

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

На правах рукописи

Филипенко Ирина Анатольевна



ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА КРОМОК ЛИСТОВОГО
ПРОКАТА ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ АМц МЕТОДОМ
МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Санкт-Петербург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	13
1.1 Особенности эксплуатации изделий, изготавливаемых из алюминиевого сплава марки АМц.....	13
1.2 Причины разрушения сварных соединений изделий из алюминиевых сплавов	16
1.3 Технологические особенности подготовки кромок изделий из алюминиевых сплавов перед сваркой.....	23
1.3.1 Механические способы подготовки кромок изделий перед сваркой.....	24
1.3.2 Химические способы зачистки кромок изделий перед сваркой.....	26
1.3.3 Другие способы подготовки кромок изделий перед сваркой.....	29
1.4 Выводы по первой главе.....	31
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ КРОМОК ПЛОСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО МАТЕРИАЛА ПЕРЕД СВАРКОЙ.....	34
2.1 Сущность и особенности магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий из алюминиевого сплава.....	34
2.2 Способ магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий.....	36
2.2.1 Выбор сочетания рабочих движений.....	39
2.2.2 Магнитно-абразивный комплекс для обработки кромок плоских изделий из алюминиевого сплава.....	42
2.2.3 Схема магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий.....	44
2.2.4 Определение диапазона рабочих движений.....	49
2.3.1 Магнитная индукция при магнитно-абразивной обработке алюминиевых изделий.....	51
2.3.2 Абразивный материал при магнитно-абразивной обработке алюминиевых изделий.....	53
2.3.3 Обоснование выбора смазочно-охлаждающей жидкости для создания технологического инструмента.....	58
2.4 Выводы по второй главе.....	60

ГЛАВА 3 МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА КРОМОК ПЛОСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ АМц	62
3.1 Методика проведения экспериментальных исследований.....	62
3.2 Разработка центрального композиционного ротатбельного плана эксперимента и методика составления регрессионной модели	65
3.3 Влияние магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхности кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц.....	71
3.4 Влияние магнитно-абразивной обработки на удаление существующей и формирование новой оксидной пленки на поверхности кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц.....	80
3.5 Влияние магнитно-абразивной обработки чистоту поверхности кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц	89
3.6 Влияние технологических факторов магнитно-абразивной обработки на производительность при обработке кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц.....	94
3.7 Выводы по третьей главе	98
ГЛАВА 4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА КРОМОК ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ АМц ПЕРЕД СВАРКОЙ ПОСРЕДСТВОМ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ	100
4.1 Методика проведения экспериментальных исследований.....	101
4.2 Оценка дефектности сварных соединений с различным способом подготовки кромок перед сваркой.....	103
4.2.1 Анализ макроструктуры сварных швов	103
4.2.2 Анализ микроструктуры сварных швов.....	106
4.3 Оценка прочности сварных соединений с различным способом подготовки кромок перед сваркой.....	109
4.4 Практические рекомендации по подготовке к сварке кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц методом магнитно-абразивной обработки	113
4.5 Выводы по четвертой главе	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	124
ПРИЛОЖЕНИЕ А Вспомогательные таблицы для построения регрессионных моделей	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Планирование эксперимента и результаты экспериментальных данных	139
ПРИЛОЖЕНИЕ В Технические характеристики приборов.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Патенты на способ магнитно-абразивной обработки.....	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акты о промышленном опробовании способа магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий перед сваркой..	151
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Акт внедрения результатов диссертации в учебный процесс.....	153

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Благодаря своим отличительным эксплуатационным и технологическим свойствам алюминий и его сплавы нашли широкое применение во многих отраслях промышленности.

Одной из отличительных особенностей изделий из алюминиевых сплавов является наличие оксидной пленки на поверхности. Наличие оксидной пленки на поверхности алюминия повышает коррозионную стойкость изделий, однако создает трудности в процессе сварки. Имея температуру плавления много выше, чем основной металл, оксидная пленка остается в качестве неметаллических включений в корне шва, являясь дефектом сварного соединения и локальным концентратором напряжения. Рост оксидной пленки зависит от температуры воздействия на поверхность и резко увеличивается с ее повышением. Уменьшение площади поверхности окисления и толщины пленки способствует уменьшению количества дефектов в сварном шве, тем самым повышая прочность соединения. Для достижения данной цели используются операции предварительной подготовки кромок изделий перед сваркой. Существующие способы основываются на механическом или химическом воздействии, сопровождаются высокими температурными воздействиями и значительным повышением шероховатости поверхности, что формирует большую площадь окисления и, как следствие, большее количество оксида, переходящего в расплав.

Обеспечить снижение шероховатости, тем самым уменьшая площадь поверхности окисления, без воздействия на поверхность кромок высоких температур возможно с применением метода магнитно-абразивной обработки.

Степень разработанности темы исследования

Изучению свойств алюминиевых сплавов и их влияния на сварные соединения посвящен ряд фундаментальных исследований отечественных ученых: И.Н. Фридляндера, Л.А. Воронцовой, И.Б. Пешкова, Б.А. Колачева, В.И. Елагина, В.А. Ливанова, Д.М. Рабкина, А.В. Лозовской, М.Е. Дрица, А.М. Дрица, В.В. Овчинникова, а также зарубежных ученых О. Kubaschewski, В.Е. Hopkins.

Технологию магнитно-абразивной обработке и ее влиянию на поверхностный слой изделий посвящены исследования ряда отечественных ученых: Ю.М. Барона, Н.Я. Скворчевского, Д.М. Ждановича, Л.М. Кожуро, Е.Г. Коновалова, В.Е. Оликера, а также зарубежных ученых Н.С. Хомича, Н.Я. Ящерицина, С.Ю. Сакулевича, Т. Shinmura, К. Takazava, E. Hitano, S. Yin, V.K. Jain.

Процессу формирования качества при магнитно-абразивной обработке цветных металлов уделяли внимание в своих исследованиях Н.С. Хомич, С.Ю. Сакулевич, Н.Я. Скворчевский.

Однако обработке алюминиевых сплавов уделено недостаточно внимания. Сплав АМц является наиболее применяемым для изготовления сварных конструкций. Изучению влияния магнитно-абразивной обработки на формируемое качество поверхности кромок, прочность и дефектность сварного соединения не уделялось достаточно внимания.

В связи с этим, необходимо проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований, основывающихся на комплексном подходе обеспечения качественных характеристик кромок плоских изделий и удалению оксидного слоя с поверхности посредством метода магнитно-абразивной обработки и оптимизации трудоемкого технологического процесса механической подготовки кромок изделий из алюминиевого сплава АМц, что является актуальной технологической задачей, требующей своего решения.

Цели и задачи

Цель работы - выявление закономерностей влияния технологических факторов магнитно-абразивной обработки на повышение качества кромок листового проката из алюминиевого сплава марки АМц, позволяющих обеспечить прочность сварного соединения за счет удаления существующего оксидного слоя и уменьшения шероховатости поверхности.

Идея исследования. Технологическое обеспечение качества торцовых и боковых поверхностей кромок листового проката из алюминиевого сплава марки АМц осуществляется посредством магнитно-абразивной обработки, снижающей

площадь поверхности окисления и толщину оксидной пленки для повышения прочности сварного соединения.

Задачи исследования:

Для достижения цели исследования необходимо выполнить следующие задачи:

1. Провести анализ и обобщение теоретических и экспериментальных данных, приведенных в литературных источниках, зависимости прочности сварного соединения от качества предварительной подготовки кромок, технологии магнитно-абразивной обработки и ее влияния на поверхностный слой изделий из алюминиевых материалов;

2. Разработать способ магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий, включающий обоснование выбора схемы обработки, рабочих движений, технологического инструмента, состава технологической среды и значений технологических факторов обработки;

3. Экспериментально определить влияние технологических параметров магнитно-абразивной обработки на шероховатость кромок плоских изделий, удельный съем материала с единицы площади и толщину снимаемого материала;

4. Разработать регрессионные математические зависимости технологической системы, учитывающие влияние технологических параметров магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхности, удельный съем материала с единицы площади и толщину снимаемого материала при обработке плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц;

5. Установить зависимости влияния значений шероховатости поверхности кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц, подготовленных способом магнитно-абразивной обработки с различными значениями технологических факторов, на прочность и дефектность сварного соединения;

6. Предложить практические рекомендации по выбору значений технологических параметров магнитно-абразивной обработки и способа обработки кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц, позволяющие

произвести равномерную обработку торцовых и боковых поверхностей, обеспечить удаление существующего оксидного слоя и снизить шероховатость поверхности.

Объект исследования

Процесс магнитно-абразивной обработки кромок листового проката из алюминиевого сплава марки АМц.

Предмет исследования

Кромки листового проката из алюминиевого сплава марки АМц.

Научная новизна работы

1. Разработаны регрессионные математические зависимости и выявлены закономерности влияния технологических факторов (магнитная индукция, время обработки, частота вращения и величина подачи заготовки) магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхности, удельный съем материала с единицы площади поверхности, толщину снимаемого материала при обработке изделий из алюминиевого сплава марки АМц.

2. Установлены зависимости влияния значений шероховатости поверхности кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц, подготовленных способом магнитно-абразивной обработки с различными значениями технологических факторов, на прочность и дефектность сварного соединения.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Получены регрессионные математические зависимости, учитывающие величину магнитной индукции, время обработки, частоту вращения и скорость подачи заготовки в процессе магнитно-абразивной обработки изделий из алюминиевого сплава марки АМц, позволяющие оценить степень влияния технологических факторов обработки на шероховатость поверхности, удельный съем материала с единицы площади и толщину снимаемого материала.

2. Разработан способ магнитно-абразивной подготовки кромок поверхностей плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц (Патент на изобретение № 2710085), включающий в себя схему обработки, сочетание рабочих движений, диапазоны технологических факторов и технологический инструмент, позволяющий произвести равномерную бездефектную обработку.

3. Разработан способ магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий одновременно с боковых и торцевой сторон (Патент на изобретение № 2751392), применяющийся для кромок изделий толщиной более 8 мм.

4. Определены оптимальные режимные параметры магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц, позволяющие удалить существующий оксидный и дефектный слой и обеспечить шероховатость поверхности $Ra = 0,23$ мкм.

5. Установлено, что применение метода магнитно-абразивной обработки в качестве предварительной операции подготовки кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц перед сваркой позволяет увеличить предел прочности сварного соединения в 1,6 раз, работу разрушения в 4,5 раза по сравнению со сварными соединениями, кромки которых подготовлены ручным абразивным инструментом.

6. Результаты диссертационной работы прошли апробацию на промышленных предприятиях АО ВО «Электроаппарат» и ООО «ПО «Электромашина», а также отдельные научные положения работы приняты к внедрению в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению 15.03.01 – Машиностроение, программе подготовки «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств» Горного университета

Методология и методы исследований

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

Положения, выносимые на защиту

1. Применение способа магнитно-абразивной подготовки кромок поверхностей плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц, включающий в себя схему обработки, сочетание рабочих движений, диапазоны технологических факторов и технологический инструмент, позволяют удалить существующий оксидный и дефектный слой, обеспечить шероховатость поверхности $Ra = 0,23$ мкм и произвести равномерную бездефектную обработку.

2. Разработанные регрессионные математические зависимости технологической системы, учитывающие влияние технологических параметров магнитно-абразивной обработки, позволяют получить значения шероховатости поверхности, удельного съема материала с единицы площади и толщины снимаемого материала при обработке плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц.

3. Разработанный и реализованный на практике способ магнитно-абразивной предварительной подготовки кромок поверхностей плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц обеспечивает увеличение предела прочности сварного соединения в 1,6 раз, работу разрушения в 4,5 раза по сравнению со сварными соединениями, кромки которых подготовлены ручным абразивным инструментом.

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

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: 59-ой Международной научной конференции по горному делу студентов и молодых ученых (г. Краков, Польша, 2018 г.); втором международном молодежном научно-практическом форуме «Нефтяная столица» (г. Ханты-Мансийск, 2019 г.); XVII Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов (г. Санкт-Петербург, 2019 г.); Международном семинаре «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME» (г. Санкт-Петербург, 2019-2021 гг.); Международном форуме «70. VHT Freiburger Universitätsforum» и конференции «14. Freiberg-St. Petersburger Kolloquium junger Wissenschaftler» (г. Фрайберг,

Германия, 2019 г.); Всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса» (г. Санкт-Петербург, 2020-2021 гг.); IV Международной научно-практической конференции «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.).

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 20-38-90286 «Технологическое повышение качества кромок изделий из алюминиевых материалов перед сваркой посредством магнитно-абразивной обработки».

В полном объеме диссертация заслушана и одобрена на заседании кафедры машиностроения Горного университета в 2022 г. Методика использования магнитно-абразивной обработки кромок изделий из алюминиевого сплава опробована в производственном процессе предприятий.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; проведении теоретических и экспериментальных исследований по выбору схемы обработки, сочетания рабочих движений, их значений, технологической среды; проведении экспериментальных исследований по определению влияния значений технологических факторов обработки на формирование шероховатости поверхности, удельный съем материала с единицы площади, толщину снимаемого материала; проведении экспериментальных исследований влияния шероховатости поверхности кромок алюминиевых изделий после магнитно-абразивной обработки на дефектность и прочность сварного соединения; проведении анализа результатов экспериментальных исследований и подготовке рекомендаций по выбору режимных параметров магнитно-абразивной обработки.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 13 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на

соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и системы цитирования Scopus. Получено 2 патента.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Содержит 153 страницы машинописного текста, 58 рисунков, 12 таблиц, список литературы из 111 наименований и 6 приложений на 18 страницах.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Особенности эксплуатации изделий, изготавливаемых из алюминиевого сплава марки АМц

Алюминий и его сплавы занимают первое место по распространению в промышленности среди цветных металлов [50]. Широкое распространение алюминиевых сплавов связано с их уникальными физико-механическими свойствами. По ряду свойств, присущих конструкционным материалам (удельная прочность, коррозионная стойкость), алюминий и его сплавы превосходят углеродистые и низкоуглеродистые стали [19]. Алюминий и его сплавы обладают высокой пластичностью, теплопроводностью ($\lambda = 226 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) и электропроводностью, коррозионной стойкостью, имеют низкую плотность ($2,7 \text{ г/см}^3$) при сравнительно высокой удельной прочности, наряду с высокопрочными сталями [10, 50, 104].

Алюминий является химически активным металлом, что обуславливает появление оксида Al_2O_3 в виде оксидной пленки на поверхности изделия при контакте с кислородом. Наличие оксидной пленки обеспечивает высокую коррозионную стойкость алюминия в тех средах, которые не оказывают разрушающего воздействия, и предохраняет алюминиевые изделия от взаимодействия с окружающей средой [50]. Оксидный слой мгновенно восстанавливается при повреждении поверхности [19].

К основным отраслям применения алюминия можно отнести: машиностроение, автомобилестроение, энергетический сектор, нефтегазовый сектор, авиастроение и ракетная техника, судостроение. В авиастроении важным фактором является коррозионная стойкость применяемых материалов, причем контакт материала с окружающей средой (атмосферой) следует рассматривать с учетом температурно-временного фактора. Также, отличительной особенностью алюминиевых сплавов от сталей является увеличение прочностных свойств и пластичности при понижении температуры до $-273 \text{ }^\circ\text{C}$, что является крайне важным в авиастроении [19]. Высокая удельная прочность алюминия и его сплавов

обеспечила широкое распространение в авиационной, космической технике, автомобильной промышленности, позволяя значительно снижать вес изделий. Снижение веса изделий в таких областях промышленности позволяет уменьшить расход топлива, тем самым снижая выбросы CO_2 в атмосферу [19, 23]. Применение алюминиевых сплавов в транспортном машиностроении также связано со способностью материала к демпфированию колебаний и большому поглощению энергии [44]. Применение алюминиевых сплавов в электротехнике связано с высокой электропроводностью материалов [19], удельное электросопротивление которого $\rho = 2,62 \cdot 10^{-8}$ Ом·м [9].

Широкая номенклатура изделий и область применения алюминия и его сплавов обуславливается их физико-механическими свойствами, а также высокой технологичностью при производстве и применении, высокой отражательной способностью, работоспособностью при отрицательных температурах, более высокой температурой воспламенения (~ 2000 °С) в сравнении с железом (~ 1000 °С), отсутствием искрообразования при ударах, а также отсутствием магнитных свойств [19]. Блестящая полированная поверхность обладает большой способностью к отражению света, тепла, электромагнитных излучений в широком диапазоне волн и малую теплоту излучения. Ввиду высокой вязкости обработка алюминия резанием затруднительна. Сваривается алюминий всеми видами сварки [9, 69].

Энергетический комплекс, в том числе электротехническая промышленность обеспечивает 10 % потребления алюминия и его сплавов от общего числа употребления. Одним из ответственных узлов энергетической системы любого предприятия являются трансформаторы. Одним из критериев классификации трансформаторов является вид изоляции. В классическом понимании, в связи с широким их распространением, в качестве изолятора применяется масляное наполнение. Имея ряд существенных преимуществ, таких как низкая себестоимость и широкое распространение, такие трансформаторы не отвечают современным требованиям безопасности и экологичности. Одним из ключевых недостатков является пожаро- и взрывоопасность, что в свою очередь ограничивает условия их применения, а также заставляет прибегать к организации

пожарных станций вблизи трансформатора. Использование минерального масла в силовых трансформаторах и сжигание масла выделяют токсичные газы и фураны, которые влияют на среду обитания на земле [97]. Силовые трансформаторы, заполненные минеральным маслом, теряют способность изоляции, когда изоляция теряет свою электрическую прочность, приводит к возгоранию трансформатора [83, 100]. Выбросы масла при нештатных ситуациях, а также утилизация масла при обслуживании, составляет существенный недостаток в вопросе их экологичности.

Основным видом альтернативного трансформатора является элегазовый трансформатор (рисунок 1.1). В качестве изоляционного материала и хладогена, в элегазовых трансформаторах используется гексафторид серы SF₆. Одним из существенных его достоинств является негорючесть, что позволяет избежать затраты на противопожарное оборудование, а также сэкономить место для расположения трансформатора. Элегаз обладает высокими звукоизоляционными свойствами, что в несколько раз снижает уровень шума в сравнении с масляными трансформаторами.

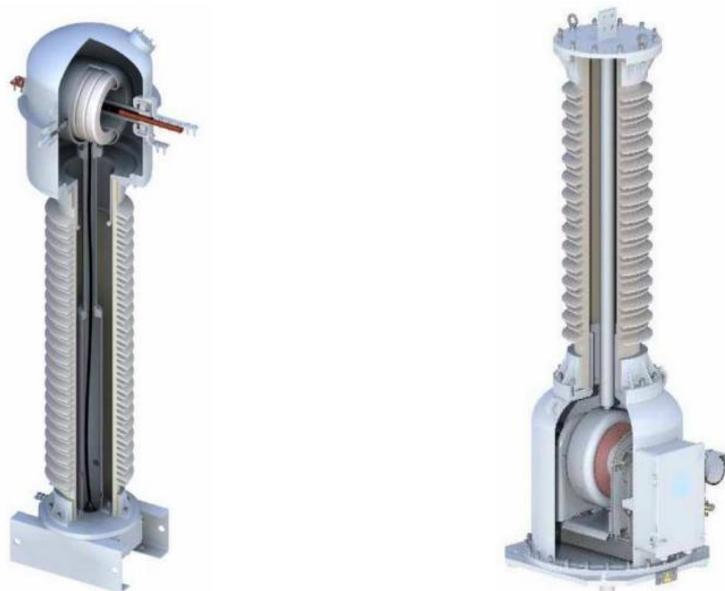


Рисунок 1.1 – Конструкция элегазового трансформатора

Корпус элегазового трансформатора выполняется из алюминиевого сплава марки АМц, который относится к системе сплавов Al-Mn и имеет высокие значения прочностных свойств, обладает высокой пластичностью и коррозионной стойкостью, а также относится к хорошо свариваемым сплавам. Российская

цифровая форма обозначения соответствует 1400, согласно ИСО 209-1 цифровая запись: 3003 [9]. Основным легирующим элементом в этих сплавах является марганец. Марганец образует с алюминием диаграмму эвтектического типа с переменной растворимостью. Промышленные сплавы содержат 1,0-1,6 % марганца. Кроме марганца в этих сплавах всегда есть примеси железа и кремния, которые резко снижают растворимость марганца в алюминии, состав сплава АМц представлен в таблице 1.1. Марганец может находиться в твердом растворе и в виде избыточных фаз Al-Mn в случае малого содержания железа и кремния. Повышение содержания марганца от 1 до 1,6% улучшает прочностные свойства, также действуют и небольшие добавки магния [14, 19].

Таблица 1.1 – Химический состав сплава АМц [19]

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Прочие элементы
0,6	0,7	0,2	1,0-1,5	0,2	0,1	0,1	0,15

Важной задачей в обеспечении бесперебойной работы элегазового трансформатора является создание качественного сварного соединения корпуса, в который закачивается элегаз под давлением. Вследствие возникновения внутренних неисправностей в элегазовом трансформаторе возникает электрическая дуга, которая повышает уровень давления в корпусе. При некачественном сварном соединении может произойти разрыв емкости, что приведет к выходу трансформатора из строя и возникнет необходимость замены или ремонта и больших финансовых затрат.

1.2 Причины разрушения сварных соединений изделий из алюминиевых сплавов

Несмотря на широкое распространение алюминия и его сплавов, их обработка остается достаточно трудоемким процессом. В первую очередь это связано с присущими им свойствами и со структурой материала. В связи с мягкостью и вязкостью материала, обработка алюминия и его сплавов резанием представляет собой трудоемкий процесс. Достичь требуемых параметров качества

обработанного изделия зачастую становится невозможно без изменения структуры поверхностного слоя. Особое внимание в этом вопросе следует уделять финишным методам обработки изделий из алюминиевых сплавов.

В общем случае состав поверхностного слоя на алюминиевых сплавах формируется следующим образом: на чистом металле образуется пленка из оксидов металла, далее идет слой гидратированных оксидов, содержание влаги в которых возрастает по мере приближения к поверхности пленки. Непосредственно на оксидную пленку адсорбируются пары влаги, идет адгезия пылевых частиц, масел, жиров, а в объемах дефектов поверхности происходит капиллярная конденсация влаги. Поскольку адсорбция влаги происходит с большей скоростью, чем адгезия, то пленка влаги покрывает большую часть оксидированной поверхности металла. Вследствие процесса адгезии на пленке влаги образуются участки, преимущественно состоящие из пылевых частиц, жиров, масел, сажевых и металлических частиц. Пылевидные частицы представляют собой в основном комплексные соединения с кислородом кремния, алюминия и натрия. В закатах и расслоениях поверхностного слоя металла и присадочной проволоки содержатся вещества, сопутствующие получению полуфабриката [50].

Основные затруднения при сварке изделий из сплава АМц вызывает неудаленная тугоплавкая оксидная пленка на поверхности кромок, наличие которой приводит к несплавлениям в корне шва. Несплавление уменьшает сечение шва, снижает его прочность и часто обуславливает негерметичность сварных соединений. Негерметичность определяется макро- и микродефектами. К макродефектам относятся раковины, к микродефектам – несплошности, количество и величина которых зависит от скорости рекристаллизации [19, 58].

Рассматривая вопрос формирования качественного сварного соединения, следует в первую очередь выявить причины разрушения сварных швов. Основные причины разрушений сварных соединений связаны с некачественной предварительной обработкой кромок изделий перед сваркой и как следствие возникновение дефектов в корне шва. На кромках изделий часто остаются загрязнения и дефекты от предшествующей обработки (рисунок 1.2), что локально

приводит к нарушению целостности шва, а также к посторонним включениям и непроварам в корне сварного шва.

Дефектом называют несоответствие параметров и характеристик сварного шва или соединения требованиям нормативно-технической документации [19].

Классификацию можно проводить по разным признакам:

- месту расположения: дефекты шва, околошовной зоны и сварного соединения;
- стадии технологического процесса: дефекты подготовки, сборки и сварочного процесса;
- допустимости: допустимые и недопустимые;
- степени опасности эксплуатации сварных соединений – малозначительные, значительные и критические;
- глубине залегания: наружные (поверхностные) и внутренние. Зачастую поверхностные дефекты являются следствием или наружным проявлением дефектов внутренних, в связи с чем разделение на данную группу является условным. Однако, к дефектам наружным можно отнести дефекты формы шва, вышедшие на поверхность поры, свищи, трещины и подрезы. К внутренним относятся поры, твердые включения шлака или инородного металла, непровары и внутренние трещины разного рода.

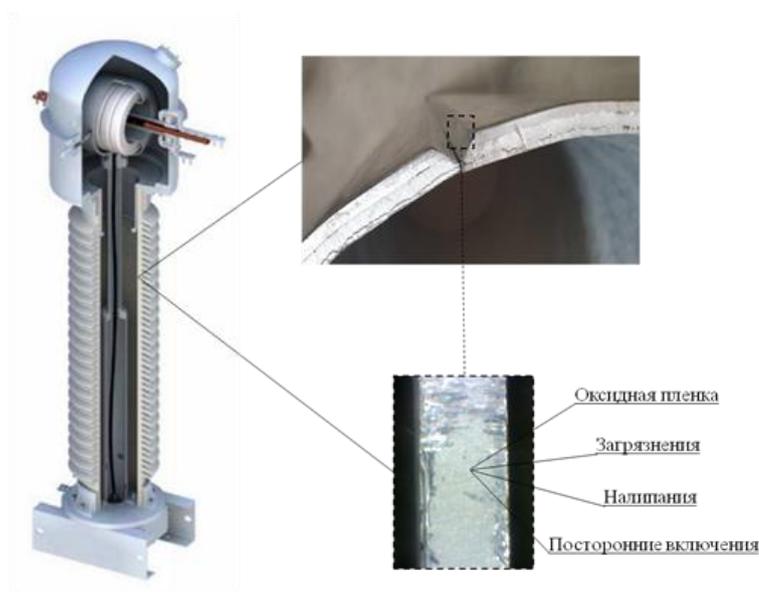


Рисунок 1.2 – Дефекты на поверхности кромок листового изделия

Недостаточно качественная зачистка кромок приводит к необратимым последствиям: хрупкий и неоднородный сварной шов, включения в металл шва металлических и неметаллических включения (рисунок 1.3), появление пор (рисунок 1.4) и микровоздушшин в шве, появление трещин (рисунок 1.5), пережог и перегрев металла. Сварка алюминиевых сплавов осложняется образованием оксидной пленки на поверхности изделий при контакте с кислородом. Оксидная пленка, имея температуру плавления много выше (~ 2000 °C) температуры плавления самого материала ($\sim 500-600$ °C), остается в качестве неметаллических включений в корне шва (рисунок 1.6).

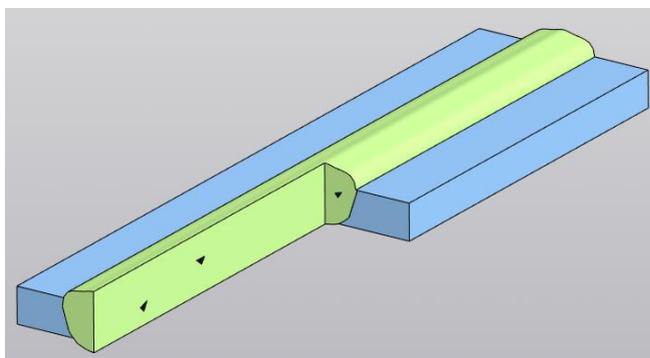


Рисунок 1.3 – Металлические включения в корне сварного шва

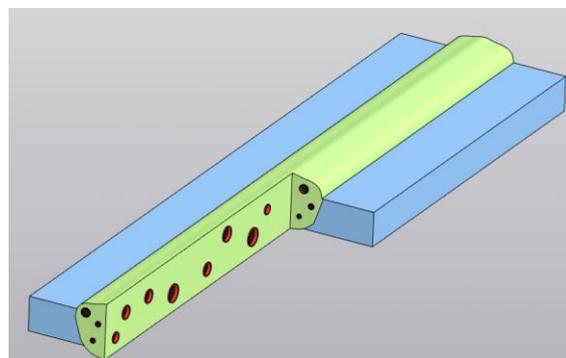


Рисунок 1.4 – Поры в сварном соединении

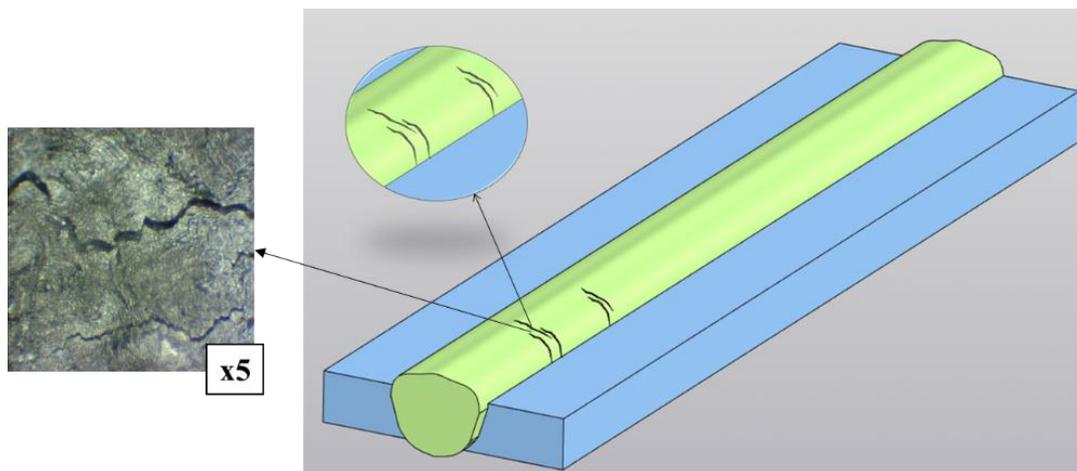


Рисунок 1.5 – Поперечные трещины в сварном соединении

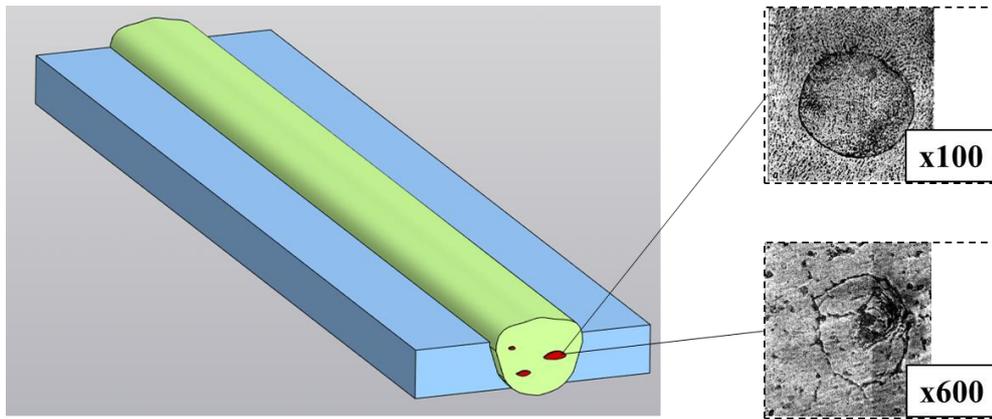


Рисунок 1.6 – Оксидные включения в сварном соединении

Посторонние включения и дефекты сварных соединений являются локальными концентраторами напряжения, приводящими к разрушению сварных соединений.

Кристаллизация расплавленного металла при сварке алюминия и его сплавов сопровождается возникновением химической, физической и структурной неоднородности. Химическая неоднородность может быть макро- и микроскопической. Первый вид неоднородности связан с колебаниями в химическом составе металла шва. Эти колебания обусловлены различием в содержании легирующих элементов в присадочной проволоке и основном металле. Микрхимическая неоднородность проявляется в объеме кристаллита (внутрикристаллическая ликвация) или в зонах срастания кристаллитов (межкристаллическая ликвация). Такая неоднородность характерна для сплавов и обусловлена у них наличием интервала кристаллизации. Зональная ликвация (неравномерное распределение элементов по сечению шва) проявляется в сварных швах редко и зависит от размера сварочной ванны, условий ее остывания и от химического состава металла.

Химическая неоднородность отрицательно влияет на механические и коррозионные свойства сварных соединений, а в процессе кристаллизации способствует образованию дефектов в сварных швах в виде кристаллизационных трещин. Количество таких трещин изменяется по кривой с максимумом [46, 56].

Сварка является заключительной операцией изготовления изделий, создающей неразъемное соединение. Сварке может предшествовать целое

многообразие операций, таких как разделка кромок перед сваркой, если толщина листа больше 4 мм (рисунок 1.7), резка и механическая обработка кромок. Данные операции воздействуют на поверхность изделия, формируя большую шероховатость поверхности (рисунок 1.8), а также оказывая высокие температурные воздействия. Как известно, процесс окисления зависит от температуры воздействия по линейному закону и происходит тем быстрее, чем выше температура внешнего воздействия.



Рисунок 1.7 – Станок для разделки кромок



Рисунок 1.8 – Состояние кромки алюминиевого листа после разделки

Температурные воздействия оказывают наиболее значимый эффект на процесс окисления алюминия. Так, при комнатной температуре оксидная пленка имеет аморфное строение. При контакте чистого металла с кислородом она образуется мгновенно, достигая определенной толщины, а затем процесс окисления замедляется. Однако, при повышении температуры воздействия на поверхность до 400°C , выявляется кристаллическая структура оксида, характеризующаяся большей толщиной оксидной пленки и более активным ее ростом [34, 104]. При выдержке алюминиевого изделия на воздухе при температуре более 500°C образуется сплошной слой кристаллического оксида с толщиной до 0,1-0,2 мкм. Результаты экспериментальных данных по выявлению

зависимости окисляемости поверхности от ее шероховатости показали, что за один промежуток времени, толщина вновь образованной оксидной пленки на грубо шлифованной поверхности металла больше, чем на чисто шлифованной поверхности, что может быть связано с различными напряжениями в поверхностном слое металла. Скорость окисления алюминия от температуры имеет «паралинейный» характер, переходя от параболического к линейному закону роста при достижении определенной толщины [34].

Уменьшение шероховатости поверхности, а также снятие оксидной пленки, образованной в ходе предварительных операций, возможных температурных и химических воздействий, позволяет значительно уменьшить посторонние включения в сварное соединение. Шероховатость поверхности определяет площадь поверхности окисления кромки изделия. Так, имея одинаковую толщину, общий объем оксидной пленки на поверхности изделия будет пропорционально больше при большем значении шероховатости (рисунок 1.9), а, следовательно, потенциальное количество неметаллических включений в корень шва будет значительно выше (рисунок 1.10).

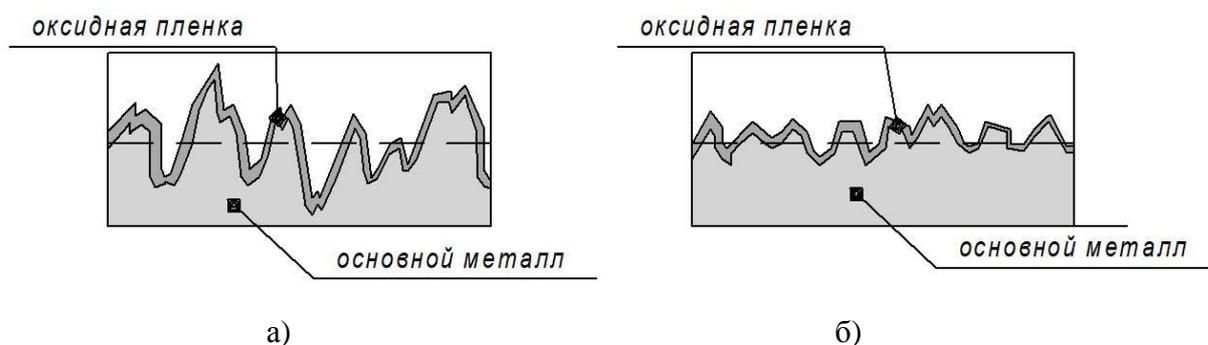


Рисунок 1.9 – Оксидная пленка на поверхности изделия: а – шероховатость поверхности $Ra = 2,5$ мкм; б – шероховатость поверхности $Ra = 0,5$ мкм



Рисунок 1.10 – Оксидные включения в сварном соединении: а – при шероховатости поверхности $Ra = 2,5$ мкм; б – при шероховатости поверхности $Ra = 0,5$ мкм

Таким образом, для обеспечения качественного сварного соединения изделий из алюминиевых сплавов необходимо применять подготовительные операции перед сваркой по зачистке кромок. Предварительные операции должны не только очищать поверхность от загрязнений и посторонних включений, но также обеспечивать сьем дефектного и оксидного слоя с поверхности кромок изделий, не оказывая температурного и химического воздействия на поверхность для предотвращения активации процесса окисления.

1.3 Технологические особенности подготовки кромок изделий из алюминиевых сплавов перед сваркой

Для создания качественного сварного соединения крайне важными являются подготовительные операции. Одной из операций подготовки изделий для сварки является зачистка кромок. Зачистка кромок изделий производится с целью обезжиривания поверхности и удаления посторонних включений, очистки поверхности от впадин, трещин, вкраплений, маслянистых структур, влаги, окалин и оксидной пленки. Удаление оксидной пленки, перед сваркой сварки изделий из алюминия и его сплавов, является важнейшей задачей. Недостаточно качественная зачистка кромок приводит к необратимым последствиям: хрупкий сварной шов, неоднородный шов (включения шлаков в металл), появление пор и микрозавоздушин в шве, появление трещин, пережог и перегрев металла.

Помимо зачистки кромок еще одной операцией подготовки кромок под сварку является их разделка. Разделка кромок в обязательном порядке производится при толщине металлического листа более 4 мм. Это выполняется для того, чтобы обеспечить качественную проварку элементов и полное заполнение жидким металлом электрода полости между соединяемыми элементами. Однако, после разделки кромок всегда производится зачистка кромок перед сваркой.

Существует несколько технологий зачистки кромок, которые можно разделить на три основные группы: механическая, химическая и термическая. Выбор способа зачистки кромок зависит от условий производства и назначения

свариваемой детали [74]. Также немаловажным фактором является материал заготовки.

1.3.1 Механические способы подготовки кромок изделий перед сваркой

Механические способы подготовки кромок изделий в большинстве своем подразумевают применение ручных абразивных инструментов, которые путем механического воздействия снимают верхний слой материала, обеспечивая зачистку поверхности от загрязнений и оксидной пленки. К механическим способам можно отнести следующие технологии обработки [42, 43]:

1. Ручная очистка механическим инструментом. Данный способ обработки предусматривает использование металлических щеток, зубил, наждачной бумаги и рубильных молотков (рисунок 1.11);



Рисунок 1.11 – Ручные абразивные инструменты для зачистки кромок

2. Абразивно-струйная очистка. Данный способ представляет собой удар абразивного порошка, зачастую мягкого материала или специальных реагентов, об обрабатываемую поверхность с высокой кинетической энергией. Поток абразива формируется под действием центробежных сил или вакуума и направляется единым потоком с рабочей средой, которая представляет собой небольшие добавления жидкости для направления потока.

3. Абразивно-порошковая очистка. При абразивно-порошковой очистке кромок изделий главное движение резания задается заготовке и выражается в скорости подачи. Обрабатываемое изделие погружают в ванну с абразивом и за счет возвратно-поступательного движения происходит микрорезание и выглаживание дефектного слоя.

4. Дробеметная очистка. Обрабатываемая часть заготовки помещается в рабочее пространство машины и под давлением на нее оказывается абразивное воздействие материала, представляющего из себя колотую дробь металла. Является достаточно грубым способом очистки, не подходящим для алюминия.

5. Гидроабразивная очистка. Сущность гидроабразивной очистки заключается в том, что абразивный материал смешивается с рабочей жидкостью и под давлением подается на обрабатываемую поверхность.

6. Электрогидроимпульсная очистка. В рабочую ванну подаются электрические импульсы, формирующие электрический разряд с образованием мощной ударной волны и гидродинамических потоков, которые разрушают накипь на внутренней поверхности трубы. Фактически — это микровзрывы, но режим работы подобран таким образом, что при разрушении накипи сама труба не получает повреждения и не деформируется. Разрушенные отложения вымываются из трубы проточной водой. Также представляет собой грубый метод обработки, подходящий для определенных материалов.

Все вышеперечисленные инструменты оказывают сильное механическое воздействие на поверхность. Так, к примеру, ручные абразивные инструменты являются жесткими абразивами, режущий инструмент представляет собой жестко соединенные между собой абразивные частицы. Недостатком данного метода является большая температура, возникающая в зоне резания. Недостатком это является по причине того, что толщина оксидной пленки при повышении температуры стремительно возрастает, что приводит к тому, что многие дефекты кромки изделия удаляются механическим способом, однако толщина оксидной пленки после обработки имеет большее значение, чем до обработки. Также высокая температура резания оставляет поверхность кромки электрохимически активной, что в свою очередь способствует ускоренному росту оксидной пленки. Методы шлифования оставляют поверхность с достаточно высоким значением шероховатости [55], не обеспечивая тонкого снятия материала [65, 66, 67, 68].

Оксидная пленка в воде при температуре 20 °С образуется в 3 стадии. На первой стадии образуется аморфная оксидная пленка толщиной 8-10 нм. На второй

стадии образуется кристаллический беллит, толщина которого доходит до нескольких десятков нанометров. На третьей кристаллический байерит, толщина которого достигает 0,1 мкм. В связи с этим применение способов зачистки кромок с применением воды, как рабочей среды, для изделий из алюминия и его сплавов неприемлемо [34].

Виды абразивной зачистки, в которых применяется незакрепленный между собой абразив, является предпочтительным, однако, в большинстве перечисленных способов абразиву задается главное движение резания, и подача его происходит с силовым воздействием на поверхность кромки, что при обработке алюминия является недопустимым [1].

1.3.2 Химические способы зачистки кромок изделий перед сваркой

Химические способы зачистки кромок изделия, в общем, заключаются в нанесении кислот, которые удаляют загрязнения и повреждения. Кислота на поверхность может быть нанесена двумя способами: подачей на поверхность струи кислоты, либо погружением изделия непосредственно в ванну. При применении первого метода, подача на изделие осуществляется непрерывной струей с изменяющимися растворами, в зависимости от предписанной технологии [1]. При погружении изделия в ванну с раствором кислоты, его выдерживают там в течении определенного времени, сопровождая в дальнейшем промывкой водой. Зачастую, химическое травление включает в себя не одну технологическую операцию. Технологические процессы подготовки поверхности изделий, эксплуатирующихся внутри помещений, могут состоять из 3–5, в жестких условиях из 6–12 стадий. Практически во всех случаях после проведения химической подготовки поверхности изделия сушат от влаги в специальных камерах.

Между всеми стадиями химической обработки необходима промывка водой. Окончательная промывка, особенно для изделий, эксплуатирующихся в открытой атмосфере, должна проводиться деминерализованной водой. Увеличение числа промывок с противотоком воды улучшает качество и снижает расход воды.

Пример технологического процесса химической очистки кромок поверхностей перед сваркой:

1. На первом этапе производят обезжиривание поверхности изделия и очищение ее от посторонних загрязнений, остатков смазочно-охлаждающей жидкости или консервирующей смазки. Для этого в мелкосерийном производстве используют обезжириватели, спирты или другие органические растворители. Процесс осуществляют протиранием поверхности до полного удаления загрязнения. В серийном производстве свариваемые детали обычно обезжиривают в негорячем водном растворе, содержащем 10 г/л NaOH, 40-50 г/л тринатрийфосфата $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, 5 г/л натриевого жидкого стекла Na_2SiO_3 . Продолжительность процесса обезжиривания зависит от степени загрязненности поверхности металла и от температуры. При температуре раствора 60-70 °С длительность обезжиривания обычно не превышает 3-5 мин.

2. На втором этапе обезжиренную поверхность кромок путем травления в кислоте очищают от образовавшихся оксидных пленок. Для этого изделия погружают в 5 %-ный водный раствор щелочи (NaOH или KOH), нагретый до 60-70°C. В результате взаимодействия со щелочью оксидная пленка стравливается с поверхности в течение 2-3 мин. После процесса травления обязательна промывка теплой и холодной водой для удаления остатков химических реактивов.

3. Сразу же после промывки детали пассивируют в 20 %-ной азотной кислоте (HNO_3), нагретой до 60-70°C. За 5-7 мин пребывания в растворе поверхность деталей покрывается новым, более плотным слоем оксида алюминия. Извлеченные из азотной кислоты детали промывают в холодной, а затем в горячей воде и сушат подогретым воздухом.

Применительно к алюминиевым сплавам, технологический процесс травления представляет собой следующую последовательность:

1. Обезжиривание деталей в 2 %-ном водном растворе моющего препарата при температуре 60-70°C в течение 2-3 мин.

2. Промывку деталей в теплой (35-50°C) проточной воде многократным погружением (5-8 раз).

3. Травление деталей в водном растворе NaOH (концентрация 40-60 г/л, температура 35-45 °С, длительность травления 30-60 с).
4. Промывку деталей в теплой (35-50°С) проточной воде многократным погружением (5-8 раз); смена воды из расчета 15 л на 1 м² поверхности детали.
5. Промывку деталей в холодной проточной воде многократным погружением (5-8 раз); смена воды из расчета 25 л на 1 м².
6. Осветление деталей в водном растворе азотной кислоты (концентрация 200-250 г/л, температура 16-30 °С, 2-5 мин).
7. Промывку в проточной воде многократным погружением (5-8 раз); смена воды из расчета 25 л на 1 м².
8. Пассирование деталей в водном растворе ортофосфорной кислоты (H₃PO₄) и калиевого хромпика (K₂Cr₂O₇): концентрация H₃PO₄ – 50-120 г/л, K₂Cr₂O₇ - 0,5—1,2 г/л; температура 26-34 °С, длительность травления 15-20 мин; отношение H₃PO₄ к K₂Cr₂O₇ поддерживается на уровне 100:1.
9. Промывку деталей в холодной проточной воде многократным погружением (5-8 раз); смена воды из расчета 25 л на 1 м².
10. Сушку деталей в подогретом до 40-60°С воздухе.
11. Проверку контактного сопротивления образцов и свариваемых деталей (контактное сопротивление должно иметь минимальные значения и быть стабильным).

Как видно из представленных технологий, способ химического травления кромок изделий перед сваркой является весьма трудоемким, неэкологичным и финансово и трудозатратным. Также следует отметить, что поверхность остается электрохимически активной, что способствует скорейшему образованию большего слоя оксидной пленки.

Одной из применяемых технологий зачистки кромок изделий из алюминиевых сплавов перед сваркой является совмещение механического и химического способов. Данная технология представляет собой сначала механическую зачистку с помощью металлических щеток, затем обезжиривание в водном растворе следующего состава: 40-50 г/л тринатрийфосфата

($\text{Na}_3\text{PO}_4+12\text{H}_2\text{O}$), 35-50 г/л кальцинированной соды (Na_2CO_3), и 25-30 г/л жидкого стекла (Na_2SiO_3) на протяжении 5 минут при температуре раствора 60-70°C. Далее осуществляется травление в течении 1-3 минут в 5 % растворе щелочи NaOH или KOH. Удаление остатков щелочи с поверхности кромки осуществляется при помощи смывания сначала горячей, а затем холодной водой. После операции травления в растворе щелочи осуществляется пассивация 20 % азотной кислотой (HNO_3), нагретой до температуры 60°C. После всех проведенных операций производится промывка деталей горячей и холодной водой.

1.3.3 Другие способы подготовки кромок изделий перед сваркой

Помимо механических и химических технологий подготовки кромок изделий перед сваркой существует ряд способов, которые не относятся напрямую к той или иной группе. Термический способ представляет собой обработку кромок изделий при помощи температурных колебаний и применением высоких температур. К таким способам относятся: газоплазменная, электродуговая, электроэрозионная, очищение паром, а также с применением струи холодного льда.

Все вышеперечисленные способы сопровождаются действием на поверхность высоких температур, что, в свою очередь, удаляя существующий оксидный слой и загрязнения поверхности, катализирует активный рост новой оксидной пленки на поверхности.

Одним из перспективных методов очистки поверхности является применение лазерного луча. Данная технология имеет большую номенклатуру применяемых операций, очищая поверхности не только перед сваркой, но и в эксплуатационных целях. Сущность данного способа заключается в воздействии лазерного импульса на поверхность основного металла, который проходит сквозь загрязнения за счет разницы показателей поглощения луча лазера, и разогревая до температуры кипения поверхностный слой, отрывают загрязнения на поверхности [12]. Так, основываясь на законах окисления алюминия, можно сделать вывод, что,

оказывая влияние на небольшой слой, лазерное воздействие может приводить к росту новой оксидной пленки с увеличенной скоростью.

На основании проведенного анализа причин разрушения сварных соединений, а также способов подготовки кромок изделий перед сваркой, установлено, что существующие методы обработки обеспечивают снятие оксидной пленки и дефектного слоя с поверхности изделия, однако, вследствие воздействия высоких температур и химических реакций на обрабатываемую поверхность, производится активация роста оксидной пленки, вновь образуемой при контакте основного металла с кислородом. Также важным пунктом в формировании качества сварного соединения является шероховатость поверхности кромок свариваемого изделия. При уменьшении шероховатости поверхности пропорционально снижается и объем оксидной пленки, образованной на поверхности и потенциально оказавшейся в сварном шве.

В последнее время особое внимание уделяется технологиям обработки, при которых температура в зоне обработки составляет $T \leq 100^\circ\text{C}$. При обработке с такой температурой наблюдаются благоприятные для поверхности изделия явления: измельчается структура тонких слоев поверхностного слоя, увеличивается твердость, а также возникают большие остаточные напряжения сжатия. От действия высоких температур $T > 400^\circ\text{C}$, которые возникают, к примеру, при шлифовании, появляются прижоги, наблюдается эффект шаржирования, нарушается однородность структуры, увеличиваются размеры зерна материала, снижается твердость, а также появляются растягивающие остаточные напряжения, способствующие возникновению трещин [2, 29]. Для обработки алюминия и его сплавов применение технологий обработки с относительно малыми температурами резания является особенно актуально.

Одной из перспективных технологий обработки изделий с низкими температурами резания является магнитно-абразивная обработка, температура которой в зоне обработки равняется $T_{\text{мао}} = 30\text{-}40^\circ\text{C}$ [7, 8, 27, 32, 82, 90]. Сущность магнитно-абразивной обработки заключается в том, что ферромагнитная абразивная масса, состоящая из режущих частиц магнитно-абразивного порошка,

под действием магнитного поля создает абразивную щетку, благодаря которой и происходит обработка изделий. За счет того, что абразивные частицы в щетке закреплены не жестко между собой, особенностями технологии магнитно-абразивной технологии являются: устранение в зоне микрорезания критических давлений и температур, значительное снижение установившейся температуры абразивной обработки вследствие отсутствия трения жесткой связки о поверхность изделия, снижение контактной температуры, в результате устранения случаев трения затупившейся жесткой связки об обрабатываемую поверхность [1, 89, 92]. Следует отметить и то, что магнитно-абразивная обработка способствует улучшению точности геометрических размеров и формы обрабатываемой поверхности, снижению микро- и макрогеометрических параметров поверхности, удалению эффекта шаржирования [37, 38, 39, 93].

За счет действия низких температур, отсутствия химических воздействий на поверхность, а также способностью формирования низкой шероховатости поверхности и удаления дефектного слоя с поверхности заготовки, магнитно-абразивная обработка может выступать в качестве предварительной операции по подготовке кромок изделий из алюминиевых сплавов, однако процесс формирования качества обработанной поверхности до конца не изучен.

1.4 Выводы по первой главе

На основании проведенного анализа, были сделаны следующие выводы, поставлены цель и задачи исследования:

1. Изделия из алюминиевых сплавов широко распространены во всех отраслях промышленности, так как обладают отличительными эксплуатационными и технологическими факторами, однако обработка и сварка таких изделий является трудоемким процессом.

2. Оксидная пленка образуется на поверхности изделия моментально при контакте его с кислородом, защищает поверхность от коррозии, но имея температуру плавления много выше основного металла, остается в качестве неметаллических включений в корне шва, являясь в процессе эксплуатации

сварного соединения локальным концентратором напряжений и причиной разрушения сварного соединения; удаление оксидной пленки с поверхности кромок обязательно при сварке изделий из алюминиевых сплавов.

3. Для обеспечения качественного сварного соединения изделий из алюминиевых сплавов операции сварки в обязательном порядке предшествует операция по подготовке кромок, целью которой является устранение оксидной пленки, а также загрязнений с поверхности свариваемых кромок изделий.

4. Существующие методы подготовки кромок изделий перед сваркой оказывают высокие температурные и химические воздействия на поверхность кромки, что является катализатором для повышения скорости процесса окисления поверхности.

5. Достичь снижения объема нерасплавленной оксидной пленки в корне шва возможно путем обеспечения меньшей площади окисления, уменьшая шероховатость поверхности на этапе подготовительной операции кромок перед сваркой.

6. Применение метода магнитно-абразивной обработки может позволить значительно снизить шероховатость поверхности, полностью удалить дефектный слой и оксидную пленку с поверхности кромок без воздействия высоких температур и химических реакций на поверхность изделия.

Цель исследования: выявление закономерностей влияния технологических факторов магнитно-абразивной обработки на повышение качества кромок листового проката из алюминиевого сплава марки АМц.

Задачи исследования:

1. Провести анализ и обобщение теоретических и экспериментальных данных, приведенных в литературных источниках, зависимости прочности сварного соединения от качества предварительной подготовки кромок, технологии магнитно-абразивной обработки и ее влияния на поверхностный слой изделий из алюминиевых материалов.

2. Разработать способ магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий, включающий обоснование выбора схемы обработки, рабочих движений,

технологического инструмента, состава технологической среды и значений технологических факторов обработки.

3. Экспериментально определить влияние технологических параметров магнитно-абразивной обработки на шероховатость кромок плоских изделий, удельный съем материала с единицы площади и толщину снимаемого материала.

4. Разработать регрессионные математические зависимости технологической системы, учитывающие влияние технологических параметров магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхности, удельный съем материала с единицы площади и толщину снимаемого материала при обработке плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц.

5. Установить зависимости влияния значений шероховатости поверхности кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц, подготовленных способом магнитно-абразивной обработки с различными значениями технологических факторов, на прочность и дефектность сварного соединения.

6. Предложить практические рекомендации по выбору значений технологических параметров магнитно-абразивной обработки и способа обработки кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц, позволяющие произвести равномерную обработку торцовых и боковых поверхностей, обеспечить удаление существующего оксидного слоя и снизить шероховатость поверхности.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ КРОМОК ПЛОСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО МАТЕРИАЛА ПЕРЕД СВАРКОЙ

2.1 Сущность и особенности магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий из алюминиевого сплава

Метод магнитно-абразивной обработки представляет собой абразивной резание, в рабочем пространстве которого используется непосредственно магнитное поле. Абразивный инструмент, в качестве которого применяются ферромагнитные порошки, попадает в рабочую зону обработки и под действием магнитного поля формирует абразивную щетку, не имеющую жесткой связи между частицами. Благодаря этому изделия с различной конфигурацией могут подвергаться обработке без использования дополнительных приспособлений.

Отличительной особенностью метода является то, что силовое нагружение абразивного элемента осуществляется магнитным полем [4, 6, 18, 20, 21, 25, 51]. Чаще всего магнитно-абразивная обработка применяется в качестве финишного метода обработки. С помощью магнитно-абразивной обработки можно механизировать процессы удаления заусенцев, дефектов предшествующих обработок, окалины, тонких оксидных пленок, полирование изделий и снижение их шероховатости, округление острых кромок [6, 15].

Управляющее взаимодействие магнитного поля с несвязанным между собой жесткой связкой абразивом позволяет решать больший спектр технологических задач в сравнение с традиционными методами абразивных обработок. Магнитно-абразивная обработка позволяет обеспечить производительную и качественную обработку «трудношлифуемых» материалов, таких как медь, титан, алюминий, золото и др. [3, 6, 31, 36, 41, 51, 88, 95]. Основными отличительными особенностями процесса, позволяющими произвести обработку тогда, когда классические методы бессильны, является постоянное перемешивание абразивных зерен в процессе обработки, большая площадь контакта абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью, отсутствие жесткой сцепки между абразивными

зернами что обеспечивает эластичность режущего инструмента, возможность тонкого управления прижимным усилием абразивных зерен к обрабатываемой поверхности за счет управления величиной магнитного поля [51, 59, 79, 80, 81].

В процессе магнитно-абразивной обработки порошок с определенной силой прилегает к поверхности заготовки и при движении заготовки в межполюсном пространстве производится массовое микрорезание (диспергирование металла) частицами абразива, прилегающими к поверхности заготовки [6], а также упруго-пластическое деформирование (выглаживание) поверхностного слоя [60]. Абразивные частицы под действием сил трения со стороны двигающейся заготовки или полюсного наконечника (в зависимости от того, чье движение является главным) смещаются к краю рабочей зоны, где встречаются с противодействием силы магнитного поля. Благодаря тому, что абразивные частицы не связаны между собой, они свободно перемещаются внутри рабочего зазора под действием сил трения и противодействия магнитного поля [6, 84, 86, 87]. После введения заготовки в рабочую зону между поверхностью заготовки и индуктором образуется рабочий зазор δ . Рекомендуемая величина рабочего зазора варьируется в диапазоне $\delta = 0,5...3$ мм. Рабочая зона представляет собой пространство между индукторами, заполненное абразивным порошком.

Наряду с резанием и механическим полированием в процессе магнитно-абразивной обработки осуществляется полирование со съемом непрерывно образующихся химических пленок (в том числе оксидных). Пленки, образующиеся на поверхности обрабатываемого изделия, имеют меньшую механическую прочность по сравнению с основным металлом, благодаря чему их съем может осуществляться любыми участками порошка, в том числе и не режущими [6].

Отсутствие жесткой связки между частицами абразивного инструмента характеризует метод магнитно-абразивной обработки как холодный. Температура в зоне резания при обработке ферромагнитных материалов не превышает $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ без использования смазочно-охлаждающей жидкости, а при использовании смазочно-охлаждающей жидкости температура в зоне резания варьируется в

диапазоне 30-40°C [6, 70, 72]. В процессе магнитно-абразивной обработки нагревание заготовки происходит не только за счет действия сил резания, но и от действия сил намагничивания. Температура обработки немагнитных материалов несколько ниже и достигает 100 °С без использования смазочно-охлаждающей жидкости, что подтверждено экспериментально и обусловлено отсутствием влияния намагничивания обрабатываемого изделия.

Благодаря тому, что абразивные частицы формируют под действием магнитного поля щетку, зерна которой не имеют жесткого скрепления между собой, удельное давление, оказываемое со стороны абразивного материала на обрабатываемую заготовку много меньше в сравнении с традиционными методами обработки изделий [6, 91, 94, 96, 99]. Давление порошка на обрабатываемую поверхность определяет силовую динамику процесса и служит важнейшим фактором, влияющим на интенсивность съема металла, формирование соответствующего качества поверхностного слоя и температуры резания в ходе обработки [60].

Повышение качества поверхностей и производительности обработки зависит от выбранных факторов обработки: схемы обработки, рабочих движений, их сочетания и значений, характеристик обрабатываемого материала, состава смазочно-охлаждающей жидкости, материала и количества абразивного порошка [6, 92, 97, 98, 101].

2.2 Способ магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий

При разработке способа магнитно-абразивной обработки кромок листового проката особое внимание следует уделять толщине обрабатываемого изделия. Необходимо обеспечение равномерной обработки торцевой и боковых сторон кромок с сохранением геометрической формы, которую предали кромке при разделке. Неравномерность обработки торцевой и боковых поверхностей при предварительной обработке кромок изделий перед сваркой приводит к дефектам сварного соединения. В связи с разными воздействиями зерен на стороны кромки, на их поверхностях образуются разные структуры приповерхностного слоя, с

разной электрохимической активностью. При обработке алюминия это является важным фактором, в связи с тем, что от этого зависит структура и размер оксидной пленки на поверхности. В свою очередь оксидная пленка остается в сварном шве в качестве неметаллических включений.

Обеспечение равномерности обработки кромок листов толщиной до 8 мм можно достичь при помощи применения обработки с двумя полюсными наконечниками. Тогда, абразивная масса воздействует на поверхность торцевой и боковых сторон с одинаковой силой и с одинаковыми движениями резания (рисунок 2.1).

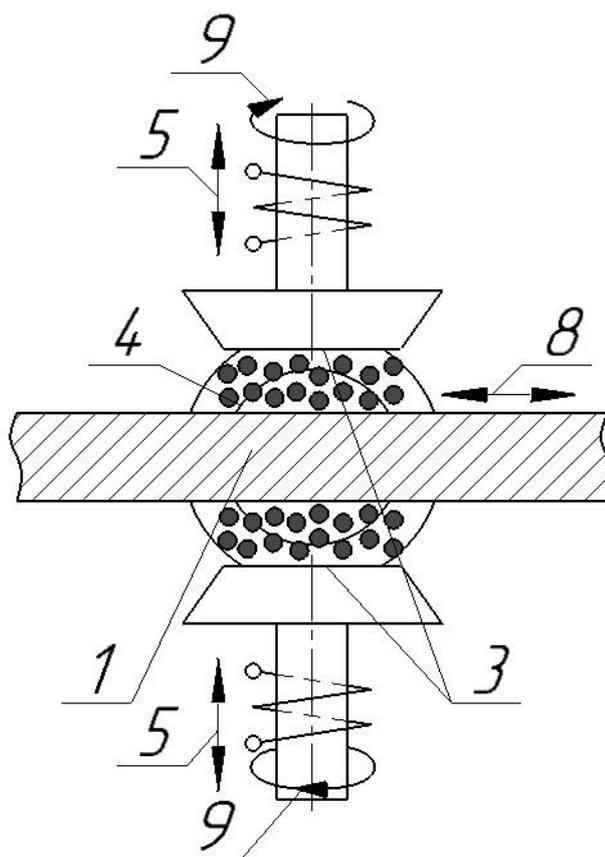


Рисунок 2.1 – Схема обработки кромок листового проката толщиной до 8 мм с использованием двух полюсных наконечников

Известен способ [76], при котором магнитно-абразивная обработка кромок плоских изделий осуществляется с применением двух вращающихся полюсных наконечников (рисунок 2.1). Обрабатываемое изделие 1 помещается в рабочее пространство. Сформированное между двумя полюсными наконечниками 4. При этом изделию задается поступательное движение 8 вдоль полюсных наконечников

3, а полюсным наконечникам придается вращательное движение 9 и движение осцилляции 5. Толщина обрабатываемого листа менее 8 мм позволяет абразивной массе равномерно перемещаться, обеспечивая равную силу воздействия на торцевые и боковые поверхности кромки, формируя поверхность с одинаковой шероховатостью и состоянием приповерхностного слоя.

При толщине листа более 8 мм обеспечение равномерной обработки кромки с использованием двух полюсов затруднительно. Магнитно-абразивная масса под действием сил магнитного потока концентрируется на боковых сторонах, оказывая большее воздействие. На торцевую поверхность кромки абразивная масса воздействует с меньшей силой, что снижает силы резания и формирует отличную от боковой поверхности структуру приповерхностного слоя. Для обеспечения равномерной обработки применяется способ с использованием трех синхронно вращающихся полюсных наконечников (рисунок 2.2) [52].

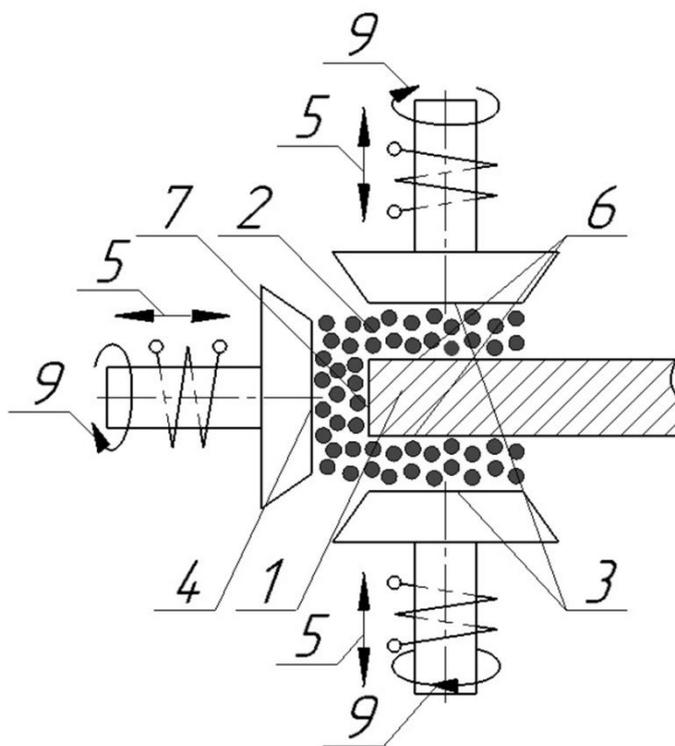


Рисунок 2.2 - Схема обработки кромок листового проката толщиной более 8 мм с использованием трех полюсных наконечников

Способ осуществляется следующим образом. Первоначально кромку изделия 1 помещают в магнитно-абразивную массу 2, которая сформирована магнитной системой, включающей два боковых полюсных наконечника 3 и торцевой полюсной наконечник 4, установленный перпендикулярно двум боковым полюсным наконечникам 3 (рисунок 2.2).

Затем посредством независимых друг от друга движений перемещения полюсных наконечников 5 устанавливают одинаковый рабочий зазор между двумя боковыми полюсными наконечниками 3 и боковыми поверхностями кромки изделия 6 и между торцевым полюсным наконечником 4 и торцевой поверхностью кромки изделия 7. После этого одновременно задают возвратно-поступательное движение кромки изделия 8 вдоль двух боковых полюсных наконечников 3 и торцевого полюсного наконечника 4 и синхронные вращательные движения трем полюсным наконечникам 9 в одностороннем направлении.

При магнитно-абразивной обработке кромки изделия 1 перед сваркой два боковых полюсных наконечника 3 должны быть расположены на одном уровне с пересечением плоскостей торцевой поверхности кромки изделия 7 и боковых поверхностей кромки изделия 6. Посредством синхронных вращательных движений трех полюсных наконечников 9 в одностороннем направлении и возвратно-поступательного движения кромки изделия 8 в магнитно-абразивной массе 2 магнитной системы осуществляется равномерная и бездефектная магнитно-абразивная обработка кромки изделия 1 одновременно с боковых поверхностей кромки изделия 6 и торцевой поверхности кромки изделия 7.

Применение третьего полюсного наконечника при обработке кромок изделий, толщиной более 8 мм, позволяет обеспечить равномерный съем материала за счет сочетания движений, обеспечивающих равномерное перемещение абразивных зерен относительно торцевой и боковых сторон.

2.2.1 Выбор сочетания рабочих движений

При определении способа магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий из алюминиевых изделий перед сваркой особое внимание следует уделять

равномерности обработки торцевых и боковых поверхностей. Равномерность обработки может быть достигнута подбором правильного сочетания движений обработки. Сочетание движений непосредственно влияет на формируемое качество поверхности и производительность обработки [15, 60, 85, 109].

Процесс магнитно-абразивной обработки характеризуется четырьмя видами движений [6]: главное движение, обеспечивающее процесс микрорезания и определяющее скорость резания; осциллирующее; возвратно-поступательное или движение подачи, заставляющее абразивный порошок активно перемешиваться в зоне резания; дополнительные движения.

Особое влияние на величину давления порошка оказывает кинематика выбранной схемы обработки, то есть сочетание рабочих движений. Скорость подачи по данным исследования [60] оказывает наибольшее влияние на удельное давление порошка на поверхность заготовки. Отличительная особенность действия абразивных частиц в процессе магнитно-абразивной обработки заключается в самозатачивании. Под действием сил трения и магнитного поля частицы постоянно находятся в движении, перемешиваются, переходят из одного рабочего зазора в другой, тем самым воздействуя на заготовку новыми гранями и углами. Каждая грань абразивного зерна имеет индивидуальную геометрическую форму и твердость, а, следовательно, имеет также разную способность осуществлять резание [6]. Подбор сочетаний движений обеспечивает требуемое перемешивание частиц в рабочем зазоре. Скорость подачи обеспечивает перемешивание и обновление порошка вдоль обрабатываемой поверхности, а также создает условие подбора магнитно-абразивного порошка к обрабатываемой поверхности с передней стороны, то есть со стороны направления движения детали по рабочей зоне.

Вопросу сочетания рабочих движений при магнитно-абразивной обработке и их непосредственному влиянию на качественные характеристики поверхности и производительность уделено особое внимание в работе [60]. В данных исследованиях были задействованы следующие сочетания рабочих движений: сочетание скорости резания, подачи и осцилляции ($V_p + V_n + V_o$); сочетание

скорости резания и подачи ($V_p + V_n$); сочетание скорости резания и осцилляции ($V_p + V_o$); скорость резания (V_p); сочетание скорости подачи и осцилляции ($V_n + V_o$); скорость осцилляции (V_o); скорость подачи (V_n). По результатам исследований был сделан вывод, что наиболее эффективными являются несколько сочетаний рабочих движений, а именно: сочетание трех движений $V_p + V_n + V_o$; сочетание двух движений $V_p + V_n$; а также применение одного движения вращения заготовки вокруг собственной оси [25, 39].

В целом, подбор сочетаний рабочих движений осуществляется индивидуально, исходя из поставленной научно-технической задачи [39]. Основным критерием, по которому следует производить выбор сочетания движений при магнитно-абразивной обработке, является эффективность выбранного сочетания, выражаемая временем, затрачиваемым на формирование качественных характеристик, и производительностью обработки (количеством снимаемого материала за единицу времени).

Известно [6, 60], что проведение обработки с использованием двух рабочих движений позволяет увеличить производительность обработки более чем в 2 раза по сравнению с обработкой с одним рабочим движением за счет более интенсивного перемешивания абразивного порошка и участия в процессе резания большего числа зерен. Следует предположить, что добавление третьего рабочего движения будет сопровождаться увеличением производительности обработки. Таким образом, основываясь на результатах исследований [6, 39, 55, 60] магнитно-абразивную обработку кромок изделий следует осуществлять с применением сочетания трех рабочих движений: скорости резания V_p , скорости подачи V_n и скорости осцилляции V_o . Под скоростью резания понимается скорость главного движения заготовки или полюсов, обеспечивающая резания в процессе магнитно-абразивной обработки, так как скорость движения абразивных частиц много меньше скорости вращения заготовки или полюсных наконечников.

Применительно к описанному выше устройству для магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий в качестве главного движения принимается

частота вращения заготовки n , мин⁻¹, а скорость подачи представляет собой поступательное движение заготовки вдоль полюсных наконечников S , мм/мин.

2.2.2 Магнитно-абразивный комплекс для обработки кромок плоских изделий из алюминиевого сплава

Основной отличительной характеристикой устройств для магнитно-абразивной обработки является тип применяемого магнитного индуктора [6, 57, 103]. Магнитные индукторы подразделяются на: электромагнитные индукторы постоянного тока; индукторы на постоянных магнитах; индукторы переменного тока. Управлять величиной магнитной индукции позволяет применение электромагнитных индукторов постоянного тока путем регулировки тока в намагничивающих катушках. Постоянное магнитное поле формируется при помощи специального устройства – преобразователя переменного тока в постоянный (выпрямителя). Диапазон формируемой средней магнитной индукции в рабочем зазоре составляет $B = 0,1 - 2,5$ Тл.

Комплекс для магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий представлен на рисунке 2.3. Устройство (рисунок 2.3, б) реализовано на базе фрезерного станка с числовым программным управлением (ЧПУ) *Emco Concept Mill 250* (рисунок 2.3, а). Устройство представляет собой две опоры 1, на которые крепятся электромагнитные катушки 2 и сменные полюсные наконечники 3. Опоры фиксируются на плите, которая через резиновую прокладку фиксируется на рабочем столе станка 4. Приближение катушек к рабочей зоне позволяет значительно увеличить величину магнитной индукции при меньших энергозатратах и геометрических размерах катушек, так как позволяет полезно использовать большую долю магнитодвижущей силы катушек за счет уменьшения потоков рассеивания на пути прохождения основного магнитного потока от намагничивающихся катушек к рабочей зоне [6, 102, 105, 106].



а)



б)

Рисунок 2.3 – Магнитно-абразивный комплекс для обработки кромок плоских изделий, созданный на базе фрезерного станка с ЧПУ Emco Concept Mill 250:

а – общий вид фрезерного станка с ЧПУ Emco Concept Mill 250;

б – устройство для магнитно-абразивной обработки

При помощи специально разработанного приспособления производится закрепление заготовки типа «пластина» и подается в рабочее пространство (рисунок 2.4). Заготовка 5 посредством приспособления 6 фиксируется в шпинделе станка. Заготовке могут задаваться все движения, необходимые для обработки (вращательное, поступательное, осциллирующее), а также любая комбинация необходимых движений посредством использования рабочих движения шпинделя станка и написания управляющей программы.

Процесс магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий состоит из нескольких этапов. На первом этапе пишется управляющая программа для станка *Emco Concept Mill 250*, в которой устанавливаются выбранные движения заготовки, а также скорость подачи, частота вращения, и время обработки. Далее производится крепление заготовки в приспособление, а само приспособление

крепится в шпиндель станка посредством специальной оправки. Вторым этапом является подготовка рабочего пространства к процессу обработки.

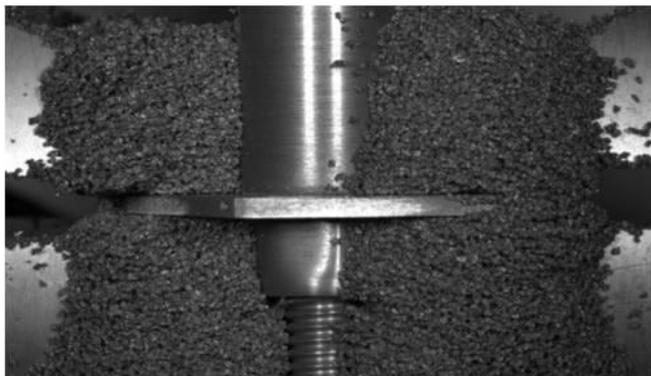


Рисунок 2.4 - Оправка с обрабатываемой пластиной в рабочей зоне установки

Важным фактором, влияющим на формирование качественных характеристик поверхностного слоя, а также на производительность процесса, является величина рабочего зазора [6, 63, 76, 107, 108, 110, 111]. Рабочий зазор устанавливается равным 2 мм от полюсного наконечника до обрабатываемой кромки с обеих сторон соответственно. Далее производится проверка управляющей программы непосредственно в рабочем пространстве. На третьем этапе, после успешной проверки работоспособности системы, в рабочем пространстве обеспечивается магнитная индукция равная $B = 0,3$ Тл, способная удерживать абразивный порошок. Далее производится заполнение рабочего пространства абразивным порошком, магнитная индукция устанавливается согласно требуемым значениям, производится внедрение заготовки в рабочее пространство с абразивным порошком. Запускается рабочая программа и производится магнитно-абразивная обработка кромок плоского изделия в рамках определенного заранее времени.

2.2.3 Схема магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий

Также немаловажным фактором является эффект шаржирования на торцевой поверхности кромки. Малейшее постороннее включение на поверхностях свариваемых кромок приводит к неоднородности сварного шва и как следствие становится очагом разрушения одного.

Известен способ магнитно-абразивной обработки [76], в котором кромке изделия задается возвратно-поступательное движение в магнитно-абразивной массе, сформированной двумя вращающимися полюсными наконечниками, что позволяет обеспечить одновременную обработку кромки изделия с торцевой и боковых поверхностей.

Недостатком данного способа является неоднородное магнитно-абразивное воздействие на торцевую и боковые поверхности кромки изделия, что приводит к неравномерному съему материала с торцевой и боковых поверхностей, а также формированию различных качественных характеристик на торцевой и боковых поверхностях кромки изделия.

На рисунке 2.5 представлена схема магнитно-абразивной обработки кромок образцов плоских изделий, реализуемая на устройстве для магнитно-абразивной обработки (рисунок 2.3) в уменьшенном масштабе, повторяющая схему обработки с использованием двух полюсных наконечников для обработки пластины толщиной 2 мм. Обрабатываемая заготовка размещается между полюсными наконечниками в рабочую зону L с установленным рабочим зазором δ , заполненную магнитно-абразивным порошком с определенной фракцией Δ (рисунок 2.6). С целью формирования требуемых значений качественных характеристик на обрабатываемых поверхностях, применяется сочетание выбранное сочетание движений: заготовке задается вращательное движение n и возвратно-поступательное S . При этом время обработки устанавливается исходя их требуемых значений параметров качества обработки.

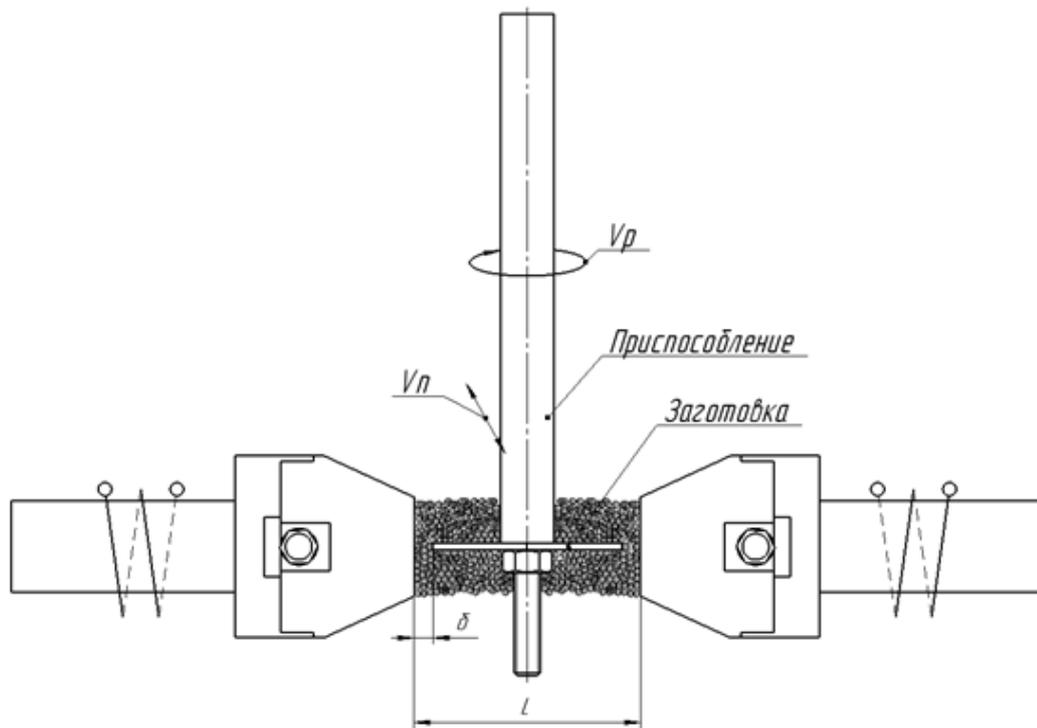


Рисунок 2.5 – Схема реализации способа магнитно-абразивного воздействия обработки кромок плоских изделий с формированием основных движений

Рассматривая предлагаемый способ стоит отметить, что эффект скольжения абразивных частиц о поверхность обрабатываемого материала наблюдается равномерно с боковых и торцевой сторон. Обрабатываемая пластина равномерно погружается в магнитно-абразивную массу в каждый момент времени и сила магнитной индукции с каждой из сторон кромки одинакова, что позволяет магнитно-абразивному порошку равномерно перемешиваться. Кинематика процесса осуществляется таким образом, что определенный участок кромки обрабатываемого изделия не врезается в магнитно-абразивную массу за счет того, что другая часть кромки всегда находится в ней. За счет того, что частицы абразивного порошка не врезаются в поверхности обрабатываемой заготовки, наблюдается эффект скольжения частиц по торцевой и боковым поверхностям [53].

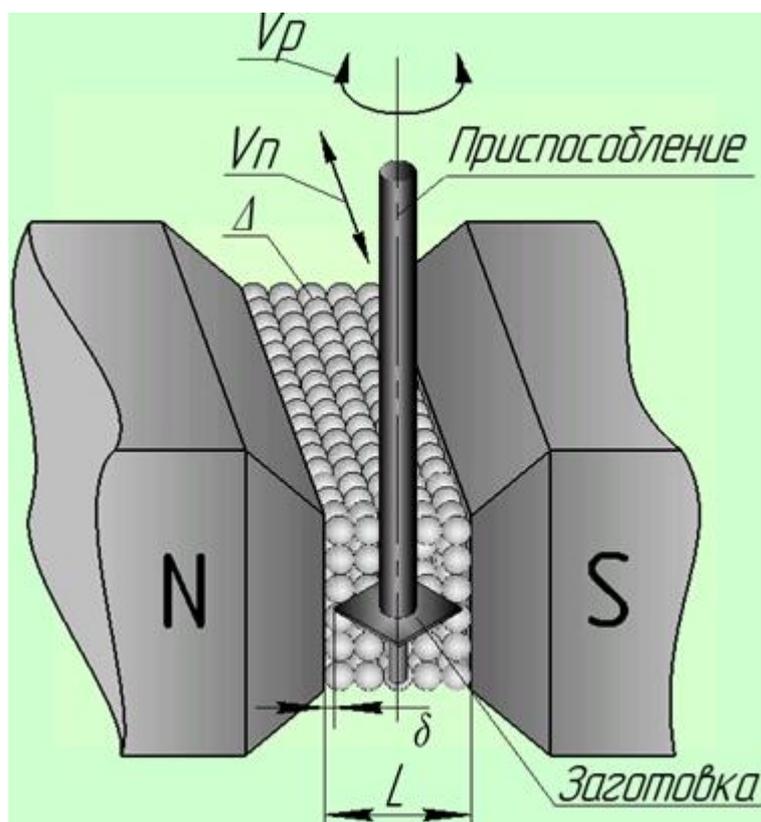


Рисунок 2.6 – Схема расположения исследуемой пластины способом магнитно-абразивного воздействия в зоне обработки

Подтверждением отсутствия врезания абразивного порошка в обрабатываемую заготовку и равномерной его обработки стали исследования по микротвердости боковых и торцевых поверхностей до и после магнитно-абразивной обработки. Известно [1], что особую роль в процессе изменения физико-механических свойств поверхностного слоя и повышения микротвердости оказывает процесс микроудара и пластической деформации в процессе обработки, а в меньшей степени – микрорезание. Таким образом, отсутствие изменений микротвердости обработанных поверхностей свидетельствует о преимущественном микрорезании и микровыглаживании поверхности и скольжении абразивных частиц о поверхность заготовки при выбранном сочетании движений и схемы обработки.

Измерение микротвердости производилось при помощи микротвердомера ПМТ-3 серией испытаний с нагрузкой $P = 5; 10; 20; 50$ г. Измерения проводились по торцевым и боковым поверхностям. Результаты измерений и дальнейшего пересчета для определения микротвердости поверхности не показали изменений в

сравнении обработанных и необработанных образцов. Так, справочное [9, 30] значение твердости алюминиевого сплава марки АМц составляет $HV \cdot 10^{-1} = 40$ МПа, результаты измерений (рисунок 2.7) показали соответствующий результат на всех сторонах кромок изделий до и после обработки, что позволяет сделать вывод об отсутствии микроудара в процессе магнитно-абразивной обработки.

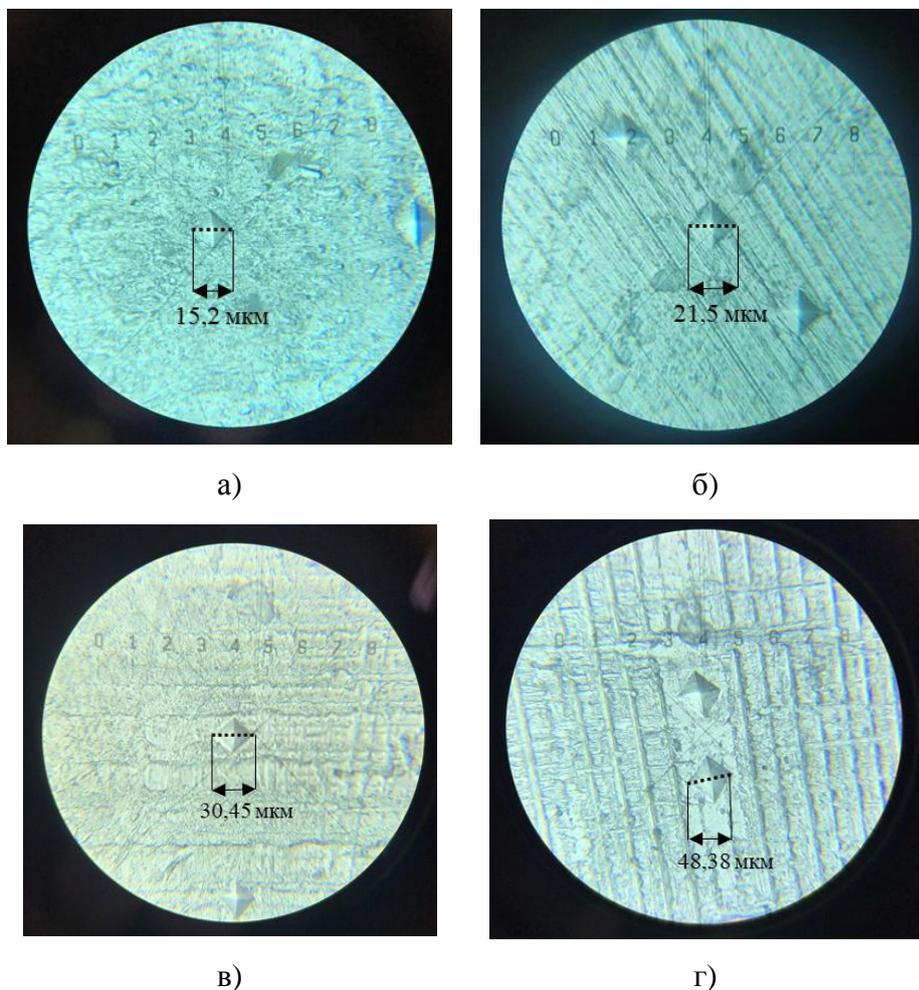


Рисунок 2.7 – Отпечатки индентора при проведении серии испытаний:

а – нагрузка 5 г; б – нагрузка 10 г; в – нагрузка 20 г; г – нагрузка 50 г

Подбор режимных параметров, технологического инструмента и схемы обработки позволяет управлять точностью формы, количеством снимаемого материала, шероховатостью поверхности. Правильный подбор схемы обработки, а также величины технологических факторов обработки, сочетаний рабочих движений, технологического инструмента позволяет избежать появления в процессе обработки микротрещин, надрывов, шаржирования на обрабатываемой поверхности, а также позволяет обеспечивать равномерную и бездефектную

обработку [63]. Таким образом, дальнейшей задачей стоит подбор рационального технологического инструмента обработки, формирующегося из состава абразивного материала и его фракции, величины магнитной индукции и состава смазочно-охлаждающей жидкости, и подбора режимных параметров обработки.

2.2.4 Определение диапазона рабочих движений

Комплексные исследования по изучению влияния магнитно-абразивной обработки на качество кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц невозможно осуществить без предварительного определения диапазона варьирования величин рабочих движений заготовки: скорости вращения и подачи. В связи с этим, проведен подбор рациональных диапазонов значений, который производился опытным путем и оценивался визуальному контролю обработанных поверхностей на предмет наличия дефектов поверхности и посторонних включений абразивного порошка.

Экспериментальные исследования проводились на пластинах из алюминиевого сплава марки АМц с размерными параметрами 30x30x2 мм при помощи магнитно-абразивного устройства и специально разработанного приспособления (рисунок 2.3). Технологические параметры при проведении исследований применялись равными: магнитная индукция $B = 0,6$ Тл; время обработки $t = 8$ минут, рабочий зазор $\delta = 2$ мм с каждой стороны. Экспериментальные исследования проводились с изменениями значений скорости вращения и подачи заготовки при прочих равных. В качестве абразивного инструмента применялся порошок Пр10Р6М5 фракцией 160-350 мкм в количестве 180 г.

В качестве первоначально принятого диапазона рабочих движений принимались значения частоты вращения заготовки $n = 100-800$ мин⁻¹, скорости подачи заготовки вдоль полюсных наконечников $S = 50-400$ мм/мин.

Для установления максимальных крайних значений проводится эксперимент со значениями подачи 400 мм/мин и частоты вращения 800 об/мин. Визуальный контроль показал сильные вкрапления на углах боковых поверхностей кромок, а также сильные скругления формы углов торцевых сторон. Для уточнения влияния

скорости подачи и частоты вращения на остаточные после обработки дефекты проводился эксперимент с изменением скорости подачи при прочих равных. Для уточнения степени влияния скорости подачи на процесс обработки варьируемым фактором становится скорость подачи и, которая уменьшается от 400 мм/мин до 100 мм/мин. Остальные технологические параметры обработки остаются неизменными. Частота вращения влияет на обработку даже при малых значениях индукции. Результаты визуального контроля показали, что большие значения частоты вращения заготовки приводят к увеличению силы столкновения абразивных частиц с поверхностью заготовка (особенно в углах заготовки) что приводит к скруглению и вбиванию частиц в поверхность. По результатам проведенных экспериментальных исследований значения технологических параметров скорости подачи следует принимать не более 200 мм/мин, скорость вращения заготовки – не более 500 об/мин.

Таким образом, на основании проведенных экспериментальных исследований рекомендованный для дальнейших исследований диапазон значений частоты вращения заготовки принимается равным $n = 225-475 \text{ мин}^{-1}$, диапазон значений скорости подачи заготовки вдоль полюсных наконечников принимается равным $S = 75-175 \text{ мм/мин}$.

2.3 Технологический инструмент магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий из алюминиевого сплава

В процессе магнитно-абразивной обработки в качестве технологического инструмента принимается технологическая рабочая среда, а именно магнитная индукция, формирующая основные силы при магнитно-абразивной обработке, магнитно-абразивный порошок, его фракция и количество, формируемый под действием магнитной индукции в режущий абразивный инструмент, и вид смазочно-охлаждающей жидкости. Основной задачей магнитно-абразивной обработки является достижение качества обработанной поверхности и производительности обработки. Подбор схемы обработки, сочетания рабочих

движений и рациональных диапазонов их значений позволяют достичь заданной цели лишь с условием правильного подбора технологического инструмента.

2.3.1 Магнитная индукция при магнитно-абразивной обработке алюминиевых изделий

Величина магнитной индукции является определяющей характеристикой при формировании сил резания в процессе магнитно-абразивной обработки и намагниченности порошка. Превалирующее влияние на давление порошка оказывает величина магнитной индукции. Магнитная индукция отвечает за несколько основополагающих эффектов: формирование жесткости магнитно-абразивной щетки [76]; удержание абразивных частиц в рабочем зазоре; формирование силы резания. Важным параметром в результативности магнитно-абразивной обработки достижения качества поверхности и производительности является магнитная индукция в рабочей зоне, определяющая силы взаимодействия порошка и обрабатываемой поверхности. Так, увеличение значений магнитной индукции в рабочей зоне приводит к увеличению сил резания, однако чрезмерное увеличение значений магнитной индукции приводит к достижению магнитного насыщения порошковой среды, увеличению магнитных потоков рассеивания вне рабочего зазора [6]. Действие магнитного поля начинает рассеиваться вне рабочей зоны, тем самым снижая градиент раздела двух сред: воздух и рабочая зона, способствуя увеличению выхода абразивных частиц за пределы рабочего зазора.

Увеличение магнитной индукции приводит к повышению давления порошка на обрабатываемую поверхность и, как следствие, увеличивает силы резания и приводит к увеличению массового съема материала [60]. Установлено [60], что с увеличением магнитной индукции давление растет по линейному закону. При обработке ферромагнитных материалов зависимость величины количественного съема материала от величины магнитной индукции имеет пик, после которого при повышении значений магнитной индукции количество снимаемого материала уменьшается. Связно это с намагничиванием обрабатываемой заготовки и ее

насыщением [63]. При обработке неферромагнитных материалов данного явления не происходит в силу их немагнитности.

Для определения оптимальных значений магнитной индукции при магнитно-абразивной обработке изделий из алюминиевого сплава марки АМц производились экспериментальные исследования. В качестве образцов выбраны пластины размером 30x30x2 мм, применялся магнитно-абразивный порошок марки Пр10Р6М5 фракцией $\Delta = 250-160$ мкм, время обработки $t = 10$ мин, частота вращения $n = 250$ мин⁻¹, скорость подачи $S = 125$ мм/мин. Исследуемый диапазон магнитной индукции составлял $B = 0,4-1,0$ Тл. Экспериментальные исследования проводились на магнитно-абразивной установке (рисунок 2.3) по определенной ранее схеме (рисунок 2.6). Оценка эффективности применения значений магнитной индукции проводилась при помощи оптического контроля поверхности. Фотографии оптического контроля торцевых и боковых поверхностей кромок представлены на рисунке 2.8.

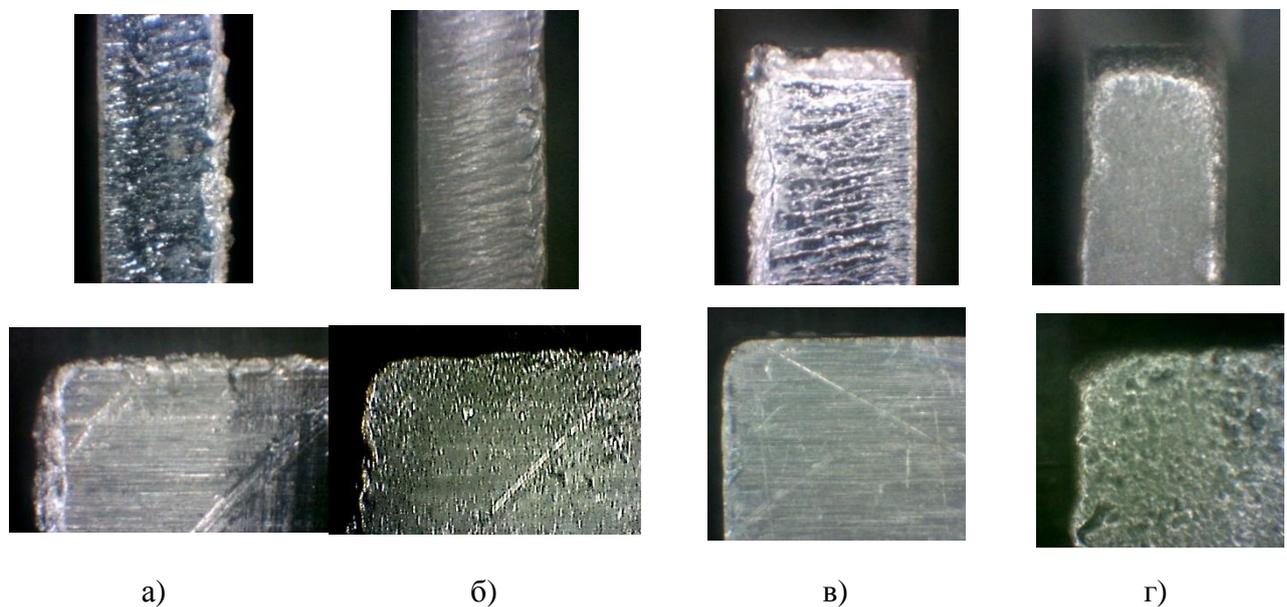


Рисунок 2.8 – Макроанализ торцевой и боковой сторон пластины: а, в - до магнитно-абразивной обработки; б, г - после магнитно-абразивной обработки при значении магнитной индукции $B = 0,4$ Тл; г - после магнитно-абразивной обработки при значении магнитной индукции $B = 1$ Тл

По итогам экспериментальных исследований установлено, что магнитная индукция равная 0,4 Тл не обеспечивает полный сьем дефектного поверхностного слоя с обрабатываемой заготовки (рисунок 2.8, б). Напротив, увеличение значений магнитной индукции до 1 Тл искажает геометрию обрабатываемой заготовки, оставляя значительные прижоги и вкрапления абразивного материала в поверхность (рисунок 2.8, г).

На основании проведенных экспериментальных исследований установлено, что оптимальным диапазоном магнитной индукции для обработки плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц, применяемый для дальнейших исследований, является $B = 0,5-0,8$ Тл.

2.3.2 Абразивный материал при магнитно-абразивной обработке алюминиевых изделий

В качестве режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке выступает магнитно-абразивный порошок, который под действием магнитного поля формируется в абразивную щетку. Порошок для магнитно-абразивной обработки должен сочетать в себе высокие режущие и магнитные свойства.

Выбор абразивного материала зависит от целого ряда факторов: поставленной задачи обработки (количество снимаемого материала и заданная шероховатость поверхности), физико-химических свойств обрабатываемого материала и его предшествующей обработки, метода обработки (вид магнитного поля, применяемые сочетания движений), конструктивные особенности оборудования.

Выбор оптимального состава магнитно-абразивного порошка является важнейшим фактором обработки и определяет качество, производительность и себестоимость процесса. При выборе марки абразивного материала следует учитывать, что на качество обработки в первую очередь оказывает влияние адгезионная совместимость порошка и обрабатываемого материала, а на производительность – механические и магнитные свойства порошка. Однако,

работа адгезии не должна превышать поверхностное натяжение обрабатываемого металла для эффективного полирования [28, 51].

Абразивный порошок для магнитно-абразивной обработки разделяется на две группы: однородные и композитные. В качестве однородных материалов могут применяться ферриты, альсифер, альперм. Однако, их твердость недостаточна для обеспечения режущей способности в процессе магнитно-абразивной обработки сталей и чугунов. Поэтому, для повышения твердости материала и повышения его режущей способности прибегают к композитным материалам. Композитные порошки представляют собой соединения магнитной и режущей составляющей, изготовленные путем спекания. Твердость таких порошков много выше однородных, но они требуют специального производства и оборудования. Себестоимость изготовления композитных абразивных порошков много выше себестоимости однородных абразивов, что является значительным аргументом в пользу использования однородных абразивов по мере возможности. Применение однородных магнитно-абразивных материалов предпочтительнее тогда, когда это возможно, например, для обработки цветных металлов [5, 8].

Применение однородных абразивных материалов для обработки алюминия более желательно. Это связано с однородностью формирования температуры в зоне резания и пластического деформирования. При условии неоднородности (композитности) материала в местах контакта наиболее твердого и износостойкого элемента структуры, осуществляющего пластическое оттеснение металла, локализуется максимальная температура [51], что приводит к неоднородности формирования поверхности и оксидной пленки, зависящей от температуры.

При обработке цветных металлов методом магнитно-абразивной обработки целесообразно использовать абразивный порошок с высокой твердостью абразивных частиц. Форма зерен выбирается в зависимости от задач, поставленных при обработке: для достижения наименьшей шероховатости целесообразно применение абразивных частиц округлой формы, а для увеличения количества снимаемого материала – осколочной. При обработке мягких металлов

формирование шероховатости осуществляется в большей степени путем выглаживания поверхности [51].

Частицы округлой формы более плотно формируются в единую абразивную щетку, что обеспечивает большее число частиц абразива, прилегающих к обрабатываемой поверхности и участвующих в резании. Средняя глубина внедрения круглых частиц больше, нежели частиц осколочной формы и совместно с увеличенной площадью резания обеспечивает получение поверхности с меньшей шероховатостью. С увеличением размера частиц шероховатость поверхности растет. Сферическая форма зерен способствует перемешиванию порошка в рабочих зазорах, вступлению в работу каждого зерна разными своими вершинами и поддержанию, таким образом, высокой интенсивности резания. Такой процесс можно характеризовать как самозатачивание абразивной массы в процессе обработки [6].

Для обеспечения высокой производительности обработки при выборе абразивного материала следует опираться на соотношение твердости абразива и твердости обрабатываемого материала. Так, при обеспечении условия, что твердость абразивного материала больше твердости обрабатываемого материала в 2,5 раза (2.1), обработка будет производиться с максимальной производительностью при условии подбора оптимальных значений технологических параметров [6]

$$H_a/H_m > 2,5, \quad (2.1)$$

где H_a – твердость абразива, МПа;

H_m - твердость обрабатываемого материала, МПа.

В качестве абразивного материала для магнитно-абразивной обработки изделий из алюминиевого сплава марки АМц был выбран однородный материал марки Пр10Р6М5 представляющий собой быстрорежущую сталь с химическим составом: основа - железо, углерод – 1 %, хром – 4 %, вольфрам – 6,5 %, молибден – 5,2 %, ванадий – 1,9 %, кремний – 0,6 %, марганец – 0,65 %, никель – 2 %, Сера – 0,03 %.

Твердость по Бринеллю быстрорежущей стали марки Пр10Р6М5 составляет $HВ \cdot 10^{-1} = 255$ МПа [40], твердость алюминиевого сплава марки АМц составляет $HВ \cdot 10^{-1} = 40$ МПа [9, 30]. Таким образом, отношение твердости абразивного материала к твердости обрабатываемого материала больше 2,5, согласно неравенству 2.2, что обуславливает целесообразность применения выбранного материала абразивного порошка

$$\frac{255}{40} = 6,375 > 2,5. \quad (2.2)$$

Размер фракции абразивного материала оказывает существенное влияние на процесс съема металла, качество обрабатываемой поверхности, износ порошка и его стойкость [6]. С уменьшением фракции порошка увеличивается количество зерен, прилегающих к поверхности обрабатываемого изделия и участвующих в процессе резания, обеспечивая тем самым снижение шероховатости [60].

Фракция абразивного материала оказывает непосредственное влияние на активность резания. Так, существует закономерность между размером частиц и размером их радиусов скругления: чем больше зерно, тем больше его радиусы скругления вершин. Уменьшение радиуса скругления вершин обеспечивает повышение активности резания. Слишком большие радиусы скруглений приводят к преобладанию процессов пластического деформирования и истирание обрабатываемой поверхности, нежели резание. Выбор фракции абразивного порошка следует подбирать индивидуально под конкретные условия обработки и материал заготовки.

Для определения рабочей фракции для обработки изделий из алюминиевого сплава марки АМц проводились экспериментальные исследования. Абразивный порошок марки Пр10Р6М5 был разбит на фракции при помощи ручных металлических сит (рисунок 2.9). Исследуемые фракции Δ составляли диапазоны: $\Delta > 315$ мкм; $\Delta = 315-250$ мкм; $\Delta = 250-160$ мкм; $\Delta = 160-60$ мкм; $\Delta < 60$ мкм (рисунок 2.10).



Рисунок 2.9 – Ручные металлические сита



а)

б)

в)

г)

Рисунок 2.10 – Фракции абразивного порошка Р6М5: а – $\Delta > 315$ мкм; б – $\Delta = 315-250$ мкм;
в – $\Delta = 250-160$ мкм; г – $\Delta = 160-60$ мкм

Экспериментальные исследования проводились на установке для магнитно-абразивной обработки (рисунок 2.3), режимные параметры обработки применялись одинаковыми и равными: магнитная индукция $B = 0,6$ Тл, время обработки $t = 10$ мин, частота вращения $n = 250$ мин⁻¹, скорость подачи $S = 125$ мм/мин. По итогам экспериментальных исследований выявлено, что фракции порошка $\Delta = 250-60$ мкм предпочтительна для обработки изделий из алюминиевого сплава марки АМц.

При рассмотрении процесса полирования алюминиевого сплава марки АМц выявлено, что рабочие элементы, осуществляющие пластическое оттеснение обрабатываемого металла, должны иметь диаметр около 50 мкм. Формирование рельефа полируемой поверхности эффективно проводить непосредственно самими частицами порошка, имеющими достаточную твердость [51].

Немаловажным в вопросе давления порошка на обрабатываемую поверхность является величина рабочего зазора и степень его заполняемости абразивным материалом. При увеличении рабочего зазора удельное давление уменьшается, а с увеличением заполняемости – увеличивается [60]. Рассматривая обработку изделий

из мягких материалов, таких как алюминий и его сплавы, стоит уделять особое внимание механизму заклинивания абразивного материала в рабочем зазоре. Имея много большую твердость, абразивный материал может увязать в структуре материала заготовки, оставаясь в качестве дефектов обработки. Следовательно, величину рабочего зазора и степень его заполняемости надо подбирать опытным путем и избегая эффекта заклинивания. В качестве рекомендованного рабочего зазора для обработки изделий принято считать $\delta = 0,5-3$ мм [63]. Рекомендуемая степень заполнения больше 0,8.

2.3.3 Обоснование выбора смазочно-охлаждающей жидкости для создания технологического инструмента

Применение в процессе микрорезания при магнитно-абразивной обработке смазочно-охлаждающей жидкости не только охлаждают процесс резания, но и способствуют дополнительному полированию. Так, наличие поверхностно-активных веществ в составе смазочно-охлаждающей жидкости интенсифицирует процесс снятия тонких химических пленок, а также влияет на производительность обработки и количество снимаемого материала. Применение при магнитно-абразивной обработке смазочно-охлаждающей жидкости способствует снижению поверхностной энергии металла и работы, необходимой для разрушения поверхностного слоя изделия и его деформирование, предразрушая поверхностный слой благодаря поверхностно-активным веществам в своем составе [6, 97].

При применении смазочно-охлаждающей жидкости наблюдается изменение стружкообразования в процессе микрорезания [6, 63]. Так, стружка, образуемая при обработке без применения смазочно-охлаждающей жидкости, имеет более длинную геометрическую форму, нежели стружка, образуемая при обработке с применением смазочно-охлаждающей жидкости. Данный факт характеризует участие в первом случае лишь больших частиц в процессе резания, тогда как обработка с использованием смазочно-охлаждающей жидкости производится

частицами различных размеров и способствует увеличению количества снимаемого материала.

Смазочно-охлаждающая жидкость способствует улучшению качества формируемой поверхности, а также позволяет избежать вкраплений абразивного материала в поверхность заготовки и в случае обработки алюминиевых сплавов позволяет достичь блеска обработанной поверхности.

Для определения вида смазочно-охлаждающей жидкости проводились экспериментальные исследования. В качестве испытуемых применялись водорастворимые жидкости: 4 вида синтетических смазочно-охлаждающих жидкостей с химическим составом, представленным в таблице 2.1, и 2 вида масляных смазочно-охлаждающих жидкостей на эмульсионной основе марок Унизор ТУ 0253-001-1764563-2016 и ECOCOOL GLOBAL 10 UK.

Таблица 2.1 – Состав смазочно-охлаждающих жидкостей, применяемых в ходе исследования

Синтетические жидкости			
Тринатрифосфат 1 %	Тринатрифосфат 1 %	Моноэтаноламин 1,5 %	Моноэтаноламин 0,5 %
Нитрит натрия 1 %	Бензойная кислота 1-2 %	Нитрит натрия 1 %	Нитрит натрия 2 %
ПЭГ-400 0,5 %	ПЭГ-400 1 %	ПЭГ-400 1 %	ПЭГ-400 – 1 %
ОП-10 0,1-0,2 %	Изопропанол 5 %	Изопропанол 5 %	ОП-10 0,2 %

Экспериментальные исследования проводились на установке для магнитно-абразивной обработки (рисунок 2.3) с соответствующим сочетанием рабочих движений. Режимные параметры обработки принимались равными во всех сериях экспериментов: магнитная индукция $B = 0,6$ Тл; время обработки $t = 10$ минут; частота вращения $n = 250$ мин⁻¹; скорость подачи заготовки вдоль полюсных наконечников $S = 125$ мм/мин. В качестве абразивного инструмента применялся магнитно-абразивный порошок марки Пр10Р6М5 фракцией $\Delta=80-250$ мкм. В качестве заготовок применялись пластины из алюминиевого сплава марки АМц с размерами 30x30x2 мм.

Результаты экспериментальных исследований показали, что при магнитно-абразивной обработке с применением синтетических смазочно-охлаждающих жидкостей (таблица 2.1) в процессе обработки образуется пена, формируется матовая обработанная поверхность. Применение эмульсионных жидкостей сопровождается отсутствием пены в процессе обработки и формированием блестящей обработанной поверхности.

Таким образом, на основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований, в процессе магнитно-абразивной обработки изделий из алюминиевого сплава марки АМц рекомендовано применение масляных водорастворимых смазочно-охлаждающих жидкостей на эмульсионной основе, в частности марок Унизор и ECOCOOL GLOBAL 10 UK.

2.4 Выводы по второй главе

1. Разработан способ магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий, обеспечивающий равномерный съем материала с боковых и торцовых сторон, в частности:

- определено сочетание движений магнитно-абразивной обработки, включающее сочетание главного движения резания (V_p), движения подачи (V_n) и движения осцилляции (V_o). Применительно для имеющегося устройства в качестве движения резания принимается частота вращения заготовки n , мин^{-1} , в качестве движения подачи принимается подача заготовки вдоль полюсных наконечников S , мм/мин;

- обоснована схема магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий, обеспечивающая равномерный съем материала по всей поверхности изделия, а также обеспечивающая скольжение абразивных частиц о поверхность с исключением микроудара;

- предложен способ магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий с применением трех вращающихся полюсных наконечников, позволяющий равномерно обрабатывать кромки изделий любых габаритов для последующего внедрения в промышленные производства.

2. Установлены технологические параметры, состав абразивного материала и состав смазочно-охлаждающей жидкости для магнитно-абразивного воздействия обработки кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц, в частности:

- определен диапазон значений рабочих движений магнитно-абразивной обработки кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц по выбранной схеме для использования в дальнейших комплексных исследованиях: частота вращения заготовки $n = 225-475 \text{ мин}^{-1}$, скорость подачи заготовки вдоль полюсных наконечников $S = 75-175 \text{ мм/мин}$;

- определен диапазон изменения магнитной индукции для применения в последующих комплексных исследованиях, который варьируется от 0,5 Тл до 0,8 Тл;

- обоснован выбор состава абразивного материала марки с применение абразивного порошка фракцией в диапазоне $\Delta = 250-60 \text{ мкм}$;

- выполнены экспериментальные исследования по подбору смазочно-охлаждающей жидкости, по результатам которых установлено повышение производительности и отсутствие пенообразования при использовании масляных водорастворимых жидкостей на эмульсионной основе.

ГЛАВА 3 МАГНИТНО-АБРАЗИВНАЯ ОБРАБОТКА КРОМОК ПЛОСКИХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ АМц

3.1 Методика проведения экспериментальных исследований

Комплексные исследования магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий проводились на усовершенствованном магнитно-абразивном комплексе (рисунок 2.3), расположенном на кафедре машиностроения в лаборатории станков с ЧПУ Санкт-Петербургского горного университета. Обработка осуществлялась в соответствии с разработанной схемой (рисунок 2.5).

В качестве экспериментальных образцов выбраны изделия типа «пластина» из алюминиевого сплава марки АМц с размерными параметрами 30x30x2 мм. Пластинам предавалось вращательное (частота вращения n , мин⁻¹) и возвратно-поступательное (скорость подачи S , мм/мин) движения. В качестве режущего инструмента по итогам проведенных предварительных экспериментов был выбран порошок Пр10Р6М5 фракцией $\Delta = 50-250$ мкм.

Варьируемыми технологическими параметрами процесса магнитно-абразивной обработки определены величина магнитной индукции (B , Тл), время обработки (t , мин), частота вращения заготовки (n , мин⁻¹), скорость подачи заготовки (S , мм/мин), и изменялись в диапазонах, определенных ранее: $B = 0,5-0,8$ Тл; $t = 6-10$ мин; $n = 225 \div 475$ мин⁻¹; $S = 75 \div 175$ мм/мин.

Контролируемыми параметрами качества поверхности кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц являлись: шероховатость торцевых и боковых поверхностей, оксидная пленка, чистота поверхности. Также контролировался параметр производительности процесса магнитно-абразивной обработки.

Контроль шероховатости поверхности осуществлялся по параметру Ra при помощи профилометра Mitutoyo Surftest SJ-210 по боковым и торцевым сторонам кромки изделия. Измерения производились в 4 точках по 3 серии на верхних и нижних боковых сторонах заготовки и в 8 точках по 3 серии на торцевых сторонах кромки. Для расчетов принимали среднее значение шероховатости по рассматриваемой стороне (3.1).

$$R_a = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} R_{ai}. \quad (3.1)$$

Примеры измерения шероховатости и полученные результаты представлены на рисунках 3.1-3.2.

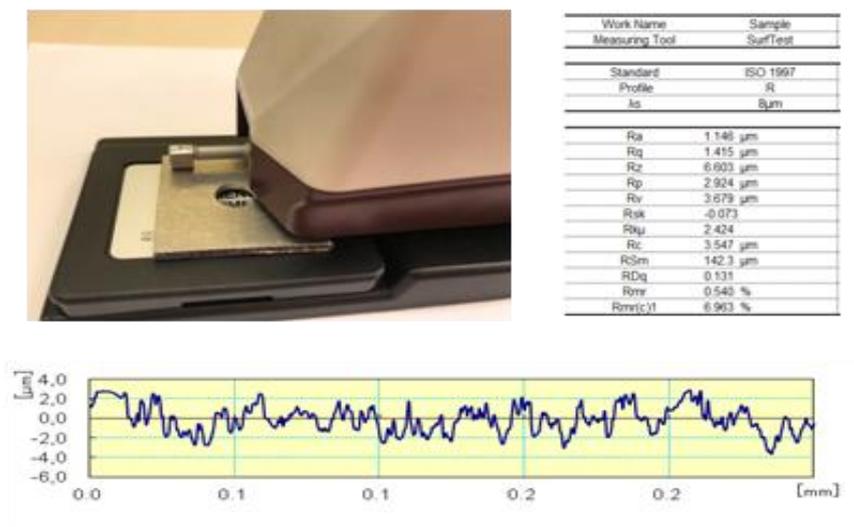


Рисунок 3.1 – Измерение шероховатости боковой поверхности заготовки и обработка результатов до обработки

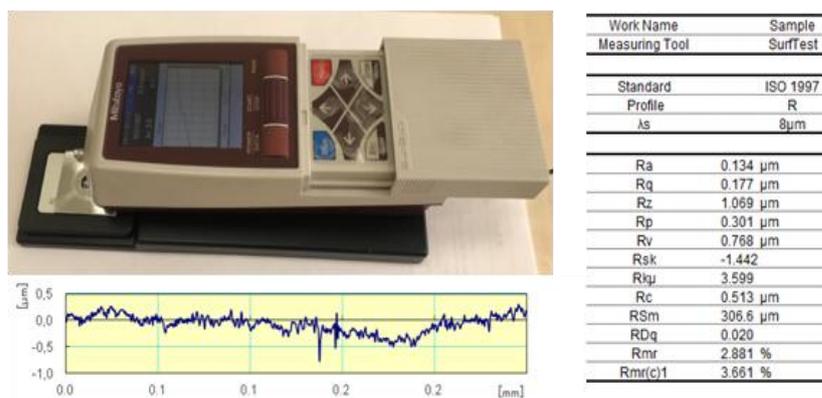


Рисунок 3.2 – Измерение шероховатости боковой поверхности заготовки и обработка результатов после магнитно-абразивной обработки

Оценку толщины оксидной пленки производили серией испытаний с постепенно увеличивающейся нагрузкой от 50 до 50000 мкН при помощи сканирующего наноиндентора «Наноскан» (рисунок 3.3) с установлением нерегулярной сетки испытаний 300x300 мкм, позволяющим обеспечить внедрение индентора на величину в несколько нанометров. В качестве индентора применяли

алмазную пирамиду Берковича (рисунок 3.4), представляющую собой трехгранную пирамиду, угол между осью пирамиды и гранью $65,3^\circ$, эквивалентный угол конуса $70,32^\circ$, радиус закругления острия индентора менее 100 нм. Серия экспериментов включает в себя 32 испытания с постепенным увеличением нагрузки. Минимальная глубина внедрения составила 15 нм, максимальная глубина составила 1250 нм. По изменению твердости материала на определенной глубине можно сделать вывод о преодолении оксидной пленки и достижению поверхности основного металла.

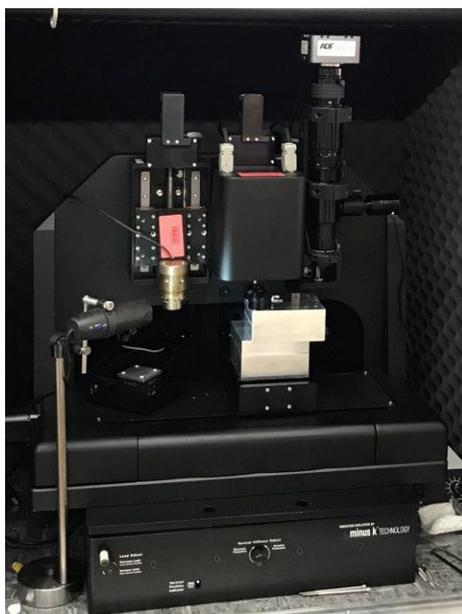


Рисунок 3.3 - Сканирующий нанотвердомер «Наноскан»

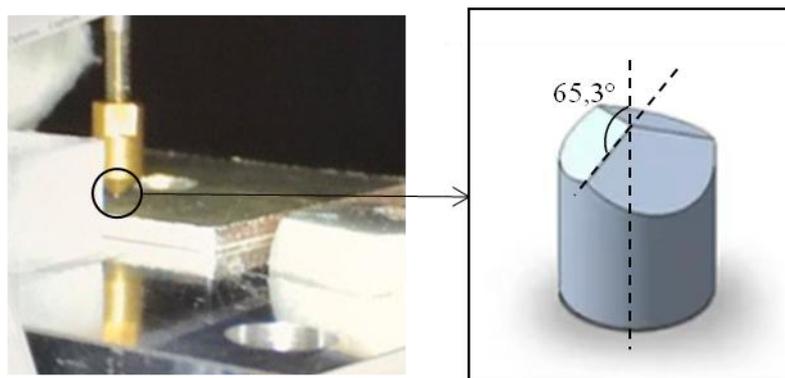


Рисунок 3.4 – Индентор алмазной пирамиды Берковича

Оценка производительности магнитно-абразивной обработки, удельный съем материала с единицы площади и толщины снимаемого осуществлялась путем

измерения массы образца до и после обработки на весах марки ВЛТЭ 310 (рисунок 3.6). Профилометр, используемый для измерения шероховатости, представлен на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 - Профилометр *Mitutoyo Surftest SJ-210*



Рисунок 3.6 – Измерительные весы марки ВЛТЭ 310

3.2 Разработка центрального композиционного ротатабельного плана эксперимента и методика составления регрессионной модели

Проведение экспериментальных исследований базировалось на методике планирования эксперимента [47, 48, 62]. Методика проведения экспериментального исследования согласно центральному композиционному ротатабельному плану позволяет получить математическое представление отклика объекта исследования в виде полного полинома второй степени, построить степенную математическую модель отклика эксперимента, а также оценить ее адекватность.

Ротатабельный план обеспечивает получение модели, предсказывающей значение отклика с одинаковой дисперсией во всех точках факторного пространства, находящихся на одинаковом расстоянии от центра [48]. Таким образом, варьируемые параметры принимают верхнее и нижнее значения в определенном ранее диапазоне (согласно матрице планирования полнофакторного эксперимента), а также значение в центре диапазона и значения в «звездных» точках. Общая модель отклика имеет вид (3.2):

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

Число опытов при использовании ротатабельного композиционного плана определяется по формуле (3.3):

$$N = N_{\text{я}} + 2 \cdot m + n_0, \quad (3.3)$$

где $N_{\text{я}}$ – число опытов в ядре плана (полнофакторного эксперимента) $N_{\text{я}} = 2^n$,
 m – число факторов,
 $2 \cdot m$ – число опытов в «звездных» точках (с координатами $(\alpha, 0 \dots, 0)$, $(0, \alpha \dots, 0)$, $(0, 0, \dots, \alpha)$ после масштабирования факторов),
 n_0 – число опытов в центре плана (в точке, которая после масштабирования факторов будет иметь координаты $(0, 0 \dots, 0)$). Для $m = 4 \rightarrow N_0 = 7$.

Ротатабельность плана (равные расстояния от всех экспериментальных точек до центра плана), обеспечивающая одинаковую точность предсказаний значений отклика объекта исследования для всех точек, достигается выбором значения «звездного плеча» из условия (3.4):

$$\alpha = \begin{cases} 2^{0,25 \cdot m}, & m < 5 \\ 2^{0,25 \cdot (m-1)}, & m \geq 5 \end{cases} \quad (3.4)$$

При количестве факторов равных 4, число опытов и значение «звездного плеча» рассчитывается по формулам (3.3-3.4):

$$N = 2^4 + 2 \cdot 4 + 7 = 31,$$

$$\alpha = 2.$$

Натуральные значения варьируемых факторов обработки кодируются и связываются с натуральным масштабом соотношением (3.5):

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (3.5)$$

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

Для определения коэффициентов уравнения регрессии (3.2) проводятся экспериментальные исследования согласно матрице планирования центрального композиционного ротатабельного плана, представленной в таблице 3.1. План состоит из 31 эксперимента, 16 из которых составляют ядро плана и соответствуют

матрице планирования полнофакторного эксперимента 2^4 , 8 экспериментов в «звездных» точках и 7 в центре плана.

Таблица 3.1 - Матрица планирования экспериментальных исследований:

№ опыта	Натуральные значения факторов				Кодовые значения факторов				
	B , Тл	t , с	n , об/мин	S , мм/мин	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4
1	0,8	10	475	175	+1	+1	+1	+1	+1
2	0,5	10	475	175	+1	-1	+1	+1	+1
3	0,8	6	475	175	+1	+1	-1	+1	+1
4	0,5	6	475	175	+1	-1	-1	+1	+1
5	0,8	10	225	175	+1	+1	+1	-1	+1
6	0,5	10	225	175	+1	-1	+1	-1	+1
7	0,8	6	225	175	+1	+1	-1	-1	+1
8	0,5	6	225	175	+1	-1	-1	-1	+1
9	0,8	10	475	75	+1	+1	+1	+1	-1
10	0,5	10	475	75	+1	-1	+1	+1	-1
11	0,8	6	475	75	+1	+1	-1	+1	-1
12	0,5	6	475	75	+1	-1	-1	+1	-1
13	0,8	10	225	75	+1	+1	+1	-1	-1
14	0,5	10	225	75	+1	-1	+1	-1	-1
15	0,8	6	225	75	+1	+1	-1	-1	-1
16	0,5	6	225	75	+1	-1	-1	-1	-1
17	0,95	8	350	125	+1	+2	0	0	0
18	0,35	8	350	125	+1	-2	0	0	0
19	0,65	12	350	125	+1	0	+2	0	0
20	0,65	4	350	125	+1	0	-2	0	0
21	0,65	8	600	125	+1	0	0	+2	0
22	0,65	8	100	125	+1	0	0	-2	0
23	0,65	8	350	225	+1	0	0	0	+2
24	0,65	8	350	25	+1	0	0	0	-2
25	0,65	8	350	125	+1	0	0	0	0
26	0,65	8	350	125	+1	0	0	0	0
27	0,65	8	350	125	+1	0	0	0	0
28	0,65	8	350	125	+1	0	0	0	0
29	0,65	8	350	125	+1	0	0	0	0
30	0,65	8	350	125	+1	0	0	0	0
31	0,65	8	350	125	+1	0	0	0	0

Результаты экспериментальных исследований подвергаются статистической обработке для определения коэффициентов уравнения регрессии, а также установления адекватности гипотезы в следующем порядке:

1. По результатам всех проведённых опытов, используя константы c_i , представленные в таблице А.3 (приложение А) в зависимости от номера плана и числа опытов, последовательно проводится расчёт всех коэффициентов модели согласно формулам (3.6-3.9):

$$b_0 = c_1 \sum_{u=1}^N y_u - c_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u, \quad (3.6)$$

$$b_i = c_3 \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u, \quad (3.7)$$

$$b_{ij} = c_4 \sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u y_u, \quad (3.8)$$

$$b_{ii} = c_5 \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + c_6 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - c_2 \sum_{i=1}^k y_u, \quad (3.9)$$

где N – общее число опытов ротatableльного эксперимента,

k – число факторов,

y_u – экспериментальное значение в u -м опыте,

$x_i x_j$ – значения факторов в i -м и j -м столбце.

2. Дисперсия опыта оценивается по значениям выходной характеристики в центре плана по формуле (3.10):

$$S_y^2 = \frac{\sum_{g=1}^{n_0} (y_{0g} - \bar{y}_0)^2}{f_1}, \quad (3.10)$$

где y_{0g} – результат g -го дубля – повтора опыта (в центре плана),

\bar{y}_0 – среднее арифметическое значение всех n_0 дублей центрального опыта,

f_1 – число степеней свободы.

Среднее арифметическое значение всех дублей центрального опыта рассчитывается по формуле (3.11):

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{n_0} \cdot \sum_{j=N_{я+2} \cdot m + 1}^N y_j, \quad (3.11)$$

где n_0 – число опытов в центре плана,

y_j – натуральное значение выходного параметра в j -ом опыте.

Число степеней свободы – понятие, учитывающие в статистических ситуациях связи, ограничивающие свободу изменения случайных величин. Определяется как разность между числом выполненных опытов n_0 и числом констант (средних, коэффициентов и проч.), подсчитанных по результатам тех же опытов. Требуется подсчитать одну константу (\bar{y}_0). Поэтому формула для определения числа степени свободы примет вид (3.12):

$$f_1 = n_0 - 1. \quad (3.12)$$

Формула (3.13) используется, если все опыты, заданные планом, выполняют по одному разу, а один из них (чаще в центре плана) дублируют несколько раз. Число степеней свободы в настоящем эксперименте равняется 6.

3. С целью оценки отклонений экспериментальных значений выходного параметра от его среднего значения рассчитываются дисперсия S_b (3.13-3.20) каждого коэффициента планирования модели, а также ковариации cov_{bb} (3.21, 3.22):

$$S_{b_0}^2 = c_1 S_y^2, \quad (3.13)$$

$$S_{b_0} = c_7 S_y, \quad (3.14)$$

$$S_{b_j}^2 = c_3 S_y^2, \quad (3.15)$$

$$S_{b_j} = c_8 S_y, \quad (3.16)$$

$$S_{b_{ij}}^2 = c_4 S_y^2, \quad (3.17)$$

$$S_{b_{ij}} = c_9 S_y, \quad (3.18)$$

$$S_{b_{jj}}^2 = (c_5 + c_6) S_y^2, \quad (3.19)$$

$$S_{b_{jj}} = c_{10} S_y, \quad (3.20)$$

$$cov_{b_0 b_{ii}} = -c_2 S_y^2, \quad (3.21)$$

$$cov_{b_{ii} b_{jj}} = c_6 S_y^2, \quad (3.22)$$

где S_y^2 - дисперсия воспроизводимости эксперимента,

S_y – среднеквадратическое отклонение,

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

4. Статистическая оценка значимости коэффициентов производится путем сравнения абсолютной величины коэффициента с его доверительным интервалом. Доверительный интервал рассчитывается по формуле (3.23):

$$\Delta b_i = t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_i}, \quad (3.23)$$

где $t_{\alpha; f_1}$ – критерий Стьюдента, находится из таблицы А.1 (приложение А) в зависимости от уровня значимости α и числа степени свободы f_1 при определении дисперсии опыта S_y^2 ,

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

Уровень значимости α – вероятность практически невозможных событий, принимается равным 0,05. Значение критерия $t_{\alpha; f}$ равняется 2,45.

Коэффициент считается статически значимым, когда его абсолютная величина b_i больше доверительного интервала или равна ему, т.е. соответствует неравенству (3.24):

$$|b_i| \geq \Delta_{b_i}. \quad (3.24)$$

5. Дисперсия неадекватности модели проверяется по формуле (3.25):

$$SS_{\text{неад}}^2 = \frac{SS_{\text{неад}}}{f_2}, \quad (3.25)$$

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

f_2 - число степеней свободы.

Так как дублирование производилось одного опыта в центре плана, сумма квадратов, связанная с дисперсией неадекватности, рассчитывается по формуле (3.26):

$$SS_{\text{неад}} = n_0 (y_{0\text{расч}} - \bar{y}_0)^2 + \sum_{i=1}^{24} (y_{i\text{расч}} - y_{i\text{эксп}})^2, \quad (3.26)$$

где n_0 – число опытов в центре плана,

$y_{0\text{расч}}$ и \bar{y}_0 расчётное и среднее значение из опытов в центре плана,

$y_{i\text{расч}}$ и $\bar{y}_{i\text{эксп}}$ – рассчитанное по уравнению регрессии и экспериментальное значение опытов.

Число степеней свободы определяется по формуле (3.27):

$$f_2 = N - k' - 1, \quad (3.27)$$

где N – число опытов,

k' – число оставленных коэффициентов уравнения.

6. Гипотеза адекватности найденной модели оценивается по F-критерию Фишера, определяемому по формуле (3.28):

$$F_{\text{расч}} = \frac{SS_{\text{неад}}^2}{S_y^2}. \quad (3.28)$$

Рассчитанное значение F-критерия сравнивается с табличным значением (приложение А, таблица А.2) после чего делается вывод об адекватности полученной модели. Если $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$ для принятого уровня значимости, то модель адекватна.

3.3 Влияние магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхности кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц

Критерий шероховатости поверхности свариваемых кромок играет значительную роль в формировании качественного сварного соединения. С увеличением шероховатости поверхности увеличивается ее площадь. Оксидная пленка, имея равную толщину при условии различной шероховатости поверхности, отличается по объему. С увеличением объема оксидной пленки на поверхности свариваемой кромки, увеличивается количество включений в сварном соединении, что оказывает значительное влияние на качество и долговечность сварного соединения.

Метод магнитно-абразивной обработки позволяет снижать шероховатость поверхности в 6-10 раз, а также удалять дефектный слой, загрязнения и следы технологической наследственности. Вследствие этого поставлена задача изучения влияния технологических параметров магнитно-абразивной обработки на изменения шероховатости поверхности. Для оценки влияния проводились экспериментальные исследования согласно матрице центрального композиционного ротатбельного плана.

Расчет всех коэффициентов модели производится по формулам (3.6-3.9), их дисперсии и ковариации по формулам (3.13-3.22), а также проводится оценка значимости каждого коэффициента путем сравнения его абсолютной величины с расчетным значением доверительного интервала, определенного по формуле (3.23) при $t = 2,45$.

Общая дисперсия опыта оценивается по значениям в центре плана по формуле (3.10). Среднее арифметическое значение всех дублей центрального опыта $\bar{y}_0=0,434571$. Результаты расчетов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты расчетов коэффициентов регрессионного уравнения шероховатости

Коэффициент	Значение	Дисперсия опыта, S_y^2	Дисперсия коэффициента, S_b^2	Среднеквадратичная ошибка, S_b	Доверительный интервал
b_0	0,435	0,00013	0,0000189	0,00435	0,011
b_1	0,038		0,00000552	0,00235	0,0058
b_2	0,033				
b_3	0,018				
b_4	-0,079				
b_{12}	0,004		0,00000829	0,00287	0,007
b_{13}	-0,003				
b_{14}	-0,003				
b_{23}	0,006				
b_{24}	-0,037		0,00000463	0,00215	0,005
b_{34}	0,038				
b_{11}	0,08				
b_{22}	-0,023				
b_{33}	-0,001				
b_{44}	-0,01				

Статистически незначимые коэффициенты не учитываются при составлении модели. Так, по результатам проведенных расчетов коэффициенты b_{12} , b_{13} , b_{14} , b_{23} , b_{33} признаны статистически незначимыми. Таким образом, подставив коэффициенты в уравнение (3.2) получаем уравнение регрессии (3.29):

$$y_{Ra} = 0,435 + 0,038x_1 + 0,033x_2 + 0,018x_3 - 0,079x_4 - \\ -0,037x_2x_4 + 0,038x_3x_4 + 0,08x_{11} - 0,023x_{22} - 0,01x_{44}. \quad (3.29)$$

Далее проводится проверка адекватности модели. С помощью построенного уравнения регрессии (3.29) вычисляются расчетные значения отклика. При вычислении значения отклика стоит обратить внимание, что значения x_i имеет закодированное значение. Так, например, при вычислении значения отклика для 2-го опыта, используя таблицу 3.2, закодированные значения x_i будут приниматься: $x_1 = -1$, $x_2 = +1$, $x_3 = +1$, $x_4 = +1$, $x_2x_4 = +1$, $x_3x_4 = +1$, $x_{11} = +1$, $x_{22} = +1$, $x_{44} = +1$, тогда расчетное значение шероховатости боковой поверхности будет равняться:

$$y_{Ra(3)} = 0,435 - 0,038 + 0,033 + 0,018 - 0,079 - 0,037 + 0,038 + 0,08 - \\ -0,023 - 0,01 = 0,417.$$

Рассчитанные таким образом значения отклика приведены в таблице 3.4. Данные таблицы использовались для определения дисперсии неадекватности, которая рассчитывается по формуле (3.25). Расчетное значение в центре плана равняется $y_{0расч} = 0,434957$. Среднеквадратичная ошибка в центре плана равняется $SS_{неад0} = 1,04 \cdot 10^{-6}$. Число степеней свободы зависит от количества оставленных коэффициентов уравнения. Так, оставлено 10 коэффициентов, следовательно, число степеней свободы будет иметь значение: $f_2 = 20$. Дисперсия неадекватности модели составляет: $SS_{неад}^2 = \frac{0,005}{20} = 0,00025$.

Таблица 3.4 – Экспериментальные и расчетные значения отклика уравнения шероховатости

№ опыта	$Ra_{\text{эксп}}$	$Ra_{\text{расч}}$	Δy_{Ra}^2	№ опыта	$Ra_{\text{эксп}}$	$Ra_{\text{расч}}$	Δy_{Ra}^2
1	0,355	0,493892	0,0108	13	0,786	0,689568	0,0173
2	0,408	0,417386	0,0005	14	0,579	0,613062	0,0004
3	0,426	0,500553	0,0005	15	0,495	0,54923	0,0006
4	0,312	0,424047	0,0059	16	0,596	0,472724	0,0250
5	0,313	0,383306	0,0111	17	0,847	0,830098	0,0003
6	0,271	0,3068	0,0039	18	0,755	0,677085	0,0061
7	0,477	0,389967	0,0023	19	0,496	0,41143	0,0072
8	0,233	0,313461	0,0158	20	0,288	0,277753	0,0001
9	0,668	0,649655	0,0007	21	0,632	0,470293	0,0272
10	0,469	0,573149	0,0206	22	0,326	0,399621	0,0049
11	0,503	0,509316	0,0011	23	0,402	0,239079	0,0265
12	0,421	0,43281	0,0022	24	0,486	0,554104	0,0046
Σ	-	-	-	-	-	-	0,1957

Гипотеза об адекватности модели проверялась по F-критерию Фишера, вычисляемому по формуле (3.28). Расчетное значение критерия Фишера равняется $F_{\text{расч}} = 1,88$, табличное значение при $\alpha = 0,05$: $F_{\text{табл}} = 3,87$. Адекватность модели оценивается путем сравнения табличного и расчетного значений. Так как неравенство имеет вид: $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, можно утверждать об адекватности полученной математической модели для оценки шероховатости поверхности Ra .

После проверки модели (3.29) на адекватность производится ее раскодирование. Окончательная модель имеет вид (3.30), где переменные x_i представлены в кодированном масштабе и связаны с натуральными значениями соотношениями (3.5):

$$Ra = 1,314 - 4,362B + 0,155t - 0,62n \cdot 10^{-3} + 0,3S \cdot 10^{-3} - \quad (3.30)$$

$$- 0,37tS \cdot 10^{-3} + 0,61nS \cdot 10^{-5} + 3,55B^2 - 0,006t^2 - 0,4S^2 \cdot 10^{-5}.$$

По результатам проведенных экспериментальных исследований составлены полиномиальные модели, позволяющие оценить влияние технологических параметров обработки магнитной индукции B , времени обработки t , частоты

вращения n и подачи S заготовки на шероховатость плоских поверхностей R_a . Математическое описание моделей представлено в таблице 3.5, а их графическая интерпретация на рисунках 3.8-3.11.

Таблица 3.5 - Обобщающие полиномиальные модели влияния технологических параметров процесса магнитно-абразивной обработки на шероховатость поверхностей плоской заготовки из алюминия марки АМц

Варьируемый параметр	Обобщающая полиномиальная модель
Магнитная индукция B , Тл	$R_a = 1,85 - 4,72 \cdot B + 3,83 \cdot B^2$
Время обработки t , мин	$R_a = -0,014 + 0,11 \cdot t - 0,006 \cdot t^2$
Частота вращения n , мин ⁻¹	$R_a = 0,42 + 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot n - 0,4 \cdot 10^{-7} \cdot n^2$
Подача S , мм/мин	$R_a = 0,61 - 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot S - 0,4 \cdot 10^{-5} \cdot S^2$

Анализ обобщающей полиномиальной функции (рисунок 3.7) влияния магнитной индукции B на шероховатость плоских поверхностей R_a из алюминия марки АМц показывает, что изменение магнитной индукции в диапазоне от 0,35 до 0,61 Тл сопровождается улучшением шероховатости R_a от 0,67 мкм до 0,39 мкм; последующее изменение магнитной индукции от 0,61 до 0,95 Тл приводит к ухудшению шероховатости R_a от 0,39 мкм до 0,82 мкм. В первом случае снижение значений шероховатости вызвано более эффективным удалением микронеровностей магнитно-абразивным инструментом за счет увеличения его жесткости. Однако чрезмерное увеличение жесткости магнитно-абразивного инструмента приводит к более грубой обработке плоских заготовок из алюминия марки АМц, что подтверждается увеличением значений шероховатости во втором случае.

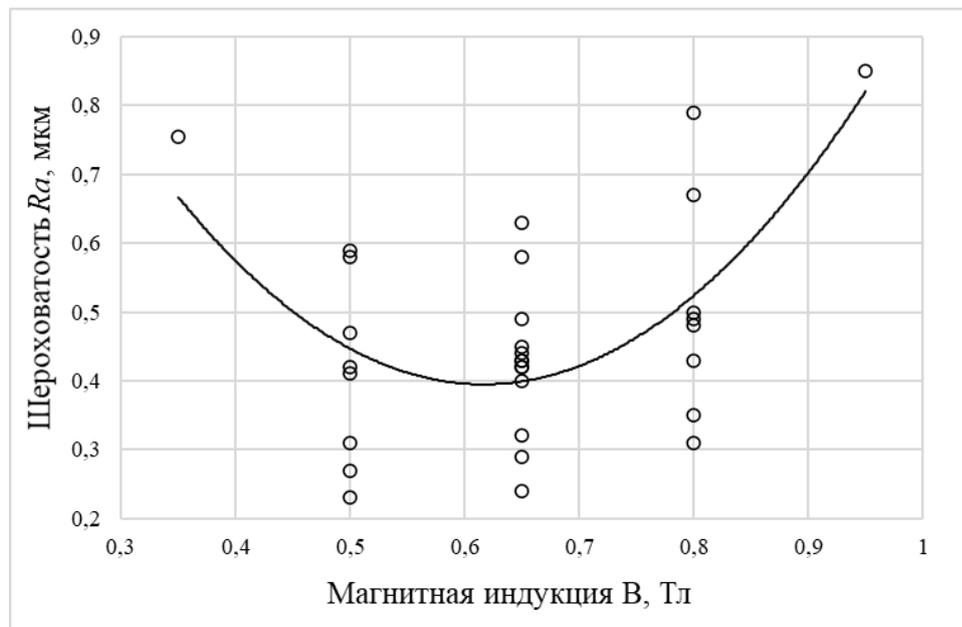


Рисунок 3.7 – График полиномиальной регрессии влияния магнитной индукции B , Тл на шероховатость поверхности Ra , мкм при магнитно-абразивной обработке плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц

Обобщающая полиномиальная функция (рисунок 3.8) влияния времени обработки t на шероховатость Ra плоских поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц показывает, что изменение времени обработки в диапазоне от 4 до 9,5 минут приводит к увеличению значений шероховатости поверхности от 0,33 мкм до 0,49 мкм, дальнейшее увеличение времени обработки до 12 минут сопровождается уменьшением значения шероховатости от 0,49 мкм до 0,46 мкм. Однако, по результатам проведенных предварительных экспериментов можно утверждать, что время обработки равное $t = 3$ мин не позволяет произвести обработку с обеспечением значения шероховатости $Ra < 0,33$ мкм. Магнитно-абразивная обработка с временем $t > 12$ мин не изучена в данном исследовании, однако, согласно тенденции распределения средних значений шероховатости, можно сделать вывод, что шероховатость продолжит снижаться, но значения и пределы не известны.

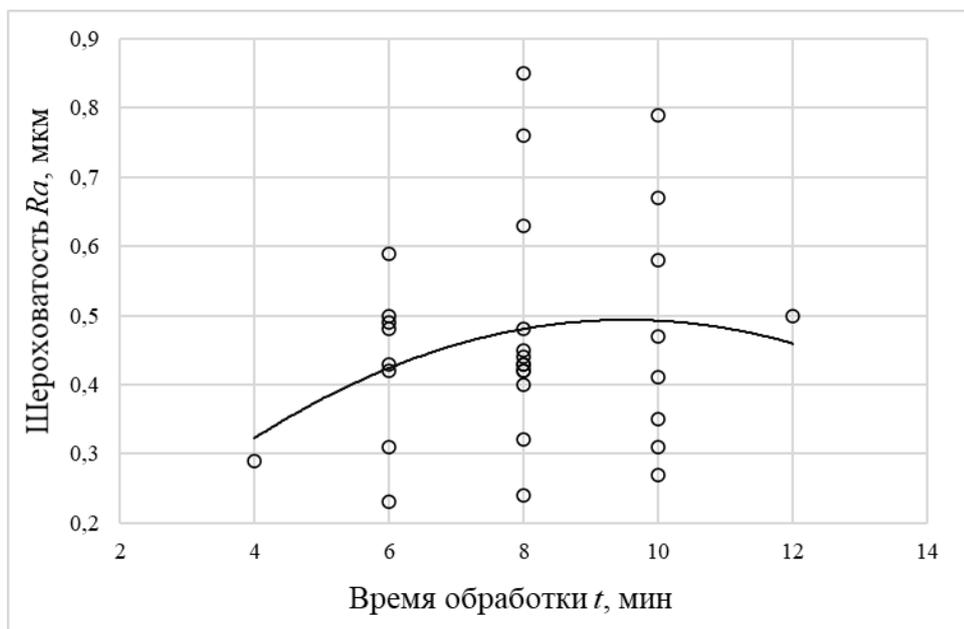


Рисунок 3.8 - График полиномиальной регрессии влияния времени обработки t , мин на шероховатость поверхности Ra , мкм при магнитно-абразивной обработке плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц

Обобщающая полиномиальная функция (рисунок 3.9) влияния частоты вращения n на шероховатость плоских поверхностей Ra из алюминиевого сплава марки АМц показывает, что изменение частоты вращения в диапазоне от 75 до 600 мин^{-1} сопровождается ухудшением шероховатости поверхности Ra от 0,43 мкм до 0,49 мкм, что представляет собой наименьший диапазон изменения шероховатости в зависимости от рассматриваемых факторов обработки. Данное утверждение позволяет сделать вывод о незначительном влиянии величины частоты вращения на процесс формирования шероховатости поверхности в сравнении с другими факторами обработки, что подтверждает также и статистическую обработку результатов экспериментов при анализе регрессионной модели.

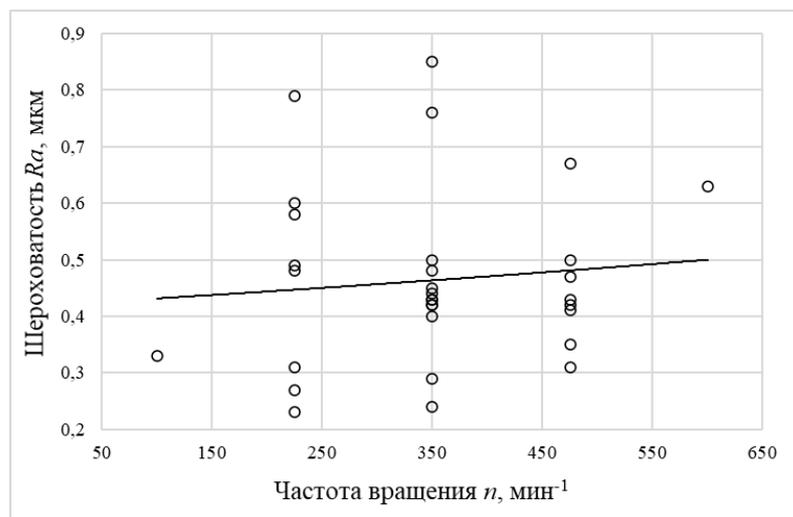


Рисунок 3.9 - График полиномиальной регрессии влияния частоты вращения n , мин⁻¹ на шероховатость поверхности Ra , мкм при магнитно-абразивной обработке плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц

Обобщающая полиномиальная функция (рисунок 3.10) влияния подачи заготовки S на шероховатость плоских поверхностей Ra из алюминиевого сплава марки АМц показывает, что изменение подачи в диапазоне от 25 до 225 мм/мин сопровождается улучшением шероховатости Ra от 0,59 мкм до 0,25 мкм. По результатам проведенных предварительных экспериментов можно сделать вывод о том, что дальнейшее увеличение подачи заготовки не приводит к уменьшению значения шероховатости, а наоборот способствует ее увеличению.

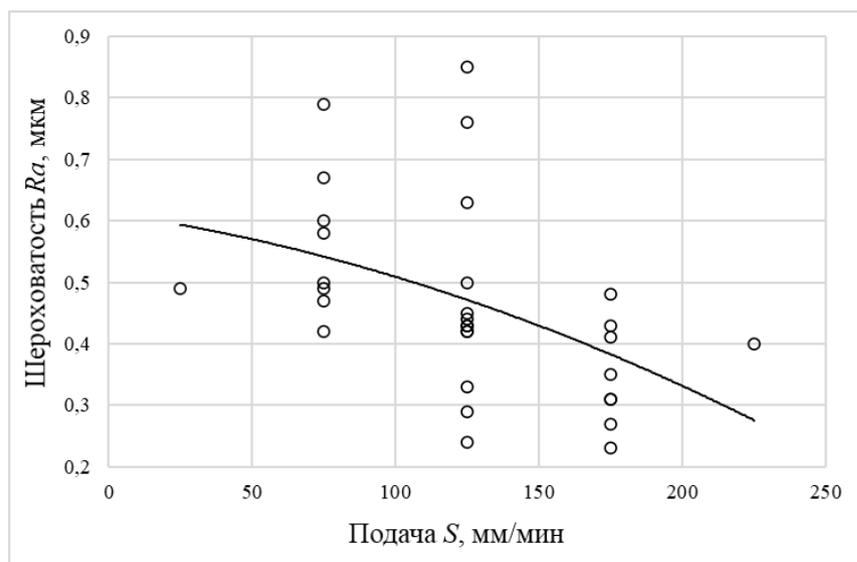


Рисунок 3.10 - График полиномиальной регрессии влияния скорости подачи заготовки S , мм/мин на шероховатость поверхности Ra , мкм при магнитно-абразивной обработке плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц

Анализ математической регрессионной модели и полиномиальных функций позволяет сделать вывод, что наибольшее влияние на процесс формирования шероховатости поверхностного слоя при обработке плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц оказывает скорость подачи заготовки S , второстепенную позицию занимает магнитная индукция B и затем время обработки t . Влияние чистоты вращения оказалось менее значимым, однако исключение данного параметра из процесса обработки невозможно.

Шероховатость боковой поверхности кромки плоского изделий из алюминиевого сплава марки АМц в исследуемом диапазоне технологических параметров ($B = 0,5-0,8$ Тл; $t = 6-10$ мин; $n = 225-475$ мин⁻¹; $S = 75-175$ мм/мин) варьируется в пределах $Ra = 0,233-0,847$ мкм. По итогам анализа результатов экспериментальных исследований можно выделить несколько режимных параметров, при которых обеспечивается наименьшая шероховатость поверхности: $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 475$ мин⁻¹, формируемая шероховатость поверхности $Ra = 0,31$ мкм; $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹, формируемая шероховатость поверхности $Ra = 0,23$ мкм; $B = 0,65$ Тл, $t = 4$ мин, $S = 125$ мм/мин, $n = 350$ мин⁻¹, формируемая шероховатость поверхности $Ra = 0,29$ мкм.

3.4 Влияние магнитно-абразивной обработки на удаление существующей и формирование новой оксидной пленки на поверхности кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц

Наличие оксидной пленки на поверхности изделий из алюминиевых сплавов защищает основной металл от коррозии и устраняет необходимость нанесения дополнительных специальных покрытий. Однако, при сварке алюминиевых сплавов наличие оксидной пленки на поверхности представляет существенную трудность в обеспечении качества сварного соединения. Оксидная пленка, имея температуру плавления много выше основного металла, остается в качестве неметаллических включений в корне шва, что является локальным концентратором напряжения и в последствие становится очагом разрушения [71,

73, 76]. Известно [34], что окисление поверхности алюминиевых изделий после обработки происходит мгновенно при контакте чистой поверхности с кислородом. Избежать процесса окисления возможно лишь в среде, где отсутствует кислород, например, вакуум. Изделия, кромки которых требуют предварительной зачистки перед сваркой, могут иметь различные типоразмеры, и создание вакуумной среды физически не представляется возможным в условиях реального производства. В связи с этим, требуется обеспечить такое состояние поверхности, при котором процесс окисления не будет катализироваться от химических или температурных воздействий на поверхность.

Толщина оксидной пленки на поверхности зависит от характера предшествующего воздействия. Сварка является заключительным этапом изготовления изделия, создавая неразъемное соединение. Операции сварки всегда предшествуют технологические операции по разделке кромок, если толщина свариваемых кромок больше 4 мм, либо предварительная резка и иные виды обработки. При прохождении технологического цикла на изделие оказываются воздействия различного рода, которые могут приводить к росту толщины оксидной пленки и формированию кристаллического оксида [104].

Известно [9, 23], что толщина оксидной пленки на поверхности изделия из алюминиевого сплава марки АМц может варьироваться от нескольких десятков нанометров до 0,1 мкм. Снижая шероховатость поверхности, уменьшается площадь окисления поверхности, тем самым снижая объем оксидной пленки. Однако, структура и толщина этой пленки зачастую неизвестна. Так, изучение влияния метода магнитно-абразивной обработки на обеспечение съема существующей оксидной пленки и формирование нового слоя представляет собой важную технологическую задачу.

Для определения толщины оксидной пленки на поверхности обрабатываемых заготовок, кромки которых предварительно подвергались механической резке, проводилась серия испытаний по методике, описанной в пункте 3.1. Толщина оксидной пленки на поверхности составила 100 нм.

Для определения обеспечения полного снятия существующей оксидной пленки с поверхности обрабатываемого изделия проводился анализ толщины снимаемого материала по результатам экспериментальных исследований. Определив по массе снимаемого материала ΔQ , можно установить толщину снятого слоя. Толщина снятого слоя считается равномерной по всей обрабатываемой поверхности (3.31) [60, 61]:

$$h = \Delta Q / \rho S, \quad (3.31)$$

где h - толщина снятого слоя, мм,

ΔQ - масса снятого слоя, мг,

ρ - плотность обрабатываемого материала, мг/мм³,

S – площадь обрабатываемой поверхности, мм².

Плотность алюминиевого сплава АМц равна $\rho = 2,73$ мг/мм³ [9, 14], площадь обрабатываемой поверхности пластины без учета площади закрепления составляет $S = 1686,75$ мм². Тогда, толщина снимаемого слоя в исследуемом диапазоне технологических параметров магнитно-абразивной обработки варьируется в диапазоне $h = 3-51$ мкм (экспериментальные значения по каждому опыту представлены в приложении Б, таблица Б.1).

Исследование влияния технологических параметров процесса магнитно-абразивной обработки производилось согласно методике, описанной в разделе 3.2. Расчеты выполнены согласно методике, описанной в разделе 3.3. Рассчитанные коэффициенты уравнения регрессии, дисперсия опыта, дисперсия коэффициентов, среднеквадратичная ошибка и доверительный интервал представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты расчетов коэффициентов регрессионного уравнения толщины снимаемого слоя

Коэффициент	Значение	Дисперсия опыта, S_y^2	Дисперсия коэффициента, S_b^2	Среднеквадратичная ошибка, S_b	Доверительный интервал
b_0	21,2	0,000047	0,24	0,49	1,2
b_1	7,35		0,07	0,26	0,648
b_2	6,68				
b_3	5,83				
b_4	-0,02				
b_{12}	2,14		0,105	0,324	0,794
b_{13}	2,5				
b_{14}	-0,35				
b_{23}	1,93				
b_{24}	0,16		0,059	0,242	0,594
b_{34}	-0,62				
b_{11}	-0,15				
b_{22}	1,65				
b_{33}	-0,15				
b_{44}	-0,04				

По результатам проведенных расчетов, оценки значимости коэффициентов из уравнения регрессии исключаются коэффициенты: b_4 , b_{14} , b_{24} , b_{34} , b_{11} , b_{33} , b_{44} . Подставляя коэффициенты в уравнение (3.2), получается уравнение регрессии (3.32):

$$y_h = 21,2 + 7,35x_1 + 6,68x_2 + 5,83x_3 + 2,14x_{12} + 2,5x_{13} + 1,93x_{23} + 1,65x_{22}. \quad (3.32)$$

Оценка адекватности модели проводилась по F-критерию Фишера (3.28). Расчетное значение критерия Фишера равняется $F_{\text{расч}} = 2,366$, табличное значение при $\alpha = 0,05$: $F_{\text{табл}} = 3,87$. Адекватность модели оценивается путем сравнения табличного и расчетного значений. Так как неравенство имеет вид: $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, можно утверждать об адекватности полученной математической модели для оценки толщины снимаемого слоя y_h .

Таблица 3.7 – Экспериментальные и расчетные значения отклика уравнения регрессии толщины снимаемого материала

№ опыта	$h_{эксп}$	$h_{расч}$	Δy_h^2	№ опыта	$h_{эксп}$	$h_{расч}$	Δy_h^2
1	47,56	49,28	2,95	13	26,71	28,77	4,24
2	24,54	25,30	0,57	14	14,33	14,78	0,20
3	26,49	27,78	1,64	15	16,07	14,98	1,19
4	13,90	12,37	2,33	16	9,99	9,57	0,18
5	26,93	28,77	3,39	17	35,61	35,90	0,08
6	15,85	14,78	1,15	18	3,26	6,51	10,59
7	15,64	14,98	0,43	19	42,56	41,15	2,01
8	9,34	9,57	0,05	20	10,64	14,43	14,37
9	51,68	49,28	5,80	21	29,53	32,86	11,08
10	25,19	25,30	0,01	22	9,34	9,55	0,05
11	29,32	27,78	2,38	23	21,93	21,21	0,53
12	15,64	12,37	10,64	24	17,81	21,21	11,56
Σ	-	-	-	-	-	-	87,42

После проверки модели (3.32) на адекватность производится ее раскодирование. Окончательная модель, позволяющая определить толщину снимаемого слоя (мкм) при магнитно-абразивной обработке в зависимости от величины магнитной индукции, времени обработки, частоты вращения и подачи, имеет вид (3.33), где переменные x_i представлены в кодированном масштабе и связаны с натуральными значениями соотношениями (3.5):

$$h = 61,03 - 54,7B - 10,6t - 0,1n + 7,13Bt + 0,13Bn + 0,008tn + 0,41t^2. \quad (3.33)$$

По результатам проведенных экспериментальных исследований составлены полиномиальные модели, позволяющие оценить влияние технологических параметров обработки магнитной индукции B , времени обработки t , частоты вращения n и подачи S заготовки на толщину снимаемого материала h . Математическое описание моделей представлено в таблице 3.8, а их графическая интерпретация на рисунках 3.11-3.14.

Таблица 3.8 - Обобщающие полиномиальные модели влияния технологических параметров на толщину снимаемого материала

Варьируемый параметр	Обобщающая полиномиальная модель
Магнитная индукция B , Тл	$h = -14,6 + 64,9 \cdot B - 12,28 \cdot B^2$
Время обработки t , мин	$h = 20,95 - 3,35 \cdot t + 0,42 \cdot t^2$
Частота вращения n , мин ⁻¹	$h = 3,9 + 0,06 \cdot n - 2 \cdot 10^{-5} \cdot n^2$
Подача S , мм/мин	$h = 21,38 + 0,015 \cdot S - 6 \cdot 10^{-5} \cdot S^2$

Анализ обобщающей полиномиальной функции (рисунок 3.11) влияния магнитной индукции B на толщину снимаемого материала при обработке плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц показывает, что в изучаемом диапазоне значений магнитной индукции от 0,35 до 0,95 Тл толщина снимаемого материала увеличивается с увеличением значений магнитной индукции. Величина магнитной индукции характеризует жесткость абразивной щетки, формируемой в рабочем пространстве, а также влияет на величину силы, приложенной к контактирующим с обрабатываемой поверхностью зернам. Произведенными экспериментальными исследованиями и статистическим анализом полученных результатов подтверждается гипотеза: чем выше жесткость абразивной щетки, тем грубее обработка, тем самым увеличивается толщина снимаемого материала.

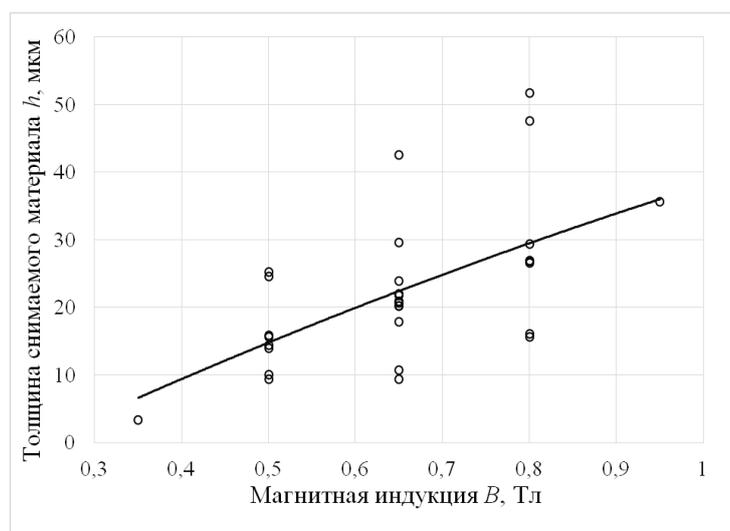


Рисунок 3.11 - График полиномиальной регрессии влияния магнитной индукции B , Тл на толщину снимаемого материала h , мкм при магнитно-абразивной обработке плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц

Обобщающая полиномиальная функция (рисунок 3.12) влияния времени обработки t на толщину снимаемого материала при обработке плоских поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц показывает, что с увеличением времени обработки в исследуемом диапазоне способствует увеличению толщины снимаемого материала. Согласно выявленной тенденции, можно отметить, что с увеличением времени выше 12 минут толщина снимаемого материала будет увеличиваться. Однако, известно [6], что производительность процесса является частной производной съема материала. С течением времени производительность обработки снижается. Объясняется это снижением режущей способности абразивного материала, смещением порошка в нерабочее пространство рабочего зазора, насыщением порошка вязкими компонентами смазочно-охлаждающей жидкости. Применение выбранного сочетания движений, схемы обработки и технологического инструмента говорит о том, что достичь требуемых качества поверхности возможно без уменьшения производительности процесса магнитно-абразивной обработки.

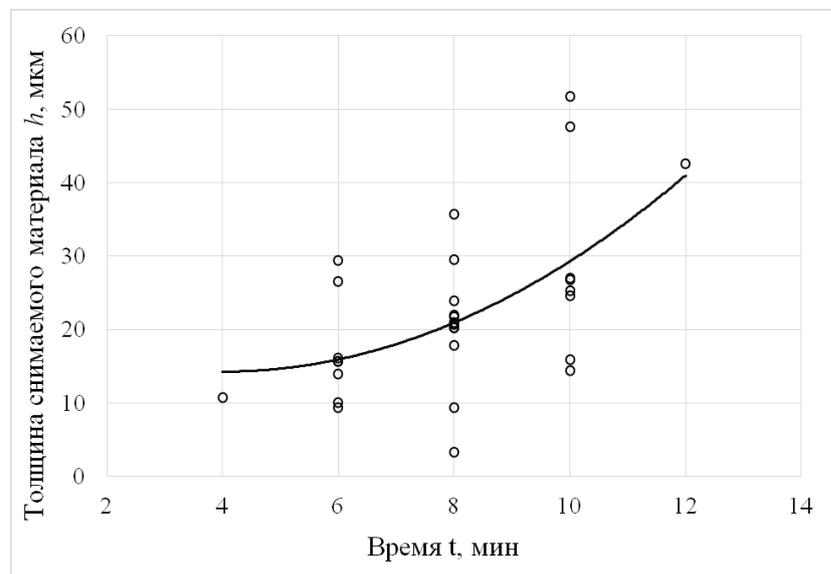


Рисунок 3.12 - График полиномиальной регрессии влияния времени обработки t , мин на толщину снимаемого материала h , мкм при магнитно-абразивной обработке плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц

Обобщающая полиномиальная функция (рисунок 3.13) влияния частоты вращения n на количество снимаемого материала при обработке плоских изделий

из алюминиевого сплава марки АМц показывает, что с увеличением частоты вращения количество снимаемого материала увеличивается. Частота вращения, выступающая в качестве главного движения резания в применяемой схеме магнитно-абразивной обработки, обеспечивает сьем металла. Наблюдается закономерный рост толщины снимаемого материала с увеличением частоты вращения.

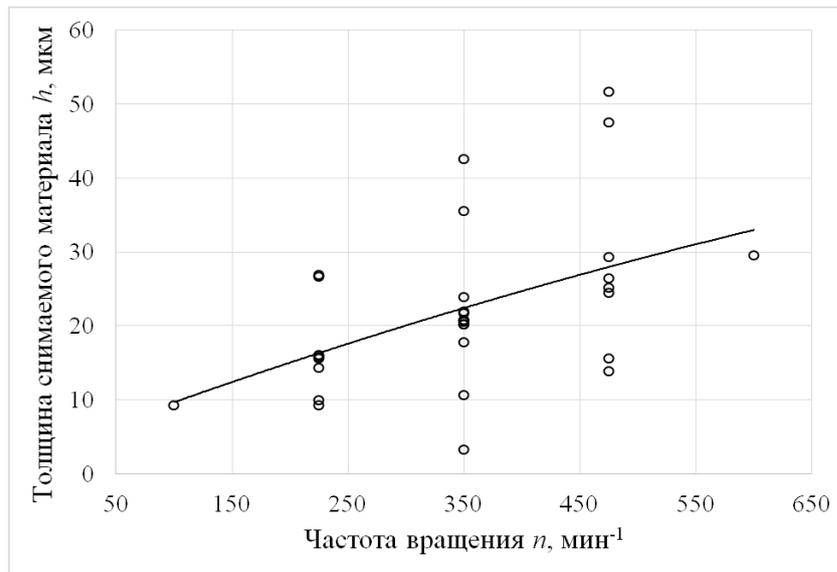


Рисунок 3.13 - График полиномиальной регрессии влияния частоты вращения n , мин⁻¹ на толщину снимаемого материала h , мкм при магнитно-абразивной обработке плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц

Обобщающая полиномиальная функция (рисунок 3.14) влияния подачи заготовки S на толщину снимаемого материала при обработке плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц показывает, что изменение подачи в исследуемом диапазоне от 25 до 225 мм/мин не влияет на толщину снимаемого материала. Данное утверждение позволяет сделать вывод о незначительном влиянии величины скорости подачи заготовки на процесс снятия материала с обрабатываемой поверхности в сравнении с другими факторами обработки, что подтверждает также и статистическую обработку результатов экспериментов при анализе регрессионной модели.

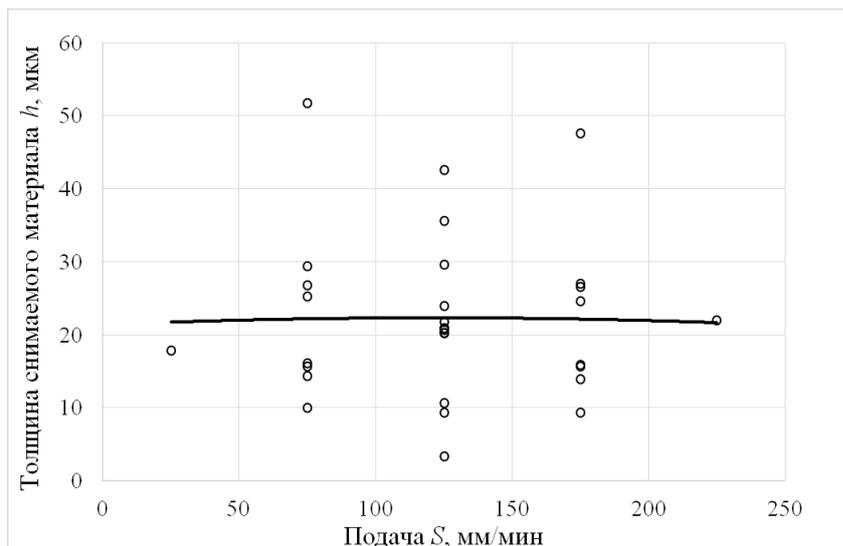


Рисунок 3.14 - График полиномиальной регрессии влияния скорости подачи заготовки S , мм/мин на толщину снимаемого материала h , мкм при магнитно-абразивной обработке плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц

Анализ математической регрессионной модели и полиномиальных функций позволяет сделать вывод, что наибольшее влияние на толщину снимаемого материала с поверхностей плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц при магнитно-абразивной обработке оказывает величина магнитной индукции B , второстепенную позицию, однако близкой к первой по значимости, занимает время обработки t и затем частота вращения заготовки n . Влияние скорости подачи заготовки вдоль полюсных наконечников S оказалось менее значимо, однако исключение данного технологического параметра из процесса обработки невозможно.

Толщина снимаемого материала в исследуемом диапазоне технологических параметров ($B = 0,5-0,8$ Тл; $t = 6-10$ мин; $n = 225-475$ мин⁻¹; $S = 75-175$ мм/мин) варьируется в пределах $h = 3-51$ мкм. По итогам анализа результатов экспериментальных исследований наименьший съём материала обеспечивается при технологических параметрах: $B = 0,35$ Тл, $t = 8$ мин, $n = 350$ мин⁻¹, $S = 125$ мм/мин; наибольший при значении технологических параметров: $B = 0,8$ Тл, $t = 10$ мин, $n = 475$ мин⁻¹, $S = 75$ мм/мин.

На основании расчета толщины снимаемого слоя в процессе магнитно-абразивной обработки можно сделать вывод, что оксидный слой,

находящийся на поверхности обработанного изделия, является вновь образованным при контакте обработанной поверхности с кислородом. Для определения толщины вновь образуемого оксидного слоя производились испытания по методике, описанной в пункте 3.1. Минимальная глубина внедрения составила 15 нм, максимальная глубина составила 1250 нм. На основании полученных данных установлено, что вновь образующийся оксидный слой не превышает толщины в 32 нм.

Таким образом, магнитно-абразивная обработка обеспечивает очистку поверхности от образованной оксидной пленки в ходе реализации технологических операций, предшествующих сварке, а также обеспечивает толщину возобновляемой пленки на обработанной поверхности, не превышающую 30 нм.

3.5 Влияние магнитно-абразивной обработки чистоту поверхности кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц

Нарушение целостности поверхностного слоя (наличие посторонних включений, загрязнений) кромок свариваемых изделий из алюминиевых сплавов может привести к возникновению дефектов в сварном соединении. Образование такого рода дефектов на поверхности изделия неразрывно связано с внешним воздействием на поверхность, природа которого в большинстве случаев не может быть установлена. Не исключается факт локального температурного воздействия на поверхность и как следствие образование оксидной пленки отличной по структуре и толщине от основной поверхности непосредственно в самом дефекте и в его области.

Стоит отметить, что магнитно-абразивная обработка характеризуется небольшими съемом металла, что может привести к вскрытию внутренних дефектов, которые также неблагоприятно влияют на качество сварного соединения.

Для комплексной оценки влияния технологических параметров магнитно-абразивной обработки на качество подготовки кромок перед сваркой, а также определения взаимосвязи между параметром шероховатости поверхности и толщиной снимаемого материала, необходимо произвести оценку чистоты и

состояния поверхности. Вследствие этого интересен вопрос формирования поверхности при различных режимах обработки в рамках исследуемого диапазона. В качестве образцов для сравнения особый интерес представляют заготовки, обработанные с режимными параметрами:

1. $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 475$ мин⁻¹, формируемая шероховатость поверхности $Ra = 0,31$ мкм, толщина снимаемого материала $h = 13,9$ мкм;

2. $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹, формируемая шероховатость поверхности $Ra = 0,23$ мкм, толщина снимаемого материала $h = 9,34$ мкм;

3. $B = 0,65$ Тл, $t = 4$ мин, $S = 125$ мм/мин, $n = 350$ мин⁻¹, формируемая шероховатость поверхности $Ra = 0,29$ мкм, толщина снимаемого материала $h = 10,64$ мкм;

4. $B = 0,8$ Тл, $t = 10$ мин, $S = 75$ мм/мин, $n = 475$ мин⁻¹, формируемая шероховатость поверхности $Ra = 0,67$ мкм, толщина снимаемого материала $h = 51,7$ мкм;

5. $B = 0,8$ Тл, $t = 10$ мин, $S = 75$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹, формируемая шероховатость поверхности $Ra = 0,79$ мкм, толщина снимаемого материала $h = 26,7$ мкм;

6. $B = 0,35$ Тл, $t = 8$ мин, $S = 125$ мм/мин, $n = 350$ мин⁻¹, формируемая шероховатость поверхности $Ra = 0,75$ мкм, толщина снимаемого материала $h = 3,26$ мкм;

7. $B = 0,65$ Тл, $t = 8$ мин, $S = 125$ мм/мин, $n = 350$ мин⁻¹, формируемая шероховатость поверхности $Ra = 0,41$ мкм, толщина снимаемого материала $h = 20$ мкм;

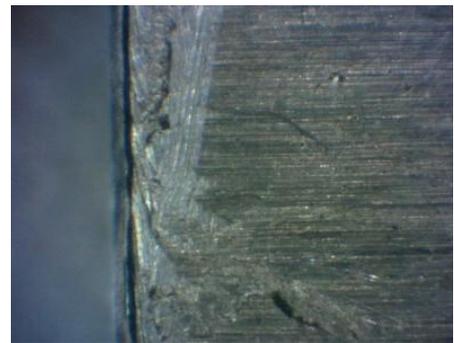
На рисунке 3.15 показаны фотографии необработанных кромок пластины из алюминиевого сплава марки АМц, предварительно подвергшейся механической резке по торцевой стороне. На представленных фотографиях можно наблюдать наиболее часто встречаемые дефекты кромок с торцевой и боковой сторон после механической резки в силу трудно обрабатываемости алюминия резанием. На

рисунках 3.16 – 3.21 представлены фотографии тех же поверхностей, но полученных после магнитно-абразивной обработки с разными режимными параметрами.

Анализируя фотографии поверхностей кромок после магнитно-абразивной обработки на режимных параметрах, обеспечивающих шероховатость поверхности в диапазоне $Ra = 0,23-0,31$ мкм с толщиной снимаемого материала в диапазоне $h = 9,34-13,9$ мкм, обеспечивает полное удаление дефектного слоя с поверхностей кромок, формируя поверхность со сравнительно небольшой площадью окисления.



а)



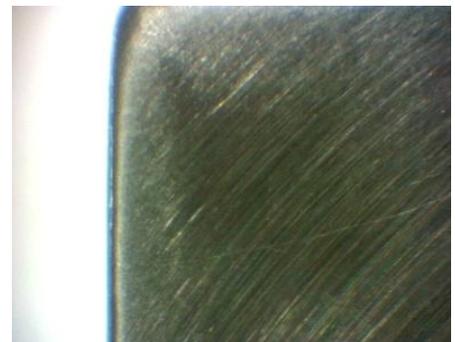
б)

Рисунок 3.15 – Поверхности кромок после механического резания:

а – торцевая поверхность; б – боковая поверхность



а)



б)

Рисунок 3.16 – Поверхности кромок после магнитно-абразивной обработки с технологическими параметрами: $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 475$ мин⁻¹: а – торцевая поверхность;

б – боковая поверхность

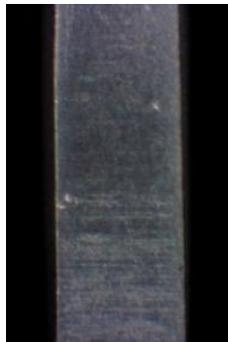


а)

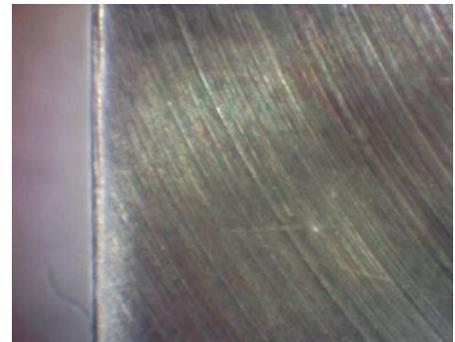


б)

Рисунок 3.17 – Поверхности кромок после магнитно-абразивной обработки с технологическими параметрами: $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹: а – торцевая поверхность; б – боковая поверхность



а)



б)

Рисунок 3.18 – Поверхности кромок после магнитно-абразивной обработки с технологическими параметрами: $B = 0,65$ Тл, $t = 4$ мин, $S = 125$ мм/мин, $n = 350$ мин⁻¹: а – торцевая поверхность; б – боковая поверхность

Значения магнитной индукции $B = 0,8$ Тл формируют наиболее жесткий, в рамках исследуемых диапазонов, абразивный инструмент, что приводит к вкраплениям абразива в поверхность заготовки, а также к деформированию геометрической формы кромки (рисунок 3.19). Толщина снимаемого материала при выбранных технологических параметрах больше, чем при магнитной индукции равной $B = 0,5$ Тл, и равняется $h = 26,7$ мкм, однако, удаляя полностью дефектный слой, формируется новый с технологической наследственностью от магнитно-абразивной обработки. Значения магнитной индукции $B = 0,35$ Тл формируют шероховатость поверхности $Ra = 0,75$ мкм, при этом толщина снимаемого материала равняется $h = 3,26$ мкм. На основании оптического контроля можно судить о недостаточной силе резания при данном значении индукции и

формируемой шероховатости за счет неполного удаления дефектного слоя с поверхности кромки (рисунок 3.20). При центральных значениях технологических факторов со значением магнитной индукции $B = 0,65$ Тл формируется шероховатость поверхности $Ra = 0,4$ мкм, толщина снимаемого материала ровняется примерно 20 мкм, что говорит о полном снятии дефектного слоя с поверхности обрабатываемых кромок. Однако, сочетание режимных параметров не позволяет сформировать поверхность с меньшей шероховатостью (рисунок 3.21).

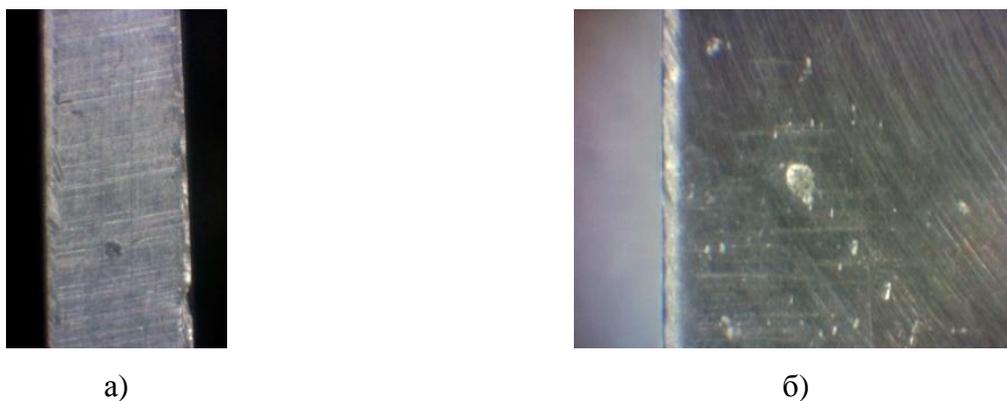


Рисунок 3.19 – Поверхности кромок после магнитно-абразивной обработки с технологическими параметрами: $B = 0,8$ Тл, $t = 10$ мин, $S = 75$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹: а – торцевая поверхность; б – боковая поверхность

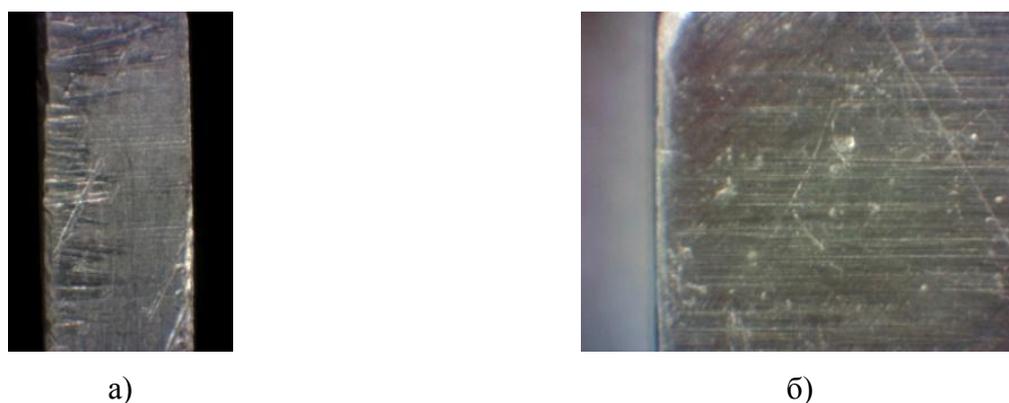


Рисунок 3.20 – Поверхности кромок после магнитно-абразивной обработки с технологическими параметрами: $B = 0,35$ Тл, $t = 8$ мин, $S = 125$ мм/мин, $n = 350$ мин⁻¹: а – торцевая поверхность; б – боковая поверхность

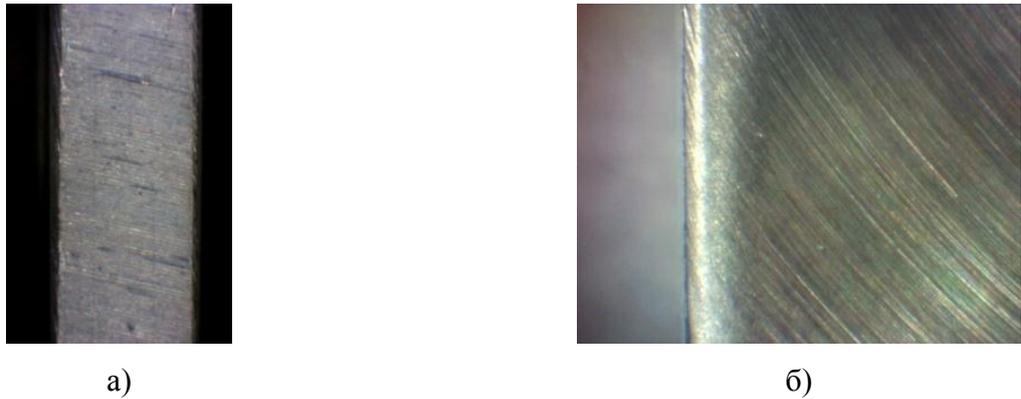


Рисунок 3.21 – Поверхности кромок после магнитно-абразивной обработки с технологическими параметрами: $B = 0,65$ Тл, $t = 8$ мин, $S = 125$ мм/мин, $n = 350$ мин⁻¹: а – торцевая поверхность; б – боковая поверхность

На основании оптического контроля можно сделать вывод о том, что толщины снимаемого материала от 9 до 14 мкм при обработке изделий из алюминиевого сплава марки АМц достаточно для полного удаления дефектного слоя. Толщина снимаемого материала в 3,26 мкм не обеспечивает полное удаление дефектного слоя с поверхности кромок, формируя поверхность с технологической наследственностью предшествующих обработок. Толщина снимаемого материала выше 20 мкм формируется при значениях магнитной индукции выше 0,65 Тл, что обеспечивает полный дефектный слой с поверхности изделия, однако за счет жесткости сформированного абразивного инструмента деформирует поверхность и не представляется возможным формирование поверхности с небольшой шероховатостью.

3.6 Влияние технологических факторов магнитно-абразивной обработки на производительность при обработке кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц

Производительность магнитно-абразивной обработки принято определять массой снятого материала, то есть путем взвешивания образца до и после обработки. Определение производительности обработки по измерению изменений геометрических параметров заготовки не нашло широкого распространения касательно процесса магнитно-абразивной обработки в связи с возможностью

возникновения больших погрешностей измерений из-за малой толщины снимаемого слоя ($10^{-3} \div 10^{-2}$ мм) и температурных деформаций заготовки.

Зачастую, точное взвешивание крупногабаритных изделий не представляется возможным, тогда целесообразно для наладки условий процесса обработки применять образцы схожие по геометрии и материалу. Для более удобной оценки производительности процесса магнитно-абразивной обработки вне зависимости от размеров заготовки применяется значение удельного съема материала q , мг/см² с единицы площади (формула 3.34):

$$q = \frac{Q}{S}, \quad (3.34)$$

где Q - масса снятого материала, мг;

S – площадь обрабатываемой поверхности, см².

Площадь обрабатываемой поверхности без учета площади закрепления $S = 16,87$ см². Тогда, удельный съем материала с единицы площади в исследуемом диапазоне технологических параметров магнитно-абразивной обработки варьируется в диапазоне $q = 0,0009-0,014$ мг/см². Экспериментальные значения удельного съема материала с единицы площади по каждому опыту представлены в приложении Б, таблица Б.2.

Исследование влияния технологических параметров процесса магнитно-абразивной обработки производилось согласно методике, описанной в разделе 3.2. Расчеты выполнены согласно методике, описанной в разделе 3.3. Рассчитанные коэффициенты уравнения регрессии, дисперсия опыта, дисперсия коэффициентов, среднеквадратичная ошибка и доверительный интервал представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 - Результаты расчетов уравнения регрессии удельного съема материала с единицы площади

Коэффициент	Значение	Дисперсия опыта, S_y^2	Дисперсия коэффициента, S_b^2	Среднеквадратичная ошибка, S_b	Доверительный интервал
b_0	0,006	1,25·10 ⁻⁷	0,000000018	0,00013	0,000328
b_1	0,002		0,000000005	0,000072	0,00018
b_2	0,002				
b_3	0,0016				
b_4	-0,000005		0,000000008	0,000088	0,000217
b_{12}	0,0006				
b_{13}	0,0007				
b_{14}	-0,000096				
b_{23}	0,0005		0,000000004	0,000066	0,000162
b_{24}	0,000044				
b_{34}	-0,00017				
b_{11}	-0,00004				
b_{22}	0,00045				
b_{33}	-0,00004				
b_{44}	-0,00001				

По результатам проведенных расчетов, оценки значимости коэффициентов из уравнения регрессии исключаются коэффициенты: b_4 , b_{14} , b_{24} , b_{34} , b_{11} , b_{33} , b_{44} . Подставляя коэффициенты в уравнение (3.2), получаем уравнение регрессии (3.35):

$$y_q = 0,006 + 0,002x_1 + 0,002x_2 + 0,0016x_3 + 0,0006x_{12} + 0,0007x_{13} + 0,0005x_{23} + 0,00045x_{22} . \quad (3.35)$$

Оценка адекватности модели проводилась по F-критерию Фишера (3.28). Расчетное значение критерия Фишера равняется $F_{\text{расч}} = 2,366$, табличное значение при $\alpha = 0,05$: $F_{\text{табл}} = 3,87$. Адекватность модели оценивается путем сравнения табличного и расчетного значений. Так как неравенство имеет вид: $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, можно утверждать об адекватности полученной математической модели для оценки удельного съема материала с единицы площади y_q .

Таблица 3.10 – Экспериментальные и расчетные значения отклика уравнения регрессии количества снимаемого материала с единицы площади

№ опыта	$q_{\text{эксп}}$	$q_{\text{расч}}$	Δy_q^2	№ опыта	$q_{\text{эксп}}$	$q_{\text{расч}}$	Δy_q^2
1	0,01298	0,01345223	$2,2 \cdot 10^{-7}$	13	0,00729	0,007854424	$3,16 \cdot 10^{-7}$
2	0,0067	0,00690579	$4,26 \cdot 10^{-8}$	14	0,00391	0,004035122	$1,49 \cdot 10^{-8}$
3	0,00723	0,00758266	$1,22 \cdot 10^{-7}$	15	0,00439	0,004089496	$8,86 \cdot 10^{-8}$
4	0,00379	0,003378	$1,73 \cdot 10^{-7}$	16	0,00273	0,002611976	$1,33 \cdot 10^{-8}$
5	0,00735	0,00785442	$2,53 \cdot 10^{-7}$	17	0,00972	0,009801504	$6,19 \cdot 10^{-9}$
6	0,00433	0,00403512	$8,57 \cdot 10^{-8}$	18	0,00089	0,001777543	$7,89 \cdot 10^{-7}$
7	0,00427	0,0040895	$3,2 \cdot 10^{-8}$	19	0,01162	0,011232635	$1,5 \cdot 10^{-7}$
8	0,00255	0,00261198	$3,93 \cdot 10^{-9}$	20	0,0029	0,003939922	$1,07 \cdot 10^{-6}$
9	0,01411	0,01345223	$4,33 \cdot 10^{-7}$	21	0,00806	0,008971439	$8,26 \cdot 10^{-7}$
10	0,00688	0,00690579	$8,21 \cdot 10^{-10}$	22	0,00255	0,002607608	$3,4 \cdot 10^{-9}$
11	0,008	0,00758266	$1,77 \cdot 10^{-7}$	23	0,00599	0,005789524	$3,93 \cdot 10^{-8}$
12	0,00427	0,00337800	$7,93 \cdot 10^{-7}$	24	0,00486	0,005789524	$8,6 \cdot 10^{-7}$
Σ	-	-	-	-	-	-	$6,5 \cdot 10^{-6}$

После проверки модели (3.35) на адекватность производится ее раскодирование. Окончательная модель, позволяющая определить удельный съем материала с единицы площади при магнитно-абразивной обработке в зависимости от величины магнитной индукции, времени обработки, частоты вращения и подачи, имеет вид (3.36), где переменные x_i представлены в кодированном масштабе и связаны с натуральными значениями соотношениями (3.5):

$$q = 0,016 - 0,016B - 0,0028t - 0,000027n + 0,002Bt + 0,000037Bn + 0,000002tn + 0,000112t^2 . \quad (3.36)$$

Анализ математической регрессионной модели позволяет сделать вывод, что наибольшее влияние на удельный съем материала с поверхностей плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц при магнитно-абразивной обработки оказывает величина магнитной индукции B , второстепенную позицию, однако близкой к первой по значимости, занимает время обработки t и затем частота вращения заготовки n . Влияние скорости подачи заготовки вдоль полюсных

наконечников S оказалось менее значимо, однако исключение данного технологического параметра из процесса обработки невозможно.

Удельный съём материала с единицы площади в исследуемом диапазоне технологических параметров ($B = 0,5-0,8$ Тл; $t = 6-10$ мин; $n = 225-475$ мин⁻¹; $S = 75-175$ мм/мин) варьируется в пределах $q = 0,9-14 \cdot 10^{-3}$ мг/см². По итогам анализа результатов экспериментальных исследований наименьший съём материала обеспечивается при технологических параметрах: $B = 0,35$ Тл, $t = 8$ мин, $n = 350$ мин⁻¹, $S = 125$ мм/мин; наибольший при значении технологических параметров: $B = 0,8$ Тл, $t = 10$ мин, $n = 475$ мин⁻¹, $S = 75$ мм/мин.

3.7 Выводы по третьей главе

1. Получены регрессионные математические зависимости, позволяющие определить шероховатость поверхности, толщину снимаемого материала и удельный съём материала с единицы площади при магнитно-абразивной обработке кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц от технологических факторов магнитно абразивной обработки: магнитная индукция B , Тл; время обработки t , мин; частота вращения заготовки n , мин⁻¹; скорость подачи заготовки S , мм/мин.

2. По результатам анализа проведенных экспериментальных исследований получены полиномиальные модели, позволяющие оценить влияние каждого технологического фактора на шероховатость поверхности, толщину снимаемого материала и удельный съём материала с единицы площади в отдельности при магнитно-абразивной обработке кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц.

3. Установлено, что на шероховатость поверхности наибольшее влияние оказывает скорость подачи заготовки S , второстепенную позицию занимает магнитная индукция B и затем время обработки t ; на толщину снимаемого материала и удельный съём материала с единицы площади наибольшее влияние оказывает величина магнитной индукции B , второстепенную позицию, однако

близкой к первой по значимости, занимает время обработки t и затем частота вращения заготовки n .

4. Экспериментально установлено, что процесс магнитно-абразивной обработки позволяет полностью удалить имеющийся оксидный слой с поверхности обрабатываемого изделия, а также обеспечить формирование нового, толщина которого не превышает 30 нм.

5. В исследуемом диапазоне технологических параметров процесса магнитно-абразивной обработки кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц шероховатость поверхности формируется в диапазоне $Ra = 0,23-0,85$ мкм, толщина снимаемого материала варьируется в диапазоне $h = 3-51$ мкм, удельный съем материала с единицы площади в диапазоне $q = 0,9-14 \cdot 10^{-3}$ мг/см².

6. По результатам оптического контроля и анализа взаимосвязи шероховатости поверхности и толщины снимаемого материала установлено, что толщина снимаемого материала в диапазоне $h = 9-14$ мкм позволяет обеспечить полное удаление дефектного слоя с обрабатываемой поверхности изделия из алюминиевого сплава марки АМц.

ГЛАВА 4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА КРОМОК ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ АМц ПЕРЕД СВАРКОЙ ПОСРЕДСТВОМ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Сварка представляет собой процесс формирования неразъемного соединения изделий. Процесс сварки изделий из алюминиевых сплавов является трудоемким процессом, требующим обязательной подготовки кромок изделий. Подготовительные операции проводятся с целью удаления загрязнений с поверхностей свариваемых кромок и удаления оксидной пленки. Наличие оксидной пленки на поверхности изделия является основным, негативно влияющим фактором на формирование качественного сварного соединения. Имея большую температуру плавления, а также являясь более плотной, нежели основной металл, оксидная пленка остается в сварном шве в качестве неметаллического включения, является локальным концентратором напряжений и местом начала разрушения сварного соединения [13, 22, 33, 35].

В связи с тем, что оксидная пленка увеличивается при повышении температуры, для ее удаления и предотвращения быстрого повторного образования необходимо применять методы обработки с низкими температурами резания. Для обеспечения высокого качества сварного соединения, его долговечности и предотвращения дефектов шва необходимо обеспечить качественную предварительную обработку кромок перед сваркой. Традиционными методами подготовки являются: механическое и химическое удаление оксидной пленки и загрязнений. Последний способ находит все меньшее применение, так как поверхностный слой заготовки остается химически активным, что негативно влияет на процесс сваривания, а также требует наличия сложного оборудования. Механические способы подготовки формируют высокую шероховатость поверхности и оказывают воздействия высоких температур, что напротив приводит к активизации роста оксидной пленки [77, 78].

Применение метода магнитно-абразивной обработки позволяет уменьшить шероховатость поверхности кромок в 6-8 раз, обеспечивая сохранение геометрической формы, а также обеспечивает полное снятие существующей

оксидной пленки с поверхностями кромки. Снижение шероховатости обеспечивает значительное уменьшение площади окисления, тем самым уменьшая объем оксидной пленки, который потенциально может оставаться в корне сварного шва.

В данной работе особое внимание уделяется состоянию подготовленных поверхностей кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц. На основании проведенных комплексных исследований влияния магнитно-абразивной обработки на формирование качества кромок требуется проведение исследований по установлению зависимостей сформированной шероховатости на дефектность и прочность сварного соединения.

4.1 Методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования влияния состояния подготовки поверхностей кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц методом магнитно-абразивной обработки проводились в промышленных условиях. Целью проводимых исследований являлось изучение дефектности и прочности сварных соединений с предварительно подготовленными кромками ручным абразивным инструментом и, магнитно-абразивной обработкой с обеспечением шероховатости поверхности $Ra = 0,79$ мкм и $Ra = 0,23$ мкм для определения влияния шероховатости и чистоты поверхности кромок.

Для проведения испытаний были отобраны образцы с размерными параметрами 30x30x2 мм из алюминиевого сплава марки АМц и распределены на серии. Всего использовали 3 серии образцов, сваренных попарно внутри серии. В первой серии подготовку кромок осуществляли ручным абразивным инструментом, во второй серии посредством магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами $B = 0,8$ Тл, $t = 10$ мин, $S = 75$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹ и обеспечением шероховатости поверхности $Ra = 0,79$ мкм, в третьей серии посредством магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹ и обеспечением шероховатости поверхности $Ra = 0,23$ мкм.

Сварку производили на сварочном аппарате Транс ТИГ 500 (рисунок 4.1) ручной дуговой сваркой в среде инертного газа аргон неплавящимся электродом с переменным током 50 А.



Рисунок 4.1 – Сварочный аппарат Транс ТИГ 500

Для оценки дефектности сварного соединения из образцов каждой серии выполнены шлифы, на которых проводили макро- и микроанализ. Анализ проводили на поляризационном микроскопе Leica DM2700P (рисунок 4.2) с использованием окуляров с увеличивающей способностью $\times 10$ для макроанализа и $\times 100$ для микроанализа. Для выявления микроструктуры микрошлифы подвергали химическому травлению в 5% растворе плавиковой кислоты [58].



Рисунок 4.2 - Поляризационный микроскоп Leica DM2700P

Проверку сварных соединений на прочность проводили на универсальной испытательной машине ZwickRoell Z100 (рисунок 4.3) с предварительной нагрузкой 0,5 МПа и скоростью нагружения 5 Н/мм²·с. Механические испытания образцов проводили при нормальной температуре. Крепление заготовок в рабочем пространстве испытательной машины производилось посредством губок (рисунок 4.4). Определение механических свойств сварного соединения производили в соответствии с ГОСТ 57180-2016 [16] и ГОСТ 6996-66 [17].



Рисунок 4.3 – Универсальная испытательная машина ZwickRoell Z100

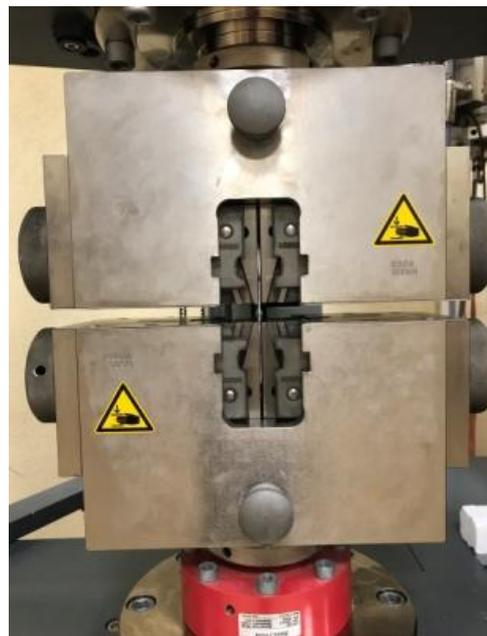


Рисунок 4.4 – Закрепление исследуемых образцов в тисках испытательной машины ZwickRoell Z100

4.2 Оценка дефектности сварных соединений с различным способом подготовки кромок перед сваркой

4.2.1 Анализ макроструктуры сварных швов

Анализ макроструктуры сварных соединений позволяет оценить наличие наружных и внутренних дефектов сварного соединения, имеющих крупные размеры, вызванные наличием посторонних включений и загрязнений на поверхности свариваемых кромок, а также нарушениями процесса сварки. По результатам макроанализа можно оценить такие дефекты как непровары, трещины

и раковины, а также неоднородность металла шва, поверхностные трещины [24, 49, 75].

Анализ макроструктуры сварного соединения, кромки которого были подготовлены с использованием ручного абразивного инструмента, показал, что в корне шва присутствуют металлические включения большой величины (рисунок 4.5) на стыке кромки изделия и сварного шва. Данные включения могут быть остатками абразивных зерен после зачистки поверхности кромки. Непосредственно рядом с включениями наблюдается предположительно скопление пор, которые могут образовываться вблизи инородного включения [58, 75].

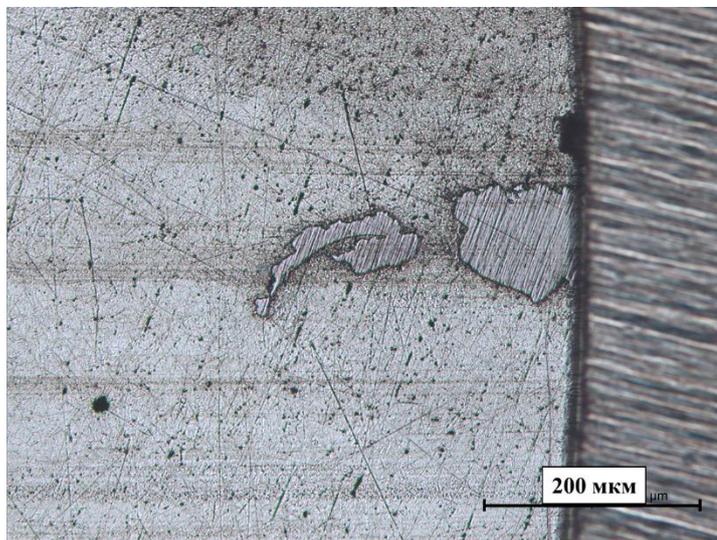


Рисунок 4.5 – Фотография макроструктуры сварного соединения, кромки которого предварительно подготовлены ручным абразивным инструментом

Сравнение макроструктуры материала шва изделий, кромки которого подготовлены предварительно с использованием ручного абразивного инструмента и с применением метода магнитно-абразивной обработки, показало, что в сравнении с первым образцом, структура шва имеет более целостный характер, отсутствуют крупногабаритные включения. Однако, при сравнении макроструктуры шва, кромки которого подготовлены магнитно-абразивным способом с режимными параметрами $B = 0,8$ Тл, $t = 10$ мин, $S = 75$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹ и обеспечением шероховатости $Ra = 0,79$ мкм, и шва, кромки которого подготовлены магнитно-абразивным способом с режимными

параметрами $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹ и обеспечением шероховатости $Ra = 0,23$ мкм, выявлено, что структура первого визуально имеет неоднородность, а также присутствуют дефекты сварного соединения (рисунок 4.6). В металле шва второго наблюдается значительно меньшее количество предположительно пор или включений, что обеспечивает явное превосходство сплошности шва в сравнении с другими образцами (рисунок 4.7).

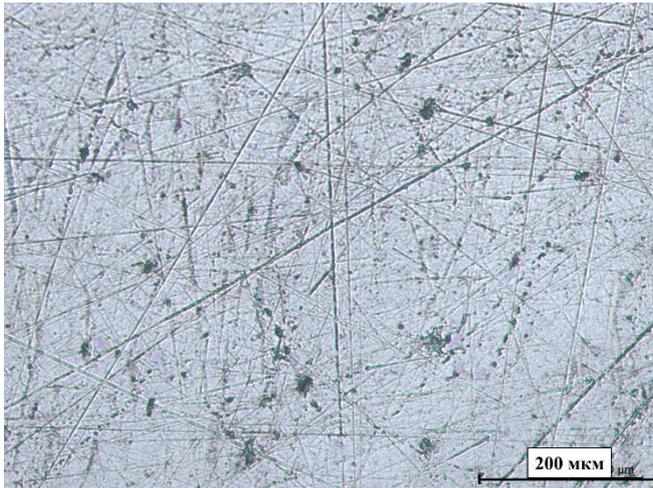


Рисунок 4.6 – Фотография макроструктуры сварного соединения, кромки которого предварительно подготовлены методом магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами: $B = 0,8$ Тл, $t = 10$ мин, $S = 75$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹

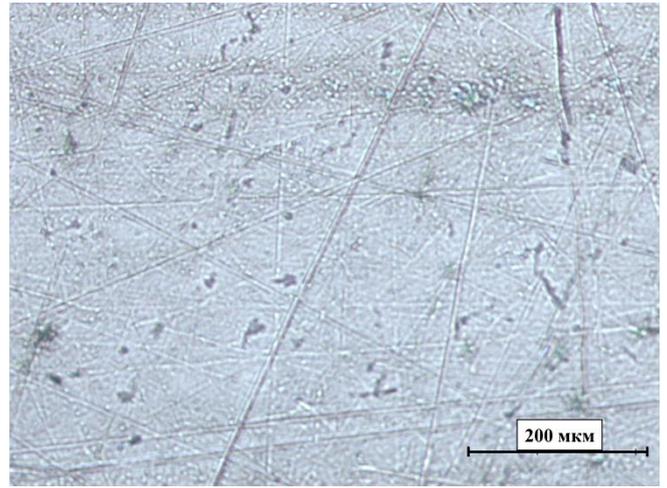


Рисунок 4.7 – Фотография макроструктуры сварного соединения, кромки которого предварительно подготовлены методом магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами: $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹

Макроанализ шлифов показал, что при подготовке кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц с применением ручного абразивного инструмента в структуре металла шва обнаруживаются посторонние металлические включения, поры, а также наблюдается несплошность сварного соединения. При подготовке кромок с применением метода магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами $B = 0,8$ Тл, $t = 10$ мин, $S = 75$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹ и обеспечением шероховатости $Ra = 0,79$ мкм в сварном соединении не обнаружено посторонних включений больших размеров, однако наблюдается несплошность в связи с наличием предположительно пор или неметаллических включений. При подготовке кромок с применением метода магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹ и

обеспечением шероховатости $Ra = 0,23$ мкм сварное соединение имеет однородную структуру с небольшим количеством предположительно посторонних включений, однако точно установить не представляется возможным на данном этапе исследования. Для точного определения характера вкраплений необходимо провести анализ с использованием более тонких методов контроля.

4.2.2 Анализ микроструктуры сварных швов

Для более точной оценки структуры металла шва, а также для выявления более малых посторонних включений, например, оксидной пленки, проводится микроанализ шлифов сварных соединений. Микроанализ позволяет выявить микропоры, микротрещины, образующиеся в металле шва. Образование сосредоточенной микропористости в сварном соединении может быть вызвано наличием оксидной пленки, не удаленной с поверхности кромки перед сваркой, и внедренной в состав шва в ходе сварки. Более высокая температура плавления и наличие гидратированной оксидной пленки вызывает появление вблизи нее пор [58], причем чем больше толщина внедренной оксидной пленки, тем выше риск возникновения вблизи нее микропор и микротрещин.

Известно [54, 58, 64], что оксидные пленки могут располагаться в металле шва в различных конфигурациях и формах. Зачастую они располагаются вдоль металла шва в корневой его части, имея форму от протяженной волосовидной до закрученной сосредоточенной.

Фотографии микроструктуры сварных соединений, кромки которых предварительно подготовлены с использованием ручного абразивного инструмента и применением метода магнитно-абразивной обработки, представлены на рисунках 4.8-4.10.

При проведении анализа микроструктуры сварного соединения (рисунок 4.8), кромки которого были предварительно подготовлены при помощи ручного абразивного инструмента, в корне шва обнаружены включения оксидной пленки, которая имеет замкнутую форму, окаймляющую основной материал или дефект, либо имеет расположение непосредственно ближе к кромке изделия. Также

обнаружены значительные дефекты сварного соединения в виде посторонних включений.

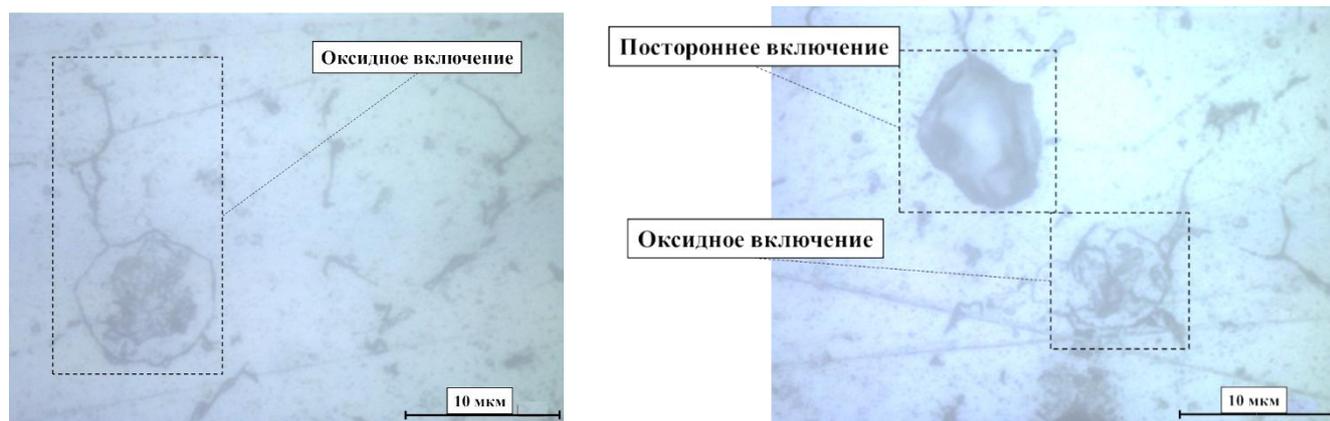


Рисунок 4.8 - Фотографии микроструктуры сварного соединения, кромки которого предварительно подготовлены ручным абразивным инструментом

Микроструктура сварных швов изделий, кромки которых подготовлены с применением способа магнитно-абразивной обработки отличается равномерностью. Также на микрошлифах не обнаружено посторонних включений больших размеров в корне шва. В микроструктуре сварного соединения образца, кромки которого подготовлены магнитно-абразивным способом с режимными параметрами $B = 0,8$ Тл, $t = 10$ мин, $S = 75$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹ и обеспечением шероховатости $Ra = 0,79$ мкм (рисунок 4.9) наблюдаются включения оксидной пленки, однако ее форма и размеры значительно меньше, чем на первом исследуемом образце. Также в непосредственной близости от включения оксидной пленки наблюдается скопление микропор.

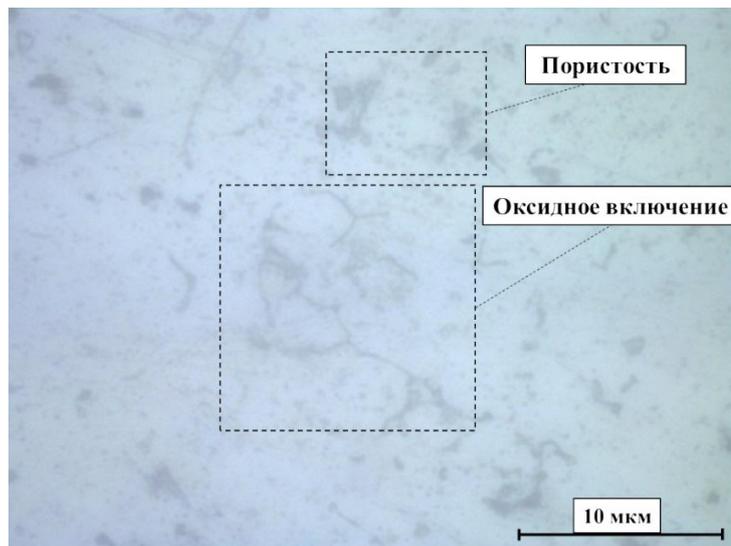


Рисунок 4.9 – Фотография микроструктуры сварного соединения, кромки которого предварительно подготовлены способом магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами: $B = 0,8$ Тл, $t = 10$ мин, $S = 75$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹

Анализ микроструктуры сварного соединения образца, кромки которого подготовлены магнитно-абразивным способом с режимными параметрами $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹, обеспечивающими шероховатость $Ra = 0,23$ мкм (рисунок 4.10), показал отсутствие вкраплений оксидной пленки по всей длине поперечного сечения шва, а также наиболее однородную структуру из всех исследуемых образцов.

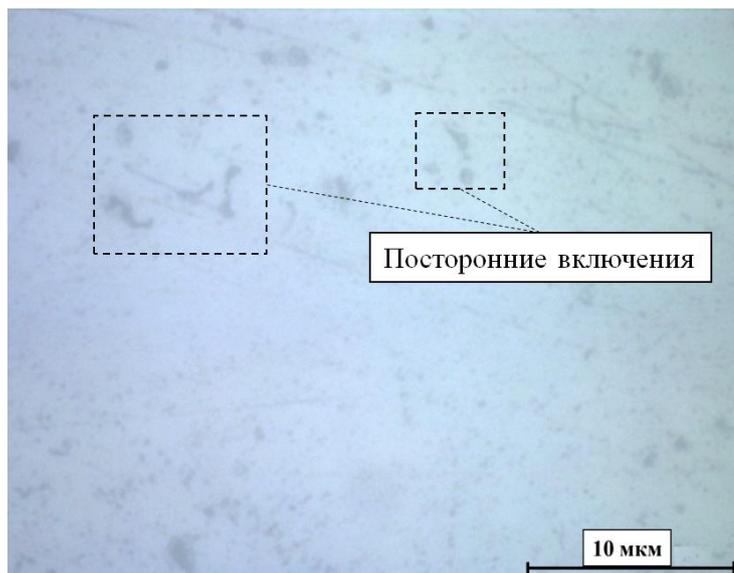


Рисунок 4.10 - Фотография микроструктуры сварного соединения, кромки которого предварительно подготовлены способом магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами: $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹

На основании проведенного макро и макроанализа можно сделать вывод, что способ подготовки кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц и шероховатость сформированной в процессе подготовки поверхности оказывают существенное влияние на однородность сварного соединения, а также на размер дефектов и посторонних включений в корне шва. Так, подготовка кромок изделий с использованием ручного абразивного инструмента может приводить к появлению посторонних включений в виде абразивных зерен, а также повышенной пористости и существенных оксидных включений. Все вышеперечисленные дефекты являются локальными концентраторами напряжений и приводят к разрушению сварных соединений под нагрузкой или в коррозионной среде. Сварные соединения образцов, кромки которых были подготовлены с применением способа магнитно-абразивной обработки при проведении макро и микроанализа показали большую сплошность металла шва, а также сравнительно меньшее количество посторонних включений в корне шва. При этом, при обеспечении шероховатости поверхности кромок равной $Ra = 0,23$ мкм, наблюдается наиболее однородная структура, а также отсутствие включений оксидной пленки в сварном шве.

4.3 Оценка прочности сварных соединений с различным способом подготовки кромок перед сваркой

Прочность сварного соединения характеризуется величиной фактических напряжений, которые возникают в соединении под действием на него усилий. Под прочностью подразумевают способность сварного соединения воспринимать определенные нагрузки не подвергаясь разрушению. Пределом прочности считается такой показатель нагрузки, при котором начинает происходить деформация образца [45]. Значительное влияние на прочность сварного соединения оказывают внутренние дефекты, такие как трещины, поры, оксидные включения, образованные в связи с некорректным подбором режимов сварки, некачественной подготовки кромок. При проведении конструкторских расчетов изделий, где присутствуют сварные соединения, основным показателем при расчете допустимых напряжений является показатель предела прочности [11, 22].

Целью проведения испытаний сварных образцов на разрыв было установление влияния способа подготовки кромок изделий перед сваркой, а также качества подготовленной поверхности на прочностные характеристики образуемого соединения. Испытания проводились трех серий образцов, указанных в пункте 4.1. Обобщающие результаты диаграмм растяжения по каждой серии представлены на рисунках 4.11-4.13. Образцы, имеющие трещины в корне сварного соединения из испытаний исключались.

На рисунке 4.11 представлена характерная диаграмма растяжения серии образцов, кромки которых были подготовлены с применением ручного абразивного инструмента. Результаты экспериментальных исследований показали, что сопротивление сварного соединения разрушению происходит до значений деформации около 60%. В дальнейшем наблюдается разрыв образца по сварному соединению. Анализ разрушенных образцов показал, что разрушение в большинстве случаев происходило по месту дефекта, либо со стороны сварного соединения, ближе к которому находился дефект или концентратор напряжения. Предел прочности сварных соединений составил в среднем $\sigma = 90$ МПа.

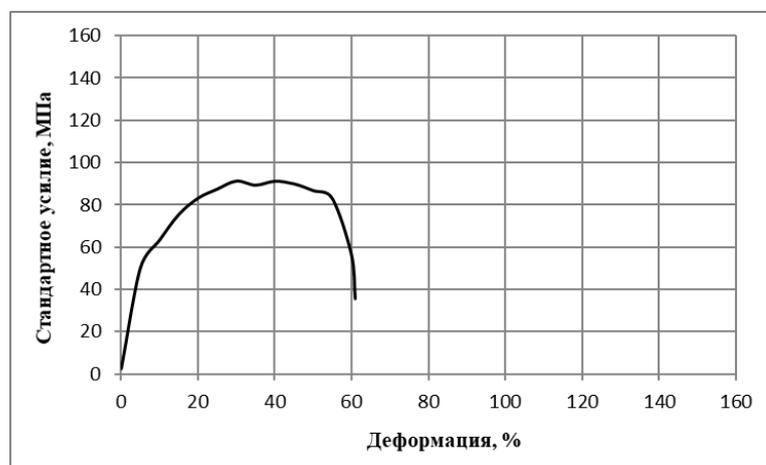


Рисунок 4.11 – Диаграмма растяжения серии образцов, кромки которых подготовлены ручным абразивным инструментом

Диаграмма растяжения серии образцов, кромки которых подготовлены способом магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами: $B = 0,8$ Тл, $t = 10$ мин, $S = 75$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹, обеспечивающими шероховатость поверхности $Ra = 0,79$ мкм, представленная на рисунке 4.12, и иллюстрирует, что

предел прочности сварного соединения в среднем составил $\sigma = 100$ МПа, однако пластическая деформация возрастает до значений 100%, что в 1,6 раз больше по сравнению с первой серией образцов. Можно сделать вывод, что наличие крупных дефектов в сварном соединении, а также наличие посторонних включений большей величины способствует преждевременному разрушению сварного соединения при схожей нагрузке.

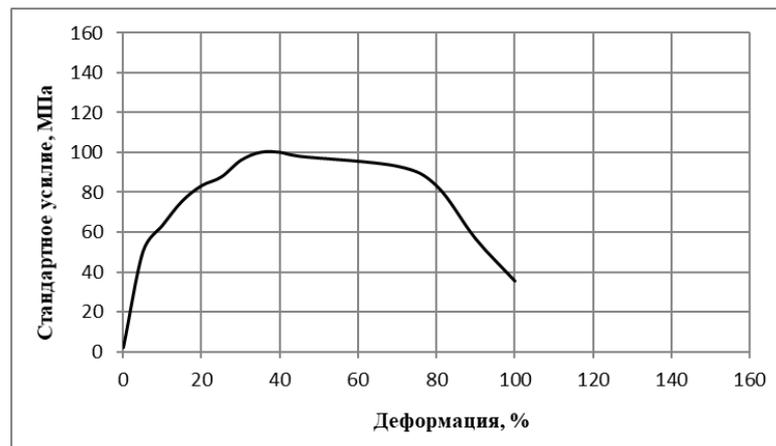


Рисунок 4.12 – Диаграмма растяжения серии образцов, кромки которых подготовлены способом магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами: $B = 0,8$ Тл, $t = 10$ мин,

$$S = 75 \text{ мм/мин}, n = 225 \text{ мин}^{-1}$$

Результаты экспериментальных исследований растяжения серии образцов, кромки которых предварительно подготовлены способом магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами: $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 225 \text{ мин}^{-1}$ и обеспечением шероховатости поверхности $Ra = 0,23$ мкм, представлены в виде диаграммы растяжения на рисунке 4.13. Согласно полученным данным средний предел прочности серии образцов составил $\sigma = 45$ МПа. Пластическая деформация сварного соединения превышает 120%. Стоит отметить, что при проведении испытаний значительная часть образцов разрушалась по месту основного металла, при этом сварное соединение не испытывало видимых деформаций.

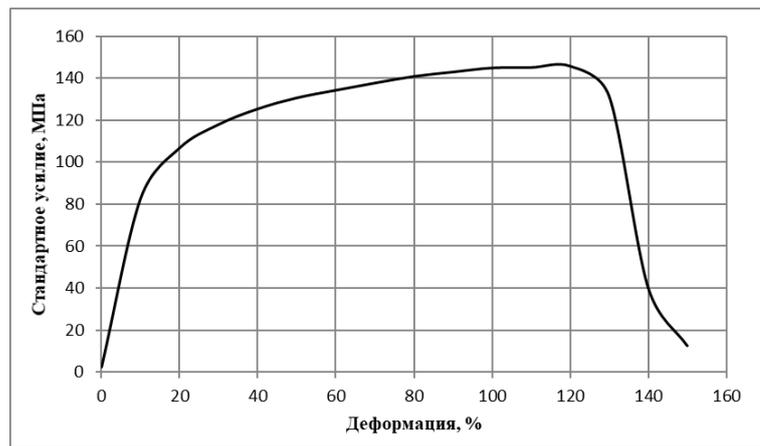


Рисунок 4.13 – Диаграмма растяжения серии образцов, кромки которых предварительно подготовлены способом магнитно-абразивной обработки с режимными параметрами: $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹

Работа разрушения, которую можно оценить по площади внутри кривой разрушения (формула 4.1) характеризует способность материала сопротивляться разрушению.

$$A_{\text{разр}} = \int_0^x \sigma dx . \quad (4.1)$$

Согласно полученным данным, работа разрушения образцов, кромки которых подготовлены при помощи способа магнитно-абразивной обработки с обеспечением шероховатости поверхности $Ra = 0,23$ мкм и $Ra = 0,79$ мкм, больше в 4,5 и 1,7 раза соответственно, по сравнению с образцами, кромки которых подготовлены ручным абразивным инструментом.

Результаты экспериментальных исследований и комплексный анализ диаграмм разрушения серий образцов позволили установить, что предел прочности сварного соединения образцов, кромки которых были подготовлены с применением способа магнитно-абразивной обработки, выше в 1,1-1,6 раз по сравнению с пределом прочности сварного соединения образцов, кромки которых были подготовлены с применением ручного абразивного инструмента. Причем, формирование меньшей шероховатости поверхности кромок способом магнитно-абразивной обработки позволяет обеспечить больший предел прочности сварного соединения. Пластическая деформация, характеризующаяся процентом деформации образца до разрушения более чем в 2 раза выше на образцах, кромки

которых были подготовлены магнитно-абразивным способом по сравнению с ручным абразивным инструментом.

4.4 Практические рекомендации по подготовке к сварке кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц методом магнитно-абразивной обработки

Анализ результатов экспериментальных исследований влияния способа подготовки кромок изделий перед сваркой, а также качества сформированной поверхности, позволяет сделать вывод, что применение технологии магнитно-абразивной обработки в качестве предварительной операции подготовки поверхностей кромок перед сваркой позволяет значительно уменьшить дефектность сварного соединения, повысить сплошность сварного шва, тем самым оказывая влияние на прочность соединения и сопротивление деформации.

Способ магнитно-абразивной обработки позволяет полностью снять дефектный слой и оксидную пленку с обрабатываемой поверхности, а также обработать поверхность кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц с обеспечением шероховатости поверхности $Ra = 0,3-0,2$ мкм, тем самым снижая площадь поверхности окисления. Оксидная пленка на поверхности изделия образуется мгновенно при контакте чистой поверхности с кислородом. Экспериментально установлено, что оксидная пленка, находящаяся после обработки на поверхности кромки является полностью вновь образуемой и имеет толщину в 3 раза меньше по сравнению с толщиной пленки после механической резки изделия. Таким образом, уменьшая площадь поверхности окисления, а также уменьшая толщину оксидной пленки на поверхности, сохраняя поверхность химически неактивной, что предотвращает дополнительный рост оксидного слоя, способ магнитно-абразивной обработки способствует повышению качества сварного соединения.

Достижение наименьшей шероховатости с обеспечением полного снятия дефектного и оксидного слоя возможно с применением рациональных режимов обработки. На основании проведенных предварительных и основных

экспериментальных исследований, а также их анализа, выявлено, что основными технологическими факторами магнитно-абразивной обработки, оказывающими влияние на процесс резания и формирования поверхности является магнитная индукция B , время обработки t , частота вращения заготовки n , скорость подачи S заготовки вдоль полюсных наконечников. На формирование шероховатости поверхности наибольшее влияние оказывает величина подачи, магнитной индукции и времени обработки. На удельный съем материала и толщину снимаемого материала наибольшее влияние оказывает величина магнитной индукции, время обработки и частота вращения.

Так, на основе проведенного комплексного анализа были выбраны несколько режимов магнитно-абразивной обработки кромок алюминиевых изделий марки АМц, которые рекомендованы для разработанного способа обработки:

1. $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 475$ мин⁻¹, формируемая шероховатость поверхности $Ra = 0,31$ мкм, толщина снимаемого материала $h = 13,9$ мкм;

2. $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹, формируемая шероховатость поверхности $Ra = 0,23$ мкм, толщина снимаемого материала $h = 9,34$ мкм;

3. $B = 0,65$ Тл, $t = 4$ мин, $S = 125$ мм/мин, $n = 350$ мин⁻¹, формируемая шероховатость поверхности $Ra = 0,29$ мкм, толщина снимаемого материала $h = 10,64$ мкм;

Снятие толщины материала с поверхности заготовки, варьируемое в пределах $h = 9-14$ мкм обеспечивает полное удаление дефектного слоя с поверхности образцов, а также не изменяет геометрических параметров кромки изделия. Дальнейшее увеличение толщины снимаемого материала сопровождается повышением магнитной индукции, что приводит к образованию новых дефектов на поверхности изделий. Снятие меньшей толщины обрабатываемого материала не обеспечивает полного удаления предшествующего дефектного слоя с поверхности заготовки, тем самым не позволяет обеспечить низкую шероховатость поверхности.

В ходе проведения исследований был разработан способ [52, 53] магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий, который позволяет обрабатывать кромки изделий любых габаритов в условиях реального производства. Способ заключается в использовании трех вращающихся полюсных наконечников, два из которых расположены перпендикулярно боковым поверхностям обрабатываемой кромки, а третий перпендикулярно торцевой поверхности. Согласно предложенному способу [52], полюсным наконечникам задается синхронное вращательное движение.

Установлено, что при магнитно-абразивной обработке кромок изделия с применением трех синхронно вращающихся полюсных наконечников, два из которых расположены относительно боковых поверхностей и один относительно торцевой поверхности кромки изделия, происходит ассиметричное снятие материала в областях пересечения торцевой и боковых поверхностей кромки изделия вследствие различного магнитно-абразивного воздействия в данных областях, так как поток является однонаправленным и движения магнитной массы с одной стороны больше, чем с другой, что приводит к различному количественному съему материала с углов кромки изделия и, как следствие, формирует искаженность геометрической формы кромки изделия.

С целью устранения данного недостатка и осуществления равномерной магнитно-абразивной обработки в областях пересечения торцевой и боковых поверхностей кромки изделия предлагается двум полюсным наконечникам, обрабатывающим боковые поверхности кромки изделия, вращение задавать в противоположных направлениях, а вращение третьего полюсного наконечника задавать таким образом, чтобы в первой области пересечения торцевой и боковой поверхности кромки изделия и во второй области пересечения торцевой и боковой поверхности кромки изделия магнитно-абразивное воздействие осуществлялось посредством встречного движения торцевого и боковых полюсных наконечников [53] (рисунок 4.14). Равномерность обработки обеспечивается заданием торцевому наконечнику движения, обратного направлению движения магнитно-абразивной массы на границе боковой и торцевой поверхностей, благодаря чему движение

магнитной массы с одной боковой стороны и с другой становятся равнодействующими, обеспечивается достаточное перемешивания частиц и постоянного возобновления режущего контура магнитно-абразивной массы, что повышает режущие способности магнитно-абразивных частиц и позволяет производить обработку кромки изделия равномерно с каждой из сторон [53] (рисунок 4.15). Применение данного способа позволяет равномерно обработать поверхности кромок, создавая микроскругления одинакового радиуса по сторонам кромок (рисунок 4.16).

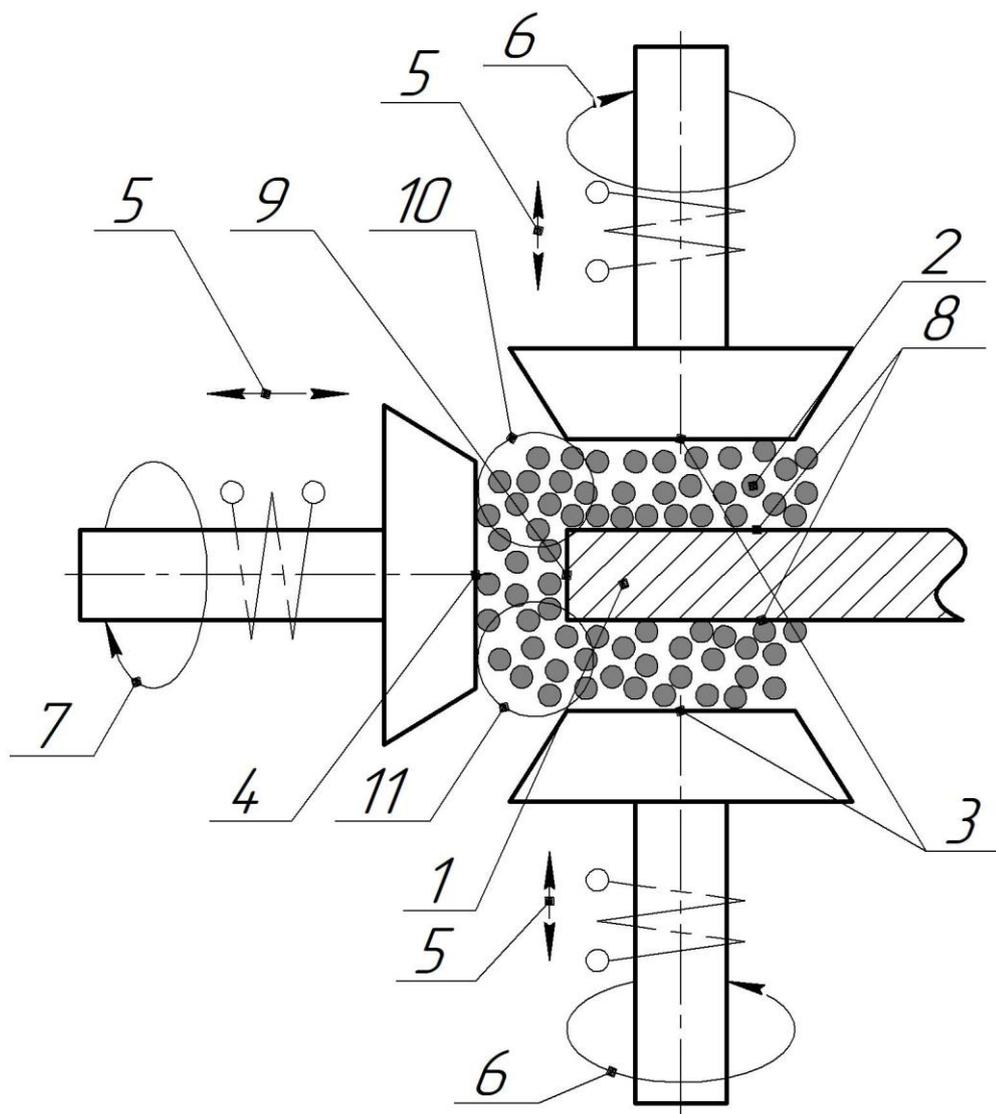


Рисунок 4.14 – Способ обработки кромок листового проката с использованием трех полюсных наконечников (вид сбоку)

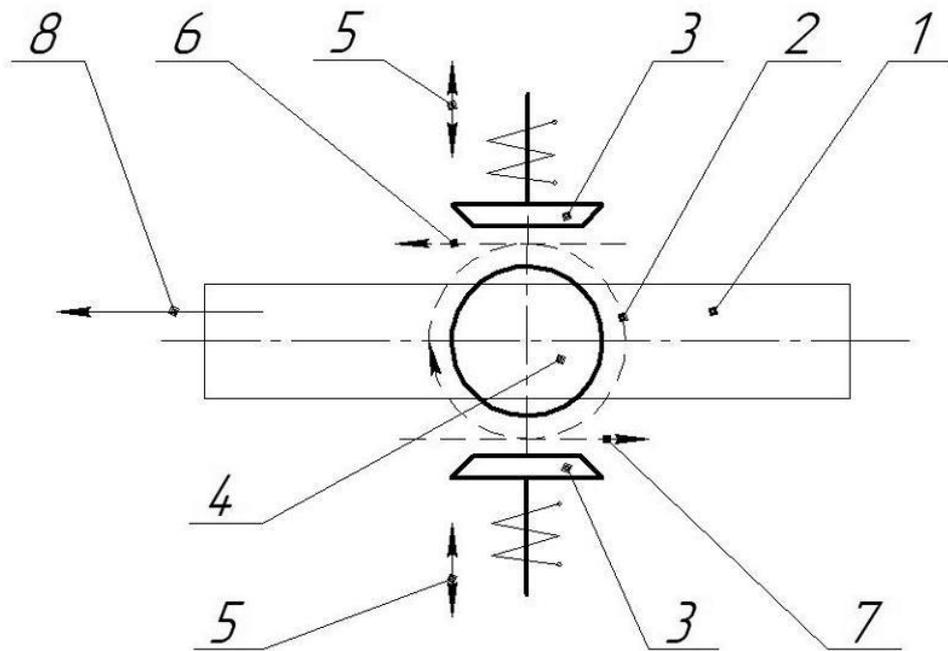


Рисунок 4.15 - Способ обработки кромок листового проката с использованием трех полюсных наконечников (вид сверху)

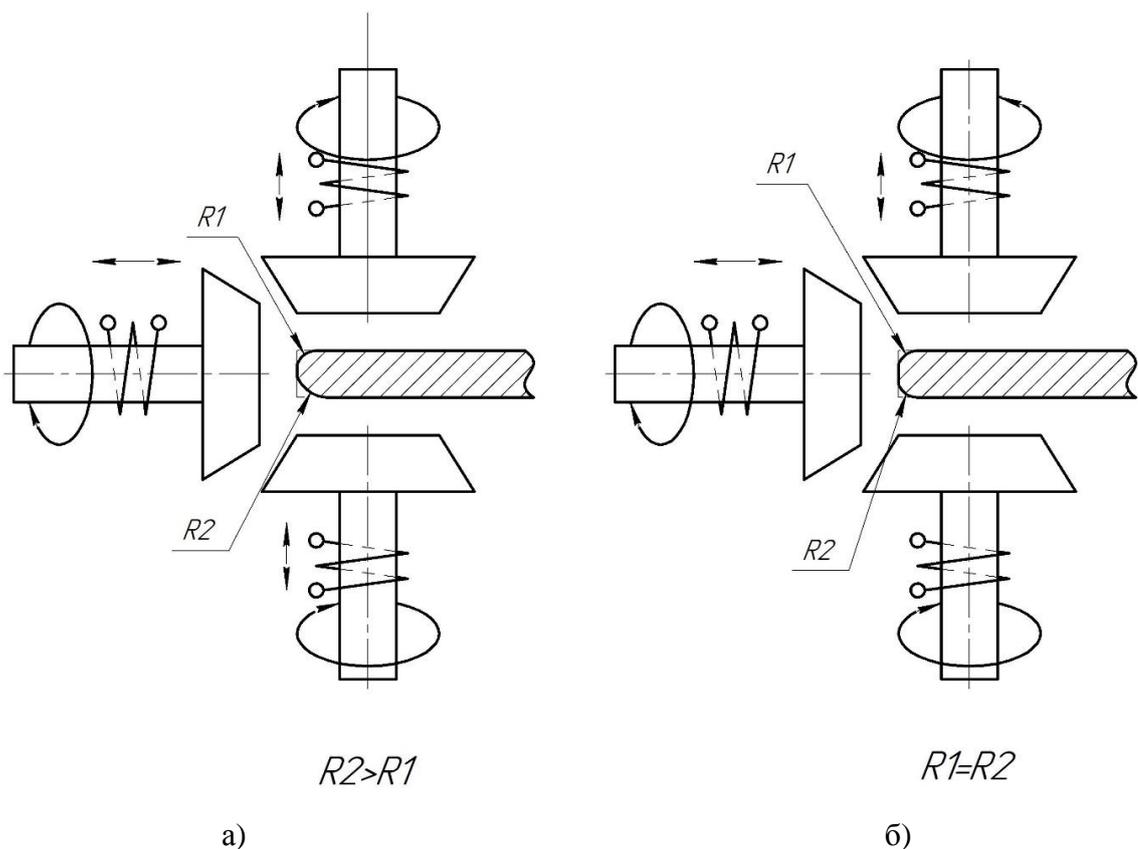


Рисунок 4.16 – Микроскругления кромки при магнитно-абразивной обработке с применением трех вращающихся полюсных наконечников: а – синхронное вращение наконечников; б – встречное вращение наконечников

Полученные режимные параметры можно использовать применительно к разработанному способу [53], рекомендованному для промышленного внедрения, с небольшим уточнением скоростей вращения полюсных наконечников. Разработанный способ позволяет обеспечить равномерную бездефектную магнитно-абразивную обработку кромок изделий перед сваркой одновременно с боковых и торцовой поверхностей без искажения ее геометрической формы.

Установлено, что для обработки изделий из алюминиевого сплава марки АМц в качестве абразивного инструмента целесообразно применять магнитно-абразивный порошок однородного состава марки Пр10Р6М5 фракцией $\Delta=50-250$ мкм, так как по своей твердости в сравнении с твердостью алюминиевого сплава АМц данный порошок будет обеспечивать необходимое для обработки резание без влипания в поверхность заготовки, а его себестоимость и трудоемкость изготовления много ниже композиционных абразивных материалов. В качестве смазочно-охлаждающей жидкости рекомендовано применять масляные водорастворимые жидкости на эмульсионной основе, которые позволяют достичь блеска обрабатываемой поверхности и избежать пенообразования в процессе обработки.

По результатам проведенных комплексных теоретических и экспериментальных исследований, их анализа и обобщения составлены некоторые практические рекомендации:

1. Для повышения прочности сварного соединения и уменьшения дефектности шва изделий из алюминиевого сплава марки АМц рекомендовано применение способа магнитно-абразивной обработки;

2. Рекомендуется осуществлять магнитно-абразивную обработку кромок плоских изделий в соответствие с разработанным способом, описанном в патенте Российской Федерации № 2751392 С1 [53], а также с применением разработанного во второй главе настоящей диссертации технологического инструмента, а именно:

- в качестве абразивного инструмента целесообразно применение однородного порошка марки Пр10Р6М5 фракцией $\Delta = 50-250$ мкм;

- в качестве смазочно-охлаждающей жидкости рекомендованы масляные водорастворимые жидкости на эмульсионной основе;

- магнитная индукция в рабочем пространстве магнитно-абразивной обработки должна варьироваться в пределах $B = 0,5-0,8$ Тл и зависеть от режимных параметров обработки;

3. Магнитно-абразивную обработку следует осуществлять в рамках диапазонов рекомендованных режимных параметров: $B = 0,5-0,65$ Тл, $t = 4-6$ мин, $S = 125-175$ мм/мин, $n = 225-475$ мин⁻¹.

Применение способа магнитно-абразивной обработки изделий из алюминиевого сплава марки АМц позволяет достичь уменьшения шероховатости поверхности в 6-8 раз в сравнении с первоначальной.

Результаты комплексных экспериментальных исследований по разработке, реализации и оценке эффективности способа магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц показали значительный результат изменения прочности и дефектности сварного соединения и стали основой для рекомендации применения данного способа в качестве предварительной операции перед сваркой.

4.5 Выводы по четвертой главе

1. Проведены экспериментальные исследования по определению влияния способа подготовки и состояния поверхности кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц на прочность и дефектность сварного соединения, для чего аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом была проведена сварка серии заготовок, кромки которых подготовлены с применением ручного абразивного инструмента и методом магнитно-абразивной обработки с обеспечением шероховатости поверхности $Ra = 0,23$ и $Ra = 0,79$ мкм;

2. Сварные соединения образцов, кромки которых были подготовлены с применением способа магнитно-абразивной обработки при проведении макро и микроанализа показали большую сплошность металла шва, а также меньшее количество посторонних включений в корне шва, в сравнении с образцами, кромки

которых были подготовлены с применением ручного абразивного инструмента, в структуре шва которых наблюдалось большое количество включений оксидной пленки. При этом, при магнитно-абразивной обработке с режимными параметрами: $B = 0,5$ Тл, $t = 6$ мин, $S = 175$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹ и обеспечением шероховатости поверхности $Ra = 0,23$ мкм наблюдается наиболее однородная структура, а также отсутствие включений оксидной пленки в сварном шве в сравнении с магнитно-абразивной обработкой с режимными параметрами: $B = 0,8$ Тл, $t = 10$ мин, $S = 75$ мм/мин, $n = 225$ мин⁻¹ и обеспечением шероховатости $Ra = 0,79$ мкм;

3. Результаты механических испытаний серий образцов показали, что предел прочности сварного соединения образцов, кромки которых были подготовлены с применением способа магнитно-абразивной обработки, выше в 1,1-1,6 раз, сопротивление разрушению увеличивается более чем в 2 раза, а работа разрушения в 1,6-3 раза по сравнению с пределом прочности сварного соединения образцов, кромки которых были подготовлены с применением ручного абразивного инструмента.

4. Предложены практические рекомендации по применению способа магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц, позволяющий обеспечить полное снятие дефектного и оксидного слоя с поверхности, сохранить геометрическую форму кромки, избежать эффекта шаржирования и снизить шероховатость поверхности в 6-8 раз, тем самым увеличивая предел прочности сварного соединения в 1,6 раз, а работу разрушения в 1,7-4,5 раза по сравнению со сварными соединениями изделий, кромки которых подготовлены ручным абразивным инструментом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи выявления закономерностей влияния технологических факторов магнитно-абразивной обработки на повышение качества поверхности кромок листового проката из алюминиевого сплава марки АМц с целью повышения прочности сварного соединения за счет удаления существующего оксидного слоя и уменьшения шероховатости поверхности.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. На основании проведенного анализа установлено, что причинами разрушений сварных соединений изделий из алюминиевого сплава марки АМц в наибольшей степени являются дефекты сварного шва, вызванные некачественной подготовкой кромок, что приводит к посторонним включениям в корне шва. Существующие методы подготовки кромок изделий перед сваркой не позволяют обеспечить качественную зачистку поверхностей, не оказывая температурных или химических воздействий, стимулируя рост оксидной пленки.

2. Разработан способ магнитно-абразивной обработки кромок листового проката из алюминиевого сплава марки АМц, обеспечивающий равномерный съем материала с торцевых и боковых сторон кромки исключая эффект шаржирования.

3. Разработанный способ включает в себя:

3.1 сочетание рабочих движений (главное движение резания (частота вращения заготовки n , мин⁻¹), движение подачи (подача заготовки вдоль полюсных наконечников S , мм/мин)) и движение осцилляции с рабочими диапазонами $n = 225-475$ мин⁻¹, $S = 75-175$ мм/мин;

3.2 схему обработки, обеспечивающую равномерный съем материала по всей поверхности изделия, а также скольжение абразивных частиц о поверхность с исключением микроудара.

4. Разработан технологический инструмент для магнитно-абразивной обработки кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц, включающий в себя:

4.1 определен диапазон оптимальной магнитной индукции $B = 0,5-0,8$ Тл, в рамках которого происходит удаление дефектного слоя и формирование нового, без вкраплений абразивного материала и прижогов поверхности;

4.2 в качестве магнитно-абразивного порошка в процессе обработки алюминиевого сплава марки АМц рекомендовано применение однородного абразивного порошка марки Пр10Р6М5 с фракцией $\Delta = 50-250$ мкм;

4.3 в качестве смазочно-охлаждающей жидкости рекомендовано применение масляных водорастворимых жидкостей на эмульсионной основе, позволяющих достичь блеска обрабатываемой поверхности и избежать пенообразования в процессе обработки.

5. На основе анализа экспериментальных исследований установлено, что на формирование шероховатости поверхности кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц в процессе магнитно-абразивной обработки наибольшее влияние оказывают значения подачи, магнитной индукции и времени обработки, на удельный съём материала с единицы площади и толщину снимаемого материала наибольшее влияние оказывают величины значений магнитной индукции, времени обработки и частоты вращения.

6. Получены регрессионные математические зависимости, позволяющие определить значения отклика (шероховатость поверхности, удельный съём материала с единицы площади и толщину снимаемого материала) в зависимости от технологических факторов обработки: величина магнитной индукции, времени обработки, частоты вращения и скорости подачи заготовки вдоль полюсных наконечников.

7. Установлено, что в процесс магнитно-абразивной обработки толщина снимаемого материала в пределах 9-14 мкм позволяет полностью устранить оксидный и дефектный слой с поверхности изделия, а также сформировать поверхность с шероховатостью $Ra = 0,23$ мкм, что характеризует снижение

шероховатости в 6-8 раз по сравнению с исходной, и толщиной оксидной пленки не более 30 нм.

8. Применение способа магнитно-абразивной обработки в качестве предварительной операции по зачистке кромок изделий из алюминиевого сплава АМц перед сваркой с обеспечением шероховатости поверхности $Ra = 0,23$ мкм позволяет обеспечить однородность сварного соединения, избежать включений оксидной пленки в корне шва, а также повысить прочность сварного соединения в 1,6 раз, работу разрушения в 4,5 раза, по сравнению со сварными соединениями, подготовка кромок которых осуществляется ручным абразивным инструментом.

9. Даны практические рекомендации применения способа магнитно-абразивной обработки в условиях реального производства с использованием трех вращающихся полюсных наконечников, диапазоном режимных параметров обработки $V = 0,5-0,65$ Тл, $t = 4-6$ мин, $S = 125-175$ мм/мин, $n = 225-475$ мин⁻¹ и технологическим инструментом, указанным в пункте 4.

10. 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 «ПО» «Электромашина».

11. Перспективы дальнейшего развития диссертационного исследования заключаются в разработке технологии магнитно-абразивной обработки труднообрабатываемых цветных металлов, включающей в себя управление потоками порошковой среды, с целью повышения качественных характеристик поверхностного слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов, А. И. Технология и оборудование сварки плавлением и термической резки: Учебник для вузов. – 2-е изд. испр. и доп. / А. И. Акулов, В. П. Алехин, С. И. Ермаков и др. / Под ред. А. И. Акулова. – М.: Машиностроение, 2003. – 560 с.
2. Акулович, Л. М. Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, В. Я. Лебедев. – Минск: БГАТУ, 2012. – 316 с.
3. Акулович, Л. М. Проектирование технологий технического сервиса машин и оборудования: учебно-методическое пособие: в 2 ч. / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, А. В. Миранович. – Минск: БГАТУ, 2021. – Ч. 1. – 216 с.
4. Акулович, Л. М. Технология и оборудование магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей различного профиля / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск: БГАТУ, 2013. – 372 с.
5. Акулович, Л. М. Ферроабразивные порошки для магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, А. И. Покровский, Е. В. Сенчуров. – Минск: БГАТУ, 2015. – 284 с.
6. Бабич, В.Е. Технология финишной магнитно-абразивной обработки сборного породоразрушающего инструмента: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Бабич Виталий Евгеньевич. – ГНУ «Физико-технический институт» НАН Беларуси. – Минск, 2009. – 158 с.
7. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1986. – 176 с.
8. Барон, Ю. М. Технология абразивной обработки в магнитном поле / Ю. М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1975. – 128 с.
9. Белецкий, В. М. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение). Справочник / В. М. Белецкий, Г. А. Кривов; под общей редакцией академика РАН И. Н. Фридляндера. – К.: «КОМИНТЕХ», 2005. – 365 с.

10. Беляев, А. И. Металловедение алюминия и его сплавов: Справ. изд. 2-е перераб. доп. / А. И. Беляев, О. С. Бочвар, Н. Н. Буйнов и др. – М.: Металлургия, 1983. – 280 с.
11. Бернштейн, М. Л. Механические свойства металлов / М. Л. Бернштейн, В. А. Займовский. – М.: Металлургия, 1979. – 495 с.
12. Вейко, В. П. Перспективы промышленных применений лазерной очистки материалов / В. П. Вейко, А. А. Кишалов, Т. Ю. Мутин, В. Н. Смирнов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3 (79). – С. 50-55.
13. Владимиров, В. И. Физическая природа разрушения металлов / В. И. Владимиров. - М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
14. Воронцова, Л. А. Алюминий и алюминиевые сплавы в электротехнических изделиях / Л. А. Воронцова, В. В. Маслов, И. Б. Пешков. – Москва: Энергия, 1971. – 224 с.
15. Гейчук, В. Н. Кинематика формирования кромок магнитно-абразивной обработкой / В. Н. Гейчук, А. Ю. Гаврушкевичю - Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2010. - Т.2. - № 4. – С. 25-32.
16. ГОСТ Р 57180-2016. Соединения сварные. Методы определения механических свойств, макроструктуры и микроструктуры.
17. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств.
18. Дальский, А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М.: Машиностроение. – 1975. – 222 с.
19. Дриц, А. М. Сварка алюминиевых сплавов / А. М. Дриц, В. В. Овчинников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2020. – 476 с.
20. Ефремов, В. Д. Технологическое обеспечение качества рабочих кромок инструмента и деталей / В. Д. Ефремов, П. И. Ящерицын. – Минск: БАТУ, 1997. – 251 с.

21. Жданович, В. И. Исследование процесса магнитно-абразивной обработки наружных цилиндрических поверхностей: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Жданович Венедикт Иванович. – Физико-технический ин-т АН БССР. – Минск, 1974. – 23 с.
22. Испытание материалов. Справочник / Под ред. Х. Блюменауэра. Пер. с нем. - М.: Металлургия, 1979. - 448 с.
23. Каблов, Е. Н. Алюминиевые сплавы в авиакосмической технике / под общ. ред. Е. Н. Каблова. - М.: Наука, 2001. - 192 с.
24. Каличенко, Н. П. Атлас дефектов сварных соединений и основного металла: учебное пособие / Н. П. Каличенко, М. А. Васильева, А. Ю. Радостев. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. - 71 с.
25. Кексин, А. И. Повышение качества внутренних резьбовых поверхностей на основе предварительного магнитно-абразивного полирования сложнопрофильного инструмента: дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08 / Кексин Александр Игоревич. – СПб, 2017. – 204 с.
26. Кексин, А. И. Пути повышения качества нарезаемой резьбы / А. И. Кексин, В. В. Максаров // Металлообработка. – 2013. – 5-6 (77-78). – С. 17-21.
27. Кексин, А. И. Способ подготовки кромок алюминиевых изделий перед сваркой / А. И. Кексин, **И. А. Филипенко** // Сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021», Санкт-Петербург. – 2021. – С. 28-32.
28. Кексин, А. И. Технологическое повышение качества плоских изделий из алюминиевых сплавов магнитно-абразивной обработкой / А. И. Кексин, А. Е. Ефимов, **И. А. Филипенко** // Сборник тезисов IV Международной научно-практической конференции «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование», Санкт-Петербург. – 2021. – С. 125.
29. Кексин, А. И. Технологическое повышение качества сложнопрофильных поверхностей методом магнитно-абразивного полирования / А. И. Кексин, В. В. Максаров // Металлообработка. – 2017. – № 1 (97). – С. 47-57.

30. Колачев, Б. А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б. А. Колачев, В. И. Елагин, В. А. Ливанов; учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: МИСИС, 2005. – 432 с.
31. Коновалов, Е. Г. Основы электроферромагнитной обработки / Е. Г. Коновалов, Ф. Ю. Сакулевич. – Мн.: Наука и техника, 1974. – 272 с.
32. Коновалов, Е.Г. Чистовая обработка деталей в магнитном поле ферромагнитными порошками / Е.Г. Коновалов, Г.С. Шулев. Минск: Наука и техника, 1967. – 125с.
33. Кошкарев, Б. Т. Теория сварочных процессов. Учебное пособие / Б. Т. Кошкарев. – Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2003. – 217 с.
34. Кубашевский, О. Окисление металлов и сплавов / О. Кубашевский, Б. Гопкинс : перевод с англ. В. А. Алексеева // Москва: «Металлургия», 1965. – 428 с.
35. Лившиц Л. С. Металловедение для сварщиков (сварка сталей) / Л. С. Лившиц.- М.: Машиностроение, 1979. - 253 с.
36. Литвиненко, В. А. Финишная обработка фасонных поверхностей с высокими требованиями к качеству методом МАП с вращающейся рабочей зоной: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Литвиненко Валентина Алексеевна. – Ленинград, 1985. – 259 с.
37. Максаров, В. В. Обеспечение качества подготовки кромок листовых изделий из алюминия и его сплавов перед сваркой / В. В. Максаров, А. И. Кексин, **И. А. Филипенко** // Металлообработка. - 2020. - № 3 (117). - С. 44-55.
38. Максаров, В. В. Технологическое обеспечение качества кромок плоских изделий посредством магнитно-абразивной обработки / В. В. Максаров, **И. А. Филипенко**, Р. А. Щеглова, И. А. Бригаднов // Металлообработка. - 2021. - № 3 (123). - С. 57-63.
39. Максаров, В. В. 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.

40. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский и др. Под общей ред. А. С. Зубченко – М.: Машиностроение, 2003. - 784 с.
41. Маслов, Е. Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
42. Маталин, А.А. Технология механической обработки. – М.: Машиностроение, 1977. 460 с.
43. Машиностроение. Энциклопедия: в 40 т. / [Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др.]. – М.: Машиностроение, 2000. – Т. 3: Технология изготовления деталей машин / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др.; Под общ. ред. А.Г. Сулова. 2002. – 840 с.
44. Митяев, А. А. Производство и применение алюминиевых сплавов в транспортном машиностроении / А. А. Митяев, С. Б. Беликов, И. П. Волчок // Вестник двигателестроения, Запорожье ОАО "Мотор Сич". – 2006. - № 1/2006.
45. Непомнящая, Э. З. Механические свойства конструкционных материалов при низких температурах: Сб. научн. трудов: Пер. с англ. / Под ред. Фридляндера И. Н. // Москва.: Металлургия, 1983. – 432 с.
46. Николаев, Г. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.
47. Нинул, А. С. Оптимизация целевых функций: Аналитика. Численные методы. Планирование эксперимента / А. С. Нилун - М.: Издательство Физикоматематической литературы, 2009. - 336 с.
48. Новик, Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов - М.: Машиностроение, 1980. – 304 с.
49. Овчинников, В. В. Дефектация сварных швов и контроль качества сварных соединений : учебник для студ. Учреждений сред. проф. Образования / В. В. Овчинников. – 3-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2017. – 224 с.

50. Овчинников, В. В. Технология сварки алюминиевых сплавов: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2004. – 68 с.
51. Оливер, В. Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В. Е. Оливер – М.: Metallurgiya, 1990. - 176 с.
52. Патент № 2710085 С1 Российская Федерация, МПК В24В 31/112 (2006.01). Способ магнитно-абразивной обработки : №2019129384 : заявл. 17.09.2019 : опубл. 24.12.2019 / Максаров В. В., Кексин А. И., **Филипенко И. А.**; заявитель СПГУ. – 9 с. : ил.
53. Патент № 2751392 С1 Российская Федерация, МПК В24В 31/112 (2006.01). Способ магнитно-абразивной обработки : №2020140484 : заявл. 09.12.2020 : опубл. 13.07.2021 / Максаров В. В., Кексин А. И., **Филипенко И. А.**, Щеглова Р. А.; заявитель СПГУ. – 11 с. : ил.
54. Подгаецкий, В. В. Неметаллические включения в сварных швах / В. В. Подгаецкий. – М.: Машгиз, 1962. – 84 с.
55. Подзей, А. В. Технологические остаточные напряжения / А. В. Подзей [и др.]. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
56. Полухин, П. И. Технология металлов и сварка / П. И. Полухин, Б. Г. Гринберг, В. Т. Жадан, С. К. Кантеник, Д. И. Васильев // Учебник для вузов. Под ред. П. И. Полухина. – М.: «Высшая школа», 1977. – 464 с.
57. Приходько, С. П. Магнитно-абразивное полирование с применением индукторов на постоянных магнитах : автореф. канд. дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. - Л.: ЛПИ, 1983. – 20 с.
58. Рабкин, Д. М. Металловедение сварки алюминия и его сплавов / Д. М. Рабкин, А. В. Лозовская, И. Е. Скабинская ; отв. ред. В. Н. Замков: АН Украины. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. – Киев : Наук. Думка, 1992. – 160 с. ISBN 5-12-002022-4.
59. Сакулевич, Ф. Ю. Магнитно-абразивная обработка точных деталей. – Минск, 1977. – 288 с.
60. Сакулевич, Ф. Ю. Объемная магнитно-абразивная обработка / Ф. Ю. Сакулевич, Л. М. Кожуро. – Минск : Наука и техника, 1978. - 168 с.

61. Сакулевич, Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. / Ф. Ю. Сакулевич // Минск : Наука и техника, 1981. – 328 с.
62. Сидняев, Н. И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебное пособие. - М.: ИД Юрайт, 2012. - 399 с.
63. Скворчевский, Н. Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерицын. – Минск : Наука и техника, 1991. – 215 с.
64. Справочник по сварке. Том 4 / под ред. А. И. Акулова. – М.: «Машиностроение», 1971. – 416 с.
65. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова.-5-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение. – Т. 1, 2001. – 912 с.
66. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова.-5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. – Т. 2, 2001. – 905 с.
67. Сулов, А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Сулов, А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
68. Сулов, А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
69. Фетисов, Г. П. Материаловедение и технология металлов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин, В. С. Гаврилюк и др. – М.: «Высшая школа», 2001. – 864 с.
70. **Филипенко И. А.** Обеспечение качества обработки кромок алюминиевых изделий перед сваркой // Сборник тезисов VII Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020», Секция «Круглый стол молодых ученых», Санкт-Петербург, Горный университет. – 2020. –С. 288-290.
71. **Филипенко И. А.** Обработка кромок плоских изделий из алюминиевых сплавов методом магнитно-абразивной обработки // Сборник научных трудов IV Всероссийской научной конференции «Современные

образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса», Санкт-Петербург, Горный университет. – 2021. – С. 645-648.

72. **Филипенко И. А.** Повышение качества обработки кромок алюминиевых изделий перед сваркой с применением метода магнитно-абразивной обработки // Сборник научных трудов III Всероссийской научной конференции «Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса», Санкт-Петербург, Горный университет. – 2020. – С. 1285-1289.

73. **Филипенко И. А.** Совершенствование технологического процесса магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных изделий // Сборник тезисов Международного семинара «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики IPDME-2019», Секция «Круглый стол молодых ученых», Горный университет. – 2019. – С. 587-590.

74. **Филипенко И. А.** Современные технологии обеспечения качества в машиностроении / И. А. Филипенко, И. В. Горшков // Сборник научных статей по итогам работы международного научного форума «Наука и инновации – современные концепции», Москва. – 2019. – С. 121-125.

75. Халимов, А. Г. Техническая диагностика и оценка ресурса аппаратов : Учеб. пособие / А. Г. Халимов, Р. С. Зайнуллин, А. А. Халимов // Уфа : Изд-во УГНТУ, 2001. – 408 с.

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

77. Шоршоров, М. Х. Испытания металлов на свариваемость / М. Х. Шоршоров, Т. А. Чернышова, А. И. Красовский. - М.: Металлургия, 1972. – 240 с.

78. Юхин, Н. А. Дефекты сварных швов и соединений / А. Н. Юхин. – М.: «СОУЭЛО», 2007. – 56 с.

79. Ящерицын, П. И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын, М. Т. Забавский, Л. М. Кожуро, Л. М. Акулович. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 272 с.
80. Ящерицын, П. И. Чистовая обработка деталей в машиностроении / П. И. Ящерицын, А. Н. Мартынов. – Минск: Высшая школа, 1983. – 191 с.
81. Ящерицын, П. И. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле. – Минск: Физико-технический ин-т, 1997. – 416 с.
82. Baron, Y. M. Characterization of the Magnetic Abrasive Finishing Method and Its Application to Deburring / Y. M. Baron, S. L. Ko, J. I. Park // Key Engineering Materials. – 2005. - Vol. 291-292. - P. 291-296.
83. Baijun, X. Investigation of finishing aluminum alloy A5052 using the magnetic abrasive finishing combined with electrolytic process / X. Baijun, Z. Yanhua. - DOI: 10.3390/machines8040078 // Machines. – 2020. – Vol. 8. – № 78 – P. 76-90.
84. Chang, G. W. Study on cylindrical magnetic abrasive finishing using unbonded magnetic abrasives / G. W. Chang, B. H. Yan, R. T. Hsu. - DOI:10.1016/S0890-6955(01)00153-5 // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2002. - № 42(5). – P. 575–583.
85. Cheng, K. C. Characteristics of the polishing effects for the stainless tubes in magnetic finishing with gel abrasive / C.K Cheng, K. Yu. Chen, H. P. Tsui, A. C. Wang. - DOI: 10.3390/pr9091561 // Processes. – 2021. – № 9. P. 15-24.
86. Dhirendra, K. S. V. K. Jain & V. (2005) On the performance analysis of flexible magnetic abrasive brush / K. S. Dhirenda, V. K. Jain, V. Raghuram. - DOI: 10.1080/10910340500398217 // Machining Science and Technology: An International Journal. – 2005. – № 9. – P. 601–619.
87. Farwaha, H. S. Mathematical modeling and process parameters optimization of ultrasonic assisted electrochemical magnetic abrasive machining / H. S. Farwaha, D. Deepak, G. S. Brar. - DOI:10.1007/s12206-020-1110-7 // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2020. – № 34(12). – P. 5063–5073.

88. Fernández, I. 2013. Comparative evaluation of alternative fluids for power transformers / I. Fernández, A. Ortiz, F. Delgado, C. Renedo, S. Pérez // *Electric Power System Researches*. – 2013. - № 98. – P. 58-69.

89. **Filipenko I.A.** Improvement of quality of welded joints in designs of mining machines // *Proceedings of 59 Konferencja Studenckich Kół Naukowych Pionu Górniczego AGH, Poland*. – 2018. – P. 175.

90. Jain, V. Effect of working gap and circumferential speed on the performance of magnetic abrasive finishing process / V. Jain, P. Kumar., P Behera, S. Jayswal // *Wear*. – 2001. - № 250(1-12). – P. 384–390.

91. Jayswal, S. C. Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process / S. C. Jayswal, V. K. Jain, P. M. Dixit. – DOI: 10.1007/s00170-004-2180-x // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2005. - № 26(5-6). – P. 477–490.

92. Keksin, A. I. Methods of increasing the quality of the thread pitches / A. I. Keksin, V. V. Maksarov // *Agronomy Research*. – 2013. – Vol. 11. - №1. – P.139-146.

93. Keksin, A. I. Oil and gas sector products cold working process / A. I. Keksin, **I. A. Filipenko**. – DOI 10.1201/9781003014577-50 // *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019*. – 2019. – Issue 1. - P. 400-405.

94. Kim, J. D. Simulation for the prediction for surface-accuracy in magnetic abrasive machining / J. D. Kim, M. S. Choi // *J. Mater. Process. Technol.* – 1995. - № 53. – P. 630-642.

95. Maiboroda, V. S. Internal friction characteristics of mixtures of magnetic abrasive powders in magnetic fields / V. S. Maiboroda. - DOI:10.1007/BF02678639 // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2020. - № 39(3-4). – P. 163–167.

96. Maksarov, V.V. Improvement of magnetic-abrasive finishing of nonuniform products made of high-speed steel in digital conditions / V. V. Maksarov, A. I. Keksin, **I. A. Filipenko**. – DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.836.71 // *Key Engineering Materials*. – 2020. – Vol. 834. – P. 71-77.

97. Milan, A. A study of the properties of electrical insulation oils and of the components of natural oils / A. Milan // *Acta Polytech.* – 2012. - № 52 (5). – P. 100–106.
98. Mori, T. Clarification of magnetic abrasive finishing mechanism / T. Mori, K. Hirota, Y. Kawashima. - DOI:10.1016/S0924-0136(03)00410-2 // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2003. - №143-144. – P. 682–686.
99. Paswan, S. K. Analysis of finishing performance in rotating magnetorheological honing process with the effect of particles motion / S. K. Paswan, A. K. Singh. - DOI:10.1177/0954408921990132 // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering.* – 2021. - № 235(4). – P. 1104–1118.
100. Raymon, A. R. Enhancement of dielectric properties of Baobab Oil and Mongongo Oil using cost-effective additive for power transformer insulating fluids / A. R. Raymon, R. Samikannu, A. Yahya, M. Mosalaosi. – DOI: 10.1016/j.eti.2020.101150 // *Environmental Technology & Innovation.* – Vol. 20. – 2020.- P. 101-115.
101. Rodriguez, C. J. Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing / C. J. Rodriguez. – Kassel: Kassel university press GmbH, 2009. – 205 p.
102. Prakash, C. Experimental investigation into nano-finishing of β -TNTZ alloy using magnetorheological fluid magnetic abrasive finishing process for orthopedic applications / S. Singh, A. Pramanik, A. Basak, G. Królczyk. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.01.046 // *Journal of Materials Research and Technology.* - 2021. - № 11. – P. 600–617.
103. Ross, B. Polishing characteristics of transparent polycrystalline yttrium aluminum garnet ceramics using magnetic field-assisted finishing / B. Ross, H. Wang, H. Ramadhan, H. Yamaguchi. – DOI:10.1115/1.4034641 // *Journal of Micro and Nano-Manufacturing.* – 2016. - № 4(4). – P. 41-50.
104. Schmitz Ch. Handbook of aluminum recycling / Christoph Schmitz // Vulkan Verlag, 2006. - 454 p.

105. Shinmura, T. Study on magnetic abrasive process – effect of various types of magnetic abrasives on finishing characteristics / T. Shinmura, K. Takazava, E. Hitano, T. Aizawa // J. Jpn. Soc. Prec. Eng. – 1987. - № 21 (2). - P.139-141.
106. Shinmura, T. Study on magnetic abrasive process – process principle and finishing possibility / T. Shinmura, K. Takazava, E. Hitano, T. Aizawa // J. Jpn. Soc. Prec. Eng. – 1984. - № 18 (4). – P. 347-348.
107. Singh, M. Theoretical investigations into magnetorheological finishing of external cylindrical surfaces for improved performance / M. Singh, A. K. Singh. – DOI: 10.1177/0954406220931550 // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science - 2020. – P. 1-18.
108. Yamaguchi, H. Development of a new precision internal machining processing on alternating magnetic field / H. Yamaguchi, T. Shinmura, M. Takenada // Prec. eng. – 2003. – № 27. – P. 51-58.
109. Zelinko, A. Influence of process parameters and initial surface on magnetic abrasive finishing of flat surfaces on CNC machine tools / A. Zilinko, F. Welzel, D. Biermann, V. Maiboroda. - DOI: 10.3390/jmmp5040108 // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2021. – P. 5-16.
110. Yin, S. A comparative study: polishing characteristics and its mechanisms of three vibration modes in vibration-assisted magnetic abrasive polishing / S. Yin, T. Shinmura // Int. J. of Mach. Tools and Manuf. - Vol. 44. - № 4. - P. 383-390.
111. Yin, S. Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy / S. Yin, T. Shinmura // Int. J. of Mach. Tools and Manuf. – 2004. - Vol. 44. - № 12-13. - P. 1297-1303.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Вспомогательные таблицы для построения регрессионных моделей

Таблица А.1 – Критические значения t -критерия

Число степеней свободы f	Уровни значимости α			Число степеней свободы f	Уровни значимости α		
	0,1	0,05	0,01		0,1	0,05	0,01
1	6,31	12,7	63,66	16	1,75	2,12	2,92
2	2,92	4,30	9,93	17	1,74	2,11	2,90
3	2,35	3,18	5,84	18	1,73	2,10	2,88
4	2,13	2,78	4,60	19	1,73	2,09	2,86
5	2,02	2,57	4,03	20	1,73	2,08	2,85
6	1,94	2,45	3,71	21	1,72	2,08	2,83
7	1,90	2,37	3,50	22	1,72	2,07	2,82
8	1,86	2,31	3,36	23	1,71	2,07	2,81
9	1,83	2,26	3,25	24	1,71	2,06	2,80
10	1,81	2,23	3,17	25	1,71	2,06	2,79
11	1,80	2,20	3,11	26	1,71	2,06	2,78
12	1,78	2,18	3,06	27	1,70	2,05	2,77
13	1,77	2,16	3,01	28	1,70	2,05	2,76
14	1,76	2,15	2,98	29	1,70	2,05	2,76
15	1,75	2,13	2,95	30	1,70	2,04	2,75
				∞	1,64	1,96	2,58

Таблица А.2 – Значения критерия Фишера

Число степеней свободы в знаменателе	Число степеней свободы в числителе																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16	20	24	30	50	100	∞
1	161 4052	200 4999	216 5403	225 5625	230 5764	234 5859	237 5928	239 5981	241 6022	242 6056	243 6082	244 6106	245 6142	246 6169	248 6208	249 6234	250 6258	252 6303	253 6334	254 6366
2	18,51 98,49	19,00 99,01	19,16 99,17	19,25 99,25	19,30 99,30	19,33 99,33	19,36 99,94	19,37 99,36	19,38 99,38	19,39 99,40	19,40 99,41	19,41 99,42	19,42 99,43	19,43 99,44	19,44 99,55	19,45 99,48	19,46 99,48	19,47 99,48	19,49 99,48	19,50 99,50
3	10,13 34,12	9,55 30,81	9,28 29,46	9,12 28,71	9,01 28,24	8,94 27,91	8,88 27,67	8,84 27,29	8,81 27,34	8,87 27,23	8,76 27,13	8,74 27,05	8,71 26,92	8,69 26,83	8,66 26,69	8,62 26,50	8,62 26,50	8,58 26,27	8,56 26,23	8,53 26,12
4	7,71 21,20	6,59 18,00	6,59 16,69	6,39 15,98	6,26 15,52	6,16 15,51	6,09 14,98	6,04 14,80	6,00 14,66	5,96 14,54	5,93 14,45	5,91 14,37	5,87 14,24	5,84 14,15	5,80 14,02	5,77 13,93	5,74 13,83	5,70 13,69	5,66 13,57	5,63 13,46
5	6,61 16,26	5,57 13,27	5,41 12,06	5,19 11,39	5,05 10,97	4,95 10,67	4,88 10,45	4,82 10,27	4,78 10,15	4,74 10,05	4,70 9,96	4,68 9,89	4,64 9,70	4,60 9,68	4,56 9,55	4,53 9,47	4,50 9,38	4,46 9,24	4,40 9,13	4,36 9,02
6	5,99 13,74	5,14 10,92	4,76 9,98	4,53 9,15	4,39 8,75	4,28 8,47	4,21 8,26	4,15 8,10	4,10 7,98	4,06 7,87	4,03 7,79	4,00 7,72	3,96 7,60	3,92 7,52	3,87 7,39	3,84 7,31	3,81 7,23	3,75 7,09	3,71 6,99	3,67 6,88
7	5,59 12,26	4,74 9,55	4,35 8,45	4,12 7,85	3,98 7,46	3,87 7,19	3,79 7,00	3,73 6,84	3,68 6,71	3,63 6,62	3,60 6,54	3,57 6,47	3,52 6,35	3,49 6,27	3,44 6,15	3,41 6,07	3,38 5,98	3,32 5,85	3,28 5,75	3,23 5,65
8	5,32 11,26	4,46 8,65	4,07 7,59	3,84 7,01	3,69 6,63	3,58 6,37	3,50 6,19	3,44 6,03	3,39 5,91	3,34 5,82	3,31 5,74	3,28 5,67	3,23 6,65	3,20 5,48	3,15 5,36	3,12 5,28	3,08 5,20	3,03 5,06	2,98 4,96	2,93 4,86
9	5,12 10,56	4,26 8,02	3,86 6,99	3,63 6,42	3,48 6,06	3,37 5,80	3,29 5,62	3,23 5,47	3,18 5,35	3,13 5,26	3,10 5,18	3,07 5,11	3,02 5,00	2,98 4,98	2,93 4,80	2,90 4,73	2,86 4,64	2,80 4,51	2,76 4,41	2,71 4,31
10	4,96 10,04	4,10 7,56	3,71 6,55	3,48 5,99	3,33 5,64	3,22 5,39	3,14 5,21	3,07 5,06	3,02 4,95	2,97 4,85	2,94 4,78	2,91 4,71	2,86 4,60	2,82 4,52	2,77 4,41	2,74 4,33	2,70 4,25	2,64 4,12	2,59 4,01	2,54 3,91
15	5,54 8,68	3,68 6,36	3,29 5,42	3,06 4,89	2,90 4,56	2,79 4,32	2,70 4,14	2,64 4,00	2,59 3,89	2,55 3,80	2,51 3,73	2,48 3,67	2,43 3,56	2,39 3,48	2,33 3,36	2,29 3,29	2,25 3,20	2,18 3,07	2,12 2,97	2,07 2,87
20	4,35 8,1	3,49 5,85	3,10 4,94	2,87 4,43	2,71 4,10	2,60 3,87	2,52 3,71	2,45 3,56	2,40 3,45	2,35 3,37	2,31 3,30	2,29 3,23	2,23 3,13	2,18 3,05	2,12 2,94	2,08 2,86	2,04 2,77	1,96 2,63	1,90 2,53	1,84 2,42
30	4,16 7,56	3,32 5,39	2,92 4,51	2,69 4,02	2,53 3,70	2,42 3,47	2,34 3,30	2,27 3,17	2,21 3,06	2,16 2,98	2,12 2,90	2,09 2,84	2,04 2,27	1,99 2,66	1,93 2,55	1,89 2,47	1,84 2,38	1,76 2,24	1,69 2,13	1,62 2,01
50	4,03 7,17	3,18 3,06	2,79 4,20	2,56 3,72	2,40 3,41	2,29 3,18	2,20 3,02	2,13 2,88	2,07 2,78	2,02 2,70	1,98 2,62	1,95 2,56	1,90 2,46	1,85 2,39	1,78 2,26	1,74 2,18	1,69 2,10	1,60 1,94	1,52 1,82	1,44 1,68
100	3,94 6,90 3,84 6,64	3,09 4,82 2,99 4,60	2,70 3,98 2,60 3,78	2,46 3,51 2,37 3,32	2,30 3,20 2,21 3,02	2,19 2,99 2,09 2,80	2,10 2,82 2,01 2,64	2,08 2,69 1,94 2,51	1,97 2,59 1,88 2,41	1,92 2,51 1,83 2,32	1,88 2,43 1,79 2,24	1,85 2,36 1,75 2,18	1,79 2,26 1,69 2,07	1,75 2,19 1,64 1,99	1,68 2,06 1,57 1,87	1,63 1,98 1,52 1,79	1,57 1,89 1,46 1,79	1,48 1,73 1,35 1,52	1,39 1,59 1,24 1,36	1,29 1,43 1,00 1,00

Таблица А.3 – Вспомогательные константы для составления ротатбельного плана эксперимента

Номер плана	k	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	c_8	c_9	c_{10}
1	2	1,00000	0,50000	0,12500	0,25000	0,12500	0,21875	1,00000	0,35355	0,50000	0,58630
2		0,50000	0,25000	0,12500	0,25000	0,12500	0,09375	0,70711	0,35355	0,50000	0,46771
3		0,33333	0,16667	0,12500	0,25000	0,12500	0,05208	0,57735	0,35355	0,50000	0,42081
4		0,25000	0,12500	0,12500	0,25000	0,12500	0,03125	0,50000	0,35355	0,50000	0,39528
5		0,20000	0,10000	0,12500	0,25000	0,12500	0,01875	0,44721	0,35355	0,50000	0,37914
6		0,12500	0,06250	0,12500	0,25000	0,12500	0	0,35355	0,35355	0,50000	0,35355
7	3	0,98835	0,33744	0,07322	0,12500	0,06250	0,10271	0,99416	0,27059	0,35355	0,40646
8		0,49707	0,16971	0,07322	0,12500	0,06250	0,04544	0,70503	0,27059	0,35355	0,32854
9		0,33201	0,11335	0,07322	0,12500	0,06250	0,02620	0,57620	0,27059	0,35355	0,29783
10		0,24927	0,08511	0,07322	0,12500	0,06250	0,01656	0,49927	0,27059	0,35355	0,28118
11		0,16635	0,05680	0,07322	0,12500	0,06250	0,00689	0,40786	0,27059	0,35355	0,26342
12		0,11096	0,03787	0,07322	0,12500	0,06250	0,00044	0,33311	0,27059	0,35355	0,25091
13	4	0,99998	0,24999	0,04167	0,06250	0,03125	0,05729	0,99999	0,20413	0,25000	0,29756
14		0,50000	0,12500	0,04167	0,06250	0,03125	0,02604	0,70711	0,20413	0,25000	0,23935
15		0,33327	0,08332	0,04167	0,06250	0,03125	0,01562	0,57730	0,20413	0,25000	0,21649
16		0,25000	0,06250	0,04167	0,06250	0,03125	0,01042	0,50000	0,20413	0,25000	0,20413
17		0,14287	0,03571	0,04167	0,06250	0,03125	0,00372	0,37798	0,20413	0,25000	0,18702
18		0,08333	0,02083	0,04167	0,06250	0,03125	0	0,28867	0,20413	0,25000	0,17678

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Технические характеристики приборов

Таблица В.1 - Технические характеристики прибора «Surftest» (Япония)

Модель	SJ- 210 P
№	178930 – 2 D
Назначение	Измерение шероховатости поверхностей
Диапазон измерений	
По оси Z	350 мкм
По оси X	12,5 мм
Блок привода	
Скорость измерения	0,25 мм/сек; 0,5 мм/сек
Скорость возврата	0,8 мм/сек
Длина кабеля	1 м
Масса	190 г
Датчик	
Тип	Стандартный (178 – 395)
Метод измерений	Индуктивный метод
Диапазон измерений	350 мкм
Щуп	Алмазный наконечник
Радиус	2 мкм
Радиус опоры	40 мм
Измерительное усилие	0,75 мН
Масса	18 г
Дисплейный блок	
Профили	Исходный профиль (P), Профиль шероховатости (R), DIN 4776
Параметры	Ra, Ry, Rz, Rt, Rp, Sm, S, Pc, R3z, mr, A1, A2, Rq, Rk, Rpk, Rvk, Mr 1, Mr 2, Vo
Аналитические графики	-
Стандарты шероховатости	DIN, ISO, ANSI, JIS
Длина оценки (L)	0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм
Отсечка шага	lc: 0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм ls: 2,5 мкм, 8 мкм
Число базовых длин	x 1, x 3, x 5, x L
Фильтр	2CR – 75%, 2CR – 75% (фазокорректированный фильтр), Гауссов фильтр
Вертикальное увеличение изображения на дисплее	-

Таблица В.2 - Технические характеристики лабораторных весов ВЛТЭ-310

Характеристика	Значение
Максимальная нагрузка, г	310
Минимальная нагрузка, г	0,02
Цена деления, г	0,001
Размер чашки, мм	Ø116
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 В.3 - Технические характеристики прибора ПМТ-3

Характеристика	Значение
Диапазон нагрузки, Н	0,0196...4,9
Диапазон нагрузки, КГС	0,002...0,5
Увеличение микроскопа, крат	130, 500, 800
Цена деления шкал координатного перемещения, мм	0,01
Пределы координатного перемещения, мм	0...10
Размеры Ш x Д x В, мм	270x290x470
Масса, кг, не более	22

Таблица В.4 - Технические характеристики сварочного аппарата Транс ТИГ-500

Наименование параметра	Значение
1	2
Напряжение питающей сети, В	2x380
Частота питающей сети, Гц	50
Номинальный сварочный ток в режиме ММА, А	400
Номинальное рабочее напряжение в режиме ММА, В	36
Номинальный режим работы в ММА (ПН) при цикле 10 мин., %	100
Наименьший сварочный ток в режиме ММА, А	25
Наибольший сварочный ток в режиме ММА, А	400
Пределы регулирования рабочего напряжения в режиме ММА, В	21-36
Диаметр штучного электрода, мм	2-8
Номинальный сварочный ток в режиме ТИГ, А	500
Номинальное рабочее напряжение в режиме ТИГ, В	30
Номинальный режим работы в ТИГ (ПВ) при цикле 10 мин., %	60
Наименьший сварочный ток в режиме ТИГ, А	10
Наибольший сварочный ток в режиме ТИГ, А	500
Пределы регулирования рабочего напряжения в режиме ТИГ, В	10,4-30
Диаметр вольфрамового электрода, мм	0,8-8
Напряжение холостого хода в режиме DC, В, не более	100
Напряжение холостого хода в режиме AC, В, не более	70
Регулирование сварочного тока	плавное
Потребляемая мощность, при номинальном токе, кВА, не более	37
Номинальный ток главных цепей автомата защиты (с характеристикой срабатывания электромагнитного расцепителя "D"), А	100

Таблица В.5 – Технические характеристики универсальной испытательной машины ZwickRoell Z100

Описание	Значение	
Тип	RetroLine tC II для Z100 TL	
	настольная модель	
Арт.-№	1012080	
Усилие испытания Fmax	100	кН
Высота рабочей зоны	1360	мм
Ширина рабочей зоны	640	мм
Окружающая температура	+10 ... +35	°С
Привод		
Мощность привода	4	кВт
Мотор	АС-сервомотор с концентрированной обмоткой, система, Hiperface® Motorfeedback	
Активация, ввод заданных значений	цифровой (в реальном времени, Ethernet, EtherCAT®)	
Скорость траверсы Vmin ... Vmax	0,001 ... 200	мм/мин
Регулятор	адаптив.	
Параметры подключения сетевого входа		
Вариант	4	кВт
Подключение к сети	400	В, 3Ph/N/PE
Допустимое колебание в сети напряжения	±10	%
Потребляемая мощность (полная нагрузка), примерно	6	кВА
Частота в сети	50/60	Гц

Таблица В.6 - Технические характеристики поляризационного микроскопа Leica DM2700P

Параметр прибора	Значение
1	2
Напряжение в сети электропитания	90 – 250 В переменного тока 12V 100 W
Частота	50 – 60 Гц
Потребляемая мощность не более	160 ВА
Плавкие предохранители	F 3 15 A 250 V
Категория перенапряжения	II
Метод контрастирования	Проходящий свет: светлое/темное поле, фазовый контраст, поляризация, интерференционный контраст. Отражённый свет: флуоресценция.
Оси проходящего света	Осветитель в отдельном корпусе. Вручную устанавливается: интенсивность освещения, апертурная диафрагма, полевая диафрагма.
Оси отражённого света	Флуоресцентный осветитель отражённого света для окуляров с полем зрения до 22 мм включает: пятипозиционный револьвер для фильтров; центрируемые апертурную и полевую диафрагмы; заслон для подавления излишнего света; серый фильтр и заслонка светового пучка (переключаемые)
Тубус	Фиксированный/варьируемый угол зрения. До 3 положений включения.
Смена увеличений	Ручная Пошаговая: 1x; 1,5x; 2x
Револьверная турель смены объективов	Ручная 6-ти позиционная для объективов с резьбой M25 пластина призмы объектива.
X/Y столик	С держателем конденсора. Телескопическая ручка перемещения столика, устанавливаемая справа или слева Право/левостороннее управление
Конденсор	CL/PH 0,90/1,25 OIL Конденсор с цветным кодированием CLP/PH 0,85 Конденсор для поляризации Ахроматический конденсор A 0,9 (p) конденсор с шарнирной верхушкой UCL 0,60/1,25 OIL универсальный конденсор UCPL 0,85 для поляризации с 5-ти позиционным диском для световых колец) UCL/P pol Универсальный конденсор с заменяемой верхушкой конденсора и диском на 6 позиций
Фокусировка	Колесо фокусировки для грубой/точной фокусировки Регулировка высоты Скорость включения Два режима установки шага точной фокусировки (1 и 4 мкм)

Таблица В.7 – Технические характеристики сканирующего нанотвердомера «Наноскан»

Режимы измерений	<ol style="list-style-type: none"> 1. Контактный динамический режим сканирования 2. Индентирование / склерометрия 3. Силовая спектроскопия 4. Динамическое наноиндентирование
Диапазон нагрузок	0,1-100 мН
Измеряемые значения твердости	до 80 ГПа
Измеряемые значения модуля упругости	до 1000 ГПа
Поле сканирования XY	100 мкм
Максимальный перепад высот Z в области сканирования	10 мкм
Шаг по XY	1,5 нм
Шаг по Z	0,15 нм
Кантилевер	пьезо-кантилевер
Инденторы	алмазная пирамида типа Берковича
Оптическая система высокого разрешения	видеомикроскоп с регулировкой увеличения 260x-1800x
Размер образцов	<p>до 100x100 мм до 80 мм по высоте до 3 кг по весу</p>
Система позиционирования образцов	<p>XY: до 100 мм с шагом 1 мкм, моторизованная Z: до 80 мм с шагом 40 нм, моторизованная</p>

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Патенты на способ магнитно-абразивной обработки

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2751392

СПОСОБ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

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

Авторы: *Максаров Вячеслав Викторович (RU), Кексин Александр Игоревич (RU), Филипенко Ирина Анатольевна (RU), Щеглова Радмила Алексеевна (RU)*

Заявка № 2020140484

Приоритет изобретения **09 декабря 2020 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **13 июля 2021 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **09 декабря 2040 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 0402A5CF6C00B7ACF59440A2F08092EA118
Владелец **Ивлиев Григорий Петрович**
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 751 392** ⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
B24B 31/112 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B24B 31/112 (2021.05)

(21)(22) Заявка: 2020140484, 09.12.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
09.12.2020Дата регистрации:
13.07.2021Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 09.12.2020

(45) Опубликовано: 13.07.2021 Бюл. № 20

Адрес для переписки:
199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
СПГУ, Патентно-лицензионный отдел(72) Автор(ы):
Максаров Вячеслав Викторович (RU),
Кексин Александр Игоревич (RU),
Филипенко Ирина Анатольевна (RU),
Щеглова Радмила Алексеевна (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 2710085 C1, 24.12.2019. SU
1689042 A1, 07.11.1991. SU 1614906 A1,
23.12.1990. UA 18814 A, 25.12.1997. DE 3634409
A, 21.04.1988.

(54) СПОСОБ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к обработке материалов резанием и может быть использовано при магнитно-абразивной обработке кромок изделий. При магнитно-абразивной обработке кромки изделия используют три синхронно вращающихся полюсных наконечника, два из которых расположены относительно боковых поверхностей и один - относительно торцевой поверхности кромки изделия. Двум полюсным наконечникам, обрабатывающим боковые поверхности кромки изделия, задают вращение в противоположных направлениях. Третьему

полюсному наконечнику задают вращение из условия, что в первой области пересечения торцевой и боковой поверхности кромки изделия и во второй области пересечения торцевой и боковой поверхности кромки изделия магнитно-абразивное воздействие обеспечено посредством встречного движения торцевого и боковых полюсных наконечников. Обеспечивается равномерное снятие материала в данных областях и формируется симметричность геометрической формы одного угла кромки относительно другого. 3 ил., 1 пр.

RU 2 751 392 C 1

RU 2 751 392 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2710085

СПОСОБ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

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

Авторы: *Максаров Вячеслав Викторович (RU), Кексин Александр Игоревич (RU), Филипенко Ирина Анатольевна (RU)*

Заявка № 2019129384

Приоритет изобретения 17 сентября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 24 декабря 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 17 сентября 2039 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 710 085**⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
B24B 31/112 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B24B 31/112 (2019.08)

(21)(22) Заявка: 2019129384, 17.09.2019

(24) Дата начала отчета срока действия патента:
17.09.2019Дата регистрации:
24.12.2019Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 17.09.2019

(45) Опубликовано: 24.12.2019 Бюл. № 36

Адрес для переписки:
199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский горный
университет", Патентно-лицензионный отдел(72) Автор(ы):
Максаров Вячеслав Викторович (RU),
Кексин Александр Игоревич (RU),
Филипенко Ирина Анатольевна (RU)(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет" (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: SU 1284799 A1, 23.01.1987. SU 872220
A1, 25.10.1981. SU 1060440 A, 15.12.1983. JP
61257758 A, 15.11.1986.

(54) СПОСОБ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к магнитно-абразивной обработке машиностроительных изделий, в частности к обработке кромок изделий перед сваркой. Способ включает одновременную обработку торцевой и боковых поверхностей кромки изделия при совершении изделием возвратно-поступательного движения в магнитно-абразивной массе, сформированной двумя синхронно вращающимися полюсными наконечниками относительно двух боковых поверхностей кромки изделия. Дополнительно используют третий полюсной наконечник,

которому задают синхронное вращательное движение относительно торцевой поверхности кромки изделия в плоскости, перпендикулярной плоскостям двух синхронно вращающихся полюсных наконечников. Последние расположены относительно двух боковых поверхностей на одном уровне с пересечением плоскостей торцевой поверхности и боковых поверхностей кромки изделия. В результате обеспечивается равномерная, одновременная и бездефектная обработка кромки изделия перед сваркой. 2 ил.

RU 2 710 085 C 1

RU 2 710 085 C 1

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акты о промышленном опробовании способа магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий перед сваркой



Производственное Объединение
ЭЛЕКТРОМАШИНА

Утверждаю:
Заместитель генерального директора
по новой технике и технологии
Михайлюков Е.Г. Михайлюкова
04/04 2022 г.



АКТ
о промышленном опробовании
результатов кандидатской диссертационной работы
Филипенко Ирины Анатольевны

Комиссия в составе:

Председатель: главный инженер – Моисеенко Н.И.

Члены комиссии: ведущий инженер-технолог – Баширов М.Н.

мастер ремонтно-механического цеха – Крупкин Д.Д.

составили настоящий акт о том, что проведены в промышленных условиях производственные испытания результатов диссертационной работы Филипенко И.А. «Технологическое повышение качества кромок листового проката из алюминиевого сплава марки АМц методом магнитно-абразивной обработки». Испытания проводились на сварных соединениях плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц с предварительной подготовкой кромок ручным абразивным инструментом и с применением метода магнитно-абразивной обработки. Магнитно-абразивная обработка производилась с режимными параметрами: магнитная индукция $B=0,5$ Тл, время обработки $t=6$ мин, подача $S=175$ мм/мин, частота вращения $n=225$ мин⁻¹.

Сварка осуществлялась на установке Транс ТИГ 500 аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом в среде инертных газов аргон с одинаковыми режимами. Сварные соединения подвергались механическим испытаниям на разрыв, которые позволили оценить предел прочности. Установлено, что сварные соединения, кромки которых подготовлены методом магнитно-абразивной обработки с вышеуказанными режимными параметрами, имеют предел прочности в 1,5 раза выше, чем сварные соединения с подготовкой кромок ручным абразивным инструментом. Анализ причин разрушения сварных соединений, кромки которых подготовлены с применением ручного абразивного инструмента, показал, что локальным концентратором напряжений и местом разрушения швов в большинстве испытаний являлись неметаллические включения оксида алюминия в корне шва, находящегося на поверхности свариваемых кромок.

Таким образом, сравнительные испытания показали целесообразность применения способа обработки кромок плоских изделий методом магнитно-абразивной обработки, обеспечивающего шероховатость поверхности $Ra=0,23\pm 0,32$ мкм и не оказывающего влияние высоких температур на поверхность обработки, уменьшая тем самым повторный рост оксидной пленки после обработки.

Председатель: главный инженер

Члены комиссии: ведущий инженер-технолог

мастер ремонтно-механического цеха

Моисеенко Моисеенко Н.И.

Баширов Баширов М.Н.

Крупкин Крупкин Д.Д.



Акционерное общество высоковольтного
оборудования «Электроаппарат»
(АО ВО «Электроаппарат»)
ИНН 7801032688; ОГРН 1027800510638

24-я линия В.О., д. 3-7, литер И, офис 1
Санкт-Петербург, 199106, Россия
8 (812) 677-83-83; box@ea.spb.ru
www.elektroapparat.ru

АКТ
о промышленном опробовании
результатов кандидатской диссертационной работы
Филипенко Ирины Анатольевны

На предприятии АО ВО «Электроаппарат» были проведены производственные испытания результатов диссертационной работы Филипенко И.А. «Технологическое повышение качества кромок листового проката из алюминиевого сплава марки АМц методом магнитно-абразивной обработки». Для испытаний применялись три партии пластин из алюминиевого сплава марки АМц:

1. Кромки пластин подвергались предварительной магнитно-абразивной обработке с режимными параметрами: магнитная индукция $B=0,5$ Тл, время обработки $t=6$ мин, подача $S=175$ мм/мин, частота вращения $n=475$ мин⁻¹;

2. Кромки пластин подвергались предварительной магнитно-абразивной обработке с режимными параметрами: магнитная индукция $B=0,8$ Тл, время обработки $t=10$ мин, подача $S=75$ мм/мин, частота вращения $n=225$ мин⁻¹;

3. Кромки пластин подвергались предварительной механической обработке ручным абразивным инструментом.

Далее пластины сваривались между собой попарно внутри партии аргонодуговой сваркой неплавящимся электродом в среде инертного газа аргон. Оценка качества сварного соединения оценивалась по критерию прочности методом механических испытаний на разрыв. Испытания показали:

- Предел прочности сварного соединения пластин, кромки которых предварительно подвергались магнитно-абразивной обработке в 1,2-1,5 раза выше, чем сварные соединения пластин, кромки которых подготавливались ручным абразивным инструментом, причем предел прочности сварных соединений пластин из первой партии выше, чем из второй;

- Работа разрушения сварных соединений, кромки которых подготовлены с применением метода магнитно-абразивной обработки увеличивается в 2 раза, по сравнению со сварными соединениями пластин, кромки которых подготовлены с применением ручного абразивного инструмента.

Полученные результаты сравнительных испытаний показали целесообразность применения способа магнитно-абразивной обработки и рекомендованных режимных параметров в качестве подготовительной операции кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц перед сваркой.

Главный конструктор



Карпов А.Л.



Система менеджмента качества соответствует
требованиям стандарта ГОСТ Р ИСО 9001-2015.
Сертификат №21.1624.026 выдан Ассоциацией
по сертификации «Русский Регистр» 05.09.2021



Система менеджмента качества соответствует
требованиям стандарта СТО Газпром 9001-2018.
Сертификат ОГН1.RU.1401.K00225 выдан Ассоциацией
по сертификации «Русский Регистр» 28.04.2021

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Акт внедрения результатов диссертации в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
деятельности федерального
государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Санкт-Петербургский горный
университет»

_____, д.т.н., доц. Д.Г. Петраков

_____ 03 _____ 2022 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования

Настоящим актом подтверждается внедрение результатов диссертационного исследования Филипенко Ирины Анатольевны «Технологическое повышение качества кромок листового проката из алюминиевого сплава марки АМц методом магнитно-абразивной обработки», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 05.02.08 – Технология машиностроения в учебный процесс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Разработанный автором способ магнитно-абразивной обработки кромок листового проката из алюминиевого сплава предлагается для изучения на практических занятиях при обучении 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, обучаются работе на устройстве, базирующемся на фрезерном станке с ЧПУ Emco Concept Mill 250, изучают способ обработки кромок изделий из алюминиевых сплавов, позволяющий уменьшить шероховатость поверхности в 6-8 раз, а дальнейшее сваривание данных поверхностей увеличивает прочность сварного соединения в 1,5 раза, а также учатся определять рациональные режимные параметры обработки.

Декан
механико-машиностроительного
факультета, д.т.н., проф.



V.V. Максаров

Заведующий кафедрой
машиностроения, д.т.н., проф.



V.V. Максаров