

*На правах рукописи*

**Ефимова Мария Владимировна**



**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА  
ПОВЕРХНОСТИ СОПРЯГАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ  
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ  
АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ  
ОБРАБОТКИ**

*Специальность 2.5.6. Технология машиностроения*

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

Санкт-Петербург – 2026

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

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

*Максаров Вячеслав Викторович*

**Официальные оппоненты:**

*Бреки Александр Джалильевич*

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», международный научно-образовательный центр «BaltTribo-Polytechnic», профессор;

*Дмитриев Сергей Иванович*

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Псковский государственный университет», отделение инженерных технологий Передовой инженерной школы гибридных технологий в станкостроении Союзного государства, руководитель.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **30 июня 2026 г. в 10:00** на заседании диссертационного совета ГУ.9 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, аудитория № 3321

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 30 апреля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ЕФИМОВ  
Александр Евгеньевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Алюминиевые сплавы применяются в конструкциях летательных аппаратов благодаря оптимальному соотношению веса и прочности, но стоит отметить, что эти материалы склонны к созданию концентраторов напряжений и быстрому развитию трещин от краёв отверстий под заклепочные соединения. К тому же из-за высокой отражательной способности раскрой листового материала лазерной резкой приводит к большому количеству неровностей на поверхности кромок, что требует финишной обработки для обеспечения качества неразъемных соединений летательных аппаратов. Кроме этого, шероховатость листов из алюминиевого сплава, например АМг6 после прокатки сама по себе не является стабильной величиной. Она во многом зависит от конкретных условий обработки: режимов самой прокатки (горячей или холодной), степени обжата, смазки, а также последующей термической обработки (например, отжига). Поэтому образование исходной шероховатости листа после прокатки – это технологический параметр, который может колебаться в довольно широких пределах  $Ra$  от 0,44 до 3 мкм.

Надежное скрепление листового материала в авиастроении осуществляется при помощи заклёпочных соединений, которые являются критически важными элементами конструкции и от которых зависит прочность летательных аппаратов.

Однако воздействие циклических нагрузок, вибрации, агрессивных сред и температурных перепадов приводят к возникновению усталостных трещин, снижающих прочность конструкции. Особую опасность представляют трещины в высоконагруженных элементах планера (крылья, фюзеляж), поскольку их развитие способно привести к катастрофическим последствиям. Долговечность фюзеляжа определяется, прежде всего, усталостными разрушениями, 85% из которых приходится на заклепочные соединения.

Развитие трещин в заклёпочных соединениях алюминиевых сплавов – существенная проблема авиационной безопасности. Современные методы обработки должны предотвращать катастрофические разрушения, соответственно дальнейшие исследования требуют внедрения новых или совершенствования существующих

технологий обработки материалов для повышения долговечности соединений, сопрягаемых изделий летательных аппаратов.

#### **Степень разработанности темы исследования**

Проблема обеспечения качества и долговечности неразъёмных соединений в конструкциях летательных аппаратов является традиционной для авиастроения и характеризуется высокой степенью изученности в части общих принципов и классических технологических решений.

Современные исследования характеризуются смещением акцентов в сторону решения прикладных задач повышения ресурса, технологичности и адаптации к новым материалам. В работах Г.Ф. Рудзей всесторонне исследовано влияние технологически наведённых остаточных напряжений на усталостную долговечность, предложены методы целенаправленного формирования сжимающих напряжений в зоне концентраторов. М.А. Чеканов решал задачу повышения производительности сборки за счёт применения новых конструкций заклёпок, исключая операцию сверления. Важным направлением является развитие методов неразрушающего контроля, позволяющих перейти к эксплуатации по техническому состоянию. Исследования А. Махамат Сейда посвящены разработке ультразвуковых методик для оценки натяга и выявления дефектов, что является основой для прогнозирования ресурса соединений. Особую актуальность приобретают исследования, связанные с применением полимерных композиционных материалов (ПКМ). Работы Сажина А.Н. и Н.А. демонстрируют разработку перспективного крепежа из углекомпозиатов, направленного на устранение проблем электрохимической коррозии и снижение массы.

Таким образом, проблема обладает глубокой теоретической и практической базой. Однако комплексное решение задач по дальнейшему повышению ресурса соединений и технологического обеспечения качества остаётся актуальным. Одним из таких направлений является магнитно-абразивная обработка. При этом технологией магнитно-абразивной обработки и ее влиянием на поверхностный слой изделий занимались многие ученые, среди которых можно выделить следующих: Акулович Л.М., Бабич В.И., Барон Ю.М., Жданович В.И., Иконников А.М., Приходько С.П., Сакулевич

Ф.Ю., Скворчевский Н.Я., Татаркин Е.Ю., Хомич Н.С., Singh P., Singh R., Xu J и другие. Однако изучению влияния магнитно-абразивной обработки на качество зоны заклепочного соединения для летательных аппаратов внимания не уделялось.

Степень разработанности проблемы позволяет рассматривать её дальнейшее исследование в рамках системного подхода, объединяющего совершенствование способов обработки и повышение долговечности соединений сопрягаемых изделий летательных аппаратов.

#### **Объект исследования**

Процесс магнитно-абразивной обработки поверхности сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов для летательных аппаратов.

#### **Предмет исследования**

Параметры качества поверхностного слоя кромок (шероховатость) сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов для летательных аппаратов.

**Цель работы** – повышение качества поверхностного слоя кромок сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов и формирования равномерного упрочнения зоны заклепочного соединения для летательных аппаратов на основе магнитно-абразивной обработки.

**Идея** заключается в технологическом обеспечении качества зоны заклепочного соединения сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов для летательных аппаратов и осуществляется на основе способа финишной магнитно-абразивной обработки, состоящей из двух контуров для одновременного черного и чистового воздействия.

#### **Задачи исследования**

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Провести анализ особенностей финишной обработки изделий из алюминиевых сплавов для летательных аппаратов, проанализировать текущее состояние и перспективы развития технологического обеспечения и повышения качества поверхностей посредством магнитно-абразивной обработки. Провести систематизацию теоретических и экспериментальных данных, пред-

ставленных в научных источниках, с целью выдвижения гипотезы о влиянии состояния поверхностного слоя изделий из алюминиевых сплавов на обеспечение долговечности неразъемных соединений в конструкциях летательных аппаратов.

2. Провести экспериментальные исследования с целью определения закономерностей влияния режимных факторов магнитно-абразивной обработки на показатели шероховатости поверхности зоны заклепочного соединения сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов

3. На основании экспериментальных исследований разработать способ магнитно-абразивной обработки поверхностей, предусматривающий научное обоснование выбора рациональных схем обработки, траекторий рабочих движений и режимных факторов, обеспечивающих качество обработанных поверхностей на основе одновременной черновой и чистовой обработки.

4. Установить математические зависимости, описывающие взаимосвязь между режимными факторами магнитно-абразивной обработки и характеристиками шероховатости поверхности зоны заклепочного соединения сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов.

5. Разработать практические рекомендации по выбору способа магнитно-абразивной обработки поверхности сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов для летательных аппаратов, а также по подбору значений режимных факторов обработки, обеспечивающих прогнозируемую шероховатость.

#### **Научная новизна работы:**

1. Установлены закономерности влияния технологических параметров двухконтурной черновой и чистовой магнитно-абразивной обработки – магнитной индукции, частоты вращения, времени обработки на качество поверхностного слоя зоны заклепочного соединения сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов.

2. Определены диапазоны параметров качества поверхностного слоя на плотность контакта при соединении сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов с поверхностью опорной головки заклепочного соединения.

### **Соответствие паспорту специальности**

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.5.6. Технология машиностроения по пунктам:

4. «Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска»; 7. «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин».

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Установлены математические зависимости, описывающие влияние значений магнитной индукции, частоты вращения обрабатываемого образца и времени обработки при проведении магнитно-абразивной обработки поверхностей сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов для летательных аппаратов, оценивающие степень воздействия режимных факторов обработки на показатели шероховатости поверхности.

2. На основании экспериментальных исследований разработан способ магнитно-абразивной обработки (Патент на изобретение RU2800274C1), включающий одновременную двухконтурную обработку поверхностей обрабатываемых деталей, при которой благодаря первому контуру из трехполюсных наконечников осуществляется черновая обработка при рабочем зазоре 2-3 мм, а второй контур при рабочем зазоре 4-5 мм позволяет произвести чистовую обработку поверхности и достичь значений шероховатости в диапазоне  $Ra$  от 0,2 до 0,3 мкм.

3. Определены рациональные режимные параметры магнитно-абразивной обработки поверхностей зоны заклепочного соединения сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов, позволяющие обеспечить увеличение относительной опорной длины профиля  $Rmr$  с 70 до 89 %.

4. Результаты диссертационной работы прошли апробацию на предприятии АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «Ленаэропроект», что подтверждено актом от 26.11.2025 г.

**Методология и методы исследования.** Проведение исследований базировалось на известных данных в области магнит-

но-абразивной обработки, научных основах технологии машиностроения, статистических методах исследований и методиках математического моделирования. Применены методы компьютерного моделирования. Для проведения экспериментов использовался фрезерный станок с ЧПУ Emco Concept Mill 250, а также лабораторное оборудование: профилометр Mitutoyo SurfTest SJ210, инвертированный микроскоп Leica DM ILM HC, сканирующий нанотвердомер Nanoscan 4D+.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанный и реализованный на практике способ магнитно-абразивной обработки торцевых поверхностей и кромок сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов, включающий двухконтурную черновую обработку с зазором 2...3 мм и чистовую с зазором – 4...5 мм, расположенных в последовательности технологического процесса на расстоянии друг от друга в пределах 70...75 мм, обеспечивает равномерное упрочнение поверхностного слоя до 32...35 HRB и шероховатость обрабатываемых поверхностей в диапазоне  $Ra$  от 0,2 до 0,3 мкм.

2. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что применение разработанного способа магнитно-абразивной обработки позволяет обеспечить необходимую плотность контакта в заклепочных соединениях листов из алюминиевых сплавов, расположенных внахлестку по каркасу летательного аппарата с поверхностью опорной головки заклепочного соединения за счет формирования рациональной микрогеометрии ( $Ra$ ,  $Rsm$ ,  $Rmr$ ), увеличивающей относительную опорную длины профиля  $Rmr$  с 70 до 89 %.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена необходимым объемом методов математического планирования эксперимента, использованием стандартных методов исследований, экспериментальных исследований на сертифицированном и поверенном оборудовании, результатами промышленного опробования на производственных предприятиях, а также апробацией результатов исследований на всероссийских и международных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

**Апробация результатов диссертации** проведена на следующих научно-практических мероприятиях: XI форум вузов инженерно-технологического профиля союзного государства (2023 г., г. Минск), XV Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Россия молодая» (2023 г., г. Кемерово), IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (2023 г., г. Тула), VII международная научно-практическая конференция «Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация» (2024 г., г. Санкт-Петербург), VIII Международная научно-практическая конференция «Механика и машиностроение: наука и практика» (2025 г., г. Санкт-Петербург).

Принято участие в конкурсе грантов для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга (2024 г., 2025 г., г. Санкт-Петербург).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; разработке способа двухконтурной магнитно-абразивной обработки сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов для летательных аппаратов, установлении математических зависимостей влияния режимных факторов магнитно-абразивной обработки на шероховатость и твердость поверхностей неразъемных соединений, проведении экспериментальных исследований по обработке поверхностей неразъемных соединений способом магнитно-абразивной обработки, подготовке рекомендаций по назначению режимных факторов магнитно-абразивной обработки с целью технологического обеспечения качества поверхностей сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов для летательных аппаратов.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 9 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 соис-

кание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 78 наименований и 2 приложений. Диссертация изложена на 124 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков и 22 таблицы.

### **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 по вопросам особенностей эксплуатации и обеспечения качества неразъемных соединений изделий летательных аппаратов из алюминиевого сплава, выявлены основные недостатки существующих методов раскроя и финишной обработки кромок сопрягаемых изделий летательных аппаратов, а также рассмотрены особенности неразъемных соединений.

Исходя из результатов проведенного анализа, сформулированы цель и задачи научного исследования.

**Во второй главе** представлены теоретические и экспериментальные исследования по разработке способа магнитно-абразивной обработки, обеспечивающего черновую и чистовую обработку поверхности. Определены основные технологические параметры магнитно-абразивной обработки.

**В третьей главе** на основании разработанного технологического способа магнитно-абразивной обработки проведены экспериментальные исследования по оценке влияния варьируемых параметров процесса (магнитной индукции, частоты вращения заготовки, времени обработки) на шероховатость и твердость поверхностей кромок сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований влияния состояния поверхностного слоя из-

делий из алюминиевых сплавов на обеспечение долговечности неразъёмных соединений в конструкциях летательных аппаратов.

**В заключении** отражены выводы и рекомендации по результатам исследования.

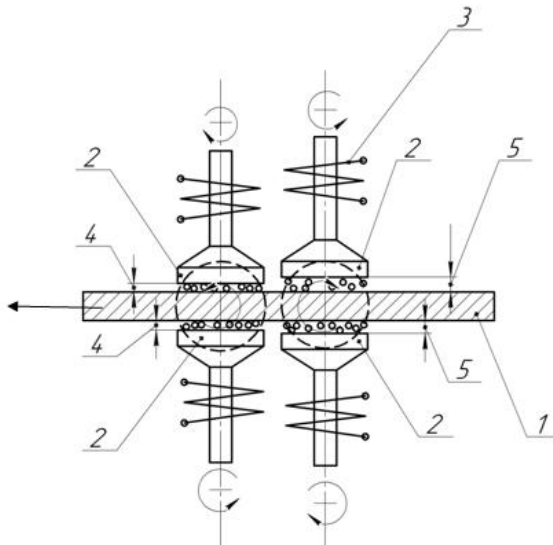
Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Разработанный и реализованный на практике способ магнитно-абразивной обработки торцевых поверхностей и кромок сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов, включающий двухконтурную черновую обработку с зазором 2...3 мм и чистовую с зазором – 4...5 мм, расположенных в последовательности технологического процесса на расстоянии друг от друга в пределах 70...75 мм, обеспечивает равномерное упрочнение поверхностного слоя до 32...35 HRB и шероховатость обрабатываемых поверхностей в диапазоне  $Ra$  от 0,2 до 0,3 мкм.**

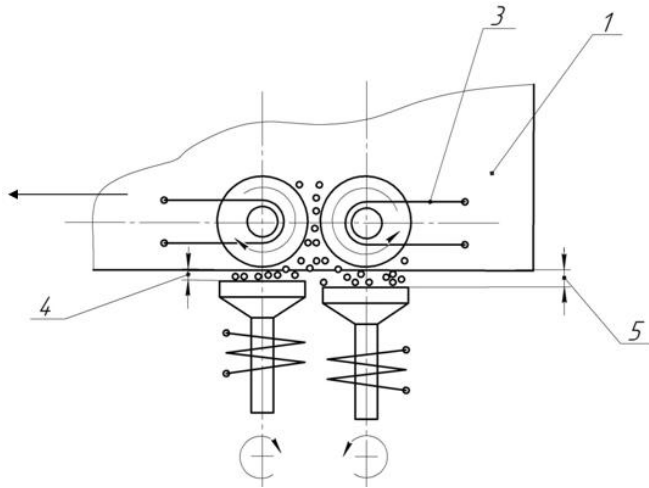
Разработан способ двухконтурной MAO поверхностей (Патент на изобретение RU2800274C1), включающий в себя схему магнитно-абразивной обработки (рисунок 1). Определены сочетания рабочих движений, диапазоны технологических параметров обработки, марка магнитно-абразивного порошка и СОЖ, разработана цифровая модель магнитно-абразивной обработки для определения параметров магнитной индукции.

Согласно проведенному в Ansys Maxwell моделированию распределения магнитной индукции в рабочем зазоре магнитная индукция  $B$  принимает значения от 0,5 до 0,8 Тл, что соответствует оптимальным значениям при магнитно-абразивной обработке алюминиевых изделий. Расстояние между двумя контурами также было определено по результатам моделирования и составило 70...75 мм для того, чтобы магнитная индукция была контролируемым параметром, а не последствием влияния одного контура на другой.

Установлено, что магнитно-абразивную обработку поверхностей из алюминиевых сплавов следует проводить с применением магнитно-абразивного порошка Пр10Р6М5 (фракция от 50 до 250 мкм) и СОЖ марки GLOBAL.



а)



б)

Рисунок 1 – Схема магнитно-абразивной обработки кромок листового проката, где а – вид сбоку, б – вид сверху: 1 – кромка изделия; 2 – полюсной наконечник; 3 – электромагнитные катушки; 4 – зазор на черновую обработку; 5 – зазор на чистовую обработку

Обеспечение качества поверхностного слоя кромок листа и повышение производительности магнитно-абразивной обработки достигается тем, что обработку производят двумя трехполюсными системами, у которых каждый из полюсных наконечников совершает вращательные движения вокруг собственной оси. Благодаря первому контуру из трехполюсных наконечников осуществляется черновая обработка при рабочем зазоре 2-3 мм, второй контур при рабочем зазоре 4-5 мм позволяет произвести чистовую обработку поверхности и достичь значений шероховатости в диапазоне  $Ra$  от 0,2 до 0,3 мкм.

Определены диапазоны технологических параметров магнитно-абразивной обработки: частота вращения заготовки  $n = 115-750 \text{ мин}^{-1}$ ; время обработки в пределах  $t = 4-12 \text{ мин}$ ; величина магнитной индукции в диапазоне  $B = 0,5-0,8 \text{ Тл}$ .

Разработанный способ реализован на фрезерном станке с ЧПУ Emco Concept Mill 250. На основании разработанного способа магнитно-абразивной обработки проведены экспериментальные исследования по влиянию режимных факторов на формирование качественной характеристики поверхностей: шероховатости и микротвердости поверхностей.

Результаты измерения твердости на 8 образцах показали, что после обработки значения находятся в промежутке 32 – 35 HRB, а до обработки разброс значений твердости варьировался в пределах от 15 до 30 HRB. Можно сделать вывод о том, что магнитно-абразивная обработка приводит к незначительному увеличению твердости, но при этом такое упрочнение поверхностного слоя является равномерным.

На основании полученных экспериментальных данных, а также статистического анализа результатов экспериментов установлено, что на шероховатость наибольшее влияние оказывает время обработки  $t$  (мин), второстепенную позицию занимают частота вращения образца  $n$  ( $\text{мин}^{-1}$ ) и величина магнитной индукции  $B$  (Тл). Обработка данных позволила получить математическую зависимость, позволяющая прогнозировать значения шероховатости при обработке сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов (1):

$$Ra = 0,5098 - 0,356 \cdot B - 0,0271 \cdot t - 0,000008 \cdot n + 0,42 \cdot Bt - 0,000024 \cdot tn \quad (1)$$

Таким образом, полученные результаты являются основой для подготовки сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов предложенным способом магнитно-абразивной обработки.

**2. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что применение разработанного способа магнитно-абразивной обработки позволяет обеспечить необходимую плотность контакта в заклепочных соединениях листов из алюминиевых сплавов, расположенных внахлестку по каркасу летательного аппарата с поверхностью опорной головки заклепочного соединения за счет формирования рациональной микрогеометрии ( $Ra$ ,  $Rsm$ ,  $Rmr$ ), увеличивающей относительную опорную длины профиля  $Rmr$  с 70 до 89 %**

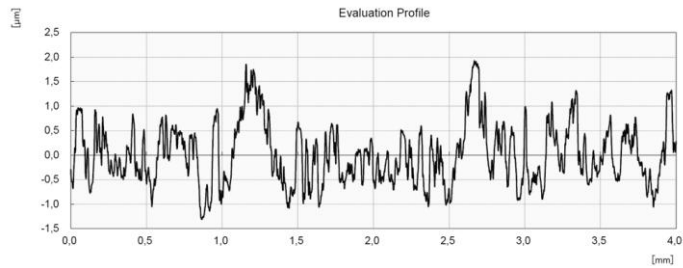
Чем ниже исходная шероховатость (достигнутая MAO), тем выше разрушающая нагрузка при сдвиге. Это объясняется следующим:

1. Согласно модели Крагельского, фактическая площадь контакта двух шероховатых поверхностей под нагрузкой определяется их микрогеометрией. Чем меньше исходная шероховатость, тем при одинаковом усилии клепки  $P$  достигается большая относительная площадь контакта.

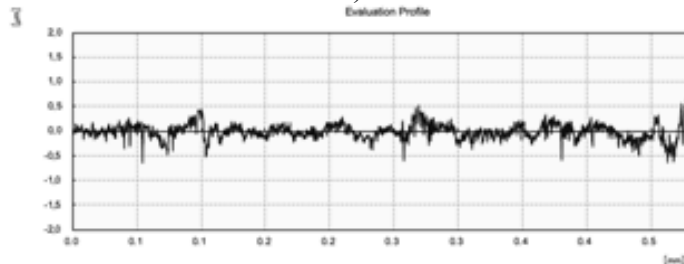
2. Сила трения в контакте определяется двумя механизмами: деформационным (зацепление неровностей) и адгезионным (схватывание поверхностей). Для чистых поверхностей (после MAO и под нагрузкой) адгезионная составляющая становится доминирующей. Чтобы сдвинуть такие поверхности, разрывной машине приходится преодолевать не просто трение скольжения, а силу, близкую к пределу прочности материала на срез в зоне фактического контакта.

3. При более плотном контакте листов внахлест и лучшем прилегании головок, внешняя сдвигающая нагрузка передается не только через стержень заклепки, но и частично компенсируется трением в стыке. Это снижает долю нагрузки, приходящуюся непосредственно на заклепку, повышая общую несущую способность соединения.

Экспериментальное исследование на сдвиг образцов проводилось на разрывной машине Zwick/Roell Z100. После испытания образцов с разной исходной шероховатостью (до и после МАО, рисунок 2 а-б) были получены следующие графики (рисунок 3 а-б). Для образцов после обработки (с шероховатостью  $Ra$  0,18..0,21 мкм) разрывной машине приходилось преодолевать большее усилие, чем для образцов до обработки (с шероховатостью 1,2..1,54 мкм), что свидетельствует об увеличении фактической площади контакта за счет снижения шероховатости в результате обработки при прочих равных условиях.



а)



б)

Рисунок 2 – Профилограммы: а – образцов до МАО, б – после (оборудование: профилометр Mitutoyo Surftest SJ210)

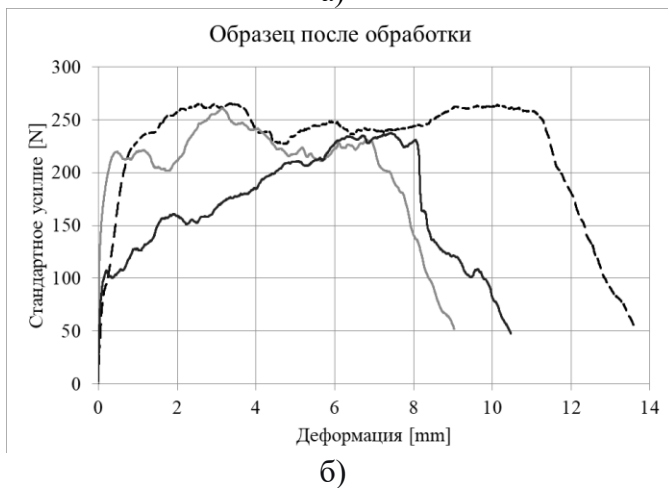


Рисунок 3 – Сравнение усилий, прилагаемых на сдвиг образцов, где а – образцы до обработки, б – образцы после обработки

Для подтверждения этого производилась оценка параметра  $Rmr$  – относительной опорной длины профиля. Параметр  $Rmr$  обычно не задается одним числом, а представляется в виде опорной кривой (кривой Эбботта-Файрстоуна) (рисунок 4). Это график, где по оси X откладывается  $Rmr$  (0%...100%), а по оси Y — уровень сечения (глубина профиля) показал увеличение относительной опорной длины профиля  $Rmr$  с 70 до 89 %.

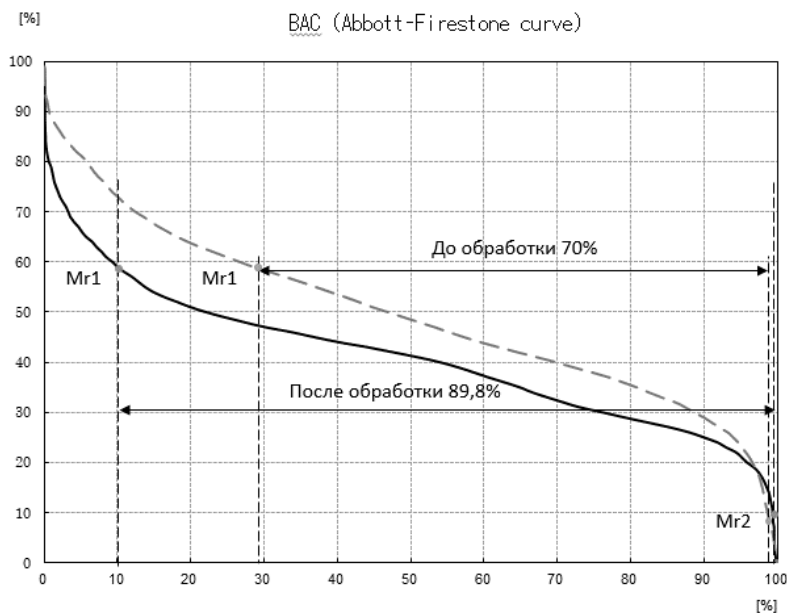


Рисунок 4 – Сравнение кривых Эббота-Файрстоуна

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований сделаны следующие выводы:

1. Анализ особенностей финишной обработки изделий из алюминиевых сплавов для летательных аппаратов позволил выявить, что технологическое обеспечение качества поверхностей может достигаться посредством магнитно-абразивной обработки. В результате систематизации теоретических и экспериментальных данных, представленных в научных источниках, сформулирована гипотеза о влиянии состояния поверхностного слоя изделий из алюминиевых сплавов на обеспечение долговечности неразъемных соединений в конструкциях летательных аппаратов.

2. На основании экспериментальных исследований разработан способ магнитно-абразивной обработки поверхностей (Патент на изобретение RU2800274C1), предусматривающий научное обосно-

вание выбора рациональных схем обработки, траекторий рабочих движений и режимных факторов, обеспечивающих качество обработанных поверхностей на основе одновременной черновой и чистовой обработки. Применение разработанного способа позволяет достичь равномерную шероховатость обработанной поверхности по  $Ra$  от 0,2 до 0,3 мкм.

3. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить рациональные режимные параметры магнитно-абразивной обработки поверхностей зоны заклепочного соединения сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов, позволяющие обеспечить увеличение относительной опорной длины профиля  $Rmr$  с 70 до 89 %.

4. Установлены математические зависимости, описывающие взаимосвязь между режимными факторами магнитно-абразивной обработки и характеристиками шероховатости поверхности зоны заклепочного соединения сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов. Комбинации технологических параметров магнитно-абразивной обработки влияют на качество обработанной поверхности, производительность и эффективность обработки.

5. Разработаны практические рекомендации по выбору способа магнитно-абразивной обработки поверхности сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов для летательных аппаратов, а также по подбору значений режимных факторов обработки, обеспечивающих прогнозируемую шероховатость:  $V=0,2$  до  $0,57$  Тл; время обработки  $t=4-8$  мин; частота вращения заготовки  $n=460-750$  мин<sup>-1</sup> (43-70 м/мин).

Результаты диссертационной работы прошли апробацию на предприятии АО «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «Ленаэро-проект», что подтверждено актом от 26.11.2025 г.

Перспективным направлением является разработка устройства, позволяющего обрабатывать поверхности предложенным способом двухконтурной магнитно-абразивной обработки листового материала. Также перспективы заключаются в исследовании методов моделирования процесса обработки с учетом всех физических характеристик процесса.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Максаров, В. В. Перспективы применения магнитно-абразивной обработки сопрягаемых деталей летательных аппаратов / В. В. Максаров, **М. В. Ефимова**, М. С. Синюков, П. И. Романов – DOI 10.25960/мо.2023.3.43 // Металлообработка. – 2023. – № 3(135). – С. 43–50.

2. Максаров, В. В. Двухконтурная магнитно-абразивная обработка кромок сопрягаемых изделий / В. В. Максаров, **М. В. Ефимова**, В. Е. Трушников – DOI 10.25960/мо.2024.2.41 // Металлообработка. – 2024. – № 2(140). – С. 41–49.

3. Максаров, В. В. Применение магнитно-абразивного полирования поверхностей заклепочных соединений деталей из алюминиевых сплавов для летательных аппаратов / В. В. Максаров, **М. В. Ефимова**, К. Ю. Шахназаров – DOI 10.17580/tsm.2026.01.11 // Цветные металлы. – 2026. – № 1. – С. 85–91.

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

4. Maksarov, V. V. Choosing parameters of a magnetic abrasive polishing for machining of edges of aircraft body parts from aluminum alloys / V. V. Maksarov, **M. V. Efimova**, I. A. Filipenko – DOI 10.17580/tsm.2024.03.11 // Tsvetnye metally. – 2024. – № 3. – pp. 78–84.

5. Maksarov, V. V. Methodology of automated magnetic abrasive machining of aircraft parts in the mining transportation complex/ V. V. Maksarov, **M. V. Efimova** – DOI 10.30686/1609–9192–2025–1S–62–67 // Russian Mining Industry. – 2025. – № S1. – pp. 62–67.

*Публикации в прочих изданиях:*

6. **Ефимова, М. В.** Обработка кромок корпусных деталей летательных аппаратов / **М. В. Ефимова** // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении : сборник докладов IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Тула, 18–20 апреля 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. – с. 91–93.

7. **Ефимова, М. В.** Перспективы применения магнитно-абразивной обработки для производства изделий летательных

аппаратов / **М. В. Ефимова** // Россия молодая: Сборник материалов XV Всероссийской научно–практической конференции с международным участием, Кемерово, 18–21 апреля 2023 года. – Кемерово: ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 2023. – С. 423031–423033.

8. **Ефимова, М. В.** Современное состояние проблемы обработки кромок деталей летательных аппаратов и перспективы ее решения / **М. В. Ефимова** // Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: Материалы международной научно–практической конференции, Санкт–Петербург, 26 января 2024 года. – Санкт–Петербург: НИЦ МС, 2024. – С. 51–53.

9. **Ефимова, М. В.** Влияние магнитно–абразивного полирования на качество обрабатываемых поверхностей из алюминиевых сплавов / **М. В. Ефимова** // Механика и машиностроение. Наука и практика: Материалы международной научно–практической конференции, Санкт–Петербург, 27 ноября 2025 года. – Санкт–Петербург: НИЦ МС, 2025. – С. 66–68.

*Патент:*

10. Патент № 2800274 Российская Федерация, МПК В24В 31/00 (2006.01); СПК В24В 31/00 (2023.02). Способ магнитно–абразивной обработки. Заявка № 2023105979: заявл. 15.03.2023: опубл. 19.07.2023 / В. В. Максаров, А. И. Кексин, И. А. Филипенко, **М. В. Ефимова**, М. С. Синюков; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт–Петербургский горный университет». – 11 с.: 2 ил.