

*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*

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

Санкт-Петербург – 2022

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

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

*Максаров Вячеслав Викторович*

**Официальные оппоненты:**

*Петров Владимир Маркович*

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

*Дмитриев Сергей Иванович*

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Псковский государственный университет», кафедра инженерных технологий и техносферной безопасности, доцент.

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

Защита диссертации состоится 15 сентября 2022 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 15 июля 2022 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ  
Иван Евгеньевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**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.

Технологии магнитно-абразивной обработки и ее влиянию на поверхностный слой изделий посвящены исследования ряда отечественных и зарубежных ученых: Ю.М. Барона, Н.Я. Скворчевского, В.И. Ждановича, Л.М. Кожуро, Е.Г. Коновалова, В.Е. Оливера, Н.С. Хомича, П.И. Ящерицына, Ф.Ю. Сакулевича, Т. Shinmura, K. 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, Ф.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 замена трудоемкого технологического процесса механической подготовки кромок изделий из алюминиевого сплава АМц, что является актуальной технологической задачей, требующей своего решения.

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

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. 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 лабораторных экспериментов на установке для магнитно-абразивной обработки, базируемой на фрезерном станке с ЧПУ *Emco Concept Mill 250*; результатами промышленного опробования на производственных предприятиях АО ВО «Электроаппарат» и ООО «ПО «Электромашина», а также апробацией результатов исследований на всероссийский 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. BHT 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 «Фундаментальные научные исследования» № 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 систему цитирования Scopus. Получено 2 патента.

**Структура работы.** 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.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен аналитический обзор научно-технической литературы по вопросу эксплуатации сварных изделий из алюминиевого сплава марки АМц и выявлению основных дефектов, приводящих к разрушению конструкций.

Выполненный обзор показал, что применение алюминиевого сплава марки АМц имеет широкую номенклатуру, в особенности при

изготовлении сварных изделий, например, корпус элегазового трансформатора. Сварка алюминиевых изделий затруднена наличием устойчивого оксидного слоя на поверхности изделия, образующегося моментально при контакте поверхности с кислородом, толщина которого зависит от внешних воздействий на поверхность. Оксидная пленка, имея температуру плавления много выше основного металла, остается в качестве неметаллических включений в корне шва, являясь локальным концентратором напряжений, нарушая сплошность шва и являясь очагом разрушения конструкции (рисунок 1).

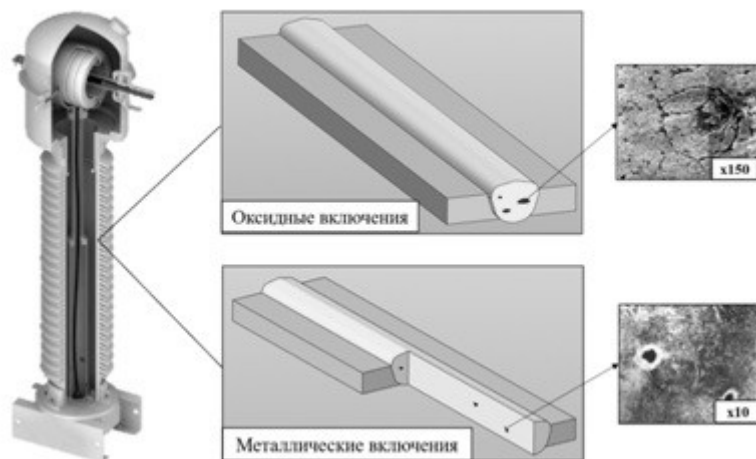


Рисунок 1 – Дефекты сварного соединения алюминиевого корпуса

Удаление оксидной пленки с поверхности кромок, а также иных загрязнений, производится при помощи механических и химических методов. Их основными недостатками являются температурные и химические воздействия на поверхность кромок, которые могут катализировать рост оксидной пленки, создавая толщину, превышающую исходную.

В связи с этим, для решения данной проблемы предлагается применять метод магнитно-абразивной обработки, который характеризуется низкой температурой резания и позволяет удалять образованный ранее оксидный слой, уменьшать площадь окисления поверхности, а также способствовать формированию оксидной пленки

меньшей толщины. Однако магнитно-абразивная обработка плоских поверхностей изделий из алюминия марки АМц до настоящего времени не проводилась.

На основе проведенного анализа обоснован выбор объекта и предмета исследования, сформулирована цель и поставлены задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** представлены теоретические и экспериментальные исследования по разработке способа магнитно-абразивной обработки кромок плоских изделий из алюминиевого сплава, которые заключались в определении: схемы обработки, рабочих движений и их сочетаний; материала и количества абразивного порошка; состава смазочно-охлаждающей жидкости; а также диапазонов технологических параметров обработки, в рамках которых в последующем будут производиться комплексные экспериментальные исследования.

При определении схемы, рабочих движений и их сочетаний для бездефектной магнитно-абразивной обработки кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц установлено, что сочетание главного движения, обеспечивающего силу резания ( $V_p$ ) в процессе обработки, возвратно-поступательного движения заготовки вдоль полюсных наконечников ( $V_n$ ) и осциллирующего движения ( $V_o$ ) является наиболее эффективным (рисунок 2).

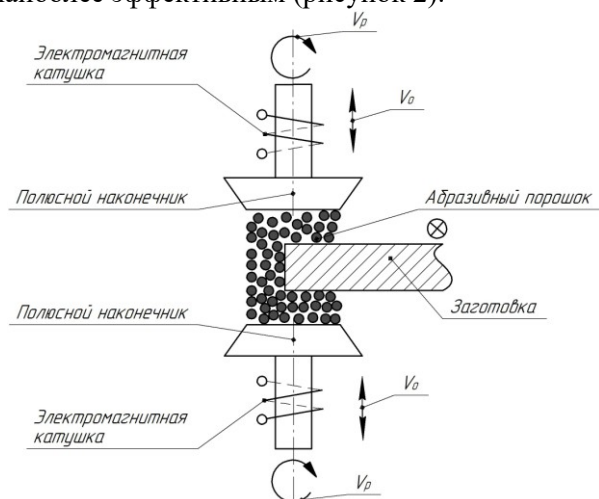


Рисунок 2 – Способ магнитно-абразивной обработки

На основании теоретических и экспериментальных исследований установлено, что магнитно-абразивную обработку кромок плоских изделий из алюминиевого сплава АМц следует проводить с применением абразива марки Пр10Р6М5 (фракция  $\Delta=50-250$  мкм) и масляных водорастворимых смазочно-охлаждающих жидкостей на эмульсионной основе.

При определении диапазона технологических параметров магнитно-абразивной обработки, в рамках которых в последующем будут производиться экспериментальные исследования, установлено, что значения технологических параметров будут варьироваться: главное движение - частота вращения заготовки ( $n$ , мин<sup>-1</sup>) в диапазоне значений  $n=150-600$  мин<sup>-1</sup>; возвратно-поступательное движение - скорость подачи заготовки ( $S$ , мм/мин) в диапазоне значений  $S=50-150$  мм/мин; время обработки в пределах  $t=6-10$  мин; величина магнитной индукции в диапазоне  $B=0,5-0,8$  Тл.

Разработанный способ реализован на установке для магнитно-абразивной обработки на базе фрезерного станка с ЧПУ (рисунок 3).



Рисунок 3 – Магнитно-абразивная обработка: а) – установка на станке с ЧПУ; б) – процесс обработки изделия

Рассматривая предлагаемый способ, стоит отметить, что эффект скольжения абразивных частиц о поверхность обрабатываемого материала наблюдается равномерно с боковых и торцевых сторон, обеспечивая бездефектность обработки. Скольжение частиц обеспечивает микрорезание и формирует качество обработанной поверхности, сгла-

живая микронеровности и исключая микроудар абразивных частиц о поверхность заготовки.

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

**В третьей главе** на основании разработанного способа, выявленных диапазонов технологических параметров, рабочей технологической среды для дальнейшего создания технологии проводились экспериментальные исследования по определению основных процессов, оказывающих влияние на формирование качества поверхности, толщину снимаемого материала и удельный съем материала с единицы площади при магнитно-абразивной обработке изделий из алюминиевого сплава АМц. Для проведения экспериментальных исследований и составления регрессионных математических зависимостей применялась методика центрального композиционного ротатбельного планирования.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что применение разработанной схемы магнитно-абразивной обработки, сочетания рабочих движений ( $Vp+Vn+Vo$ ), установленных диапазонов технологических параметров ( $n=150-600$  мин<sup>-1</sup>,  $S=50-150$  мм/мин,  $t=6-10$  мин,  $B=0,5-0,8$  Тл), определенного технологического инструмента (порошка Пр10Р6М5 фракцией  $\Delta=50-250$  мкм и масляных водорастворимых смазочно-охлаждающих жидкостей на эмульсионной основе) позволяет обеспечить шероховатость поверхностей кромок  $Ra=0,23$  мкм, а толщина снимаемого материала в диапазоне  $h=9-14$  мкм позволяет обеспечить полное удаление оксидного и дефектного слоя с обрабатываемой поверхности, а также произвести равномерную бездефектную обработку. Удельный съем материала с единицы площади варьируется в диапазоне  $q = 0,9-14 \cdot 10^{-3}$  мг/см<sup>2</sup>. Экспериментально установлено, что толщина оксидной пленки на поверхности после механической резки составляет 100 нм, толщина пленки после магнитно-абразивной обработки не превышает 30 нм.

На основании полиномиальных функций (рисунок 4), а также статистического анализа результатов экспериментов установлено, что на процесс формирования шероховатости поверхности в процессе магнитно-абразивной обработки особое влияние оказывает скорость подачи заготовки, магнитная индукция и затем время обработки. Также, при анализе количества снимаемого материала, из которого следует толщина снимаемого материала и значение

удельного съема материала с единицы площади, выявлено, что наибольшее значение имеет фактор величины магнитной индукции, второстепенную позицию, однако близкую к первой по значимости, занимает время обработки и затем частота вращения заготовки.

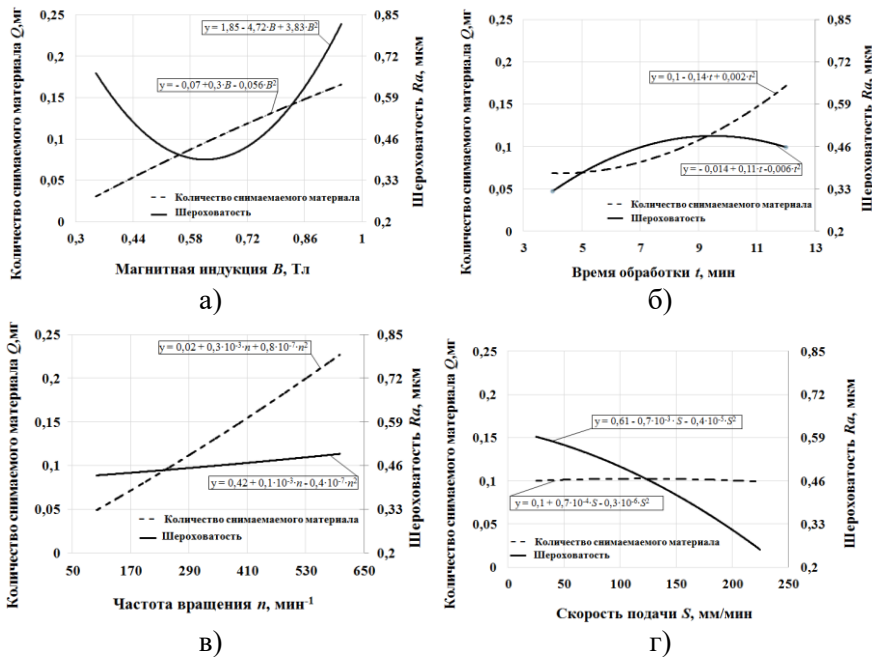


Рисунок 4 – Обобщающие полиномиальные графические модели влияния технологических факторов на шероховатость поверхности и количество снимаемого материала: а) - магнитная индукция; б) - время обработки; в) - частота вращения, г) - скорость подачи

По результатам проведенных исследований была выполнена статистическая обработка экспериментальных данных, которая позволила получить следующие регрессионные математические зависимости, учитывающие влияние технологических параметров магнитно-абразивной обработки и позволяющие получить значения шероховатости поверхности, толщины снимаемого материала и удельного съема материала с единицы площади при обработке плоских изделий из алюминиевого сплава марки АМц:

1. Шероховатость поверхности, мкм (1):

$$Ra = 1,31 - 4,36B + 0,16t - 0,62n \cdot 10^{-3} + 0,3S \cdot 10^{-3} - 0,37tS \times 10^{-3} + 0,61nS \cdot 10^{-5} + 3,55B^2 - 0,006t^2 - 0,4S^2 \cdot 10^{-5}. \quad (1)$$

2. Толщина снимаемого материала, мкм (2):

$$h = 61 + 54,7B - 10,6t - 0,1n + 7,13Bt + 0,134Bn + 0,008tn + 0,41t^2. \quad (2)$$

3. Удельный съем материала с единицы площади, мг/см<sup>2</sup> (3):

$$q = 0,016 - 0,016B - 2,8t \cdot 10^{-3} - 0,27n \cdot 10^{-4} + 0,002Bt + 0,37Bn \times 10^{-4} + 0,2tn \cdot 10^{-5} + 0,11t^2 \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

Таким образом, полученные результаты во второй и третьей главе данной диссертационной работы, являются основой для подготовки кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц с применением способа магнитно-абразивной обработки перед сваркой.

**В четвертой главе** описаны экспериментальные исследования по определению влияния способа подготовки и состояния поверхности кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц на прочность и дефектность сварного соединения. Исследования проводились на образцах, кромки которых подготовлены с применением ручного абразивного инструмента и методом магнитно-абразивной обработки с обеспечением шероховатости поверхности  $Ra=0,23$  мкм и  $Ra=0,79$  мкм, сваренных дуговой сваркой неплавящимся электродом в среде инертного газа аргон с одинаковыми режимными параметрами.

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 (рисунок 5), в сравнении с образцами, кромки которых были подготовлены с применением ручного абразивного инструмента, в структуре шва которых наблюдалось большое количество включений оксидной пленки (рисунок 6).

Результаты механических испытаний серий образцов, кромки которых подготовлены с применением ручного абразивного инструмента (рисунок 7 а) и с применением способа магнитно-абразивной обработки (рисунок 7 б, в) показали, что применение способа магнитно-абразивной обработки позволяет повысить прочность сварного соединения в 1,1 - 1,6 раз, а работу разрушения в 1,7 - 4,5 раза.

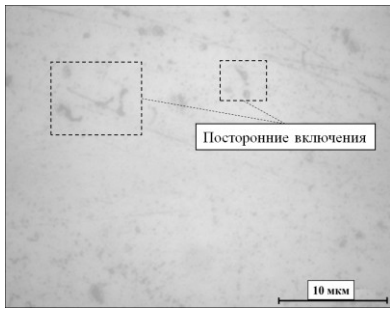


Рисунок 5 – Микроструктура сварного соединения обработкой кромок магнитно-абразивным способом

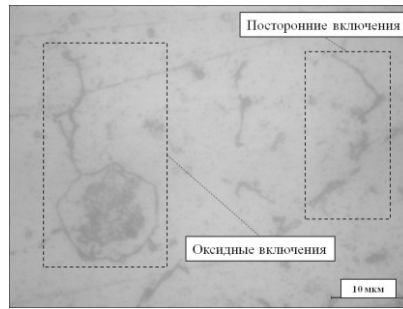
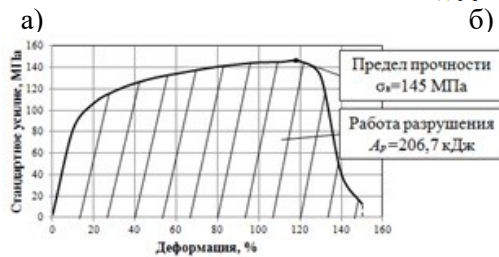
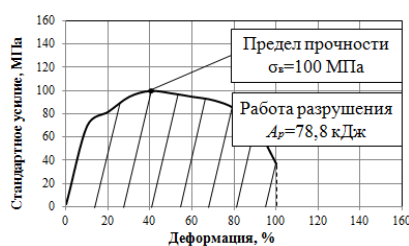
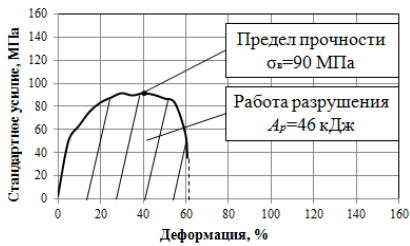


Рисунок 6 – Микроструктура сварного соединения с механически обработанными кромками



в)

Рисунок 7 – Результаты серии испытаний образцов сварных соединений на растяжение, кромки которых подготовлены: а – ручным абразивным инструментом; б – магнитно-абразивным способом с обеспечением шероховатости  $Ra=0,79$  мкм; в – магнитно-абразивным способом с обеспечением шероховатости  $Ra=0,23$  мкм



По итогам проведенных экспериментальных исследований даны следующие рекомендации по выбору технологических параметров магнитно-абразивной обработки: магнитная индукция  $B=0,5-0,6$  Тл, время обработки  $t=4-6$  мин, скорость подачи  $S=125-175$  мм/мин, частота вращения  $n=225-475$  мин<sup>-1</sup>, которые позволяют обеспечить 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.

### 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 в наибольшей степени являются дефекты, вызванные некачественной подготовкой кромок. Существующие методы подготовки кромок изделий перед сваркой не позволяют обеспечить качественную зачистку поверхностей.

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

3. Разработанный способ включает в себя разработанную схему обработки, сочетание рабочих движений  $V_p$ ,  $V_n$ ,  $V_o$  с диапазонами значений  $n=225-475$  мин<sup>-1</sup>,  $S=75-175$  мм/мин.

4. Разработан технологический инструмент, включающий применение однородного абразивного порошка марки Пр10Р6М5 с фракцией  $\Delta=50-250$  мкм; применение масляных водорастворимых смазочно-охлаждающих жидкостей на эмульсионной основе; диапазон магнитной индукции  $B=0,5-0,8$  Тл.

5. Установлено, что на формирование шероховатости поверхности кромок изделий из алюминиевого сплава марки АМц в процессе магнитно-абразивной обработки наибольшее влияние оказывает значение подачи, на удельный съём материала с единицы площади и толщину снимаемого материала величины значений магнитной индукции, времени обработки и частоты вращения.

6. Получены регрессионные математические зависимости, позволяющие определить значения шероховатости поверхности, удельного съёма материала с единицы площади и толщины снимаемого материала в зависимости от: величины 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 удалить 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 в сравнении с исходной.

8. Применение способа магнитно-абразивной обработки в качестве предварительной операции по зачистке кромок перед сваркой позволяет обеспечить однородность сварного соединения, избежать включений оксидной пленки в корне шва, 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<sup>-1</sup>.

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.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. 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.

2. 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. 44-45.

3. 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.

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

4. Keksin, A.I. Oil and gas sector products cold working process / A.I. Keksin, **I.A. Filipenko** // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources 2019. – 2019. – Issue 1. – pp. 400-405.

5. 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** // Key Engineering Materials. – 2020. – Volume 834. – pp. 71-77.

*Публикации в прочих изданиях:*

6. **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.

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

8. **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.

9. **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.

10. **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.

11. 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.

12. **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.

13. 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.

*Патенты:*

14. 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 СПбГУ. – 9 с. : ил.

15. 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 СПбГУ. – 11 с. : ил.