

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

На правах рукописи

Максимов Дмитрий Дмитриевич



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

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 – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ АМц	12
1.1 Особенности эксплуатации элегазовых трансформаторов.....	12
1.2 Предъявляемые требования к ответственным поверхностям корпуса элегазового трансформатора.....	17
1.3 Особенности лезвийной обработки алюминиевых сплавов.....	22
1.4 Анализ методов окончательной обработки сложнопрофильных поверхностей.....	27
1.5 Магнитно-абразивная обработка.....	30
1.6 Выводы по первой главе.....	41
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	44
2.1 Анализ и обобщение существующих теоретических и экспериментальных исследований.....	44
2.2 Способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей и устройство для его осуществления.....	60
2.2.1 Схема обработки.....	60
2.2.2 Устройство для осуществления способа.....	64
2.3 Определение технологических параметров.....	68
2.3.1 Обоснование выбора порошка.....	69
2.3.2 Обоснование выбора смазочно-охлаждающей жидкости.....	73
2.3.3 Обоснование выбора сочетания рабочих движений.....	74
2.3.4 Определение диапазонов величин технологических параметров.....	76
2.4 Выводы по второй главе.....	81
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ И СЪЕМ МАТЕРИАЛА	83

3.1 Методика проведения экспериментальных исследований	84
3.2 Планирование эксперимента и разработка математических моделей.....	88
3.3 Влияние технологических параметров на шероховатость.....	93
3.4 Влияние технологических параметров на удельный съем материала.....	100
3.5 Визуальная оценка состояния сложнопрофильных поверхностей	106
3.6 Выводы по третьей главе.....	112
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТВЕРДОСТЬ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ	113
4.1 Методика проведения экспериментальных исследований	114
4.2 Оценка производительности способов окончательной обработки.....	119
4.3 Оценка твердости сложнопрофильной поверхности.....	122
4.4 Совершенствование технологического процесса обработки сложнопрофильных поверхностей корпуса элегазового трансформатора	125
4.5 Практические рекомендации по технологическому обеспечению качества сложнопрофильных поверхностей изделий из алюминиевого сплава АМц методом магнитно-абразивной обработки	127
4.6 Выводы по четвертой главе.....	129
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	133
ПРИЛОЖЕНИЕ А Планирование экспериментального исследования и его результаты	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Технические характеристики станка, приборов	149
ПРИЛОЖЕНИЕ В Патент на способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей и устройство для его осуществления	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акты о промышленном внедрении результатов диссертации	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт о внедрении результатов диссертации в учебный процесс.....	159

ВВЕДЕНИЕ

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 сложнопрофильные поверхности, сталкиваются с проблемой получения равномерной шероховатости ($R_a \geq 0,8$ мкм) обработанной поверхности.

Предприятия не обладают современными технологиями по обеспечению качества сложнопрофильных поверхностей изделий. Процесс достижения заданного качества изделия является трудоемким, занимающим значительное количество времени, так как обеспечение качества сложнопрофильных поверхностей осуществляется ручным, либо полуавтоматизированным механическим воздействием. Процесс шлифования сложнопрофильной 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.

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.

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».

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 С1), 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 $n = 115 - 750$ 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» (получен акт о внедрении результатов диссертации от 01.02.2024 г., Приложение Г), ООО «ИСО» (получен акт о внедрении результатов диссертации от 28.07.2023 г., Приложение Г), 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 (получен акт о внедрении результатов от 20.03.2024 г., Приложение Д).

Методология и методы исследований

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 ротатабельный 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 *НТ-1208*.

Положения, выносимые на защиту

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 $R_a = 0,5$ 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.

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 $n = 115 - 750$ 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 (пункты списка литературы №21, 40-47, 88, 91-92, 96), 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 (Приложение В).

Структура диссертации

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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ АМц

1.1 Особенности эксплуатации элегазовых трансформаторов

Главным признаком устойчивого экономического развития страны является развитие каждого из субъектов хозяйственной деятельности [24]. За последние годы очевидным становится влияние на хозяйственную деятельность экономических факторов, связанных с изменениями во внешней среде. Поэтому перед промышленниками становится актуальной задача создания собственных промышленных систем и комплексов, обеспечивающих стабильное развитие промышленности страны.

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.

Согласно статистике, на 2023 год около 75% населения России (110 млн. человек) живет и работает в пределах городов, при этом около трети (33,7 млн. человек) от указанного значения живет в городах-миллионниках [24]. Строительство новых промышленных предприятий в черте города является основным фактором, стимулирующим рост населения города. При этом остальные факторы – административный, курортный, туристический, не являются столь значительными.

Машиностроительная промышленность, как наиболее трудоемкая отрасль промышленности, в большей степени приспособлена к размещению предприятий в городской черте [25, 48, 87]. Это связано с близостью к сбытовым каналам продукции, квалифицированным трудовым ресурсам, безвредностью предприятий для окружающей городской среды, близостью к транспортным развязкам для большегрузного и железнодорожного транспорта.

Ограниченность городской территории, выделенной для промышленных зданий и сооружений, ставит перед нами задачу поиска решений по оптимизации пространства промышленной зоны, применению современных и компактных систем, которые способны выполнять все предъявляемые к ним эксплуатационные требования.

Рост потребностей жителей и предприятий, находящихся в черте города, влечет за собой повышение энергопотребления, в частности использование электроэнергии. Так за последние 20 лет потребление электроэнергии в России выросло более чем на 30% и достигло к 2023 г. 1230 млрд. кВт·ч [13, 16, 36]. Причем около 60% потребляемой электроэнергии приходится на промышленный сектор. Стоит отметить, что общее энергопотребление, включающее использование топливно-энергетических ресурсов, за последние 13 лет не изменилось при росте потребления электроэнергии на 30%, как говорилось выше.

Электроэнергия становится все более важным энергоресурсом не только для бытовых нужд населения, но и для промышленности. По настоящее время происходит реформирование производств, электровооружение цехов и предприятий. С 2000 годов отечественная промышленность по параметру электровооруженности выросла в 1,6 раза – это включает в себя переход на электроприводной инструмент, двигатели, приводы и пр. [36].

Повышенный спрос на электроэнергию требует строительство современных трансформаторных подстанций среднего (СН) и низкого (НН) напряжения, которые будут направлять электроэнергию в низковольтные электросети к конечным потребителям [16]. Размещение новых трансформаторных подстанций в условиях современного градостроительства проблематично, так как городское пространство насыщено инженерными сетями и различными строительными объектами, расположенными на малом расстоянии друг от друга.

Сегодня на алюминий и его сплавы приходится до 90% общей массы изделий в таких отраслях промышленности, как авиастроение, энергетическое и химическое машиностроение. Основной причиной широкого распространения алюминиевых сплавов является их сравнительные легкость, пластичность,

стойкость к коррозии и высокая электропроводность при относительно низкой себестоимости производства. Известно, что прочность чистого алюминия не отвечает современным промышленным требованиям, поэтому для изготовления изделий, предназначенных для различных отраслей промышленности, применяют не чистый алюминий, а его сплавы. При легировании алюминия различными элементами (магнием, марганцем, кремнием, медью и др.) повышаются такие его физико-механические свойства, как прочность, пластичность, коррозионная стойкость и т.д., но при этом ухудшается обрабатываемость резанием при механической обработке.

Свое применение находит новый вид трансформаторных подстанций, основным элементом которых является элегазовый трансформатор (ЭТ) (рисунок 1.1). Это объясняется высокой пожаробезопасностью за счет применения негорючих изоляционных жидкостей, а также компактными размерами. Благодаря приведенным особенностям, ЭТ становится возможно размещать под коммерческими зданиями, парками, публичными пространствами и т.д.

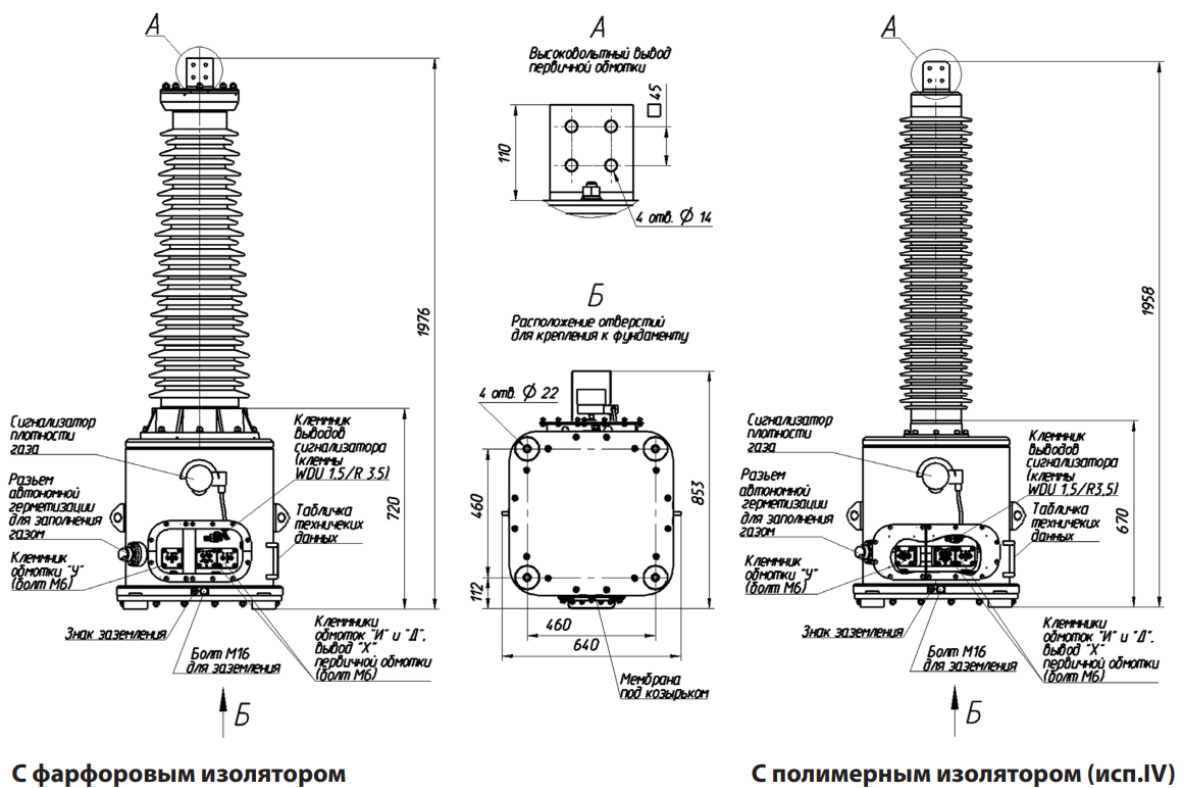


Рисунок 1.1 – Общий вид элегазового трансформатора с фарфоровым и полимерным изолятором [36]

Одними из самых сложных для механической обработки являются сплавы алюминия с марганцем (АМц) прежде всего из-за их вязкости и склонности к наростобразованию. Область применения сплавов системы АМц – производство деталей и конструкций многоцелевого назначения, одними из которых являются элегазовые трансформаторы тока. Элегазовые трансформаторы находят широкое применение на электрических подстанциях, в том числе на предприятиях минерально-сырьевого комплекса [13]. Измерительные элегазовые трансформаторы тока (рисунок 1.1) служат для передачи сигнала измерительной информации приборам учета электроэнергии, устройствам релейной защиты и управления технологическими процессами в установках переменного тока с номинальным напряжением от 110 до 500 кВ. Корпус трансформатора изготавливается из алюминиевого сплава АМц, что обуславливается балансом между электропроводимостью материала и его стоимостью. Внутри корпуса под давлением закачивается элегаз. Кривизна внутренней поверхности корпуса (канавка, остриё, угол) может способствовать возникновению самостоятельного электрического разряда в газе – коронному разряду, который приводит к выходу из строя всего трансформатора.

Приведем основные достоинства применения ЭТ (рисунок 1.2):

- пожаробезопасность и взрывобезопасность: SF_6 , используемый в качестве изоляционной и охлаждающей среды, является негорючей средой, поэтому требования к принимаемым мерам по пожаротушению в значительной мере снижаются по сравнению с силовыми трансформаторами, работающими на масле. Отсутствует необходимость в создании резервуаров, ям для сбора масла;
- компактность: благодаря тому, что для полноценной работы ЭТ не требуется консерватора и устройства для сброса давления, высота трансформаторного помещения может быть уменьшена на 2-2,5 м;
- возможность использования измерительного ЭТ совместно с распределительным ЭТ в одном помещении позволяет снизить стоимость строительства здания или сооружения.

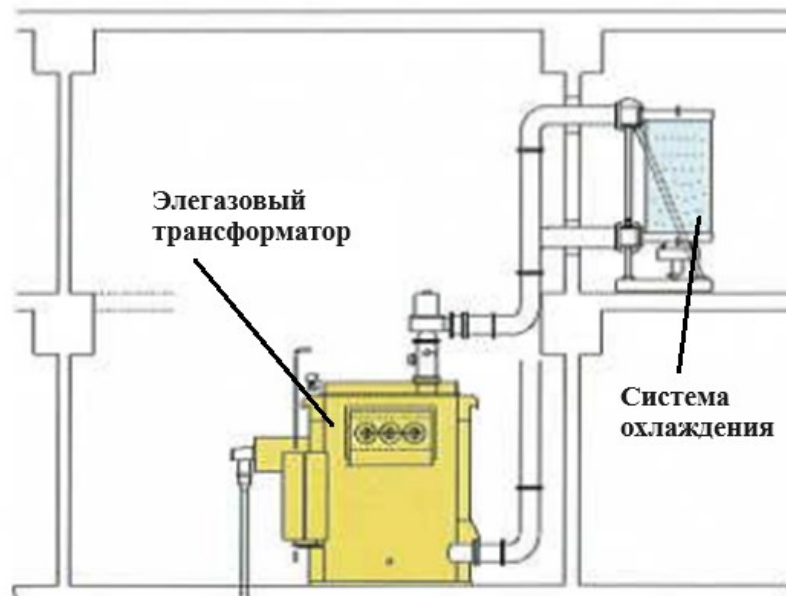


Рисунок 1.2 – Компоновка ЭТ и системы охлаждения [36]

Благодаря тому, что внутреннее давление элегаза ничтожно мало и составляет от 0,14 до 0,43 МПа, система охлаждения может устанавливаться над уровнем ЭТ, что значительно повышает возможности по компоновки трансформаторной подстанции.

Система охлаждения ЭТ может работать на воде, что широко используется в подземных трансформаторных подстанциях. Тепло, выделяемое ЭТ, эффективно переносится потоком воды в теплообменники.

Применение элегаза SF_6 в качестве изоляционной среды обуславливается его высокой электрической прочностью: при атмосферном давлении и зазоре 1 см составляет $E=89$ кВ/см, что выше, чем у трансформаторного масла [16, 32]. Элегаз отличается высокой способностью к теплоотводу, является дугогасительной средой, что позволяет отключать токи короткого замыкания больших значений при значительных скоростях восстановления напряжения.

Основной особенностью эксплуатации ЭТ является способность элегаза к разложению под действием электрического разряда. Вследствие разложения элегаза SF_6 образуются такие продукты разложения, как фториды серы SF_5 , SF_4 и фтор F , которые при реакции с кислородом O_2 и водой H_2O образуют химически активные соединения: фтороводород HF , оксид серы SO_2 , тионилфторид серы SOF_2 , тетрафторид серы SOF_4 , сульфурилфторид SO_2F_2 [16, 32]. Перечисленные

продукты разложения, а также соединения, образующиеся в результате реакции продуктов разложения с окружающей средой, реагируют с изоляционными и конструкционными материалами ЭТ, разрушая их.

Элегаз обладает высокой текучестью, благодаря чему просачивается через уплотнительные соединения.

Гетерогенная микроструктура алюминиевых сплавов обуславливает их подверженность локальной коррозии и коррозии под напряжением. Причиной высокой склонности алюминиевых сплавов к коррозии называют различие электродных потенциалов матрицы алюминия и металлических частиц, которые входят в состав сплавов. Между алюминиевыми частицами и интерметаллическими частицами формируются микрогальванические пары.

Корпус и экраны обмоток ЭТ изготавливают из алюминиевых сплавов марки АМц. Это объясняется высокой коррозионной стойкостью, малой тепло- и электропроводностью, малым удельным весом алюминиевых сплавов марки АМц.

1.2 Предъявляемые требования к ответственным поверхностям корпуса элегазового трансформатора

Особенности эксплуатации ЭТ обуславливают ряд требований к материалу деталей ЭТ, а также к ответственным поверхностям.

Корпусные детали (рисунок 1.3) и цилиндры (рисунок 1.4) ЭТ изготавливают из алюминиевого сплава АМц (таблица 1.1) с целью повышения коррозионной стойкости. Для данных деталей применяют заготовки в обычном состоянии. Экраны ЭТ (рисунок 1.5) изготавливают из заготовок в отожженном состоянии – сплав АМцМ.

Таблица 1.1 – Химический состав алюминиевого сплава марки АМц, % (ГОСТ 4784-97)

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
96,35-97,5	0,6	0,7	0,05-0,2	1,0-1,5	0,2	0,1	0,1

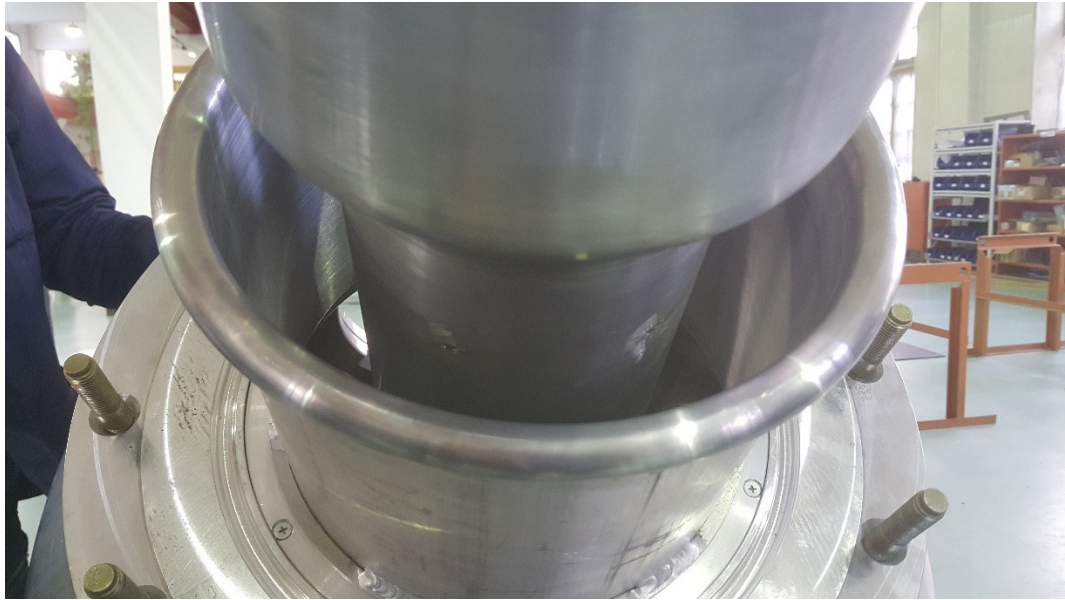
При этом к поверхностям сложнопрофильных изделий предъявляются высокие требования по шероховатости $R_a = 0,8 \dots 1,6$ мкм, что обуславливается спецификой работы элегазового трансформатора. Недостаточная шероховатость поверхности приводит к электрическим пробоям, прожигу рабочей поверхности детали, аварии, выходу элегазового трансформатора из строя [21].



Рисунок 1.3 – Корпус элегазового трансформатора

В рамках действующей технологии производства для обеспечения качества поверхности наиболее ответственной детали элегазового трансформатора - корпуса – приходится проводить значительное количество операций по его обработке, многие из которых осуществляются вручную. Основной операцией механической обработки корпуса является обработка его внутренней поверхности на токарном станке, однако необходимость обеспечения шероховатости внутренней поверхности не менее $R_a = 0,8$ мкм приводит к тому, что корпус

приходится дополнительно подвергать шабрению, так как токарная обработка обеспечивает шероховатость в диапазоне $R_a = 1,6...1,3$ мкм. Доработка сложнопрофильных поверхностей деталей ЭТ отнимает значительное количество времени и часто приводит к образованию микронеровностей на поверхности, что опять приводит к ее дополнительной доводке.



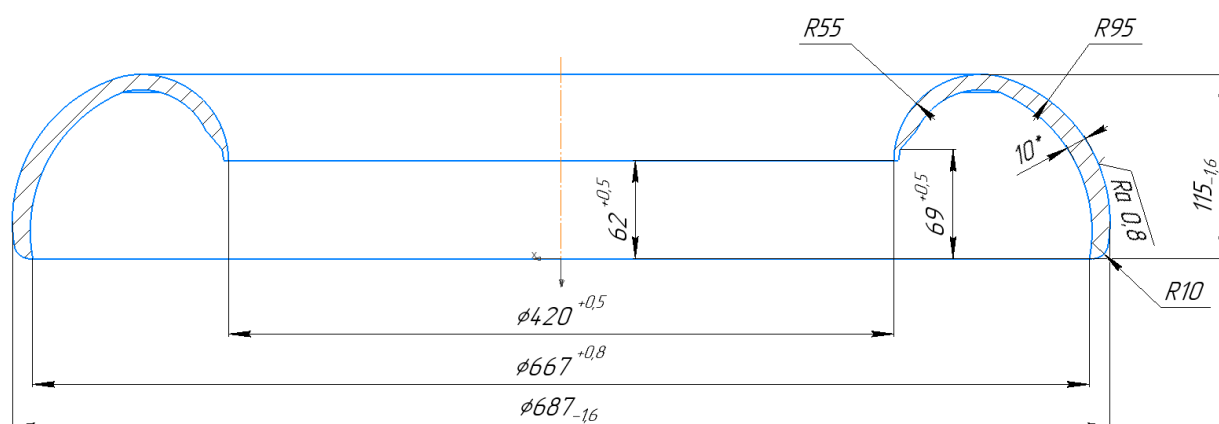
а)



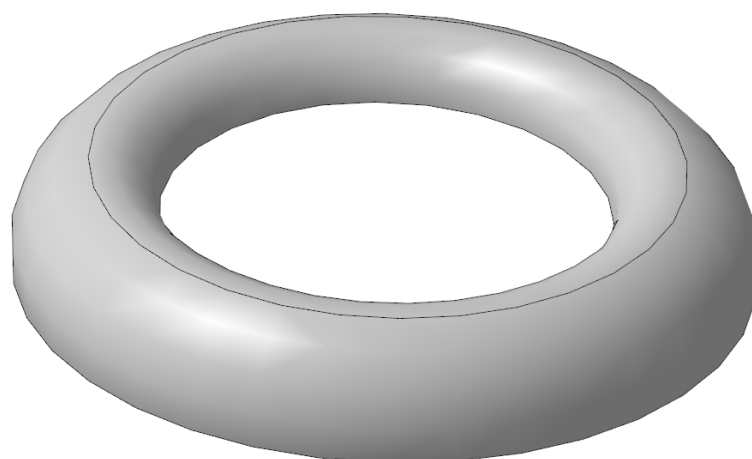
б)

Рисунок 1.4 – Цилиндры элегазового трансформатора, где:
а – в сборе; б – размерный ряд цилиндров и труб

Из этого следует, что достижение заданного качества внутренней поверхности корпуса трансформатора является трудоемким процессом с использованием в технологии ручного труда на доводочных операциях.



а)



б)

Рисунок 1.5 – Экран элегазового трансформатора, где: а – эскиз; б – модель

Помимо высоких требований по шероховатости рабочих поверхностей, к деталям элегазового трансформатора предъявляются высокие требования по соосности и круглости, которые обусловлены позиционированием деталей в сборке. Это обуславливает вскрытие отверстий деталей непосредственно в сборке, что также затрудняет технологический процесс изготовления элегазового трансформатора, так как некоторые отверстия имеют сложную геометрическую форму, должны обладать низкой шероховатостью поверхности $R_a = 0,8$ мкм. Получение таких отверстий является еще одной проблемой, встающей перед технологами, так как сложнопрофильная поверхность корпуса элегазового

трансформатора (рисунок 1.6, а) затруднительно шлифуется, так как она обладает значительными габаритными размерами. Производители могут осуществить окончательную обработку сложнопрофильной поверхности корпуса (рисунок 1.6, б) с помощью угловой шлифовальной машины с вулканитовыми дисками [21].

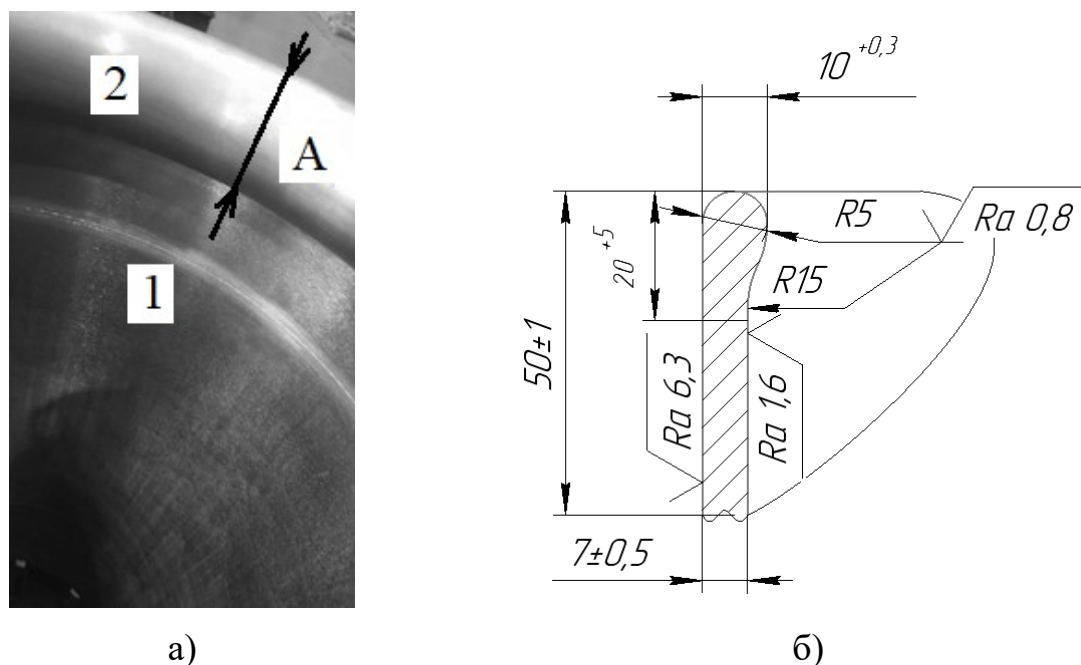


Рисунок 1.6 - Внутренняя поверхность корпуса ЭТ, где:

1 (а) – внутренняя цилиндрическая поверхность; 2 (а) – сложный профиль торца; б – эскиз профиля [21]

Рассмотрим проблему механической обработки алюминиевых сплавов и особенностей их обработки. Алюминий и алюминиевые сплавы являются одними из наиболее часто используемых легких металлических материалов, поскольку они предлагают ряд различных отличительных физико-механических свойств: малый удельный вес, высокая пластичность, коррозионностойкость, высокая электропроводность [90, 100, 102]. Кроме того, им относительно легко придавать форму, особенно при помощи механической обработки резанием [14, 20, 47]. Фактически, алюминий и его сплавы считаются легкообрабатываемыми материалами по сравнению с другими легкими материалами, такими как сплавы титана и магния [90].

Однако, известно, что легирование алюминия различными элементами, такими как магний, марганец, медь, кремний и т.д., влечет за собой изменение

обрабатываемости сплава [21, 26]. Это изменение описывается такими негативными факторами, связанными с высокой вязкостью алюминиевых сплавов, как образование нароста на передней поверхности режущего инструмента, возникновение на обработанной поверхности слоя с повышенной твердостью (наклеп), который затрудняет достижение заданного качества поверхности, приводит к перегреву, заклиниванию, поломке режущего инструмента [21, 71]. На величину нароста и наклепа влияют режимы резания, силы, возникающие в процессе резания, геометрия режущего инструмента, его стойкость.

1.3 Особенности лезвийной обработки алюминиевых сплавов

Актуальным становится решение проблем, связанных с технологическим обеспечением качества поверхностей и точности обработки, так как требования к машиностроительной продукции постоянно растут, а технологии обеспечения качества и точности требуют совершенствования, применения новых инструментов, материалов, способов и устройств [15, 21].

Алюминиевые сплавы являются труднообрабатываемыми по отношению к достижению требуемого качества поверхности по параметру шероховатости. При лезвийной обработке алюминиевых сплавов образуется элементная стружка, что объясняется высокой пластичностью и ударной вязкостью материала. Высокая теплопроводность алюминиевых сплавов приводит к тепловым деформациям при механической обработке. При лезвийной обработке на лезвии инструмента образуется нарост (рисунок 1.7), диапазон образования которого значительно расширяется за счет высокой теплопроводности алюминиевых сплавов.

Из-за высокой реакционной способности алюминия в процессе обработки на поверхности заготовки образуются окислы – тонкая оксидная пленка, которая защищает сплав от дальнейших окислительных реакций, но затрудняет адгезию при нанесении покрытий или дальнейшей сварке [79, 83]. Оксид алюминия имеет повышенную твердость по сравнению со сплавом, что приводит к повышенной изнашиваемости инструмента при обработке. Оксидная пленка образуется

неравномерно по всей обрабатываемой поверхности, имеет различную толщину, что приводит к дальнейшей неравномерной обработке изделия.

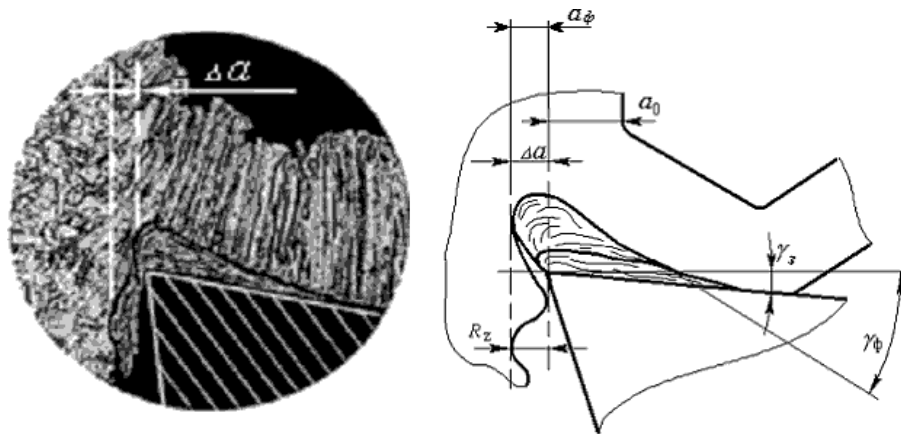


Рисунок 1.7 – Наростообразование при резании

Рассмотрим проблему механической обработки алюминиевых сплавов. Одним из важных критериев при механической обработке алюминия и его сплавов является форма стружки. При обработке алюминиевых сплавов в основном образуется сливная стружка, но она имеет различие по размеру и форме.

По сравнению со сталью алюминиевые сплавы обладают меньшей твердостью, более низким временным сопротивлением и лучшей теплопроводностью, что позволяет значительно повышать скорость резания и подачу. Поэтому процесс резания алюминиевых сплавов характеризуется высокими скоростями, сравнительно небольшими силовыми и температурными значениями и относительно малым износом режущего инструмента [14, 19, 88].

Рассматривая обрабатываемость алюминиевых материалов и сплавов по сравнению со сталью 45 необходимо отметить использование высоких скоростей резания при равной стойкости инструмента. Так, например, по многим литературным источникам [14, 25, 48] для обработки алюминиевых материалов и сплавов используют диапазон скоростей резания не ниже 90 м/мин [41].

Но при всех положительных характеристиках процесса обработки алюминиевых материалов и сплавов возникают и ряд негативных факторов, связанных с высокой вязкостью материала, что способствует формированию наростообразования по передней поверхности режущего материала. Кроме этого,

в процессе механической обработки заготовки возникают остаточные внутренние напряжения, что не позволяет достигнуть необходимого качества поверхности деталей и избежать образования на режущей кромке нароста. Затупление режущей кромки приводит к перегреву и заклиниванию инструмента, и как следствие к его поломке [41]. На степень и глубину наплавки материала влияют режимы резания, геометрия режущего инструмента, степень его затупления, т.е. все факторы, определяющие протекание пластической деформации в зоне резания [14, 15, 71].

Исследования, проведенные в работах [14, 20, 51] при обработке материалов с высокой вязкостью показали наличие нароста по передней поверхности (рисунок 1.8, а) и формирование налипания по задней поверхности (рисунок 1.8, б). Нарост по передней поверхности приводит к изменению геометрии режущей кромки и изменяет координату вершины режущей кромки инструмента. Нарост при достижении определенного значения имеет тенденцию к срыву, частицы нароста налипают на сходящую стружку, ухудшая ее равномерное скольжение по передней поверхности режущего инструмента. Другая часть нароста приводит к многократно повторяющемуся налипанию алюминиевых частиц с последующим их срывом с режущей кромки инструмента. Эта часть алюминиевых частиц, в разогретом виде скользит по обрабатываемой поверхности, приводит к формированию на ней неровностей и царапин и, соответственно, является источником ухудшения качества шероховатости поверхности изделия.

Исходя из феноменологического представления данного процесса была предложена модель формирования нароста при обработке изделия из алюминиевого сплава и изменение углов резания (рисунок 1.9) [41].

При обработке заготовки 1 с диаметром D с частотой вращения n режущим инструментом 2 образуется стружка 3, которая перемещается по наросту 4 и передней поверхности режущего инструмента со скоростью $V_{ср}$. С нароста 4 срываются алюминиевые частицы, которые попадают на обработанную поверхность заготовки 1 и изменяют ее реальный профиль. Налипающий на режущий инструмент материал создает нарост, формируя точку 5, являющуюся

координатой режущей кромки. При этом постоянно изменяются новые геометрические параметры инструмента - передний угол γ_1 задний угол α_1 .

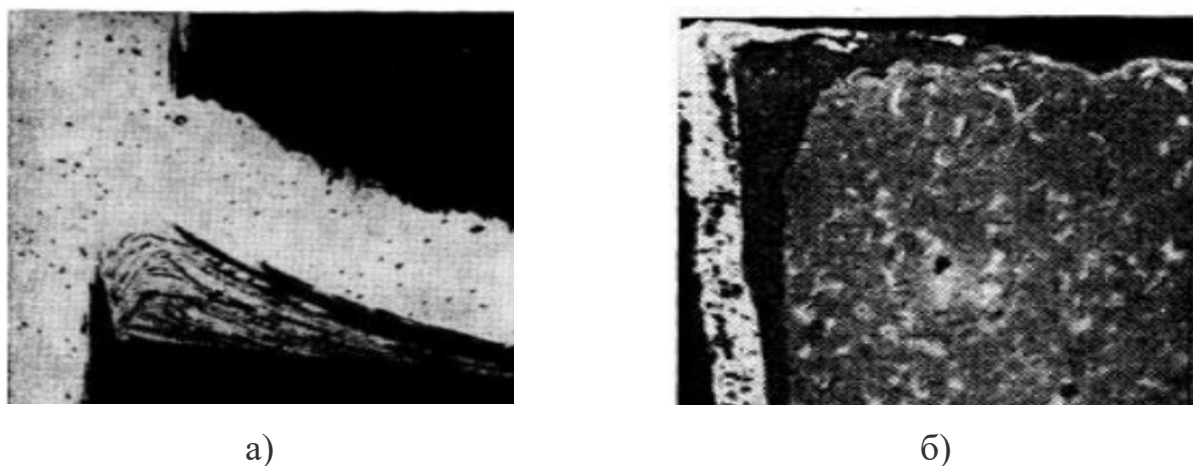


Рисунок 1.8 – Нарост, где: а – по передней поверхности инструмента; б – по задней поверхности инструмента при обработке алюминиевых сплавов [4]

В процессе формирования налипания по обработанной поверхности заготовки и образования нароста образуется слой h , который является непостоянным и подвержен многократному изменению положения координаты режущей кромки b на расстоянии от центра детали O на величину H . Если в координате режущей кромки инструмента 5 установленные геометрические параметры переднего угла γ_1 и заднего угла α_1 являются постоянными, то меняющаяся координата b в процессе обработки из-за увеличения нароста и его срыва приводит к непостоянному значению геометрических параметров переднего угла γ_2 и заднего угла α_2 [41].

При этом приращение по передней и задней поверхностям происходит неоднозначно - по передней поверхности формирование переднего угла будет находиться в пределах $\gamma_2 \pm \delta$, а по задней поверхности задний угол будет находиться в диапазоне $\alpha_2 \pm \Delta$. Они постоянно варьируются, меняют геометрию режущего инструмента, а указанная неоднозначность побуждает формирование переменной силы резания и, соответственно, формирует неустойчивый процесс резания. В свою очередь неустойчивость процесса резания приводит к ухудшению качества поверхности обрабатываемой заготовки.

Исследования, проведенные в работах [14, 20, 51] позволили установить, что задний угол инструмента оказывает незначительное влияние на силовые характеристики, а увеличение переднего угла приводит к уменьшению силы резания, что в целом приводит к уменьшению амплитуды колебаний при резании. Такая неоднозначность амплитудных значений приводит к циклическому формированию качества поверхностного слоя и шероховатости поверхности [41].

Проведенные исследования по влиянию скорости резания на величину шероховатости поверхности при обработке изделия из алюминиевых сплавов при различных значениях передних углов инструмента (10° и 15°) позволили установить, что на малых скоростях резания с передним углом инструмента равным 15° шероховатость ниже, чем при обработке с передним углом инструмента равным 10° .

При высоких скоростях значения передних углов инструментов в диапазоне $10...15^\circ$ заметного различия на шероховатость поверхности не оказывает.

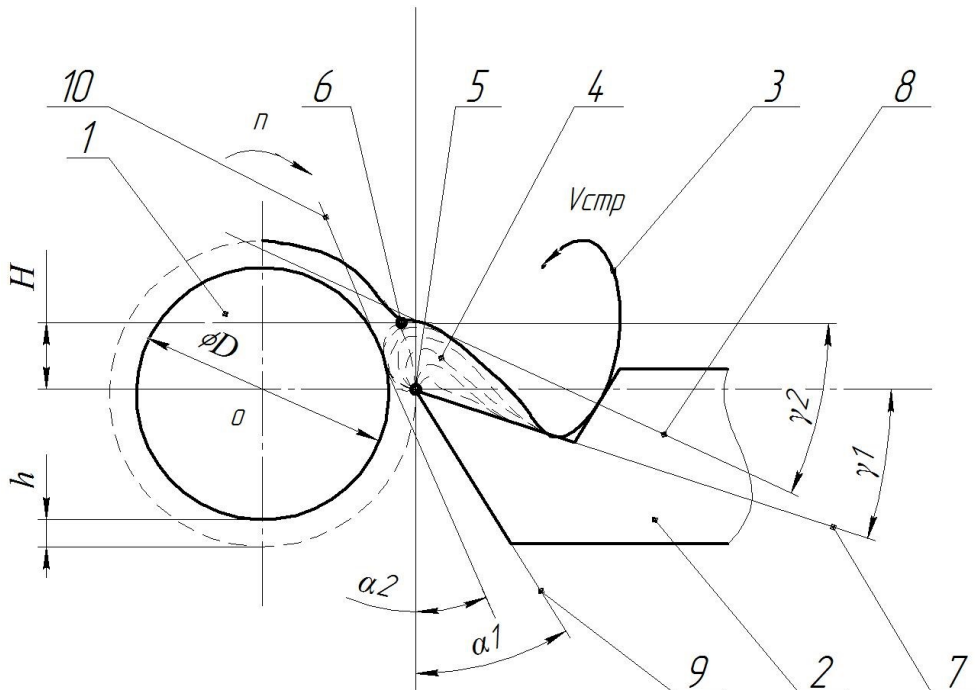


Рисунок 1.9 - Модель формирования образования нароста при обработке заготовок из алюминиевых сплавов с учетом изменения углов резания

1.4 Анализ методов окончательной обработки сложнопрофильных поверхностей

Существует ряд методов окончательной обработки, обеспечивающих необходимые физико-механические свойства, шероховатость, твердость поверхности [7, 9, 10]. Особую применимость нашли методы механической обработки поверхностей, которые за счет своей универсальности и адаптивности зачастую бывают единственно возможными в применении на предприятии [15].

Способы окончательной обработки поверхностей разделяют на механические, немеханические и комбинированные [7, 23, 28]. При этом уровень автоматизации перечисленных методов окончательной обработки на текущий момент не достиг уровня автоматизации, например, лезвийных методов обработки. Окончательная обработка необходима для обеспечения двух параметров качества поверхности – физических и геометрических [65, 69].

Материал изделия, функциональное назначение поверхности, возможности производства, а также технология обработки изделия значительно влияют на выбор метода окончательной обработки. На рисунке 1.10 приведем схему классификации основных методов окончательной обработки.



Рисунок 1.10 – Классификация методов окончательной обработки по способу их осуществления [7]

Наибольшее распространение получили методы абразивной обработки и электрохимического полирования. Указанные методы универсальны, так как могут использоваться как при размерной, так и безразмерной обработке. В связи с тем, что электрохимические методы тесно связаны с загрязнение окружающей среды, химическим травлением, наиболее широкое применение в качестве метода окончательной обработки получает абразивная обработка [12, 15].

Схема классификация способов абразивной обработки приведена на рисунке 1.11.

При абразивной обработке применяют инструменты на жесткой связке: круги, бруски, ленты [12]. Помимо инструмента на жесткой связке производители применяют инструмент без жесткой связки, представляющий собой порошки, пасты [7, 17].

Применение шлифования в качестве способа окончательной обработки поверхностей простой и сложной формы нашло широкое применение. Шлифование является высокопроизводительным способом окончательной обработки – скорость абразивных кругов может достигать до 50 м/с, а шероховатость обработанной поверхности может быть обеспечена на уровне $R_a = 0,08 - 1,25$ мкм [22].



Рисунок 1.11 – Способы абразивной обработки [7]

К недостаткам шлифования относят высокую температуру, возникающую в результате интенсивного трения инструмента и заготовки. В поверхностных слоях металла возникают упругопластические деформации, а в приповерхностном слое могут происходить структурные превращения. Возникают прижоги, задиры, напльвы, происходит шаржирование, появляются микротрещины. Все перечисленные дефекты, которые возможно обнаружить способами визуального контроля обработанной поверхности, являются концентраторами напряжений, в последствии с этих мест начинаются разрушения изделия при его эксплуатации.

Исходя из перечисленных особенностей обработки алюминиевых сплавов в качестве метода окончательной обработки предлагается рассмотреть различные методы абразивной обработки [85, 88]. При текущем техническом прогрессе у широкого спектра предприятий появилась острая потребность в таком способе окончательной обработки поверхности заготовки, который обеспечит низкую шероховатость поверхности R_a до 0,8 мкм [7]. Существует ряд способов окончательной обработки поверхности заготовки, связанных с применением абразивов: абразивная обработка, обработка с использованием в качестве абразива магнитнореологической жидкости и магнитно-абразивная обработка с использованием магнитно-абразивного порошка (далее МАП) [8, 21].

Особое внимание следует уделить процессу шлифования алюминиевых сплавов. Ввиду скорого засаливания абразивных инструментов в процессе шлифования значительно снижается эффективность инструмента, производительность обработки, качество обработанной поверхности. В процессе шлифования не удается достичь однородности поверхностного слоя, так как происходят микроразрушения, выхваты, задиры, наблюдается шаржирование. Внедренные в обрабатываемую поверхность инородные объекты (абразив) являются концентраторами напряжений, неприемлемы при сварке. Высокая температура в зоне шлифования (свыше 300°C) становится причиной изменений в поверхностном слое, а так как обеспечение равномерности обработки при шлифовании является трудной задачей, то в результате обработки на

обработанной поверхности возникают зоны с различными физико-механическими свойствами [41, 44].

Таким образом, становится очевидной необходимость в применении такого способа окончательной обработки поверхностей изделий из алюминиевых сплавов, который обеспечит низкую температуру в зоне обработки, равномерные физико-механические свойства по всей обработанной поверхности.

1.5 Магнитно-абразивная обработка

Особое внимание стоит уделить процессу магнитно-абразивной обработки (далее МАО), так как он способен обеспечить шероховатость поверхности R_a до 0,01 мкм, температура в зоне обработки не превышает 80°C, а магнитно-абразивный инструмент (далее МАИ) и магнитное поле обеспечивают перемешивание абразивных частиц в процессе обработки, что существенно повышает производительность обработки и эффективность инструмента [21, 22, 30].

В основе МАО лежат явления магнитного поля и магнитной индукции, которая является силовой характеристикой магнитного поля. Магнитное поле может создаваться постоянными магнитами или электромагнитами, которые располагаются друг относительно друга в порядке, зависящем от применяемого способа МАО [45, 62].

Магнитное поле необходимо для формирования и удержания магнитно-абразивной щетки на рабочих полюсах магнитно-абразивной установки, действия магнитной индукции на магнитные частицы МАИ, за счет которого формируются тангенциальная F_t и нормальная F_n силы, действующие на абразивные частицы [105]. При соприкосновении и прижимании абразивной частицы, удерживаемой магнитными частицами, с поверхностью заготовки за счет действия нормальной силы F_n , она царапает поверхность заготовки за счет действия тангенциальной силы F_t , производя сьем материала [21, 65, 66]. Таким образом происходит формирование качественного поверхностного слоя детали (рисунок 1.12).

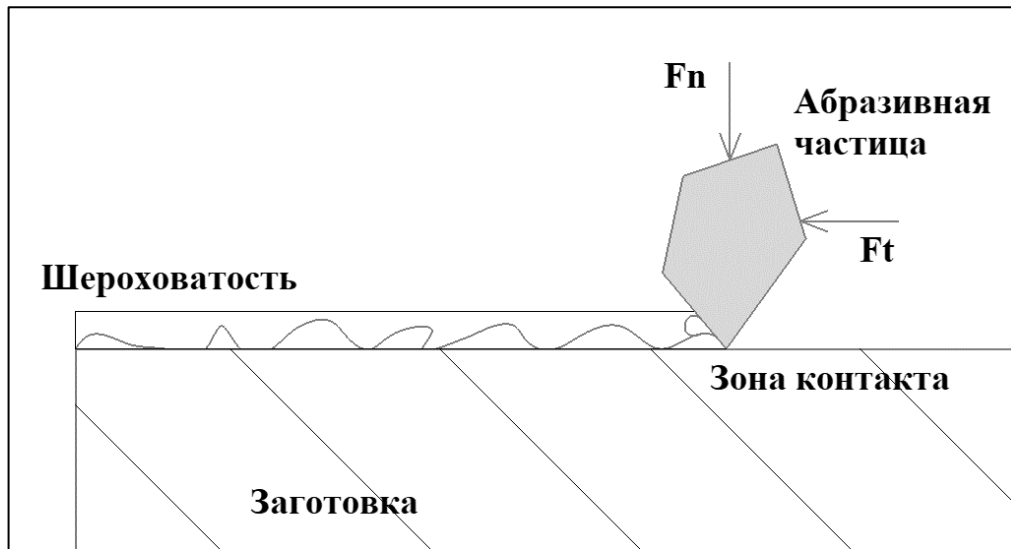


Рисунок 1.12 – Схема воздействия абразивной частицы на поверхность заготовки, где: F_n – нормальная сила; F_t – тангенциальная сила

Механизм формирования МАИ – это сложная система, поэтому при расчете сил, действующих на абразивную частицу, исследователями процесса MAO принято придерживаться некоторых допущений [93, 96]. Во-первых, все абразивные и магнитные частицы представляют собой объекты сферической формы, одинаково сориентированные относительно поверхности заготовки. Во-вторых, диаметр частиц одинаков и постоянен для всех частиц одного типа, частицы располагаются друг относительно друга без пустот. В-третьих, плотность магнитного потока распределяется равномерно по всему рабочему пространству [99, 100].

Широкое распространение получили порошки, полученные на основе железа и оксида алюминия Al_2O_3 . Ряд работ, посвященных исследованию процесса MAO с использованием таких порошковых материалов, показал высокую производительность процесса обработки и эффективное снижение шероховатости [1, 2]. При обработке магнитных и немагнитных заготовок достигается снижение шероховатости поверхности R_a на 83% [1, 10]. При обработке алюминиевых и магниевых сплавов высокую эффективность показали спечённые порошки, содержащие в качестве абразивной составляющей композит Fe_3O_4/ZrO_2 [3, 9, 11]. При обработке немагнитных алюминиевых сплавов достигается шероховатость R_a 0,096 мкм, снижение шероховатости составляет не

менее 76% [4, 12]. Опыт обработки методом MAO алюминиевой керамики показал достижение шероховатости поверхности R_a 0,0106 мкм [5]. Высокую эффективность по критерию снижения шероховатости показали спеченные порошковые материалы с алмазной абразивной составляющей [6, 7, 13]. При использовании в технологии MAO данных порошков достигается шероховатость поверхности R_a 0,1 мкм [96]. При этом ряд исследований указывает на высокую стоимость данных порошковых материалов.

Многие исследователи отмечают высокую эффективность в технологии MAO спеченных материалов, содержащих карбид титана $Fe-TiC$. Данные порошки способны обеспечить достижение шероховатости R_a 0,10-0,05 мкм, показывают производительность и срок службы на уровне спеченных материалов на основе оксидов алюминия. Ввиду высоких технологических свойств порошка-инструмента $Fe-TiC$ по критериям производительность и достижимая шероховатость поверхности, данный материал получил широкое распространение в технологии MAO и часто используется в качестве порошка-эталона при исследовании свойств новых ферромагнитных абразивных порошков.

К недостаткам порошков, получаемых методом спекания, следует отнести их невысокую производительность, так как процесс резания происходит только при контакте абразивного зерна с материалом заготовки, в то время как в предлагаемых борированных порошках режущей частью является вся поверхность каждой частицы, что обеспечивают повышение производительности магнитно-абразивной обработки [96]. Разница в механизмах резания двух типов ферромагнитных порошков хорошо продемонстрирована на рисунке 1.13.

Концепция создания новых диффузионно-легированных порошковых материалов заключается в создании на поверхности частиц порошка оболочки, обладающей высокой твердостью. В качестве исходной основы используется железный порошок с высокими магнитными свойствами, частицы которого, насыщаясь элементами, создающими твердые фазы.

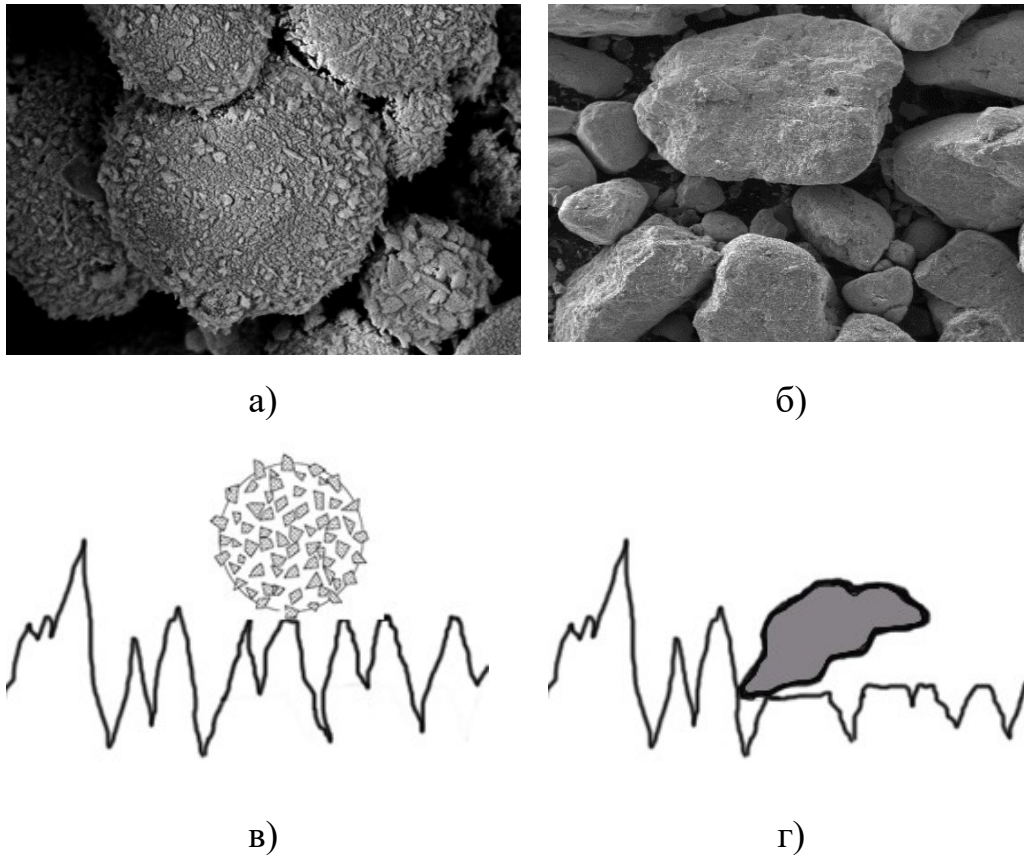


Рисунок 1.13 - Внешний вид порошка спеченным порошковым материалом (а) и диффузионно-легированным порошковым материалом (б) и схема резания микронеровностей детали (в, г) [96]

Борированные порошковые материалы (рисунок 1.14) получают путем нагрева и выдержки в герметичном контейнере смеси, состоящей из исходного железного порошка и насыщающие среды – карбида бора B_4C . Герметичный контейнер нагревали до температуры $900-950^{\circ}C$, выдерживали в течение 3 часов и охлаждали на воздухе. В результате такой химико-термической обработки на каждой частице железного порошка образуется оболочка, стоящая из двух твердых фаз – Fe_2B и FeB . На рисунке 1.14 показана микроструктура частицы борированного железного порошка (а) и распределение твердости по сечению от края к центру частицы (б).

Как видно из графика на рисунке 1.14, б, твердость поверхности борированных частиц порошка составляет $1900-1950\text{ HV}$. Такая твердость характерна для фазы FeB , фазовый анализ это подтверждает. Снижение твердости

на расстоянии 15 мкм от края частицы до 1400-1250 HV обусловлено переходом фазы FeB в фазу Fe_2B .

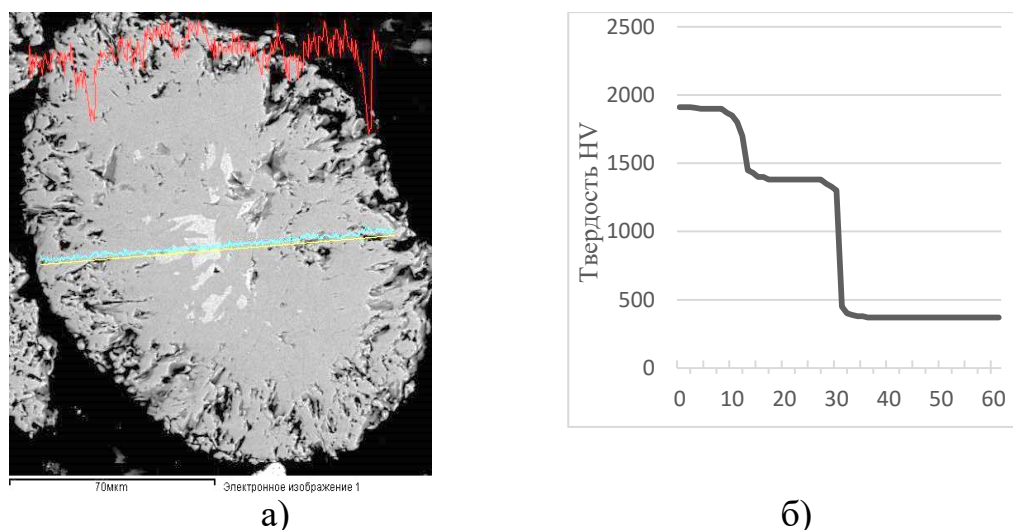
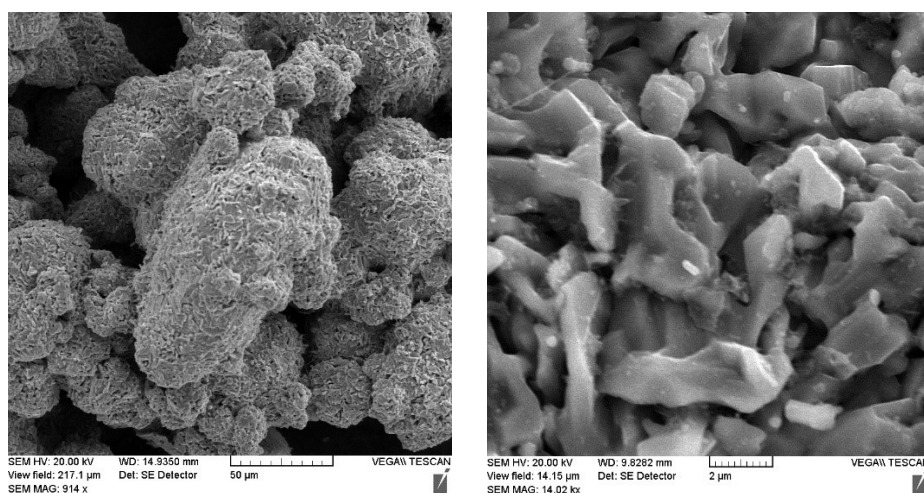


Рисунок 1.14 - Микроструктура частицы борированного железного порошка (а) и распределение твердости по сечению от края к центру частицы (б) [96]

Данная фаза менее твердая, но также менее хрупкая, что важно при использовании данных порошков в технологии MAO. Твердость ядра соответствует твердости исходного материала – железного порошка. Такая структура частиц порошка позволяет получить качественный ферромагнитный порошковый материал для магнитно-абразивной обработки. Твердая поверхность частиц, сравнимая по твердости с оксидом алюминия Al_2O_3 , обеспечивает эффективное микрорезание обрабатываемого материала. Сердцевина, имеющая низкую твердость, обеспечивает релаксацию ударов и высоких контактных нагрузок. Исследования топографии поверхности борированных частиц порошка показали наличие игольчатой структуры высокоборидной фазы FeB (рисунок 1.15). Такая топография поверхности обеспечивает высокое удельное давление на поверхность детали вследствие малой площади контакта порошка с обрабатываемой поверхностью – контакт происходит по вершинам игл высокоборидной фазы FeB .

К особенностям таких порошковых материалов относится также самозатачивание порошка-инструмента. При разрушении частиц порошка – в процессе MAO это происходит непрерывно – каждая частица порошка поворачивается вдоль силовых магнитных линий осью, имеющую наибольшую

длину. Так как в диффузионно-борированных порошковых материалах каждая частица имеет твердую оболочку, при разрушении частиц порошка твердая оболочка сохраняет свои режущие свойства. Это свойство выгодно отличает диффузионно-легированные ферромагнитные абразивные материалы от спечённых МАП, так как спеченные материалы быстро теряют свои режущие свойства: при разрушении частиц порошка абразивные зерна отделяются от магнитного ядра и в дальнейшем не участвуют в процессе резания. Высокая площадь твердой фазы диффузионно-борированных МАП обеспечивает рост производительности процесса MAO в сравнении с распространёнными в данной технологии спеченными ферромагнитными абразивными материалами [96].



а)

б)

Рисунок 1.15 - Топография поверхности частиц диффузионно-борированного ферромагнитного абразивного порошка: а – $\times 100$; б - $\times 1000$

При изготовлении диффузионно-легированных порошковых материалов имеется возможность точно управлять толщиной диффузионной оболочки путем регулирования времени выдержки порошка в насыщающей среде при высокой температуре. Изменение времени выдержки в печи при температуре 900-950°C от 0,5 часа до 5 часов позволяет получать частицы порошка с толщиной твердой фазы от 5 мкм до 200 мкм. Это дает возможность управлять как режущими свойствами, так и магнитными свойствами порошка, так как боридные фазы железа FeB и Fe_2B имеют существенно меньшую магнитную проницаемость в

сравнении с железом исходного порошка. Такая технология позволяет прогнозировать свойства МАП.

Для оценки эффективности новых ферромагнитных абразивных материалов по критерию производительности проводились исследования скорости съема металла при магнитно-абразивной обработке с использованием диффузионно-борированных порошковых материалов и наиболее распространенного и эффективного спеченного порошка на основе железа и карбида титана $Fe-TiC$, в качестве заготовки использовали сталь твердостью 45 HRC . Результаты исследований показали, что максимальную производительность магнитно-абразивной обработки 25 мг/мин обеспечил диффузионно-борированный порошковый материал с двумя фазами FeB и Fe_2B на поверхности, более низкая производительность 17 мг/мин у однофазного Fe_2B борированного порошка, однако, и она в два раза превышает производительность спеченного порошка $Fe-TiC$ [96].

Полученные результаты хорошо согласуются с исследованиями твердости поверхности исследуемых материалов – максимальную производительность показал борированный порошок с максимальной твердостью поверхности – 1950 HV . Меньшая производительность процесса магнитно-абразивной обработки с использованием спеченного материала обусловлена малой площадью режущей части частиц порошка, так как в этом порошке абразивные зерна равномерно распределены по всей поверхности железного ядра, а у диффузионно-легированных порошков вся поверхность частицы является абразивной частью.

Таким образом, новые борированные порошковые материалы оказались эффективнее спеченных порошковых материалов по критерию производительности процесса МАО. Исследования шероховатости обработанной поверхности показали, что при использовании диффузионно-борированного порошков фракции 15-25 мкм достигается шероховатость поверхности в диапазоне R_a 0,05...0,01 мкм, а срок службы порошка-инструмента увеличивается в 6-10 раз [96].

Следует отметить, что плотность магнитного потока и равномерность магнитного поля являются одними из ключевых факторов, влияющих на формирование качественного поверхностного слоя. Распределение магнитного поля в зоне обработки определяет форму и жесткость МАИ [79, 82]. Характеристиками магнитного поля в рабочем зазоре являются плотность и величина магнитного потока, его градиент. Они зависят от формы, размера, материала, из которых выполнены рабочие полюса, напряжения или тока, подаваемого на катушки, и взаимного расположения рабочих полюсов относительно друг друга [84].

Магнитный поток воздействует на абразивную частицу посредством приложения магнитной силы к магнитным частицам, которые удерживают абразивную частицу. За счет этого воздействия формируются нормальная сила F_n и тангенциальная сила F_t , которые отвечают за вдавливание абразивной частицы в заготовку и сьем материала. Схематично магнитные потоки, которые возникают в рабочем зазоре при обработке сферической поверхности плоским индуктором, состоящим из последовательно чередующихся постоянных магнитов и полюсов, изображены на рисунке 1.16.

Формирование магнитного поля может происходить за счет собственной энергии постоянных магнитов, так и за счет энергии электрического тока, который подается на катушку индуктивности [25]. Следует отметить, что при обоих вариантах формирования магнитного поля, режущим инструментом является МАП, а площадка, на которой он находится, называется полюсом [26]. Различная полярность полюсов создает магнитное поле, которое имеет линии магнитной индукции и эквипотенциальные линии [22, 24].

На каждую из ячеек, состоящих как из магнитных, так и ферромагнитных частиц, действуют силы магнитного поля. В теории МАО, принято считать, что сила магнитно-абразивной массы в магнитном поле F имеет две составляющие – силу F_x , действующую вдоль линий магнитной индукции, и силу F_y , которая действует вдоль эквипотенциальных линий [19-21].

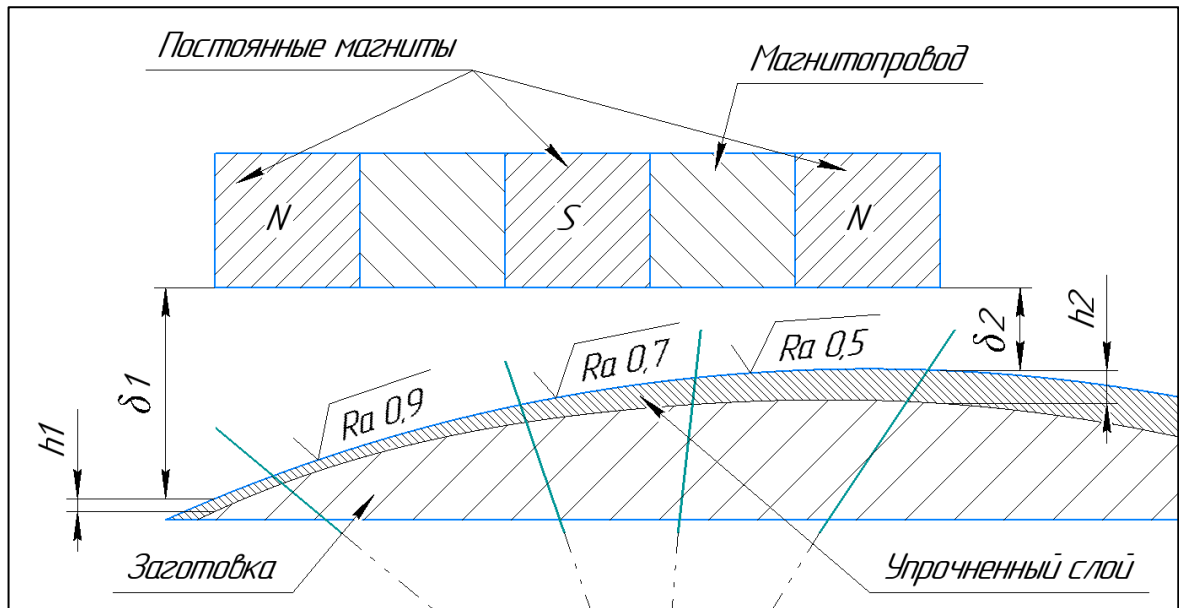


Рисунок 1.16 –Изменение глубины наклепа и шероховатости при обработке заготовки сферической формы на установке с плоским индуктором, где:

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

Сила F_x направлена вдоль обрабатываемой поверхности и заставляет ферромагнитные зерна, а вместе с ними и магнитное зерно, проходить по обрабатываемой поверхности, производя снятие материала. Сила F_y направлена перпендикулярно силе F_x и заставляет абразивное зерно внедряться в поверхность заготовки. Силы F_x и F_y описываются уравнением (1.1):

$$F_x = V_\chi \frac{dH}{dx}; F_y = V_\chi \frac{dH}{dy}, \quad (1.1)$$

где V – это объем МАП (m^3), χ – это магнитная проницаемость МАП; $\frac{dH}{dx}$ и $\frac{dH}{dy}$ – это скорости изменения напряженности магнитного поля вдоль осей x и y соответственно.

Результирующая сила F описывается уравнением (1.2):

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = V_\chi \sqrt{\left(\frac{dH}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dH}{dy}\right)^2}, \quad (1.2)$$

Из уравнения (1.2) видно, что напряженность магнитного поля, а также количество МАП и её свойства являются ключевыми параметрами, влияющими на результирующую силу МАП в магнитном поле.

Известно, что одним из технологических параметров МАО является величина рабочего зазора – расстояние от рабочей поверхности полюсного наконечника до обрабатываемой поверхности заготовки [15, 18]. При обработке сложнопрофильных поверхностей полюсами с плоскими рабочими поверхностями величина рабочего зазора будет изменяться по всему профилю обрабатываемой поверхности [13, 15]. Отсюда следует, что будет изменяться объем МАП V , который определяет результирующую силу F , согласно уравнению (1.2).

Изменение объема МАП V негативно скажется на качестве обработанной поверхности, приведет к неравномерности обработки сложнопрофильной поверхности.

Таким образом, преимуществами МАО по сравнению с остальными способами окончательной обработки являются [86]:

- низкая температура в зоне обработки – до 80°C;
- перемешивание МАП в процессе обработки, обеспечивающее включение в обработку ранее не задействованных абразивных зерен;
- процесс обработки может происходить с различной величиной давления абразивного зерна на поверхность за счет изменения величины тока, подаваемого на катушки индуктивности или предварительного подбора постоянных магнитов.

В настоящее время процесс МАО нашел широкое применение при обработке деталей простых форм – плоскостей, тел вращения с простым профилем [40]. При МАО деталей, имеющих сложную форму (газотурбинные лопатки, экраны и корпуса трансформаторов, спецарматура и др.) наблюдается неравномерный рабочий зазор по обрабатываемому профилю – снижается возможность контролировать процесс обработки, динамическую составляющую воздействия зерна на поверхность [80].

Невозможность контролировать воздействие зерна на поверхность объясняется также возникновением «слепых зон», в которых МАП застаивается, не перемешивается. Основной рабочий слой порошка, участвующий в обработке,

засаливается, снижается эффективность обработки, не обеспечивается достаточная прижимная сила [33].

Таким образом, на обработанной поверхности образуются зоны с различным качеством, физико-механическими свойствами [29].

Представляет интерес рассмотрение возможности создания такого способа МАО, который обеспечит равномерное качество сложнопрофильных поверхностей за счет перемешивания порошка в процессе МАО [31].

На основе проведенного анализа научных источников и международного опыта обеспечения заданного качества сложнопрофильных поверхностей изделий посредством МАО можно выделить несколько проблем, возникающих при указанной обработке:

- на данный момент не существует устройства и способа МАО, при котором будет обеспечен постоянный рабочий зазор между заготовкой и постоянным магнитом/магнитным полюсом;
- процесс математического и компьютерного моделирования МАО является трудоемким, поэтому исследователи находятся в поиске оптимального метода моделирования, способного обеспечить качественное прогнозирование параметром обработанной поверхности и процесса МАО;
- выбор абразивного материала, способного обеспечить необходимый съем и взаимодействие с магнитным полем, ограничен существующей выборкой МАП, поэтому зачастую исследователи вынуждены самостоятельно разрабатывать МАП для своих исследований;
- оптимизация процесса МАО является достаточно трудозатратной, так как процесс имеет от 3 до 8 изменяемых технологических параметров;
- не установлена корреляция между технологическими параметрами и качественными параметрами обработанной поверхности, способная быть универсальной для разных видов заготовок из различных материалов.

1.6 Выводы по первой главе

В результате проведенного анализа были сделаны следующие выводы:

1. Технологические требования, предъявляемые к выпускаемой промышленностью продукции, обуславливают проведение исследований в области применения новых способов обработки материалов, которые будут способны обеспечивать эти требования. При эксплуатации ответственных изделий, работающих в условиях воздействия газовых, гидравлических потоков, высоких температур и разрушающей среды агрессивных химических сред, происходит их преждевременное разрушение.

2. В настоящее время обеспечение необходимого качества поверхности или части изделия является ключевым требованием при механической обработке. Окончательная обработка изделия существенно влияет на технические, производственно-технологические и эксплуатационные показатели качества изделия.

3. На данный момент производители высоковольтной аппаратуры сталкиваются с проблемой обеспечения шероховатости сложнопрофильных поверхностей, предприятия не обладают современными технологиями.

4. Процесс достижения заданного качества изделия является трудоемким, занимающим значительное количество времени. Алюминий и алюминиевые сплавы являются одними из наиболее часто используемых легких металлических материалов.

5. Образование нароста на передней поверхности режущего инструмента, возникновение на обработанной поверхности слоя с повышенной твердостью – основные проблемы при обработке алюминия.

6. Значительно меньшее внимание уделяется процессу МАО деталей со сложной пространственной формой, недостаточно изучено распределение магнитного поля между полюсным наконечником и фасонной поверхностью; не выявлены зависимости качества обработанной сложнопрофильной поверхности от величины рабочего зазора, отсутствуют методики расчета и назначения

технологических параметров процесса, технологическое оснащение для проведения МАО на станках.

На основании сформулированных выводов, ставится цель и задачи исследования.

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 МАО 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 предлагаемого способа МАО сложнопрофильной поверхности на производительность обработки и твердость по всему обработанному профилю. Провести сравнение производительности предлагаемого способа МАО и шлифования сложнопрофильной поверхности.

6. Предложить практические рекомендации по выбору способа МАО сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава АМц и подбору значений технологических параметров МАО, позволяющих обеспечить равномерную шероховатость поверхности.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

2.1 Анализ и обобщение существующих теоретических и экспериментальных исследований

В настоящее время МАО сложнопрофильных поверхностей осуществляется двумя основными методами, в основе которых находится механизм формирования сил магнитной индукции: электрический ток и постоянные магниты.

Формирование МАИ, возможно за счет создания достаточной величины магнитной индукции [27]. Магнитное поле может быть создано магнитными системами, которые питаются:

- постоянным током;
- знакопеременным или пульсирующим током;
- трехфазным знакопеременным или пульсирующим током;
- на основе постоянных магнитов.

Наибольшее применение находят магнитные системы на основе действия постоянного тока и с использованием постоянных магнитов.

Основными достоинствами систем, работающих на постоянном токе, является возможность достаточно простого и быстрого регулирования величины магнитной индукции, создаваемой в рабочем зазоре, за счет изменения величины тока, протекающего по катушкам индуктивности. К недостаткам отнесем достаточно сложную переналадку системы под обрабатываемый профиль, имеющий сложную пространственную форму [38,62].

Одним из основных условий равномерной МАО является постоянство рабочего зазора по всему обрабатываемому профилю [40,46]. В случаях применения магнитных систем на основе действия переменного или постоянного тока в качестве рабочих поверхностей, на которых формируется МАИ, выступают плоские полюсные наконечники [43]. Таким образом, равномерность рабочего зазора соблюдается только в случаях обработки цилиндрических и плоских поверхностей изделий.

Известно, что в процессе МАО взаимодействие абразивных и магнитных частиц с обрабатываемой поверхностью происходит не отдельными зернами, а группами зерен (рисунок 2.1). Группы зерен принимают вид вытянутых конусов, вершины которых стремятся к части магнита с противоположной полярностью [11]. На равном удалении от двух полюсов формируется подвижная масса, которая легко поддается перемещению. Конусообразные формирования менее подвижны, стремятся принять свою первоначальную форму при попытке их деформации.

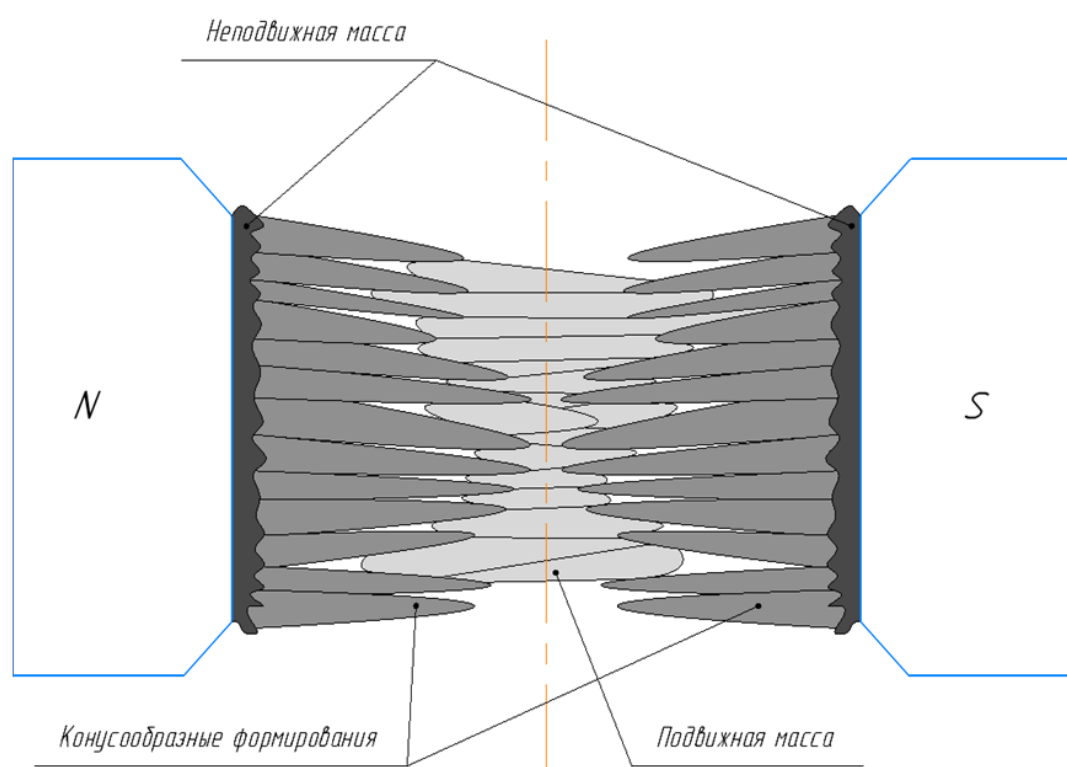


Рисунок 2.1 – Распределение масс в свободном рабочем зазоре

На рисунках 2.2 и 2.3 представлено распределение объемов подвижной и неподвижной масс при МАО относительно точек вдоль средней линии рабочего зазора при использовании плоских полюсных наконечников.

В серии предварительных экспериментальных исследований в качестве заготовки использовался сфероид, расположенный на стержне. Материал заготовок – коррозионностойкий алюминиевый сплав марки АМц.

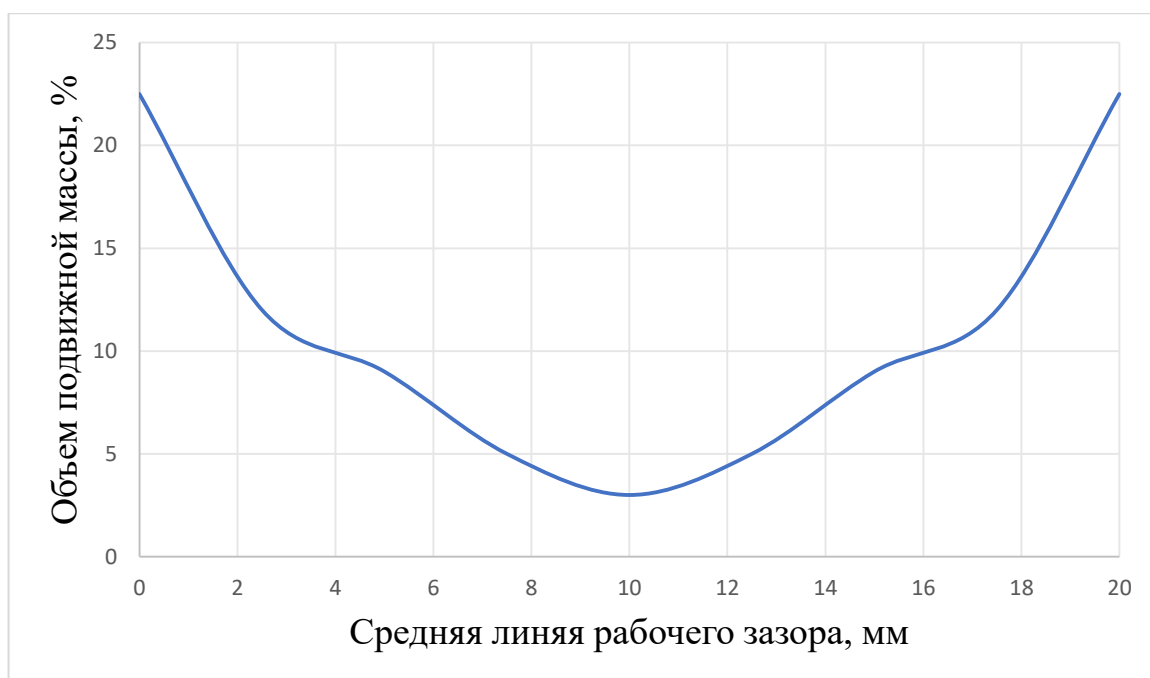


Рисунок 2.2 – Объем подвижной массы относительно точек вдоль средней линии рабочего зазора

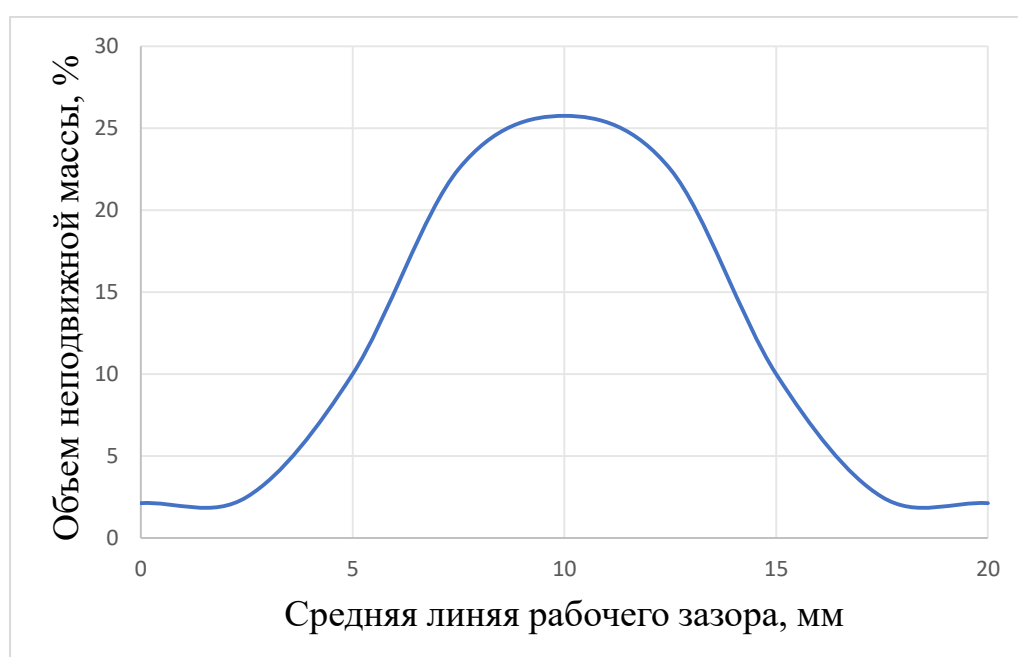


Рисунок 2.3 – Объем неподвижной массы относительно точек вдоль средней линии рабочего зазора

Экспериментальные исследования проводили на установке для магнитно-абразивной обработки (рисунок 2.4), разработанной доцентом кафедры машиностроения, к.т.н. Кексиным А.И.



Рисунок 2.4 – Процесс МАО сфероида на установке с плоскими полюсными наконечниками на базе фрезерного станка

Параметры обработки: время обработки t – 12 мин; магнитная индукция B – 0,8 Тл; подача S – 50 мм/мин; частота вращения n – 360 мин⁻¹, масса МАП m – 180 г; рабочий зазор δ – от 2 мм.

В процессе проведения экспериментальных исследований установлено, что при МАО сфероидов между двумя плоскими полюсами масса порошка распределяется неравномерно [43, 46]. Несмотря на достаточную величину магнитной индукции, МАП недостаточно прилегает к обрабатываемой поверхности. Нижняя часть сфероида обрабатывается менее интенсивно, так как под действием силы тяжести МАП отходит от обрабатываемой сложнопрофильной поверхности (рисунок 2.5).

Проведены измерения шероховатости сложнопрофильной поверхности до и после МАО (рисунок 2.6). Верхняя часть сфероида после МАО имеет шероховатость $R_a=0,785$ мкм, а нижняя часть сфероида $R_a=0,995$ мкм. Разница в шероховатости 0,210 мкм двух частей одной поверхности является неприемлемой.

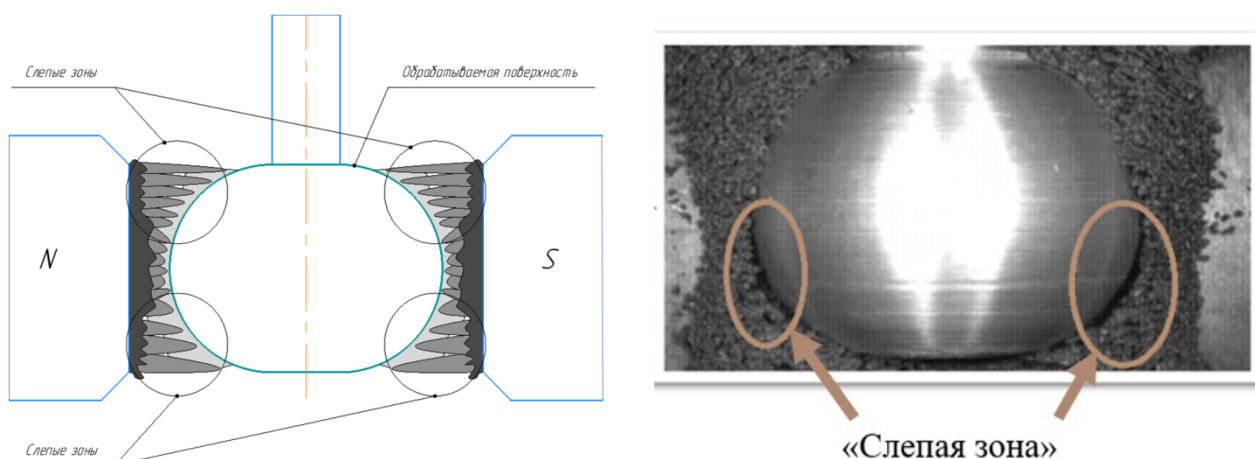


Рисунок 2.5 – Возникновение «слепых зон» в процессе МАО сфероида на установке с плоскими полюсными наконечниками

Отсюда следует, что в результате МАО между двумя плоскими полюсными наконечниками возникают «слепые зоны», в которых интенсивность обработки существенно отличается от остальных зон обработки [42].

Вследствие различного рабочего зазора магнитная индукция по всему рабочему зазору различна. А так как силы магнитного поля, определяемые величиной магнитной индукции, воздействуют на абразив, осуществляя обработку поверхности заготовки, то и эти силы будут различны, как и магнитная индукция [42].

В результате обработки экспериментальных данных выявлено, что по обрабатываемому профилю сформировались две зоны обработки, качество обработанных частей обрабатываемого профиля по значениям шероховатости отличается значительно.

Схематично процесс магнитно-абразивной обработки сфероида описан на рисунке 2.7.

При обработке сфероида между двумя плоскими полюсами формируются «слепые» зоны, в которых качество обработанной поверхности по значениям шероховатости значительно отличается от зоны обработки, расположенной в центральной части профиля сфероида.

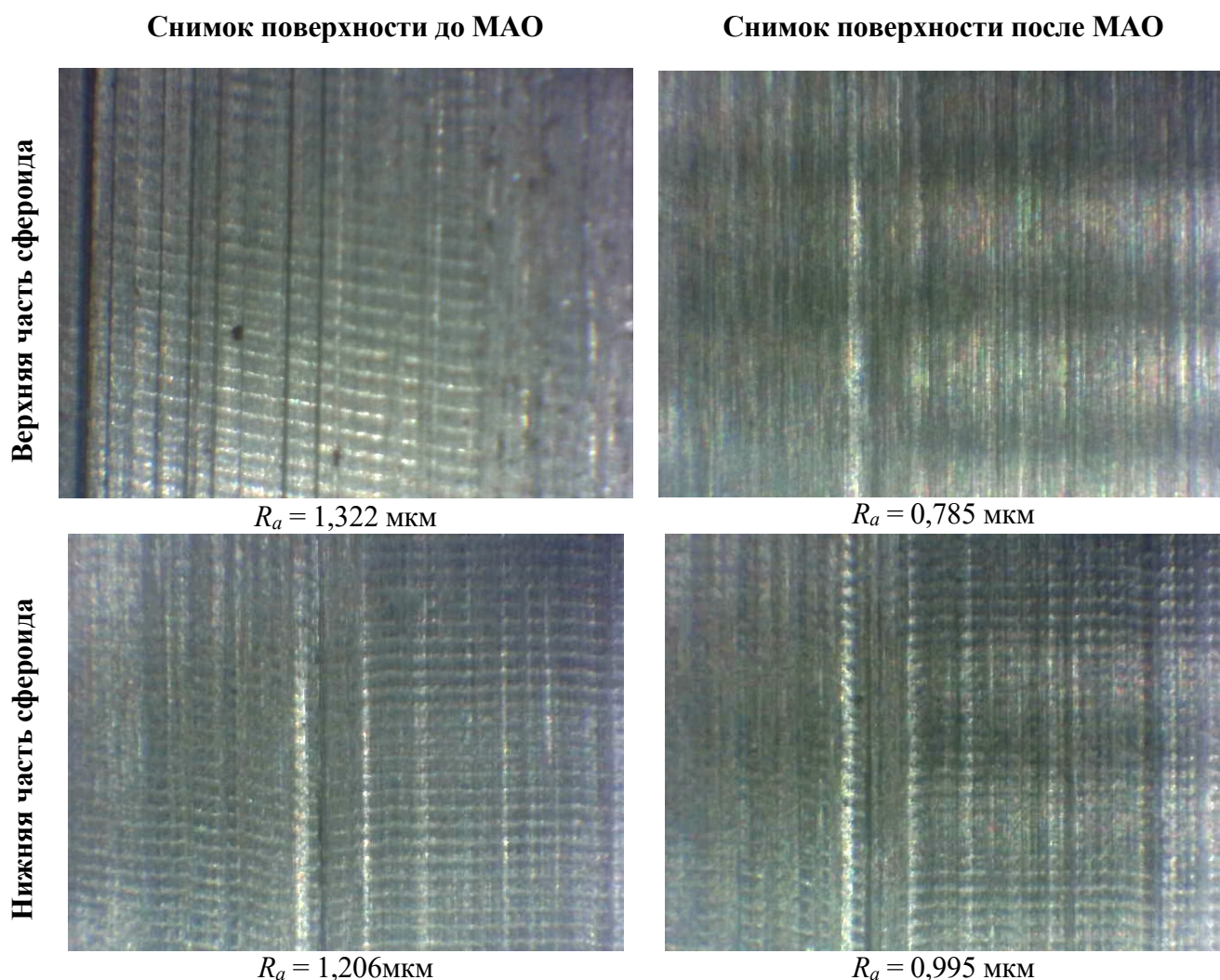


Рисунок 2.6 – Поверхность сфероида до и после МАО между плоскими полюсными наконечниками с технологическими параметрами:

$$t = 12 \text{ мин}, n = 360 \text{ мин}^{-1}, S = 50 \text{ мм/мин}, B = 0,8 \text{ Тл}$$

Объясняется это тем, что в центральной части профиля сфероида рабочий зазор минимален, а значит плотность магнитно-абразивной массы максимальна. За счет высокой величины плотности магнитно-абразивной массы уменьшается количество частиц, вовлеченных в процесс обработки. При этом возрастает доля неподвижной массы, так как в «слепых» зонах вырастает доля подвижной массы.

Следует отметить, что основной причиной неравномерной шероховатости по профилю обрабатываемой сложнопрофильной поверхности является непостоянная величина рабочего зазора [92, 106, 108]. Экспериментально нивелировать такую разницу в величинах рабочего зазора при обработке

сфероидов за счет подбора оптимальных значений других параметров обработки не представляется возможным, так как эти параметры обработки отвечают за производительность обработки в тех частях профиля, где магнитно-абразивная масса прилегает надлежащим образом.

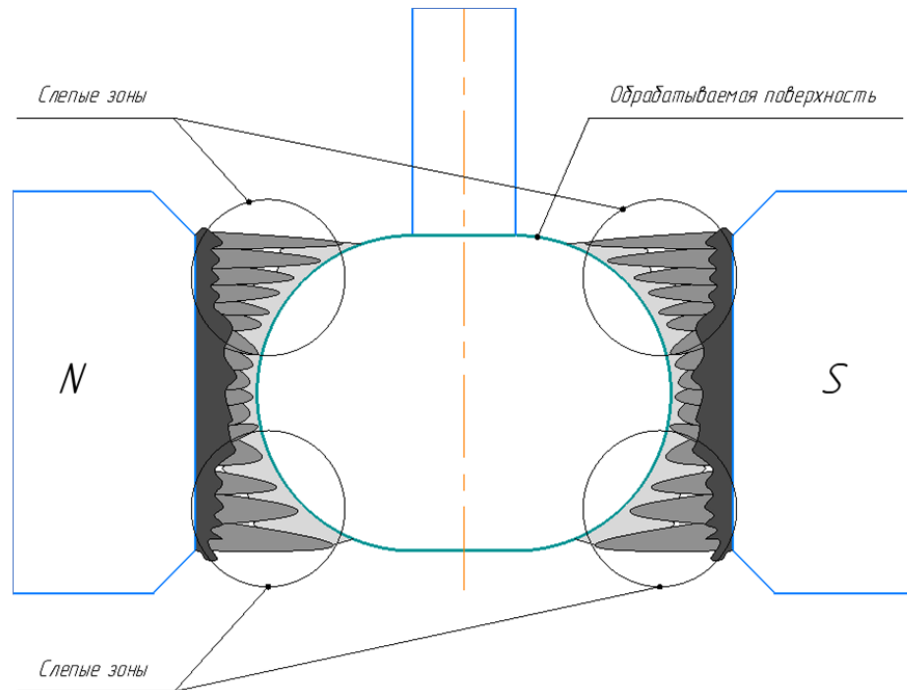


Рисунок 2.7 – Схема взаимодействия структур магнитно-абразивной массы со сложнопрофильной поверхностью

Таким образом, очевидной становится задача поиска и разработки такого способа МАО сложнопрофильных поверхностей, за счет применения которого стало бы возможным добиться равномерного рабочего зазора по всему обрабатываемому профилю.

Анализ схемы распределения магнитных потоков при обработке заготовки, имеющей криволинейную обрабатываемую поверхность, на установке с плоским индуктором показывает, что увеличение рабочего зазора δ негативно сказывается на качестве обработанной поверхности. Перетоки магнитного потока переходят с одного постоянного магнита на другой, минуя заготовку, силы F_n и F_t снижаются, съем материала с поверхности заготовки уменьшается, глубина слоя с повышенной твердостью уменьшается.

Вышеописанное утверждение подтверждается результатами моделирования распределения магнитных потоков в рабочем зазоре при обработке криволинейной поверхности плоским индуктором, имеющем в своем составе магнитопровод и постоянные магниты. Моделирование проводилось в программной среде *ANSYS Maxwell* (рисунок 2.8).

Становится очевидным, что эффективность применения MAO сложнопрофильных поверхностей напрямую зависит от возможности обеспечения постоянного рабочего зазора по всему обрабатываемому профилю [104]. Невозможность обеспечения постоянного рабочего зазора приведет к неравномерному качеству обработанной поверхности ввиду различных условий обработки на различных участках сложнопрофильной поверхности. За счет этого также увеличится время обработки, снизится производительность.

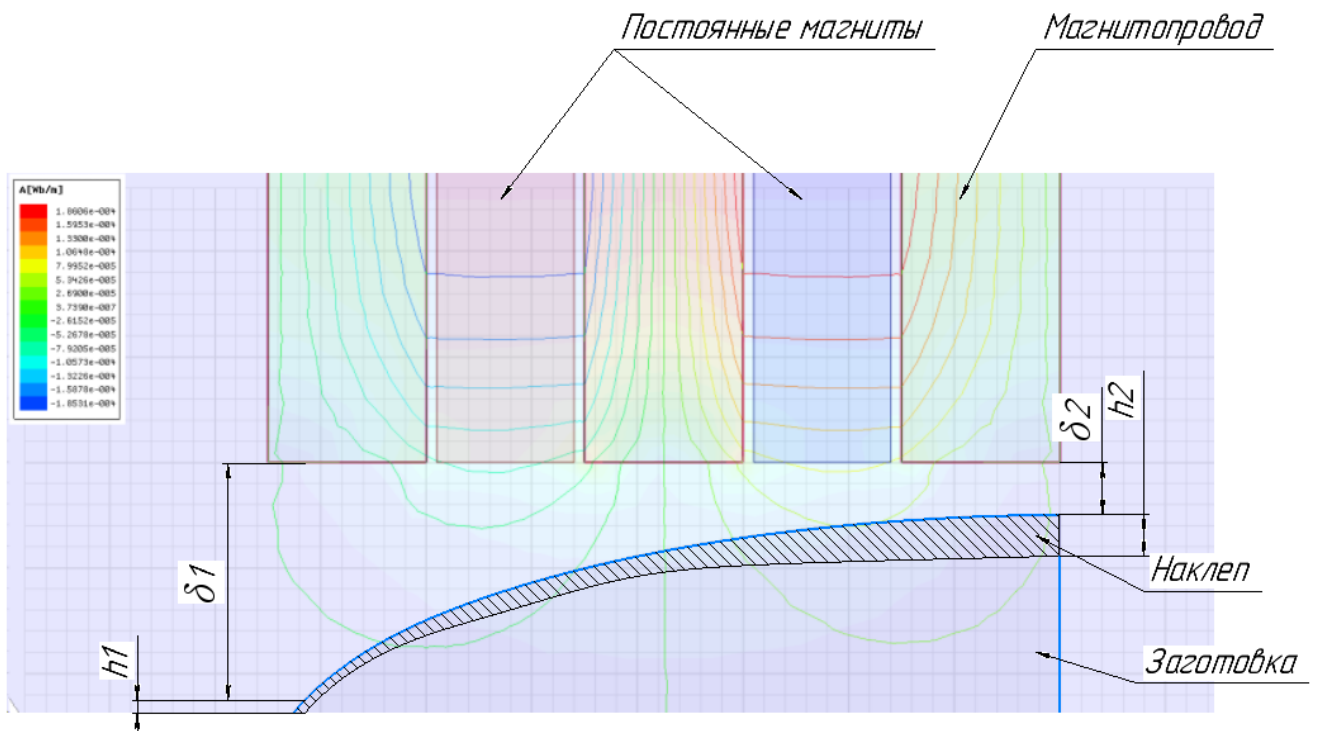


Рисунок 2.8 – Распределение магнитных потоков и изменение глубины наклепа при обработке заготовки сферической формы плоским индуктором, где:
 $h1, h2$ – глубина наклепа; $\delta1, \delta2$ – рабочий зазор

В области MAO сложнопрофильных поверхностей существует множество решений, имеющих свои достоинства и недостатки.

Существует способ и устройство для МАО волноводов (патент RU № 2534656, опубл. 10.12.2014 г.) [55]. Рабочий орган закрепляется на каретке, движущейся по трем направляющим, соответствующим осям координат. При этом постоянные магниты заранее устанавливаются и закрепляются на рабочий орган таким образом, чтобы обеспечить равноудаленность рабочей поверхности магнита от обрабатываемой поверхности. Способ обработки заключается в применении абразивного материала, который может помещаться в жидкость, распределяемого по поверхности волновода, а затем вдоль этой поверхности движется рабочий орган, таким образом происходит МАО сложнопрофильной поверхности.

Недостатком указанного способа является низкая производительность обработки, так как размер рабочей поверхности магнита значительно меньше длины обрабатываемой поверхности. Также при осуществлении указанного способа в непосредственной работе будет задействовано малая часть абразивных частиц, при этом они будут накапливаться на передней поверхности магнитов при их движении вдоль обрабатываемой поверхности, также частицы не имеют возможности перемешиваться.

Для МАО рекомендуется эффективная скорость резания до 60 м/мин [27]. В связи с вышеперечисленным, применение магнитных систем на каретках является перспективным решением для обработки сложнопрофильных поверхностей, однако в случаях обработки длинных изделий производительность будет недостаточной.

Известен способ МАО фасонных изделий (авторское свидетельство SU № 867619, опубл. 30.09.1981 г.) [4], основанный на применении гипса при формировании МАИ. Обрабатываемую заготовку прокатывают по смеси гипса и МАП, таким образом на МАИ происходит копирование обрабатываемого профиля, а за счет применения гипса щетка застывает, сохраняя скопированный профиль.

Недостатком данного способа являются пониженные режущие свойства МАП за счет применения гипсового или смолянистого связующего. Также

значительно снижается стойкость МАИ, так как отсутствует возможность её самоперемешивания, работает один слой абразивных частиц.

Существует способ МАО сложнопрофильных изделий, основанный на особом принципе подачи магнитно-абразивной массы в камеру с обрабатываемой заготовкой. Заготовку помещают в камеру, заполненную МАП, при этом к камере подведены электромагнитные диски, переменное включение и выключение которых заставляет порошок перемещаться. Заготовке придется вращательное движение, при этом подача и смена зерна происходит непрерывно.

Недостатком описанного способа МАО являются ограниченность рабочих движений (вращение заготовки и свободное перемещение МАП), а также значительный расход МАП. Часть порошка не задействована в процессе обработки, а выполняет функции магнитопровода и поддержки для слоя абразивных частиц, находящихся в непосредственной работе.

Известен способ МАО с помощью С-образных магнитных систем, заготовка вращается между этими магнитными системами, за счет чего производится МАО (авторское свидетельство SU № 1585124, опубл. 15.08.1990) [1].

Недостатком указанной системы является неравномерность магнитного поля за счет пересечения магнитных полей пар магнитов, что влечет за собой постоянное изменения режимов обработки в процессе обработки и неравномерное формирование качества обрабатываемой поверхности.

Известна установка для МАО поверхностей изделий сложной формы (патент RU № 2336985, опубл. 27.10.2010 г.) [54]. Установка содержит камеру с МАП, в которую помещается заготовка, закрепленная на подвеску с возможностью ее вращения. По периметру камеры расположены электромагниты переменного тока.

Применение камеры, наполненной МАП, значительно снижает коэффициент полезного использования МАП в процессе обработки. Будут формироваться зоны, в которых материал останется неподвижным в течение всего процесса обработки. При этом обеспечение одного вращательного движения заготовке также может негативно сказаться на равномерном формировании

качества, так как если изделие имеет поверхность сложной пространственной формы, то на поверхности также могут формироваться «слепые зоны», в которых не будет производиться МАО.

Известно устройство для МАО (авторское свидетельство SU № 779042, опубл. 15.11.1980) [3], которое содержит полюсные наконечники, вращающиеся перпендикулярно оси сердечников с целью обработки криволинейных поверхностей тел вращения. Также полюсные наконечники совершают возвратно-поступательные движения относительно обрабатываемой поверхности.

Недостатком указанного устройства является цилиндрическая форма полюсного наконечника, что значительно ограничивает применимость и производительность МАО, так как не соблюдается равномерность рабочего зазора по всему профилю.

В качестве устройства для МАО известно применение индуктора с эксцентриковым механизмом осцилляции, снабженного планетарным механизмом, который обеспечивает радиальную осцилляцию наконечника.

Применение указанного устройства ограничивается малой площадью рабочей поверхности полюсного наконечника, что говорит о низкой производительности МАО и ограниченности ее применения.

Иконниковым А.М. описан способ МАО фасонных поверхностей, при котором в качестве устройства для осуществления способа используется магнитная система [27], состоящая из набора чередующихся пластин магнитопровода и постоянных магнитов. Копирование профиля обрабатываемой заготовки происходит за счет соприкосновения рабочих поверхностей магнитов и магнитопровода с поверхностью заготовки, после чего магнитную систему отводят от обрабатываемой поверхности на необходимую величину рабочего зазора. В рабочий зазор помещают МАП, система приводится в осциллирующее возвратно-поступательное движение, а заготовке придается вращательное движение.

Указанный способ оказался наиболее привлекательным в процессе теоретических исследований способов МАО сложнопрофильных поверхностей,

так как инструмент достаточно гибок для настройки под различные профили обрабатываемых поверхностей.

Проведено моделирование распределения магнитной индукции в рабочем зазоре для указанного способа МАО сложнопрофильных поверхностей Иконникова А.М. [27]. Проведено моделирование устройства, постоянные магниты которого расположены вдоль одной прямой и на одной плоскости устройства, но имеющих разный вылет относительно этой плоскости. Такой вариант исполнения устройства обеспечивает равномерный рабочий зазор, но не учитывает непараллельность рабочих плоскостей постоянных магнитов касательным к этой поверхности (рисунок 2.9).

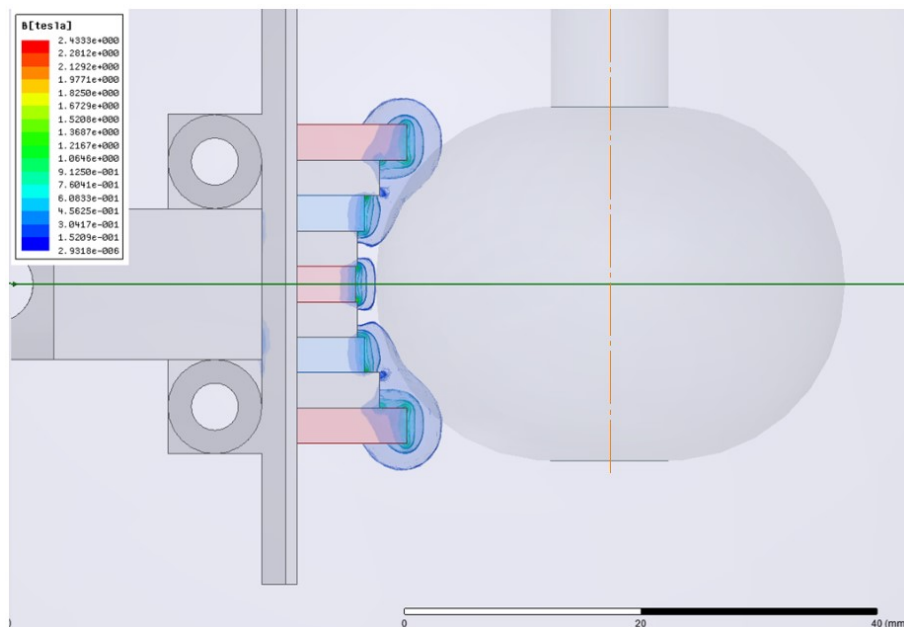


Рисунок 2.9 – Распределение магнитного поля в рабочем зазоре для устройства с постоянными магнитами, расположенными по одной прямой и на одной плоскости, но с разным вылетом

Одним из показателей интенсивности МАО является интенсивность силовых магнитных линий (рисунок 2.10). Видно, что интенсивность силовых магнитных линий выражена слабо.

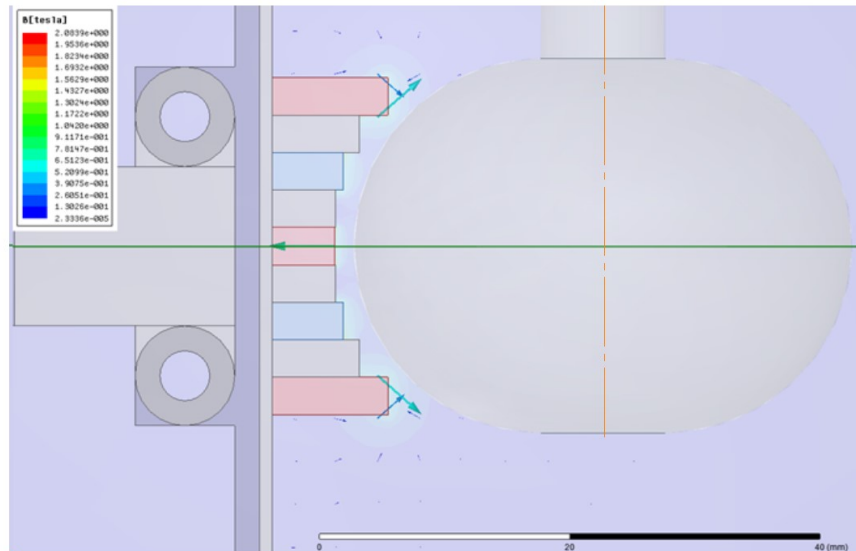


Рисунок 2.10 – Распределение силовых линий магнитного поля в рабочем зазоре для устройства с постоянными магнитами, расположенными по одной прямой и на одной плоскости, но с разным вылетом

Построена линейная зависимость величины магнитной индукции от точки на поверхности заготовки (рисунок 2.11). По графику видно, что наиболее благоприятные для последующей МАО условия не выполняются – магнитная индукция достигает значения 0,5 Тл только на крайних магнитах. Это значит, что такое выполнение устройства не подходит для обеспечения равномерной обработки сложнопрофильной поверхности.

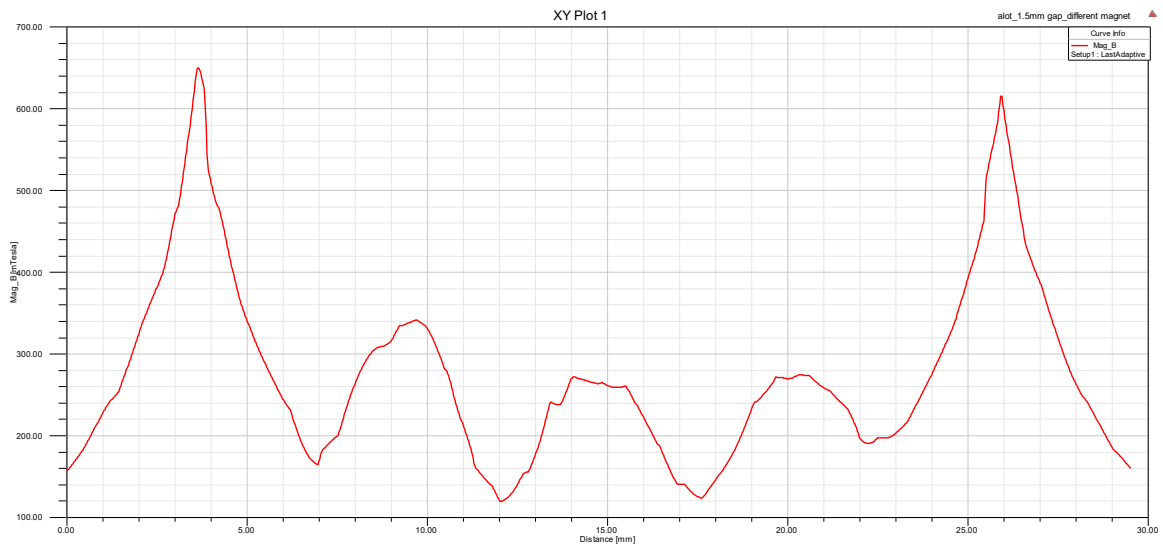


Рисунок 2.11 – График зависимости магнитной индукции от расположения рассматриваемой точки

Недостатком является необходимость в предварительном контакте постоянных магнитов и магнитопровода с обрабатываемой поверхностью, так как таким образом происходит копирование профиля заготовки.

Известно устройство для МАО поверхностей деталей (патент RU № 2599765, опубл. 10.10.2016) [56], в котором в качестве магнитных систем применяются индукторы с чередующимися постоянными магнитами и магнитопроводом. При этом магниты имеют тороидальную форму, а магнитные системы в сборе располагаются на кронштейнах. Указанная конструкция устройства представляет особый интерес, так как обладает широкими технологическими возможностями за счет высокой подвижности магнитных систем. Благодаря применению данного устройства возможно обрабатывать не только цилиндрические и плоские поверхности, но и поверхности, имеющие сложную форму.

Недостатком указанного устройства является тороидальная форма магнитов и магнитопровода. Это влечет за собой не только несоблюдение постоянства рабочего зазора по всему обрабатываемому профилю, но и сложность изготовления магнитов тороидальной формы. В связи с невозможностью изменения магнитов под определенный профиль обрабатываемой поверхности возникает проблема неравномерного съема материала и, как следствие, неравномерное формирование шероховатости сложнопрофильной поверхности.

Теоретические исследования процесса МАО позволили определить основные составляющие оптимальной схемы обработки сложнопрофильных поверхностей и конструкции устройства для осуществления данного способа.

Во-первых, необходимо обеспечить постоянство рабочего зазора по всему обрабатываемому профилю. Это позволит получить равномерное качество обработанной поверхности за счет постоянства технологических параметров в течение всего процесса обработки по всему обрабатываемому профилю.

Во-вторых, необходимо обеспечить гибкость применимости предлагаемого способа и устройства. Конструкция устройства должна иметь разъемные

соединения, а схема обработки содержать необходимое и достаточное количество рабочих движений.

Таким образом, изначально были рассмотрены возможные схемы обработки сложнопрофильной поверхности между двумя полюсными наконечниками (рисунок 2.12).

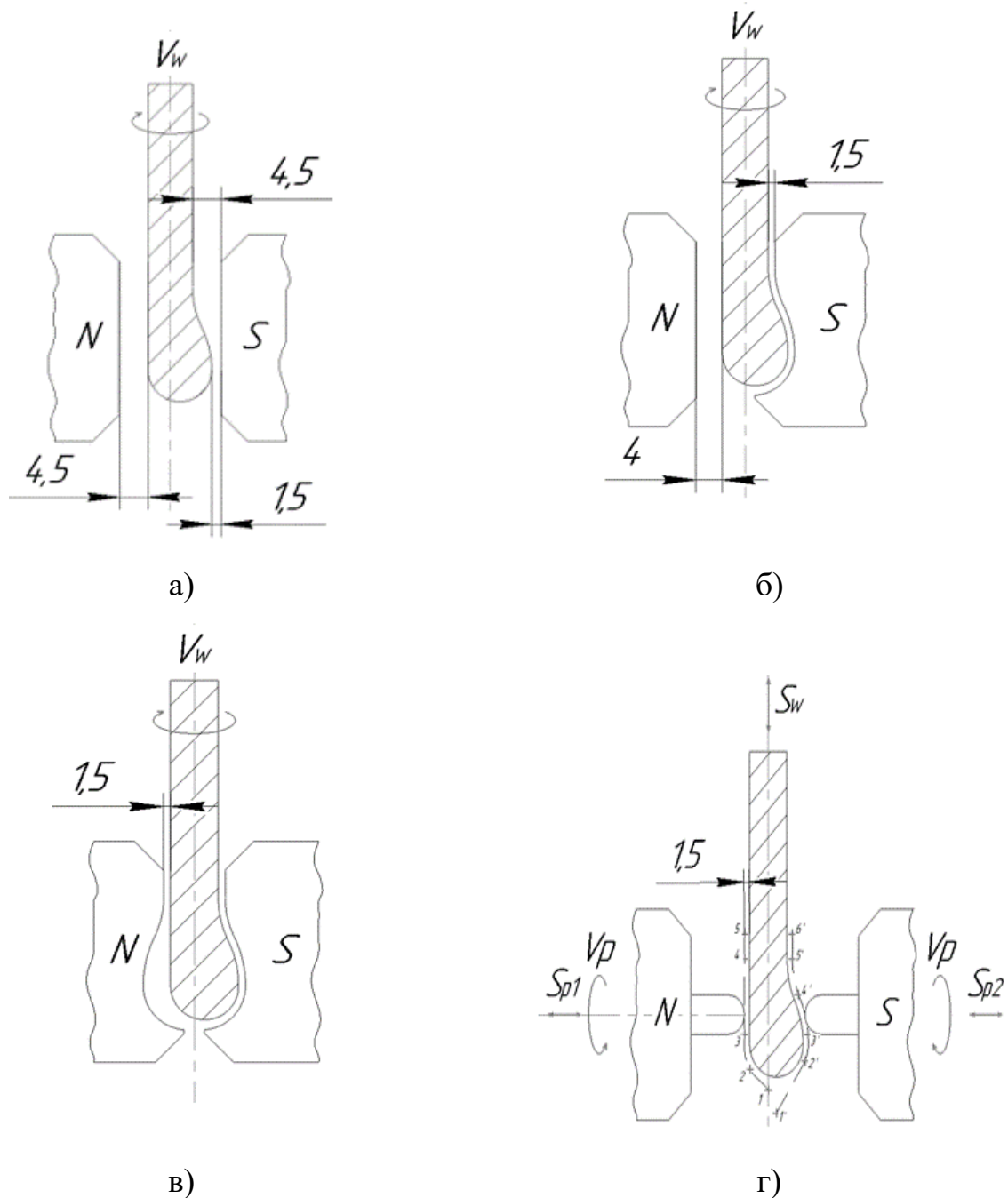


Рисунок 2.12 – Схемы обработки сложнопрофильной поверхности заготовки между двумя полюсными наконечниками: а) оба плоской формы; б) плоской и фасонной формы; в) оба фасонной формы; г) формы «пальца» [21]

В качестве обрабатываемой заготовки была взята галтель экрана элегазового трансформатора, имеющая сложный профиль, составленный из нескольких образующих.

Согласно описанным выше теоретическим и экспериментальным исследованиям, схема обработки с двумя полюсными наконечниками плоской формы (рисунок 2.12, а) не решает поставленной задачи по обеспечению равномерного рабочего зазора по всему обрабатываемому профилю во время обработки. Основным преимуществом применения двух плоских полюсных наконечников остается возможность совмещения трех рабочих движений – вращение заготовки V_w , вращение полюсных наконечников V_p и осцилляционное движение заготовки.

Применение фасонных наконечников (рисунок 2.12, б, в) концентрирует силовые линии магнитного поля на наиболее приближенных к оси вращения заготовки частях полюсного наконечника. Поэтому будет наблюдаться значительные различия в величинах магнитной индукции вдоль всего полюсного наконечника.

Схема с полюсными наконечниками в форме пальца (рисунок 2.12, г) обеспечивает постоянство рабочего зазора за счет движения «пальца» вдоль всей обрабатываемой поверхности [21]. Совмещение трех движений: вращение полюсных наконечников V_p , возвратно-поступательное движение полюсных наконечников S_p , возвратно-поступательное движение заготовки S_w также положительно скажется на качестве поверхности – увеличится количество абразивных зерен, вступающих в контакт с обрабатываемой поверхностью. Однако, применение «пальцев» в качестве полюсных наконечников значительно снижает производительность МАО, количество вступающих в процесс обработки абразивных зерен. Применение такой технологии на производстве принимаем нецелесообразным.

Таким образом, делаем вывод о том, что необходимо разработать такой способ МАО сложнопрофильных поверхностей изделий, который обеспечит равномерность рабочего зазора вдоль всего обрабатываемого профиля.

2.2 Способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей и устройство для его осуществления

МАО сложнопрофильных поверхностей предлагается проводить таким способом и устройством для его осуществления, который обеспечит равномерность рабочего зазора вдоль всего обрабатываемого профиля. Для осуществления указанного способа предлагается использовать кассеты с постоянными магнитами, которые необходимо ориентировать относительно обрабатываемой сложнопрофильной поверхности за счет применения подвижных механизмов, кронштейнов, салазок. Рабочие поверхности постоянных магнитов предлагается ориентировать параллельно касательным к обрабатываемой сложнопрофильной поверхности. Таким образом, будет обеспечен равноотстоящий рабочий зазор по всему обрабатываемому профилю.

Способ предлагается осуществлять при помощи устройства, состоящего из набора постоянных магнитов и магнитопровода, включающего в себя также кассету, устройство для ориентации кассеты и салазки [58].

Таким образом, применение указанного устройства позволит сориентировать магнитную систему относительно сложнопрофильной поверхности.

2.2.1 Схема обработки

Схема МАО сложнопрофильной поверхности представлена на рисунке 2.13, где:

- 1 – заготовка;
- 2 – сложнопрофильная поверхность;
- 3 – постоянный магнит;
- 4 – кассета;
- 5 – магнитопровод;
- 6 – кронштейн;
- 7 – салазки;
- 8 – рабочий зазор;

- 9 – касательная к обрабатываемой поверхности;
 10 – магнитно-абразивный порошок;
 11 – вращение заготовки с частотой вращения n ;
 12 – возвратно-поступательное движение салазок S [57].

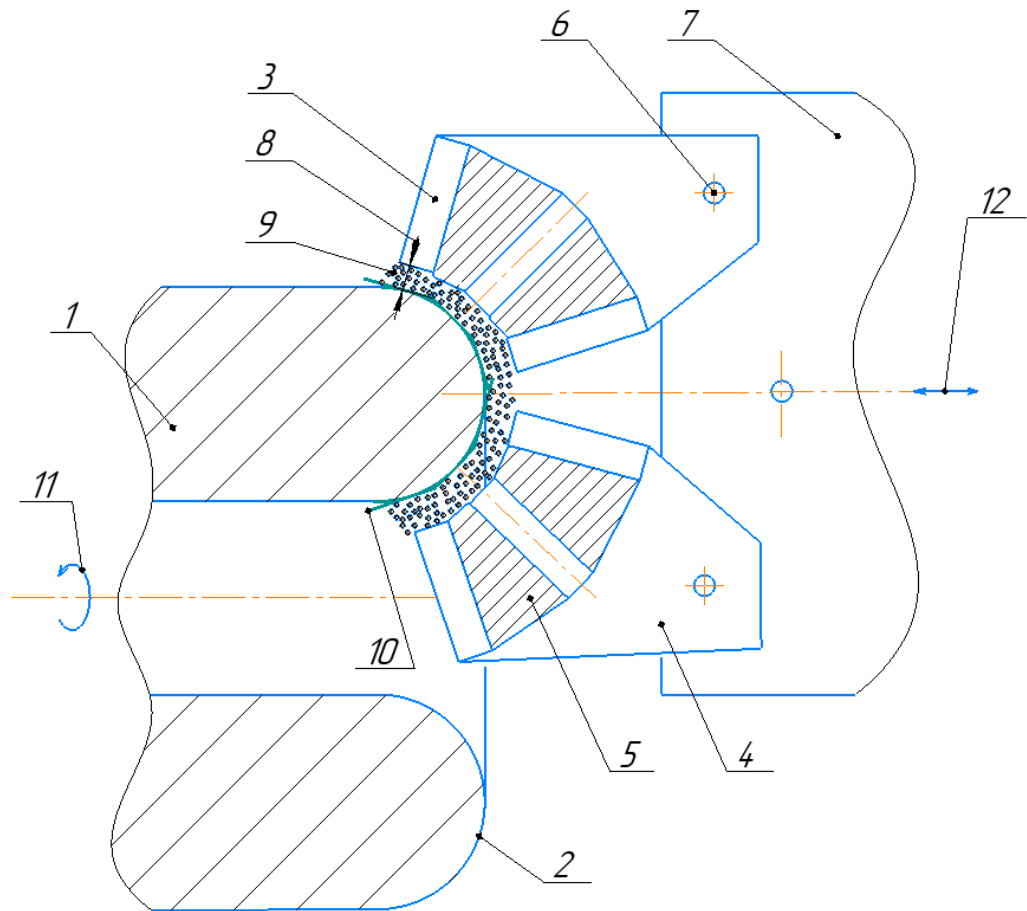


Рисунок 2.13 – Способ МАО сложнопрофильной поверхности

Регулирование положения кассеты относительно обрабатываемой сложнопрофильной поверхности с целью обеспечения постоянного рабочего зазора по всему обрабатываемому профилю производится с помощью фиксирующего устройства кассеты и салазок. Фиксирующее устройство может представлять собой шпильку или болт с шайбами и гайкой. Таким образом, обеспечивается вращение кассеты относительно оси фиксирующего устройства на 360 градусов, а также вращение кронштейна относительно фиксирующего устройства салазок также на 360 градусов.

Помимо этого, салазки позволяют обеспечить возвратно-поступательное движение кассеты, которое совместно с вращением заготовки обеспечивает необходимое и достаточное количество рабочих движений.

Процесс МАО по предлагаемому способу начинается с придания вращения заготовке и подвода сориентированной кассеты к обрабатываемой поверхности. В процессе обработки в рабочий зазор подается смазочно-охлаждающая жидкость с целью снижения температуры в зоне обработки, а также улучшения визуальных характеристик поверхности.

Таким образом, предлагаемый способ МАО сложнопрофильных поверхностей и устройство для его осуществления позволят обеспечить равномерный рабочий зазор по всему обрабатываемому профилю.

Схематично процесс МАО сложнопрофильной поверхности сфероида по предлагаемому способу описан на рисунке 2.14.

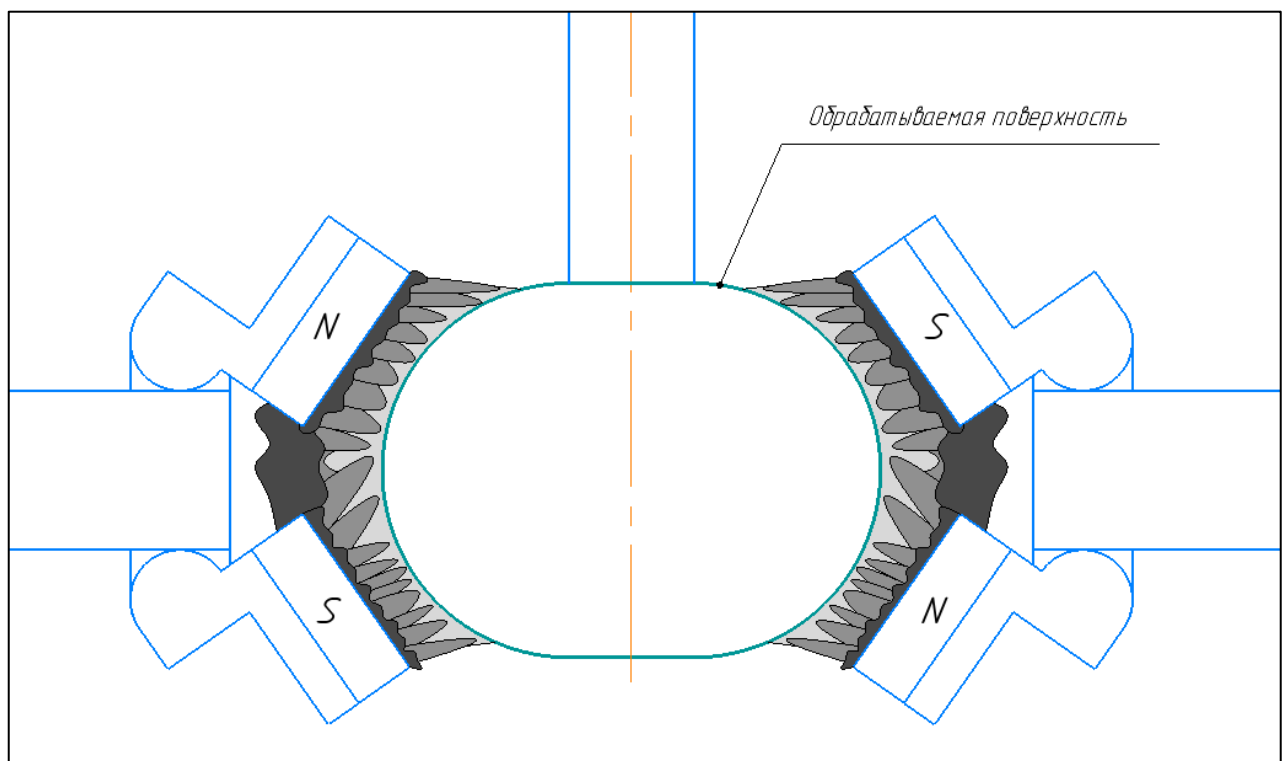


Рисунок 2.14 – Схема взаимодействия структур МАП со сложнопрофильной поверхностью

Согласно рисунку 2.14 основной объем неподвижной массы скапливается в пространстве между постоянными магнитами (рисунок 2.15), что позволит

обеспечить равномерное заполнение рабочего зазора подвижной массой и свободным абразивом.

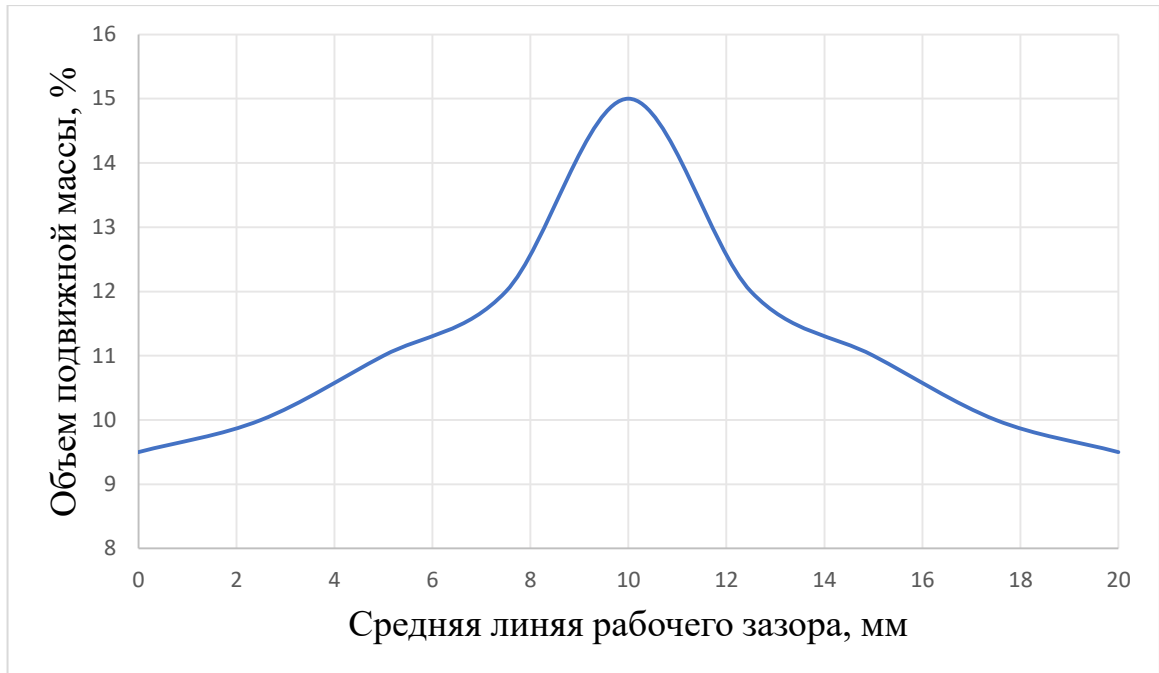


Рисунок 2.15 – Объем подвижной массы относительно точек вдоль средней линии рабочего зазора

Проведено моделирование распределения магнитной индукции в рабочем зазоре устройства, постоянные магниты которого расположены вдоль одной прямой и на одной плоскости устройства, но имеющих разный вылет относительно этой плоскости (рисунок 2.16, а). Такой вариант исполнения устройства обеспечивает равномерный рабочий зазор, но не учитывает непараллельность рабочих плоскостей постоянных магнитов касательным к этой поверхности [91].

Во вторую очередь проведено моделирование распределения магнитной индукции в рабочем зазоре устройства, постоянные магниты которого расположены параллельно касательным к обрабатываемой поверхности (рисунок 2.16, б). Видно, что распределение магнитной индукции является равномерным.

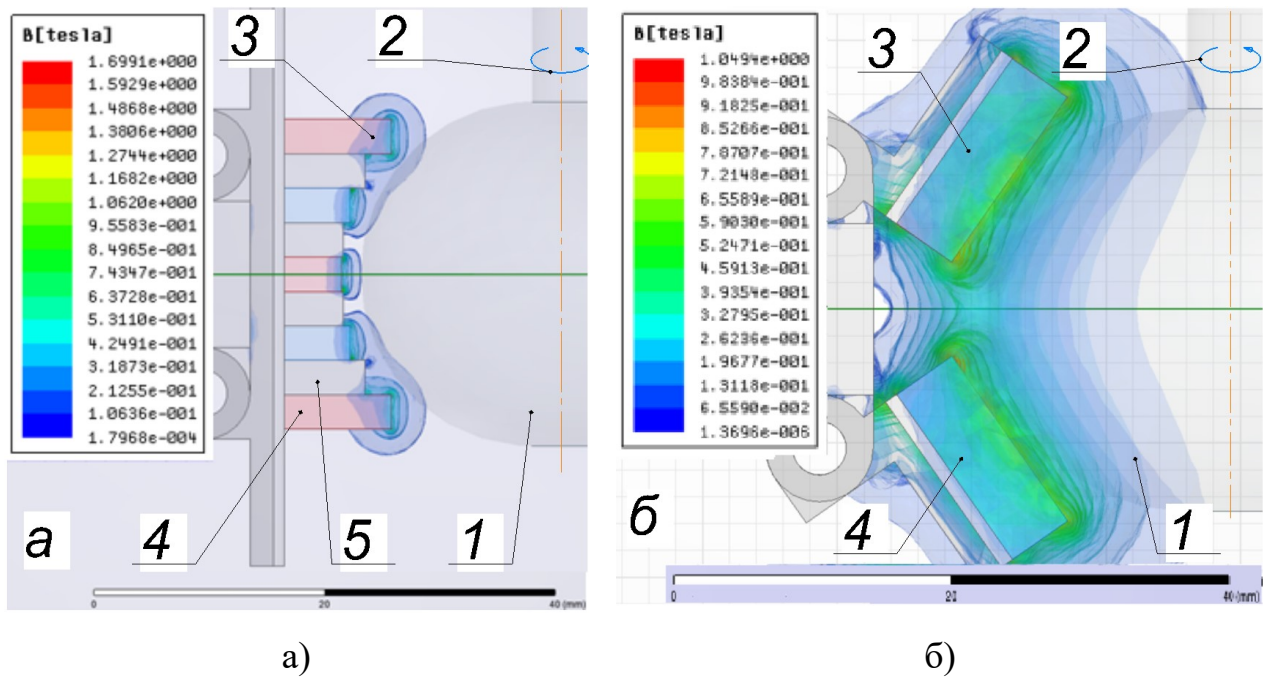


Рисунок 2.16 – Распределение магнитной индукции в рабочем зазоре при:
 а – магниты расположены вдоль прямой, рабочие поверхности на разных плоскостях; б – рабочие поверхности магнитов параллельны касательным к обрабатываемой поверхности; где: 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – вращательное движение заготовки; 3 – магниты полярности N ; 4 – магниты полярности S ; 5 – металлические проставки

2.2.2 Устройство для осуществления способа

Обработка сложнопрофильных поверхностей проводили согласно предлагаемому способу при помощи разработанного устройства (рисунок 2.17).

Устройство содержит корпус 1, на котором с помощью винтов закреплены подвижные части 2, на которых располагаются постоянные магниты 3. Постоянные магниты приклеены к подвижным частям, причем съем их с подвижных частей без нарушения целостности магнита невозможен. Поэтому при дальнейших экспериментальных исследованиях использовали несколько подвижных частей, на которых были закреплены магниты различной силы.

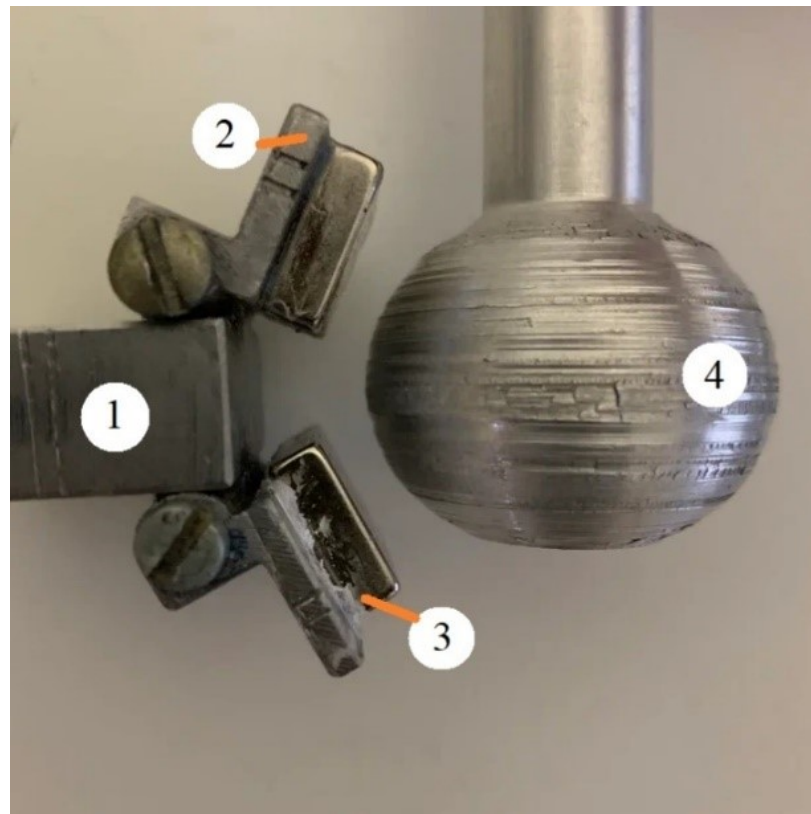


Рисунок 2.17 – Устройство для MAO сложнопрофильных поверхностей, где:
1 – корпус; 2 – подвижная часть; 3 – постоянный магнит; 4 – обрабатываемая
поверхность

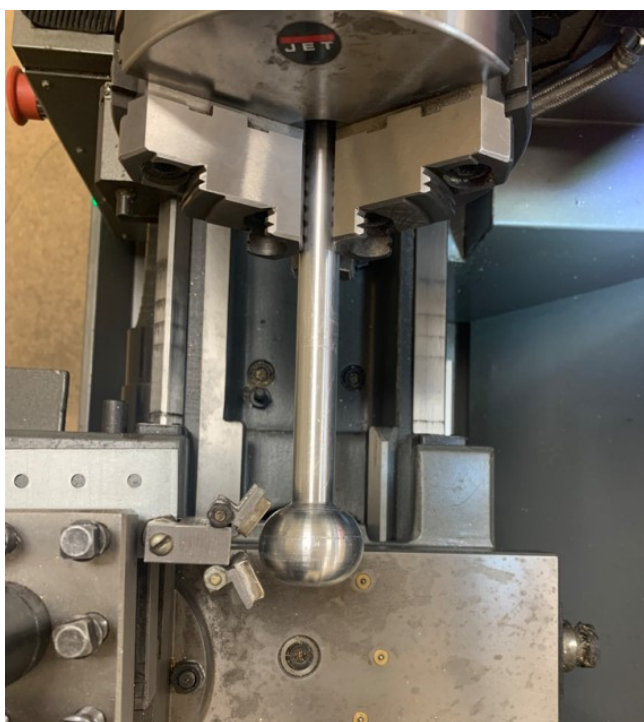
Устройство для MAO сложнопрофильных поверхностей может быть установлено на различные станки, что увеличивает его технологические возможности. На рисунках 2.18, 2.19 представлены возможные варианты установки устройства на сердечник полюсного наконечника установки для магнитно-абразивной обработки, базируемой на фрезерном станке с ЧПУ *Emco Concept Mill 250*, а также в резцедержатель токарного станка *JET GHB 1340A DRO*.

Благодаря применяемой конструкции крепления устройства становится возможным без применения специального инструмента и в значительно короткие сроки оснащать станки данным устройством.

При необходимости обеспечения различной магнитной индукции B при обработке поверхностей, подвижные части с магнитами снимаются, устанавливаются части с магнитами с необходимой остаточной магнитной индукцией на поверхности.



а)

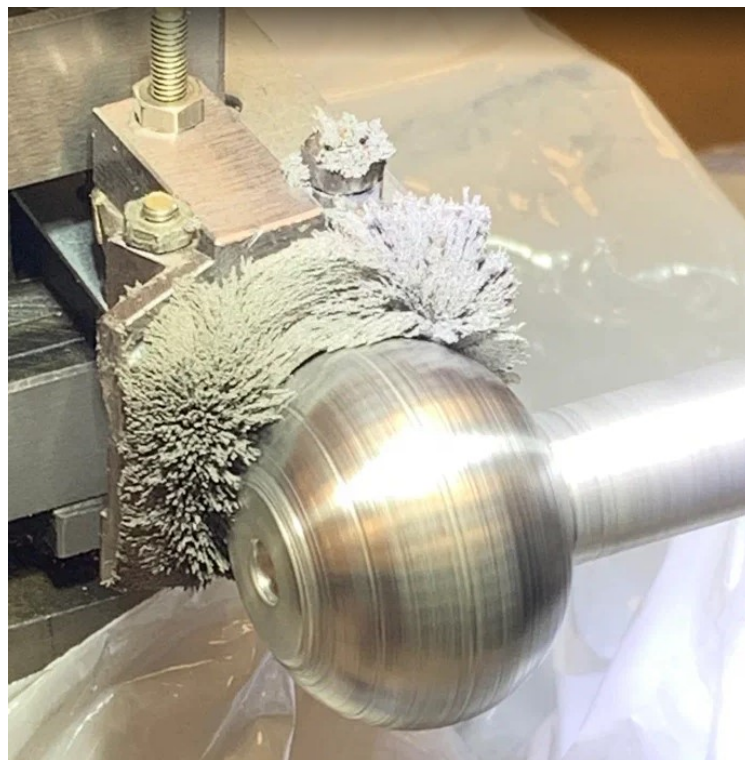


б)

Рисунок 2.18 – Устройство для MAO сложнопрофильных поверхностей на фрезерном станке (а) и токарном станке (б)



а)



б)

Рисунок 2.19 – Процесс МАО сложнопрофильной поверхности по предлагаемому способу с применением разработанного устройства, закрепленного в резцедержатель токарного станка *JET GHV 1340A DRO*, где:

а – вид сверху; б – вид сбоку

Таким образом, применение разработанного способа МАО и устройства для его осуществления обеспечивает равномерное магнитное поле в рабочем зазоре, что приводит к равномерному качеству обрабатываемой сложнопрофильной поверхности.

Разработанное устройство представляет собой универсальный инструмент для окончательной обработки поверхностей с различным радиусом скругления. Устройство можно применять как на фрезерных, так и токарных станках, а также на тех станках, где обеспечивается вращение обрабатываемой заготовки, а устройство возможно сориентировать относительно обрабатываемой поверхности.

Сменные подвижные части с магнитами расширяют возможности устройства, так как возможно использовать магниты с различной магнитной индукцией у рабочей поверхности.

Применение постоянных магнитов устраняет необходимость в источнике постоянного тока, трансформатора, индукционных катушек. Масса устройства составляет около 800 г., при этом установки, работающие на постоянном токе (рисунок 2.4), обладают массой свыше 100 кг. за счет использования индукционных катушек с количеством витков около 9000, а также стальных стоек, рабочего стола, сердечников, наконечников.

2.3 Определение технологических параметров

Осуществление МАО сложнопрофильных поверхностей по предлагаемому способу с помощью разработанного устройства с целью технологического обеспечения качества сложнопрофильной поверхности возможно при определенных технологических параметрах МАО.

Основной задачей экспериментальных исследований является выявление зависимостей влияния величины магнитной индукции B , частоты вращения заготовки n , амплитуды осцилляции устройства A и времени обработки t на шероховатость обработанной поверхности и удельный съем материала.

Необходимо определить оптимальную величину магнитной индукции B , выбрать МАП и смазочно-охлаждающую жидкость.

2.3.1 Обоснование выбора порошка

Известно, что для обеспечения процесса резания и микрорезания, характерного для шлифования, твердость порошка-инструмента должна быть выше твердости материала обрабатываемой детали. В машиностроении в качестве абразивных материалов широко используются оксиды и карбиды металлов, а также природные и синтетические алмазы, алмазоподобные материалы - кубический нитрид бора и др. Данные материалы, обладающие высокой твердостью, немагнитны, и не могут применяться в технологии МАО. Для получения композиционных порошковых материалов, как правило, применяют методы спекания. В качестве абразивных зерен при спекании наиболее широкое распространение получили порошки оксида алюминия Al_2O_3 , оксида циркония ZrO_2 , оксида кремния SiO_2 , карбида хрома Cr_3C_2 , карбида титана TiC , карбида кремния SiC , синтетические и природные алмазы.

В процессе микрорезания, характерного для МАО, твердость МАП должна быть выше твердости обрабатываемого материала [8, 31, 35, 37].

Абразивные частицы, входящие в состав МАП, обеспечивают абразивное действие в процессе обработки поверхности. Распространено применение таких абразивных частиц: оксиды металлов (оксид железа Fe_2O_3 , оксид алюминия Al_2O_3 , оксид кремния SiO_2); карбиды (карбид кремния SiC); алмазные частицы в виде алмазного порошка [49, 79, 89].

Магнитные частицы добавляются в состав МАП с целью обеспечения магнитной подвижности и управления поведением абразивных частиц в процессе обработки. Распространено применение таких магнитных материалов: магнитная глина, ферритовые порошки (оксиды железа и других металлов), а также магнитная жидкость, которая содержит жидкую фазу и наночастицы магнитных материалов (также оксидов железа и других металлов) [99,102,103].

Поскольку содержание железа в абразивном материале важно с точки зрения магнитных свойств МАП, были проведены исследования по оптимизации состава МАП для достижения лучшей скорости удаления. Эти исследования показывают, что количество содержание магнитного компонента должно быть в пределах 35-70% (от общего объема) [95].

Оптимальный состав зависит от магнитной индукции магнитного поля и конфигурации рабочего зазора. Средний размер зерен магнитного компонента находится в диапазоне 50-250 мкм, а абразивного компонента - в диапазоне 25-80 мкм.

В первую очередь от выбранных материалов для МАП зависит возможность МАО, так как магнитная проницаемость некоторых материалов может быть недостаточной для управления ими в процессе обработки. Также от материала МАП зависит производительность обработки и, наконец, себестоимость технологии окончательной обработки. При выборе МАП необходимо оценивать адгезионную совместимость обрабатываемого материала и материала порошка.

При обработке цветных металлов предпочтительно использование однородных МАП, так как их свойств достаточно для проведения качественной обработки поверхности [98, 100]. Твердость и режущие способности МАП получают путем спекания магнитных и абразивных частиц, получая композитные МАП [101, 103].

Абразивные частицы могут иметь округлую и осколочную форму. Округлая форма абразивных частиц применяется в случаях, когда необходимо достичь высокого качества поверхности, обеспечить низкую шероховатость. Осколочная форма позволяет повысить производительность обработки, увеличить удельный съем материала.

Применение абразивного материала с частицами округлой формы позволяет обеспечить большее число абразивных частиц, прилегающих к обрабатываемой поверхности и участвующих в микрорезании. За счет своей формы частицы внедряются в обрабатываемую поверхность на меньшую величину, обеспечивая меньшую шероховатость, сглаживая поверхность, увеличивая твердость

поверхностного слоя [92]. Круглые зерна в процессе магнитно-абразивной обработки перемешиваются, таким образом происходит самозатачивание частиц, увеличивается объем порошка, находящегося в непосредственной работе.

Согласно условию максимальной производительности обработки необходимо обеспечить превышение твердости абразивного материала по сравнению с обрабатываемым материалов в 2,5 раза и более.

Твердость частиц Пр10Р6М5 составляет $HВ \cdot 10^{-1} = 255$ МПа, заявленная твердость алюминиевого сплава АМц составляет $HВ \cdot 10^{-1} = 40$ МПа. Условию максимальной производительности обработки (2.1) выполняется.

$$H_a/H_m = \frac{255}{40} = 6,375 > 1,5. \quad (2.1)$$

Порошок Пр10Р6М5 выбран ввиду выполнения условия максимальной производительности, его доступности на рынке, высокому периоду стойкости. В результате предварительных экспериментальных исследований оценивалась стойкость порошка. Так для обработки алюминиевой заготовки в течение 12 минут использовали 90 г порошка. Одной порции порошка хватало для обработки 3 заготовок. Однако, для дальнейших экспериментальных исследований было принято решение ограничиться условием: одна порция порошка для одной заготовки.

Рабочий зазор наполняется определенным количеством МАП непосредственно перед началом обработки. Масса порошка, наполняющая рабочий зазор, выбирается предварительно. От фракции порошка зависит количество абразивных частиц, находящихся в процессе MAO. Таким образом, изменяя фракцию порошка, возможно контролировать производительность обработки и качество обработанной поверхности, стойкость МАИ.

В ходе предварительной серии экспериментальных исследований проведен выбор фракции порошка. Определено, что фракция порошка $\Delta = 60-160$ мкм обеспечивает необходимую производительность обработки и качество обработанной поверхности. В каждом отдельном опыте сохраняли следующие значения технологических параметров MAO: магнитная индукция $B = 1,15$ Тл

(магниты неодимовые N54); частота вращения заготовки $n = 300 \text{ мин}^{-1}$, время обработки $t = 8 \text{ мин}$.

Также необходимо определить оптимальную величину рабочего зазора, так как от этого значения зависит удельное давление зерна на обрабатываемую заготовку.

В ходе предварительных экспериментальных исследований сделан вывод об ухудшении качества поверхностного слоя деталей сложной формы из алюминиевого сплава марки АМц при магнитно-абразивной обработке с увеличением рабочего зазора δ . По полученным результатам получена зависимость изменения шероховатости поверхности ΔR_a от величины рабочего зазора δ (рисунок 2.20), где экспоненциальная зависимость описывается следующей функцией: $\Delta R_a = 1,5962^{-0,3031 \cdot \delta}$.

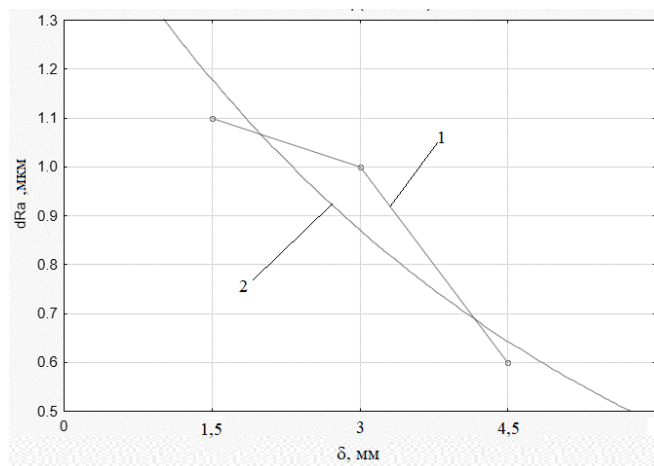


Рисунок 2.20 – Зависимость изменения шероховатости поверхности ΔR_a от величины рабочего зазора δ , где: 1 – линейная зависимость;

2 – экспоненциальная зависимость

Наполняемость рабочего зазора МАП влияет на жесткость МАИ. В ходе предварительных экспериментальных исследований выбрана величина рабочего зазора для дальнейших экспериментальных исследований $\delta = 2 \text{ мм}$. Масса порошка, помещаемого в рабочий зазор, $m = 90 \text{ г}$.

2.3.2 Обоснование выбора смазочно-охлаждающей жидкости

Применение смазочно-охлаждающей жидкости (далее СОЖ) в процессе МАО позволяет снизить температуру в зоне обработки и улучшить визуальные характеристики обработанной поверхности [18, 70]. Наличие СОЖ в составе магнитно-абразивной массы существенно повышает производительность магнитно-абразивной обработки [18, 70].

Серия предварительных экспериментальных исследований для определения эффективности применения СОЖ проводилась при следующих технологических параметрах: магнитная индукция $B = 1,15$ Тл (магниты неодимовые N54); время обработки $t = 8$ мин; частота вращения заготовки $n = 300$ мин⁻¹.

Проведены экспериментальные исследования влияния применения СОЖ на плотность МАИ и визуальные параметры обработанной поверхности (рисунок 2.21).



а)



б)

Рисунок 2.21 – МАО сложнопрофильной поверхности: а – без применения СОЖ; б – с применением полусинтетической СОЖ

После МАО на сложнопрофильной поверхности остаются темные включения МАИ, которые удаляются с поверхности со значительным усилием, отсутствует характерный блеск поверхности.

В процессе MAO добавление полусинтетической СОЖ повысило плотность магнитно-абразивной массы, ее прилегание к обрабатываемой поверхности, что влечет за собой повышение производительности MAO.

Для сравнения использовалась синтетическая СОЖ Universal Oil, полусинтетическая RANGOIL-UNIVERSAL и концентрат для приготовления СОЖ на водной основе Bohre. СОЖ добавлялась в начале обработки через распылитель на МАИ и обрабатываемую поверхность.

Исходя из результатов проведенных исследований по магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей из алюминиевых сплавов, рекомендуется применять полусинтетическую СОЖ RANGOIL-UNIVERSAL, так как она обеспечивает достаточную плотность МАИ, доступна на рынке.

2.3.3 Обоснование выбора сочетания рабочих движений

Шероховатость обработанной поверхности и производительность процесса MAO напрямую зависят от выбранного сочетания рабочих движений. Сочетание рабочих движений напрямую зависит от способа магнитно-абразивной обработки. Согласно разработанному способу MAO, движение производится как заготовкой, так и инструментом – кассетой с набором постоянных магнитов.

Взаимное движение заготовки и инструмента обеспечивает достаточное перемешивание МАП в рабочем зазоре, что позволяет вовлекать в процесс обработки большой объем абразивных частиц с целью повышения интенсивности обработки.

Предлагаемый способ MAO сложнопрофильных поверхностей включает в себя следующие возможные движения: вращение обрабатываемой заготовки, осцилляцию устройства, одновременное вращение заготовки и осцилляция устройство.

При осуществлении одной осцилляции шероховатость поверхности не меняется, что очевидно, так как необходимая скорость не обеспечивается и движение происходит по одному направлению (перпендикулярно оси заготовки), при этом в процессе обработки участвует только $\frac{1}{4}$ часть поверхности.

Поэтому предлагается рассматривать два набора движений:

1 – вращение заготовки с частотой n и осцилляцию устройства v с амплитудой A ;

2 – вращение заготовки с частотой n .

Установлены зависимости шероховатости поверхности R_a и удельного съема материала q от набора рабочих движений, осуществляемых в процессе MAO (рисунок 2.22) при $n = 300 \text{ мин}^{-1}$, амплитуда осцилляции устройства $A = 1 \text{ мм}$ с периодом $T = 2 \text{ с}$.

Предварительные экспериментальные исследования показали, что наибольшее влияние на шероховатость R_a оказывает сочетание частоты вращения заготовки и осцилляции устройства с амплитудой A . Интенсивность уменьшения шероховатости R_a снижается после 6 минуты обработки. Кривые изменения удельного съема материала q для двух сочетаний движений имеют практически одинаковый характер возрастания, интенсивность удаления материала растет с добавлением осцилляции.

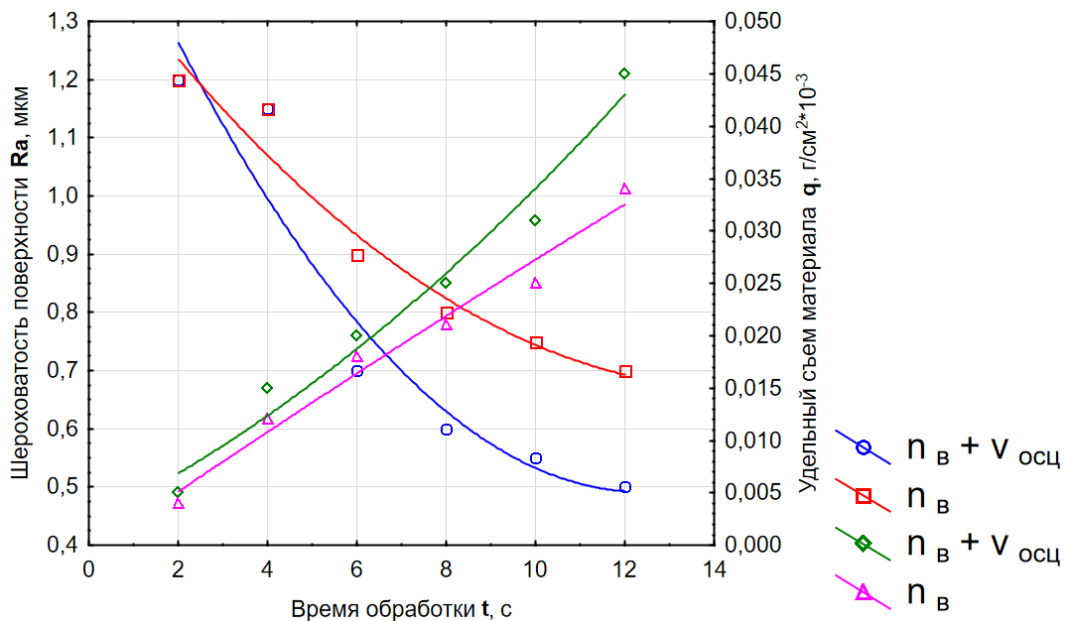


Рисунок 2.22 – Влияние различных сочетаний рабочих движений при MAO сложнопрофильной поверхности на шероховатость поверхности R_a и удельный съем материала q в зависимости от времени обработки t

2.3.4 Определение диапазонов величин технологических параметров

За счет воздействия магнитного поля на МАП формируется МАИ [9]. Магнитная индукция при использовании постоянных магнитов регулируется заменой постоянных магнитов на другие. Таким образом, с целью экономии ресурсов и определения оптимальных размеров постоянного магнита применяли компьютерное моделирование устройства с заготовкой.

Проведено моделирование распределения магнитной индукции в рабочем зазоре для разработанного устройства (рисунок 2.23). Материал устройства – сталь Ст3; материал заготовки – алюминиевый сплав АМц; материал магнитов – неодим $NdFeBr$ (неодим-железо-бор) класса $N33$ с остаточной магнитной индукцией у поверхности 1,14-1,17 Тл. Размер магнита 25x15x5 мм.

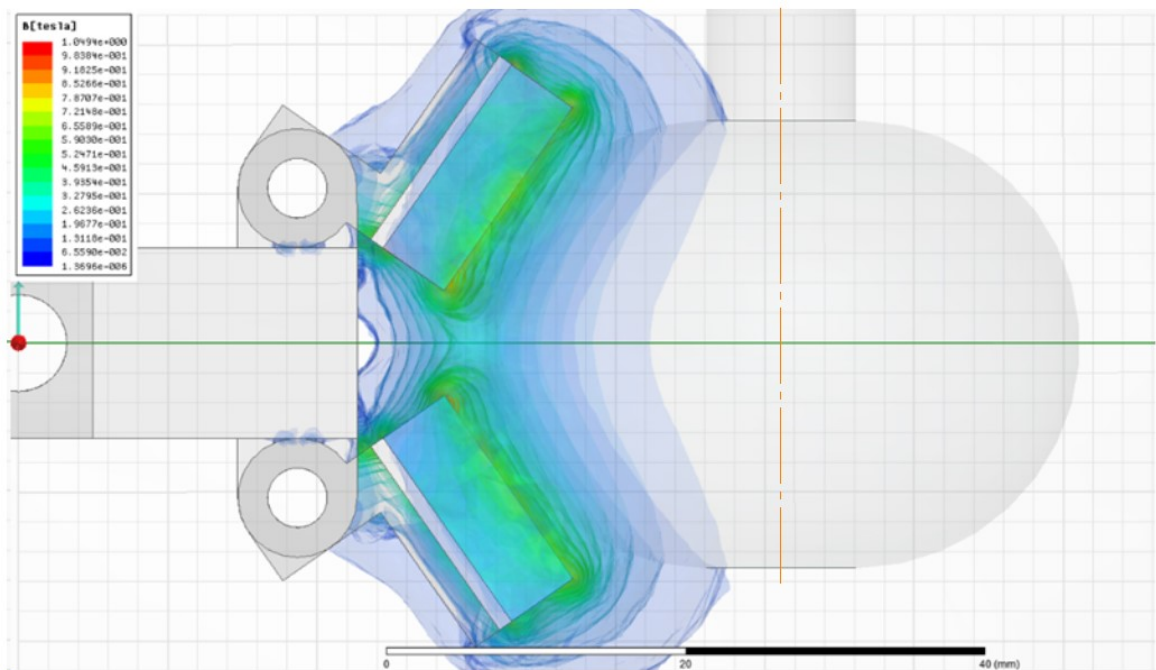


Рисунок 2.23 – Конструкция, у которой рабочие поверхности магнитов параллельны касательным к обрабатываемой поверхности, и распределение магнитного поля в рабочем зазоре для данной конструкции

Одним из показателей является интенсивность силовых магнитных линий (рисунок 2.24). Видно, что интенсивность силовых магнитных линий выражена явно.

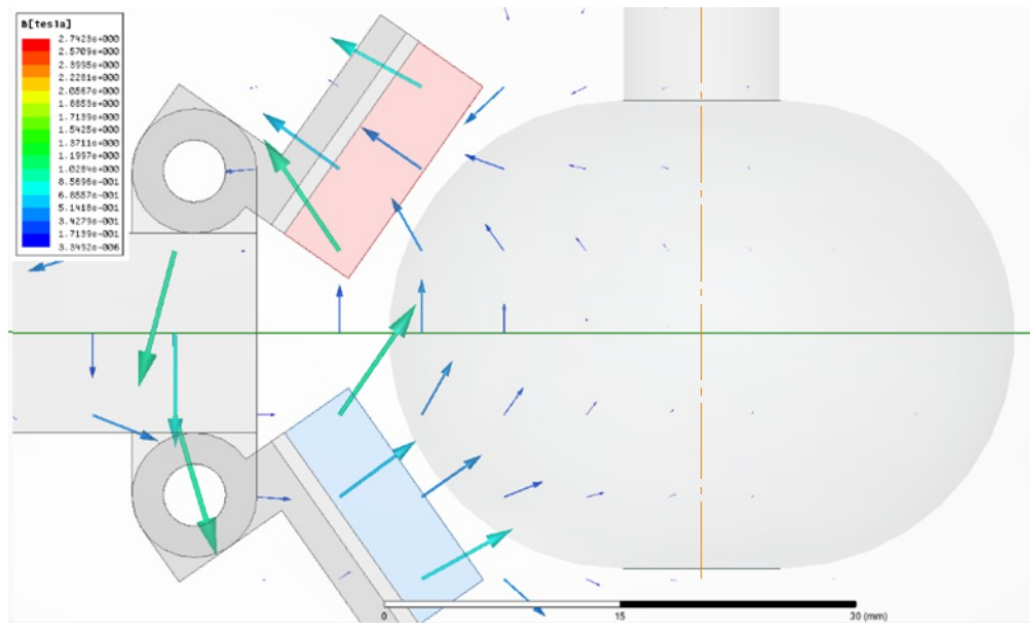


Рисунок 2.24 – Распределение силовых линий магнитного поля в рабочем зазоре для устройства с постоянными магнитами

Получена зависимость магнитной индукции от рассматриваемых точек средней линии рабочего зазора (рисунок 2.25). По графику видно, что наиболее благоприятные для последующей магнитно-абразивной обработки условия выполняются – магнитная индукция достигает значения 0,5 Тл по большей части рабочего зазора. Это значит, что такое выполнение устройства подходит для обеспечения равномерной обработки сложнопрофильной поверхности.

Примем 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 $N54$ соответственно.

Тем не менее, динамика магнитно-абразивной массы в центральной точке наблюдения может несколько отличаться от динамики в остальных точках наблюдения. Поэтому проведено моделирование динамики магнитно-абразивной массы в процессе обработки (рисунок 2.26).

На рисунке 2.26 показано состояние магнитно-абразивной массы в момент времени $t=30$ с после начала обработки.

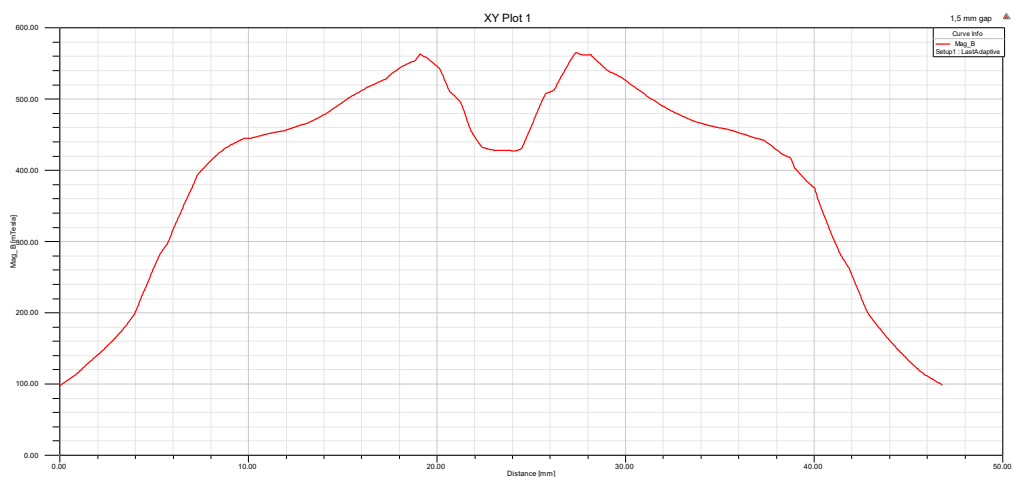


Рисунок 2.25 – График зависимости магнитной индукции от рассматриваемых точек средней линии рабочего зазора

Видно, что магнитно-абразивная масса скопилась в полости между постоянными магнитами и не двигается там, однако в непосредственном контакте с обрабатываемой поверхностью находится преимущественно движущаяся магнитно-абразивная масса. Плотность магнитно-абразивных частиц по всему профилю обрабатываемой поверхности приблизительно равна.

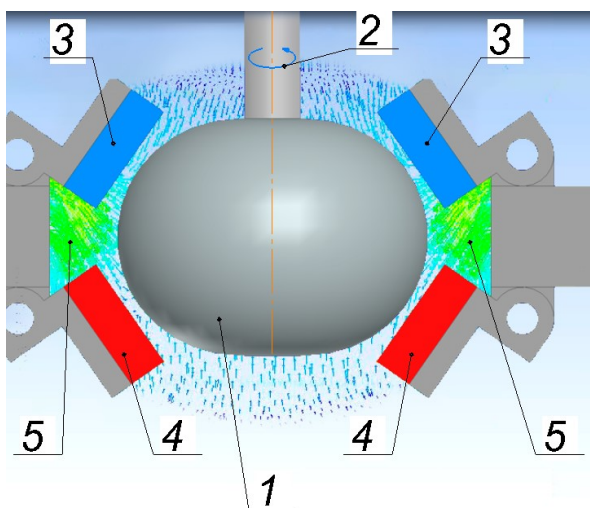


Рисунок 2.26 – Плотность магнитно-абразивного порошка после 30 с обработки, где:

- 1 – обрабатываемая заготовка; 2 – вращательное движение заготовки;
- 3 – магниты полярности N ; 4 – магниты полярности S ;
- 5 – скопления малоподвижной магнитно-абразивной массы [91]

Частота вращения заготовки n ограничивается технологическими возможностями используемого токарного станка *JET GHB 1340A DRO* (рисунок 2.27). Принимаем предварительно значения частоты вращения заготовки n от 115 до 750 мин⁻¹.



Рисунок 2.27 – Частоты вращения шпинделя токарно-винторезного станка *JET GHB 1340A DRO*

Экспериментальные исследования проводили на заготовках, представляющих собой вал с размещенным на одном из его концов сфероидом (рисунок 2.28). Материал заготовки – алюминиевый сплава марки АМц.

Проведена предварительная серия опытов, в каждом отдельном опыте сохраняли следующие значения технологических параметров МАО: магнитная индукция $B = 1,15$ Тл (магниты неодимовые *N54*); время обработки $t = 8$ мин; величина рабочего зазора $\delta = 2$ мм. масса порошка $m = 90$ г; фракция порошка *Pr10P6M5* $\Delta = 60-160$ мкм. Предварительно определен 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 $A = 0,5-1,5$ мм с постоянным периодом осцилляции $T = 2$ с.

Получены снимки сложнопрофильной поверхности до и после МАО по предлагаемому способу с помощью разработанного устройства (рисунок 2.29).

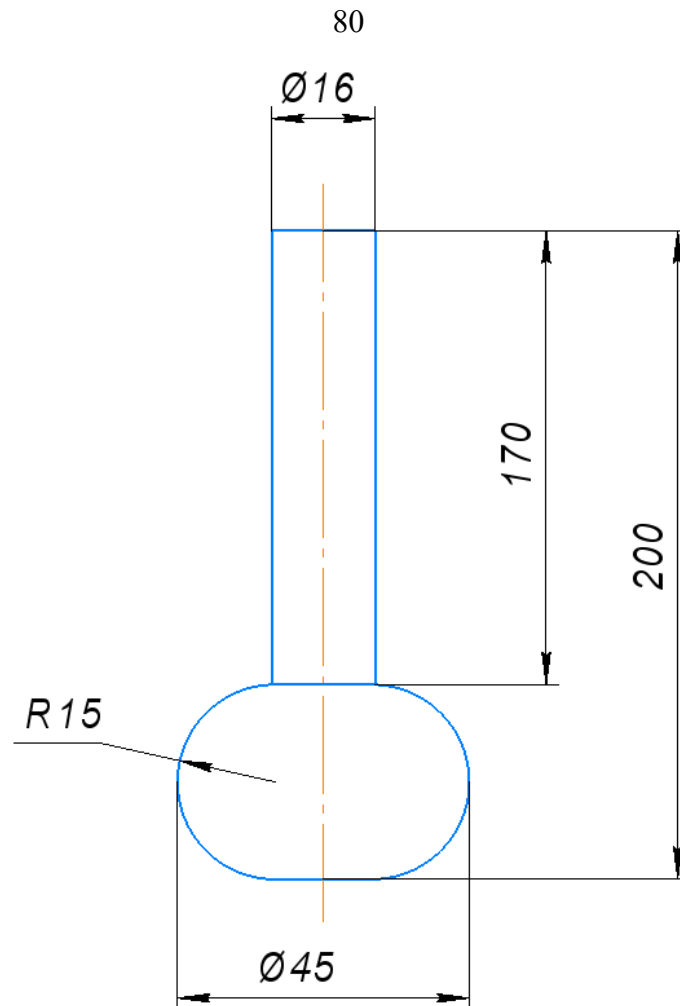


Рисунок 2.28 – Эскиз заготовки

Для обоих крайних значений рабочих параметров наблюдаются изменения в качестве обработанной поверхности. При этом для больших значений характерны признака шаржирования – внедрения абразивных частиц в поверхность заготовки. В целом, результаты предварительных опытов показывают, что принятые предварительно значения технологических параметров являются удовлетворительными.

Таким образом, принимаем диапазон частоты вращения заготовки в соответствии с режимами работы токарного станка JET GHB 1340A DRO $n = 115-750 \text{ мин}^{-1}$, диапазон значений амплитуды осцилляции устройства $A = 0,5-1,5 \text{ мм}$ с постоянным периодом осцилляции $T = 2 \text{ с}$.

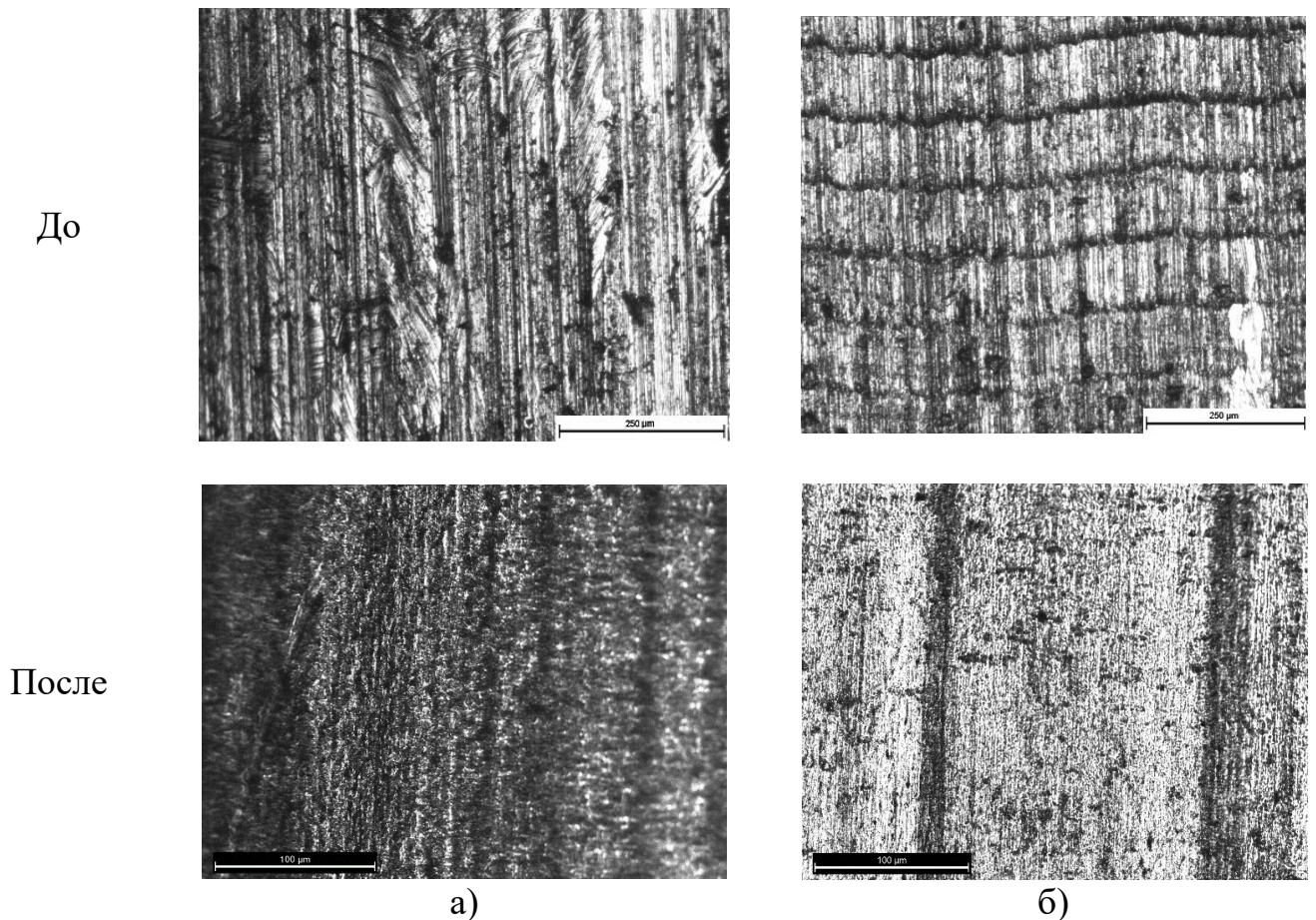


Рисунок 2.29 – Снимки сложнопрофильной поверхности до и после МАО при:
 а) $n=115 \text{ мин}^{-1}$, $A=0,5 \text{ мм}$; б) $n=750 \text{ мин}^{-1}$, $A=1,5 \text{ мм}$

2.4 Выводы по второй главе

В результате проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Предложен способ МАО сложнопрофильных поверхностей и устройство для его осуществления, которые позволяют сориентировать кассету с постоянными магнитами таким образом, чтобы обеспечить параллельность рабочих поверхностей постоянных магнитов касательным к сложнопрофильной поверхности и эквидистантность рабочих поверхностей постоянных магнитов от этих касательных. Предложенный способ МАО и устройство для его осуществления обеспечивают равномерное магнитное поле в рабочем зазоре, что приводит к равномерному качеству обрабатываемой сложнопрофильной поверхности. Устройство можно применять как на фрезерных, так и токарных станках, а также на тех станках, где обеспечивается вращение обрабатываемой

заготовки, а устройство возможно сориентировать относительно обрабатываемой поверхности.

2. В ходе серии предварительных экспериментальных исследований 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.

3. 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 соответственно.

4. 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 $A = 0,5-1,5$ мм с постоянным периодом осцилляции $T = 2$ с.

5. В процессе MAO добавление полусинтетической СОЖ RANGOIL-UNIVERSAL повысило плотность магнитно-абразивной массы, ее прилегание к обрабатываемой поверхности.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ И СЪЕМ МАТЕРИАЛА

Технологическое обеспечение качества сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц посредством МАО возможно при назначении таких технологических параметров обработки, которые позволят достичь необходимой кинематики процесса. Одним из важных аспектов магнитно-абразивной обработки является создание высокой и равномерной плотности магнитного потока в зоне обработки, что существенно влияет на силу, действующую на отдельные абразивные зерна, и помогает улучшить процесс обработки. В результате моделирования установлено, что предлагаемая конструкция устройства на постоянных магнитах обеспечивает равномерное распределение магнитной индукции по всему обрабатываемому профилю. Однако, остаются неизвестными значения магнитной индукции, при которых МАО будет наиболее эффективна.

Также неизвестны значения частоты вращения заготовки, амплитуды движения устройства и времени обработки, которые позволят достичь необходимое качество обработанной сложнопрофильной поверхности за наиболее короткий промежуток времени.

Таким образом, целью настоящей главы является установление закономерностей изменения шероховатости обработанной сложнопрофильной поверхности в зависимости от сочетаний технологических параметров обработки и разработка математических моделей. Производительность магнитно-абразивной обработки оценивали по удельному съему материала, закономерности изменения которого также установлены.

В качестве обрабатываемых изделий рассматривали сфероиды из алюминиевого сплава марки АМц с радиусом скругления 15 мм и диаметром 45 мм (рисунок 2.28).

3.1 Методика проведения экспериментальных исследований

Теория планирования эксперимента для получения математических моделей зависимостей измеряемых параметров от варьируемых с целью сокращения объема экспериментов предусматривает применение центрального композиционного плана [6, 50, 68].

Технологические параметры МАО в ходе экспериментальных исследований разделены на три группы: варьируемые, статические и измеряемые параметры. План предусматривает 5 уровней каждого варьируемого параметра.

Варьируемыми параметрами считали те параметры, которые будут изменяться в ходе эксперимента: величина магнитной индукции B , время обработки t , частота вращения заготовки n , амплитуда осцилляции устройства A . Величина магнитной индукции B изменялась путем замены боковых подвижных частей устройства и магнитов, расположенных на них. Величину магнитной индукции B измеряли датчиком Холла для каждого магнита отдельно на его поверхности, полученное значение сверяли с техническими характеристиками магнита, указанными на его упаковке. Применяли неодимовые магниты марок от $N33$ до $N54$ с магнитной индукцией на поверхности от 0,55 до 1,15 Тл соответственно. Значения частоты вращения заготовки n ограничивались значениями, которые можно было получить на токарном станке. Осцилляцию устройства осуществляли с постоянным периодом 2 секунды.

Экспериментальные исследования проводили на токарном станке *JET GHB 1340A DRO*, в резцедержателе которого было размещено разработанное устройство с постоянными магнитами.

МАО осуществлялась согласно предлагаемому способу, который включает в себя предварительную ориентацию устройства относительно сложнопрофильной поверхности таким образом, чтобы рабочие плоскости магнитов были параллельны касательным к обрабатываемой поверхности.

Статическими параметрами считали те параметры, которые не изменяли в ходе экспериментальных исследований. К ним относим: геометрию обрабатываемых заготовок, тип, зернистость и массу магнитно-абразивного

порошка, тип смазочно-охлаждающей жидкости. Также к статическим параметрам относим величину рабочего зазора, пренебрегая изменениями на величину амплитуды осцилляции.

Измеряемыми параметрами являлись шероховатость обработанной сложнопрофильной поверхности R_a и величину удельного съема материала q .

В таблицах 3.1-3.2 указаны принимаемые величины варьируемых и статических параметров.

Таблица 3.1 – Варьируемые технологические параметры

Варьируемые параметры	Символ	Уровень				
		-2	-1	0	+1	+2
1. Величина магнитной индукции (Тл)	B	0,55	0,7	0,85	1,0	1,15
2. Время обработки (мин)	t	4	6	8	10	12
3. Частота вращения (мин^{-1})	n	115	190	300	460	750
4. Амплитуда осцилляции (мм)	A	0,25	0,5	1	1,25	1,5

Таблица 3.2 – Статические технологические параметры

Статические параметры	
Обрабатываемая сложнопрофильная поверхность	Сфероид из алюминиевого сплава марки АМц с радиусом скругления 15 мм, диаметром 45 мм
Марка магнитно-абразивного порошка	Пр10Р6М5
Зернистость магнитно-абразивного порошка Δ	60..160 мкм
Масса ФАП	90 г
Величина рабочего зазора δ	2 мм
Период осцилляции T	2 с
Смазочно-охлаждающая жидкость	полусинтетическая RANGOIL-UNIVERSAL

Контроль шероховатости обработанной сложнопрофильной поверхности проводили по высотному параметру шероховатости R_a с применением профилометра *Mitutoyo Surftest SJ-210*.

Контроль шероховатости проводили на 9 отрезках, расположенных в верхней, центральной и нижней частях сфероида (рисунок 3.1). Проводили по 3 измерения на каждом отрезке.

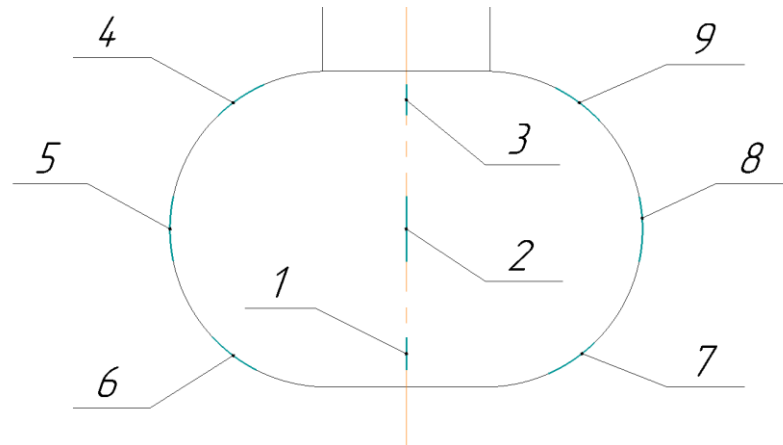


Рисунок 3.1 – Отрезки, на которых измерялась шероховатость сложнопрофильной поверхности

В результате измерений рассчитывали среднее значение шероховатости (3.1):

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

где n – общее количество измерений, i – номер измерения.

На рисунках 3.2 и 3.3 показано измерение шероховатости и результат измерения.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Измерение значения шероховатости сложнопрофильной поверхности в центральной части сфероида, где: а – общий вид; б – вид сбоку

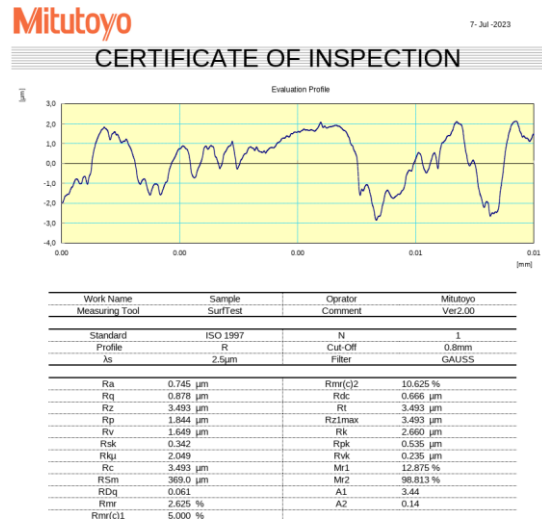


Рисунок 3.3 – Результаты измерения шероховатости сложнопрофильной поверхности в центральной части сфероида

Проведено измерение массы алюминиевых заготовок до и после MAO. Полученные значения масс, а также их разница, использованы для оценки эффективности магнитно-абразивной обработки. Массу заготовок измеряли на весах марки *ВЛТЭ 310* (рисунок 3.4).

Визуальный анализ и съемку поверхности до и после обработки проводили с использованием лабораторного инвертированного микроскопа *Leica DM ILM HC* (рисунок 3.5).



Рисунок 3.4 – Измерительные весы марки *ВЛТЭ 310*



Рисунок 3.5 – Микроскоп инвертированный лабораторный *Leica DM ILM HC*

3.2 Планирование эксперимента и разработка математических моделей

Применены различные статистические методы, предварительные экспериментальные исследования с целью установления диапазонов технологических параметров и значений статических параметров.

Определение числа опытов, являющегося необходимым и достаточным для решения поставленной цели – установления закономерностей технологического обеспечения равномерной шероховатости на финишной операции, связано с необходимостью:

- минимизировать число опытов;
- выбрать логически обоснованные процедуры и четко следовать им;
- применить математический аппарат, который формализует результаты экспериментальных исследований;
- получить математические модели, соответствующие критериям адекватности.

Так как заранее известно, что процесс МАО обладает существенными нелинейными свойствами – шероховатость поверхности зависит от некоторых технологических параметров обработки нелинейно, то целесообразно для получения регрессионной модели в виде полинома второй степени применить план второго порядка.

Выбран ротатабельный центральный композиционный план, при котором информационная поверхность приближается к сферической [6, 50, 68].

Уравнение регрессии (3.2), имеет следующий вид:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i \leq j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2. \quad (3.2)$$

Общее число опытов описывается уравнением (3.3):

$$N = N_{\text{я}} + 2k + N_0, \quad (3.3)$$

где $N_{\text{я}}$ – опыты в ядре плана;

k – факторы;

$2k$ – опыты в звездных точках;

N_0 – опыты в центре плана.

Основные характеристики ротатбельного центрального композиционного плана, необходимые для построения матрицы плана, представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Характеристики РЦКП

Число факторов k	Число опытов в ядре плана, $N_{я}$	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

Установили уровни варьируемых факторов в соответствии с интервалом варьирования. Так как частота вращения заготовки ограничивается возможностями токарного станка, то для частоты вращения заготовки установим гибкий интервал варьирования.

Каждому уровню варьируемых факторов относится кодовое значение фактора. Таким образом, значения факторов для каждого уровня представлены в таблице 3.4, а матрица плана представлена в таблице 3.5.

Таблица 3.4 – Уровни варьируемых факторов

Факторы	Магнитная индукция B , Тл	Время обработки t , мин	Частота вращения заготовки n , мин ⁻¹	Амплитуда движения устройства A , мм
Основной уровень (X_{i0})	0,85	8	300	1
Интервал варьирования (ΔX_i)	0,15	2		0,25
Верхний уровень ($x_i = +1$)	1	10	460	1,25
Нижний уровень ($x_i = -1$)	0,7	6	190	0,75
Звездная точка $+\alpha$ ($x_i = +2$)	1,15	12	750	1,5
Звездная точка $-\alpha$ ($x_i = -2$)	0,55	4	115	0,5

Таблица 3.5 – Матрица плана эксперимента

Область	Номер опыта	Значение фактора				Код фактора				
		V , Тл	t , мин	n , мин ⁻¹	A , мм	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4
Ядро	1	1,00	10	460	1,25	+1	+1	+1	+1	+1
	2	0,70	10	460	1,25	+1	-1	+1	+1	+1
	3	1,00	6	460	1,25	+1	+1	-1	+1	+1
	4	0,70	6	460	1,25	+1	-1	-1	+1	+1
	5	1,00	10	190	1,25	+1	+1	+1	-1	+1
	6	0,70	10	190	1,25	+1	-1	+1	-1	+1
	7	1,00	6	190	1,25	+1	+1	-1	-1	+1
	8	0,70	6	190	1,25	+1	-1	-1	-1	+1
	9	1,00	10	460	0,75	+1	+1	+1	+1	-1
	10	0,70	10	460	0,75	+1	-1	+1	+1	-1
	11	1,00	6	460	0,75	+1	+1	-1	+1	-1
	12	0,70	6	460	0,75	+1	-1	-1	+1	-1
	13	1,00	10	190	0,75	+1	+1	+1	-1	-1
	14	0,70	10	190	0,75	+1	-1	+1	-1	-1
	15	1,00	6	190	0,75	+1	+1	-1	-1	-1
	16	0,70	6	190	0,75	+1	-1	-1	-1	-1
Звездные точки	17	1,15	8	300	1	+1	+2	0	0	0
	18	0,55	8	300	1	+1	-2	0	0	0
	19	0,85	12	300	1	+1	0	+2	0	0
	20	0,85	4	300	1	+1	0	-2	0	0
	21	0,85	8	750	1	+1	0	0	+2	0
	22	0,85	8	115	1	+1	0	0	-2	0
	23	0,85	8	300	1,5	+1	0	0	0	+2
	24	0,85	8	300	0,5	+1	0	0	0	-2
Центр	25	0,85	8	300	1	+1	0	0	0	0
	26	0,85	8	300	1	+1	0	0	0	0
	27	0,85	8	300	1	+1	0	0	0	0
	28	0,85	8	300	1	+1	0	0	0	0
	29	0,85	8	300	1	+1	0	0	0	0
	30	0,85	8	300	1	+1	0	0	0	0
	31	0,85	8	300	1	+1	0	0	0	0

После проведения экспериментальных исследований полученные результаты проходили статистическую обработку, в ходе которой определялись коэффициенты уравнений регрессии, полученная модель проверялась на адекватность.

Во-первых, проведен расчет коэффициентов уравнения регрессии по формулам (3.4-3.7):

$$b_0 = c_1 \sum_{u=1}^N y_u - c_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u, \quad (3.4)$$

$$b_i = c_3 \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u, \quad (3.5)$$

$$b_{ij} = c_4 \sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u y_u, \quad (3.6)$$

$$b_{ii} = c_5 \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + c_6 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - c_2 \sum_{i=1}^N y_u, \quad (3.7)$$

где y_u – экспериментальное значение,

x_i, x_j – значение факторов.

Таблицы со вспомогательными константами c для ротатабельных планов представлены в трудах, посвященных применению статистических методов планирования экспериментов [50, с. 219-220].

Во-вторых, рассчитана дисперсия воспроизводимости S_y^2 по формуле (3.8):

$$S_y^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{j=1}^{n_0} (y_j - \bar{y})^2. \quad (3.8)$$

В-третьих, определена дисперсия каждого коэффициента модели S_b по формулам (3.9-3.16), ковариации коэффициентов cov_{bb} по формулам (3.17-3.18):

$$S_{b_0}^2 = c_1 S_y^2, \quad (3.9)$$

$$S_{b_0} = c_7 S_y, \quad (3.10)$$

$$S_{b_j}^2 = c_3 S_y^2, \quad (3.11)$$

$$S_{b_j} = c_8 S_y, \quad (3.12)$$

$$S_{b_{ij}}^2 = c_4 S_y^2, \quad (3.13)$$

$$S_{b_{ij}} = c_9 S_y, \quad (3.14)$$

$$S_{b_{jj}}^2 = (c_5 + c_6) S_y^2, \quad (3.15)$$

$$S_{b_{jj}} = c_{10} S_y, \quad (3.16)$$

$$cov_{b_0 b_{ii}} = -c_2 S_y^2, \quad (3.17)$$

$$\text{cov}_{b_{ii}b_{jj}} = c_6 S_y^2, \quad (3.18)$$

В-четвертых, определяли доверительные интервалы коэффициентов уравнения (3.19):

$$\Delta b_i = t_{a;f_1} \cdot S_{b_i}, \quad (3.19)$$

где $t_{a;f_1}$ – критерий Стьюдента [50];

S_{b_i} – среднеквадратичная ошибка в определении коэффициента регрессии.

Статистическая значимость коэффициентов определяется по формулам (3.20-3.23):

$$|b_0| \geq t_{a;f_1} \cdot S_{b_0}, \quad (3.20)$$

$$|b_i| \geq t_{a;f_1} \cdot S_{b_i}, \quad (3.21)$$

$$|b_{ii}| \geq t_{a;f_1} \cdot S_{b_{ii}}, \quad (3.22)$$

$$|b_{ij}| \geq t_{a;f_1} \cdot S_{b_{ij}}. \quad (3.23)$$

Дисперсия неадекватности модели оценивается по формуле (3.24):

$$SS_{\text{неад}}^2 = \frac{SS_{\text{неад}}}{f_2}, \quad (3.24)$$

где $SS_{\text{неад}}$ – сумма квадратов, связанная с дисперсией неадекватности, f_2 – число степеней свободы.

Сумма квадратов, связанная с дисперсией неадекватности, рассчитывается по формуле (3.25):

$$SS_{\text{неад}} = N_0(y_0^p - \bar{y}_0)^2 + \sum_{u=1}^{24} (y_u^p - y_u^3)^2, \quad (3.25)$$

Число степеней свободы, связанное с оценкой дисперсии (3.26):

$$f_2 = N - \frac{(k+2)(k+1)}{2}, \quad (3.26)$$

где N – число опытов,

k – число факторов в эксперименте.

Проверку гипотезы адекватности модели проводили по F-критерию Фишера (3.27):

$$F_p = \frac{SS_{\text{неад}}^2}{S_y^2}. \quad (3.27)$$

Если $F_p < F_{\text{табл}}$, то модель считается адекватной [50].

3.3 Влияние технологических параметров на шероховатость

Результаты экспериментальных исследований по определению влияния технологических параметров МАО на шероховатость сложнопрофильной поверхности представлены в приложении А, таблица А.1.

Расчет коэффициентов регрессионной модели проведено в соответствии с методикой, описанной в подразделе 3.2. Результаты представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – 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	0,747	0,74628571 4	0,000146257 1	0,0002089576	0,01445531	0,035415506	
b_1	-0,060			0,00006095	0,007806662	0,019126322	
b_2	0,035						
b_3	-0,049						
b_4	-0,086			0,000009141	0,009560895	0,023424193	
b_{12}	0,020						
b_{13}	-0,014						
b_{14}	0,013						
b_{23}	0,059			0,00005115	0,007152314	0,01752317	
b_{24}	-0,021						
b_{34}	0,021						
b_{11}	0,063						
b_{22}	-0,010						
b_{33}	-0,054						
b_{44}	-0,006						

В соответствии с рассчитанными коэффициентами уравнение регрессии имеет вид (3.28):

$$y_{Ra} = 0,747 - 0,06x_1 + 0,035x_2 - 0,049x_3 - 0,086x_4 + 0,02x_1x_2 - 0,014x_1x_3 + 0,013x_1x_4 + 0,059x_2x_3 - 0,021x_2x_4 + 0,021x_3x_4 + 0,063x_{11} - 0,01x_{22} - 0,054x_{33} - 0,006x_{44}. \quad (3.28)$$

Расчетные значения приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Экспериментальные и расчетные значения отклика уравнения шероховатости

Номер опыта	$R_{a\text{экс.}}$	$R_{a\text{расч.}}$	Δy_{Ra}^2	Номер опыта	$R_{a\text{экс.}}$	$R_{a\text{расч.}}$	Δy_{Ra}^2
1	0,155	0,65816248	0,00867925	13	0,286	0,85385064	0,00161197
2	0,208	0,7408388	0,01273259	14	0,279	0,93102696	0,00435956
3	0,226	0,4723236	0,00236939	15	0,295	0,81951176	0,00911800
4	0,112	0,63649992	0,00837224	16	0,296	0,97818808	0,00174824
5	0,113	0,62267024	0,00700071	17	0,347	0,87924896	0,00068901
6	0,171	0,64934656	0,00263647	18	0,355	1,1206016	0,00799207
7	0,277	0,67233136	0,00037370	19	0,296	0,77776416	0,02796783
8	0,133	0,78050768	0,00005637	20	0,188	0,6390864	0,01083398
9	0,268	0,80384288	0,00009688	21	0,132	0,43291752	0,00563738
10	0,269	0,9370192	0,00102523	22	0,126	0,62693304	0,00014240
11	0,103	0,534004	0,00000000	23	0,202	0,54974488	0,02830979
12	0,221	0,74868032	0,00439830	24	0,286	0,89310568	0,01104720
Σ							0,15719855

Проведена оценка адекватности модели по F-критерию Фишера (3.28). Расчетное значение критерия Фишера $F_{\text{расч.}} = 0,042241$, а табличное значение при $\alpha = 0,05$: $F_{\text{табл}, 0,05; 4; 26} = 2,742$, то принимаем полученную модель для оценки комбинированного влияния технологических параметров MAO на шероховатость адекватной.

Уравнение регрессии (3.28) было раскодировано, получена модель (3.29).

$$\begin{aligned}
 R_a = & 3,710 - 5,734B + 0,035t - 3,406n \cdot 10^{-4} - 0,002A + \\
 & 2,8B^2 - 2,4S^2 \cdot 10^{-6} - 0,025t^2 - 2,143n^2 \cdot 10^{-6} + 1,7BS \cdot 10^{-3} - \\
 & 5,879Bn \cdot 10^{-4} + 2,646Sn \cdot 10^{-6} + 0,067Bt - 2,1St \cdot 10^{-4} - \\
 & 0,029t + 1,859nt \cdot 10^{-4}.
 \end{aligned}
 \tag{3.29}$$

После упрощения путем отбрасывания слагаемых, имеющих ничтожно малое значение получаем окончательную модель (3.30).

$$\begin{aligned}
 R_a = & 3,710 - 5,734B + 0,035t - 0,002A + 2,8B^2 - 0,025t^2 + \\
 & 0,067Bt - 0,029t.
 \end{aligned}
 \tag{3.30}$$

Таким образом, получены математические полиномиальные модели влияния каждого технологического параметра на шероховатость сложнопрофильной поверхности (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Математические модели влияния технологических параметров на шероховатость

Технологический параметр	Математическая модель
Магнитная индукция B	$R_a = 3,2561 - 5,6427 \cdot B + 3,0827 \cdot B^2$
Время обработки t	$R_a = 0,4511 + 0,057 \cdot t - 0,0025 \cdot t^2$
Частота вращения n	$R_a = 0,7313 + 0,4n \cdot 10^{-3} - 1,0854n^2 \cdot 10^{-6}$
Амплитуда осцилляции A	$R_a = 0,9869 - 0,1394A - 0,102A^2$

Графические представления закономерностей изменения шероховатости сложнопрофильной поверхности от варьируемых технологических параметров представлены на рисунке 3.6.

В результате анализа полученных закономерностей установлено, что наименьшая шероховатость сложнопрофильной поверхности обеспечивается при магнитной индукции B в диапазоне от 0,8 до 1 Тл (рисунок 3.6, а). Это объясняется тем, что при магнитной индукции от 0,8 до 1 Тл в созданных условиях процесса магнитно-абразивной обработки обеспечивается необходимая жесткость магнитно-абразивной щетки – достаточной для микрорезания и

перемешивания абразивных частиц в процессе обработки. Повышение магнитной индукции выше 1 Тл обеспечивает такую жесткость магнитно-абразивной щетки, при которой в процессе обработки не происходит перемешивание абразивных зерен, в микрорезании участвует постоянный слой абразивных частиц.

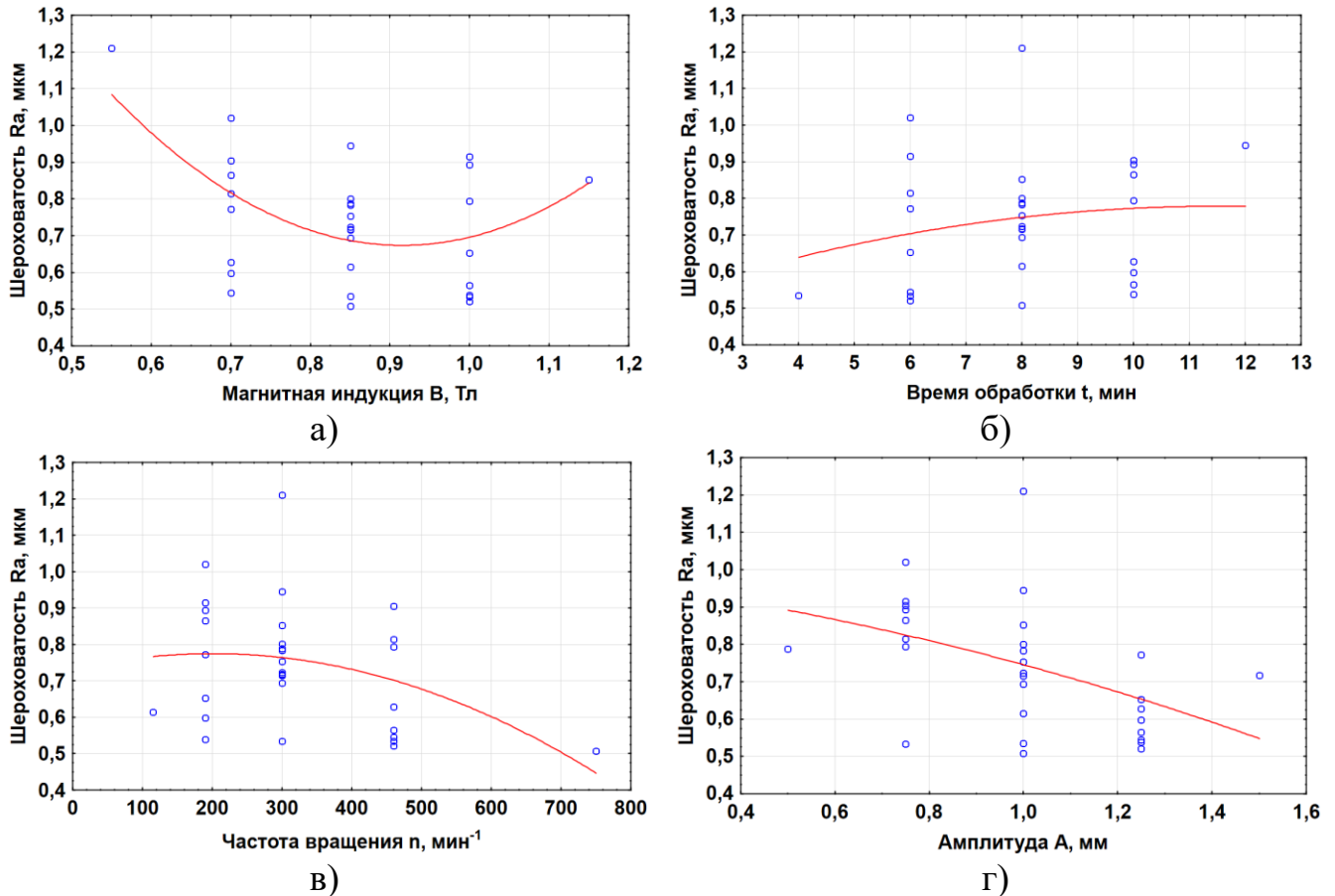


Рисунок 3.6 – Графики влияния а) магнитной индукции, б) времени обработки, в) частоты вращения, г) амплитуды осцилляции на шероховатость R_a , мкм при обработке сложнопрофильной поверхности

Определено, что оптимальным временем обработки t сложнопрофильных поверхностей является диапазон от 4 до 8 минут (рисунок 3.6, б), так как обеспечивается наименьшая шероховатость R_a от 0,5 до 0,7 мкм. При этом увеличение времени обработки свыше 8 минут приводит к меньшим результатам – обеспечивается шероховатость около 0,75 мкм. Объясняется данная закономерность тем, что в процессе MAO большая часть абразивных зерен засаливается, эффективность обработки падает.

Наибольшее влияние на шероховатость сложнопрофильной поверхности в условиях проведенного эксперимента оказывают рабочие движения – частота вращения заготовки n и амплитуда осцилляции устройства A . Так, согласно графику (рисунок 3.6, в), увеличение частоты вращения n свыше 300 мин^{-1} приводит к значительному снижению шероховатости R_a . Частота вращения n обеспечивает не только главное движение процесса обработки, но и перемешивание магнитно-абразивных частиц.

Повышение амплитуды осцилляции заготовки A также способствует перемешиванию магнитно-абразивного порошка, о чем свидетельствуют результаты эксперимента, отраженные на рисунке 3.6, г. Сочетание частоты вращения и осцилляции заготовки обеспечивают необходимое и достаточное сочетание движений, способствующих снижению шероховатости сложнопрофильной поверхности.

Получены математические модели комбинированного влияния технологических параметров на шероховатость (таблица 3.9). Проведена оценка комбинированного влияния технологических параметров на шероховатость сложнопрофильной поверхности R_a (рисунок 3.7).

Таблица 3.9 – Математические модели комбинированного влияния технологических параметров на шероховатость

Комбинация технологических параметров	Математическая модель
Магнитная индукция B + Время обработки t	$R_a = 3,51 - 6,16B - 0,025t + 3,07B^2 + 0,07Bt - 0,001t^2$
Магнитная индукция B + Амплитуда осцилляции A	$R_a = 3,88 - 5,98B - 0,62A + 3,08B^2 + 0,34BA - 0,005A^2$
Амплитуда осцилляции A + Частота вращения n	$R_a = 1,03 - 0,11A - 0,19A^2 + 0,0004An$
Амплитуда осцилляции A + Время обработки t	$R_a = 0,34 + 0,23A + 0,10t - 0,12A^2 - 0,04At - 0,0026t^2$
Частота вращения n + Время обработки t	$R_a = 0,74 - 0,001n + 0,05t + 0,0002nt - 0,0065t^2$
Магнитная индукция B + Частота вращения n	$R_a = 4,3 - 8,38B + 0,0006n + 4,89B^2 - 0,0005Bn$

Установлено, что шероховатость $R_a < 0,65$ мкм удается обеспечить при магнитной индукции от 0,7 до 1,15 Тл. При этом время обработки должно составлять от 4 до 8 минут (рисунок 3.7 а). Для данных значений магнитной индукции B и времени обработки t обеспечивается необходимая жесткость магнитно-абразивной щетки, при этом абразивные частицы порошка Пр10Р6М5 не успевают окислиться, обеспечивая эффективную обработку.

Шероховатость $R_a < 0,7$ мкм удается обеспечить также при магнитной индукции B от 0,8 до 1,1 Тл и амплитуде осцилляции свыше 1,2 мм (рисунок 3.7, б). Однако, при недостаточной частоте вращения заготовки n до 500 мин⁻¹ и малой амплитуде осцилляции до 1,2 мкм влияния данные технологические параметры на шероховатость сложнопрофильной поверхности практически не оказывают. В условиях проведенного эксперимента для указанных значений удалось добиться снижения шероховатости R_a с 1,3 мкм до 0,8-0,9 мкм (рисунок 3.7, в).

О сделанных ранее выводах свидетельствует график комбинированного влияния амплитуды A и времени обработки t на шероховатость R_a (рисунок 3,7 г). Шероховатость $R_a < 0,625$ мкм удается обеспечить при времени обработки t от 4 до 10 минут, при этом амплитуда осцилляции A должна быть более 1 мм.

Таким образом, установлено, что каждый технологический параметр обработки, рассматриваемый в данном эксперименте, оказывает влияния на шероховатость поверхности R_a . Сделаны выводы о связи технологических параметров обработки с перемешиванием МАП в процессе обработки. Минимальные значения шероховатости сложнопрофильной поверхности достигаются при следующих значениях технологических параметров: магнитная индукция $B=0,7-1,15$ Тл; время обработки $t=4-8$ мин; частота вращения заготовки $n=460-750$ мин⁻¹; амплитуда осцилляции $A = 1-1,5$ мм.

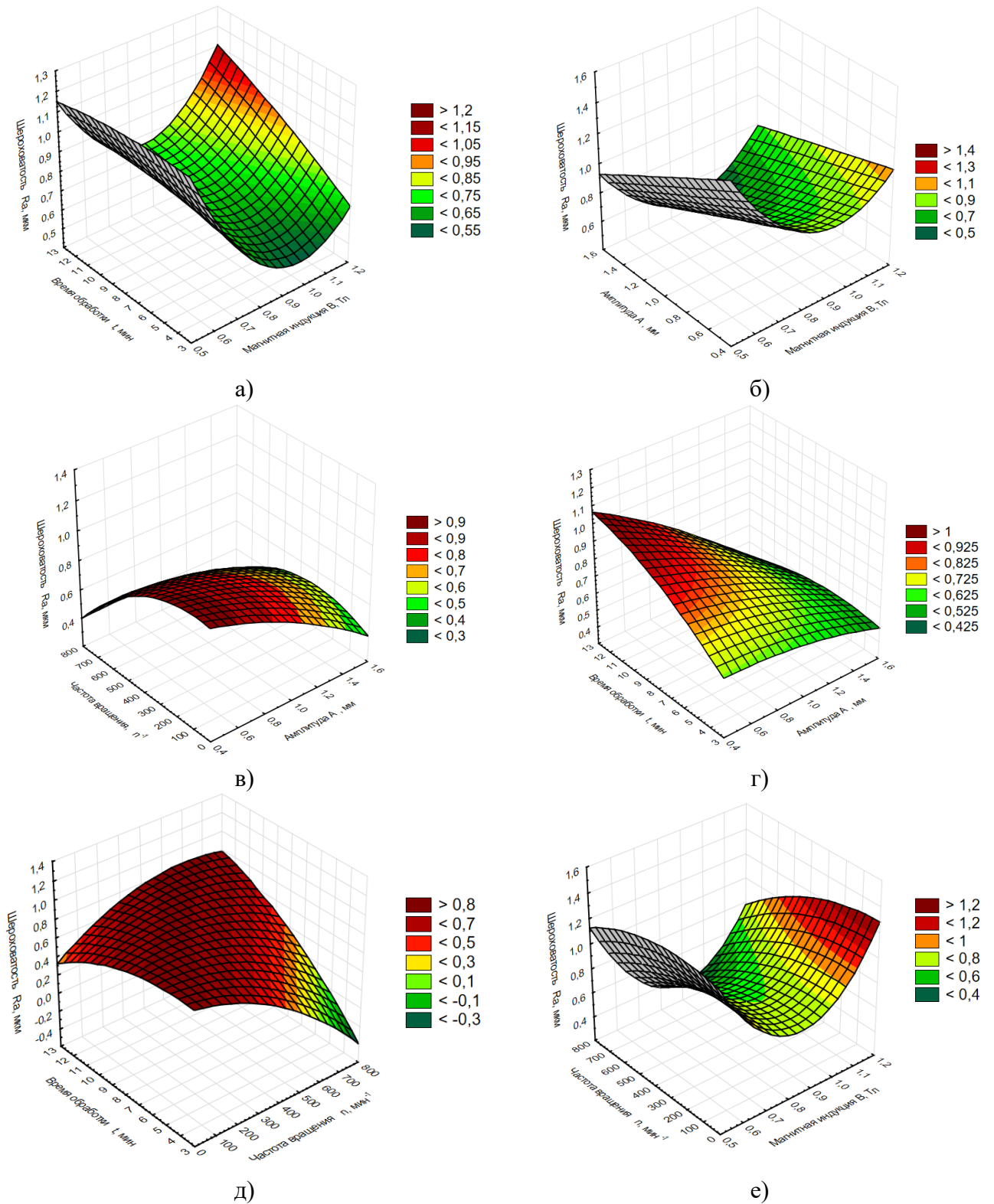


Рисунок 3.7 – Совместное влияние на шероховатость: а) времени обработки t и магнитной индукции B ; б) амплитуды осцилляции A и магнитной индукции B ; в) амплитуды осцилляции A и частоты вращения n ; г) амплитуды осцилляции A и времени обработки t ; д) частоты вращения n и времени обработки t ; е) частоты вращения n и магнитной индукции B

3.4 Влияние технологических параметров на удельный съем материала

Эффективность процесса MAO оценивалась по массе заготовок до и после MAO и удельному съему материала q , г/см² (3.31):

$$q = \frac{Q}{S}, \quad (3.31)$$

где Q – масса снятого материала, г;

S – площадь поверхности, см².

Площадь поверхности сфероида, имеющая прямой контакт с МАИ измерена методами компьютерного моделирования и составляет $S = 50$ см².

Результаты экспериментальных исследований по определению влияния технологических параметров MAO на съем материала со сложнопрофильной поверхности представлены в приложении А, таблица А.2.

Расчет коэффициентов регрессионной модели проведен в соответствии с методикой, описанной в подразделе 3.2. Результаты представлены в таблицах 3.10, 3.11.

Таблица 3.10 – Масса снятого материала при MAO

Номер опыта	Q_d , г	Q_p , г	Q , г	Номер опыта	Q_d , г	Q_p , г	Q , г
1	179,312	176,690	2,622	17	174,932	171,436	3,496
2	185,475	183,670	1,805	18	182,415	180,591	1,824
3	178,280	176,342	1,938	19	191,382	188,931	2,451
4	186,524	185,023	1,501	20	182,634	181,038	1,596
5	182,876	180,938	1,938	21	175,515	172,456	3,059
6	184,715	183,556	1,159	22	178,673	177,571	1,102
7	178,516	176,863	1,653	23	174,396	172,344	2,052
8	181,357	179,590	1,767	24	182,371	180,433	1,938
9	184,718	181,146	3,572	25	182,894	181,241	1,653
10	182,901	181,400	1,501	26	175,583	174,044	1,539
11	179,811	177,797	2,014	27	176,715	174,929	1,786
12	178,514	176,481	2,033	28	188,211	186,710	1,501
13	182,618	180,433	2,185	29	184,527	183,026	1,501
14	190,718	189,369	1,349	30	186,244	184,800	1,444
15	174,432	173,311	1,121	31	179,885	178,346	1,539
16	182,764	181,833	0,931				

Таблица 3.11 – Результаты расчета уравнения регрессии удельного съема материала

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	0,03135	0,03132286	$5,38406 \cdot 10^{-6}$	$0,000000769$ 2	0,00087705	0,002148769
b_1	0,00695			$0,00000022$	0,000473654	0,001160454
b_2	0,00407					
b_3	0,00733					
b_4	-0,00008			$0,00000034$	0,000580089	0,001421219
b_{12}	0,00501					
b_{13}	0,00202					
b_{14}	-0,00145			$0,00000019$	0,000433953	0,001063185
b_{23}	0,00107					
b_{24}	-0,00230					
b_{34}	-0,00273					
b_{11}	0,00423					
b_{22}	0,00105					
b_{33}	0,00134					
b_{44}	0,00091					

Уравнение регрессии имеет следующий вид (3.32):

$$\begin{aligned}
 y_q = & 0,03135 + 0,00695x_1 + 0,00407x_2 + 0,00733x_3 - \\
 & 0,00008x_4 + 0,00501x_1x_2 + 0,00202x_1x_3 - 0,00145x_1x_4 + \\
 & 0,00107x_2x_3 - 0,00230x_2x_4 - 0,00273x_3x_4 + 0,00423x_{11} + \\
 & 0,00105x_{22} + 0,00134x_{33} + 0,00091x_{44}.
 \end{aligned}
 \tag{3.32}$$

Расчетные значения приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Экспериментальные и расчетные значения отклика уравнения удельного съема материала

Номер опыта	q экс.	q расч.	Δy_q^2	Номер опыта	q экс.	q расч.	Δy_q^2
1	0,05244	0,05877427	0,00004012	13	0,0437	0,04559977	0,00000361
2	0,0361	0,03370899	0,00000572	14	0,02698	0,02281449	0,00001735
3	0,03876	0,04308278	0,00001869	15	0,02242	0,02496829	0,00000649
4	0,03002	0,0380625	0,00006468	16	0,01862	0,02222801	0,00001302
5	0,03876	0,04339893	0,00002152	17	0,06992	0,06219392	0,00005969
6	0,02318	0,02640865	0,00001042	18	0,03648	0,03438836	0,00000437
7	0,03306	0,03198244	0,00000116	19	0,04902	0,04370012	0,00002830
8	0,03534	0,03503716	0,00000009	20	0,03192	0,02742215	0,00002023
9	0,07144	0,07190011	0,00000021	21	0,06118	0,05136398	0,00009635
10	0,03002	0,04103983	0,00012144	22	0,02204	0,0220383	0,00000000
11	0,04028	0,04699363	0,00004507	23	0,04104	0,03483279	0,00003853
12	0,04066	0,03617835	0,00002009	24	0,03876	0,03514948	0,00001304
Σ							0,000650202

Расчетное значение критерия Фишера равняется $F_{\text{расч.}} = 0,0001963$, а табличное значение при $\alpha = 0,05$: $F_{\text{табл}, 0,05; 4; 26} = 2,742$, то принимаем полученную модель для оценки комбинированного влияния технологических параметров МАО на съем материала со сложнопрофильной поверхности адекватной.

Уравнение регрессии (3.32) было раскодировано, получена модель (3.33).

$$\begin{aligned}
 q = & 0,212 - 0,408 \cdot B - 1,45 \cdot 10^{-2} \cdot t - 4,180 \cdot 10^{-5} \cdot n - \\
 & + 3,589 \cdot 10^{-4} \cdot S + 0,188 \cdot B^2 - 3,64 \cdot 10^{-7} \cdot S^2 - 2,625 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + \\
 & 5,317 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 - 1,933 \cdot 10^{-4} \cdot B \cdot S + 8,483 \cdot 10^{-5} \cdot B \cdot n - 3,439 \cdot 10^{-7} \cdot \\
 & S \cdot n + 1,67 \cdot 10^{-2} \cdot B \cdot t - 2,3 \cdot 10^{-5} \cdot S \cdot t - 0,029 \cdot t + 1,859 \cdot 10^{-4} \cdot n \cdot t.
 \end{aligned} \quad (3.33)$$

После упрощения путем отбрасывания слагаемых, имеющих ничтожно малое значение, получаем окончательную модель (3.34).

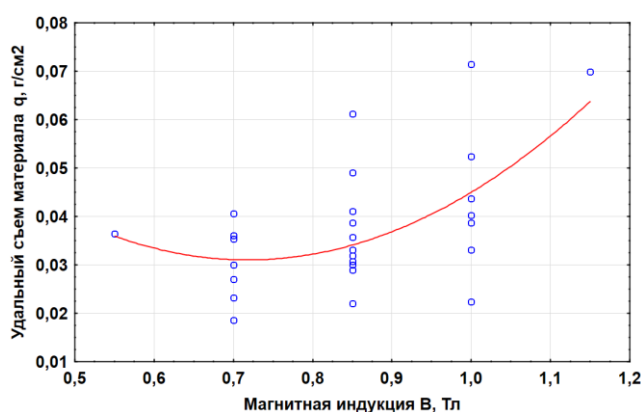
$$\begin{aligned}
 q = & 0,212 - 0,408B - 1,45t \cdot 10^{-2} + 0,188B^2 + 1,67Bt \cdot \\
 & 10^{-2} - 0,029t + 1,859nt \cdot 10^{-4}.
 \end{aligned} \quad (3.34)$$

Таким образом, получены полиномиальные модели влияния каждого технологического параметра на съем материала с обрабатываемой

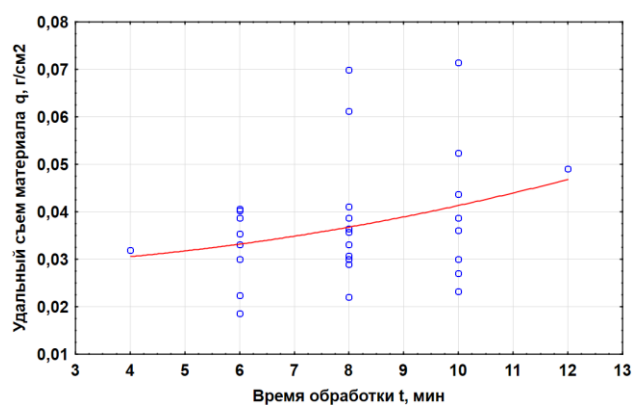
сложнопрофильной поверхности. В таблице 3.13 представлено математическое описание полученных моделей (рисунок 3.8).

Таблица 3.13 – Математические модели влияния технологических параметров на съем материала

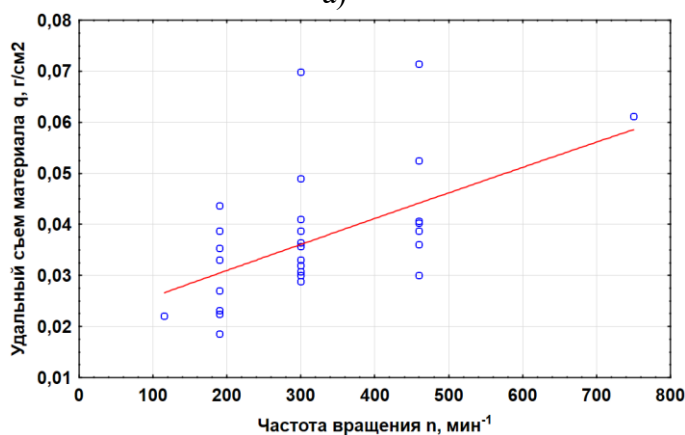
Технологический параметр	Математическая модель
Магнитная индукция B	$q = 0,1213 - 0,2515B + 0,1752B^2$
Время обработки t	$q = 0,0282 + 0,0001t + 0,0001t^2$
Частота вращения n	$q = 0,0206 + 5,212n \cdot 10^{-5} - 2,0375n^2 \cdot 10^{-9}$
Амплитуда осцилляции A	$q = 0,0424 - 0,0107A + 0,0052A^2$



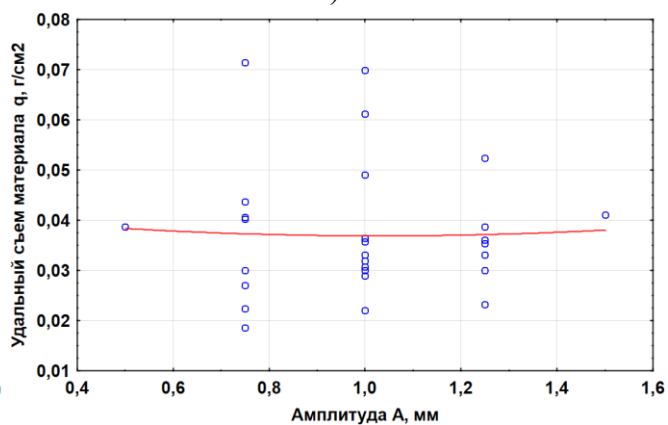
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.8 – Графики влияния а) магнитной индукции, б) времени обработки, в) частоты вращения, г) амплитуды осцилляции на удельный съем материала q г/см² при обработке сложнопрофильной поверхности

В результате анализа полученных закономерностей установлено, что наименьший удельный съем материала со сложнопрофильной поверхности обеспечивается при магнитной индукции B в диапазоне от 0,85 до 1,15 Тл (рисунок 3.8, а). Это объясняется тем, что при магнитной индукции от 0,85 до 1,15 Тл в созданных условиях магнитно-абразивной обработки обеспечивается необходимая жесткость магнитно-абразивной щетки – достаточной для микрорезания и перемешивания абразивных частиц в процессе обработки. Повышение магнитной индукции выше 1 Тл обеспечивает такую жесткость магнитно-абразивной щетки, при которой в процессе обработки не происходит перемешивание абразивных зерен, в микрорезании участвует постоянный слой абразивных частиц. За счет обеспеченного перемешивания значительно возрастает производительность процесса обработки.

Установлено, что оптимальным временем обработки t с целью съема материала со сложнопрофильных поверхностей является диапазон от 8 до 12 минут (рисунок 3.8, б), обеспечивается удельный съем материала от 0,035 до 0,045 г/см². Вне зависимости от достигаемой шероховатости поверхности R_a увеличение времени обработки t позволяет включиться большему количеству абразивных частиц в процесс.

Наибольшее влияние на удельный съем материала q в условиях проведенного эксперимента оказывает частота вращения заготовки n . Так, согласно графику (рисунок 3.8, в), увеличение частоты вращения n приводит к значительному повышению удельного съема материала q . Частота вращения n обеспечивает не только главное движение процесса обработки, но и перемешивание магнитно-абразивных частиц. Чем выше частота вращения заготовки – тем активнее магнитно-абразивные частицы перемешиваются, включаются абразивные частицы, не участвовавшие в обработке.

Однако, повышение амплитуды осцилляции заготовки A не способствует увеличению удельного съема материала q , о чем свидетельствуют результаты эксперимента, отраженные на рисунке 3.8, г.

Получены математические модели комбинированного влияния технологических параметров на удельный съём материала (таблица 3.14). Проведена оценка комбинированного влияния технологических параметров на удельный съём материала q (рисунок 3.9).

Таблица 3.14 – Математические модели комбинированного влияния технологических параметров на удельный съём материала

Комбинация технологических параметров	Математическая модель
Магнитная индукция B + Время обработки t	$q = 0,23 - 0,39B - 0,02t + 0,18B^2 + 0,02Bt + 0,0002t^2$
Магнитная индукция B + Амплитуда осцилляции A	$q = 0,1 - 0,22B + 0,01A + 0,18B^2 - 0,04BA + 0,01A^2$
Амплитуда осцилляции A + Частота вращения n	$q = 0,003 + 0,0001n + 0,009A + 0,0084A^2$
Амплитуда осцилляции A + Время обработки t	$q = -0,0022 + 0,0046t + 0,025A + 0,0001t^2 - 0,005At + 0,0059A^2$
Частота вращения n + Время обработки t	$q = 0,025 - 0,0019t + 0,0002t^2$
Магнитная индукция B + Частота вращения n	$q = 0,1396 - 0,2998B + 0,1864B^2$

Установлено, что удельный съём материала $q > 0,07$ г/см² удается обеспечить при магнитной индукции от 1 до 1,15 Тл. При этом время обработки должно составлять от 8 до 12 минут (рисунок 3.9 а). Для данных значений магнитной индукции B и времени обработки t обеспечивается необходимая жесткость магнитно-абразивной щетки, при этом абразивные частицы порошка Пр10Р6М5 не успевают окислиться, обеспечивая эффективную обработку и производительность процесса.

Удельный съём материала $q > 0,06$ г/см² удается обеспечить при магнитной индукции B от 1 до 1,15 Тл и амплитуде осцилляции A от 0,5 до 1,5 мм (рисунок 3.9, б). Однако, при недостаточной частоте вращения заготовки n до 460 мин⁻¹ влияния данный технологический параметр на удельный съём материала q практически не оказывают (рисунок 3.9, в).

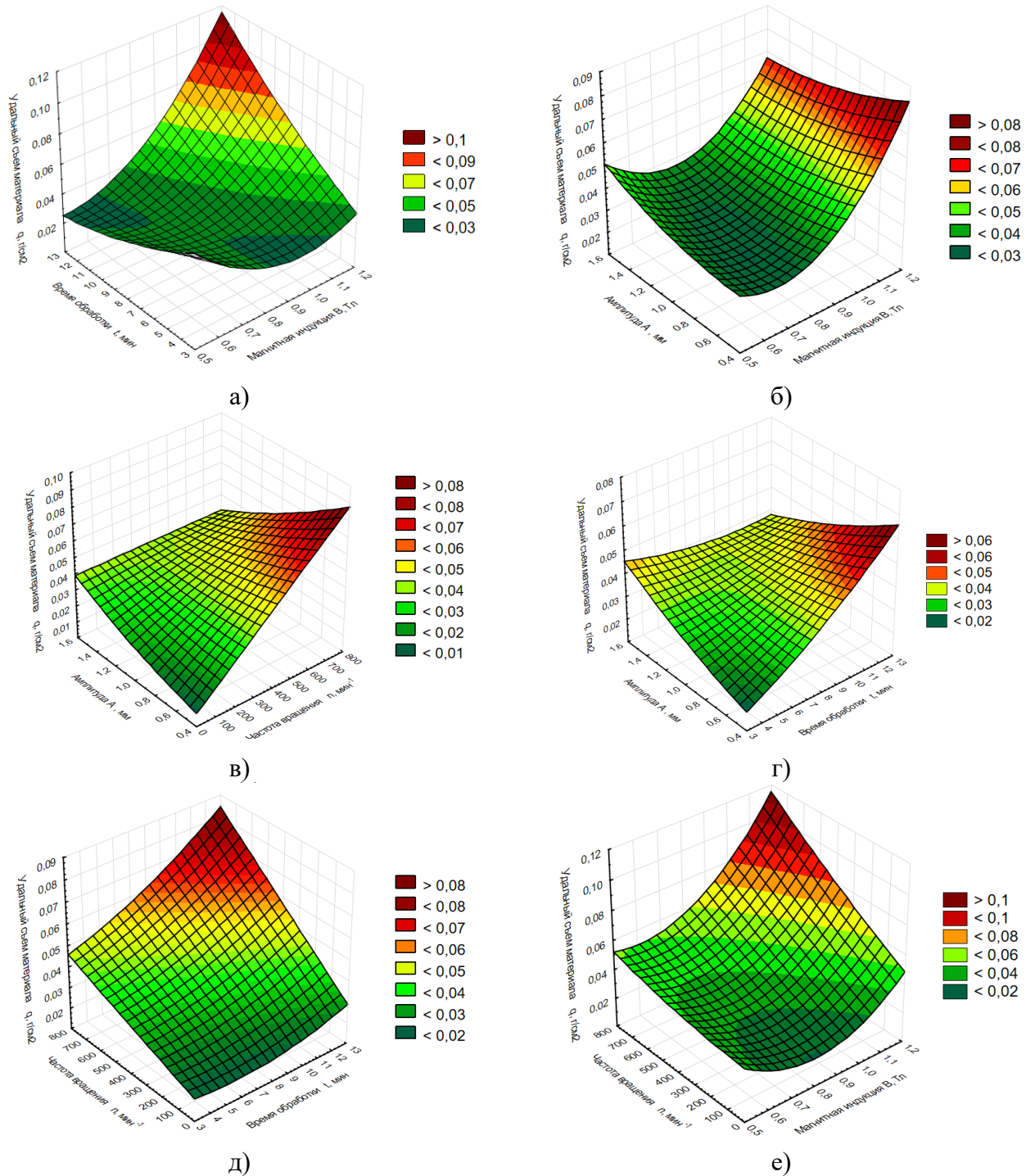


Рисунок 3.9 – Совместное влияние на удельный съем материала q : а) времени обработки t и магнитной индукции B ; б) амплитуды осцилляции A и магнитной индукции B ; в) амплитуды осцилляции A и частоты вращения n ; г) амплитуды осцилляции A и времени обработки t ; д) частоты вращения n и времени обработки t ; е) частоты вращения n и магнитной индукции B

О сделанных ранее выводах свидетельствует график комбинированного влияния амплитуды A и времени обработки t на удельный съем материала q

(рисунок 3,9 г). Удельный съём материала $q > 0,05$ г/см² удается обеспечить при амплитуде осцилляции $A = 1,5$ мм, при этом время обработки должно быть минимальным $t=4-6$ мин, либо при времени обработки от 8 до 12 мин, но с амплитудой $A = 0,5$ мм.

Комбинированное влияние частоты вращения n и времени обработки t (рисунок 3,9, д), частоты вращения n и магнитной индукции B (рисунок 3,9, е) описывается следующим образом – чем выше значения указанных технологических параметров, тем выше удельный съём материала q .

Таким образом, установлено, что каждый технологический параметр обработки, рассматриваемый в данном эксперименте, оказывает влияние на удельный съём материала q . Сделаны выводы о связи технологических параметров обработки с перемешиванием МАП. Максимальные значения удельного съёма материала q со сложнопрофильной поверхности достигаются при следующих значениях технологических параметров: магнитная индукция $B=0,85-1,15$ Тл; время обработки $t=8-12$ мин; частота вращения заготовки $n=460-750$ мин⁻¹; амплитуда осцилляции $A = 0,25-1,5$ мм.

3.5 Визуальная оценка состояния сложнопрофильных поверхностей

Проведена визуальная оценка состояния сложнопрофильных поверхностей до и после МАО с различными технологическими параметрами.

Целью визуальной оценки состояния поверхностей является выявление наличия дефектов поверхностного слоя, равномерности обработки и оценка общего состояния поверхности.

Выбраны пять сочетаний технологических параметров, обеспечивающих наименьшую шероховатость обработанной сложнопрофильной поверхности:

1. Время обработки $t = 6$ мин, частота вращения заготовки $n = 460$ мин⁻¹, амплитуда осцилляции $A = 0,5$ мм, магнитная индукция $B = 0,85$ Тл.
2. Время обработки $t = 8$ мин, частота вращения заготовки $n = 750$ мин⁻¹, амплитуда осцилляции $A = 0,5$ мм, магнитная индукция $B = 0,7$ Тл.

3. Время обработки $t = 8$ мин, частота вращения заготовки $n = 300 \text{ мин}^{-1}$, амплитуда осцилляции $A = 1$ мм, магнитная индукция $B = 0,85$ Тл.

Получены снимки сложнопрофильной поверхности до и после обработки для каждого рассматриваемого набора технологических параметров. В результате магнитно-абразивной обработки удается полностью или частично устранить следы предыдущей операции технологического процесса обработки заготовки, наблюдается однородность качества поверхностного слоя.

Очевидно, что от комбинации технологических параметров MAO зависит качество обработанной сложнопрофильной поверхности, производительность и эффективность обработки. Однако, при наборе любых технологических параметров наблюдается положительная тенденция в изменении шероховатости и съеме материала. Таким образом, делаем вывод о состоятельности разработанного способа и устройства для его осуществления, разработанных моделей.

В результате визуальной оценки (рисунки 3.10-3.12) сделаны выводы о наибольших изменениях поверхностного слоя при времени обработки $t=6-10$ мин, а также величинах магнитной индукции $B=0,55-0,85$ Тл. Результаты визуальной оценки подтверждают состоятельность разработанных моделей и установленных закономерностей.

Комбинации технологических параметров MAO влияют на качество обработанной сложнопрофильной поверхности, производительность и эффективность обработки. Так при наборе любых технологических параметров наблюдается положительная тенденция в изменении шероховатости поверхности по параметру R_a и съеме материала.

В результате MAO удается избавиться от дефектов, образованных на предыдущих этапах технологического процесса обработки сложнопрофильной поверхности. Так заметно снижается количество царапин, уменьшается глубина и сглаживаются углы борозд после токарной обработки.

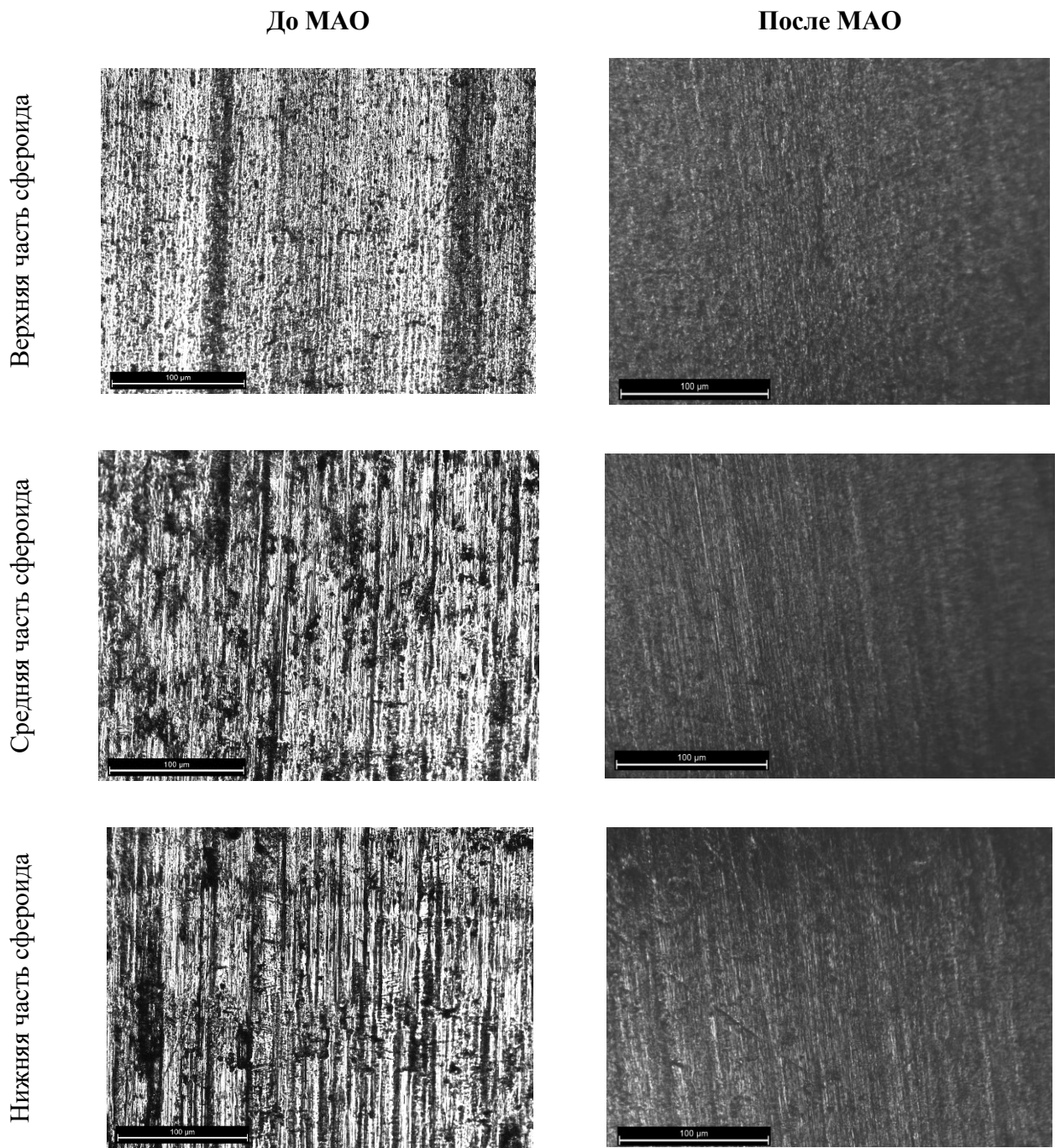


Рисунок 3.10 – Сложнопрофильная поверхность до и после МАО с технологическими параметрами: $t = 6$ мин, $n = 460$ мин⁻¹, $A = 0,5$ мм, $B = 0,85$ Тл

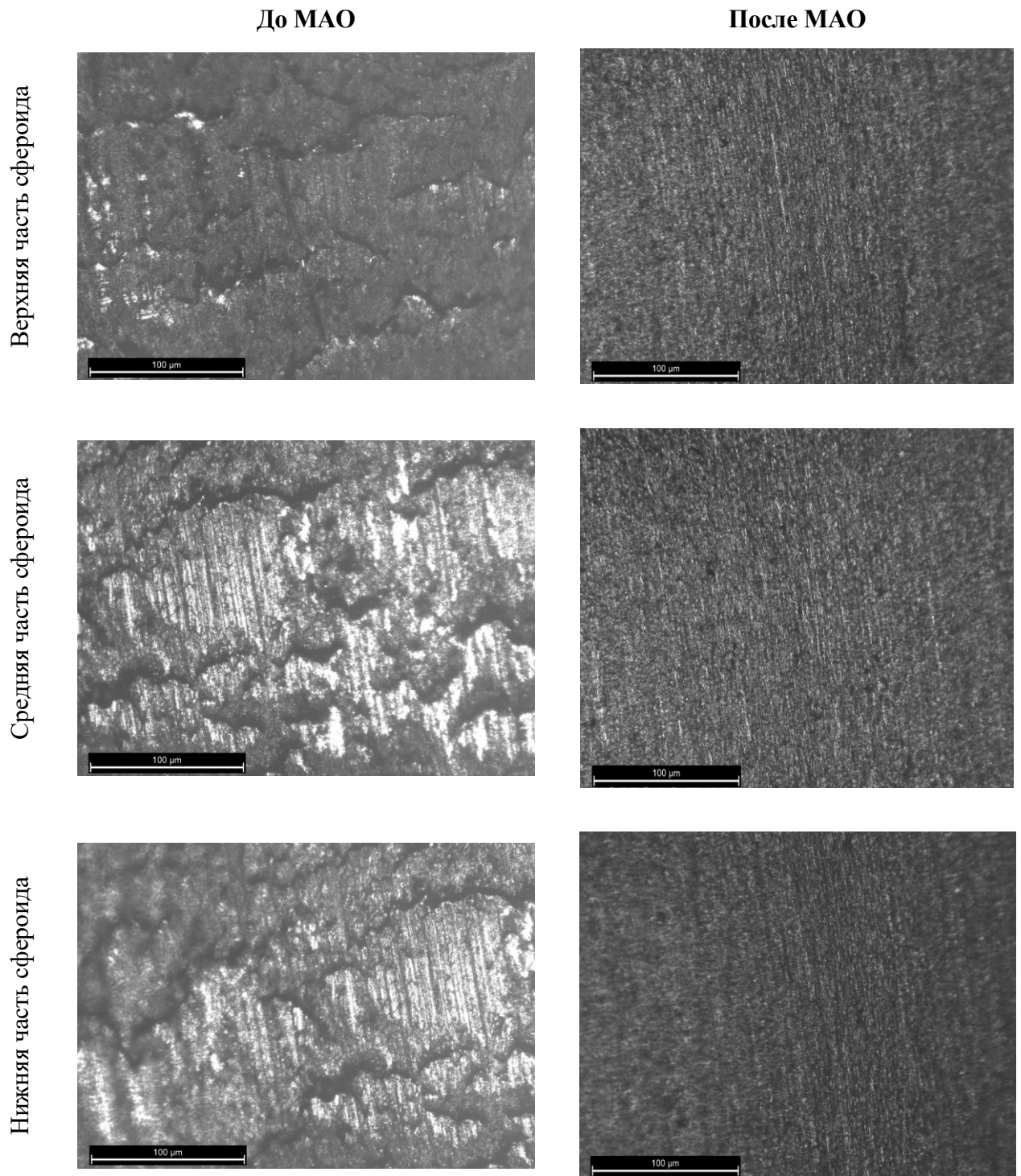


Рисунок 3.11 – Сложнопрофильная поверхность до и после МАО с технологическими параметрами: $t = 8$ мин, $n = 750$ мин⁻¹, $A = 0,5$ мм, $B = 0,7$ Тл

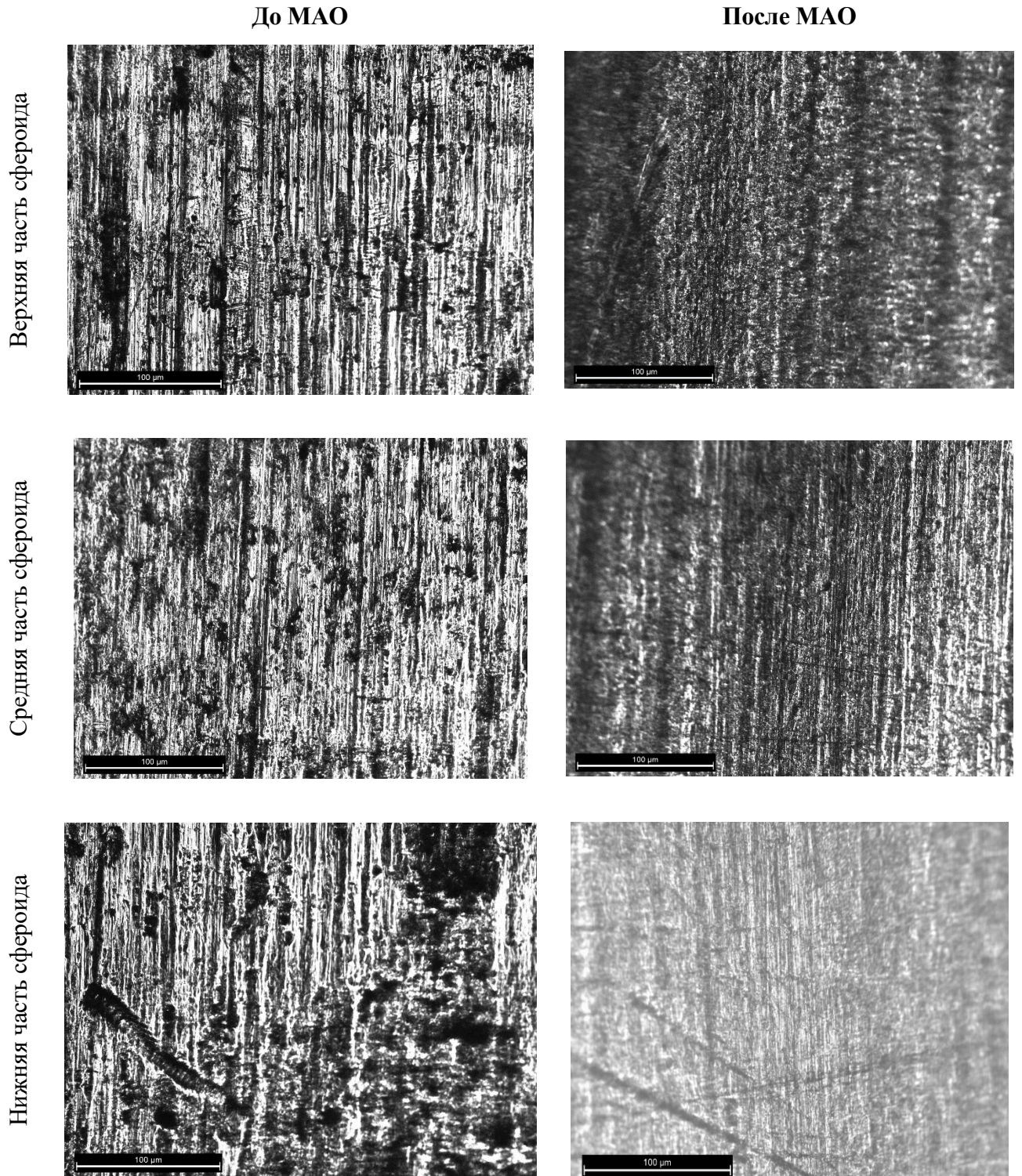


Рисунок 3.12 – Сложнопрофильная поверхность до и после МАО с технологическими параметрами: $t = 8$ мин, $n = 300$ мин⁻¹, $A = 1$ мм, $B = 0,85$ Тл

3.6 Выводы по третьей главе

1. Экспериментально определены закономерности влияния технологических параметров МАО сложнопрофильных поверхностей по предлагаемому способу на шероховатость поверхности и удельный съем материала.

2. Разработаны математические модели влияния как отдельных технологических параметров, так и сочетания технологических параметров на шероховатость и удельный съем материала.

3. Установлено, что каждый технологический параметр обработки, рассматриваемый в эксперименте, оказывает влияние на шероховатость поверхности R_a . Сделаны выводы о связи технологических параметров обработки с перемешиванием МАП в процессе обработки. Минимальные значения шероховатости сложнопрофильной поверхности достигаются при следующих значениях технологических параметров: магнитная индукция $B=0,7-1,15$ Тл; время обработки $t=4-8$ мин; частота вращения заготовки $n=460-750$ мин⁻¹; амплитуда осцилляции $A=1-1,5$ мм.

4. Установлено, что каждый технологический параметр обработки, рассматриваемый в данном эксперименте, оказывает влияние на удельный съем материала q . Максимальные значения удельного съема материала q со сложнопрофильной поверхности достигаются при следующих значениях технологических параметров: магнитная индукция $B=0,85-1,15$ Тл; время обработки $t=8-12$ мин; частота вращения заготовки $n=460-750$ мин⁻¹; амплитуда осцилляции $A=0,25-1,5$ мм. Удастся достичь шероховатости обработанной поверхности по $R_a=0,5$ мкм.

5. Комбинации технологических параметров МАО 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 съеме материала.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТВЕРДОСТЬ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

Качество поверхностного слоя зависит от ряда физико-механических характеристик поверхности, среди которых необходимо выделить твердость. Физико-механические параметры и геометрические характеристики определяются в результате совместного действия процессов в зоне магнитно-абразивной обработки: электромагнитные явления, абразивное резание, пластическое выглаживание, химические реакции активных веществ [89, 90].

По одной шероховатости поверхности невозможно сказать о достигнутом в процессе обработки изделия качестве поверхности, так как одинаковые по параметрам точности и шероховатости поверхности изделия могут иметь различные эксплуатационные показатели – надежность и долговечность. Процесс формирования микрорельефа поверхности и структуры поверхностного слоя обрабатываемой сложнопрофильной поверхности определяет эксплуатационные изделия.

Известно, что в процессе шлифования обрабатываемой сложнопрофильной поверхности происходят прижоги, наблюдается шаржирование (рисунок 4.1). В результате шлифования возможен сьем слоя материала, упрочненный химико-термической обработкой на предыдущих операциях.

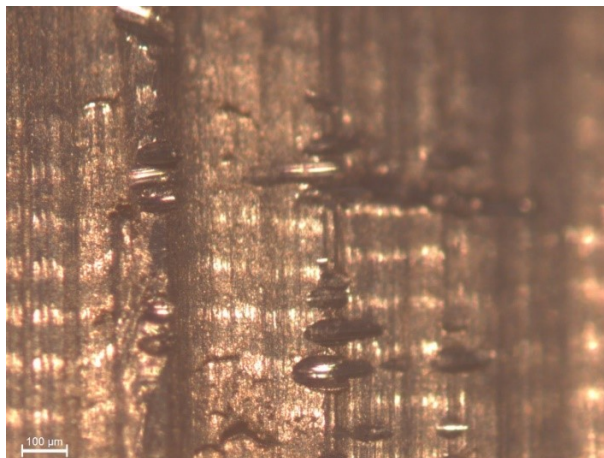


Рисунок 4.1 – Сложнопрофильная поверхность после шлифования с неверно подобранными технологическими параметрами

Производительность процесса окончательной обработки возможно оценивать на основании величины удельного съема материала. Процесс шлифования сложнопрофильных поверхностей является достаточно трудоемким, так как площадь поверхности, качество которой можно считать достигнутым в процессе обработки, ограничивается площадью инструмента – шлифовального круга, губки и др. При этом необходимо использовать абразивный материал с различной зернистостью, постоянно контролировать давление инструмента на обрабатываемую поверхность.

МАО сложнопрофильных поверхностей обеспечивает равномерную интенсивность процесса обработки по всему обрабатываемому профилю, так как МАИ покрывает весь обрабатываемый профиль.

В настоящем разделе представлены результаты исследования влияния способа магнитно-абразивной обработки на твердость обработанной сложнопрофильной поверхности и производительность процесса.

4.1 Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования влияния метода окончательной обработки на твердость сложнопрофильной поверхности и производительность процесса обработки проводили на токарном станке *JET GHB 1340A DRO*.

Шлифование проводили согласно рекомендациям по обработке изделий из алюминиевых сплавов. В качестве инструмента применялись губки шлифовальные с зернистостью 320, 400 и 600 мкм (рисунок 4.2). Процесс шлифования осуществлялся вручную (рисунок 4.3) до достижения шероховатости поверхности $R_a = 0,6 - 0,8$ мкм.

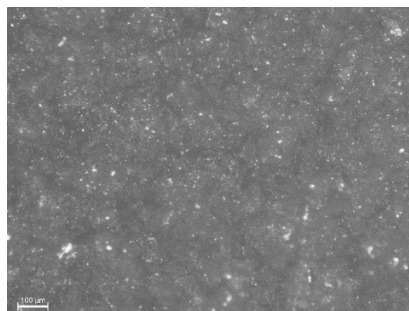
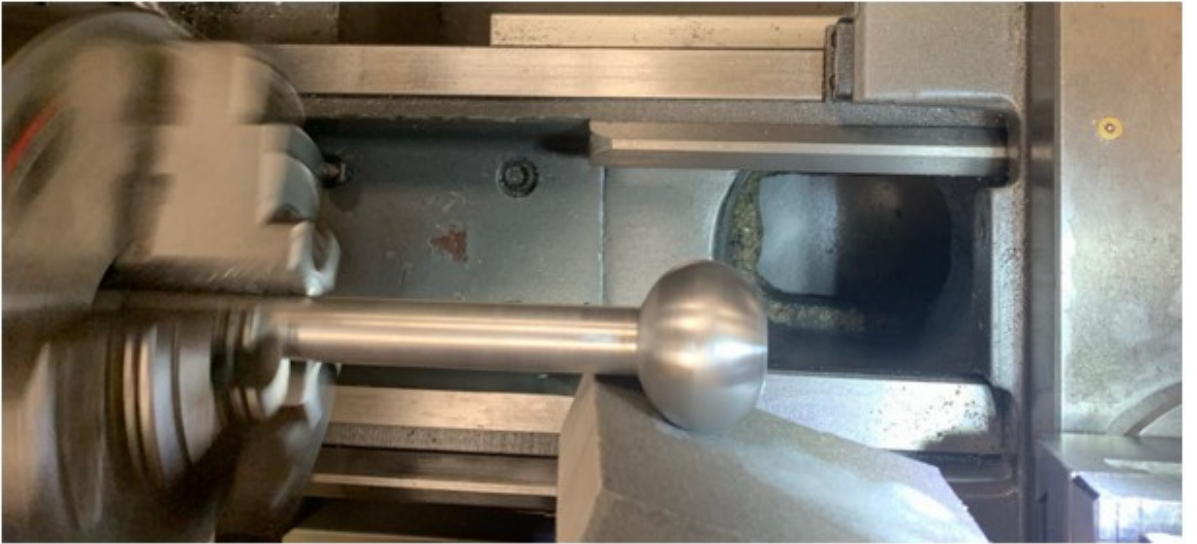
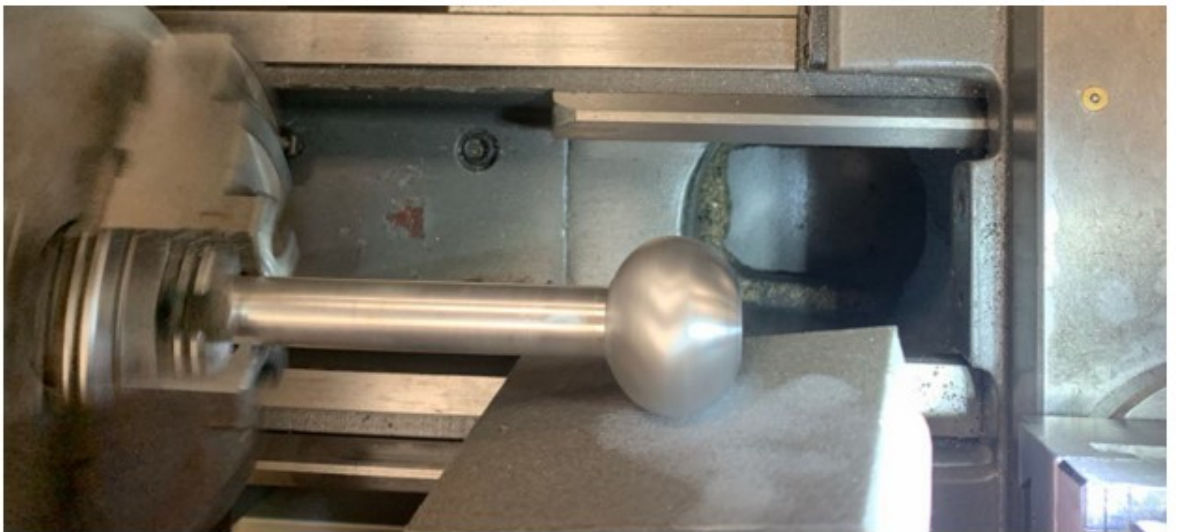


Рисунок 4.2 – Снимок поверхности губки шлифовальной с зернистостью 320 мкм

Верхняя часть сфероида



Средняя часть сфероида



Нижняя часть сфероида

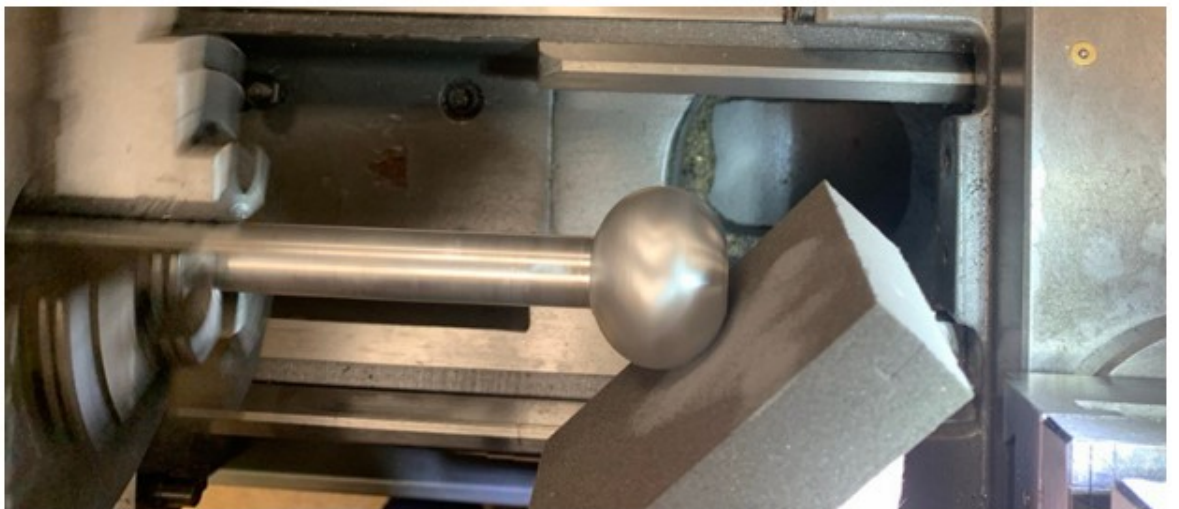


Рисунок 4.3 – Процесс шлифования сложнопрофильной поверхности абразивной губкой

В качестве экспериментальных образцов применяли заготовки из алюминиевого сплава марки АМц, представляющие собой стержень с размещенным на одном из концов сфероидом.

Твердость сложнопрофильной поверхности измеряли портативным твердомером *HT-1208* (рисунок 4.4), предварительно откалиброванным. Измерение проводили в 12 зонах (рисунок 4.5), расположенных в верхней, центральной и нижней частях сфероида (рисунок 4.6). Измерения твердости проводили по 3 раза в каждой зоне. Усилие индентора $F = 98,07$ Н при диаметре шарика $D = 1$ мм согласно ГОСТ 9012-59. Портативный твердомер выбран по причине возможности расположения индентора перпендикулярно поверхности в зонах, в которых измерялась твердость. При этом заготовка закреплялась в тисках. Измерение твердости на стационарных твердомерах возможно для данных заготовок только в зонах 2, 5, 8, 11. Твердомер обладает настройками изменения направления оси индентора относительно горизонта, выбора материала заготовки, а также переводом твердости в единицы измерения *HB*, *HV*, *HRC* и др.



Рисунок 4.4 – Твердомер HT-1208

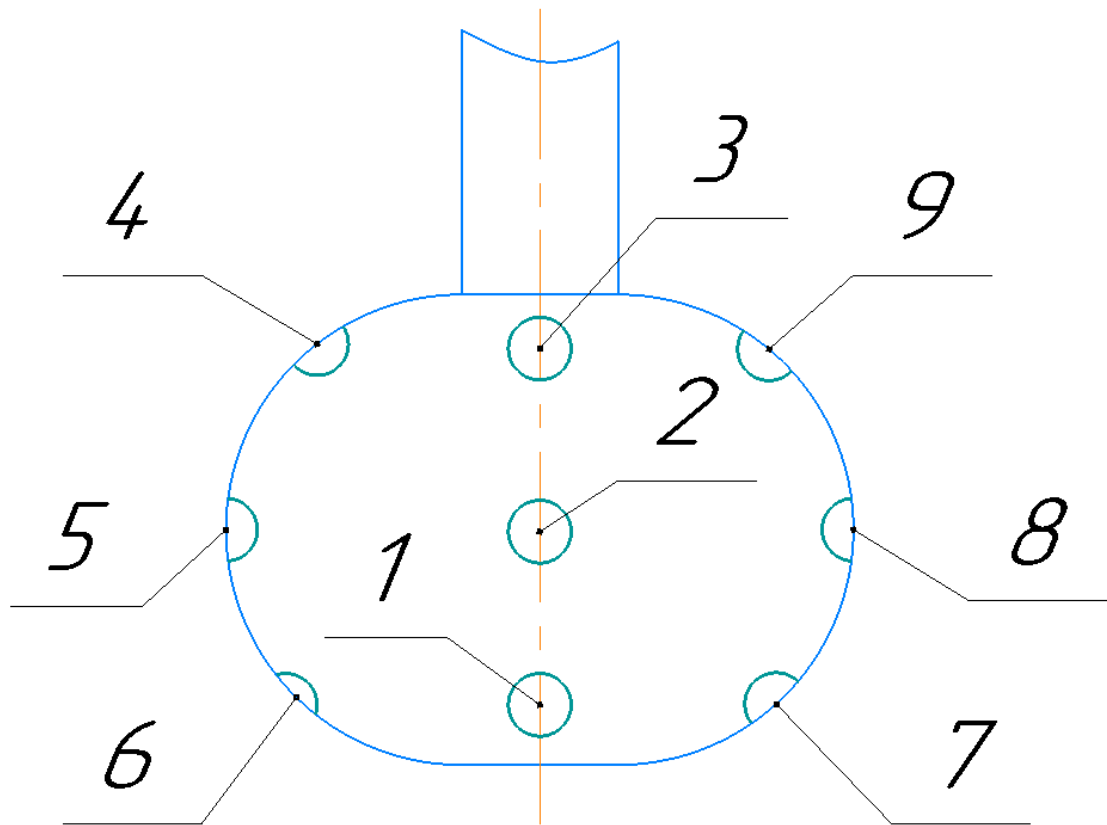


Рисунок 4.5 – Расположение зон, в которых измерялась твердость сложнопрофильной поверхности, по сфероиду

Проведено измерение массы алюминиевых заготовок до и после МАО. Полученные значения масс, а также их разница, использованы для оценки эффективности магнитно-абразивной обработки по значению удельного съема материала q . Массу заготовок измеряли на весах марки *ВЛТЭ 310* (рисунок 3.4).

Визуальный анализ состояния сложнопрофильных поверхностей, съемку снимков поверхностей до и после обработки проводили с использованием лабораторного инвертированного микроскопа *Leica DM ILM HC* (рисунок 3.5).

Верхняя часть сфероида



Средняя часть сфероида



Нижняя часть сфероида



Рисунок 4.6 – Процесс измерения твердости сложнопрофильной поверхности

4.2 Оценка производительности способов окончательной обработки

Шлифование получило широкое применение на операция чистовой обработки изделий, так как является достаточно простым в осуществлении и способно обеспечить высокие показатели качества и точности обрабатываемых поверхностей.

Однако, технологические возможности шлифования при обработке сложнопрофильных поверхностей из алюминиевых сплавов достаточно ограничены, так как процесс является трудоемким, а в результате высокой теплонапряженности образуются трещины, прижоги, царапины.

Проведена оценка производительности шлифования сложнопрофильных поверхностей. Обработка производилась до достижения шероховатости обработанной поверхности $R_a = 0,6 - 0,8$ мкм. При этом отмечалось время обработки t , затраченное на достижение заданной шероховатости, и разница между массами изделия до обработки и после обработки, выраженная в съеме материала q .

Расчет производительности p производился по формуле (4.1):

$$p = \frac{q}{t}. \quad (4.1)$$

Результаты оценки производительности шлифования сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава АМц представлены в таблице 4.1.

Проведена оценка производительности МАО. Обработаны 15 заготовок из – по 5 заготовок на серию эксперимента. Результаты представлены в таблице 4.2.

Технологические параметры МАО выбраны в соответствии с результатами анализа экспериментального исследования, описанного в главе 3:

1. Серия 1: $n = 750 \text{ мин}^{-1}$, $t = 8 \text{ мин}$; $A = 1 \text{ мм}$, $B = 0,85 \text{ Тл}$;
2. Серия 2: $n = 460 \text{ мин}^{-1}$, $t = 10 \text{ мин}$; $A = 1,5 \text{ мм}$, $B = 1 \text{ Тл}$;
3. Серия 3: $n = 300 \text{ мин}^{-1}$, $t = 8 \text{ мин}$; $A = 1 \text{ мм}$, $B = 0,85 \text{ Тл}$;
4. Серия 4: $n = 190 \text{ мин}^{-1}$, $t = 10 \text{ мин}$; $A = 0,75 \text{ мм}$, $B = 1 \text{ Тл}$;
5. Серия 5: $n = 115 \text{ мин}^{-1}$, $t = 8 \text{ мин}$; $A = 1 \text{ мм}$, $B = 0,85 \text{ Тл}$.

Таблица 4.1 – Значения съема материала и производительности шлифования сложнопрофильных поверхностей

Серия	Образец	Частота вращения n , мин ⁻¹	Время обработки t , мин	Съем материала q , г	Производительность p , г/мин
1	1	750	9,6	2,915	0,3036
	2		10,1	2,689	0,2662
	3		11,5	3,214	0,2795
2	4	460	12,5	2,458	0,19664
	5		11,8	3,033	0,2570
	6		12,1	2,815	0,2326
3	7	300	13,1	2,312	0,1765
	8		13,5	2,574	0,1907
	9		12,8	2,628	0,2053
4	10	190	13,8	2,799	0,2028
	11		14,5	2,211	0,1525
	12		14,2	2,671	0,1881
5	13	115	16,8	1,786	0,1063
	14		16,6	2,058	0,1240
	15		15,2	1,349	0,0888

Таблица 4.2 – Значения съема материала и производительности МАО сложнопрофильных поверхностей

Серия	Образец	Частота вращения n , мин ⁻¹	Время обработки t , мин	Съем материала q , г	Производительность p , г/мин
1	1	750	8	3,059	0,382375
	2			2,878584	0,359823
	3			2,952992	0,369124
2	4	460	10	2,622	0,2622
	5			3,218	0,3218
	6			3,572	0,3572
3	7	300	8	1,786	0,22325
	8			1,8576	0,2322
	9			2,06	0,2575
4	10	190	10	2,755	0,2755
	11			2,2199	0,22199
	12			2,5939	0,25939
5	13	115	8	1,102	0,13775
	14			1,23192	0,15399
	15			0,75136	0,09392

Зависимость производительности p шлифования и магнитно-абразивной обработки от частоты вращения заготовки n представлена на рисунке 4.7.

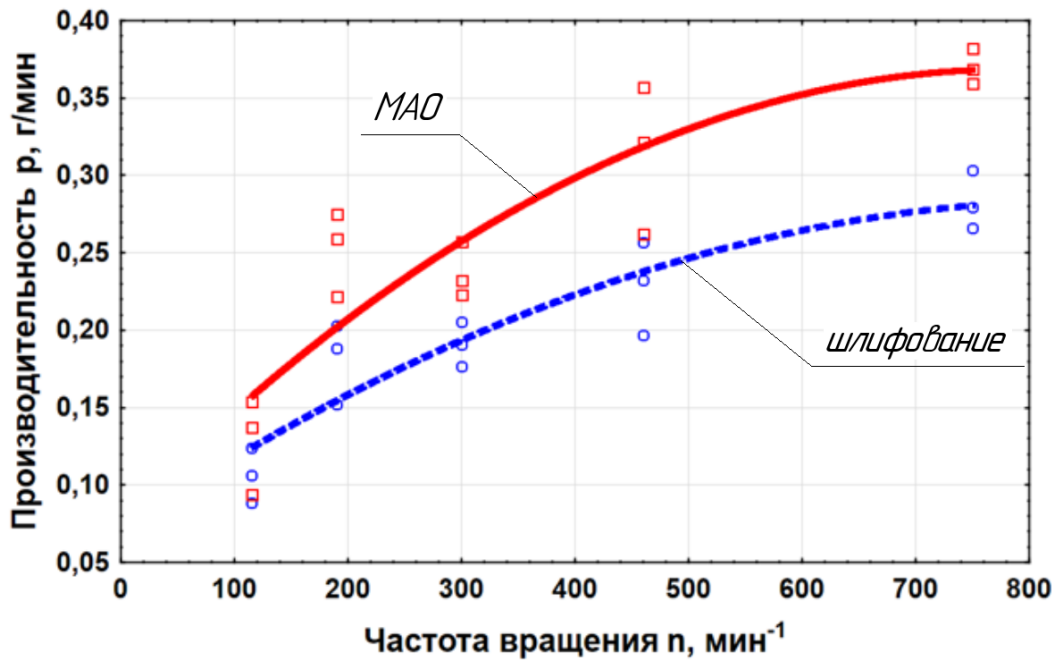


Рисунок 4.7 – Производительность процесса p окончательной обработки в зависимости от частоты вращения n заготовки

По формуле 4.1 рассчитана производительность процесса МАО, результаты представлены в сравнительной таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Сравнительная таблица производительности шлифования и МАО

Серия	Частота вращения n , мин ⁻¹	Шлифование	Магнитно-абразивная обработка	$p_{\text{ср.шл.}} / p_{\text{ср.мао}}$
		Производительность $p_{\text{ср.шл.}}$, г/мин	Производительность $p_{\text{ср.мао}}$, г/мин	
1	750	0,2831	0,3704	1,3
2	460	0,2288	0,3137	1,4
3	300	0,1908	0,2377	1,3
4	190	0,1811	0,2523	1,4
5	115	0,1064	0,1286	1,2

Таким образом, применение магнитно-абразивной обработки по предлагаемому способу позволяет увеличить производительность финишной операции технологического процесса в 1,4 раза по сравнению со шлифованием при той же частоте вращения заготовки.

4.3 Оценка твердости сложнопрофильной поверхности

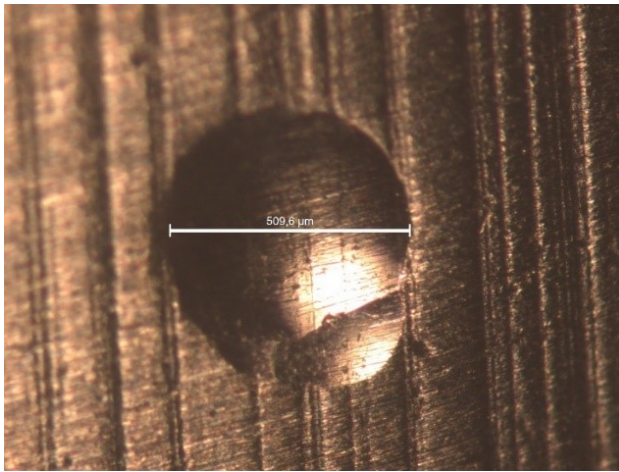
Целью проведения экспериментальных исследований было определение изменения твердости обработанной поверхности методом МАО по предлагаемому способу.

Измерения твердости поверхности проводили у заготовок, обработанных с технологическими параметрами, указанными в разделе 4.1. Твердость измеряли в 12 зонах обработанной поверхности (рисунок 4.5), в таблицу занесено среднее значение. Результаты измерения твердости представлены в таблице 4.4.

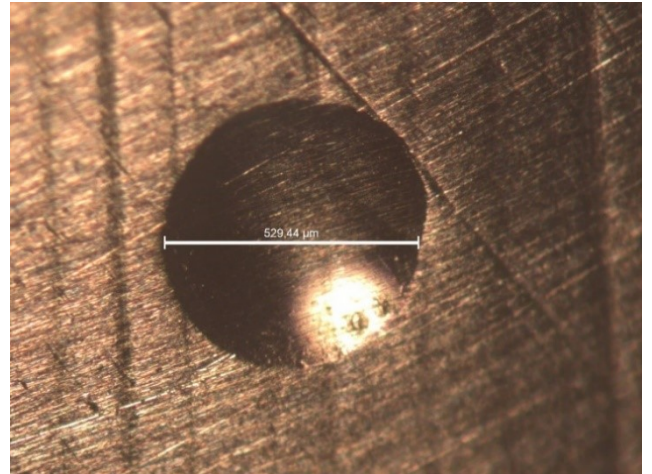
Таблица 4.4 – Сравнительная таблица твердости поверхности до и после МАО

Серия	Образец	Частота вращения n , мин ⁻¹	Твердость до обработки $HB \cdot 10^{-1}$, МПа	Твердость после обработки $HB \cdot 10^{-1}$, МПа
1	1	750	28	40
	2		29	35
	3		32	40
2	4	460	33	40
	5		33	38
	6		35	41
3	7	300	30	39
	8		32	40
	9		31	34
4	10	190	31	37
	11		29	35
	12		34	41
5	13	115	33	38
	14		35	39
	15		33	37

Получены снимки отпечатков твердомера, проведено измерение диаметров отпечатков твердомера (рисунки 4.8-4.12).

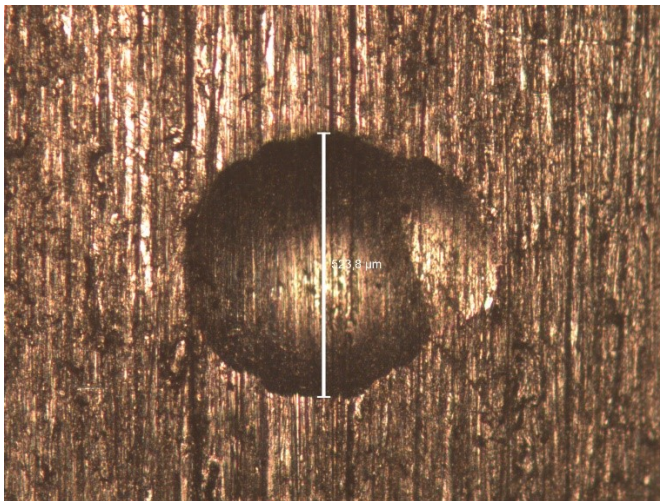


а

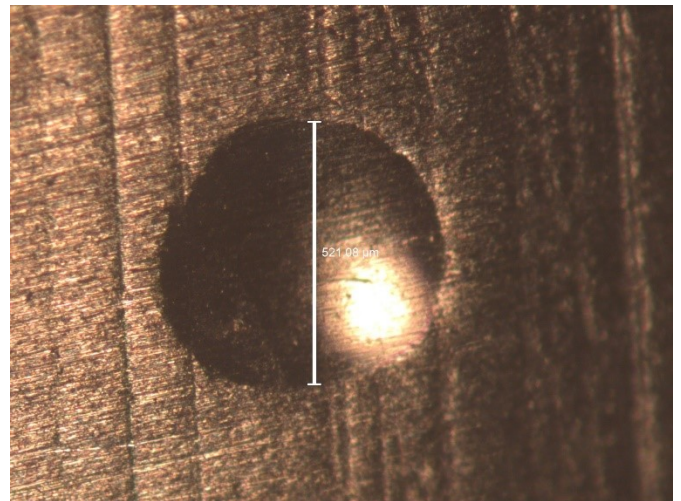


б

Рисунок 4.8 – Отпечаток твердомера, где: а – до МАО; б – после МАО с технологическими параметрами: $n = 750 \text{ мин}^{-1}$, $t = 8 \text{ мин}$; $A = 1 \text{ мм}$, $B = 0,85 \text{ Тл}$

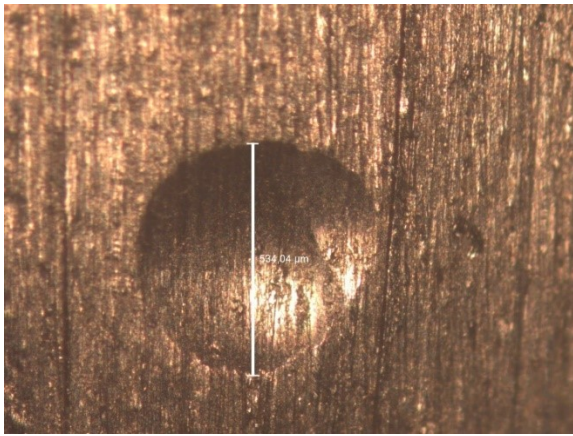


а

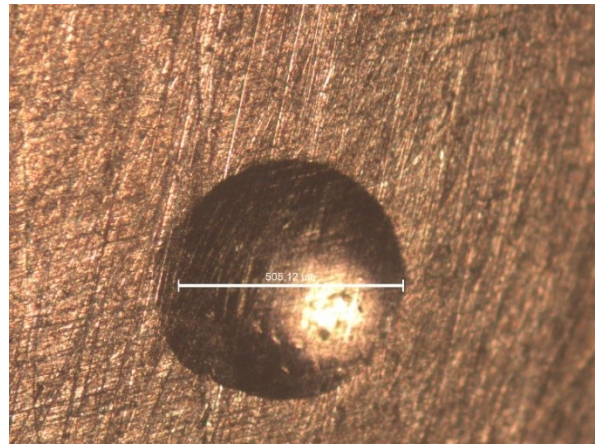


б

Рисунок 4.9 – Отпечаток твердомера, где: а – до МАО; б – после МАО с технологическими параметрами: $n = 460 \text{ мин}^{-1}$, $t = 10 \text{ мин}$; $A = 1,5 \text{ мм}$, $B = 1 \text{ Тл}$

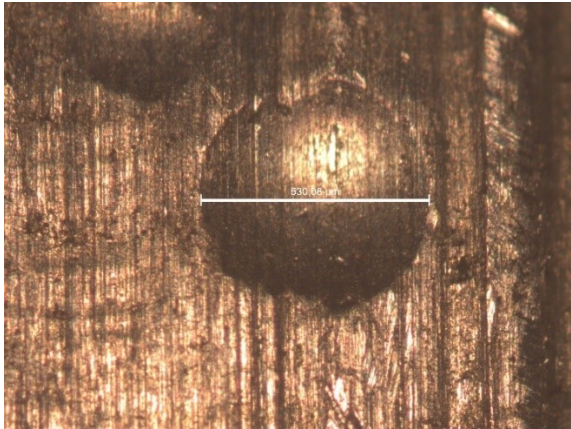


а

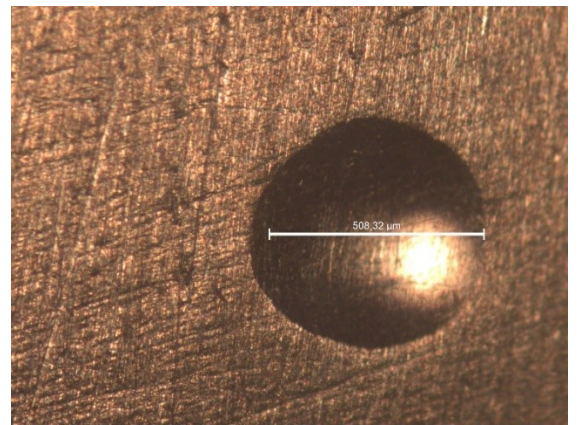


б

Рисунок 4.10 – Отпечаток твердомера, где: а – до MAO; б – после MAO с технологическими параметрами: $n = 300 \text{ мин}^{-1}$, $t = 8 \text{ мин}$; $A = 1 \text{ мм}$, $B = 0,85 \text{ Тл}$

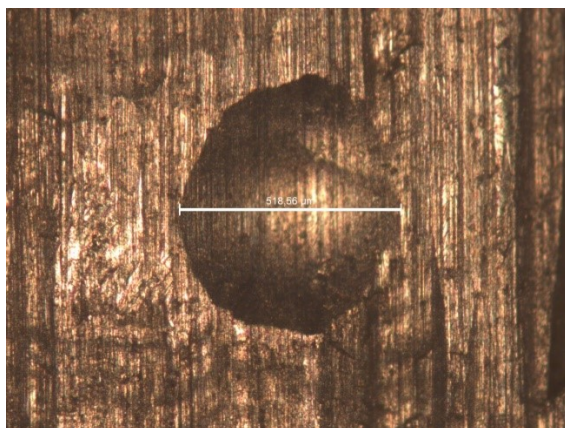


а

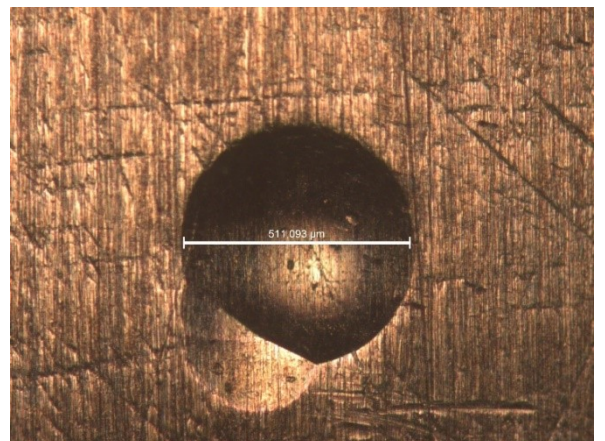


б

Рисунок 4.11 – Отпечаток твердомера, где: а – до MAO; б – после MAO с технологическими параметрами: $n = 190 \text{ мин}^{-1}$, $t = 10 \text{ мин}$; $A = 0,75 \text{ мм}$, $B = 1 \text{ Тл}$



а



б

Рисунок 4.12 – Отпечаток твердомера, где: а – до MAO; б – после MAO с технологическими параметрами: $n = 115 \text{ мин}^{-1}$, $t = 8 \text{ мин}$; $A = 1 \text{ мм}$, $B = 0,85 \text{ Тл}$

На рисунке 4.13 представлены результаты измерения твердости образца №3 (таблица 4.4).

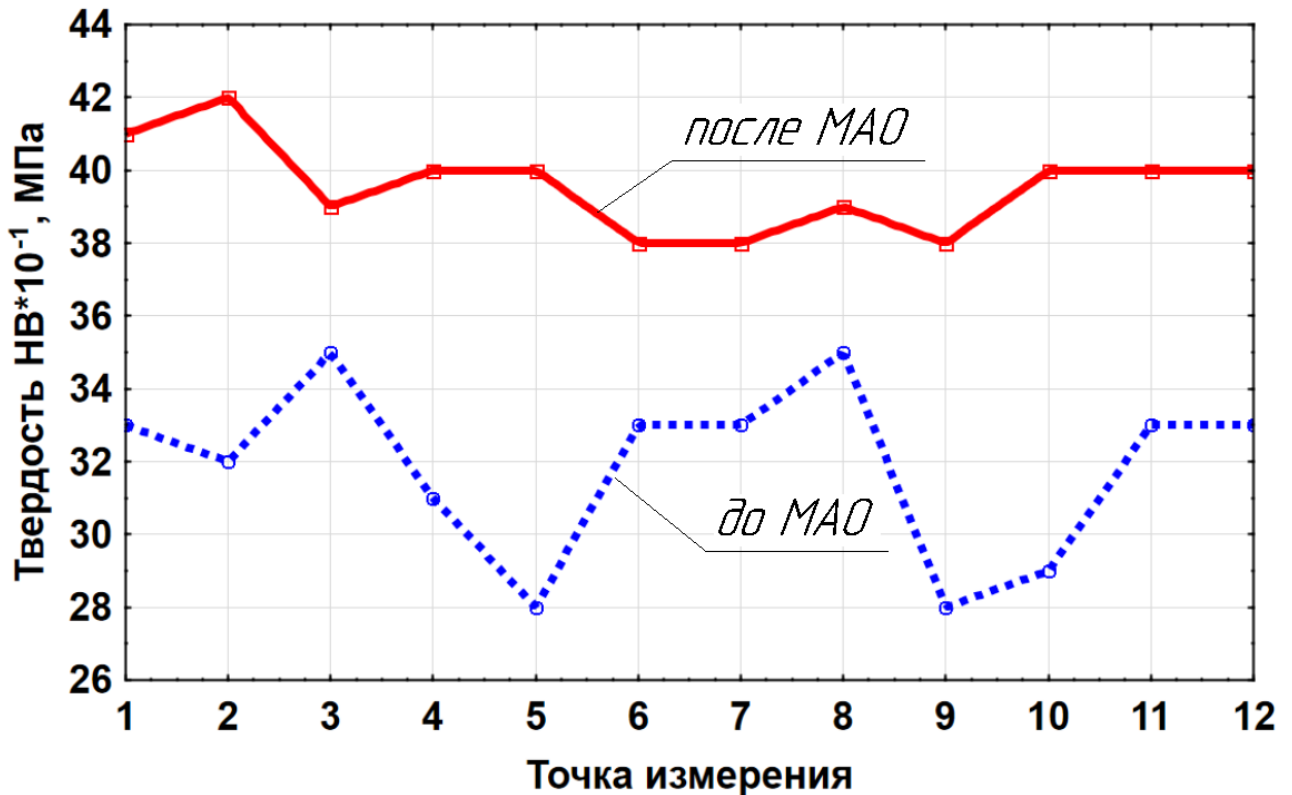


Рисунок 4.13 – Твердость сложнопрофильной поверхности по профилю

В результате анализа полученных результатов измерения твердости сложнопрофильных поверхностей, обработанных согласно предложенному способу МАО, можно сделать вывод о повышении твердости поверхности в 1,2 раза. Применение МАО позволяет обеспечить равномерность качественных характеристик по всему обрабатываемому профилю, так как уменьшается разброс между значениями твердости.

4.4 Совершенствование технологического процесса обработки сложнопрофильных поверхностей корпуса элегазового трансформатора

Обеспечение качества сложнопрофильных поверхностей корпуса элегазового трансформатора – ответственная задача, так как в тех местах, где требования по шероховатости не выполняются, возникает возмущение электромагнитного поля, что приводит к пробоям. Пробой тока ведет к прожигу корпуса и выходу из строя аппарата. Поэтому все сложнопрофильные

поверхности корпуса и экрана элегазового трансформатора должны быть изготовлены посредством такого технологического процесса, который обеспечит не только необходимое качество ответственных поверхностей, но и будет производительным.

В настоящее время в типовом технологическом процессе изготовления корпусов, экранов элегазового трансформатора в качестве финишной операции применяется шлифовальная операция. Операция осуществляется в ручном или полуавтоматическом режимах с применением абразивных губок, бумаг, кругов. По трудоемкости операция шлифовальная занимает до 35% времени всего технологического процесса изготовления корпуса элегазового трансформатора. Применение абразивного инструмента на жесткой и гибкой основе приводит к шаржированию, а осуществление обработки в ручном режиме к увеличению рисков не обеспечить равномерное качество сложнопрофильной поверхности.

Повысить производительность технологического процесса изготовления корпуса элегазового трансформатора (таблица 4.5), а также обеспечить равномерное качество по всему обрабатываемому профилю возможно благодаря замене финишной шлифовальной операции на магнитно-абразивную.

Таблица 4.5 – Технологический процесс изготовления корпуса элегазового трансформатора

Номер операции	Наименование операции
005	Заготовительная
010	Токарная
015	Слесарная
020	Фрезерная
025	Шлифовальная
030	Контрольная

Магнитно-абразивная обработка позволит повысить эффективность обработки, обеспечить заданное качество изделия, а также значительно снизить трудоемкость технологического процесса изготовления корпуса элегазового

трансформатора. Предлагаемый технологический процесс представлен в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Предлагаемый технологический процесс изготовления корпуса элегазового трансформатора

Номер операции	Наименование операции
005	Заготовительная
010	Токарная
015	Слесарная
020	Фрезерная
025	Магнитно-абразивная
030	Контрольная

Результаты исследований, приведенные в 3 и 4 главах, подтверждают возможность применения магнитно-абразивной обработки в качестве финишной операции в технологическом процессе изготовления корпуса, экрана элегазового трансформатора.

4.5 Практические рекомендации по технологическому обеспечению качества сложнопрофильных поверхностей изделий из алюминиевого сплава АМц методом магнитно-абразивной обработки

Применение однородного порошка Пр10Р6М5 фракции $\Delta = 60 - 160$ мкм в сочетании с полусинтетическими СОЖ позволяет увеличить плотность МАИ, прилегание к обрабатываемой поверхности, что обеспечивает равномерную обработку профиля, а также повышает производительность обработки.

Установлены технологические параметры MAO: магнитная индукция B , частота вращения n , амплитуда осцилляции устройства A , время обработки t . В результате варьирования параметров возможно обеспечить шероховатость сложнопрофильной поверхности $R_a=0,508$ мкм, а также обеспечить удельный съем материала $q=0,07144$ г/см². Применение MAO позволяет устранить дефекты поверхности, вызванные предыдущими операциями технологического процесса.

Обоснована эффективность применения МАО по сравнению со шлифованием путем сравнения производительности двух процессов финишной обработки. Доказано, что применение МАО по предлагаемому способу позволяет увеличить производительность операции по сравнению со шлифованием при той же частоте вращения шпинделя в 1,4 раза. Наблюдается улучшение твердости поверхности после МАО, что выражается не только в повышении твердости в 1,2 раза, но и равномерности твердости по всей обработанной поверхности.

Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований позволяют предложить ряд практических рекомендаций:

1. Окончательную обработку сложнопрофильных поверхностей изделий из алюминиевого сплава АМц рекомендуется проводить методом МАО.

2. МАО сложнопрофильных поверхностей рекомендуется осуществлять посредством предлагаемого способа МАО сложнопрофильных поверхностей и устройства для его осуществления.

3. Рекомендуется придерживаться следующих технологических параметров МАО сложнопрофильных поверхностей:

- МАП – однородный порошок Пр10Р6М5 фракции $\Delta = 60 - 160$ мкм в сочетании с полусинтетическими смазочно-охлаждающими жидкостями;

- рабочий зазор - $\delta = 1 - 2$ мм, при этом наполняемость рабочего зазора порошком более 80%;

- магнитная индукция – $B = 0,7 - 1,15$ Тл для рабочего зазора $\delta = 1 - 2$ мм с учетом отсутствия магнитных свойств у материала обрабатываемой заготовки;

- магниты устройства – неодимовые магниты марок от N33 до N54.

МАО осуществлять со следующими технологическими параметрами в диапазонах: магнитная индукция $B=0,7-1,15$ 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.

4.6 Выводы по четвертой главе

1. Проведены экспериментальные исследования влияния метода окончательной обработки на твердость сложнопрофильной поверхности и производительность процесса обработки. Процесс шлифования осуществлялся в полуавтоматическом режиме до достижения шероховатости поверхности $R_a = 0,6 - 0,8$ мкм.

2. Результаты экспериментальных исследований показали, что применение МАО по предлагаемому способу позволяет увеличить производительность финишной операции технологического процесса в 1,4 раза по сравнению со шлифованием при той же частоте вращения заготовки.

3. В результате анализа полученных результатов измерения твердости сложнопрофильных поверхностей, обработанных методом МАО, можно сделать вывод о повышении твердости поверхности в 1,2 раза. Применение МАО позволяет обеспечить равномерность качественных характеристик по всему обрабатываемому профилю, так как уменьшается разброс между значениями твердости.

4. Повысить производительность технологического процесса изготовления корпуса, экранов элегазового трансформатора, а также обеспечить равномерное качество по всему обрабатываемому профилю возможно благодаря замене финишной шлифовальной операции на МАО.

5. Даны практические рекомендации по осуществлению МАО сложнопрофильных поверхностей, что позволит обеспечить шероховатость сложнопрофильной поверхности до $R_a=0,508$ мкм, а также обеспечить удельный съем материала $q=0,07144$ г/см². Применение МАО позволяет устранить дефекты поверхности, вызванные предыдущими операциями технологического процесса.

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 корпусный 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 C1), 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 $N54$ соответственно. 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 $A = 0,5-1,5$ мм с постоянным периодом осцилляции $T = 2$ с. Экспериментально определены закономерности влияния технологических параметров МАО на шероховатость обработанной поверхности и удельный съём материала, а также установлено, что в процессе МАО сложнопрофильной поверхности по предлагаемому способу, значение удельного съёма 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 съёма 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 съёме 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство № 1585124 А1 СССР, МПК В24В 31/112. Способ магнитно-абразивной обработки: № 4407781: заявл. 11.04.1988: опубл. 15.08.1990 / В. Ф. Чеботаев, С. А. Михалькова; заявитель КРАМАТОРСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ.
2. Авторское свидетельство № 380438 А1 СССР, МПК В24В 31/112, В24В 31/10. Устройство для чистовой магнитно-абразивной обработки: № 1340560/25-8: заявл. 01.07.1969: опубл. 15.05.1973 / Е. Г. Коновалов, А. М. Штейнберг, Г. С. Шулев; заявитель Калининградский технический институт рыбной промышленности и хозяйства.
3. Авторское свидетельство № 779042 А1 СССР, МПК В24В 31/10. Устройство для магнитно-абразивной обработки: № 2695086: заявл. 11.12.1978: опубл. 15.11.1980 / П. И. Ящерицын, В. В. Смоляк, Ю. А. Базарнов; заявитель ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ АН БЕЛОРУССКОЙ ССР.
4. Авторское свидетельство № 867619 А1 СССР, МПК В24В 31/10. Способ магнитно-абразивной обработки фасонных поверхностей: № 2872114: заявл. 23.01.1980: опубл. 30.09.1981 / Ю. С. Кочура, А. А. Мизери, Н. Б. Соловьев; заявитель МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ТЕКСТИЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ.
5. Авторское свидетельство № 878523 А1 СССР, МПК В24В 31/10. Способ магнитно-абразивной обработки: № 2160620: заявл. 04.08.1975: опубл. 07.11.1981 / Ф. Ю. Сакулевич, Л. К. Минин, Ю. А. Базарнов [и др.]; заявитель ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ АН БССР.
6. Адлер, Ю.П., Маркова, Е.В., Грановский, Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий, издательство наука, Москва 1976, 278 с.
7. Акулович, Л. М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ, 2013. – 372 с.

8. 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.
9. Акулович, Л. М. Моделирование магнитостатических полей при магнитно-абразивной обработке деталей / Л. М. Акулович, И. Е. Андрушкевич, Л. Е. Сергеев // Докл. II Международной конференции «Математическое моделирование и фундаментальные уравнения. – Минск, 2009. – С. 31–33.
10. Акулович, Л. М. Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, В. Я. Лебедев. – Минск: БГАТУ, 2012. – 316 с.: ил. – ISBN 978-985-519-544-4.
11. Акулович, Л. М. Самоорганизация процессов упрочняющей обработки / Л. М. Акулович, В. С. Ивашко, М. Л. Хейфец. – Минск: Народная книга, 2008. – 236 с.
12. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле: Наука и техн. прогресс НТП / ред. П. И. Яшерицын, М. Т. Забавский, Л. М. Кожуро, Л. М. Акулович. – Минск: Наука и техника, 1988. – 270 с.
13. Аракелян, В.Г. «Физическая химия элегазового электротехнического оборудования». — М.: Издательство МЭИ, 2001. — 300 с.
14. Армарево, И. А. Обработка металлов резанием. Обработка металлов резанием / И. А. Армарево, Р. Х. Браун. – Москва: Машиностроение, 1977. – 325 с.
15. 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.
16. Балобанов, Р.Н., Лопухова, Т.В., Зацаринная, Ю.Н. Влияние времени эксплуатации элегазового оборудования на состояние изоляции/ Р.Н. Балобанов, Т.В. Лопухова, Ю.Н. Зацаринная // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – №16 – С. 122–124.

17. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Ленинград: Машиностроение Ленингр. отд-ние, 1986. – 172 с.
18. Бердичевский, Е.Г. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов: справочник / Е. Г. Бердичевский. – Москва: Машиностроение, 1984. – 196 с.
19. 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.
20. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение. – 1973. – 344 с.
21. 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.
22. Вайнер, Г. М. Качество поверхностного слоя при магнитно-абразивном полировании некоторых материалов / Г. М. Вайнер // Докл. III Междунар. н.-т. сем. по технологиям финишной обработки «АМО'87» (г. Варна, окт. 1987 г.). – Варна, 1987. – С. 42–47.
23. Ваксер, Д. Б. Пути повышения производительности абразивного инструмента при шлифовании / Д. Б. Ваксер. – Москва; Ленинград: Машиностроение. [Ленингр. отд-ние], 1964. – 123 с.
24. Гура, Ю.Л. Силовой трансформатор с элегазовым заполнением [Текст] / Ю.Л. Гура // Электрик. – 2009. – № 1–2, 9.
25. Дальский, А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин: Б-ка технолога / А. М. Дальский. – Москва: Машиностроение, 1975. – 223 с.
26. 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.

27. Иконников, А.М. Теоретические основы обеспечения качества и повышения производительности магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей: дис. ... докт. техн. наук: 05.02.07 / А. М. Иконников. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова, 2019. – 311 с.

28. Исследование общих вопросов теории и технологии процесса магнитно-абразивной обработки: отчет о НИР / Академия Наук БССР; Физико-технический институт; рук. Ф. Ю. Сакулевич. – Минск, 1975. – 566 с. – № ГР. P012010.

29. Кадхум, А. Х. Повышение эффективности магнитно-абразивной обработки оптимизации геометрических параметров рабочей зоны: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Али Хуссейн Кадхум; Белорусская государственная политехническая академия. – Минск, 1993. – 18 с.

30. 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.

31. Коновалов, Е. Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е. Г. Коновалов, Г. С. Шулев. – Минск: Наука и техника, 1967. – 125 с.

32. Кох, Д. Свойства SF6 и его использование в коммутационном оборудовании среднего и высокого напряжения [Текст] / Д. Кох // Техническая коллекция Schneider Electric. – 2003. – № 2. – С. 22.

33. Леонов, С. Л. Автоматическое регулирование рабочего зазора при магнитно-абразивной обработке пространственно сложных поверхностей / С. Л. Леонов, А. М. Иконников, Р. В. Гребеньков // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2014. – № 1. – С. 162-165. – EDN TAUPMD.

34. Леонов, С. Л. Математическое моделирование процесса съема металла при магнитно-абразивной обработке / С. Л. Леонов, А. М. Иконников, В. С. Силивакин // Вестник современных технологий. – 2017. – № 2(6). – С. 46-51. – EDN ZOKUFZ.
35. Леонов, С. Л. Применение анализа сигнала акустической эмиссии процесса резания для активного контроля состояния ферромагнитного порошка при магнитно-абразивной обработке сложнопрофильных поверхностей деталей / С. Л. Леонов, А. М. Иконников, Р. В. Гребеньков // Ползуновский вестник. – 2016. – № 4-2. – С. 58-60. – EDN YQRDWR.
36. Лопухова, Т. В., Зацаринная, Ю. Н., & Балобанов, Р. Н. (2013). Особенности конструкции трансформаторов с элегазовой изоляцией. Вестник Казанского технологического университета, 16 (4), 218-220.
37. Магнитнореологические суспензии на основе аморфных магнитных порошков / И. В. Прохоров [и др.] // Магнитные материалы и их применение: тез. докл. междунар. науч. конф., Минск, 30 сент. – 2 окт. 1998 г. / ФТИ НАН Беларуси. – Минск, 1998. – С. 157.
38. Майборода, В.С., Слободянюк, И.В., Джулий, Д.Ю. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы. - (рос. мов). Житомир.: ПП «Рута», 2017. – 272 с. ISBN 978-617-581-336-2.
39. Макаров, В.Г. Выбор трансформатора в трехфазном магнито-транзисторном инверторе/ В.Г. Макаров // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – №17 – С. 50–54.
40. 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
41. 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.

42. **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.

43. **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.

44. **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

45. **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.

46. **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.

47. **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

48. 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.

49. Оликер, В. Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В. Е. Оликер. – Москва: Metallurgia, 1990. – 175 с.

50. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Новик Ф.С., Арсов Я.Б. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с., ил.

51. 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.

52. Патент № 2098258 С1 Российская Федерация, МПК В24В 31/112. устройство для магнитно-абразивной обработки: № 96103788/02: заявл. 26.02.1996: опубл. 10.12.1997 / Е. Ю. Татаркин, А. А. Ситников, А. М. Марков [и др.]; заявитель Алтайский государственный технический университет им.И.И.Ползунова.

53. Патент № 2314185 С2 Российская Федерация, МПК В24В 31/112. Устройство для магнитно-абразивной обработки: № 2005134064/02: заявл. 03.11.2005: опубл. 10.01.2008 / А. М. Иконников, В. В. Полуденный, В. А. Федоров.

54. Патент № 2336985 С1 Российская Федерация, МПК В24В 31/10, В24В 31/112. Установка для магнитно-абразивной очистки и/или обработки

поверхностей изделий сложной формы: № 2006145228/02: заявл. 19.12.2006: опубл. 27.10.2008 / А. А. Уютов, Л. Ф. Родионов, Е. Р. Шадыев.

55. Патент № 2534656 С2 Российская Федерация, МПК В24В 31/112. Способ и устройство для обработки внутренней поверхности волноводов: № 2012152137/02: заявл. 04.12.2012: опубл. 10.12.2014 / С. В. Агашкин, М. М. Михнев, А. Р. Ушаков; заявитель Открытое акционерное общество "Информационные спутниковые системы" имени академика М.Ф. Решетнёва".

56. Патент № 2599765 С2 Российская Федерация, МПК В24В 31/112. устройство для магнитно-абразивной обработки: № 2015100565/02: заявл. 12.01.2015: опубл. 10.10.2016 / А. М. Иконников, Е. Ю. Татаркин, В. С. Силивакин [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова" (АлтГТУ).

57. Патент № 2632732 С Российская Федерация, МПК В24В 31/112. устройство для магнитно-абразивной обработки изделия: № 2016136594: заявл. 12.09.2016: опубл. 09.10.2017 / Ю. А. Алехов, А. Н. Пересадченко, В. С. Полищук [и др.].

58. 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".

59. Патент на полезную модель № 151704 U1 Российская Федерация, МПК В24В 31/112. устройство для магнитно-абразивной обработки: № 2014147455/02: заявл. 25.11.2014: опубл. 10.04.2015 / А. М. Иконников, Е. Ю. Татаркин, В. А. Хоменко, М. Е. Нестеров; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова" (АлтГТУ). – EDN ZVSUDJ.

60. Патент на полезную модель № 152033 U1 Российская Федерация, МПК В24В 31/112. устройство для магнитно-абразивной обработки: № 2014143286/02: заявл. 27.10.2014: опубл. 27.04.2015 / Р. В. Гребеньков, А. М. Иконников, Е. Ю. Татаркин, В. С. Силивакин; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова" (АлтГТУ). – EDN QHNNLP.

61. Патент на полезную модель № 162223 U1 Российская Федерация, МПК В24В 31/112. устройство для магнитно-абразивной обработки: № 2015145262/02: заявл. 21.10.2015: опубл. 27.05.2016 / А. М. Иконников, Е. Ю. Татаркин, Р. В. Гребеньков, Т. А. Шрайнер; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова" (АлтГТУ). – EDN NDIYFX.

62. 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.

63. 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.

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

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

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

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

68. 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.

69. Скворчевский, Н. Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерицын. – Минск: Навука і тэхніка, 1991. – 214 с.

70. Скворчевский, Н. Я. Смазочно-охлаждающие жидкости для магнитно-абразивной обработки // Технология машиностроения: науч.-техн. сб. – Сер. 17. – Вып. 124. – 1981. – С. 6-12.

71. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. – Москва: Машиностроение, 1987. – 206 с.

72. 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.

73. Татаркин, Е. Ю. Автоматизация выбора инструментальной оснастки для операций магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей / Е. Ю. Татаркин, А. М. Иконников, Т. А. Шрайнер // ИННОВАЦИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ (ИнМаш-2015), Кемерово, 23–25 сентября 2015 года / Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2015. – С. 196-201.

74. Татаркин, Е. Ю. Проектирование магнитных индукторов для полирования рабочих поверхностей режущих инструментов / Е. Ю. Татаркин, А. М. Иконников // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 1(54). – С. 66-68.

75. Татаркин, Е. Ю. Проектирование устройств для магнитно- абразивной обработки с помощью метода поискового конструирования / Е. Ю. Татаркин, А.

М. Иконников, Р. Н. Шапоров // Ползуновский альманах. – 2012. – № 1. – С. 99-101. – EDN PVHCBN.

76. 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.

77. Шабанов, В.А. Высоковольтное электрооборудование подстанций промышленных предприятий: учеб. пособие [Текст] / В.А. Шабанов, В.П. Лопатин. – Уфа: РИЦ УГНТУ. – 2013. – 157 с.

78. Ahmadi, F. Effect of abrasive particle morphology along with other influencing parameters in magnetic abrasive finishing process / F. Ahmadi, H. Beiramlou, P. Yazdi // Mechanics and Industry. – 2021. – № 22.

79. Alok, A. Synthesis and Characterization of Sintered Magnetic Abrasive Particles having Alumina and Carbonyl Iron Powder / A. Alok, M.S. Niranjana, A. Kumar, M. Kumar, M. Das // Institute of Physics Publishing. – 2020. – № 804 (012002).

80. Bhardwaj, A. Modelling of wind turbine magnet for magnetic abrasive finishing and magnetic field assisted abrasive flow machining process / A. Bhardwaj, K. Srinivas, R. Chaudhary // Journal of Engineering Research (Kuwait). – 2021. – С. 121-130.

81. Chawla, G. Experimental Investigation of Process Parameters of Al-SiC-B4C MMCs Finished by a Novel Magnetic Abrasive Flow Machining Setup / G. Chawla, V.K. Mittal, S. Mittal // Walailak Journal of Science and Technology (WJST). – 2021. – № 18 (18).

82. Cui, Y. Study on magnetic abrasive finishing process of AlSi10Mg alloy curved surface formed by selective laser melting / Y. Cui, G. Zhang, T. Cui, H. Chen // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – № 9-10 (118). – С. 3315-3330.

83. Gunjal, S. B. Improving the process performance of magnetic abrasive finishing of ss304 material using multiobjective artificial bee colony algorithm / Gunjal S. B., Pawar P. J. // Engineering Review. – 2020. – № 1 (41). – С. 34-49.

84. Jiao, A. Study on improving hole quality of 7075 aluminum alloy based on magnetic abrasive finishing / A. Jiao, G. Zhang, B. Liu, W. Liu // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2020. – № 6 (12).
85. Kim, J. S. Development of an inner finishing method for brass cone pipe via a movable manual electromagnet in a magnetic abrasive finishing process / J.S. Kim, S. Chanchamnan, L. Heng, S.D. Mun // – 2021. – № 9 (11).
86. Kim, J. S. Effect of environmentally friendly oil on Ni-Ti stent wire using ultraprecision magnetic abrasive finishing / J.S. Kim, S.S. Nam, L. Heng, B.S. Kim, S.D. Mun // – 2020. – № 10 (10). – С. 1-13.
87. Kim, J. S. Machining the surface of orthopedic stent wire using a non-toxic abrasive compound in a magnetic abrasive finishing process / J.S. Kim, L. Heng, S. Chanchamnan, S.D. Mun // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2021. – № 16 (11).
88. Krasnyy, V. A. Improving the wear resistance of piston rings of internal combustion engines when using ion-plasma coatings / V. A. Krasnyy, V. V. Maksarov, **D. D. Maksimov** // *Key Engineering Materials*. – 2020. – № 854. – С. 133-139.
89. Li, W. Achieving in-situ alloy-hardening core-shell structured carbonyl iron powders for magnetic abrasive finishing / W. Li, J. Li, B. Cheng, M. Belotrkovsky // *Materials and Design*. – 2021. – №. 212. – С. 5-8.
90. Li, W. Effect of magnetic head shape on processing of titanium alloy wire by magnetic abrasive finishing / W. Li, Y. Chen, M. Cheng, Y. Lv // *Materials*. – 2020. – № 13 (6).
91. 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*. – 2023. – № 4. – С 96-102.
92. **Maksimov, D. D.** Quality assurance of surfaces of complex profile of products from Aluminum alloy / **D. D. Maksimov** // *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*, St Petersburg, 31 – 06 мая 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. – С. 121-122.

93. Marczak, M. Finite element analysis of the magnetic field distribution in a magnetic abrasive finishing station and its impact on the effects of finishing stainless steel AISI 3041 / M. Marczak, J. Zawora // *Metals*. – 2021. – № 2 (11). – C. 1-24.
94. Nahy, A. M., Kadhum A. H. Optimizing the micro-hardness of a surface by magnetic abrasive finishing / A.M. Nahy, A.H. Kadhum // *Institute of Physics Publishing*. – 2020. – № 1 (870).
95. Nam, S. S., Kim J. S., Mun S. D. Magnetic abrasive finishing of beta-titanium wire using multiple transfer movement method / S.S. Nam, J.S. Kim, S.D. Mun // *Applied Sciences (Switzerland)*. – 2020. – № 19 (10). – C. 1-13.
96. Panteleenko, F. Fast Magnetic Abrasive Finishing with Diffusionally Alloyed Powder / F. Panteleenko, G. Petrishin, V. Maksarov, **D. Maksimov** // *Russian Engineering Research*. – 2023. – № 43 (4). – C. 470-473.
97. Sharma, V. K. Modeling and analysis of a novel rotational magnetorheological abrasive flow finishing process / V.K. Sharma // *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. – 2021. – № 3 (4). – C. 290–301.
98. Singh, P. Finishing of Tubes using Bonded Magnetic Abrasive Powder in an Abrasive Medium / P. Singh, L. Singh, S. Singh // *Powder Metallurgy Progress*. – 2020. – № 1 (20).
99. Singh, P. Preparation, Microstructure Evaluation and Performance Analysis of Diamond-Iron Bonded Magnetic Abrasive Powder / P. Singh, L. Singh, S. Singh // *Powder Metallurgy Progress*. – 2020. – № 2 (19). – C. 82–89.
100. Singh, S. Magneto-rheological fluid assisted abrasive nanofinishing of β -phase ti-nb-ta-zr alloy: Parametric appraisal and corrosion analysis / S. Singh, C. Prakash, A. Pramanik, A. Babbar // *Materials*. – 2020. – № 22 (13). – C. 1–15.
101. Song, J. Micro-machining characteristics in high-speed magnetic abrasive finishing for fine ceramic bar / J. Song, T. Shinmura, S.D. Mun, M. Sun // *Metals*. – 2020. – № 4 (10).
102. Song, W. Annular surface micromachining of titanium tubes using a magnetorheological polishing technique / W. Song, Z. Peng, P. Li, S.B. Choi // *Micromachines*. – 2020. – № 3 (11).

103. Zhang, W. Preparation and optimization of high-purity silicon carbide magnetic abrasives for the magnetic induction-wire sawing process / W. Zhang, T. Qiu, C. Yao // *Fluid Dynamics and Materials Processing*. – 2020. – № 4 (16). – С. 709–721.

104. Zhang, Y. Study of corrective abrasive finishing for plane surfaces using magnetic abrasive finishing processes / Y. Zhang, Y. Zou // *Nanotechnology and Precision Engineering*. – 2021. – № 3 (4).

105. Zou, Y. Development of a new finishing process combining a fixed abrasive polishing with magnetic abrasive finishing process / Y. Zou, R. Satoui, O. Yamazaki, H. Xie // *Machines*. – 2021. – № 4 (9).

ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Технические характеристики станка, приборов**Таблица Б.1 – Технические характеристики прибора *SURFTEST SJ-210*

Модель	SJ-210 P
№	178930 – 2 D
Назначение	Измерение шероховатости
Диапазон измерений	
По оси Z	360 мкм
Блок привода	
Скорость измерения	0,25 мм/с; 0,5 мм/с; 0,75 мм/с
Датчик	
Метод измерений	Индуктивность дифференциальная
Щуп	Алмазный наконечник
Радиус опоры	40 мм
Измерительное усилие	0,75 мН
Дисплейный блок	
Профили	Профиль шероховатости (R); R-Motif; DF-Профиль и др.
Стандарты шероховатости	EN ISO; VDA; JIS; ANSI и пользовательские
Длина оценки (L)	0,08 мм; 0,25 мм; 0,8 мм; 2,5 мм
Допуск	Цветная индикация
Интерфейс	USB; Digimatic
Источник питания	Блок или аккумулятор

Таблица Б.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 ТУ)
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 Б.3 – Технические характеристики твердомера портативного НТ-1208

Характеристика	Значение
Диапазон измерения, HLD	170-960
Шкала твердости	HLD, HB, HRB, HRC, HV
Направление измерения	180°
Погрешность, HLD	±6
Повторяемость, HLD	6
Напряжение, В	2
Время зарядки, ч	5
Диапазон рабочих температур, °C	0-40
Диаметр индентора, мм	2,5

Таблица Б.4 – Технические характеристики микроскопа инвертированного Leica DM 2500

Параметр прибора	Характеристика
Метод контрастирования	Проходящий свет: светлое/темное поле, фазовый контраст, поляризация, интерференционный контраст Отраженный свет: флуоресценция
Оси проходящего света	Осветитель в отдельном корпусе
Оси отраженного света	Флуоресцентный осветитель отраженного света, для окуляров с полем зрения до 22, включает: 5-позиционный револьвер для фильтров центрируемые апертурную и полевую диафрагмы заслон для подавления излишнего света Серый фильтр и заслонка светового пучка, переключаемые
X/Y столик	С держателем конденсора Телескопическая ручка перемещения столика, устанавливаемая справа или слева Право/левостороннее управление
Револьверная турель смены объективов	Ручная 6-ти/7-ми позиционная для объективов с резьбой M25 пластина призмы объектива
Фокусировка	Колесо фокусировки для грубой/точной фокусировки Регулировка высоты Скорость включения (дополнительно) Два режима установки шага точной фокусировки (1 и 4 мкм)

Таблица Б.5 – Технические характеристики станка токарно-винторезного JET GHB-1340A DRO

Параметр	Значение
Напряжение, В	400
Диаметр обточки над станиной, мм	330
Конус шпинделя	МК-5
Ширина станины, мм	187
Мощность двигателя, кВт	2
Масса, кг	650
Макс. размер резца, мм	16x16
Количество метрических резьб	23
Диапазон метрической резьбы, мм	0,45-10
Длина, мм	1905
Ширина, мм	762
Высота, мм	1200

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Патент на способ магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных
поверхностей и устройство для его осуществления

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2787597

**СПОСОБ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ
СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И
УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Максаров Вячеслав Викторович (RU), Кексин
Александр Игоревич (RU), Максимов Дмитрий
Дмитриевич (RU), Куфяев Владислав Геннадьевич (RU)*

Заявка № 2022108066

Приоритет изобретения 28 марта 2022 г.
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 11 января 2023 г.
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 28 марта 2042 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат: 096400077634e10f0a94eebd24145bc57
Владимир Зубов /Одний Сергеевич
Действителен с 20.01.2022 по 20.01.2025

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 787 597**⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
B24B 31/112 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B24B 31/112 (2022.08)

(21)(22) Заявка: 2022108066, 28.03.2022

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
28.03.2022Дата регистрации:
11.01.2023

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.03.2022

(45) Опубликовано: 11.01.2023 Бюл. № 2

Адрес для переписки:

190106, Санкт-Петербург, 21 линия, В.О., 2,
СПГУ, Патентно-лицензионный отдел

(72) Автор(ы):

Максаров Вячеслав Викторович (RU),
Кексин Александр Игоревич (RU),
Максимов Дмитрий Дмитриевич (RU),
Куфев Владислав Геннадьевич (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 2599765 C2, 10.10.2016. SU 399352
A1, 03.10.1973. SU 1407774 A1, 07.07.1988. RU
152033 U1, 27.04.2015. UA 18814 A, 25.12.1997.
BY 14770 C1, 30.08.2011. DE 2309993 B2,
03.03.1977.(54) СПОСОБ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

(57) Реферат:

Группа изобретений относится к магнитно-абразивной обработке машиностроительных изделий и может быть использована обработке сложнопровильных поверхностей изделий. Способ включает копирование профиля обрабатываемой поверхности магнитной системой, ее ориентацию на заданную величину рабочего зазора, который наполняют магнитно-абразивной массой, и придание магнитной системе осциллирующего движения, а заготовке - вращательного движения. Магнитную систему с индуктором выполняют в виде кассеты с постоянными магнитами и пластинами

магнитпровода различной конфигурации. Ориентируют кассету относительно сложнопровильной поверхности из условия расположения рабочих поверхностей постоянных магнитов параллельно касательным к обрабатываемой поверхности. Обеспечивают заданную величину рабочего зазора путем возвратно-поступательного движением кассеты. Приведена конструкция устройства для осуществления указанного способа обработки. Обеспечивается равномерная обработка сложнопровильной поверхности. 2 н.п. ф-лы, 7 ил.

RU 2 787 597 C 1

RU 2 787 597 C 1

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акты о промышленном внедрении результатов диссертации



Инжиниринг
Строительство
Обслуживание



ул. Октябрьская, д. 4, г. Краснотурьинск, Свердловская область, 624440
Тел.: (085)4-88-64, Тел./Факс: (34384)4-87-47;
Aleksandra.Chernysheva@iso-serv.com
ОГРН 1187746982060, ИНН 7730248021, КПП 773001001

«28» июля 2023 г.

Утверждаю
Начальник РМЦ
С.Ф. Эннс
Дата « 28 » 07 2023 г.

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертации
Максимова Дмитрия Дмитриевича
по научной специальности 2.5.6. Технология машиностроения

Комиссия в составе:

Председатель: Начальник ремонтно-механического цеха Эннс Сергей Федорович;

Члены комиссии:

Начальник производственно-технического отдела Слобожанина Тамара Игорьевна;

Менеджер конструкторско-технологической группы Зорин Андрей Павлович.

составили настоящий акт о том, что в филиале ООО «ИСО» в г. Краснотурьинск в период с 17-28 июля 2023 г. проведены производственные испытания результатов кандидатской диссертации Максимова Д.Д. «Технологическое обеспечение и повышение качества сложнопольных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц». Результаты диссертации использованы в производственном процессе ООО «ИСО» при разработке технологии обработки изделий из алюминиевых сплавов, имеющих ответственные сложнопольные поверхности.

Магнитно-абразивная обработка проводилась в соответствии с рекомендациями по назначению режимных параметров магнитно-абразивной обработки сложнопольных поверхностей, представленными в кандидатской диссертации Максимова Д.Д.

Оценка обработанных поверхностей проводилась в производственной лаборатории дефектоскопии (ПЛД) филиала ООО «ИСО» в г. Краснотурьинск

(Свидетельство об аттестации № ЛПК-058А0225 от 26.08.2022г.) путем измерения шероховатости обработанной поверхности по предлагаемому способу и сравнения полученных значений со значениями шероховатости поверхности, обработанной традиционными способами.

Результаты показали, что применение устройства на постоянных магнитах позволяет достичь шероховатости поверхности $Ra=0,6+0,8$ мкм по всему обрабатываемому профилю, при этом обеспечивается равномерность покрытия обрабатываемой поверхности магнитно-абразивной массой.

Результаты диссертации Максимова Д.Д. использованы в производственном процессе филиала ООО "ИСО" в г. Красноуральск в виде:

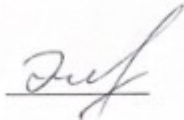
- использования в технологическом процессе обработки изделий из алюминиевых сплавов, имеющих сложнопрофильные поверхности;
- методики расчета варьируемых параметров магнитно-абразивной обработки, обеспечивающей равномерную обработку сложнопрофильной поверхности;
- рекомендаций по технологическому обеспечению качества поверхностей сложнопрофильных изделий из алюминиевых сплавов за счет применения окончательной магнитно-абразивной обработки по предлагаемому способу с применением постоянных магнитов.

Использование указанных результатов позволяет:

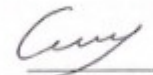
- повысить качество сложнопрофильных поверхностей изделий из алюминиевых сплавов в процессе их механической обработки;
- сократить количество технологических операций и время, затрачиваемое на их выполнение;
- повысить эффективность процесса обработки сложнопрофильных поверхностей изделий из алюминиевых сплавов.

По результатам проведенного опробования результатов диссертации составлены рекомендации при составлении технологии обработки сложнопрофильных поверхностей из алюминиевых сплавов для внутреннего использования («Рекомендации при обработке алюминиевых изделий, №091-431-ГД от 28.07.23 г.).


Председатель комиссии
Начальник РМЦ

 Эннс С.Ф.

Члены комиссии:
Начальник
производственно-технического отдела

 Слободжанна Т.И.

Менеджер
конструкторско-технологической группы

 Зорин А.П.



Утверждаю

Первый заместитель генерального
директора АО ВО «Электроаппарат»
А.Н. Грицаев

Дата « 24 » 2024 г.

М.П.



АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертации
Максимова Дмитрия Дмитриевича
по научной специальности 2.5.6. Технология машиностроения

Комиссия в составе:

Председатель: первый заместитель генерального директора - Алексей Николаевич Грицаев;

Члены комиссии:

Главный конструктор - Андрей Леонидович Карпов;

Главный технолог - Валерий Николаевич Григуть.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации Максимова Д.Д. «Технологическое обеспечение и повышение качества сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в производственном процессе АО ВО «Электроаппарат» при разработке технологии обработки сложнопрофильных поверхностей элегазового трансформатора в виде:

- использования в технологическом процессе магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей предлагаемое устройство, содержащее постоянные магниты, расположенные своими рабочими поверхностями параллельно касательным обрабатываемой поверхности;
- оптимизации технологических карт обработки сложнопрофильных поверхностей изделий из алюминиевого сплава АМц посредством замены операции шлифования на операцию магнитно-абразивной обработки;

- методики расчета варьируемых параметров магнитно-абразивной обработки, обеспечивающей формирование равномерного качества сложнопрофильной поверхности;

- рекомендации по технологическому обеспечению качества сложнопрофильных поверхностей изделий из алюминиевого сплава за счет применения предлагаемого способа магнитно-абразивной обработки.

Результаты обработки сложнопрофильных поверхностей показали, что применение устройства на постоянных магнитах позволяет достичь шероховатости поверхности $Ra = 0,65 \pm 0,75$ мкм по всему обрабатываемому профилю (шероховатость заготовки составляла $Ra = 1,4 \pm 1,6$ мкм), при этом обеспечивается равномерность покрытия обрабатываемой поверхности магнитно-абразивной массой.

Использование указанных результатов позволяет:

- повысить качество сложнопрофильных поверхностей изделий из алюминиевых сплавов в процессе их окончательной механической обработки;

- повысить эффективность процесса обработки сложнопрофильных поверхностей изделий и сократить расходы на производство за счет применения предлагаемого способа магнитно-абразивной обработки.

По результатам проведенного опробования результатов диссертации составлены рекомендации по окончательной обработке сложнопрофильных поверхностей из алюминиевых сплавов для внутреннего пользования (№191-ТД от 12.02.2024 г.).

Председатель комиссии

Первый заместитель
генерального директора

А.Н. Грицаев

Члены комиссии:

Главный конструктор

А.Л. Карпов

Главный технолог

В.Н. Григуть

ПРИЛОЖЕНИЕ Д**Акт о внедрении результатов диссертации в учебный процесс****Утверждаю**

Проректор по образовательной
деятельности федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования



«Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II»

к.т.н., доц. Д.Г. Петраков

Дата «20» марта 2024 г.

АКТ

о внедрении результатов
кандидатской диссертации

Максимова Дмитрия Дмитриевича

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 кафедрой машиностроения Жуков И.А.;
доцент кафедры машиностроения Халимоненко А.Д.

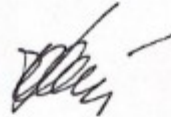
составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Технологическое обеспечение и повышение качества сложнопольных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в учебном процессе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II» 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, изучают способы магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей, приобретают навыки работы с устройствами на постоянных магнитах, располагающихся на токарно-винторезном станке JET GHB 1340 A.

Студенты приобретают навыки компьютерного моделирования электромагнитных процессов, процесса магнитно-абразивной обработки в программах Ansys Electronic Suite (модуль Maxwell 3D), Rocky DEM и Ansys Fluent. В ходе практических занятий студенты получают компетенции в области окончательной механической обработки изделий, в частности магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей из алюминиевых сплавов, а также получают навыки по проектированию устройств для магнитно-абразивной обработки, подбору режимных параметров обработки и анализа экспериментальных данных.

Председатель комиссии

Декан
механико-машиностроительного
факультета



Максаров В.В.

Члены комиссии:

Заведующий кафедрой
машиностроения



Жуков И.А.

доцент кафедры
машиностроения



Халимоненко А.Д.