

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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	12
1.1 Особенности неразъемных соединений летательных аппаратов.....	12
1.2 Конструктивные и функциональные особенности заклёпочных соединений..	13
1.3 Анализ материалов, применяемых для создания неразъемных соединений летательных аппаратов	21
1.4 Анализ существующих методов размерной и финишной обработки изделий летательных аппаратов	23
1.5 Выводы по первой главе.....	30
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СОПРЯГАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ	33
2.1 Сущность, особенности и возможности магнитно-абразивной обработки	33
2.2.1 Выбор порошка.....	36
2.2.2 Выбор смазочно-охлаждающей жидкости	38
2.2.3 Выбор диапазона значений магнитной индукции с применением моделирования в программной среде ANSYS	40
2.3 Разработанный способ магнитно-абразивной обработки	45
2.4 Выбор расстояния между двумя системами.....	50
2.5 Выводы по второй главе	55
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СОПРЯГАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ	

ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОБРАБОТКОЙ РЕЗУЛЬТАТОВ	56
3.1 Материальная база и методика проведения экспериментальных исследований	56
3.2 Обработка результатов эксперимента и получение математической зависимости.....	62
3.3 Выводы по третьей главе.....	74
ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ НА ЗОНУ ЗАКЛЕПОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ	75
4.1 Особенности взаимодействия поверхностей в зоне заклепочного соединения	75
4.2 Анализ физико-механического состояния материала в зоне соединения.....	77
4.2.1 Зарождение трещин.....	77
4.2.2 Факторы, влияющие на рост трещин	78
4.2.3 Методы анализа и прогнозирования	81
4.2.4 Способы повышения долговечности.....	81
4.3 Оценка исходной зоны отверстий	81
4.4 Оценка механических свойств поверхностного слоя.....	82
4.5 Экспериментальное исследование деформации микрорельефа в зоне контакта заклепочного соединения	91
4.6 Рекомендации к технологическому процессу клепки	101
4.7 Выводы по четвертой главе.....	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	108
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	110
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение	122
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт о внедрении результатов диссертации	123

ВВЕДЕНИЕ

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 АМгб после прокатки сама по себе не является стабильной величиной. Она во многом зависит от конкретных условий обработки: режимов самой прокатки (горячей или холодной), степени обжатия, 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, исключающих 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 углекомполитов, 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 чернового 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, представленных в научных источниках, с целью выдвижения гипотезы о влиянии состояния поверхностного слоя изделий из алюминиевых сплавов на обеспечение долговечности неразъёмных 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.

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

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, Приложение А), 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. (Приложение Б).

Методология и методы исследований

Проведение исследований базировалось на известных данных в области магнитно-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 SJ-210, 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 5 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных. За последние 3 года принято участие в 2 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных:

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 (пункты списка литературы №12-15, 19-21, 61-62), 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 (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент (Приложение А, пункт списка литературы №31).

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.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

1.1 Особенности неразъемных соединений летательных аппаратов

Критически важной ролью в обеспечении ключевых эксплуатационных характеристик летательных аппаратов является конструкция и ее неразъемные соединения. Эти элементы представляют собой не просто последовательность технологических операций, а фундаментальную основу, от которой напрямую зависят безопасность, эффективность и долговечность самолета. Именно неразъемные соединения формируют силовую схему планера, обеспечивая его способность выдерживать значительные переменные нагрузки на протяжении всего жизненного цикла.

Для достижения требуемого качества сборки изделий с применением неразъемных соединений необходимо обеспечивать технологичность таких конструкций, что подразумевает не только соответствие проекта производственным возможностям, но и создание условий для стабильного выполнения операций, контроля качества и последующего обслуживания. Технологически продуманные соединения позволяют поддерживать высокий уровень производственной культуры, что в конечном итоге определяет надежность и ресурс авиационной конструкции в целом.

При производстве узлов самолётов и вертолётв, изготовленных из лёгких сплавов, заклёпочные соединения являются основным технологическим решением для создания неразъёмных конструкций (рисунок 1). Данный метод продолжает доминировать в авиастроении благодаря своей способности гарантировать высочайший уровень надёжности и соответствие строгим требованиям к назначенному ресурсу планера [1].

Несмотря на высокую надежность, монтаж заклепочных соединений остается трудоемким процессом, тем не менее, в конструкциях летательных аппаратов альтернативы в виде сварки или болтовых соединений практически исключены ввиду их повышенной уязвимости в условиях полета: стыки сварных

швов будут разрушаться под действием постоянных перепадов давления и мощных аэродинамических воздействий, а болтовые соединения склонны к раскручиванию под влиянием непрерывных вибраций, что ставит под угрозу целостность всего узла. Любой из этих сценариев на большой высоте чреват катастрофическими последствиями.

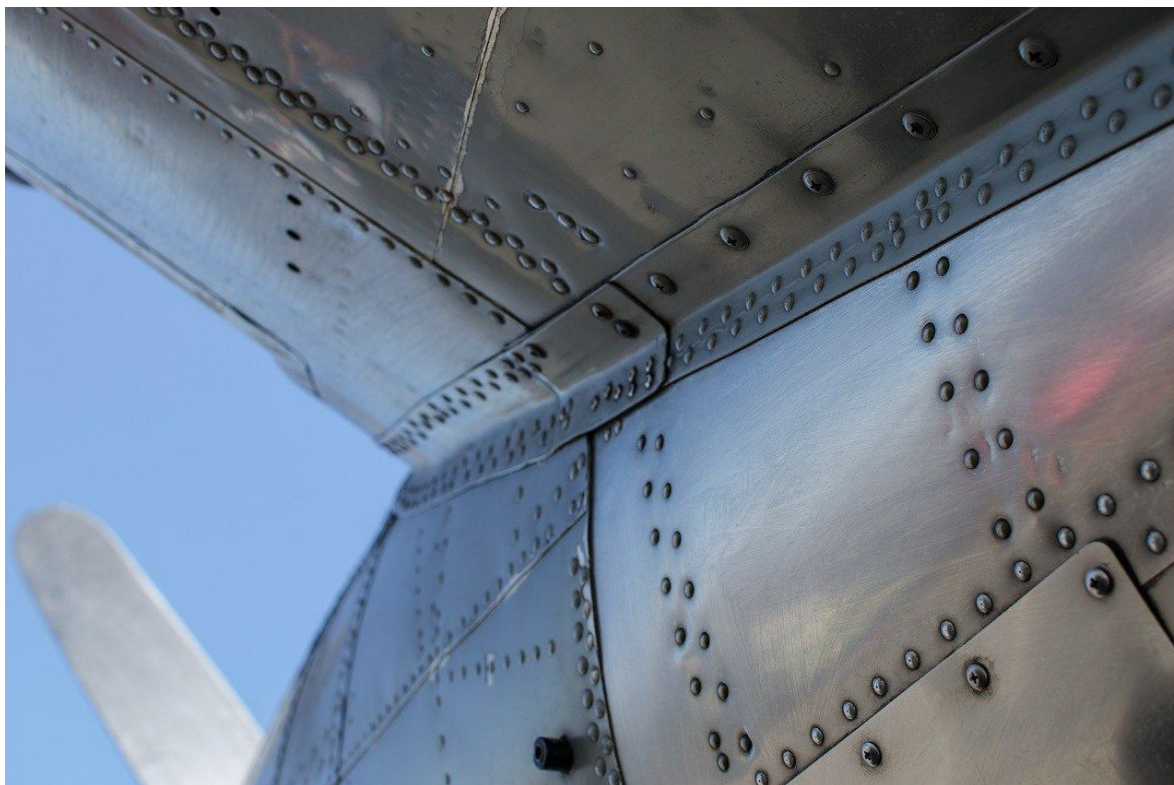


Рисунок 1 – Заклепочные соединения в конструкции летательного аппарата
[Getty images / Автор: Иван Беляев]

Обеспечивая оптимальное распределение нагрузок, устойчивость к усталости и вибрациям, заклёпочные соединения вносят решающий вклад в долговечность и безопасность летательного аппарата [48, 68, 76]. Эта технология обеспечения неразъёмных соединений лежит в основе создания критически важных авиационных конструкций, где надёжность является абсолютным приоритетом [32, 33, 43].

1.2 Конструктивные и функциональные особенности заклёпочных соединений

Прочность заклёпочных соединений определяется комплексом взаимосвязанных теоретических принципов, лежащих в основе их

проектирования и технологии изготовления. Технологический процесс клепки, состав операций и их последовательность во многом определяются требованиями обеспечения ресурса и герметичности, типом заклепок, методом сборки.

При установке заклепок детали соединяются внахлест, а для дополнительной надежности швы обрабатываются специальным герметиком, устойчивым к агрессивным средам, высокой влажности, предельно низким и высоким температурам.

Наиболее распространенные типы заклепок, применяемых в конструкциях летательных аппаратов, приведены на рисунке 2.

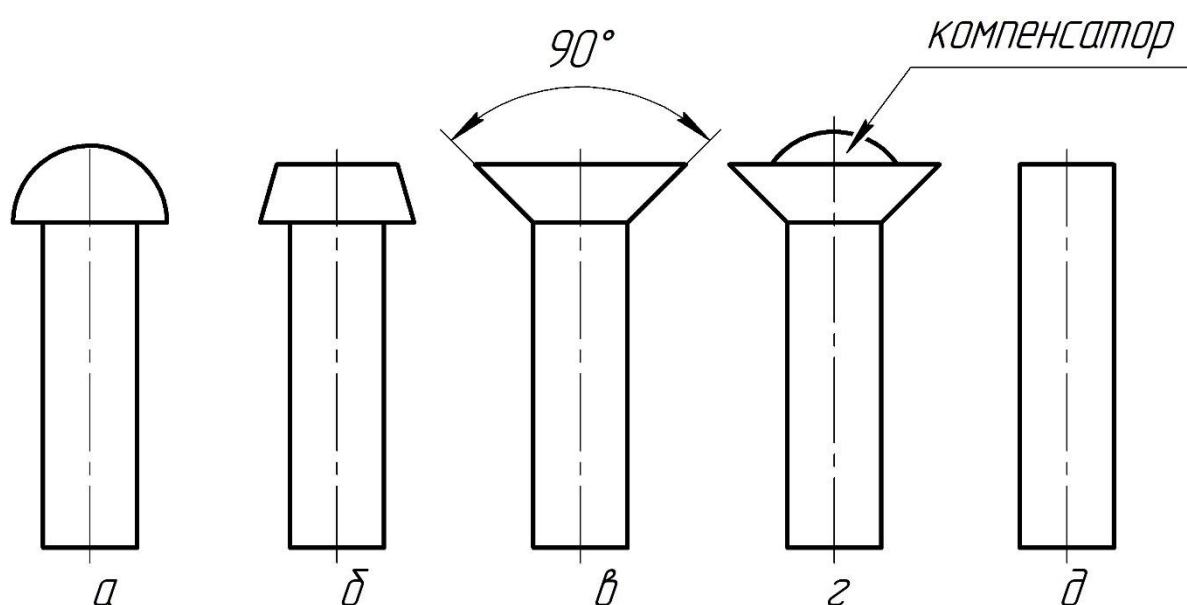


Рисунок 2 – Виды заклепок по форме головки, где а – с полукруглой головкой; б – с плоской закладной головкой – ЗП; в – с потайной закладной головкой ЗУ – 90 град. (или 120); г – с компенсатором ЗУК; д – стержневая [10]

В соединениях, обтекаемых воздушным потоком, обычно применяются заклепки с потайными головками. На современных самолетах такие заклепки составляют примерно 65...70% от общего количества заклепок в самолете [2].

Заклёпки с полукруглой (куполообразной) головкой являются одним из классических и широко применяемых типов крепежа в авиастроении, несмотря на растущую конкуренцию со стороны потайных и специализированных типов.

К преимуществам такого типа относятся:

- Высокая прочность головки. Полуокруглая форма обеспечивает оптимальное распределение напряжений и максимальную прочность на отрыв по сравнению с другими типами головок. Это делает их предпочтительными для силовых, высоконагруженных соединений.

- Технологичность и надёжность контроля. Процесс клёпки и визуальный контроль качества сформированной головки более просты и надёжны, чем для потайных заклёпок. Форма головки менее критична к небольшим смещениям инструмента.

- Эффективное заполнение зазора. Благодаря своей форме, такая заклёпка лучше компенсирует небольшие неровности и зазоры в соединяемом пакете материалов.

- Усталостная прочность. Хотя обтекаемость ниже, чем у потайного варианта, правильно установленная заклёпка с натягом создаёт благоприятную картину остаточных напряжений, повышая усталостную долговечность соединения.

Главным недостатком такого типа заклепок является аэродинамическое сопротивление. Выступающая головка создаёт турбулентность, что неприемлемо для внешних обшивок крыла и фюзеляжа, где требуется гладкая поверхность. В этих зонах применяются потайные заклёпки

Заклёпки с полуокруглой (куполообразной) головкой применяются там, где аэродинамика не критична: в шпангоутах, стрингерах, нервюрах, для крепления силовых кронштейнов и узлов, в соединениях в центроплане и лонжеронах, в ненагруженных и мало нагруженных обшивках (в зонах, где требования к обтекаемости потока не являются максимальными), а также в соединениях во вспомогательных агрегатах – двери, люки, ниши шасси (внутренний каркас).

Для повышения качества заклепочных соединений заклепки изготавливаются из тех же материалов, из которых изготовлены детали, если они обладают достаточным запасом пластичности [36].

Операции соединения заклепками трудоемки, так как содержат значительное число переходов: разметку и сверление отверстий, их соосное

развертывание, образование лунки или фаски под головку, установку заклепок и образование замыкающей головки. Поэтому в самолетостроении, например, где до (70 – 90) % соединений являются заклепочными, трудоемкость их выполнения составляет (40 – 50) % общей трудоемкости.

Технологический процесс клепки состоит из следующих этапов:

1. Подготовка отверстия: в склепываемых деталях сверлением или пробивкой формируется отверстие диаметром d_0 , соответствующее диаметру стержня заклёпки либо на (0,1 – 0,2) мм больше диаметра заклепки.

2. Обработка гнезда под головку: для потайных головок выполняется зенкование или штамповка гнезда заданной глубины $h_{з.г}$.

3. Установка заклёпки в подготовленное отверстие. При этом стержень должен выступать на определённую длину l_0 , необходимую для формирования замыкающей головки.

4. Формирование замыкающей головки прессованием или ударным методом. В первом случае приложенное усилие P осаживает стержень, создавая головку заданного размера $h_{з.г}$, а процесс контролируется системой микровыключателей. Во втором методе используется пневматический молоток, где размер головки определяется квалификацией рабочего.

5. Окончательная обработка заключается в удалении излишков материала для обеспечения требуемого выступания головок h . Эта операция выполняется для высокоточных швов.

6. Контроль качества, при котором проверяются размеры и правильность формирования как потайных, так и замыкающих головок.

Теоретической основой обеспечения прочности заклёпочных соединений является синтез классической механики, теории упругости и пластичности, учения об усталости материалов и технологических моделей формообразования, позволяющий перейти от расчёта номинальных прочностных характеристик к целенаправленному проектированию высокоресурсных соединений. На рисунке 3 приведена схема распределения сил в заклепочном соединении.

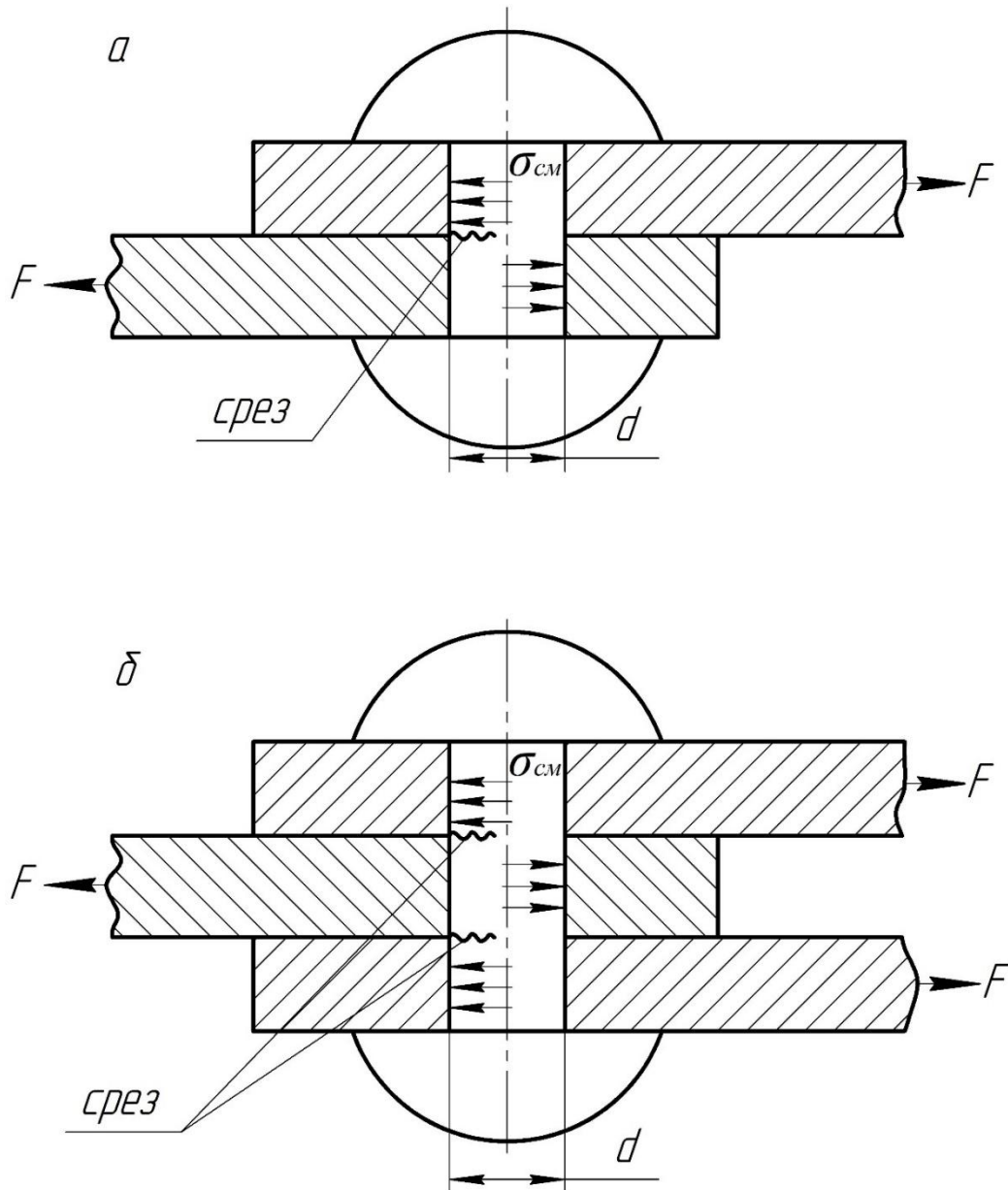


Рисунок 3 – Распределение сил в заклепочном соединении, где а – односрезное соединение, б – двухсрезное соединение [21, 25]

Заклёпки работают преимущественно на срез при условии прочности (1.1) [21, 25]:

$$\tau = \frac{F}{n \cdot A_{ср}} \leq [\tau] \quad , \quad (1.1)$$

где τ – фактическое касательное напряжение в заклёпке, МПа

F – внешняя нагрузка, действующая на соединение, Н,

n – количество заклёпок в соединении, шт,

$A_{ср} = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь среза одной заклёпки (для однострочного соединения), м,

d – диаметр стержня заклёпки, м,

$[\tau]$ – допускаемое напряжение на срез для материала заклёпки, МПа.

Для двухсрезных заклёпок (например, при соединении внахлест) площадь среза удваивается (1.2) [21, 25]:

$$A_{\text{ср}} = 2 \cdot \frac{\pi d^2}{4} . \quad (1.2)$$

Листы, участвующие в заклепочном соединении, испытывают смятие в местах контакта с заклепками при условии прочности (1.3) [21, 25]:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{F}{n \cdot d \cdot \delta} \leq [\sigma_{\text{см}}] , \quad (1.3)$$

где $\sigma_{\text{см}}$ – напряжение смятия, МПа,

δ – толщина самого тонкого листа в соединении, м,

$[\sigma_{\text{см}}]$ – допускаемое напряжение на смятие для материала листа или заклёпки (выбирается меньшее), МПа.

Также необходимо проверять на растяжение ослабленное заклёпками сечение листа (1.4) [21, 25]:

$$\sigma_{\text{р}} = \frac{F}{(b - n \cdot d) \cdot \delta} \leq [\sigma_{\text{р}}], \quad (1.4)$$

где b – ширина листа, м,

$n \cdot d$ – сумма диаметров отверстий в опасном сечении, м,

$[\sigma_{\text{р}}]$ – допускаемое напряжение на растяжение для материала листа, МПа.

Исходя из вышеприведенной расчетной части, можно сделать вывод, что чтобы увеличить долговечность соединений, оказывая влияние на конструктивные параметры, необходимо менять геометрию соединений, количество заклепок, увеличивать толщину соединяемых деталей, что ведет к существенному изменению конструкции аппарата. Также довольно трудно повлиять на эксплуатационные факторы и материал летательного аппарата, который подобран исходя из этих факторов и веса. Благодаря тому, что степень концентрации напряжений зависит также от технологических факторов, повысить долговечность заклепочных соединений можно изменением способа клепки,

способа получения отверстия, обработки его поверхности и поверхности, прилегающей к нему [23, 24].

Нагрузки, действующие в зоне отверстия в условиях отсутствия заклепки, приведены на рисунке 4.

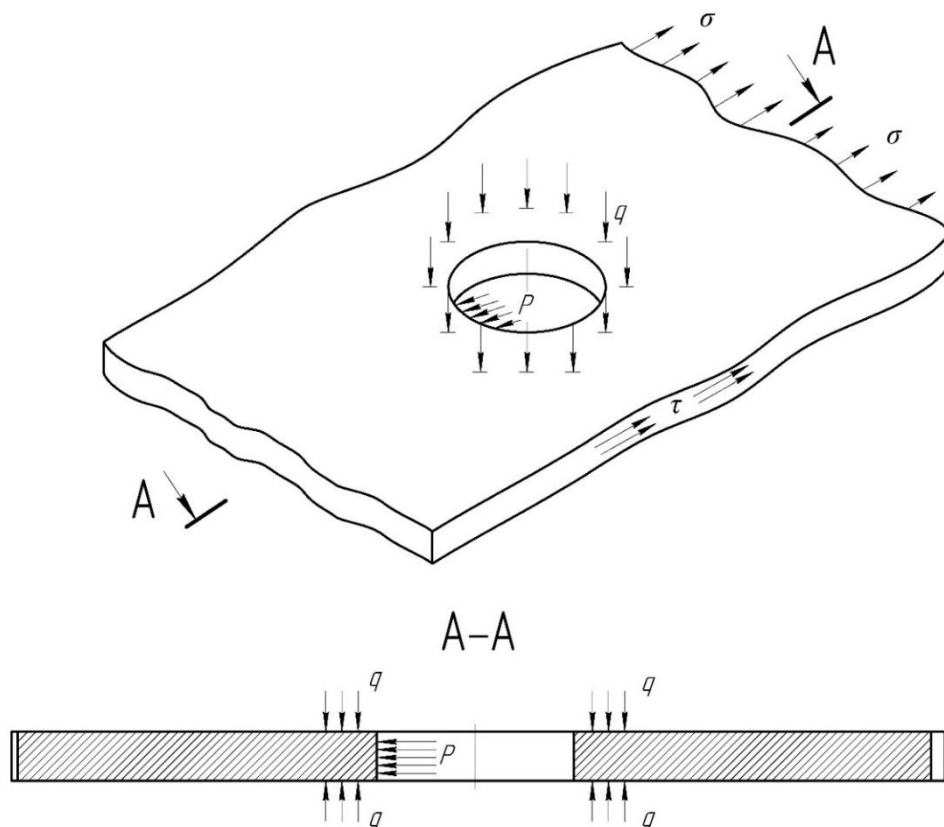


Рисунок 4 – Нагрузки, действующие в зоне отверстия [составлено автором]

На основании предоставленного рисунка можно описать распределение нагрузок в зоне отверстия под заклёпочное соединение следующим образом:

1. Внешняя растягивающая нагрузка

На основной лист (пластину) действует равномерное растягивающее напряжение σ , направленное горизонтально. Это основное рабочее напряжение в конструкции.

2. Концентрация напряжений вокруг отверстия.

Наличие отверстия нарушает равномерное распределение напряжений. Линии силы (потока напряжений) вынуждены обтекать отверстие, что приводит к их сгущению (концентрации) у краёв отверстия.

Наиболее опасными являются точки у кромки отверстия, расположенные на линии, перпендикулярной направлению силы (вверху и внизу на сечении А-А). Здесь возникают максимальные растягивающие напряжения σ_{max} , величина которых может превышать номинальное напряжение σ вдали от отверстия в 2,5-3 раза, что называется концентрацией напряжений.

3. Нагрузка от заклёпки (контактное давление)

Заклёпка, установленная в отверстии, воспринимает часть нагрузки, передавая её на другую деталь (на рисунке не показана) или уравнивая её. Это взаимодействие моделируется как:

- равномерно распределённое контактное давление (p) по части поверхности отверстия (условно показано в нижней части отверстия на основном виде). Оно моделирует силу сжатия между заклёпкой и краем отверстия.

- локальные сосредоточенные силы (q), действующие в плоскости листа. Эти силы схематично показывают передачу сдвигового усилия от листа к заклёпке (и наоборот) в зоне контакта. На сечении А-А они изображены как вертикальные силы, стремящиеся «срезать» заклёпку. Суммарное напряжённое состояние

В материале вокруг отверстия возникает сложное плоское напряжённое состояние, являющееся суперпозицией (наложением) всех факторов:

- общего растяжения от σ .
- локальной концентрации растягивающих напряжений у кромок.
- контактного сжатия от давления p .
- локального сдвига от сил q .

Рисунок схематично изображает ключевую проблему заклёпочных соединений: ослабление сечения отверстием и вызываемая этим концентрация напряжений, которая является основным очагом возможного разрушения при циклических или пиковых нагрузках. Силы p и q моделируют взаимодействие с заклёпкой, которое частично разгружает опасную зону, но также создаёт свои собственные сложные поля напряжений.

1.3 Анализ материалов, применяемых для создания неразъемных соединений летательных аппаратов

С точки зрения авиастроительной промышленности алюминиевый сплав представляет собой высокопрактичный материал [53, 71], обладающий комплексом ключевых преимуществ, таких как высокая удельная прочность и надежность, коррозионная стойкость, удобство в обслуживании и относительно низкая стоимость. Его применение позволяет не только эффективно контролировать стоимость производства летательных аппаратов, но и в полной мере использовать потенциал материала для повышения эксплуатационных характеристик компонентов, что в итоге способствует прогрессу в области авиастроения.

Использование алюминиевых сплавов в авиации охватывает широкий спектр применений — от производства деталей и узлов до создания целых элементов конструкции различного авиационного оборудования. В производстве летательных аппаратов, включающем вертолеты, гражданские и военные самолеты, а также беспилотные летательные аппараты (БПЛА), с ростом технологического уровня постоянно увеличивается доля алюминиевых сплавов. Анализ производства самолетов общего назначения показывает, что в их конструкции зачастую массово применяются алюминиевые сплавы, а фюзеляж нередко полностью изготавливается из этого материала. Например, в самолете ARJ21 масса алюминиевой обшивки составляет 40–50 кг, а для соединения элементов используется свыше 400 000 заклепок из алюминиевого сплава. Общее количество деталей из алюминия в конструкции может достигать миллионов, причем крепежные элементы составляют самую многочисленную их часть. В целом, масса алюминиевых деталей в самолете часто превышает 75 % от его чистой массы, при этом используются практически все основные типы алюминиевых сплавов — деформируемые, литейные и другие — для изготовления различных узлов [12].

Самые распространенные материалы, применяемые для различных узлов летательных аппаратов, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Применяемые в авиастроении материалы [составлено автором]

Материал	Особенности применения
Д16 (Д16АТ, Д18Т) – дюралюминий системы Al-Cu-Mg	<p>Применение: обшивки, стрингеры, лонжероны, шпангоуты, нервюры, детали системы управления, монолитные панели, прессованные профили.</p> <p>Свойства: хорошая пластичность (пригоден для штамповки), удовлетворительная обрабатываемость резанием, плохая свариваемость. Рабочий температурный диапазон – до 150-200°C.</p> <p>Формы поставки: листы (например, Д16АТ толщиной 0.5-10 мм по ГОСТ 21631-76), профили.</p>
В95 – высокопрочный дюралюминий	<p>Применение: силовые элементы конструкции, требующие повышенной прочности.</p> <p>Свойства: имеет более высокие прочностные характеристики по сравнению с Д16.</p>
Д19 – сплав, аналогичный Д16, но для повышенных температур	<p>Свойства: сохраняет работоспособность до ~250°C и имеет несколько более высокие характеристики удельной прочности, чем Д16.</p> <p>Формы поставки: листы.</p>
Сплавы системы АМг (АМг5, АМг6) – алюминиево-магниевые (марганцевые) сплавы	<p>Расшифровка маркировки: А – алюминий, Мг – магний (основной легирующий элемент), цифра – примерное содержание магния. Марганец (Mn) – дополнительный легирующий элемент.</p> <p>Применение: детали, требующие хорошей свариваемости и высокой коррозионной стойкости (например, сварные узлы, обшивки).</p> <p>Свойства: высокая коррозионная стойкость, отличная свариваемость (прочность шва 90-95%), пластичность. Не упрочняются термической обработкой; прочность повышается наклепом (холодной деформацией). В составе строго ограничиваются вредные примеси железа и кремния.</p> <p>Формы поставки: холоднокатаные листы.</p>
Другие материалы	<p>В конструкциях также находят применение сплавы АК6, АК8, магниевый сплав МЛ5Т, а также высокопрочные стали (30ХГСА, 30ХГСНА).</p>

Совершенствование технологий применения алюминиевых сплавов в проектировании и производстве самолетов привело к активному внедрению высокоэффективных марок, отвечающих строгим эксплуатационным требованиям. К материалам, используемым в авиации, предъявляются повышенные требования по прочности, вязкости, усталостной долговечности, а также по легкости и надежности для обеспечения длительной работы в экстремальных условиях. Для достижения необходимых свойств специалисты применяют комплекс технологических процессов, включая термообработку, прецизионное регулирование параметров и методы микроструктурного управления, что позволяет модифицировать характеристики алюминиевых сплавов в соответствии с запросами авиационной промышленности.

Алюминиевые сплавы остаются основным конструкционным материалом для планера. В период 2000–2010 годов их доля в структуре применения сохранялась на уровне примерно 50 %. Эти материалы характеризуются высокими значениями удельной прочности и удельной жесткости, сопоставимыми с легированными сталями, а также высоким сопротивлением усталости и хорошей технологичностью. Повышение надежности, улучшение трещиностойкости и усталостных свойств сплавов для фюзеляжа, крыла и силового набора достигается за счет повышения чистоты сплавов (снижения содержания примесей кремния и железа), разработки новых режимов термообработки и улучшения качества полуфабрикатов.

Таким образом, алюминиевые сплавы, получаемые путем введения легирующих элементов в чистый алюминий, являются одним из самых распространенных и востребованных материалов в авиастроении, широко используемых для изготовления корпусных деталей и крепежных элементов, таких как заклепки.

1.4 Анализ существующих методов размерной и финишной обработки изделий летательных аппаратов

Развитие авиастроения и уровень конкурентоспособности производства в огромной степени зависят от эффективности использования новых

конструктивных решений, материалов и методов их обработки при изготовлении летательных аппаратов.

Эти методы решают задачи: повышение прочности, улучшение аэродинамики, защита от коррозии и эрозии, достижение требуемой шероховатости и точности размеров [35]. Условно их можно разделить на несколько основных групп, приведенных в таблице 2.

Основными недостатками методов их обработки являются термические повреждения. Из-за высокой интенсивности трения в зоне обработки выделяется критическое количество тепла, что неизбежно ведет к прижогам, микро- и макротрещинам, а также образованию растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое. Такие дефекты – прямые концентраторы напряжений, резко снижающие ресурс детали. Также приведенные в таблице способы склонны деформировать тонкостенные авиационные изделия (например, корпуса), вызывая неодинаковый сьем материала, а как следствие неточность геометрии.

Помимо методов упрочнения поверхности, нанесения защитных и функциональных покрытий и методов чистовой поверхности, большое влияние на качество и точность поверхности оказывают разделительные методы обработки материала. В конструкциях летательных аппаратов применяют листовой материал, резка которого может осуществляться различными способами.

Среди таких методов раскроя можно назвать электронно-лучевую, гидроабразивную, плазменную и лазерную резку.

Электронный луч имеет очень высокую энергию, что позволяет производить резку даже на материалах с высокой твердостью и плотностью. В процессе электронно-лучевой резки электронный луч хорошо справляется с резкой стальных, алюминиевых, титановых и других металлических деталей. Однако технологические установки этого метода требуют больших затрат и необходимости проведения процесса в вакууме, а неизбежность рентгеновского излучения – особых мер предосторожности и средств защиты.

Таблица 2 – Методы обработки материалов, применяемые в авиастроении [составлено автором]

1. Методы упрочнения поверхности (Поверхностное пластическое деформирование - ППД)	
Цель: создать на поверхности сжимающие остаточные напряжения, повысить усталостную прочность, износостойкость и сопротивление коррозионному растрескиванию.	
Дробеструйная обработка	Обработка поверхности потоком мелкой дроби (стальной, керамической, стеклянной). Самый распространенный метод для ответственных деталей (лопатки турбин, шасси, силовые элементы планера). Увеличивает срок службы в разы.
Вибрационная обработка (алмазное выглаживание, роликовая обработка)	Использование твердого индентора (ролика, шарика) для пластического деформирования поверхности без снятия стружки. Применяется для обработки галтелей, посадочных мест, наружных обводов. Дает очень гладкую поверхность.
Упрочняющая механическая обработка:	Специальные режимы шлифования, точения или фрезерования, которые создают упрочненный поверхностный слой.
2. Методы нанесения защитных и функциональных покрытий	
Цель: защита от коррозии, эрозии, высоких температур, износа, а также придание специальных свойств (теплоизоляция, электропроводность).	
Анодирование (для алюминиевых и титановых сплавов):	Электрохимическое создание толстого, твердого оксидного слоя. Повышает коррозионную стойкость и служит хорошей основой для покраски.
Гальванические покрытия:	
Кадмирование:	Отличная защита стальных деталей от коррозии (особенно важна для деталей шасси и крепежа).
Хромирование:	Повышение износостойкости (например, на штоках шасси).
Никелирование:	Защита от коррозии и износа.
Термическое напыление (газотермическое напыление):	Напыление расплавленных частиц материала (металлов, керамики, карбидов) на поверхность.
HVOF (High-Velocity Oxy-Fuel):	Для нанесения сверхтвердых износостойких покрытий (карбид вольфрама-кобальта) на детали шасси и другие узлы трения.
Напыление керамики (оксид циркония, оксид алюминия):	Для термобарьерных покрытий (ТБП) на лопатках турбин.

Продолжение таблицы 2

Вакуумные методы:	
PVD (Physical Vapor Deposition):	Напыление в вакууме тонких, сверхтвердых покрытий (нитрид титана, алмазоподобный углерод) для режущего инструмента и износостойких деталей.
CVD (Chemical Vapor Deposition):	Для нанесения жаростойких и износостойких покрытий (карбид кремния, нитрид бора).
Лакокрасочные покрытия:	Многослойные системы (грунт, пигментный слой, лак) с высокой стойкостью к УФ, перепадам температур, воздействию топлива и гидрожидкостей. Включают противообледенительные и антистатические краски.
3. Методы чистовой абразивной и безабразивной обработки	
Цель: достижение высокой точности размеров, формы и низкой шероховатости.	
Прецизионное шлифование:	Окончательная обработка сопрягаемых поверхностей, посадочных мест под подшипники.
Хонингование и суперфиниш:	Для обработки внутренних цилиндров (гидросистемы), цапф валов. Обеспечивает идеальную геометрию и микрорельеф.
Полирование:	Механическое, химическое или электролитическое. Критически важно для лопаток турбин (снижение турбулентности, повышение усталостной прочности) и наружных обводов для улучшения аэродинамики.
Ультразвуковая обработка (УЗО) и Электрохимическая обработка (ЭХО):	Для обработки сложнопрофильных деталей из жаропрочных сплавов без наведения остаточных напряжений. Применяется в производстве лопаток.
Лазерная обработка:	Лазерная очистка, текстурирование, маркировка, упрочнение (лазерная закалка).

Востребованной технологией в сфере обработки металлов является гидроабразивная резка (рисунок 5), позволяющая обеспечить высокую точность поверхности, а также избежать последующей дополнительной обработки. Такой способ хорошо подходит для аэрокосмической промышленности, т.к. не оказывает высокотемпературного воздействия. Однако на практике используется редко по ряду причин.

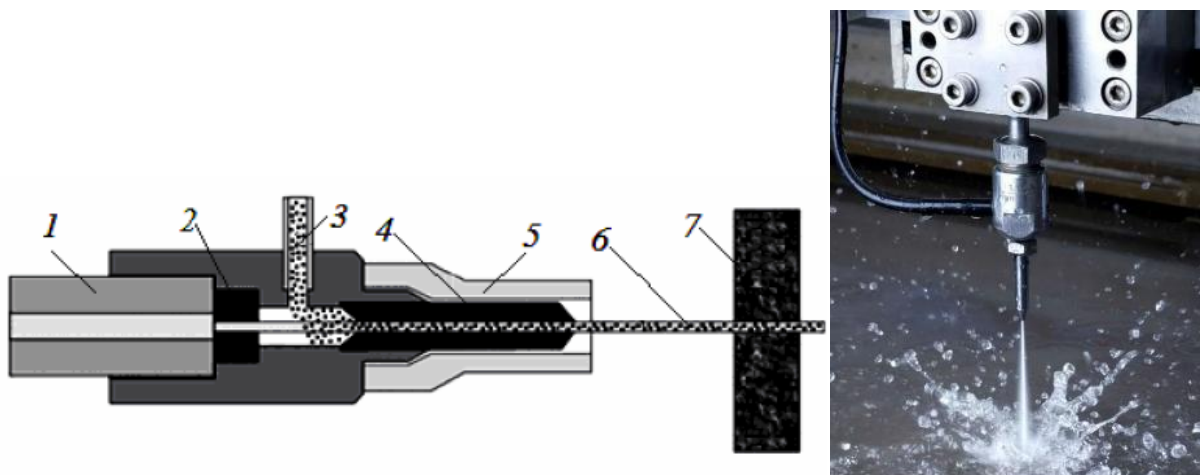


Рисунок 5 – Схема гидроабразивной резки: 1 – подвод воды под высоким давлением; 2 – сопло; 3 – подача абразива; 4 – смеситель; 5 – кожух; 6 – режущая струя; 7 – разрезаемый материал [35]

Среди недостатков выделяется высокая стоимость, связанная не только с ценой оборудования, но и с большими затратами на его обслуживание. Также применение гидроабразивной резки осложняется быстрым изнашиванием режущих частей таких установок.

Мягкие материалы, к которым относятся алюминиевые сплавы, хуже обрабатываются гидроабразивной резкой. С увеличением подачи в нижней части среза заметно образование волнистой поверхности, что говорит о существенном увеличении времени процесса для получения наилучшего качества поверхности.

Ко всему прочему скорость резания тонколистовых материалов, применяемых в изготовлении летательных аппаратов, уступает лазерной технологии.

Плазменная резка алюминия не является распространенным явлением на производстве, т.к. считается, что этот материал не выдерживает нагрева, а на

поверхности срезов наблюдается пористость из-за того, что этот метод основан на принципе контролируемого расплавления и удаления материала с помощью сильного теплового воздействия. При правильном подборе всех параметров процесса можно добиться чистоты обработанной поверхности, но плазменная резка остается менее точным методом по сравнению с лазером.

Самым распространенным методом раскроя листового материала при производстве летательных аппаратов является лазерная резка (рисунок 6). При такой размерной обработке лазерный луч фокусируется на узком участке материала, который плавится и испаряется, создавая разрез в материале.



Рисунок 6 – Процесс лазерной резки [35]

Процесс лазерной резки происходит в несколько этапов. Сначала лазерный источник излучает луч, который через систему линз фокусируется на поверхности материала, создавая очень маленький и мощный световой пучок. При движении лазерного луча по поверхности материала он разрезает его по заданной линии, создавая рез в материале [5].

Использование лазерной резки в производственных процессах является очень эффективным способом, так как позволяет обрабатывать различные материалы с высокой точностью, скоростью и чистотой. Однако, в случае с материалами на основе алюминия поверхность кромок, обработанных лазерным лучом, имеет высокую шероховатость и большое количество дефектов (рисунок 7).

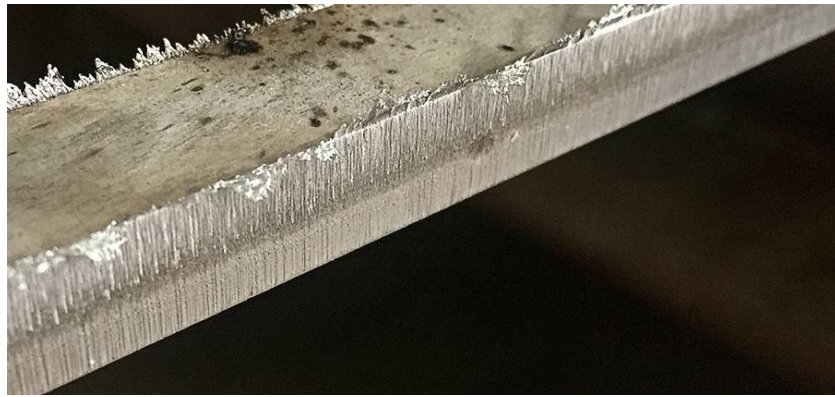


Рисунок 7 – Поверхность алюминия после лазерной резки [19, 20]

Несмотря на высокую скорость и точность, лазерная резка алюминия связана с рядом технических трудностей, вытекающих из физико-химических особенностей материала.

Одной из ключевых проблем является высокая отражательная способность и теплопроводность алюминия. Алюминиевый сплав сильно отражает инфракрасное излучение – рабочий диапазон распространённых CO₂-лазеров. Кроме того, процесс может становиться нестабильным: из-за отражения луч может неожиданно прервать резку. Отражённое излучение также повышает износ и риск повреждения оптических компонентов установки.

Другой существенный недостаток связан с наличием на поверхности алюминия тугоплавкой оксидной пленки (Al₂O₃), температура плавления которой около 2050°C, что значительно выше, чем у самого металла (~660°C). В процессе резки это приводит к образованию прочного грата (окалины) на нижней кромке реза, который сложно удалить. Качество кромки часто ухудшается: появляются неровности, наплывы, повышенная шероховатость. Для минимизации этих эффектов требуется применение специальных технологических газов, чаще всего азота высокого давления или повышенной чистоты.

Кроме того, при лазерной резке алюминиевых сплавов могут возникать дефекты в зоне термического влияния. Термоциклическое воздействие приводит к микроструктурным изменениям материала. В частности, в некоторых термически упрочняемых алюминиевых сплавах может происходить отпуск и разупрочнение, что выражается в снижении твёрдости в зоне среза. В сплавах с высоким содержанием легирующих добавок существует риск образования горячих трещин.

Также при обработке пористых отливок возможно увеличение размеров пор, что негативно сказывается на качестве формируемой кромки.

Подобное качество поверхностного слоя, полученное после лазерной резки – с наличием оксидной пленки, грата, зоны термического влияния (ЗТВ) и повышенной шероховатостью – требует обязательной последующей финишной обработки, т.к. такая поверхность не соответствует конечным эксплуатационным требованиям изделий летательных аппаратов.

1.5 Выводы по первой главе

1. Установлено, что шероховатость листов из алюминиевого сплава, например АМгб после прокатки сама по себе не является стабильной величиной. Она во многом зависит от конкретных условий обработки: режимов самой прокатки (горячей или холодной), степени обжатия, 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.

2. Анализ возможностей традиционных методов финишной обработки изделий (механическое полирование и зачистка, химическое травление, электрохимическое полирование и др.) показывает, что большинство из них не отвечает требованиям современного производства по производительности и качеству формируемых поверхностей.

3. Установлено, что лимитирующим фактором долговечности заклёпочного соединения является состояние поверхностного слоя листового материала в зоне контакта отверстия.

4. Выявлен технологический пробел: отсутствие комбинированного метода, обеспечивающего формирование глубокого модифицированного поверхностного слоя высокого качества и твердость поверхности зоны заклёпочного соединения сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов.

5. На основании сформулированных выводов ставится цель и задачи исследования.

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 чернового и чистового воздействия.

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, представленных в научных источниках, с целью выдвижения гипотезы о влиянии состояния поверхностного слоя изделий из алюминиевых сплавов на обеспечение долговечности неразъёмных 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.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СОПРЯГАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

2.1 Сущность, особенности и возможности магнитно-абразивной обработки

Магнитно-абразивная обработка является методом преимущественно финишной обработки поверхностей, основанном на феномене магнитного поля [9]. Первое техническое решение по применению магнитного поля при финишной обработке поверхностей было опубликовано более 75 лет назад, однако интенсивное развитие эта технология получила лишь в последние примерно 40 лет, главным образом в научных коллективах Минска и Санкт-Петербурга. Ими были разработаны теоретические основы магнитно-абразивной обработки, а также созданы и внедрены в производство технологии и оборудование для полирования в магнитном поле рабочих поверхностей различных деталей машин и приборов.

Сущность метода заключается в создании принудительного относительного движения между обрабатываемой деталью и ферроабразивным порошком, помещенным в магнитное поле [50, 57]. Порошок, обладающий магнитными и абразивными свойствами, формирует режущий инструмент, плотность которого контролируется напряженностью приложенного магнитного поля [52, 54, 56].

Под действием магнитных сил частицы магнитно-абразивной массы прижимаются к поверхности детали, создавая локальное давление, которое приводит к микрорезанию и сглаживанию неровностей. В процессе используется жидкая среда (СОТС – смазочно-охлаждающие технологические средства или СОЖ – смазочно-охлаждающая жидкость), выполняющая в основном роль носителя поверхностно-активных веществ, а не средства охлаждения [13, 15, 40].

Таким образом, в рабочей зоне формируется гибкий абразивный инструмент, точно копирующий контур обрабатываемой поверхности. Ключевым параметром этого инструмента является жесткость, которая управляется изменением напряженности магнитного поля в рабочем зазоре, удерживающего абразивный порошок в зоне обработки. Необходимые для съема материала

движения, такие как вращение заготовки и её осевую осцилляцию, обеспечивают стандартные электромеханические приводы.

Среди возможностей магнитно-абразивной обработки (МАО) можно особенно выделить:

1. Универсальность обработки поверхностей

Магнитно-абразивный способ демонстрирует высокую адаптивность к форме обрабатываемых изделий. Он успешно применяется для обработки как простых поверхностей, так и поверхностей сложной конфигурации: наружных и внутренних цилиндрических, плоских, сферических, винтовых, а также поверхностей с эвольвентным, трапецеидальным и иным профилем. Особенно перспективным является применение МАО для обработки длинномерных изделий, таких как прутки, трубы, проволока, листы и ленты, что расширяет границы традиционных методов обработки в машиностроении [44, 67, 75].

2. Высокое качество поверхности

Одной из ключевых возможностей МАО является формирование поверхностного слоя с низкими показателями шероховатости. Оптимизация технологических режимов позволяет стабильно получать поверхность 12 класса чистоты с параметром $Ra = 0,02-0,04$ мкм. В специальных условиях, когда процесс идёт преимущественно за счет пластического деформирования микронеровностей, достигается шероховатость 14 класса ($Ra \leq 0,01$ мкм). Этот потенциал позволяет формировать заданный нанорельеф, что критически важно для производства прецизионных деталей электронной, оптической и лазерной техники [46, 60, 69].

3. Улучшение эксплуатационных свойств изделий

Поверхностный слой, сформированный в результате МАО, обладает улучшенными физико-механическими характеристиками. Обработка позволяет создавать в приповерхностном слое остаточные сжимающие напряжения, что приводит к повышению контактной усталостной прочности и износостойкости на 20–40% по сравнению с традиционным шлифованием. Одновременно повышается коррозионная стойкость деталей, так как метод устраняет микродефекты,

являющиеся очагами зарождения коррозии, и формирует более однородную и плотную структуру поверхностного слоя [70, 77, 78].

4. Подготовка поверхностей перед дальнейшими операциями

МАО является высокопроизводительным и экологически чистым методом для операций подготовки поверхностей [28]. Он эффективно решает задачи зачистки и очистки поверхностей перед сваркой, пайкой и нанесением защитных или функциональных покрытий (металлических, керамических). Метод позволяет удалять окалину, продукты коррозии, заусенцы, а также скруглять острые кромки, обеспечивая высокую степень чистоты и активированности поверхности для последующего прочного соединения или адгезии покрытия [63, 64].

5. Экологическая и экономическая эффективность

Процесс МАО отличается мягкими режимами: температура в зоне обработки обычно не превышает 60–150 °С, что исключает риск термических повреждений и структурных превращений в материале. По сравнению с электрохимическим полированием метод не требует использования больших объемов агрессивных и токсичных электролитов, что упрощает утилизацию отходов и снижает экологическую нагрузку. Это приводит к значительному сокращению эксплуатационных затрат и улучшению условий труда [55, 59, 66].

6. Гибкость и управляемость процесса

Уникальной особенностью МАО является возможность бесступенчатого управления «жесткостью» абразивного инструмента – ферромагнитного порошка – путем простого изменения силы тока в электромагнитах. Это позволяет гибко регулировать давление на обрабатываемую поверхность и характер воздействия (от микрорезания до полирования) в рамках одного технологического цикла. Широкая «пористость» порошковой массы способствует эффективному подводу смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) в зону обработки, что дополнительно интенсифицирует процесс и улучшает качество поверхности [45, 47, 49].

7. Перспективные направления применения

Потенциал метода далеко не исчерпан. Наиболее перспективными направлениями являются применение МАО для полирования прецизионных

поверхностей в микроэлектронике (например, пластин монокристаллического кремния), оптике (линзы, призмы) и лазерной технике. Также практически не изучены возможности полирования самих покрытий и обработки пространственно-сложных поверхностей. Решение этих задач может привести к прорыву в качестве продукции указанных высокотехнологичных отраслей [65].

8. Научно-технический потенциал

МАО базируется на глубоком теоретическом фундаменте. Разработаны математические модели для расчета магнитных полей, оптимизации геометрии полюсных наконечников и анализа динамики ферроабразивных частиц. Изучены физико-химические явления в зоне обработки, такие как магнито- и электропластический эффекты, адсорбционное разупрочнение, что позволяет целенаправленно управлять процессом. Эта научная база открывает возможности для дальнейшей эволюции метода, создания новых композиционных абразивных материалов и высокоэффективного оборудования [58, 73, 74].

2.2 Выбор параметров рабочей технологической среды процесса

Рабочая технологическая среда процесса обработки включает в себя магнитное поле, ферроабразивный порошок и смазочно-охлаждающую жидкость, оказывающих комплексное воздействие на качество поверхности обработанной поверхности. Неправильный подбор параметров магнитно-абразивного воздействия негативно влияет на характер и глубину обработки поверхностного слоя.

2.2.1 Выбор порошка

Инструментом резания в процессе магнитно-абразивного полирования выступает порошок, состоящий из мелких частиц металла с примесью абразивных зерен (например, карбида кремния, алмаза или оксида алюминия). Эффективность обработки зависит от ряда параметров ферроабразивного порошка, выступающего инструментом в процессе резания: форма частиц, гранулометрический состав, химическая активность с материалом, микротвердость абразивных составляющих.

Для обработки цветных металлов предпочтителен выбор однородного порошка, способствующего равномерному процессу обработки и распределению

постоянных температур в зоне резания. При этом целесообразно использовать ферроабразивный порошок с высокой твердостью абразивных составляющих. С целью достижения наименьшей шероховатости желательно применение зерен сферической формы, которые обеспечат микровыглаживание поверхности изделий из алюминиевых сплавов. К тому же такая форма зерен позволяет абразивной массе активно перемешиваться, способствуя самозатачиванию вершин, что приводит к интенсификации процесса резания [61, 62].

Исследования изменений геометрии поверхности и характера формируемого при МАО микрорельефа показали: с ростом подвижности зерен ферроабразивного порошка получаемая поверхность по ключевым характеристикам приближается к обработанной струей абразива, а при снижении подвижности — к обработанной жестким абразивным инструментом.

Границы управления жесткостью магнитно-абразивного инструмента могут быть существенно расширены, а эффективность МАО повышена за счёт применения ферроабразивных частиц с оптимальными значениями характеристик их формы и размеров [41].

Согласно условию максимальной производительности обработки необходимо обеспечить превышение твердости абразивного материала по сравнению с обрабатываемым материалов в 2,5 раза и более [22].

Твердость частиц Пр10Р6М5 составляет $H_B \cdot 10^{-1} = 255$ МПа, заявленная твердость алюминиевого сплава АМг6 составляет $H_B \cdot 10^{-1} = 40$ МПа. Условию максимальной производительности обработки (2.1) выполняется [22].

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

Порошок Пр10Р6М5 выбран ввиду выполнения условия максимальной производительности, его доступности на рынке, высокому периоду стойкости. для одной заготовки [22]. При этом фракция порошка, способная обеспечить высокую чистоту поверхности составляет $\Delta = 80 - 140$ мкм.

Параметры порошка приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры выбранного порошка для проведения экспериментов
[составлено автором]

Параметр	Показатель	Хим.состав:			
		Железо-основа	Ванадий		
Формула	Порошок ПР-10Р6М5 "Д"				1,9%
Синонимы	порошок быстрорез	Углерод	1%	Кремний	0,6%
Гранулометрический состав:	80-140 мкм	Хром	4%	Марганец	0,65%
Чистота	99%	Вольфрам	6,5%	Никель	2%
Твердость	HRC 59-60 или 760-990 HV	Молибден	5,2%	Сера	0,03%

2.2.2 Выбор смазочно-охлаждающей жидкости

Установлено, что требуемые свойства финишной обработки обеспечиваются также применением соответствующего вида смазочно-охлаждающей жидкости. Смазочно-охлаждающие средства применяются не только для снижения температуры процесса, но и с целью интенсификации обработки. дополнительного полирования, а также предотвращения шаржирования абразивных частиц в поверхностный слой.

Знание физико-химических свойств, таких как плотность и кинематическая вязкость, способствует прогнозированию эффективности применения конкретного типа жидкости для обработки различных цветных металлов и сплавов. Поскольку процесс магнитно-абразивного полирования проходит при относительно невысоких температурах, нет необходимости в интенсивном теплоотводе, соответственно при выборе смазочно-охлаждающих средств опираются на их режущие и моющие свойства [61].

Важно отметить, что поверхностно-активные вещества в составе смазочно-охлаждающих жидкостей способствуют процессу снятия тонких химических пленок и предразрушению поверхностного слоя, что уменьшает затрачиваемую

энергию на деформацию поверхности для достижения необходимой шероховатости.

С целью улучшения качества формируемой поверхности и отсутствия пенообразования в процессе обработки в качестве смазочно-охлаждающей жидкости рекомендовано применение масляных водорастворимых средств на эмульсионной основе [29, 34, 37].

Исходя из рекомендаций [4] и результатов исследований, при назначении СОЖ следует учитывать ее способность интенсифицировать процесс МАО, ее моющий эффект, стоимость, срок годности к эксплуатации и соответствие санитарно-гигиеническим требованиям.

Традиционный подход (основанный на работах [4, 7, 8]) выбора СОЖ основывается на изучении и обеспечении диспергирующих (способность дробить и выводить абразив) и моющих свойств, а типичными составами являются Коллоидные растворы низкой концентрации на водной основе с химически активными добавками (триэтаноламин, олеиновая кислота, глицерин).

Более эффективным подходом является выделение трех дополнительных критически важных свойств СОЖ для МАО:

1. Проникающая способность – способность эффективно поступать в зону обработки.
2. Блескообразование – способность благоприятно влиять на достижение высокой микрогладкости и блеска поверхности.
3. Пассивирование – способность образовывать защитный слой на обработанной поверхности, предотвращающий коррозию.

Для достижения этих свойств необходимо введение в состав СОЖ поверхностно-активных веществ (ПАВ). Наибольший эффект дают не традиционные, а синтетические ПАВ на основе олигомеров и их производных. Они обладают чрезвычайно высокой поверхностной активностью, на порядки превосходящей традиционные ПАВ [5].

Для повышения эффективности МАО необходимо расширить требования к СОЖ, включив свойства проникающей способности, блескообразования и

пассивирования. Достичь этого оптимально позволяют современные водосмешиваемые концентраты. В качестве такого может выступать ECOCOOL Global 10 UK от немецкого бренда FUCHS, который уже зарекомендовал себя в качестве СОЖ для магнитно-абразивной обработки. Это современная синтетическая (или полусинтетическая) универсальная СОЖ с многофункциональными присадками, обычно разбавляется водой (в пропорциях 1:10 - 1:20) и отличается высокой биологической стойкостью (благодаря отсутствию нитритов и нитрозаминов) и технологичностью.

ECOCOOL Global 10 UK представляет собой сложный многокомпонентный химический продукт на водной основе. Его состав оптимизирован для обеспечения охлаждения, смазки, защиты от коррозии и биологической стабильности, особенно для цветных металлов, включая алюминий.

2.2.3 Выбор диапазона значений магнитной индукции с применением моделирования в программной среде ANSYS

Еще одним параметром рабочей технологической среды выступает магнитная индукция. Оценка формирования магнитной индукции в рабочем зазоре может быть осуществлена по результатам моделирования на основе численных методов.

В настоящее время как в научных дисциплинах, так и в производственном процессе, в качестве методологии выступают методы численного моделирования [29-31]. Численное моделирование ускоряет время проектирования изделий, при этом повышая их качество и производительность. Во многих направлениях виртуальное прототипирование - использование инструментов численного моделирования, основанных на методах конечных элементов - заменило традиционное создание и разрушение прототипов. Успешные разработки привели к улучшению протезных имплантатов, безопасности пассажиров в автомобильных авариях, упаковки, современных электронных чипов и другим достижениям.

С тенденцией к постоянному повышению точности моделирования приближения линейного поведения становятся все менее актуальными. Сегодня быстрый рост вычислительных мощностей и одновременное развитие методов

анализа сделали возможным более частое проведение нелинейного анализа и проектирования, при этом минимизации приближений. С целью аналитики и проектирования теперь пользуются возможностями моделирования в программах общего назначения, таких как ANSYS.

Моделирование проводилось в программном комплексе ANSYS Maxwell с целью определения диапазона значений, при которых обеспечивается равномерная магнитно-абразивная индукция (рисунок 8).

Моделирование было проведено для установки MAO, аналогичной существующей реальной экспериментальной установке, которая состоит из рабочего стола, стоек, сердечников, полюсных наконечников и катушек индуктивности. (количество витков медного провода катушки=5272 витка).

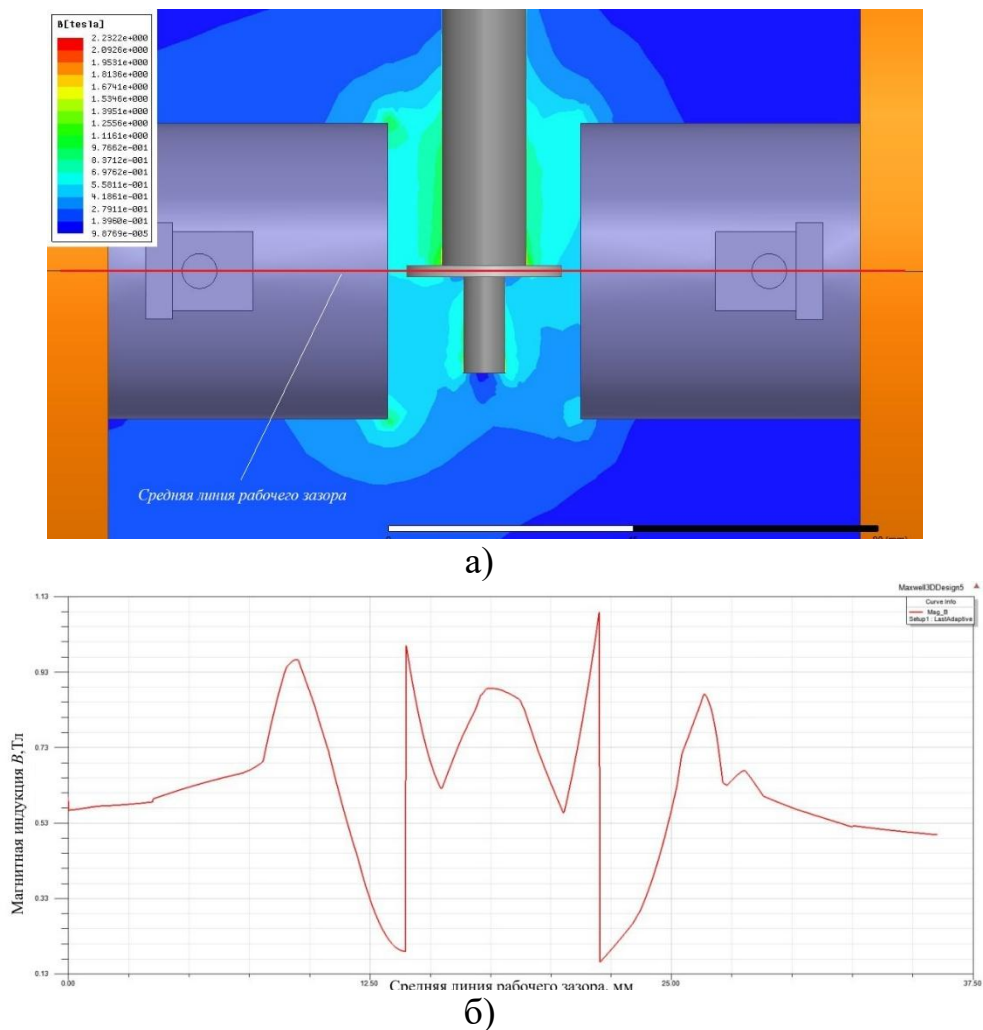
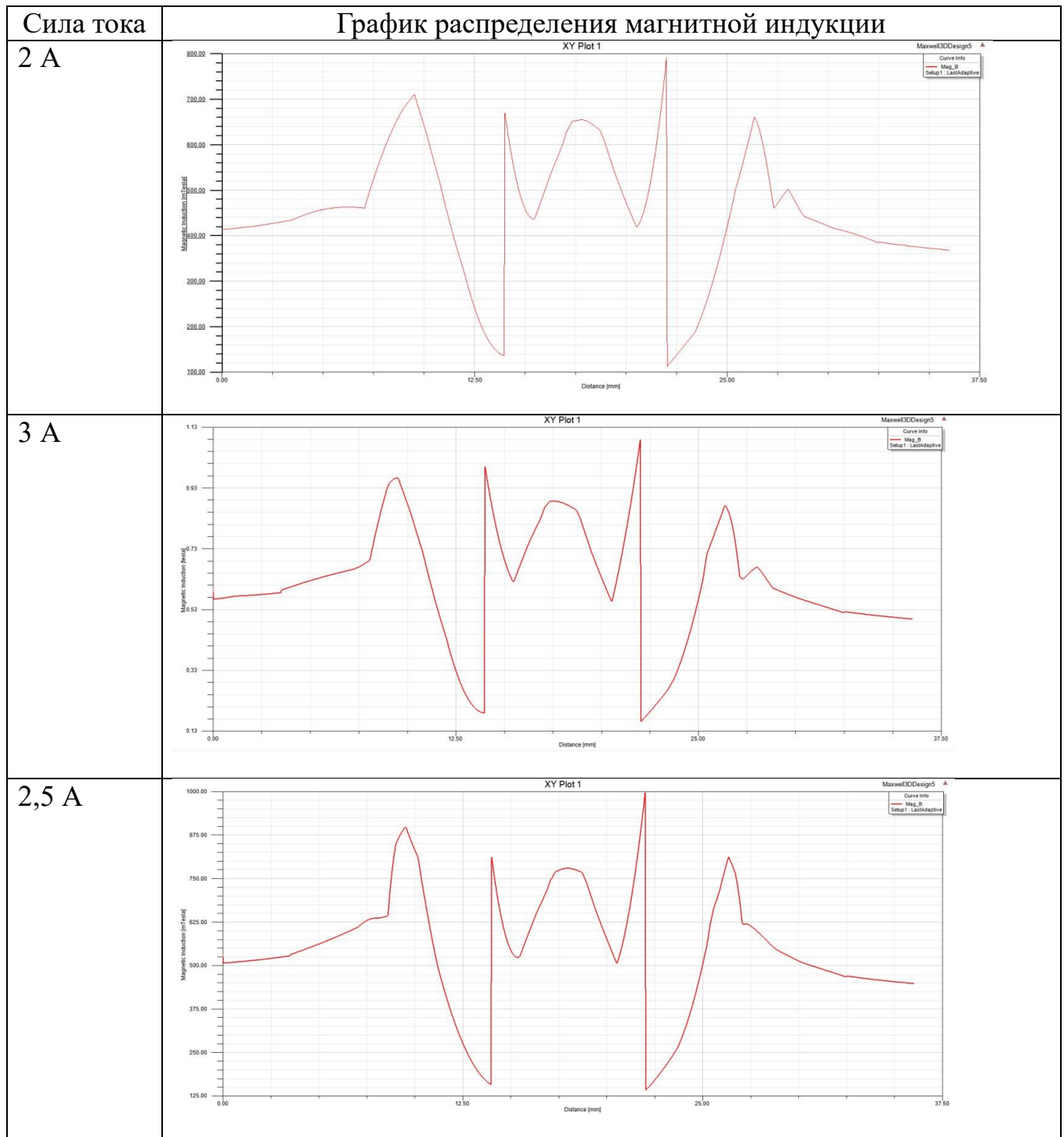


Рисунок 8 – Распределение магнитной индукции вдоль средней линии рабочего зазора в процессе предложенного варианта MAO: а) модель; б)

график [составлено автором]

При проведении моделирования важно было также выявить зависимость влияния силы тока на распределение магнитной индукции вдоль средней линии рабочего зазора (принимая за рабочий зазор расстояние по 3 мм с каждой стороны образца) (таблица 4).

Таблица 4 – Зависимость распределения магнитной индукции от силы тока [составлено автором]



Сила тока при моделировании считалась как: 5 272 витков - 1 Ампер, 10 544 витков - 2 Ампера, 13180 витков - 2,5 Ампера, 15816 витков - 3 Ампера.

В результате моделирования были получены значения, при которых обеспечивается равномерная магнитная индукция обрабатываемой кромки ($B=0,6...0,8$ Тл). Что касается исследования влияния силы тока, то профиль распределения магнитной индукции вдоль средней линии рабочего зазора при изменении силы тока от 2 до 3 А оставался практически неизменным, а значит можно сделать выбор о правильном выборе параметров среды [62].

Далее было проведено моделирование распределения магнитной индукции в рабочем зазоре в процессе магнитно-абразивной обработки алюминиевого листа тремя полюсными наконечниками, расположенными вдоль торца обрабатываемого листа и параллельно каждой из трех обрабатываемых поверхностей (рисунок 9).

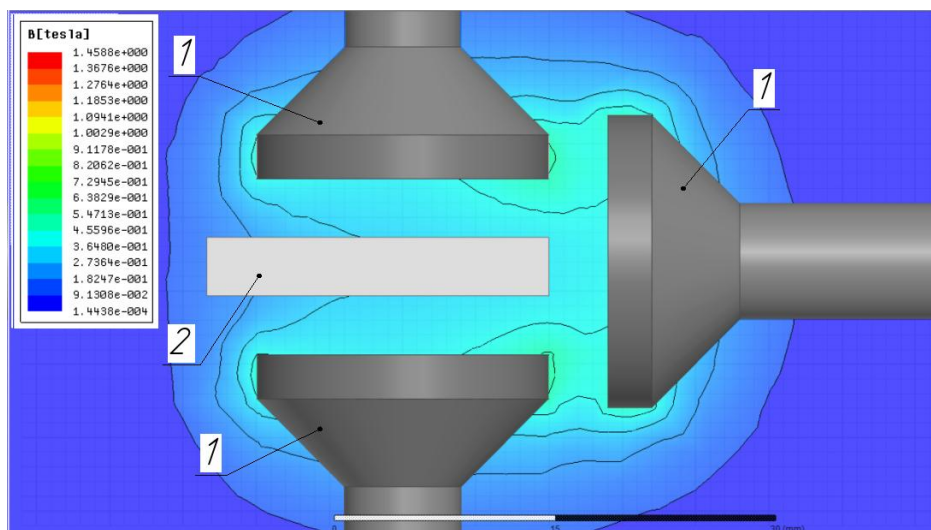


Рисунок 9 – Распределение магнитной индукции в рабочем зазоре:

1 – полюсные наконечники; 2 – обрабатываемая заготовка

[составлено автором]

Представленный вариант расположения полюсных наконечников относительно обрабатываемой поверхности торца алюминиевого листа позволяет обеспечить полное покрытие обрабатываемой поверхности магнитным полем со значением магнитной индукции B от 0,3 Тл и выше.

Так как алюминий относится к мягким материалам, то для получения качественной обработанной поверхности к жесткости магнитно-абразивной

щетки предъявляются пониженные требования. Оптимальный диапазон значений магнитной индукции B при обработке изделий из алюминиевых сплавов принимается от 0,3 до 0,8 Тл.

Таким образом, можно сделать вывод, что общие требования по равномерности покрытия рабочего зазора магнитным полем для предлагаемого способа обработки кромок листовых изделий из алюминиевых сплавов выполняется.

Получен график распределения магнитной индукции B вдоль средней линии рабочего зазора (рисунок 10) для предлагаемого способа обработки кромок листовых изделий.

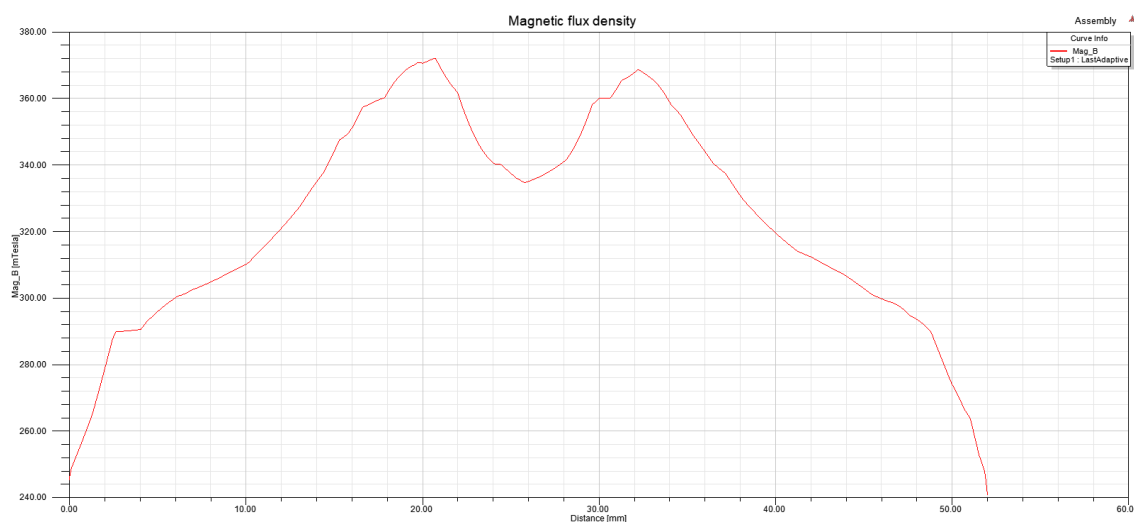


Рисунок 10 – График распределения магнитной индукции B вдоль линии рабочего зазора [составлено автором]

График показывает, что магнитная индукция B принимает значения от 0,24 до 0,37 Тл. При этом в центральной точке наблюдается снижение значения магнитной индукции до 0,335 Тл. Центральная точка средней линии рабочего зазора находится точно на осевой линии бокового полюсного наконечника. Так как к магнитным катушкам каждого из полюсных наконечников подводится ток одинаковой величины, то можно сделать вывод, что на пересечении средней линии рабочего зазора и осевой линии каждого из полюсных наконечников магнитная индукция будет принимать значения около 0,335 Тл.

Согласно графику, наблюдаются резкие повышения значения магнитной индукции B в точках 20 мм и 32 мм. Данные точки наиболее близки относительно

остальных точек средней линии к ребрам листа. При магнитно-абразивной обработке изделий, имеющих острые грани и, соответственно, определенное количество ребер, обеспечение равномерности распределения магнитной индукции B усложняется. В данном случае изменение значения магнитной индукции B на $0,035 \text{ Тл}$ в точках 20 мм и 32 мм относительно среднего значения $0,3 \text{ Тл}$ будем считать незначительным.

2.3 Разработанный способ магнитно-абразивной обработки

На кафедре машиностроения Санкт-Петербургского университета императрицы Екатерины II экспериментальные исследования в области магнитно-абразивной обработки ведутся уже давно. Установка, созданная Кексиным А.И. [17], позволяет производить испытания без обращения в другие лабораторные комплексы. В рамках нашего исследования была проведена серия испытаний, которая дала возможность прийти к новому запатентованному решению [31].

На рисунке 11 приведен процесс обработки испытуемого образца.

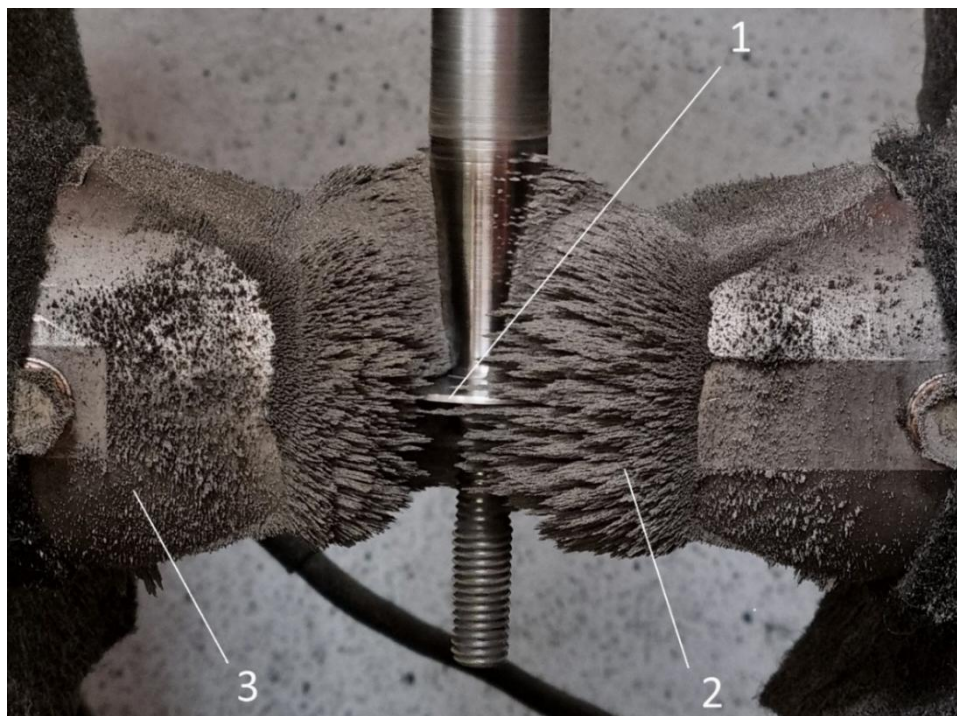


Рисунок 11 – Деталь в процессе обработки, где 1 – обрабатываемый образец, 2 – магнитно-абразивная масса, 3 – полюсные наконечники [фото автора]

В ходе экспериментов для разработки способа сохранялись следующие значения технологических параметров МАО:

магнитная индукция $B = 0,5 \dots 1$ Тл;

время обработки $t = 6 \dots 10$ мин;

фракция порошка Пр10Р6М5 $\Delta = 80-140$ мкм.

Величина рабочего зазора варьировалась от 1,5 до 5,5 мм.

Высокие требования к качеству поверхности кромок перед операциями клёпки и сборки корпусных элементов летательных аппаратов обусловили необходимость разработки метода, совмещающего высокую точность, отсутствие дефектов и повышенную производительность.

Известные способы МАО [30, 39], использующие одну трёхполюсную систему, не позволяют за один технологический переход выполнить как черновую, так и чистовую обработку. Это приводит к необходимости:

- остановки процесса,
- перенастройки оборудования (изменение рабочего зазора, параметров магнитного поля),
- увеличения общего времени обработки,
- риска возникновения дефектов на переходных участках между этапами.

Для устранения указанных недостатков предложено использовать две последовательно расположенные трёхполюсные магнитные системы, работающие синхронно в рамках одного технологического перехода (Таблица 5).

Конструкция каждой системы включает:

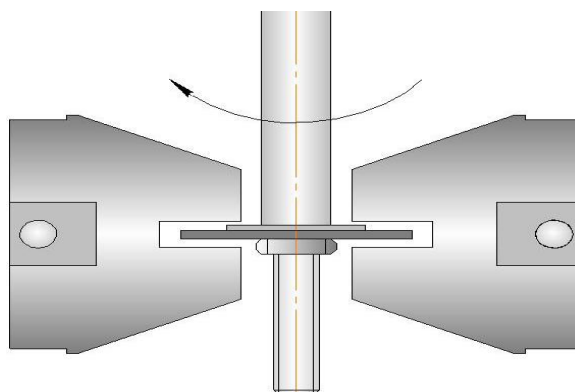
- Два боковых полюсных наконечника, воздействующих на боковые поверхности кромки.
- Один торцевой наконечник, воздействующий на торец кромки.

Таблица 5 – Ключевые параметры обработки [составлено автором]

Система	Этап обработки	Рабочий зазор	Направление вращения наконечников
Первая система	Черновой	2–3 мм	Встречное (торцевой и боковые вращаются навстречу)
Вторая система	Чистовой	4–5 мм	Попутное (торцевой и боковые вращаются в одном направлении)

Обработка в лабораторных условиях осуществлялась поэтапно. Для обеспечения трехстороннего воздействия в процессе исследований были разработаны наконечники с прорезями для обрабатываемого образца заданными размерами (рисунок 12). Т.к. образцы имеют толщину 0,8, 1 и 1,2 мм, то для обеспечения зазора 2-3 мм в случае черновой обработки высота прорези составила 7 мм, а для зазора на чистовую обработку – 11 мм.

а)



б)

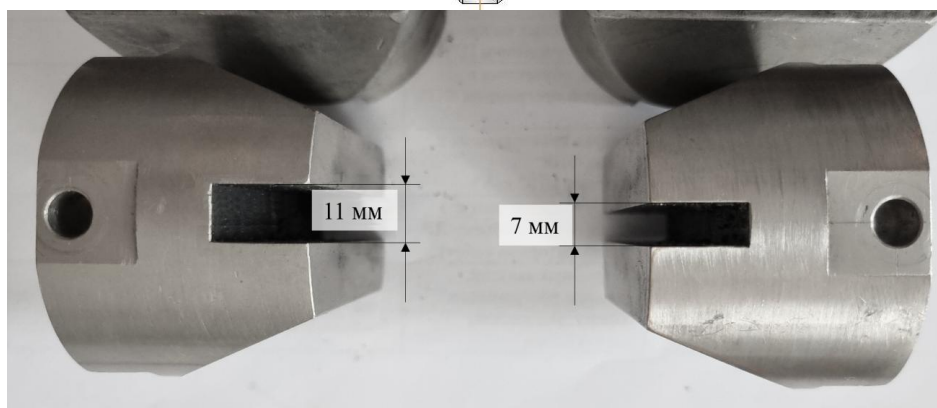


Рисунок 12 – Схема имитации зазоров на черновом и чистовом этапе обработки поверхностей изделий (а) и наконечники для черновой (справа) и чистовой (слева) обработки при двухконтурном способе магнитно-абразивного воздействия [составлено автором]

Способ магнитно-абразивной обработки поясняется рисунком 13.

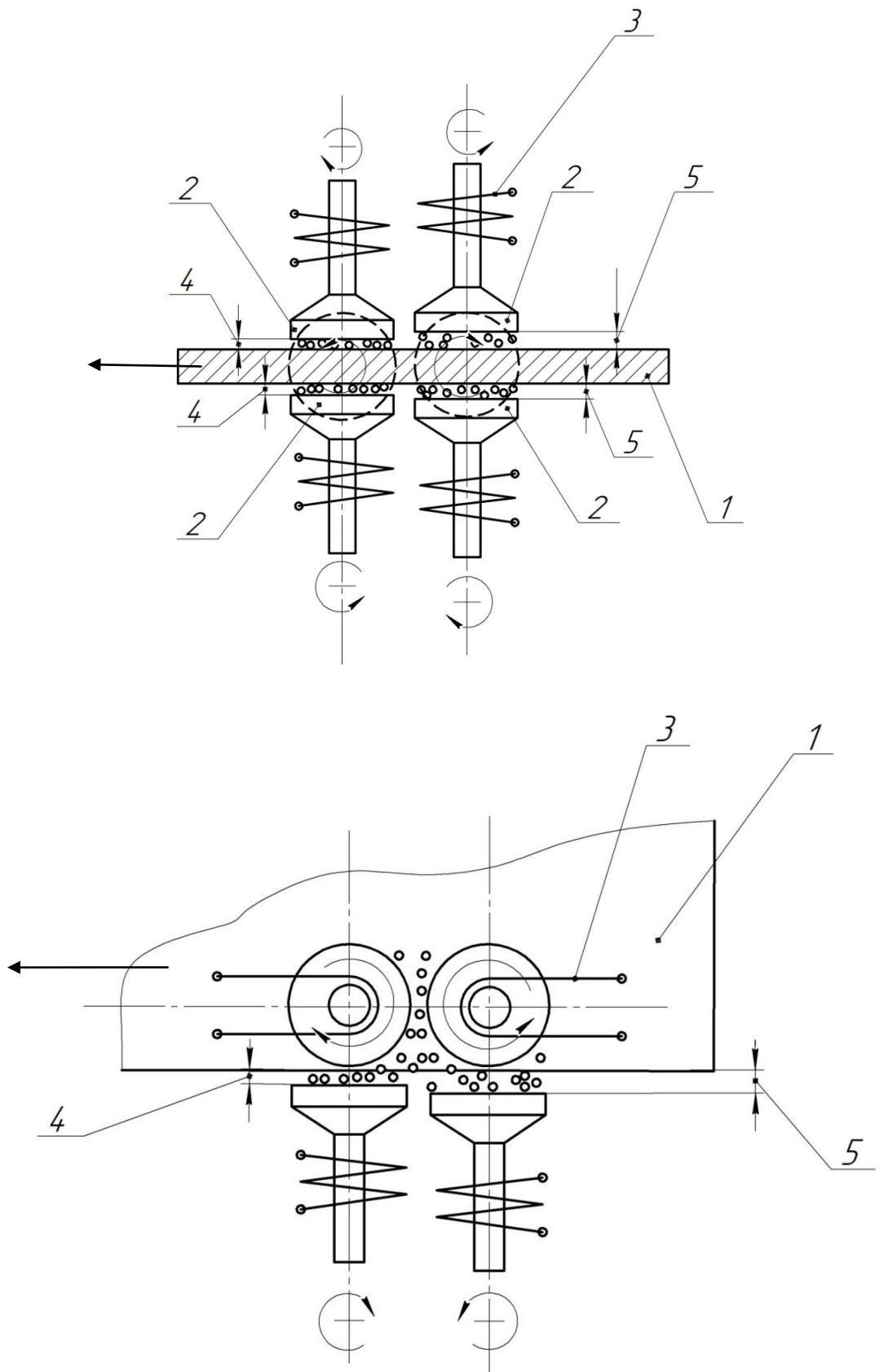


Рисунок 13 – Схема магнитно-абразивной обработки кромок листового проката, где 1 – кромка изделия; 2 – полюсной наконечник; 3 – электромагнитные катушки; 4 – зазор на черновую обработку; 5 – зазор на чистовую обработку [31]

Этап черновой обработки (первая система):

- Установлен малый зазор (2–3 мм), что обеспечивает интенсивное удаление материала.

- Встречное вращение наконечников создаёт пересекающиеся магнитные силовые линии в зоне стыка торцевой и боковых поверхностей, что позволяет равномерно обрабатывать угловые зоны и удалять основные дефекты.

Этап чистовой обработки (вторая система):

- Увеличенный зазор (4–5 мм) обеспечивает мягкое воздействие.
- Попутное вращение способствует сглаживанию поверхности, удалению микрорезаний, оставшихся после чернового этапа, и формированию требуемой шероховатости (Ra 0,2–0,3 мкм).

Синхронизация процессов:

- Изделие перемещается поступательно вдоль обеих систем без остановки.

- Оба этапа выполняются за один проход, что сокращает время обработки с ~10 минут (при двух отдельных переходах) до ~5 минут.

В ходе испытаний на образцах из алюминиевого сплава АМц толщиной 4 мм были получены следующие результаты:

При использовании одной системы с последовательной перенастройкой:

- Общее время: 10 минут (5 мин черновая + 5 мин чистовая).
- Риск появления дефектов при смене режимов.

При использовании двух систем по предлагаемому способу:

- Время сокращено до 5 минут.
- Достигнута равномерная шероховатость Ra 0,2–0,3 мкм.
- Отсутствие следов абразивного резания и других дефектов.

Предложенный способ представляет собой прогрессивную модификацию магнитно-абразивной обработки, позволяющую совместить черновую и чистовую обработку кромок за один проход. Это достигается за счёт применения двух синхронизированных трёхполюсных систем с различными зазорами и направлениями вращения, что обеспечивает высокое качество поверхности и экономическую эффективность процесса.

Разработанный способ был одобрен Федеральной службой по интеллектуальной собственности, зарегистрирован патент RU 2 800 274 С1.

2.4 Выбор расстояния между двумя системами

Для определения расстояния между двумя системами было проведено моделирование для разработанного способа с двумя трехполюсными контурами (рисунок 14).

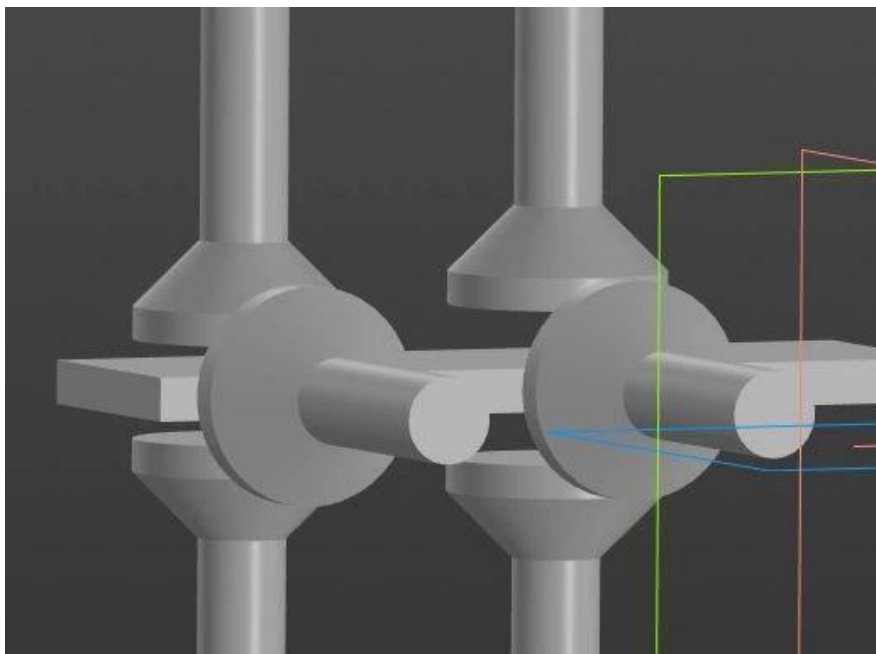


Рисунок 14 – 3D-моделирование двухконтурной системы [составлено автором]

В ANSYS Maxwell была проведена серия моделирования распределения магнитной индукции в зависимости от расстояния между двумя трехполюсными системами. Далее приведены результаты для 4 разных значений: 50 мм, 70 мм, 72,5 мм, 75 мм (рисунки 15-18).

В случае применения двух трехполюсных систем каждая из систем является независимой относительно другой. Соответственно, установить системы необходимо на таком расстоянии друг от друга, чтобы не происходило перетекание магнитного поля одной системы в систему другого, что влечет за собой образование «моста» из магнитно-абразивного порошка между двумя системами.

Если части магнитно-абразивного порошка, располагающегося в непосредственной близости к полюсным наконечникам, контролируются

оператором, то «мост» не подвергается контролю, режимные параметры обработки в данной части являются следствием взаимного влияния систем друг на друга.

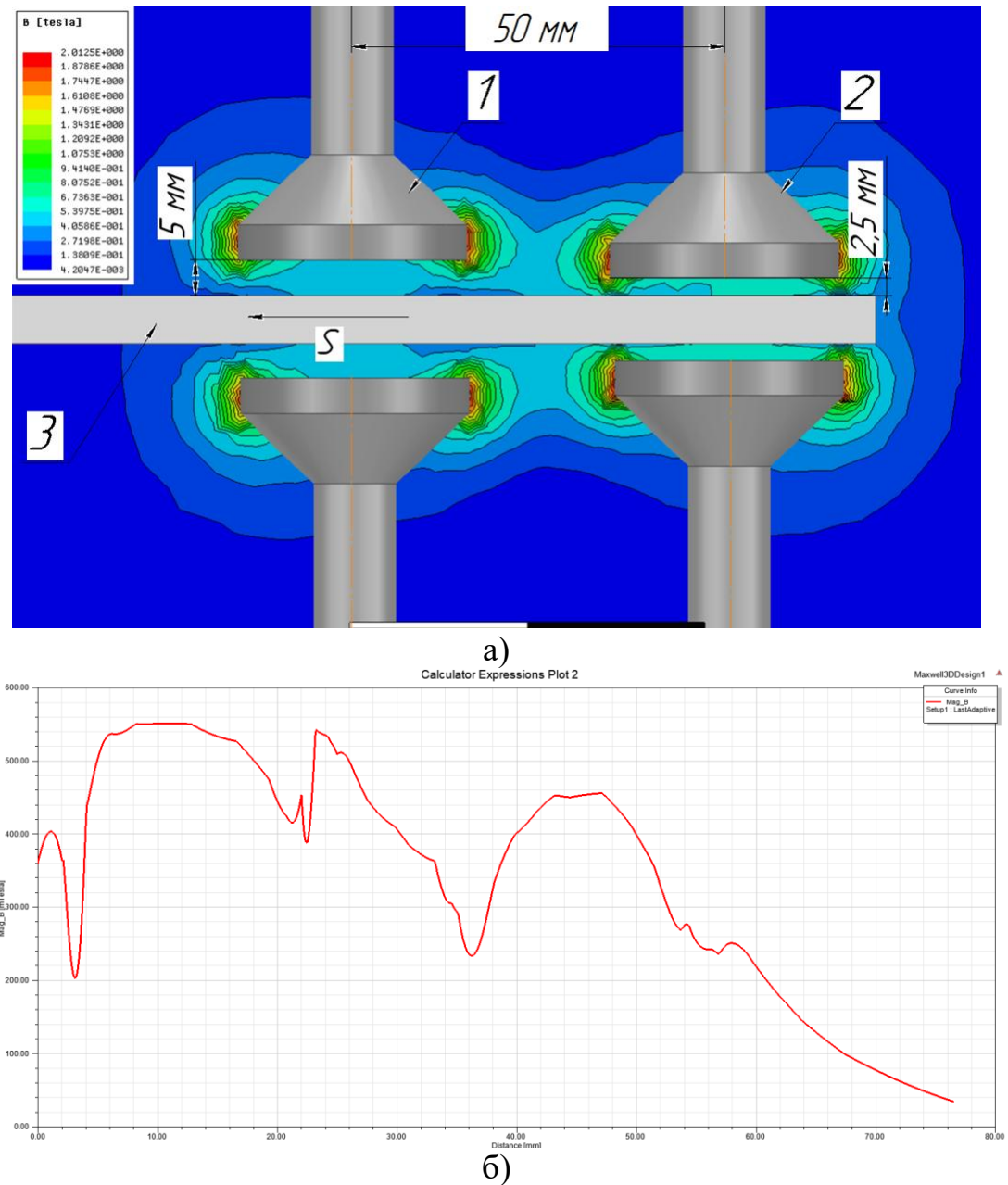
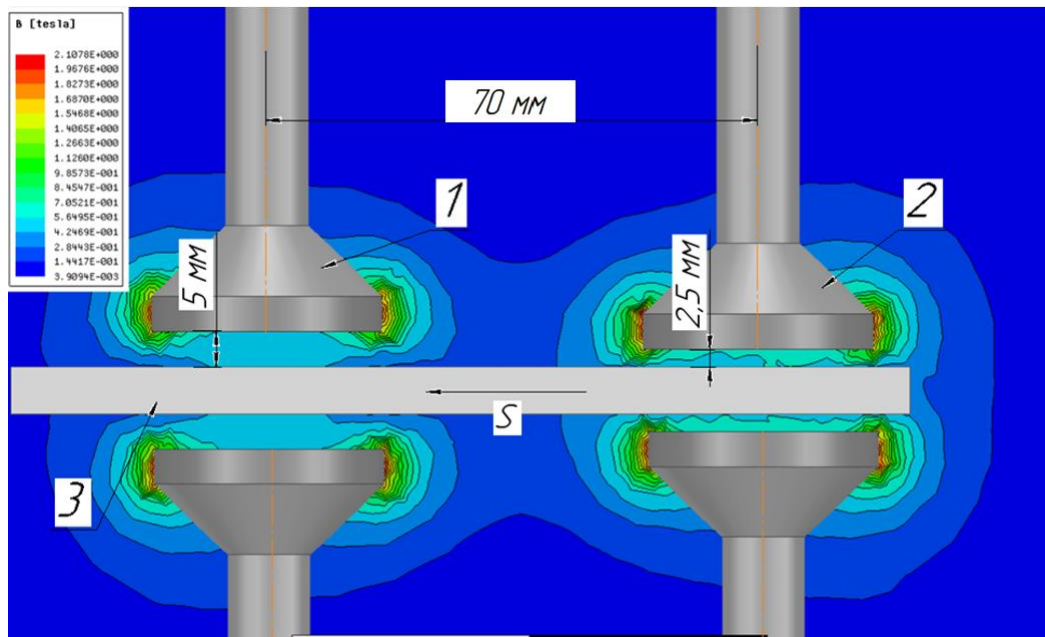
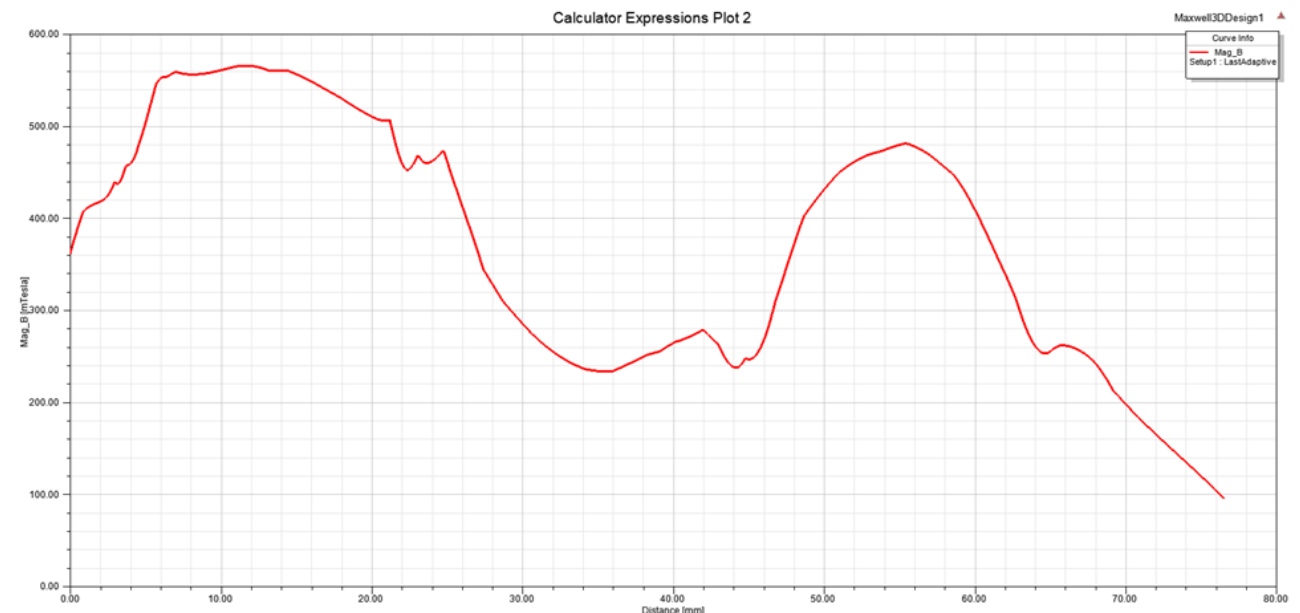


Рисунок 15 – Распределение магнитной индукции при расстоянии между двумя трехполюсными системами 50 мм: а) моделирование; б) график
[составлено автором]



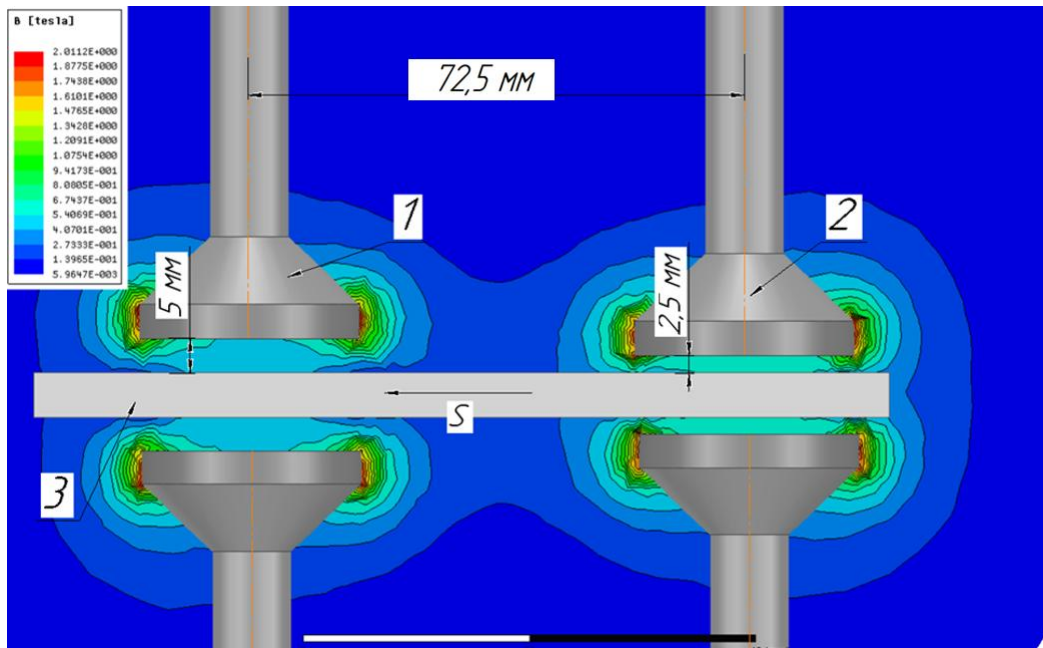
а)



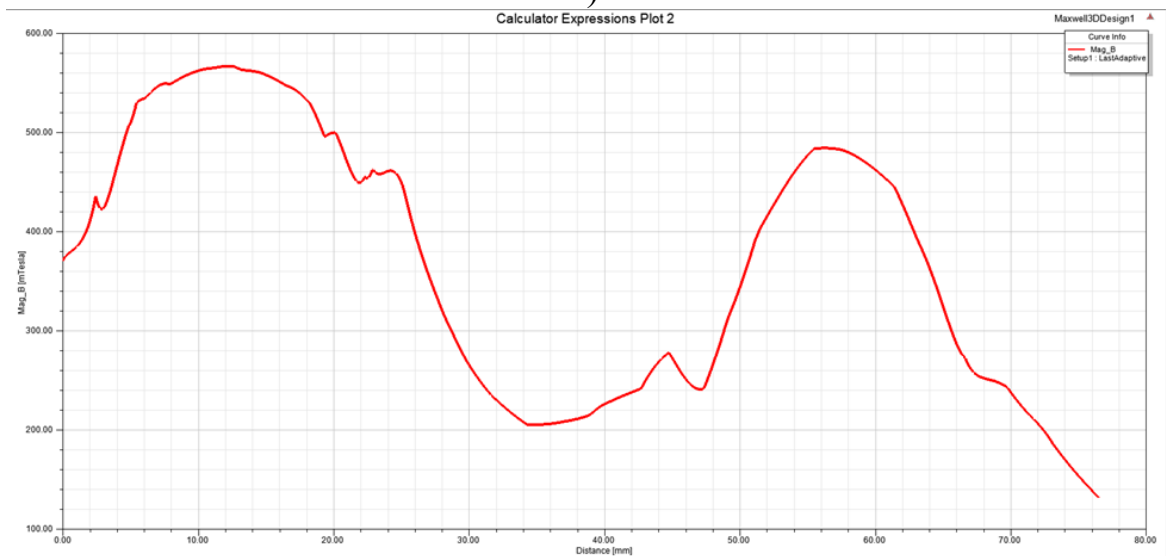
б)

Рисунок 16 – Распределение магнитной индукции при расстоянии между двумя трехполюсными системами 70 mm : а) моделирование; б) график [составлено автором]

По двум приведенным графикам стоит отметить, что характер распределения магнитной индукции значительно отличается при 50 mm и при 70 mm , т.к. на графике можно выявить снижение магнитной индукции в зоне между двумя системами.



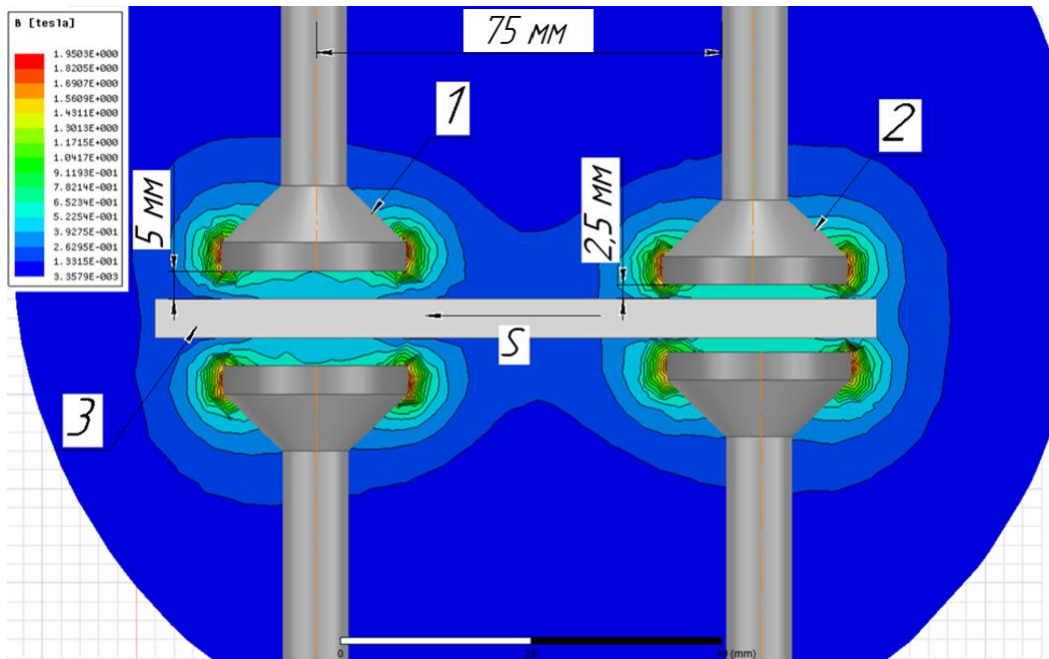
а)



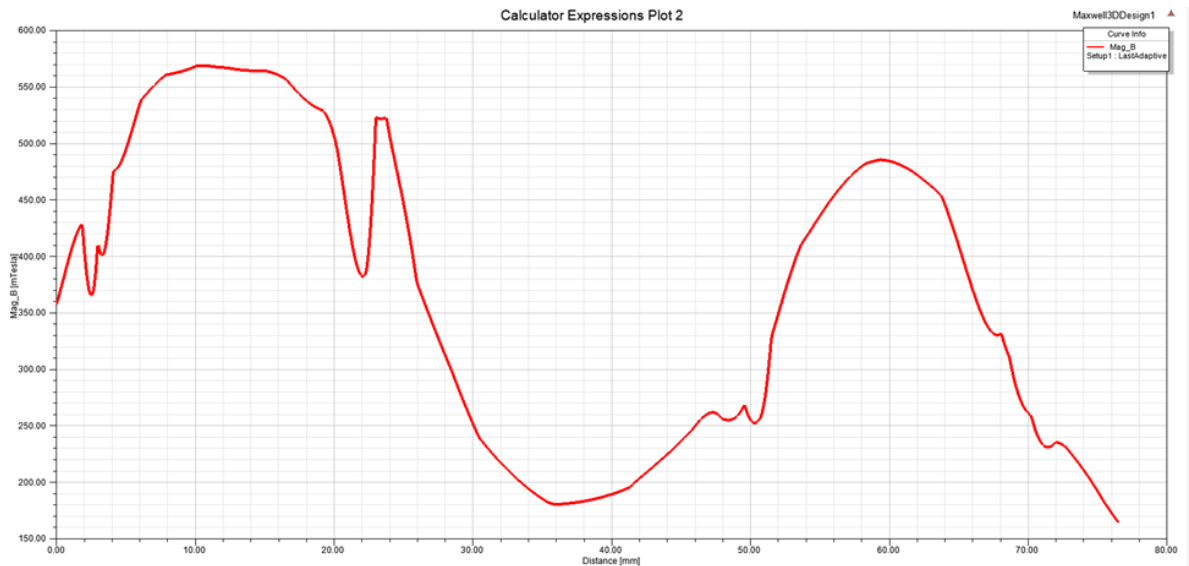
б)

Рисунок 17 – Распределение магнитной индукции при расстоянии между двумя трехполюсными системами 72,5 мм: а) моделирование; б) график [составлено автором]

Установлено, что с увеличением расстояния между контурами до 72,5 мм происходит снижение магнитной индукции на 12 %.



а)



б)

Рисунок 18 – Распределение магнитной индукции при расстоянии между двумя трехполюсными системами 75 мм: а) моделирование; б) график [составлено автором]

На основании проведенных исследований можно сделать о том, что рекомендуемое расстояние между двумя полюсными системами должно превышать 70 мм, чтобы избежать взаимного влияния магнитной индукции одной системы на другую и сделать возможным независимое и точное управление параметрами процесса, позволяя задавать конкретные значения магнитной

индукции для каждой системы, вместо работы с неконтролируемым суммарным полем.

2.5 Выводы по второй главе

В результате проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. 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, 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.

2. Для разработанного способа обосновано рекомендуемое расстояние между двумя контурами, чтобы обеспечить независимое и точное управление магнитной индукцией процесса, оно должно превышать 70 мм.

3. В результате серии предварительных экспериментальных исследований определены диапазоны варьируемых режимных факторов обработки, а также установлены значения статических факторов. В качестве магнитно-абразивного материала выбран порошок Пр10Р6М5, фракция $\Delta = 80 - 140$ мкм.

4. Принят диапазон магнитной индукции B для экспериментальных исследований от 0,5 Тл до 1,0 Тл, диапазон времени обработки от 6 мин до 10 мин, диапазон частоты вращения заготовки в соответствии с режимами работы фрезерного станка с ЧПУ $n = 225 - 475$ мин⁻¹.

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ СОПРЯГАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ОБРАБОТКОЙ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достижение требуемого качества (показателей шероховатости, твердости) при рациональных режимных факторах процесса МАО должно основываться на понимании ключевых закономерностей изменения значений варьируемых факторов в зависимости от условий обработки [16]. Исходя из этого, основной задачей данной главы является установление зависимостей влияния режимных факторов процесса МАО на формирование стабильных значений шероховатости поверхности сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов для летательных аппаратов.

3.1 Материальная база и методика проведения экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования магнитно-абразивного воздействия на поверхность сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов для летательных аппаратов осуществляли в лаборатории станков с ЧПУ Санкт-Петербургского горного университета. На кафедре машиностроения исследования производили на специально разработанной и изготовленной установке. Для реализации процесса МАО устройство базировали на фрезерном станке с ЧПУ (рисунок 19), обеспечивающем выполнение всех необходимых рабочих движений. Для осуществления процесса обработки была написана управляющая программа (рисунок 20).

В качестве образцов для обработки использовали детали из алюминиевого сплава АМгб (рисунок 21) диаметром 40 мм и толщиной 0,8 мм, 1 мм и 1,2 мм. Магнитно-абразивный порошок, состоящий из сплава 10Р6М5, был выбран в качестве инструмента.



а)



б)

Рисунок 19 – Оборудование для проведения эксперимента: а) фрезерный станок с ЧПУ (Emco Concept Mill), б) управляющая программа для осуществления процесса обработки [фото автора]



а)



б)

Рисунок 20 – Образцы для экспериментальных исследований, где а) общий вид; б) вид на кромки [фото автора]

Контроль шероховатости поверхностей проводили при помощи прибора Mitutoyo Surftest SJ-210 (рисунок).



а)



б)

Рисунок 21 – Измерение параметров шероховатости поверхности, где а) прибор Mitutoyo SurfTest SJ-210; б) процесс измерения шероховатости поверхности образца с выведением на экран профилограммы [фото автора]

Приняты следующие варьируемые режимные факторы процесса MAO: частота вращения $n = 225 \dots 475 \text{ мин}^{-1}$; магнитная индукция $B = 0,5 \dots 1,0 \text{ Тл}$; время обработки $t = 6 \dots 8 \text{ мин}$.

Измерительный микроскоп *Leica DM ILM HC* (рисунок 22) служил для визуального контроля поверхностей образца.



Рисунок 22 – Микроскоп *Leica DM ILM HC* [фото автора]

Измерение твердости исследуемых образцов проводилось на стационарном твердомере ТК-2М.



а)



б)

Рисунок 23 – Измерение твердости, где а) стационарный твердомер ТК-2М; б) получение отпечатка [фото автора]

Для проведения исследования было применено планирование эксперимента, которое позволяет назначить критерии формирования линейной и степенной математической модели технологических процессов, а также оценить ее соответствие адекватности [16].

Данный метод был выбран в связи с многофакторностью эксперимента (при значении факторов > 2). В ходе исследования применен алгоритм двухуровневого планирования, когда принятые значения режимных параметров задаются максимальным (по верхнему уровню) и минимальным (по нижнему уровню). Промежуточные значения параметров в эксперименте учитывали, однако при построении модели не были использованы. Число повторений каждого опыта составляло – 3 [16].

Изменяемыми параметрами режимных факторов обработки являлись:

- магнитная индукция B , Тл;
- время обработки t , мин,
- частота вращения образца n , мин⁻¹.

Измеряемым параметром в опытах являлась шероховатость Ra , мкм.

Основы планирования эксперимента применяются в работах многих исследователей [3]. Любой эксперимент, независимо от области исследования, оперирует тремя ключевыми категориями: параметрами, факторами и моделью. Чтобы выяснить, как различные факторы влияют на исследуемый параметр, обычно реализуют эксперимент по заранее разработанной схеме, охватывающей все возможные сочетания факторов. Такой подход, при котором реализуются все варианты комбинаций, называют полным факторным экспериментом (ПФЭ) типа 2^k . Для его проведения составляют план-матрицу, отображающую взаимное влияние всех рассматриваемых факторов. Поскольку в данном случае изменяемыми являются три фактора, необходимо выполнить 8 опытов.

После получения экспериментальных данных (ряда значений выходного параметра) приступают к построению математической модели, отражающей зависимость выходной величины от выбранных факторов. В данной ситуации модель представляется в виде уравнения регрессии. В качестве выходного параметра в исследовании выступает Ra — среднее арифметическое абсолютных отклонений профиля поверхности (мкм).

Чтобы вычислить коэффициенты регрессии и корректно обработать результаты, все исследуемые факторы следует привести к единому масштабу. Это достигается с помощью процедуры кодирования факторов.

При этом все кодированные переменные будут принимать значения от -1 до +1. Для получения коэффициентов уравнения регрессии необходимо записать матрицу планирования относительно новых переменных. В матрице планирования отражаются результаты опытов, а также средние выборочные значения для полученных результатов, если имеется серия опытов для каждого эксперимента.

Результаты кодирования факторов представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты кодирования факторов [составлено автором]

Факторы	Верхний уровень, z_i^+	Нижний уровень, z_i^-	Центр, z_i^0	Интервал варьирования, λ_i	Зависимость кодированной переменной от натуральной
Магнитная индукция (B), Тл	1	0,5	0,75	$\lambda_1 = \frac{z_1^+ - z_1^-}{2} = \frac{1 - 0,5}{2} = 0,25$	$x_1 = \frac{B - 0,75}{0,25}$
Время обработки (t), мин	10	6	8	$\lambda_2 = \frac{z_2^+ - z_2^-}{2} = \frac{10 - 6}{2} = 2$	$x_2 = \frac{t - 8}{2}$
Скорость вращения образца (n), об/мин	475	225	350	$\lambda_3 = \frac{z_3^+ - z_3^-}{2} = \frac{475 - 225}{2} = 125$	$x_3 = \frac{n - 350}{125}$

Средние выборочные значения для полученных результатов, вычисляются по формуле (3.1):

$$\bar{y}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{ij}, j = 1, n, \quad (3.1)$$

где j – номер эксперимента;

i – номер опыта;

m – количество опытов в серии;

n – количество экспериментов;

y – результат измерения выходной величины.

Чтобы матрица планирования удовлетворяла условию ортогональности и упростить вычисление коэффициента b_0 в уравнении регрессии, используют дополнительный фиктивный фактор x_0 .

В таблице 7 представлена матрица планирования эксперимента вместе с полученными результатами, которые подлежат последующей математической обработке.

Таблица 7 – Таблица планирования эксперимента с результатами опытов
[составлено автором]

№ эксп.	Изучаемые факторы				Взаимодействия				Результаты опытов			Средн ее \bar{Ra}
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	Ra_1	Ra_2	Ra_3	
1	+	1	1	1	1	1	1	1	0,190	0,179	0,183	0,184
2	+	-1	1	1	-1	-1	1	-1	0,148	0,156	0,149	0,151
3	+	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0,171	0,168	0,181	0,173
4	+	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,220	0,225	0,218	0,221
5	+	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0,249	0,246	0,245	0,247
6	+	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,210	0,214	0,221	0,215
7	+	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,206	0,199	0,211	0,205
8	+	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,258	0,271	0,264	0,264

На основании полученной таблицы планирования эксперимента и результатов измерения шероховатости поверхности после взаимодействия различных уровней изучаемых факторов в дальнейшем рассчитываются коэффициенты уравнения регрессии. В данном случае изучается влияние не только отдельно взятого фактора, но и их взаимодействий.

3.2 Обработка результатов эксперимента и получение математической зависимости

В общем случае искомая регрессионная модель записывается в виде уравнения (3.2) [6]:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{i,j} x_i x_j, \quad (3.2)$$

где b_0 , b_i , $b_{i,j}$ - коэффициенты регрессии.

Значения этих коэффициентов определяют с помощью метода наименьших квадратов [6].

Для нахождения коэффициента b_0 применяют выражение (3.3) [6]:

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_0 \bar{y}_j. \quad (3.3)$$

Чтобы вычислить коэффициенты, отражающие влияние каждого отдельного фактора на отклик, используют формулу (3.4) [6]:

$$b_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ji} \bar{y}_j. \quad (3.4)$$

Для оценки коэффициентов, учитывающих парное взаимодействие факторов и их совместное влияние на выходную переменную, предназначена формула (3.5) [6]:

$$b_{r,p} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{jr} x_{jp} \bar{y}_j, \quad (3.5)$$

где r, p – номера факторов.

Наконец, коэффициент, описывающий влияние тройного взаимодействия факторов, рассчитывается по формуле (3.6) [6]:

$$b_{r,p,c} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{jr} x_{jp} x_{jc} \bar{y}_j, \quad (3.6)$$

где c – номер фактора.

Рассчитанные по формулам (3.6-3.9) значения коэффициентов регрессии оцениваются на значимость. Необходимо проверить, действительно ли соответствующий фактор или их взаимодействие оказывает влияние на выходную величину, или же полученное значение коэффициента объясняется случайными ошибками эксперимента. Для такой проверки требуется рассчитать дополнительные статистические характеристики, которые позволят оценить точность и надёжность полученных данных, среди которых:

- дисперсия воспроизводимости S_y^2 – оценивает ошибку всего эксперимента;
- среднее квадратичное отклонение $S_{кв}$ – используется при оценке значимости коэффициентов уравнения;
- критерий Стьюдента $t_{кр}$ – служит инструментом для отсева случайных (статистически не подтверждённых) влияний и позволяет получить более «чистую» математическую модель;
- число степеней свободы k – необходимо для нахождения критического значения $t_{кр}$ по таблице распределения Стьюдента (при заданном уровне значимости, например $\alpha = 0,05$) [6].

Если соблюдается условие (3.7), то коэффициент значим:

$$|b| > t_{кр} \cdot S_{кв} \quad (3.7)$$

В противном случае данный коэффициент можно не учитывать в полученном уравнении регрессии [6].

Рассчитываются дисперсия воспроизводимости, среднее квадратичное отклонение, число степеней свободы по формулам (3.8-3.10):

$$S_y^2 = \frac{1}{n \cdot (m - 1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_j)^2, \quad (3.8)$$

$$S_{кв} = \sqrt{\frac{S_y^2}{m \cdot n}}, \quad (3.9)$$

$$k = n \cdot (m - 1). \quad (3.10)$$

Рассчитанные значения коэффициентов регрессии и с указанием значимости представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Рассчитанные значения коэффициентов регрессии [составлено автором]

Коэффициент регрессии	Значение	Значимость
b_0	0,208	Значимый
b_1	-0,005	Значимый
b_2	-0,008	Значимый
b_3	-0,025	Значимый
b_{12}	0,021	Значимый
b_{13}	0,002	Не значимый
b_{23}	-0,006	Значимый
b_{123}	-0,001	Не значимый

Рассчитанная по формуле (3.8) величина дисперсии воспроизводимости составила $S_y^2 = 2,79167E - 05$.

Рассчитанная по формуле (3.9) величина среднего квадратичного отклонения составила $S_{кв} = 0,001079$.

Рассчитанное по формуле (3.10) число степеней свободы составило $k = 16$.

По числу степеней свободы с заданным уровнем значимости $\alpha = 0,05$ по таблице распределения Стьюдента $t_{кр} = 2,12$.

В случае проверки значимости коэффициентов можно сделать вывод, что коэффициенты b_{13} и b_{123} не являются значимыми, их можно не учитывать при составлении уравнения регрессии. Таким образом, в закодированном виде уравнении регрессии примет вид (3.11) [6]:

$$Ra = 0,208 - 0,005x_1 - 0,008x_2 - 0,025x_3 + 0,021x_1x_2 - 0,006x_2x_3. \quad (3.11)$$

После составления уравнения необходимо оценить его на адекватность. Это выполняется при помощи критерия Фишера. Если расчётное значение критерия Фишера меньше табличного значения данного критерия, то считается, что уравнение адекватно описывает зависимость между факторами и выходной величиной [6].

Для определения адекватности уравнения по критерию Фишера необходимо выполнить некоторые расчёты. Сначала по формуле (3.12) рассчитывается остаточная дисперсия [6]:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{m}{n - r} \sum_{j=1}^n (\tilde{y}_j - \bar{y}_j), \quad (3.12)$$

где r - число значимых коэффициентов в уравнении регрессии (при этом в качестве значимых коэффициентов не учитывается коэффициент b_0);

\tilde{y}_j - значение изучаемого параметра, вычисленное по уравнению регрессии со значимыми коэффициентами для j -го эксперимента.

Рассчитанная по формуле (3.12) величина остаточной дисперсии составила $S_{\text{ост}}^2 = 1,875E - 05$.

Далее по формуле (3.13) определяется расчётное значение критерия Фишера [6]:

$$F_{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_y^2}. \quad (3.13)$$

Рассчитанное по формуле (3.13) значение критерия Фишера составило $F_{\text{расч}} = 0,671642$.

Далее по формулам (3.14) и (3.15) необходимо рассчитать число степеней свободы:

$$k_1 = n - r, \quad (3.14)$$

$$k_2 = n \cdot (m - 1). \quad (3.15)$$

Рассчитанные по формулам (3.14) и (3.15) значения степеней свободы составили соответственно $k_1 = 3$ и $k_2 = 16$.

После этого необходимо найти $F_{\text{табл}}$ в таблице распределения критических точек Фишера с заданным уровнем доверительной вероятности по числу степеней свободы. По числу степеней свободы с заданным уровнем значимости $\alpha = 0,05$ по таблице распределения Фишера $F_{\text{табл}} = 3,24$ [11]. Так как расчётное значение критерия Фишера меньше табличного, то можно считать, что полученное уравнение регрессии адекватно описывает полученную модель взаимосвязи выходного параметра и влияющих на него факторов [6].

В раскодированном виде уравнение регрессии примет следующий вид, выражающийся соотношением (3.16) [6]:

$$Ra = 0,5098 - 0,356B - 0,0271t - 0,000008n + 0,42Bt - 0,000024tn \quad (3.16)$$

При интерпретации уравнения регрессии можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на снижение шероховатости обрабатываемой поверхности оказывают частота вращения образца и совместное влияние индукции и времени обработки. Данный вывод сделан на основании того, что абсолютная величина коэффициентов, стоящих перед соответствующими закодированным факторами, является наибольшей в полученном уравнении. В целом с ростом значений всех коэффициентов шероховатость будет падать, за исключением совместного влияния времени обработки и магнитной индукции, совместное влияние которых дает обратный эффект.

На основании проведённых опытов по определению шероховатости и раскодированного уравнения регрессии получены зависимости шероховатости поверхности от магнитной индукции, времени обработки и частоты вращения образца. На рисунке 24 представлены полученные при соответствующей статистической обработке зависимости.

Из полученной графической зависимости шероховатости от индукции можно сделать вывод, что шероховатость обрабатываемой поверхности снижается при увеличении индукции. Это можно связать с более активным процессом фиксации магнитно-абразивной щетки, а соответственно интенсификацией обработки поверхностного слоя материала.

В исследуемом диапазоне режимных факторов процесса МАО (частота вращения образца: 225...475 мин⁻¹; магнитная индукция: 0,5...1,0 Тл; время обработки: 6...10 мин) шероховатость поверхностей снижается до $Ra = 0,15...0,27$ мкм. Минимальные значения шероховатости для образца получены при магнитно-абразивной обработке с частотой вращения $n = 475$ мин⁻¹, магнитной индукцией $B = 0,5$ Тл, временем обработки $t = 10$ мин; максимальные – с частотой вращения $n = 225$ мин⁻¹, магнитной индукцией $B = 0,5$ Тл и временем обработки $t = 6$ мин.

С помощью микроскопа *Leica* DM ILM HC получены снимки поверхности до и после обработки для каждого рассматриваемого набора технологических параметров. В результате магнитно-абразивной обработки удается полностью или частично устранить следы предыдущей операции технологического процесса обработки заготовки, наблюдается однородность качества поверхностного слоя.

Результаты визуальной оценки (таблицы 9-13) и профилометрии (рисунок 25) подтверждают состоятельность разработанных моделей и установленных закономерностей. В результате МАО удается избавиться от дефектов, образованных на предыдущих этапах технологического процесса обработки, заметно снижается количество царапин, уменьшается их глубина и сглаживаются кромки после лазерной резки. Комбинации технологических параметров МАО влияют на качество обработанной поверхности и эффективность обработки, но стоит отметить, что при наборе любых технологических параметров наблюдается положительная тенденция в изменении качества поверхностного слоя [9]. Шероховатость поверхности снижается в среднем до 0,18...0,21 мкм, разница до и после обработке представлена в сравнении профилограмм для одного образца (рисунок 25).

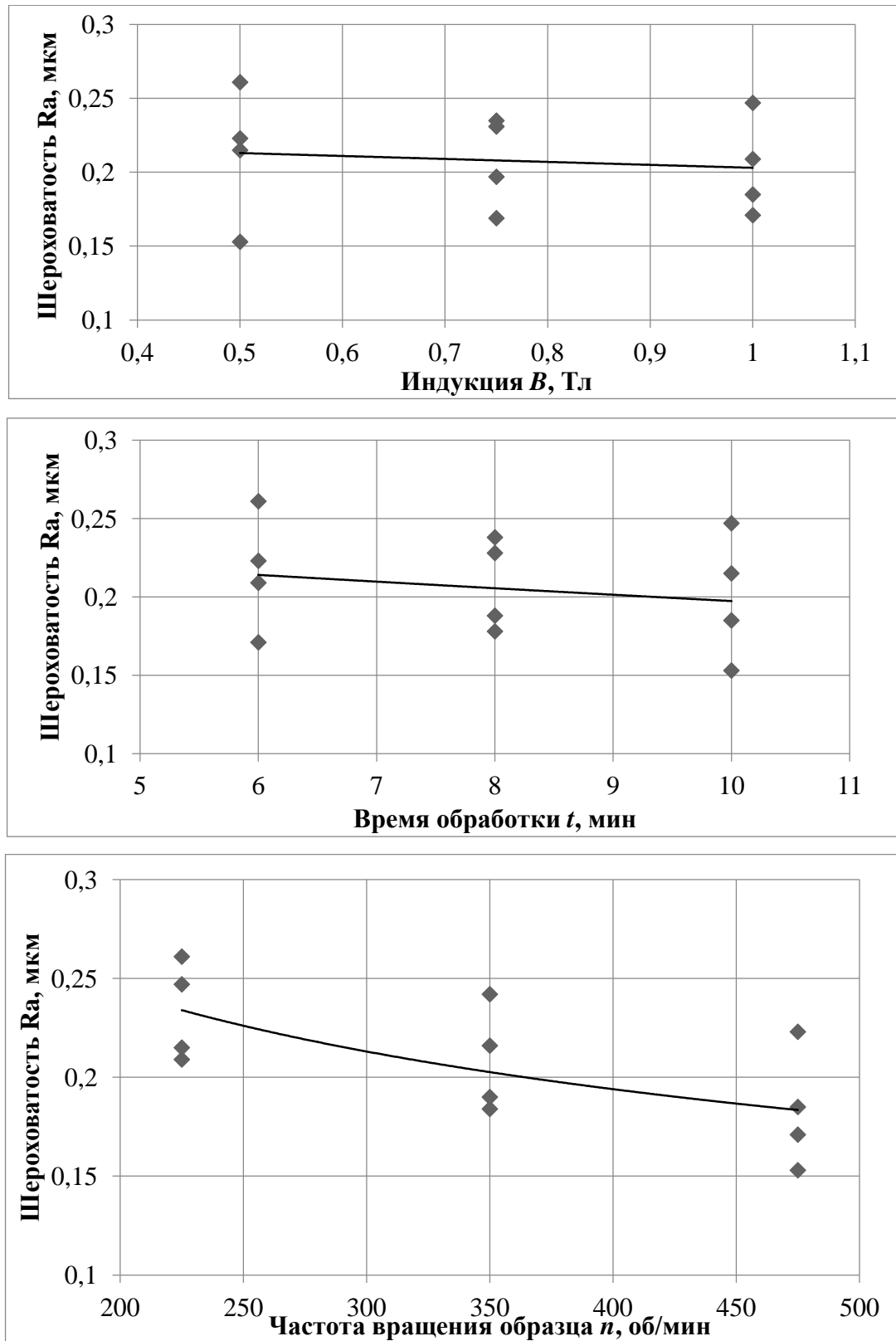


Рисунок 24 – Зависимость шероховатости от: индукции (B) (а), времени обработки (t) (б), частоты вращения образца (n) (в) [составлено автором]

Таблица 9 – Образец 1 [составлено автором]

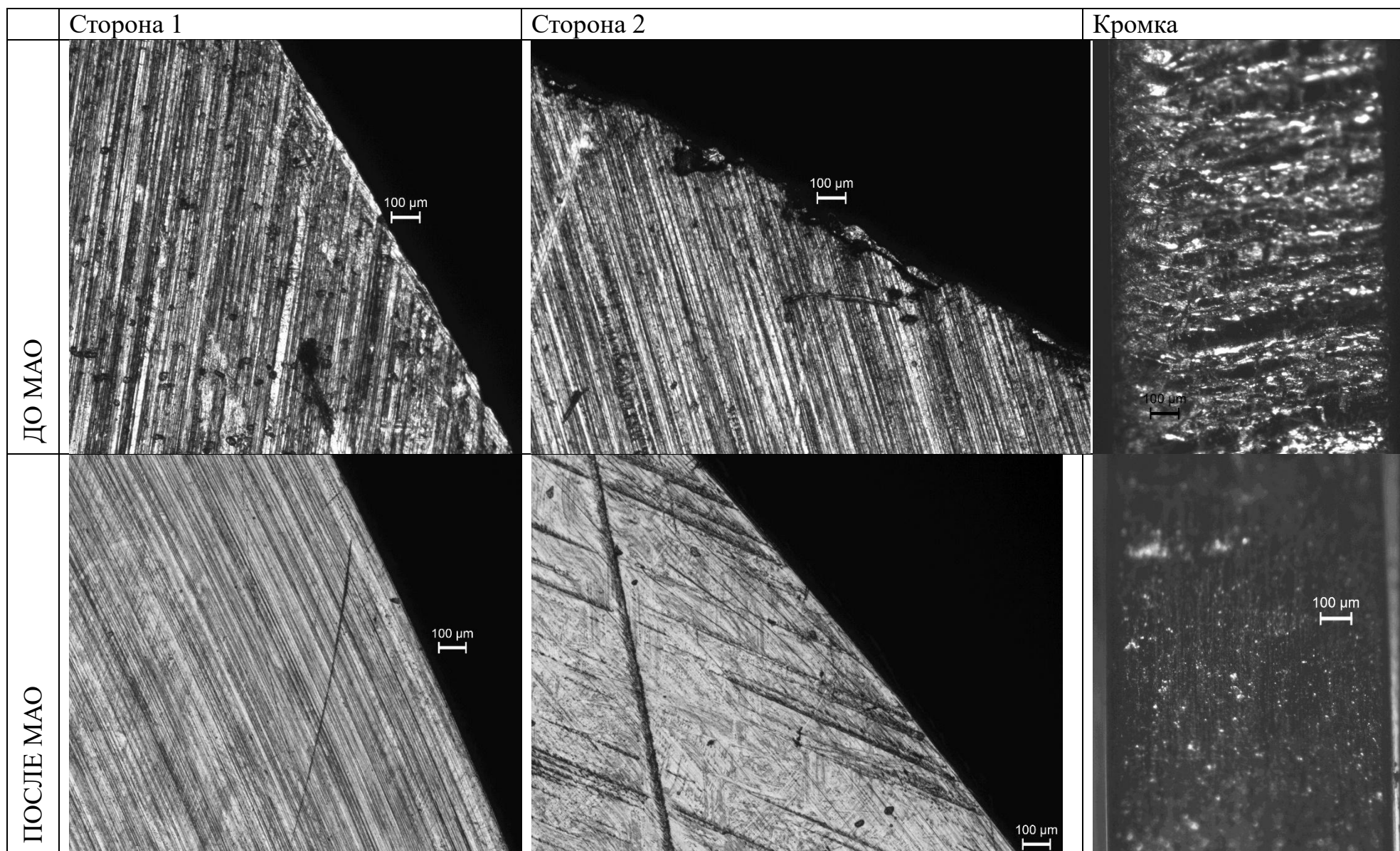


Таблица 10 – Образец 2 [составлено автором]

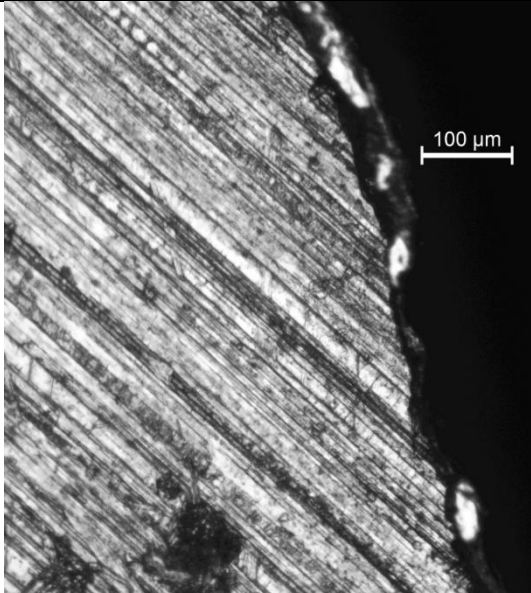
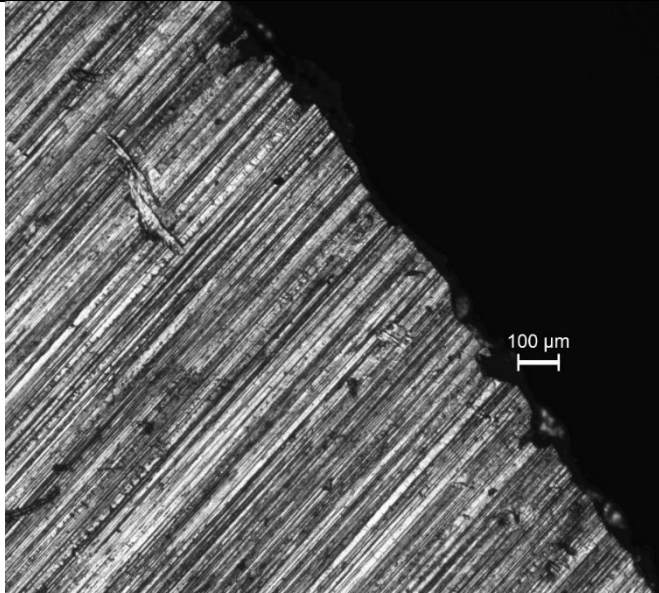
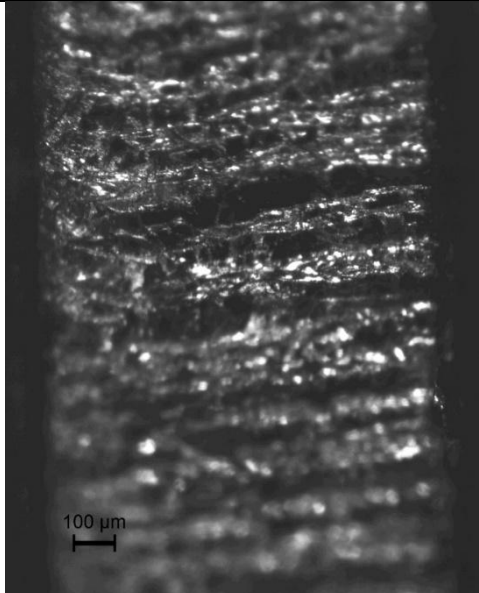
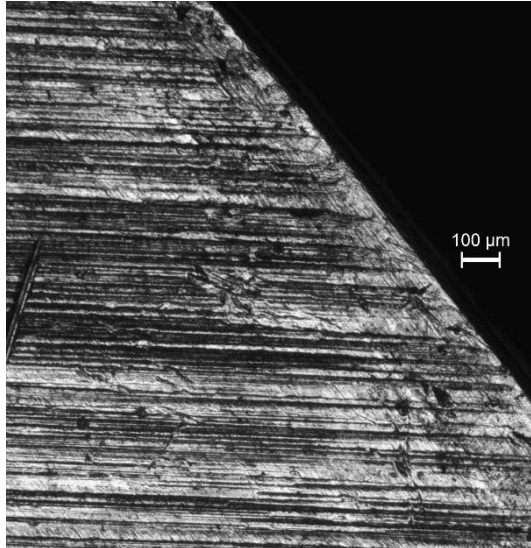
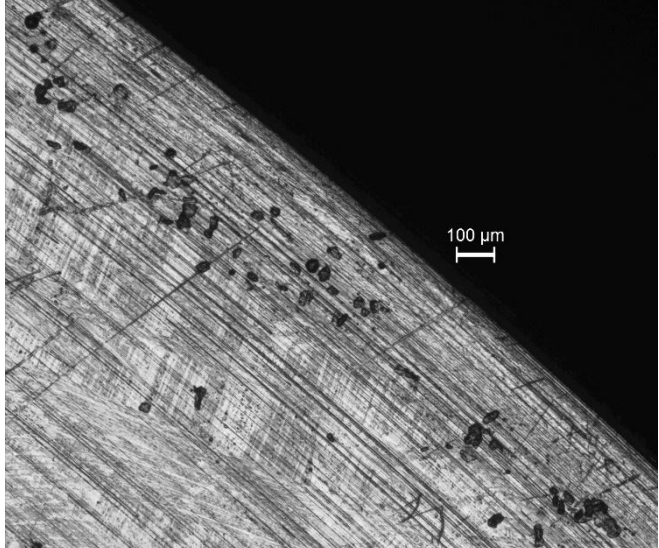
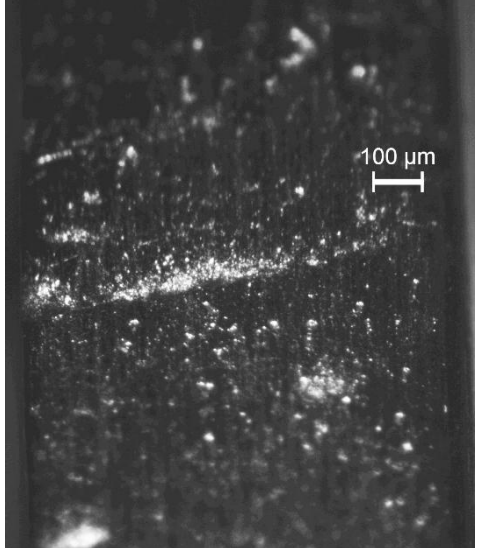
	Сторона 1	Сторона 2	Кромка
ДО МАО			
ПОСЛЕ МАО			

Таблица 11 – Образец 3 [составлено автором]

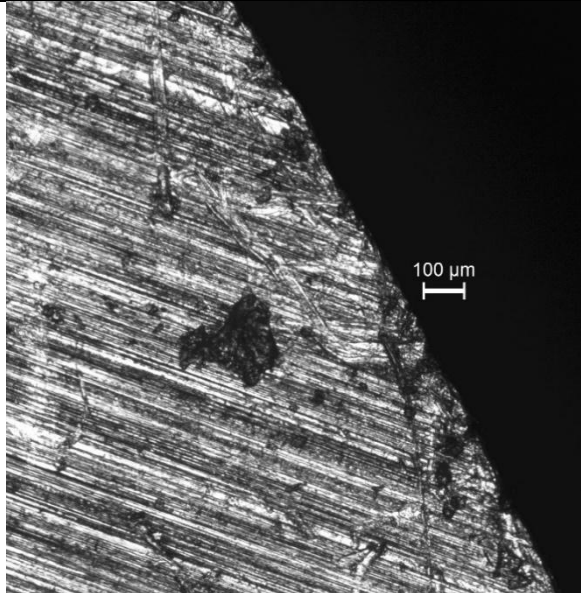
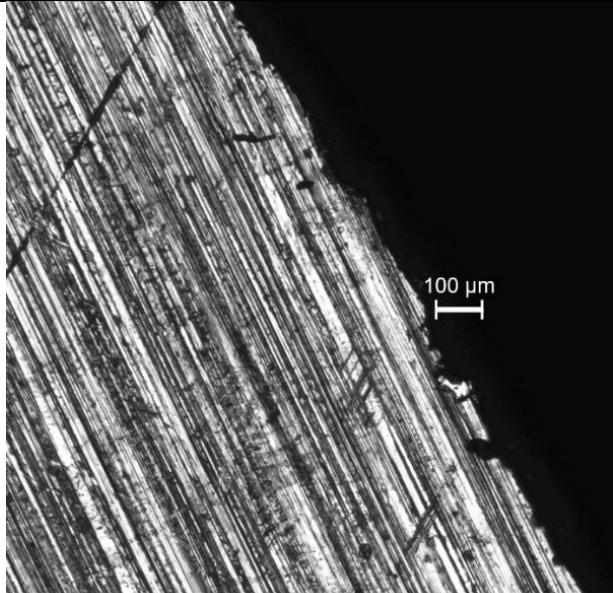
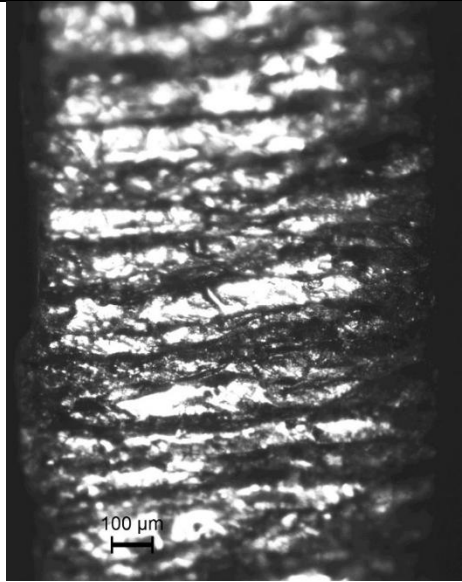
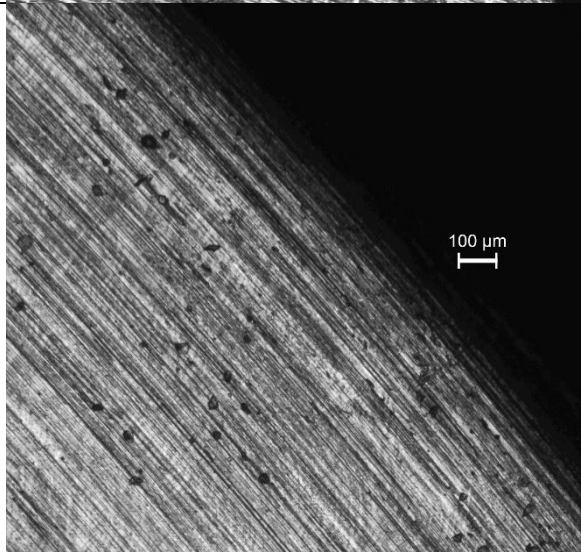
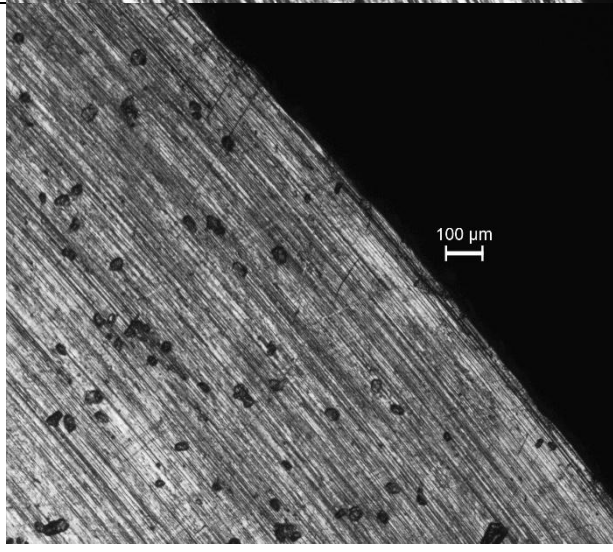
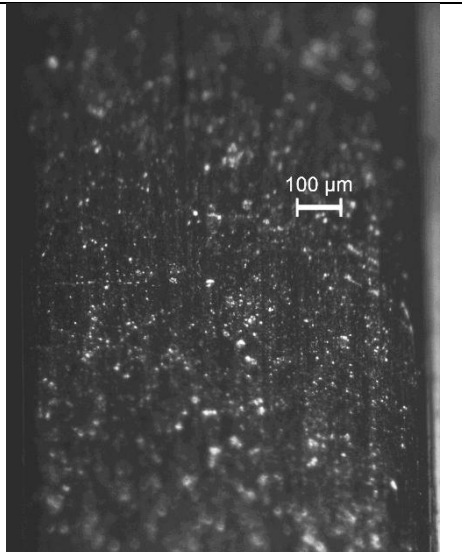
	Сторона 1	Сторона 2	Кромка
ДО МАО	 <p>Micrograph showing the surface of Side 1 before MAO treatment. The surface exhibits a dense, layered structure with a 100 μm scale bar.</p>	 <p>Micrograph showing the surface of Side 2 before MAO treatment. The surface exhibits a dense, layered structure with a 100 μm scale bar.</p>	 <p>Micrograph showing the edge of the sample before MAO treatment. The surface exhibits a dense, layered structure with a 100 μm scale bar.</p>
ПОСЛЈЕ МАО	 <p>Micrograph showing the surface of Side 1 after MAO treatment. The surface exhibits a dense, layered structure with a 100 μm scale bar.</p>	 <p>Micrograph showing the surface of Side 2 after MAO treatment. The surface exhibits a dense, layered structure with a 100 μm scale bar.</p>	 <p>Micrograph showing the edge of the sample after MAO treatment. The surface exhibits a dense, layered structure with a 100 μm scale bar.</p>

Таблица 12 – Образец 4 [составлено автором]

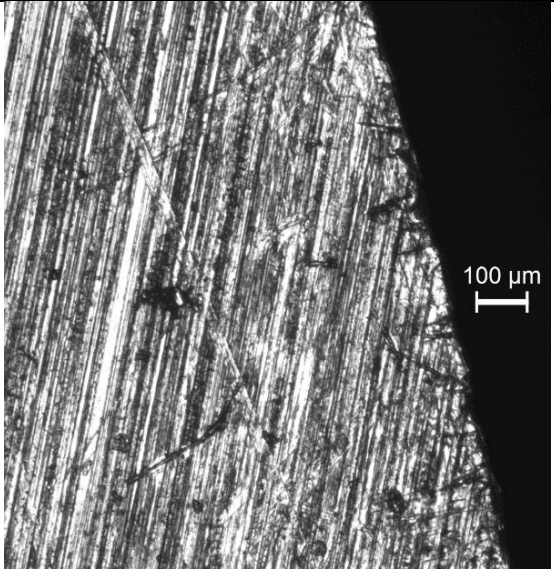
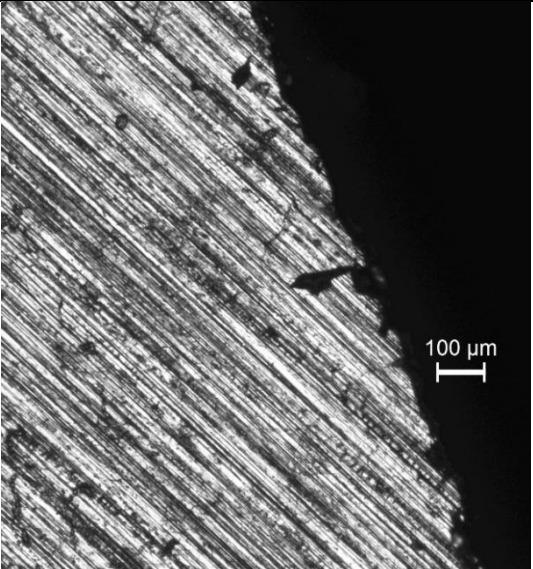
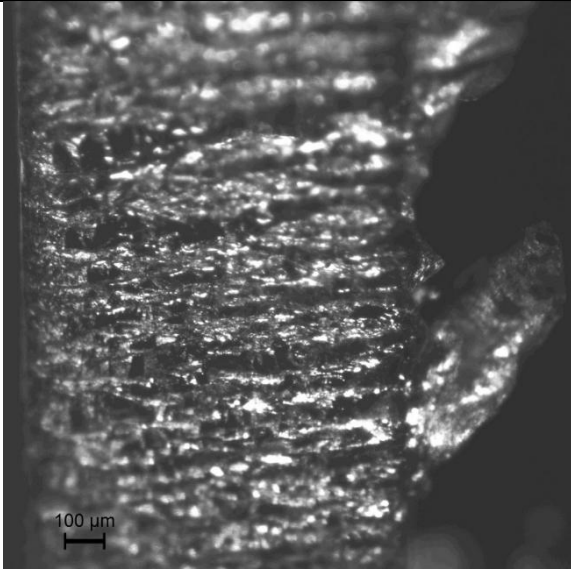
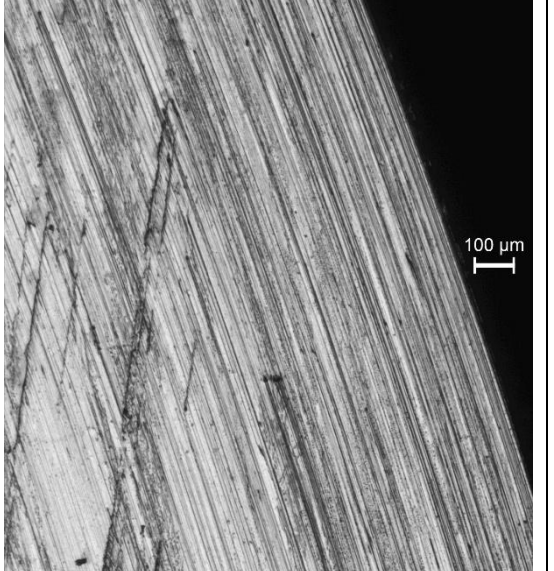
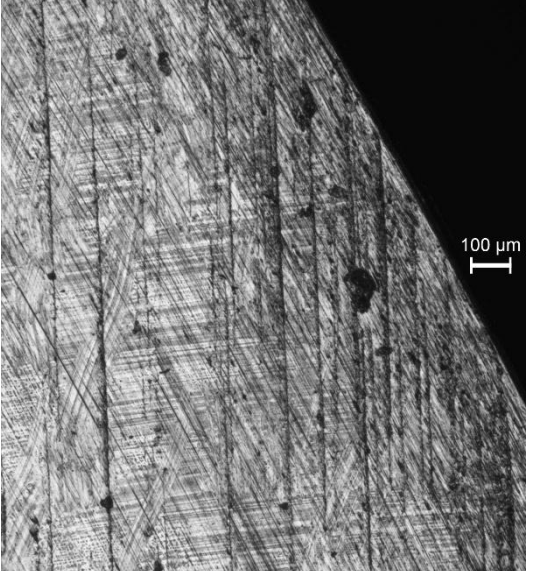
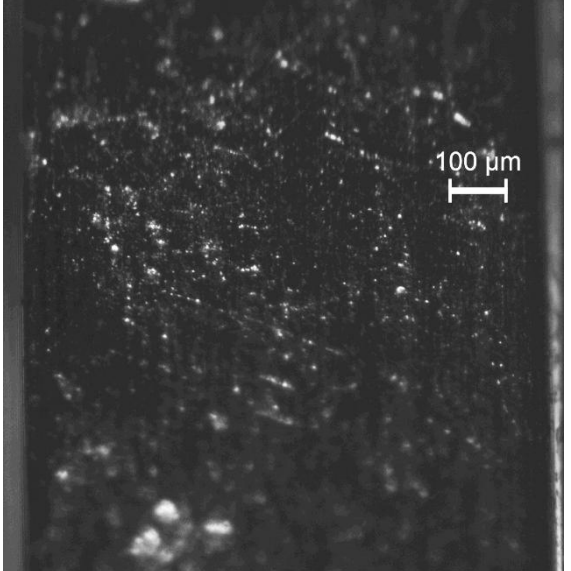
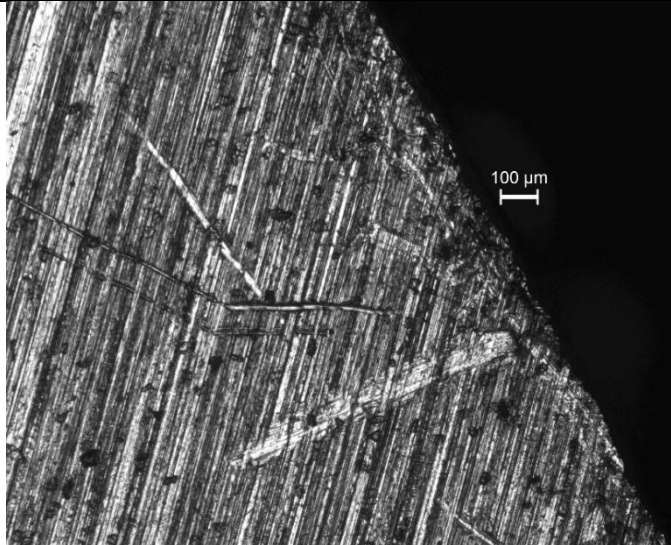
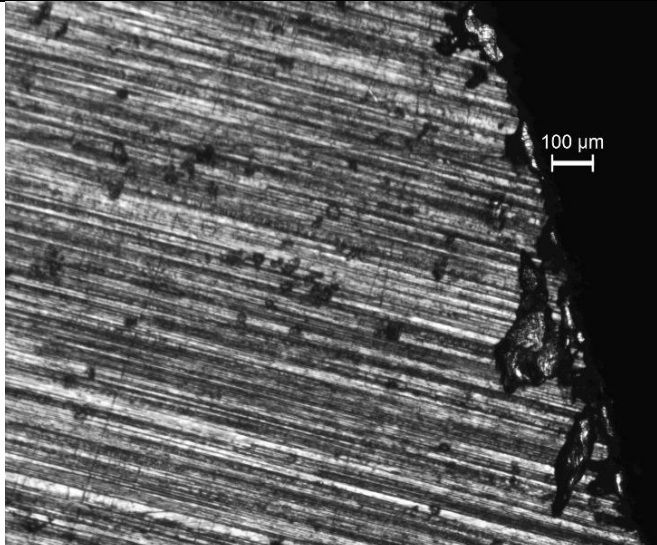

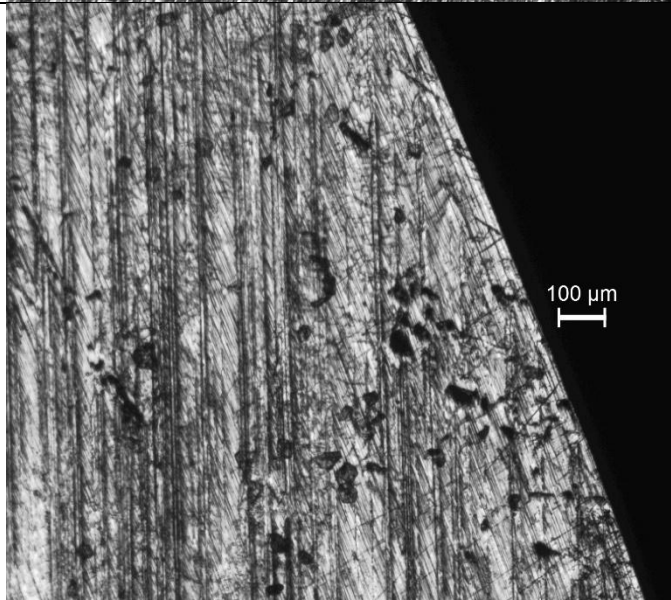
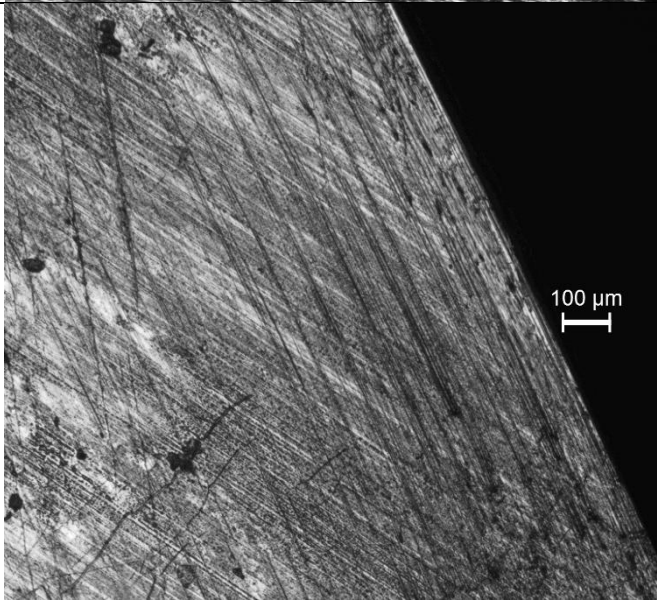
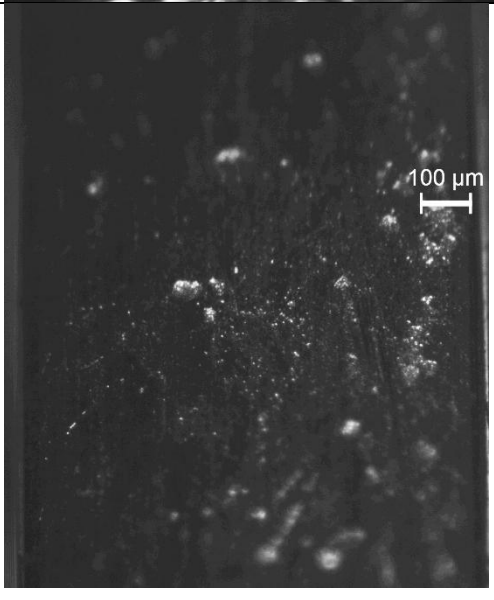
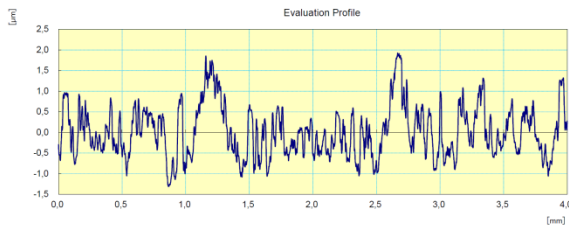
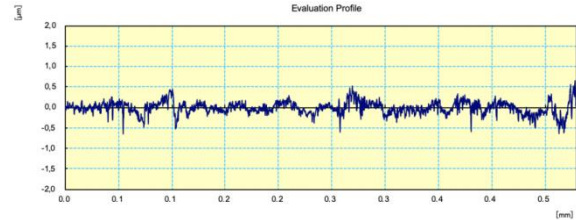
	Сторона 1	Сторона 2	Кромка
ДО МАО			
ПОСЛЕ МАО			

Таблица 13 – Образец 5 [составлено автором]

	Сторона 1	Сторона 2	Кромка
ДО МАО	 <p>100 μm</p>	 <p>100 μm</p>	 <p>100 μm</p>
ПОСЛЕ МАО	 <p>100 μm</p>	 <p>100 μm</p>	 <p>100 μm</p>



$Ra = 1,2...1,54$ мкм



$Ra = 0,18...0,21$ мкм

Рисунок 25 – Сравнение профилограмм и значений шероховатости по Ra до (слева) и после MAO (справа) [составлено автором]

3.3 Выводы по третьей главе

1. Экспериментально определены закономерности влияния технологических параметров MAO поверхностей сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов для летательных аппаратов на шероховатость поверхности.

2. Установлено, в исследуемом диапазоне режимных факторов процесса MAO (частота вращения образца: $225...475$ мин⁻¹; магнитная индукция: $0,5...1,0$ Тл; время обработки: $6...10$ мин) шероховатость поверхностей снижается до $Ra = 0,15...0,27$ мкм и формирует равномерное значение шероховатости поверхности во всей зоне магнитно-абразивного воздействия. Минимальные значения шероховатости для образца получены при магнитно-абразивной обработке с частотой вращения $n = 475$ мин⁻¹, магнитной индукцией $B = 0,5$ Тл, временем обработки $t = 10$ мин; максимальные – с частотой вращения $n = 225$ мин⁻¹, магнитной индукцией $B = 0,5$ Тл и временем обработки $t = 6$ мин.

3. Комбинации технологических параметров MAO влияют на качество обработанной поверхности и эффективность обработки. При наборе любых технологических параметров наблюдается положительная тенденция в изменении шероховатости поверхности по параметру Ra , за исключением совместного влияния времени обработки и магнитной индукции.

ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ НА ЗОНУ ЗАКЛЕПОЧНОГО СОЕДИНЕНИЯ

4.1 Особенности взаимодействия поверхностей в зоне заклепочного соединения

В области взаимодействия сопрягаемых поверхностей и в ее окрестности возникает напряженное состояние, которое оказывает существенное влияние на процессы трения и изнашивания. От контактных напряжений зависит состояние поверхности и поверхностных пленок на ней, возникновение адгезионных связей в области взаимодействия, накопление поврежденности поверхностных слоев и их разрушение [18, 26, 27].

И.В. Крагельский разработал молекулярно-механическую теорию трения, согласно которой контакт твердых тел рассматривается как взаимодействие их шероховатых поверхностей. Ключевая идея: фактическая площадь контакта составляет лишь малую долю от номинальной (кажущейся) площади и определяется деформацией микронеровностей [42].

Считается, что при сжатии двух шероховатых поверхностей контактирующие неровности (выступы) деформируются по-разному и будут находиться в неодинаковом напряженно – деформированном состоянии. Можно выделить 3 фазы деформирования выступов (рисунок 26):

- упругая фаза – область, в которой деформация мала ($\varepsilon \leq \varepsilon_{0.05}$), а выступ восстанавливает форму после снятия нагрузки;
- переходная область (ООУП) – область со средней деформацией ($\varepsilon_{0.05} < \varepsilon < \varepsilon_{кр}$), в которой начинаются необратимые изменения;
- область упругопластического деформирования с упрочнением (ОРУП) – область, в которой деформация превышает критическое значение ($\varepsilon > \varepsilon_{кр}$), что приводит к пластической деформации и упрочнению материала выступа.

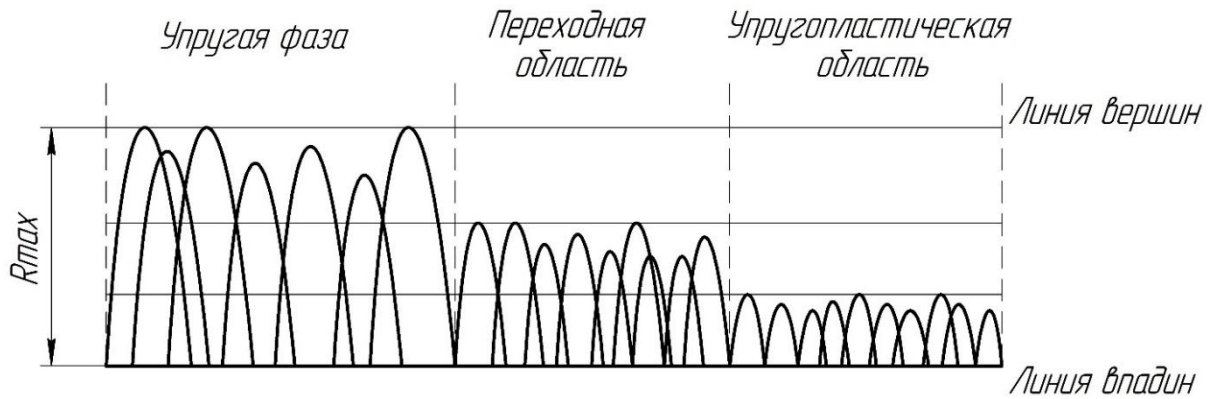


Рисунок 26 – Фазы деформирования выступов при контактном взаимодействии двух шероховатых поверхностей [составлено автором]

При таком распределении выступы в упругой фазе несут незначительную нагрузку, в то время как наибольшая часть внешней нагрузки воспринимается именно выступами в ОРУП. Фактическое давление на выступы в ОРУП является самым высоким и монотонно возрастает, стремясь к предельной твердости материала (H). Таким образом, в упругопластической области формируется равномерная шероховатость поверхности (рисунок 26)

Математическое описание контакта шероховатых поверхностей описывается опорной кривой профиля (кривой Эббота-Файрстоуна), в основе этой модели лежит представление шероховатой поверхности через функцию распределения выступов по высоте. Выступы моделируются параболоидами вращения (сферическими сегментами).

В случае упругого контакта площадь сечения выступов при данном сближении приблизительно в 2 раза больше фактической площади контакта, что является важным коэффициентом для расчетов.

Исходя из феноменологического представления получена модель заклепочного соединения (рисунок 27), в которой выявлены зоны с тремя шероховатостями, существенно влияющими на формирование соединения с плотным прилеганием поверхностей.

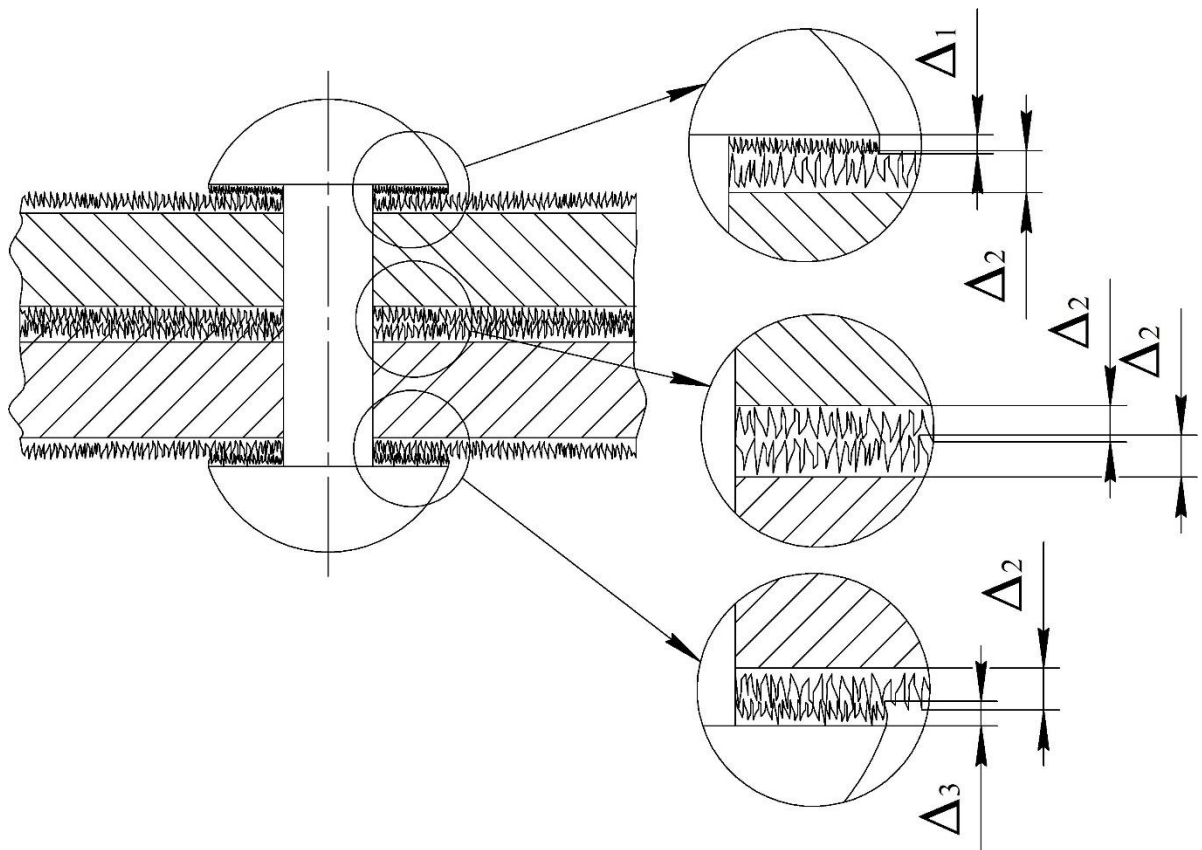


Рисунок 27 – Модель взаимодействия реальных шероховатых поверхностей в заклепочном соединении [составлено автором]

Из рисунка 27 видно, что шероховатости в зоне соединения отличаются и можно выделить:

- шероховатость под закладной головкой заклепки – Δ_1 ;
- шероховатость листового материала с каждой стороны (условно принимаемую за одинаковую) – Δ_2 ;
- шероховатость под замыкающей головкой, получаемую при образовании заклепочного соединения – Δ_3 .

В процессе магнитно-абразивной обработки листового материала снижается Δ_2 , но для снижения контактных напряжений взаимодействующих поверхностей необходима оценка Δ_2 и Δ_3 .

4.2 Анализ физико-механического состояния материала в зоне соединения

4.2.1 Зарождение трещин

Трещины в заклёпочных соединениях алюминиевых сплавов обычно возникают в зонах концентрации напряжений (рисунок 28):

- на поверхности около отверстий под заклёпки – из-за локальной пластической деформации при клёпке;
- на границе контакта заклёпки и листа – вследствие фреттинг-коррозии и циклического трения;
- в местах коррозионных повреждений – особенно в сплавах без защитных покрытий.

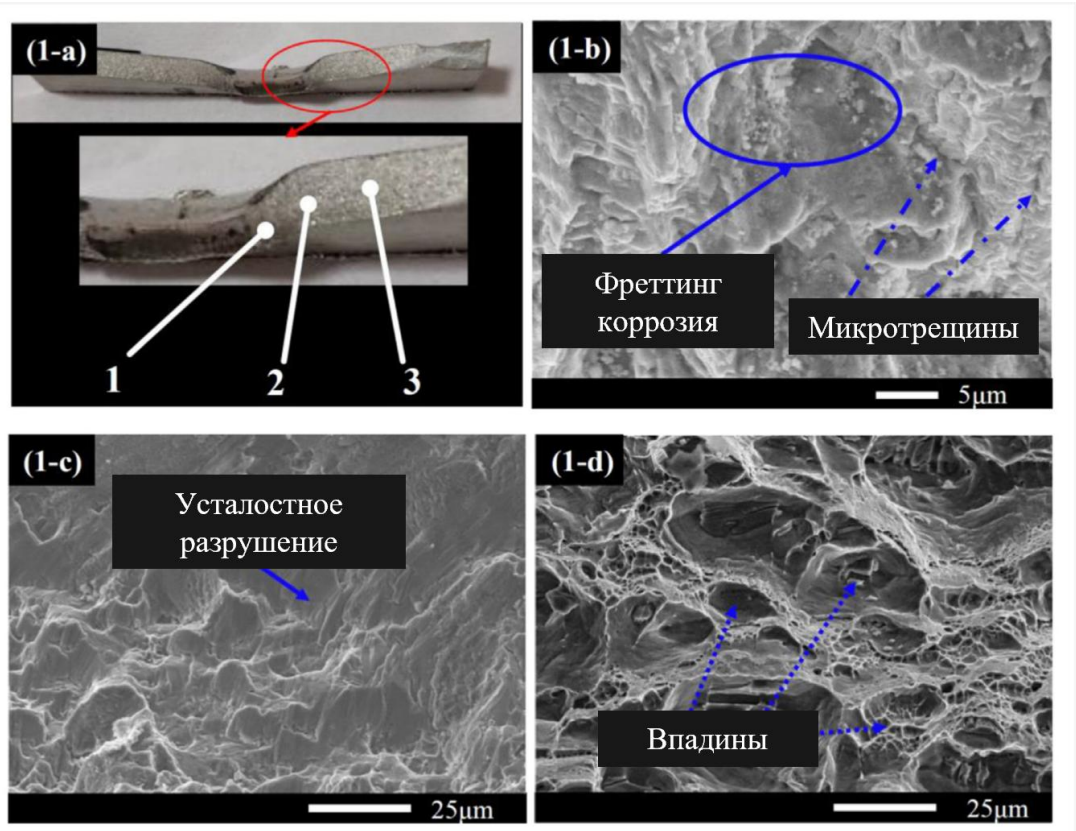


Рисунок 28 – Разрушения в зоне отверстий под заклепочное соединение
[составлено автором]

4.2.2 Факторы, влияющие на рост трещин в заклепочном соединении

Понимание факторов, влияющих на рост трещин, является ключом к прогнозированию долговечности заклепочных соединений.

Факторы можно разделить на три группы: макроуровень (напряженное состояние), мезоуровень (геометрия и поверхность) и микроуровень (структура материала), приведенные в таблице 14.

Таблица 14 – Факторы, влияющие на рост трещин [составлено автором]

Факторы напряженно-деформированного состояния	Геометрические и поверхностные факторы	Микроструктурные и материаловедческие факторы
1 Тип и уровень нагрузки	1 Концентраторы напряжений	1 Структура и фазовый состав
<ul style="list-style-type: none"> • Амплитуда напряжений ($\Delta\sigma$). • Коэффициент асимметрии цикла. • Комбинированные нагрузки – сочетание изгиба и кручения. • Частота нагружения. 	<ul style="list-style-type: none"> • Отверстия под заклепки – около 80% усталостных разрушений обшивки начинаются в местах заклепочных соединений. • Переходные зоны – переход цилиндрического отверстия в конусную фаску под головку заклепки, где возникает наибольшая концентрация напряжений. 	<ul style="list-style-type: none"> • Размер зерна – усталостные бороздки располагаются на фасетках, размер которых соответствует размеру структурных элементов сплава. • Включения и вторичные фазы – неметаллические включения и интерметаллидные частицы служат местами предпочтительного зарождения трещин.
2 Остаточные напряжения	2 Поверхностные дефекты и шероховатость	2 Предварительная пластическая деформация (наклеп)
<ul style="list-style-type: none"> • Сжимающие остаточные напряжения (например, после МАО или поверхностного пластического деформирования) замедляют рост трещины, закрывая ее берега и уменьшая эффективный размах напряжений. • Растягивающие остаточные напряжения (после сварки или неравномерной деформации) ускоряют рост трещин. 	<ul style="list-style-type: none"> • Технологические и эксплуатационные дефекты (риски, заусенцы, царапины) выступают готовыми очагами зарождения трещин. • Контактные взаимодействия – в зоне под головкой заклепки контакт двух поверхностей создает локальные напряжения, способствующие инициации трещин. МАО уменьшает количество концентраторов, что способствует повышению трещиностойкости. 	<p>Влияние предварительной деформации неоднозначно и зависит от ее величины:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Деформация 2% – несколько снижает предел выносливости. • Деформация 10-22% – повышает его. • Неравномерная пластическая деформация (характерная для штамповки) приводит к ухудшению сопротивления усталостному разрушению.

Продолжение таблицы 14

Факторы напряженно-деформированного состояния	Геометрические и поверхностные факторы	Микроструктурные и материаловедческие факторы
Для алюминиевых сплавов установлено, что остаточные напряжения от предварительного пластического изгиба существенно влияют на скорость роста трещин при последующем циклическом нагружении.	3 Толщина элемента	3 Направленность структуры
	С увеличением толщины пластины скорости роста трещины возрастают из-за изменения напряженного состояния (переход к плоской деформации).	Усталостная трещина распространяется в направлении минимальной энергии разрушения, поэтому направление бороздок может существенно отличаться в соседних структурных элементах

4.2.3 Методы анализа и прогнозирования

Для оценки развития трещин применяются:

- Линейная механика разрушения (LEFM) – расчёт коэффициента интенсивности напряжений (K) и скорости роста трещины (da/dN).
- Метод конечных элементов (FEM) – моделирование напряжённого состояния соединения.
- Экспериментальные испытания – усталостные тесты с контролем роста трещин акустической эмиссией или оптическими методами.

4.2.4 Способы повышения долговечности в заклепочном соединении

В качестве способов повышения долговечности соединений могут выступать:

- формирование равномерного значения параметров шероховатости поверхности в области соединения листового материала заклепочного соединения;
- оптимизация конструкции – увеличение шага заклёпок, использование многорядных соединений;
- улучшение технологии клёпки – холодная клёпка, применение компенсаторов напряжений;
- защитные покрытия – анодирование, грунтовки, ингибиторы коррозии;
- регулярный мониторинг – неразрушающий контроль (ультразвук, вихретоковые методы).

4.3 Оценка исходной зоны отверстий

При оценке исходного состояния образцов фиксировалось наличие следующих дефектов: задиры, трещины, заусенцы, рваные кромки отверстий. Выявление этих дефектов осуществлялось как визуально, так и с помощью микроскопии (рисунок 29).

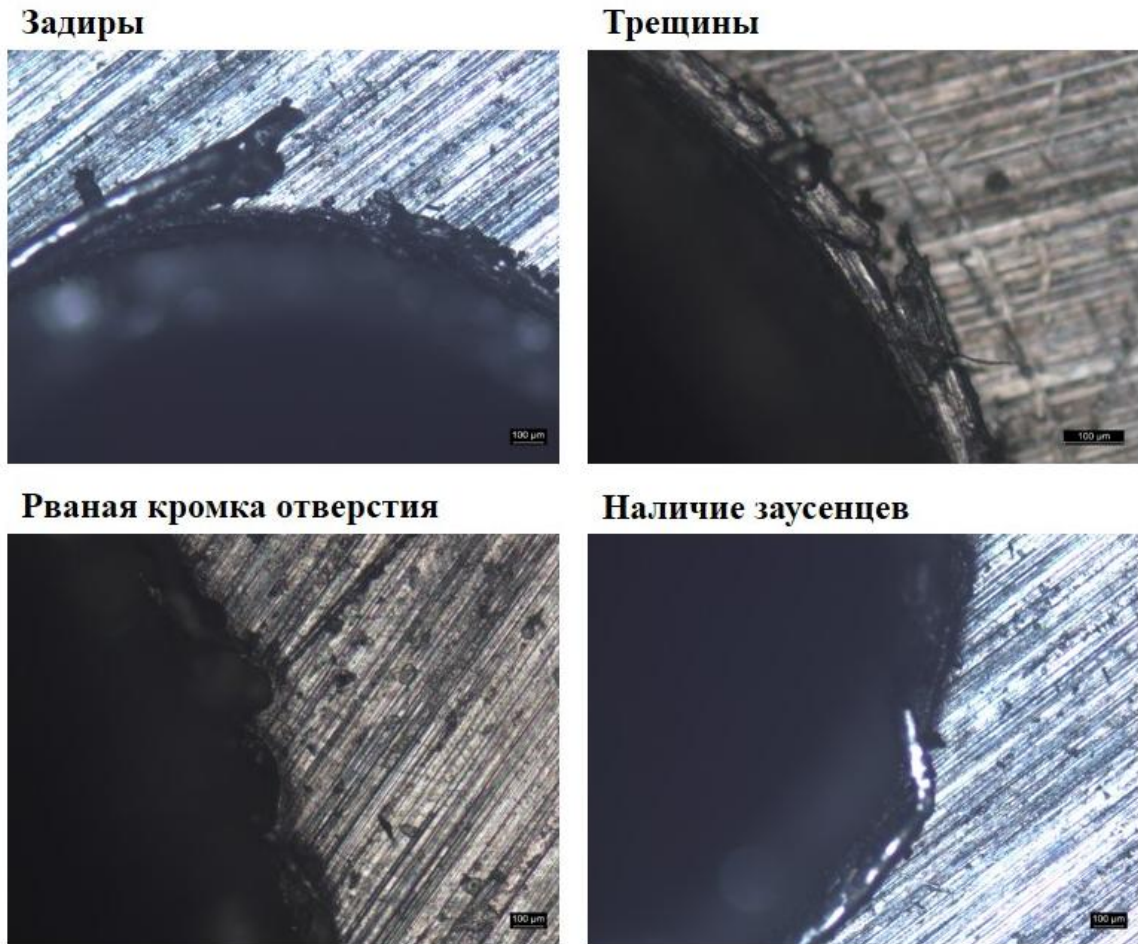


Рисунок 29 – Зона отверстия на образцах до обработки [фото автора]

Стоит отметить, что при формировании заклепочного соединения в зоне отверстия будут возникать новые дефекты вследствие повреждения поверхности основного металла инструментом (обжимкой) при формировании головки. Поэтому необходимо минимизировать возникновение дефектов и трещинообразование на предыдущих этапах.

4.4 Оценка механических свойств поверхностного слоя

Наклёп (деформационное упрочнение) – упрочнение металла в результате холодной пластической деформации, обусловленное увеличением плотности дислокаций и искажением кристаллической решетки.

В результате повышаются: твердость, предел текучести, предел прочности, усталостная прочность. Снижаются: пластичность, ударная вязкость, сопротивление коррозии. Важно, что поверхностный наклеп создает сжимающие

остаточные напряжения, повышающие сопротивление усталости заклепочного соединения.

Наиболее доступный и информативный метод — измерение микротвердости на поперечном шлифе.

Методика:

1. Изготовление поперечного шлифа образца (образец при этом разрезается перпендикулярно поверхности, закрепляется и заливается в полистирол) (рисунок 30).

2. Проведение шлифования и полирования плоскости реза.

3. Измерение микротвердости через равные промежутки от поверхности вглубь материала.

4. Построение графика зависимости микротвердости H от расстояния до поверхности x .

5. Обработка результатов:

Глубина наклепа h определяется как расстояние от поверхности, на котором твердость достигает значения, характерного для основного металла (отклонение не более 5–10%).

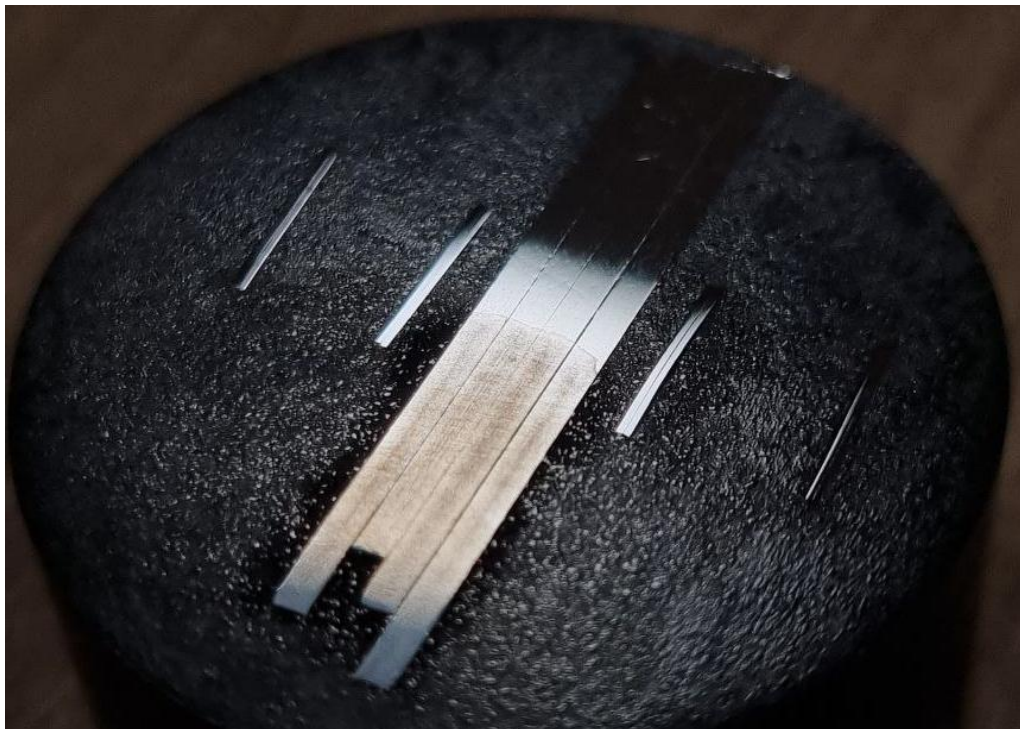


Рисунок 30 – Поперечный шлиф образцов [фото автора]

Для проведения анализа микроструктуры поперечный шлиф необходимо было протравить в лабораторных условиях (рисунок 31) раствором NaOH с последующей промывкой и светлым травлением HNO_3 .



Рисунок 31 – Подготовка к травлению шлифа в лабораторных условиях
[фото автора]

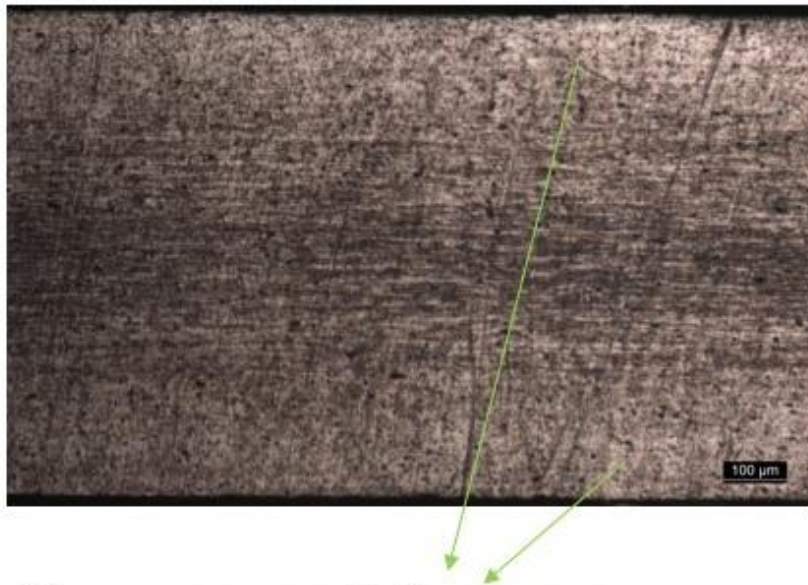
После травления стало возможным сравнение микроструктуры образцов до и после обработки с помощью электронного микроскопа *Leica*. Анализ образцов, представленный на рисунке 32, показывает уменьшение зерен в зонах образцов, обработанных магнитно-абразивной обработкой. Это может свидетельствовать о равномерном упрочнении, произошедшем на этапе финишной обработки.

Уменьшение размера зерен в поверхностном слое алюминиево-магниевого сплава АМг6 (и его аналогов, таких как АМг2, АМг5, АМг6) является эффективным способом повышения его механических свойств и коррозионной стойкости. Эта технология основана на принципах зернограничной инженерии, когда изменение структуры материала позволяет преодолеть традиционный компромисс между прочностью и коррозионной стойкостью. Уменьшение зерен и обеспечение их равноосности на поверхности сплавов АМг6 достигается преимущественно методами интенсивной пластической деформации. Благодаря этому обеспечивается изотропность свойств поверхностного слоя.

До обработки:



После обработки:



Уменьшение зёрен обработанных зон

Рисунок 32 – Сравнение микроструктуры образца до и после обработки

[фото автора]

Магнитно-абразивная обработка (МАО) для сплавов типа АМгб работает немного иначе, чем методы интенсивной пластической деформации. Прямое измельчение крупных зёрен в глубине материала здесь происходит незначительно, но зато этот метод эффективно удаляет дефектный слой и создаёт наклёп, что визуально и структурно приближает свойства поверхности к мелкозернистому состоянию. Удаление дефектного слоя позволяет повысить коррозионную стойкость материала.

Были произведены замеры твёрдости до и после магнитно-абразивного полирования на стационарном твердомере ТК-2М (рисунок 33).



Рисунок 33 – Сравнение твердости до и после обработки [составлено автором]

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 увеличению твердости, при этом такое упрочнение поверхностного слоя является равномерным.

Для точной количественной оценки механических свойств было проведено исследование на кафедре метрологии Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II. Основные параметры представлены в таблице 15.

Схема и методика измерений представлена на рисунке 34. Предварительные испытания проводятся с целью выбора основной нагрузки. В таком случае при каждом измерении линейно возрастает усилие на индентор. Затем в каждой серии основных испытаний проводится по 12 измерений с одинаковой нагрузкой в соответствии с заданной матрицей отпечатков. Условия проведения испытаний представлены в таблице 16. Примечание: нагрузка в основной серии выбирается с учетом результатов предварительных испытаний.

Таблица 15 – Параметры исследования механических свойств образцов
[составлено автором]

Средство контроля	Сканирующий нанотвердомер Nanoscan 4D+ (индентор – алмазная пирамида Берковича с коэффициентом Пуассона $\nu = 0,17$ и модулем упругости $E = 1140$ ГПа).
Калибровка	Плавленый кварц с известными механическими характеристиками: $H = 0,21 \pm 0,02$ ГПа, $E = 3,0 \pm 0,3$ ГПа.
Объект контроля	Алюминиевый сплав, подвергнутый МАО с глубиной 300 мкм.

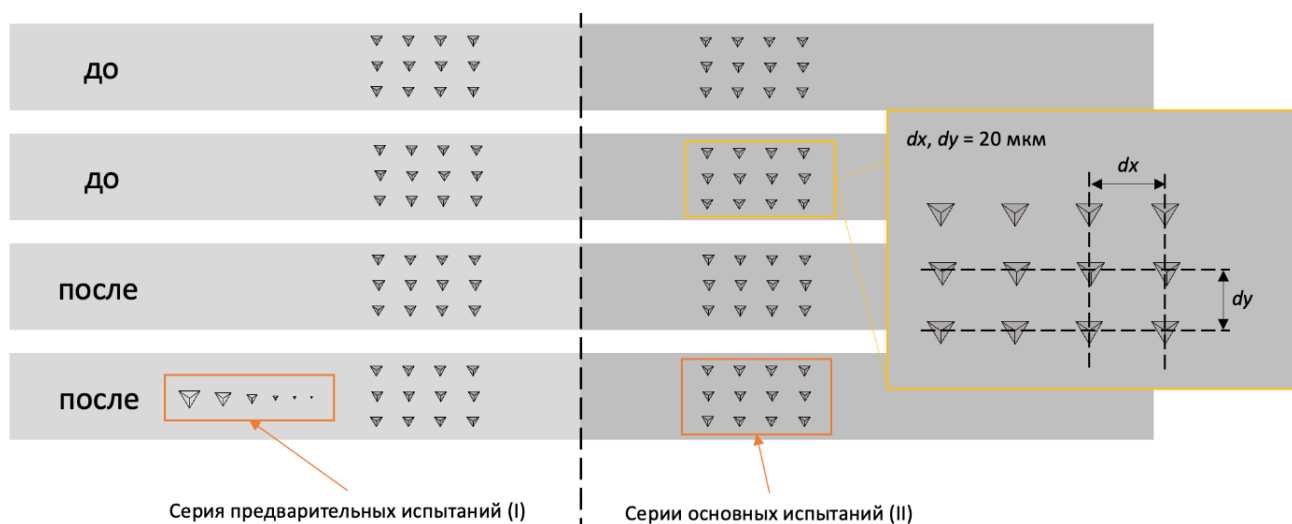
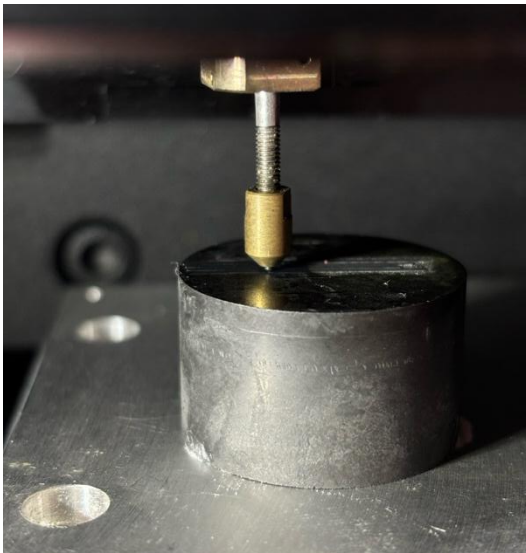


Рисунок 34 – Схема расположения серий отпечатков на образце
[составлено автором]

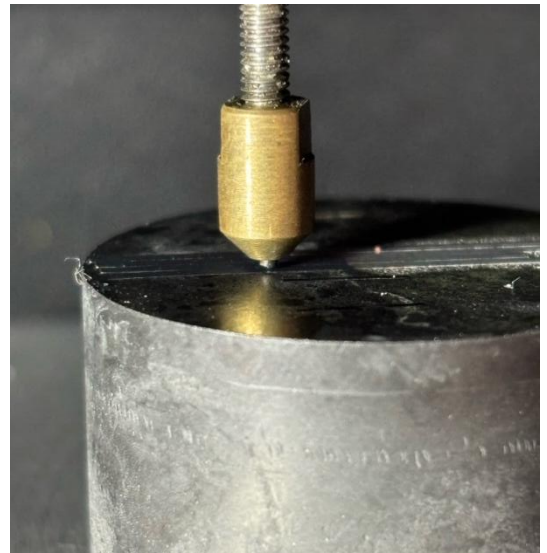
Таблица 16 – Условия проведения испытаний [составлено автором]

Серия	Предварительная	Основная
Нагрузка P_{max} , мН	1...200	20
Время нагружения t_b , с	5	
Время выдержки t_h , с	1	

Внешний вид образца под индентором представлен на рисунке 35.



а)



б)

Рисунок 35 – Снимок выполнения процедуры испытаний, где а) предварительное испытание; б) основное измерение [фото автора]

Выбор испытательной нагрузки (предварительные испытания)

Диаграммы индентирования, полученные в ходе предварительных испытаний представлены на рисунке 36. Индентирование в данной серии производилось на полированной поверхности.

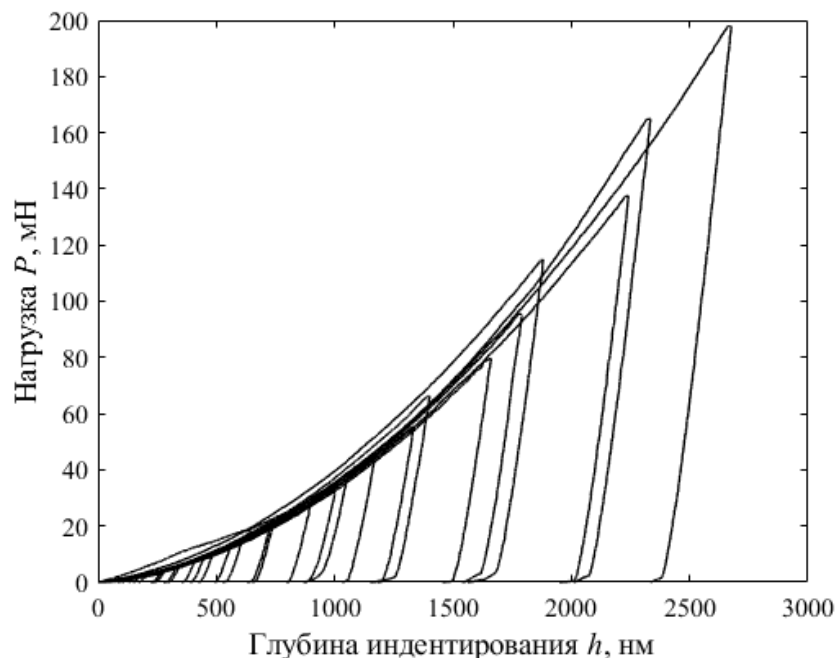


Рисунок 36 – Снимок выполнения процедуры испытаний [составлено автором]

Результаты испытаний с различной нагрузкой (1...197 мН) представлены на рисунке 37. Значения механических свойств выходят на стабильные значения при нагрузке от 10 мН и соответствующей глубине индентирования 500 нм. К тому же

значение модуля упругости приближается к справочному значению в 71 ГПа. Таким образом, для дальнейших испытаний выбрана нагрузка $F_{max} = 20$ мН.

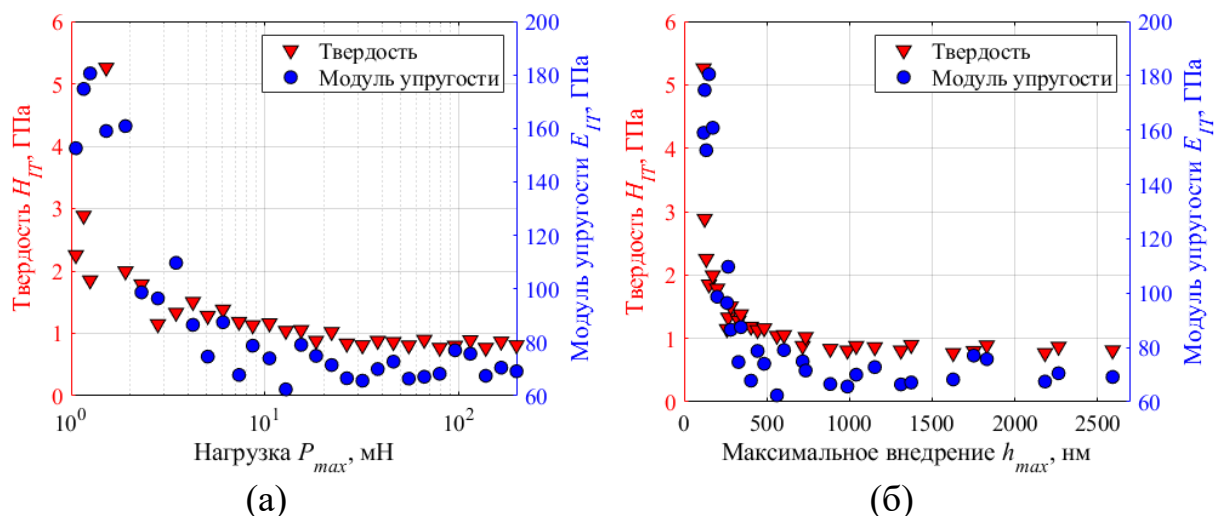


Рисунок 37 – Результаты индентирования для испытаний с различной нагрузкой, твердость и модуль упругости в зависимости от: (а) – испытательной нагрузки, (б) – глубины индентирования [составлено автором]

I. Серия испытаний с одинаковой нагрузкой (основные испытания)

Характерные диаграммы для испытаний с одинаковой нагрузкой представлены на рисунке 38. Типичные отпечатки при испытаниях представлены на рисунке 39. Результаты расчета механических свойств по диаграммам рисунка представлены в таблицах 17 и 18. В качестве отклонений в таблице указано СКО.

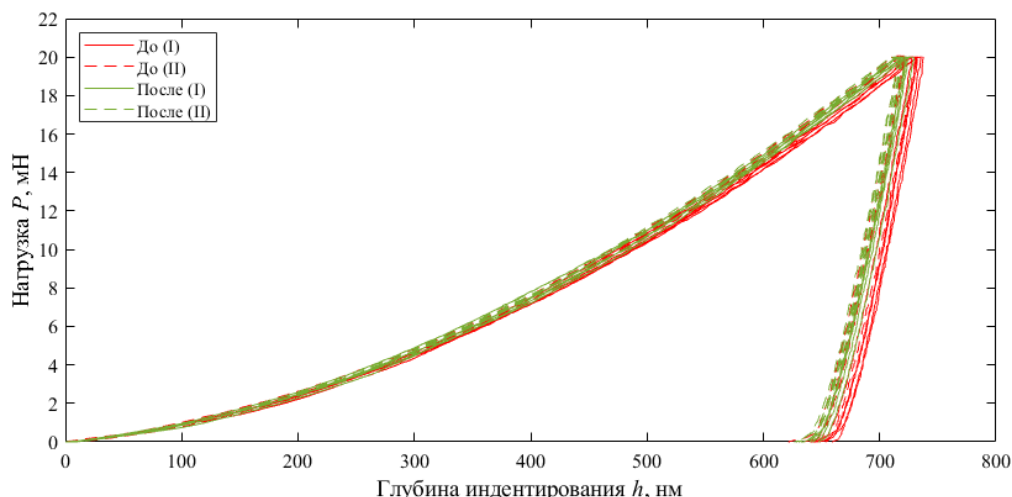


Рисунок 38 – Диаграммы индентирования при одинаковой нагрузке [составлено автором]

Графическое представление результатов в зависимости продемонстрировано на рисунках 40-41.

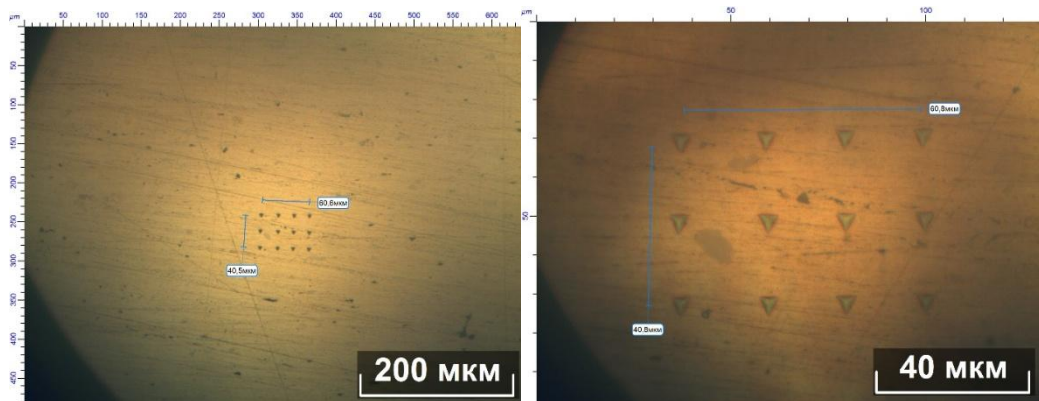


Рисунок 39 – Внешний вид отпечатков на поверхности контроля
(поверхность без травления) [составлено автором]

Таблица 17 – Результаты испытаний при одинаковой нагрузке (твердость)
[составлено автором]

Состояние	Твердость при индентировании H_{IT} , ГПа	
	Поверхность без травления	Поверхность с травлением
До	$0,943 \pm 0,035$	$0,839 \pm 0,146$
До	$0,981 \pm 0,059$	$0,899 \pm 0,061$
После	$0,954 \pm 0,067$	$0,824 \pm 0,057$
После	$0,957 \pm 0,054$	$0,899 \pm 0,062$

Таблица 18 – Результаты испытаний при одинаковой нагрузке (модуль упругости)
[составлено автором]

Состояние	Твердость при индентировании E_{IT} , ГПа	
	Поверхность без травления	Поверхность с травлением
До	$76,09 \pm 2,61$	$72,64 \pm 7,71$
До	$77,15 \pm 2,48$	$72,75 \pm 3,49$
После	$73,88 \pm 3,44$	$70,84 \pm 3,34$
После	$76,21 \pm 3,64$	$73,87 \pm 3,64$

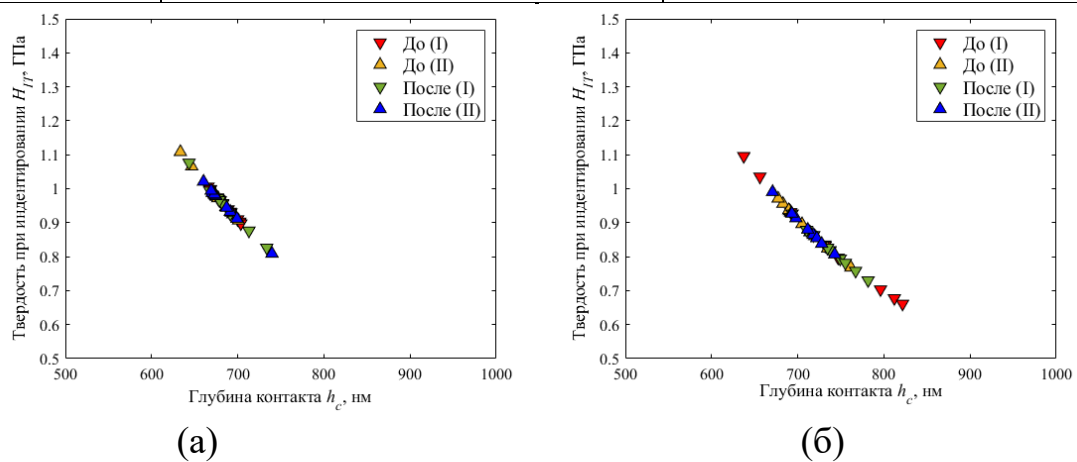


Рисунок 40 – Результаты индентирования для испытаний с одинаковой нагрузкой
(твердость): (а) – поверхность без травления, (б) – поверхность с травлением
[составлено автором]

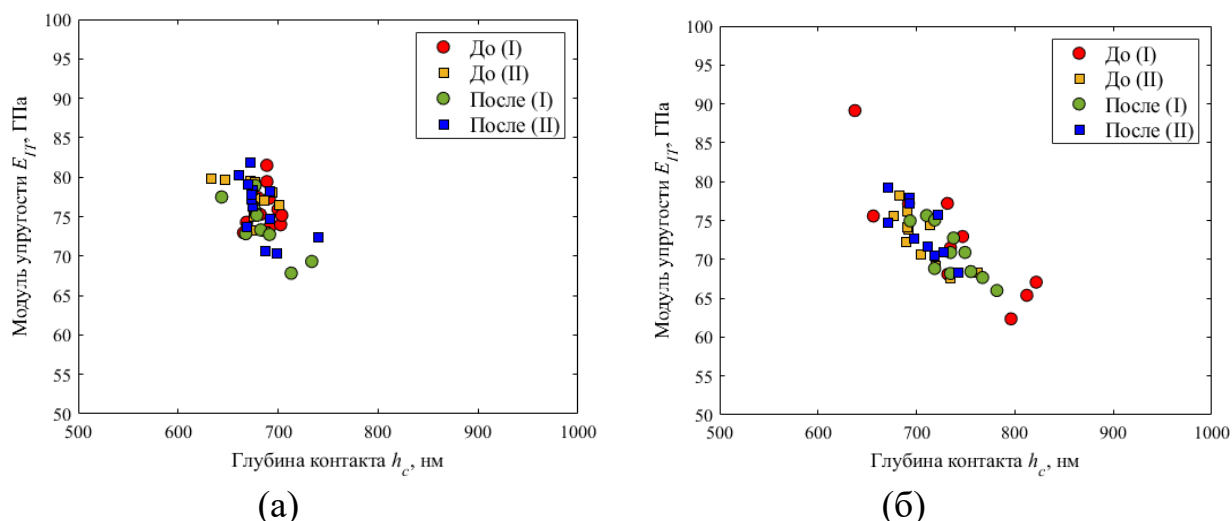


Рисунок 41 – Результаты индентирования для испытаний с одинаковой нагрузкой (модуль упругости): а) – поверхность без травления, б) – поверхность с травлением [составлено автором]

Значения механических характеристик (твердости и модуля упругости) практически не изменяются при заданном режиме МАО для всех образцов (I и II). Выявлен большой разброс на протравленной поверхности вследствие шероховатости. Средние значения модуля упругости алюминиевого сплава составили 73-77 ГПа с наибольшим разбросом 4 единицы, что соотносится со справочным значением 71 ГПа. Отмечено изменение среднего значения твердости, однако данное значение изменяется в пределах разброса (3-7%). Визуально данное изменение также можно заметить из рисунков 40-41, так как при заданной одинаковой нагрузке глубина индентирования уменьшается после МАО.

Однако, если рассматривать только образец до МАО (I) и сравнивать его с результатами с обоих образцов после (I и II), то твердость повышается с 0,943 до 0,954 ГПа.

4.5 Экспериментальное исследование деформации микрорельефа в зоне контакта заклепочного соединения

Для установления связи между усилием, созданным в процессе клепки, и шероховатостью в заклепочных соединениях предложен экспериментальный подход с использованием тарировочного (динамометрического) ключа.

Этот метод позволит количественно оценить, как сила сжатия (и соответствующий ей натяг) влияет на деформацию микронеровностей и качество

контакта на опорной поверхности головки и на листе. Ниже представлена методика, адаптированная под эту задачу.

Оборудование и инструменты, используемые в эксперименте представлены в таблице 19. Ход эксперимента начинается с подготовки и исходных измерений.

1. Просверливаются отверстия в образцах.
2. Размечаются концентрические зоны вокруг отверстия, соответствующие положению опорной поверхности головки.
3. Проводится измерение исходной шероховатости в этих зонах (до MAO и после MAO).

Таблица 19 – Оборудование и инструменты для проведения экспериментального исследования [составлено автором]

Нагружающее устройство	
<p>В качестве измерителя усилия использовать тарировочный ключ (динамометрический), если он встроен в винтовой механизм нагружения (например, динамометрический ключ, закрепленный на винте, который давит на головку через шток).</p>	
Оценка шероховатости	
<p>Профилометр (контактный или оптический) для измерения шероховатости поверхности пластины в кольцевой зоне контакта.</p>	

Следующим этапом производится нагружение:

1. Имитатор головки устанавливается в отверстие пластины.
2. С помощью нагружающего устройства прикладывается осевое усилие F .

3. Усилие фиксируется по показаниям тарировочного ключа. Нагружение производится ступенчато до максимального значения, соответствующего реальным усилиям клепки или затяжки.

4. Для каждого значения усилия образец выдерживается под нагрузкой в течение заданного времени для завершения пластической деформации.

Объектом исследования являлись образцы, имитирующие заклепочное соединение листов из алюминиевого сплава АМгб толщиной 1,0 мм. В качестве крепежных элементов использовались болты диаметром 8,0 мм. Сборка образцов производилась с контролируемым усилием деформирования в диапазоне 5–30 кН, что соответствует реальным условиям формирования замыкающей головки для алюминиевых заклепок малого диаметра. Усилие контролировалось с помощью динамометрического ключа Airline ATBN001 (диапазон 5–40 Н·м) (рисунок 42).



Рисунок 42 – Экспериментальное исследование, где а – динамометрический ключ Airline ATBN001; б – затяжка болтов [фото автора]

Осевое усилие затяжки F определяется по формуле (4.1):

$$F = \frac{M}{k \cdot d'} \quad (4.1)$$

где:

M – момент затяжки, Н·м;

k – коэффициент трения;

d – диаметр резьбы болта, м.

Эксперименты проводились с крутящим моментом 10, 20 и 30 Н·м, что соответствует следующим значениям осевого усилия: $F_1 = 8,3$ кН; $F_2 = 16,7$ кН; $F_3 = 25,0$ кН.

После снятия крепежных элементов были произведены замеры шероховатости поверхности в зоне под «опорной головкой» соединения. Зависимости шероховатости от усилия представлены на рисунке 43.

По графикам можно установить, что чем больше усилие сжатия, тем ниже шероховатость как обработанных, так и необработанных образцов. Однако высокая исходная шероховатость необработанных образцов всё равно не сглаживается усилием до требуемых значений $Ra \leq 0,63$ мкм.

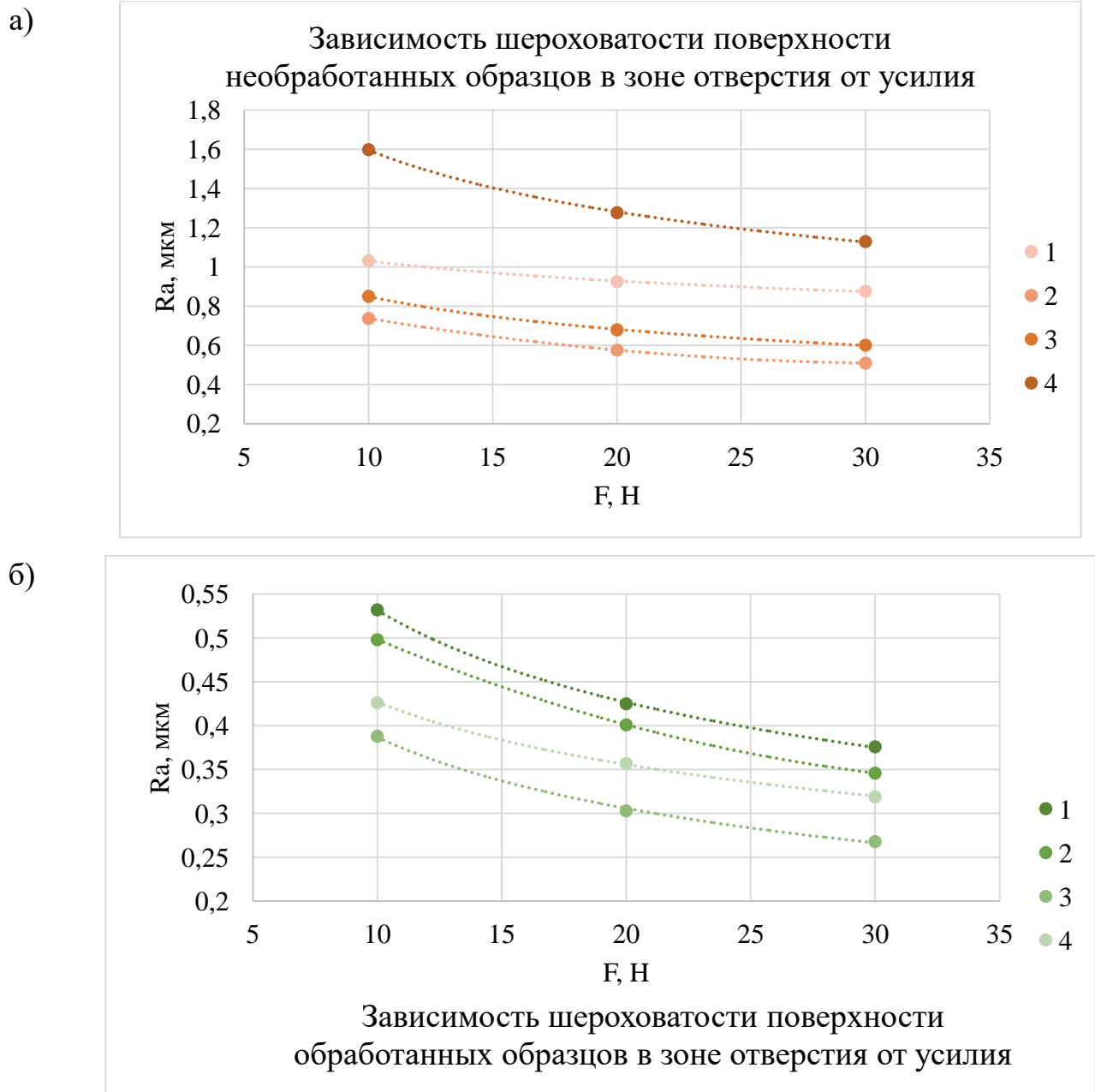


Рисунок 43 – Зависимость шероховатости поверхности образцов в зоне отверстия от усилия, где а – до MAO, б – после MAO [составлено автором]

Далее было проведено экспериментальное исследование на разрывной машине Zwick/Roell Z100. Образцы соединялись с помощью струбины и устанавливались в пресса. Затем происходило испытание на относительное перемещение образцов (рисунок 44). При этом, в каждой серии испытаний сохранялись усилие сжатия образцов и площадь их контактного взаимодействия.

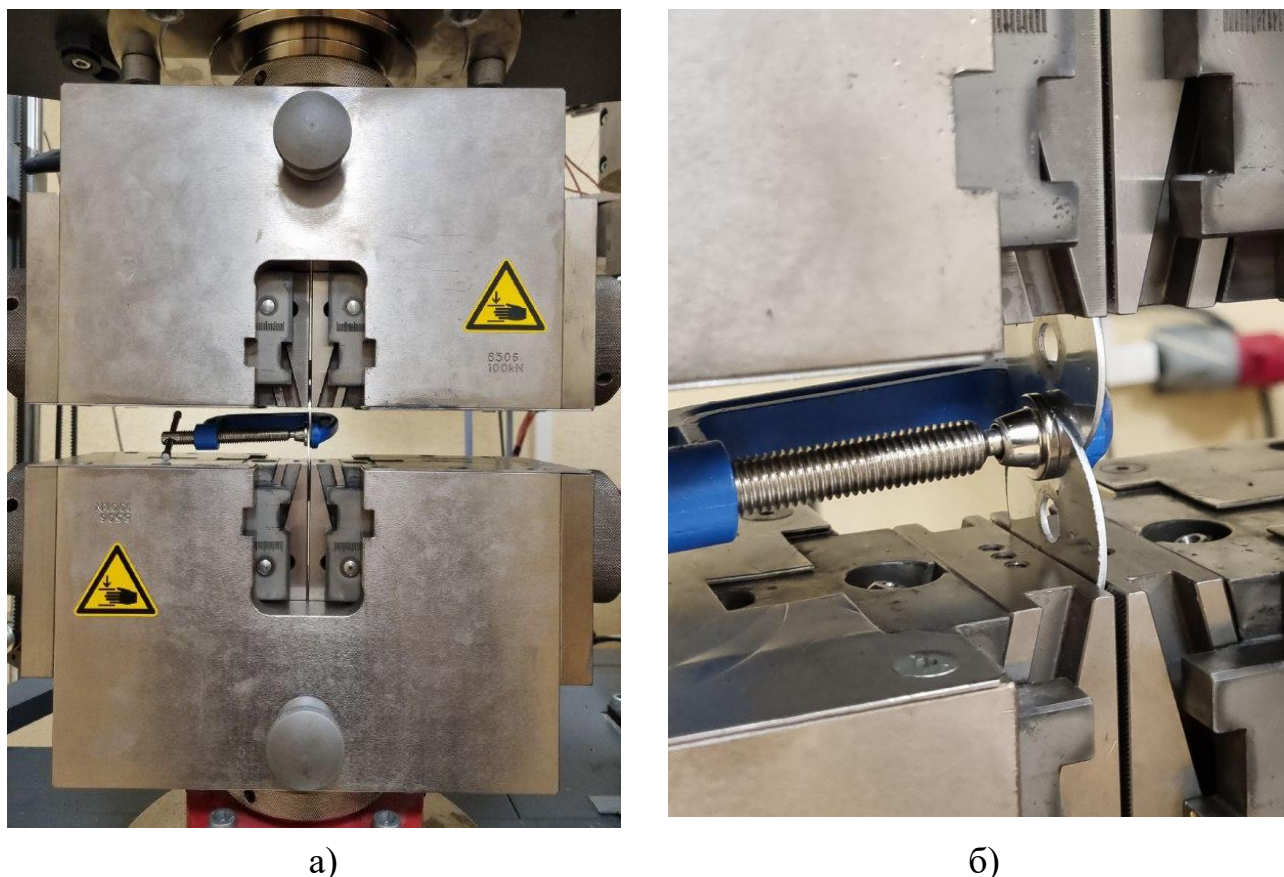
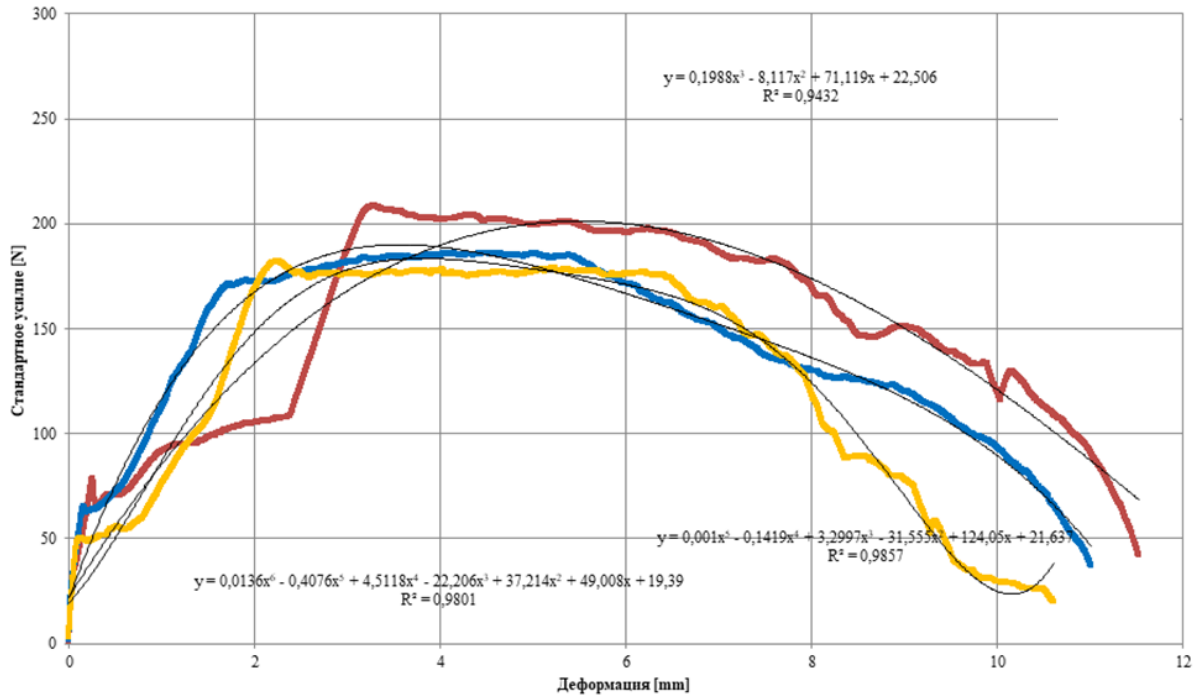


Рисунок 44 – Проведение эксперимента, где а – оборудование: Zwick/Roell Z100, б – установка образцов в струбину и в тиски [фото автора]

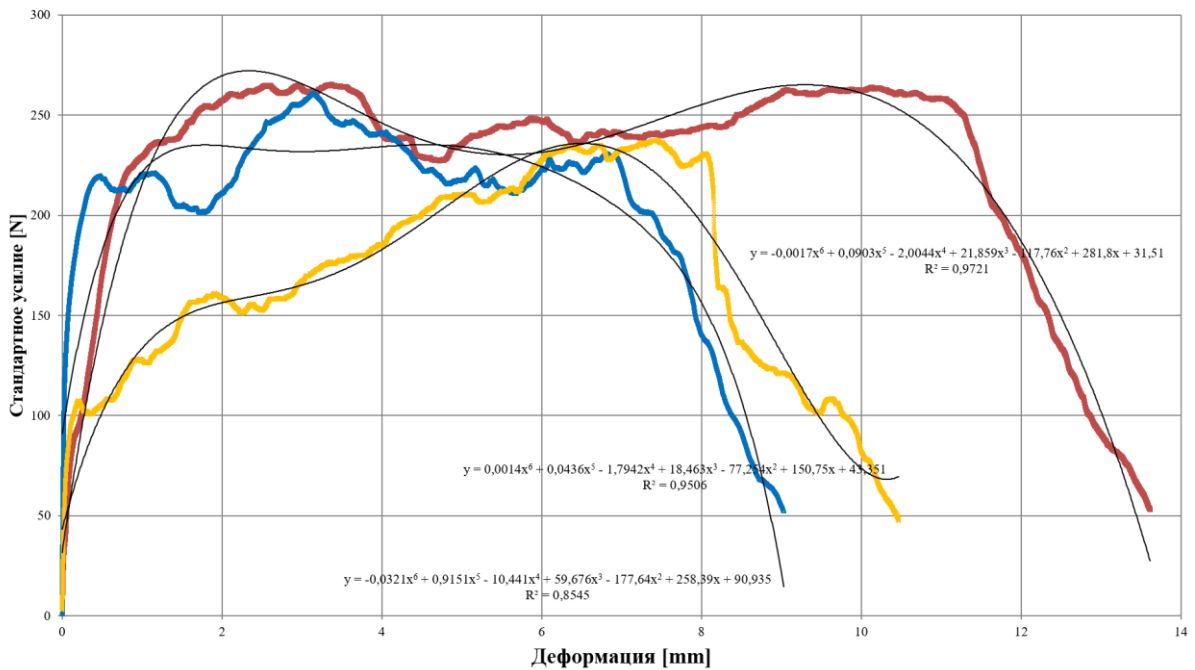
Сохранение усилия сжатия и площади контактного взаимодействия образцов позволило сравнить работу, которая была затрачена на относительное перемещение образцов до и после МАО. На рисунке 45 представлены графики, построенные на результатах эксперимента на оборудовании Zwick/Roell Z100. Линии тренда, описывающие кривые с достаточной для обработки данных точностью, представлены в таблице 20. Подсчитав площадь под кривыми были получены значения работы на перемещение.

Образец до обработки



а)

Образец после обработки



б)

Рисунок 45 – Сравнение усилий, прилагаемых на относительное перемещение образцов до и после обработки, где а – до МАО, б – после МАО

[составлено автором]

Таблица 20 – Работа, затраченная на относительное перемещение образцов до и после МАО при равном усилии затяжки [составлено автором]

	Аппроксимирующая функция	$\int_0^x y dx = A$	$\frac{A_{\text{После}}}{A_{\text{До}}}$
N₁			
До	$y = 0.001 x^5 - 0.1419x^4 + 3.2997x^3 - 31.555x^2 + 124.05x + 21.637$	1545.7891	1,2
После	$y = -0,0321x^6 + 0,9151 x^5 - 10,441x^4 + 59,676x^3 - 177,64x^2 + 258,39x + 90,935$	1814.4336	
N₂			
До	$y = 0,0136x^6 - 0,4076 x^5 + 4,5118x^4 - 22.206x^3 + 37,214x^2 + 49,008x + 1939$	1251.3020	1,45
После	$y = 0,0014x^6 + 0,0436 x^5 - 1,7942x^4 + 18,463x^3 - 77,254x^2 + 150,75x + 43,351$	1810.0934	
N₃			
До	$y = 0.1988x^3 - 8.117x^2 + 71.119x + 22.506$	1717.4499	1,46
После	$y = -0.0017x^6 + 0.0903 x^5 - 2.0044x^4 + 21.859x^3 - 117.76x^2 + 281.8x + 31.51$	2513.8331	

В результате можно сделать вывод о том, что на относительное перемещение образцов после обработки была затрачена работа в 1,2-1,46 раз больше, чем для таких же образцов до обработки. Это может свидетельствовать о том, что площадь контакта поверхностей после магнитно-абразивной обработки увеличилась.

Для подтверждения этого можно воспользоваться параметрами, которые оцениваются профилометром. Параметр tp (Bearing Length Ratio или Material Ratio) – это ключевой параметр в профилометрии, используемый для оценки функциональных характеристик поверхности, таких как износостойкость и способность удерживать смазку [38]. В стандартах ISO этот параметр обозначается Rmr и является относительной опорной длиной профиля. Этот параметр описывает "несущую способность" поверхности. В механической обработке его часто интерпретируют через мысленный эксперимент: если срезать вершины неровностей на определенной высоте, параметр tp будет показывать, какая доля поверхности станет плоской (опорной) после этого среза.

Параметр tp обычно не задается одним числом, а представляется в виде опорной кривой (Abbott-Firestone curve – кривой Эбботта-Файрстоуна). Это график, где по оси X откладывается tp (0%...100%), а по оси Y — уровень сечения (глубина профиля).

Этот график позволяет оценить распределение материала по высоте профиля. На его основе рассчитываются производные параметры, которые часто более информативны, чем просто Ra (среднее арифметическое отклонение).

На профилометре SurfTest SJ-210 значения отображаются не как $Rmr(c)1$ и $Rmr(c)2$, а как отдельные параметры $Mr1$ и $Mr2$, которые показывают следующие результаты:

- $Mr1$ (Material Ratio 1) — это значение опорной длины профиля (Rmr), которое соответствует верхней границе "сердцевины" профиля. Простыми словами, это доля поверхности (в процентах), которая находится выше уровня, разделяющего выступающие пики приработки (Rpk) и основную несущую часть (Rk).
- $Mr2$ (Material Ratio 2) — это значение опорной длины профиля (Rmr), которое соответствует нижней границе "сердцевины" профиля. Это доля поверхности, которая находится выше уровня, разделяющего основную несущую часть (Rk) и глубокие впадины для удержания смазки (Rvk).

После эксперимента на разрывной машине снимались показания профилометра, среди которых и параметры R_{mr} , представленные в таблице 21, а также получены кривые Эбботта-Файрстоуна для образцов до и после обработки, представленные на рисунке 46.

Таблица 21 – Изменение параметров профилометра до и после обработки [составлено автором]

Параметр	До обработки	После обработки	Изменение
$R_{mr(c)1}$ ($Mr1$)	28,663 %	9,988 %	↓ на 18,7 п.п.
$R_{mr(c)2}$ ($Mr2$)	98,825 %	99,400 %	↑ на 0,6 п.п.
Ширина сердцевины ($Mr2 - Mr1$)	≈70,2 %	≈89,4 %	↑ на 19,2 п.п.

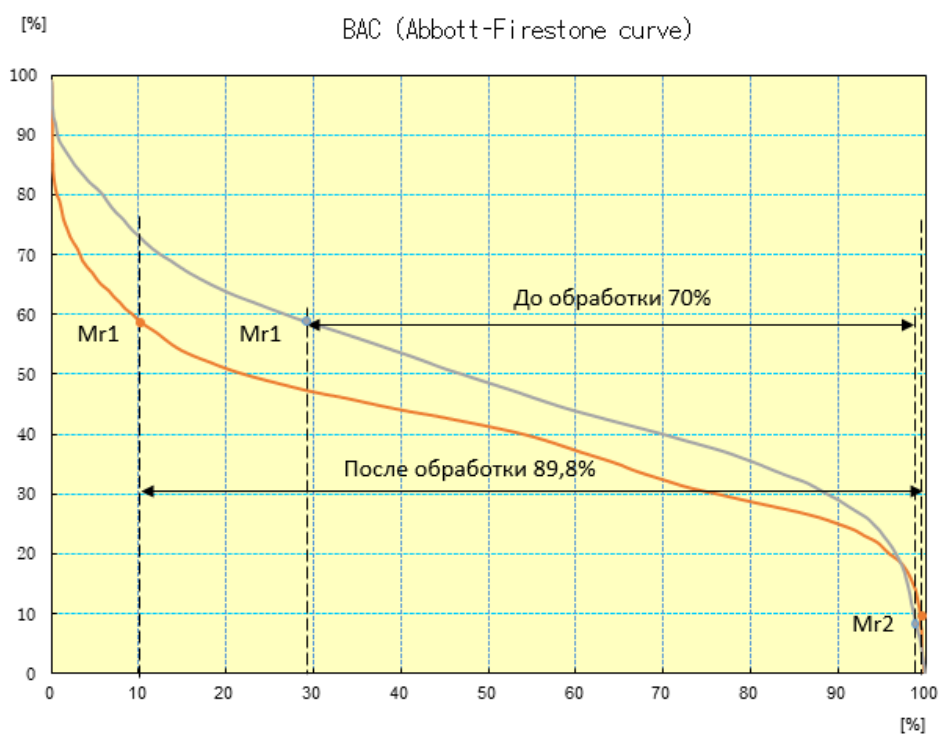


Рисунок 46 – Сравнение кривых Эбботта-Файрстоуна [составлено автором]

По результатам сравнения кривых получено следующее:

1. Снижение $R_{mr(c)1}$ с 28,7 % до 10,0 %

- До обработки: почти 29 % опорной длины приходилось на выступающие пики (R_{pk}). Это означает, что пики были высокими и занимали значительную долю высоты профиля. Поверхность была «острой», с малым фактическим пятном контакта.

- После обработки: пики срезаны или притуплены — теперь только 10 % профиля выше уровня, отделяющего пики от сердцевины.

- Вывод: обработка эффективно удалила или сгладила выступающие неровности.

2. Небольшое увеличение $R_{mr(c)2}$ с 98,8 % до 99,4 %

- Этот параметр показывает, какая доля профиля находится выше уровня, отделяющего сердцевину от глубоких впадин (R_{vk}).

- Рост с 98,8 % до 99,4 % означает, что глубокие впадины стали мельче или их количество уменьшилось (теперь только 0,6 % высоты профиля приходится на зону самых глубоких канавок вместо 1,2 %).

- Это нормально для обработок, которые не только срезают пики, но и частично сглаживают дно впадин.

3. Расширение сердцевины ($M_{r2}-M_{r1}$) с 70 % до 89 %

- Сердцевина (R_k) — это основная рабочая часть поверхности, которая будет нести нагрузку после приработки.

- Увеличение ширины сердцевины в координатах R_{mr} (почти на 20 %) говорит о том, что профиль стал **более плоским и равномерным**. Основная доля материала сосредоточена в узком диапазоне высот, а доля как пиков, так и глубоких впадин уменьшилась.

4. Физический смысл: как изменилась поверхность

• До обработки:

Поверхность напоминала классический результат токарной или фрезерной обработки — с высокими гребнями и умеренно глубокими канавками. Несущая способность при малых нагрузках низкая, смазка удерживалась в основном за счёт относительно глубоких впадин ($M_{r2} = 98,8$ %, т.е. 1,2 % профиля — это масляные карманы).

• После обработки:

Поверхность стала более плоской («плато»). Пики почти полностью удалены (M_{r1} упал до 10 %), впадины стали мельче (M_{r2} вырос до 99,4 %). Такая поверхность:

- Быстрее прирабатывается.
- Имеет большую фактическую площадь контакта.

4.6 Рекомендации к технологическому процессу клепки

Технология заклепочных соединений для летательных аппаратов – это высокоточный, многооперационный процесс, где на первый план выходит контролируемость каждого этапа.

Предложенный в работе способ обработки поверхностей существенно повлияет не только на качество поверхностного слоя обрабатываемых поверхностей, но и обеспечит плотную посадку заклепок в соединениях.

На рисунке 47 обозначены обработанные поверхности, которые участвуют в заклепочном соединении для соединений встык и внахлест.

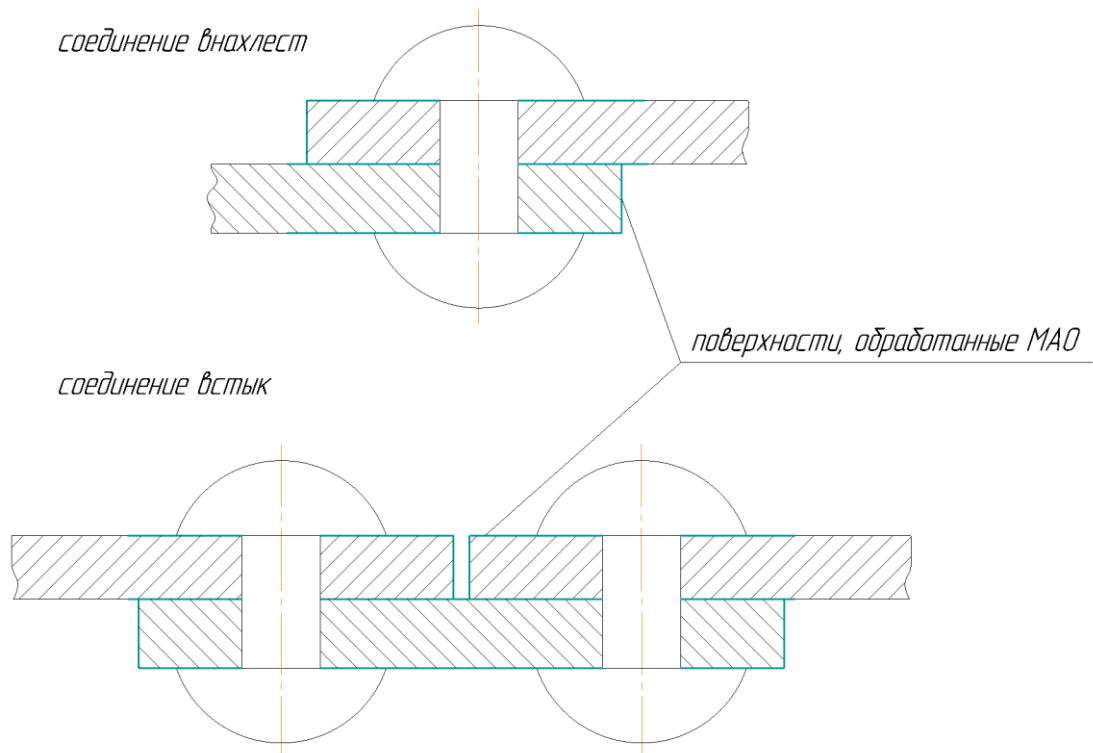
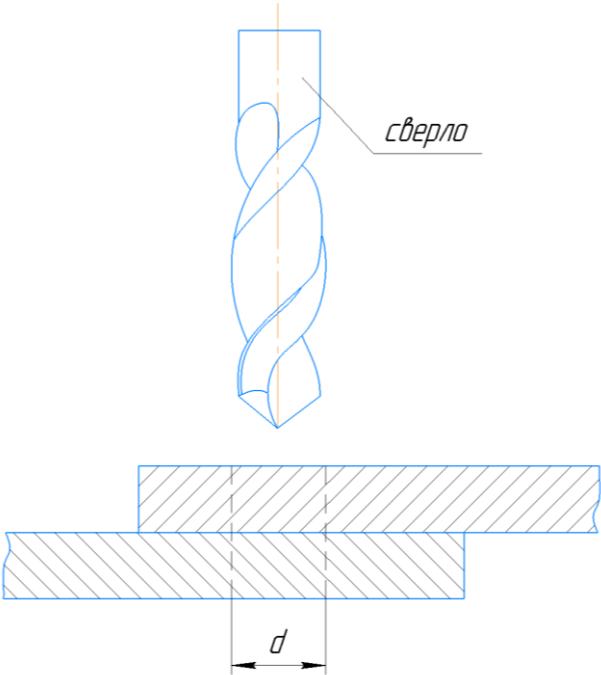
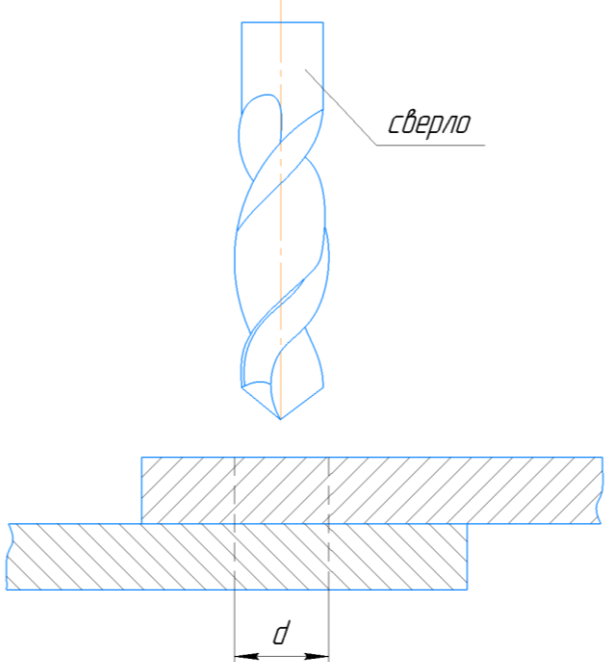


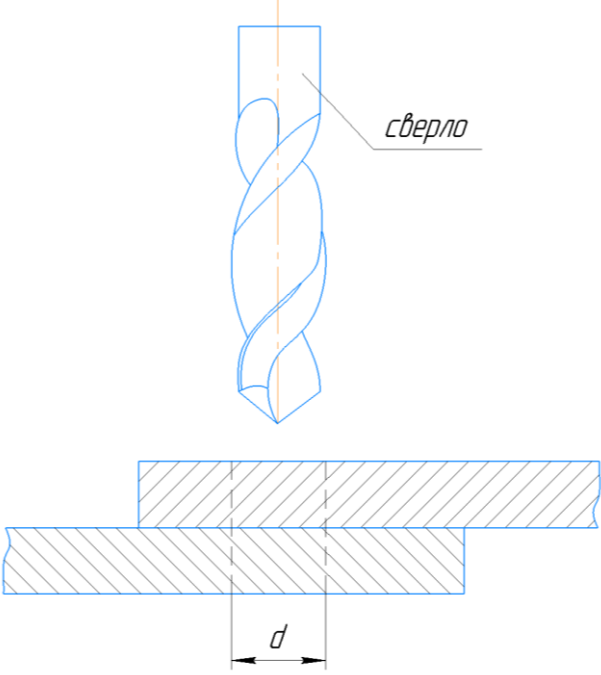
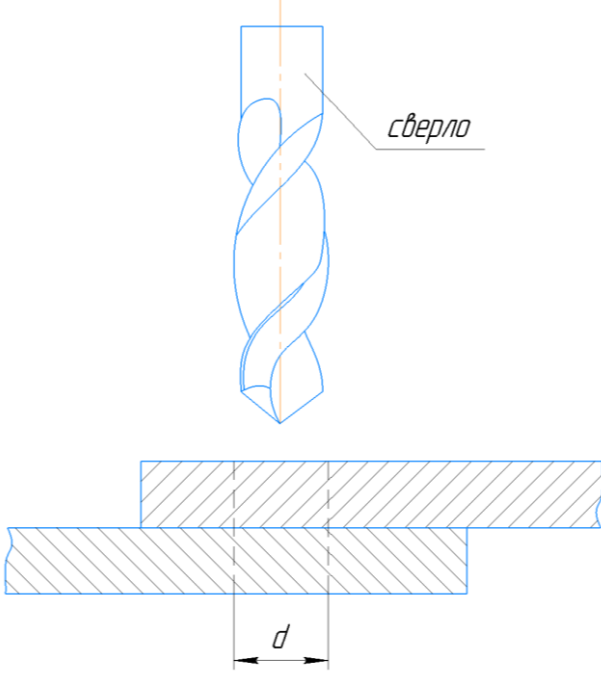
Рисунок 47 – Обработанные поверхности в заклепочных соединениях [составлено автором]

В процессе сборки летательных аппаратов при применении процесса финишной магнитно-абразивной обработки произойдут изменения на этапе получения заклепочных соединений. Сравнение существующей и рекомендуемой технологий представлено в таблице 22.

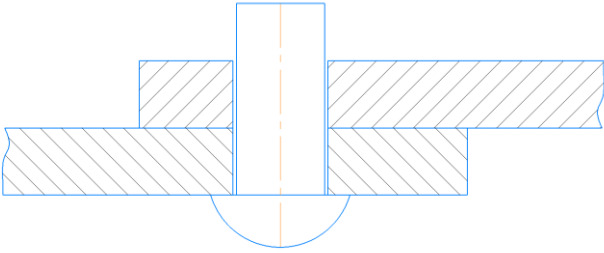
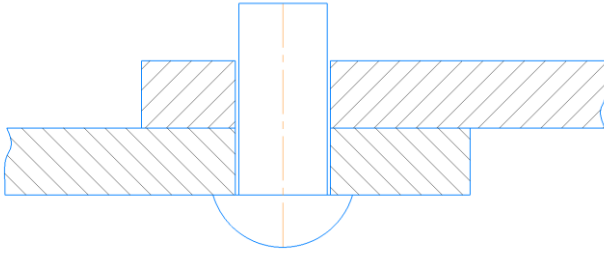
Таблица 22 – Сравнение существующей и рекомендуемой технологий,
[составлено автором]

Существующая технология	Рекомендуемая технология
<p>1. Подготовка деталей к соединению</p> <p>Правка (рихтовка): Устранение неровностей и вмятин на соединяемых поверхностях.</p> <p>Очистка: Удаление окалины, грязи, масла и влаги (особенно важно для алюминия).</p> <p>Разметка: Нанесение осей и центров отверстий.</p>	<p>1. Подготовка деталей к соединению</p> <p>Правка (рихтовка): Устранение неровностей и вмятин на соединяемых поверхностях.</p> <p>Магнитно-абразивная обработка кромок соединяемых поверхностей (рисунок 48).</p> <p>Разметка: Нанесение осей и центров отверстий.</p>
<p>2. Выполнение отверстий – сверление</p>  <p>После сверления необходимо снять заусенцы (фаску), чтобы закладная головка легла плотно.</p>	<p>2. Выполнение отверстий – сверление</p>  <p>После сверления необходимо снять заусенцы (фаску), чтобы закладная головка легла плотно.</p>

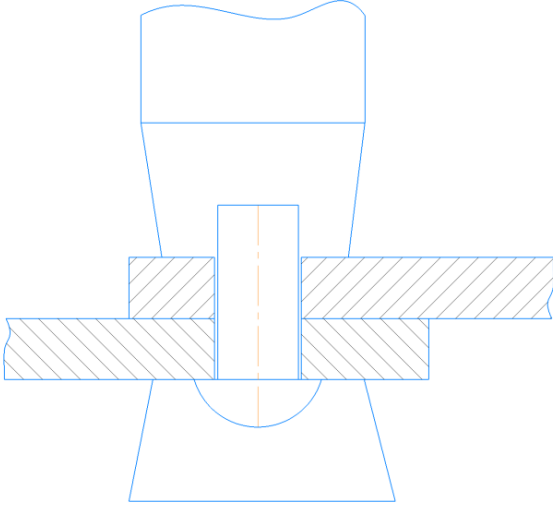
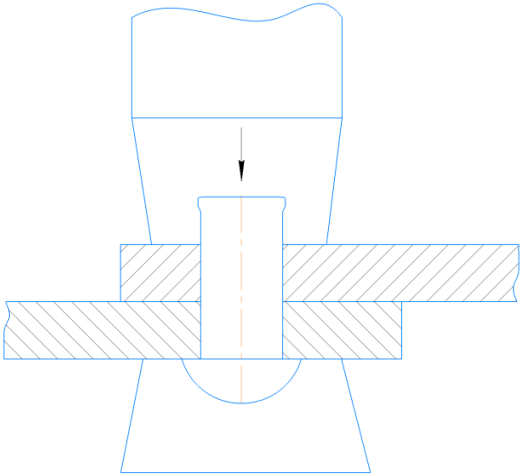
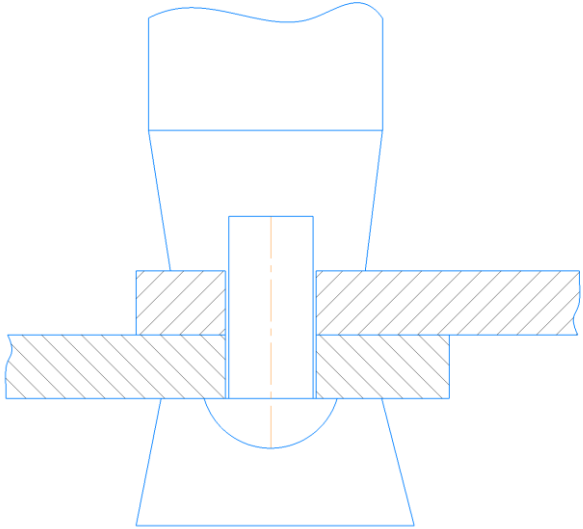
Продолжение таблицы 22

Существующая технология	Рекомендуемая технология
<p>2. Подготовка деталей к соединению</p> <p>Правка (рихтовка): Устранение неровностей и вмятин на соединяемых поверхностях.</p> <p>Очистка: Удаление окалины, грязи, масла и влаги (особенно важно для алюминия).</p> <p>Разметка: Нанесение осей и центров отверстий.</p>	<p>2. Подготовка деталей к соединению</p> <p>Правка (рихтовка): Устранение неровностей и вмятин на соединяемых поверхностях.</p> <p>Магнитно-абразивная обработка кромок соединяемых поверхностей (рисунок 48).</p> <p>Разметка: Нанесение осей и центров отверстий.</p>
<p>2. Выполнение отверстий – сверление</p>  <p>После сверления необходимо снять заусенцы (фаску), чтобы закладная головка легла плотно.</p>	<p>2. Выполнение отверстий – сверление</p>  <p>После сверления необходимо снять заусенцы (фаску), чтобы закладная головка легла плотно.</p>

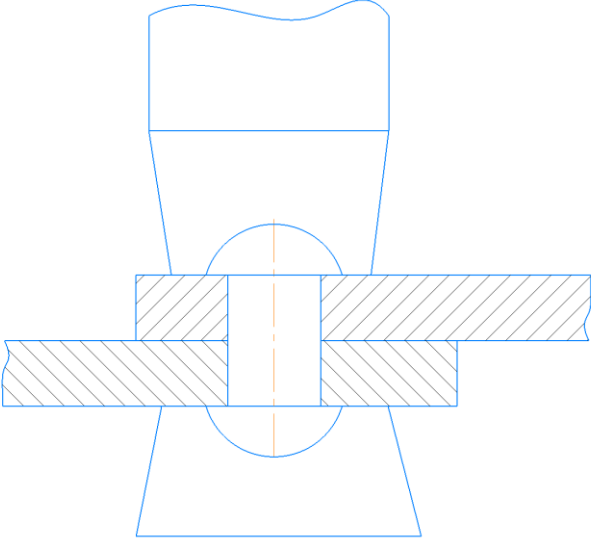
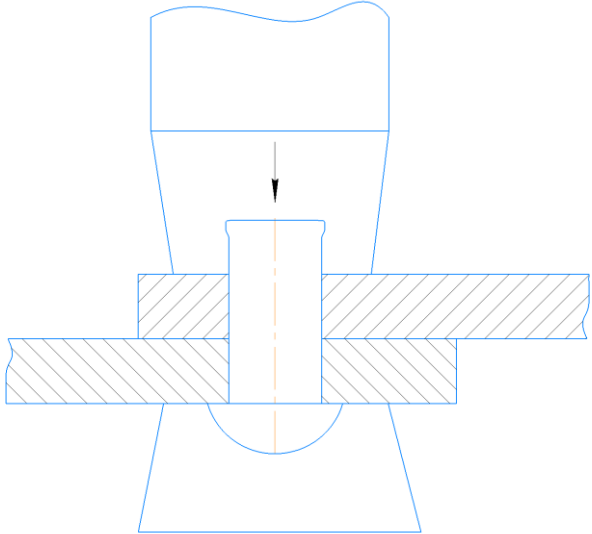
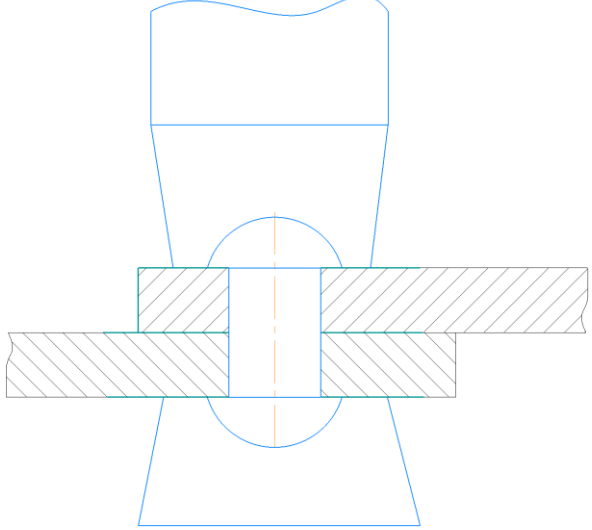
Продолжение таблицы 22

Существующая технология	Рекомендуемая технология
<p>После сверления отверстия и подготовки поверхности листа параметр шероховатости составляет $Ra = 0,8-1,2$ мкм. На поверхности присутствуют острые вершины микронеровностей, заусенцы по кромкам отверстия и технологические риски от режущего инструмента. Эти дефекты служат концентраторами напряжений и снижают фактическую площадь контакта при сборке.</p>	<p>Магнитно-абразивная обработка позволяет снизить шероховатость до $Ra = 0,18-0,21$ мкм. Происходит удаление заусенцев, сглаживание острых кромок и формирование регулярного микрорельефа. Применение МАО для обработки кромок корпусных деталей в зоне заклепочных соединений обеспечивает стабильное снижение шероховатости и увеличение долговечности соединений.</p>
<p>3. Выполнение клепки</p> <p>1. Установка</p>  <p>Заклепка вставляется в отверстие со стороны обшивки.</p> <p>С противоположной стороны (со стороны замыкающей головки) устанавливается массивная поддержка (поддержка — специальный инструмент, часто пневматический).</p>	<p>3. Выполнение клепки</p> <p>1. Установка</p>  <p>Заклепка вставляется в отверстие со стороны обшивки.</p> <p>С противоположной стороны (со стороны замыкающей головки) устанавливается массивная поддержка (поддержка — специальный инструмент, часто пневматический).</p>

Продолжение таблицы 22

Существующая технология	Рекомендуемая технология
<p>2. Натяжка (осадка)</p>  <p>Со стороны установленной заклепки (опорной головки) прикладывается ударный инструмент (пневмомолоток) с насадкой-обжимкой.</p> <p>3. Формирование (осадка стержня)</p>  <p>За счет пластической деформации стержень заклепки утолщается.</p>	<p>Ее задача — плотно прижать заклепочный стержень к стенкам отверстия и не дать деталям разойтись.</p> <p>2. Натяжка (осадка)</p>  <p>Со стороны установленной заклепки (опорной головки) прикладывается ударный инструмент (пневмомолоток) с насадкой-обжимкой.</p> <p>После магнитно-абразивной обработки обеспечивается плотное прилегание как самих листов, так и контакт с опорной головкой заклепки.</p> <p>3. Формирование (осадка стержня)</p> <p>За счет пластической деформации стержень заклепки утолщается.</p>

Продолжение таблицы 22

Существующая технология	Рекомендуемая технология
<p data-bbox="199 315 842 416">4. Формирование замыкающей головки</p>  <p data-bbox="199 1070 842 1171">Формируется вторая (замыкающая) головка.</p>	<p data-bbox="863 315 1538 416">4. Формирование замыкающей головки</p>  <p data-bbox="863 902 1538 1003">4. Формирование замыкающей головки</p>  <p data-bbox="863 1664 1538 2022">Формируется вторая (замыкающая) головка. Качество поверхности листового материала после МАО позволит обеспечить плотное прилегание замыкающей головки с поверхностью листа.</p>

4.7 Выводы по четвертой главе

1. Методом микротвердости установлено, что в результате приложения усилия в поверхностном слое листа формируется упрочненная зона. При этом предварительная магнитно-абразивная обработка способствует формированию более равномерного по глубине упрочнения без резких градиентов свойств.

2. Установленные факторы – снижение исходной шероховатости (устранение концентраторов напряжений), создание сжимающих остаточных напряжений (через наклеп) и оптимизация контактного взаимодействия под головкой заклепки – являются, согласно литературным данным, определяющими для повышения сопротивления усталостному разрушению заклепочных узлов. Полученные количественные характеристики создают основу для прогнозирования ресурса соединений, обработанных по технологии магнитно-абразивной обработки.

3. Рекомендованы рациональные режимы для реализации исследованного процесса. Для заклепочных соединений из алюминиевых сплавов с толщиной листов 0,8–1,2 мм (диаметр заклепки 2,5–3,0 мм) оптимальным является усилие прижатия в диапазоне 1,0–1,5 кН, обеспечивающее максимальную степень смятия микронеровностей и формирование равномерного наклепанного слоя без риска повреждения поверхности листа.

4. Увеличение ширины сердцевины в координатах Rmr (почти на 20 %) говорит о том, что профиль стал более плоским и равномерным, что свидетельствует о большей площади контакта и более высокой плотности неразъемного соединения.

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 неразъёмных соединений в конструкциях летательных аппаратов.

2. На основании экспериментальных исследований разработан способ магнитно-абразивной обработки поверхностей (Патент на изобретение RU2800274C1), предусматривающий научное обоснование 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. Проведены 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: $B=0,2$ до $0,57$ Тл; время обработки $t=4-8$ мин; частота вращения заготовки $n=460-750$ мин⁻¹ (43-70 м/мин).

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.

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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абделькадр, М. С. Разработка метода контроля заклепочных и болтовых соединений планера летательных аппаратов при эксплуатации по техническому состоянию : специальность 05.22.14 «Эксплуатация воздушного транспорта», 05.07.02 «Проектирование и конструкция летательных аппаратов» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Абделькадр Махамат Сейд ; Московский государственный технический университет гражданской авиации. — Москва, 2004. — 20 с. — Текст : непосредственный.
2. Абибов, А. Л. Технология самолетостроения: учебник для авиационных вузов / А. Л. Абибов, Н. М. Бирюков, В. В. Бойцов [и др.] ; под общей редакцией проф. А. Л. Абибова. — Москва : Машиностроение, 1970. — 598 с.
3. Азаров, В. А. Разработка технологии повышения адгезионной прочности гладкостного хладостойкого фторопластового покрытия магистральных газопроводов : специальность 2.6.17. Материаловедение : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Азаров Владимир Александрович ; Санкт–Петербургский горный университет императрицы Екатерины II. – Санкт–Петербург, 2025. — 131 с. — Текст : непосредственный.
4. Акулович, Л. М. Основы магнитно–абразивной обработки металлических поверхностей / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, В. Я. Лебедев. — Минск: БГАТУ, 2012. — 316 с. : ил. — ISBN 978–985–519–544–4
5. Акулович, Л. М. Смазочно–охлаждающее технологическое средство на основе сульфогрупп для магнитно–абразивной обработки алюминиевых сплавов / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, Е. В. Сенчуров. // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка–тэхнічных навук. – 2015. – № 1. – С. 82–86.
6. Акулович, Л. М. Ферроабразивные порошки для магнитно–абразивной обработки металлических поверхностей / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев, А. И. Покровский, Е. В. Сенчуров ; Минсельхозпрод РБ, УО

"БГАТУ". – Минск: БГАТУ, 2015. – 284 с.: ил. – ISBN 978–985–519–766–0 : 84800–00.

7. Барон, Ю. М. Технология абразивной обработки в магнитном поле/ Ю. М. Барон. – Ленинград : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1975. – 128 с.: ил. — Текст : непосредственный.

8. Барон, Ю. М. Магнитно–абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Ленинград : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1986. – 176 с.: ил. — Текст : непосредственный.

9. ГОСТ 23505–79 Обработка абразивная. Термины и определения = Abrasive machining. Terms and definitions : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 23 февраля 1979 г. N 722 срок введения установлен с 01.01.80 : переиздание (май 1993 г.) с Изменением N 1, утвержденным в апреле 1987 г. (ИУС 8–87). – Москва : Издательство стандартов, 1993. – Текст : непосредственный.

10. ГОСТ 14803–85. Заклепки (повышенной точности). Общие технические условия : государственный стандарт Союза ССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 20.02.85 № 349 : введен взамен ГОСТ 14803–74 : дата введения 1986–07–01. – Москва : Издательство стандартов, 1986. – 23 с. : ил. – Текст : непосредственный.

11. Ермошина, Н. Л. Конструкция самолетов и вертолетов. Ч. 2. Фюзеляж вертолета Ми–8 : методические указания : в 9 ч. / Н. Л. Ермошина, А. В. Свиненков. – Оренбург : ГОУ ОГУ, 2008. – 17 с. – Текст : непосредственный.

12. **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.

13. **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.

14. **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.

15. **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.

16. Каренина, Радмила Алексеевна. Технологическое обеспечение качества резьбовых поверхностей замковых соединений буровых штанг финишной магнитно–абразивной обработкой : специальность 2.5.6. Технология машиностроения : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Каренина Радмила Алексеевна ; Санкт–Петербургский горный университет императрицы Екатерины II. – Санкт–Петербург, 2025. — 120 с. — Текст : непосредственный.

17. Кексин, А. И. Повышение качества внутренних резьбовых поверхностей на основе предварительного магнитно–абразивного полирования сложнопрофильного инструмента : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кексин Александр Игоревич ; Санкт–Петербургский политехнический университет Петра Великого. — Санкт–Петербург, 2017. — 200 с. — Текст : непосредственный.

18. Ланков, А. А. Особенности деформирования неровностей при сжатии шероховатых поверхностей / А. А. Ланков, Д. М. Ворохобин // Механика и физика фрикционного контакта. – 2002. – № 9. – С. 31–34.
19. 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/mo.2023.3.43 // Металлообработка. – 2023. – № 3(135). – С. 43–50.
20. Максаров, В. В. Двухконтурная магнитно–абразивная обработка кромок сопрягаемых изделий / В. В. Максаров, **М. В. Ефимова**, В. Е. Трушников – DOI 10.25960/mo.2024.2.41 // Металлообработка. – 2024. – № 2(140). – С. 41–49.
21. 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.
22. Максимов, Д. Д. Технологическое обеспечение и повышение качества сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц : специальность 5.2.6 «Технология машиностроения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Максимов Дмитрий Дмитриевич ; Санкт–Петербургский горный университет императрицы Екатерины II. — Санкт–Петербург, 2024. — 160 с. — Текст : непосредственный.
23. Маталин, А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А. А. Маталин. – Киев, Техніка, 1971. – 142 с.: ил. — Текст : непосредственный.
24. Маталин, А.А. Технология механической обработки / А. А. Маталин. – Ленинград: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1977. – 462 с.: ил. — Текст : непосредственный.
25. Машиностроение : энциклопедия : в 40 т. / ред. совет: К. В. Фролов (пред.) [и др.]. – Москва : Машиностроение, 2000 – Т. 3: Технология изготовления деталей машин / А. М. Дальский, А. Г. Суслов, Ю. Ф. Назаров [и др.] ; под общей редакцией А. Г. Суслова. – 2002. – 840 с. – Текст : непосредственный.

26. Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сборник научных трудов / под редакцией В.В. Измайлова. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2018. – Вып. 11. – 144 с.

27. Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей машин : межвузовский сборник научных трудов / под общей редакцией Н. Б. Демкина; Федеральное агентство по образованию; Тверской государственный технический университет. – Тверь: ТГТУ, 2005. – 132 с. – ISBN 5–7995–0297–3.

28. Оликер, В. Е. Порошки для магнитно–абразивной обработки и износостойких покрытий / В. Е. Оликер. – Москва : Металлургия, 1990. – 175,[1] с. : ил. — ISBN 5–229–00300–6.

29. Павлюкова, Н. Л. Использование магнитно–абразивного полирования при отделке деталей из цветных сплавов / Н. Л. Павлюкова – Текст : электронный // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2010. – №3. – с. 64–67. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-magnitno-abrazivnogo-polirovaniya-pri-otdelke-detaley-iz-tsvetnyh-splavov> (дата обращения: 01.02.2026).

30. Патент № 2710085 Российская Федерация, МПК В24В 31/112 (2006.01), СПК В24В 31/112 (2019.08). Способ магнитно–абразивной обработки. Заявка № 2019129384 : заявл. 17.09.2019 : опубл. 24.12.2019 / В. В. Максаров, А. И. Кексин, И. А. Филипенко; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт–Петербургский горный университет». – 9 с.: ил.

31. 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.

32. Рудзей, Г. Ф. Обоснование путей повышения усталостной долговечности заклепочных и сварных соединений авиационных конструкций технологическими методами : специальность 05.07.03 «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Рудзей Галина Федоровна ; Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина. — Новосибирск, 2007. — 271 с. — Текст : непосредственный.

33. Сажин, А. Н. Перспективный крепёж авиационных конструкций из углекомполитов / А. Н. Сажин, Н. А. Сажин – Текст : электронный // Международный информационно-аналитический журнал «Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык». – 2018. – № 1. – 15 с. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnyy-krepyozh-aviatsionnyh-konstruktsiy-iz-uglekompozitov> (дата обращения: 09.11.2025).

34. Сакулевич, Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич ; под редакцией П. И. Ящерицына. – Минск : Наука и техника, 1981. – 327 с.: ил. – Текст : непосредственный.

35. Самохвалов, В. Н. Высокоэнергетические методы размерной и упрочняющей обработки : учебное пособие для обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 24.04.04 Авиастроение / В. Н. Самохвалов – Текст : электронный ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева". — Самара : Изд-во СамГУ, 2019. — ISBN 978-5-7883-1428-0. – URL: <https://repo.ssau.ru/handle/Uchebnye-izdaniya/Vysokoenergeticheskie-metody-razmernoj-i-uprochnyaushei-obrabotki-Elektronnyi-resurs-ucheb-posobie-80344?ysclid=mofd3poqmv660545757> (дата обращения 01.02.2026).

36. Семенов, А. Н. Технологичность конструкции изделия машиностроения : учебное пособие / А. Н. Семенов ; Минобрнауки России, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования "Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева". — Рыбинск : РГАТУ им. П. А. Соловьева, 2016. — 217 с. : ил. — ISBN 978–5–88435–618–4

37. Скворчевский, Н. Я. Эффективность магнитно–абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерицын ; АН БССР; Физико–технический институт. – Минск : Наука и техника, 1991. – 214 с. – Текст : непосредственный.

38. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – Москва: Машиностроение, 2000. – 317, [1] с. : ил. – ISBN 5–217–02976–5

39. Филипенко, И. А. 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 / Филипенко Ирина Анатольевна ; Санкт–Петербургский горный университет . — Санкт–Петербург, 2022. — 153 с. — Текст : непосредственный.

40. Филипчик, А. В. Порошки для магнитно–абразивной обработки металлических поверхностей / А. В. Филипчик, В. Е. Бабич, В. Я. Лебедев // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 15–й Международной научно–технической конференции, Минск, 26 января 2017 года. – Минск : БНТУ, 2017. – Т. 1. – С. 395–396.

41. Хомич, Н. С. Магнитно–абразивная обработка изделий : монография / Н. С. Хомич. – Минск: БНТУ, 2006. – 216, [1] с. ил. — ISBN 985–479–550–0.

42. Чичинадзе, А. В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника)/ А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.] ; под общей редакцией А.В. Чичинадзе. — Москва: Машиностроение, 2003. — 576 с.: ил. — ISBN 521703193X

43. Чеканов, М. А. Повышение производительности и качества сборки неразъемных соединений недеформируемыми заклепками : специальность 05.02.08 «Технология машиностроения» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Чеканов Максим Анатольевич. ;

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. — Барнаул, 2006. — 18 с. — Текст : непосредственный.

44. Ahmad, S. Optimization of process parameters affecting surface roughness in magnetic abrasive finishing process / S. Ahmad, S. Gangwar, P. C. Yadav, D. K. Singh – DOI 10.1080/10426914.2017.1279307 // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2017. – Vol. 32, Issue 15. – pp. 1723–1729.

45. Ahmadi, F. Effect of abrasive particle morphology along with other influencing parameters in magnetic abrasive finishing process / F. Ahmadi, H. Beiramlou, P. Yazdi – DOI 10.1051/meca/2021013 // *Mechanics and Industry*. – 2021. – Vol. 22. – p. 2021013.

46. Anjaneyulu, K. Surface texture improvement of magnetic and non magnetic materials using magnetic abrasive finishing process / K. Anjaneyulu, G. Venkatesh – DOI 10.1177/0954406220970590 // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. – 2021. – Vol. 235, Issue 19. – pp. 4084–4096.

47. Çelik, M. EFFECT of ABRASIVE TYPE on the SURFACE ROUGHNESS and MRR in MAF of AISI 304 STEEL / M. Çelik, H. Gürün, U. Çaydas – DOI 10.1142/S0218625X21501225 // *Surface Review and Letters*. – 2021. – Vol. 28, Issue 12. – p. 2150122.

48. Cengiz, I. Post–buckling design analysis for stiffened helicopter fuselage aluminum panels / I. Cengiz, F. Elaldi // *Vertical Flight Society's 75th Annual Forum and Technology Display : Proceedings of the 75th Annual Forum and Technology Display, Philadelphia, 13–16 May 2019*. – Vertical Flight Society, 2019.

49. Farwaha, H. S. Microstructure and performance investigation of magnetic abrasive particles / H. S. Farwaha, D. Deepak, G. S. Brar – DOI 10.31838/jcr.07.19.34 // *Journal of Critical Reviews*. – 2020. – Vol. 7, Issue 19. – pp. 289–295.

50. Gao, Y. Modeling of material removal in magnetic abrasive finishing process with spherical magnetic abrasive powder / Y. Gao, Y. Zhao, G. Zhang, F. Yin, H. Yin – DOI 10.1016/j.ijmecsci.2020.105601 // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2020. – Vol. 177. – p. 105601.

51. Genna, S. Experimental investigation of industrial laser cutting: The effect of the material selection and the process parameters on the kerf quality / S. Genna, E. Menna, G. Rubino, V. Tagliaferri – DOI 10.3390/app10144956 // Applied Sciences (Switzerland). – 2020. – Vol. 10, Issue 14. – p. 4956.

52. Gorji, R. Micromachining the Inner Surface using Magnetic Abrasive Finishing Process in Magnetic Field of a Stator and Study on the Effects of Input Parameters on Roughness changes with doe Technique / R. Gorji, R. Abedinzadeh // International Journal of Modern Manufacturing Technologies. – 2019. – Vol. 11, No. 1. – pp. 49–54.

53. Jiao, A. Study on improving hole quality of 7075 aluminum alloy based on magnetic abrasive finishing / A. Jiao, G. Zhang, B. Liu, W. Liu – DOI 10.1177/1687814020932006 // Advances in Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 12, Issue 6.

54. Khattri, K. A Review on Parametric Analysis of Magnetic Abrasive Machining Process / K. Khattri, G. Choudhary, B. K. Bhuyan, A. Selokar – DOI 10.1088/1757-899X/330/1/012105 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 330, Issue 1. – p. 012105.

55. Kumari, C. A review on magnetically assisted abrasive finishing and their critical process parameters / C. Kumari, S. K. Chak – DOI 10.1051/mfreview/2018010 // Manufacturing Review. – 2018. – Issue 5. – p. 13.

56. Lee, P.-H. A magnetic abrasive finishing (MAF) platform utilizing horizontal transverse magnetic field magnetized by permanent magnets / P.-H. Lee, J.-Y. Chang – DOI 10.1007/s00542-020-05172-2 // Microsystem Technologies. – 2021. – Vol. 27, Issue 6. – pp. 2499–2506.

57. Liang, X. Research on Surface Roughness Prediction Method of Magnetic Abrasive Finishing Based on Evolutionary Neural Network / X. Liang, C. Yan, H. Bing, C. Hai-Dong, L. Wen-Hao – DOI 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.12.009 // Surface Technology. – 2021. – Vol. 50, Issue 12. – pp. 94–100, 118.

58. Majeed, M. Effect of magnetic abrasive finishing with steel balls on the surface improvement of Aluminium alloy / M. Majeed, S. Al-Zubaidi, A. H. Khadum –

DOI 10.19101/IJATEE.2021.874920 // International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration. – 2022. – Vol. 9, Issue 90. – pp. 676–686.

59. 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. 836 KEM. – pp. 71–77.

60. Maksarov, V. V. Influence of magnetic–abrasive processing on roughness of flat products made of ams grade aluminum alloy / V. V. Maksarov, A. I. Keksin, I. A. Filipenko – DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.836.71 // Tsvetnye Metally. – 2022. – № 7. – pp. 82–87.

61. 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.

62. 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.

63. Mital', G. (2019). Application of laser profilometry to evaluation of the surface of the workpiece machined by Abrasive Waterjet Technology / G. Mital', J. Dobránský, J. Ružbarský, Š. Olejárová – DOI 10.3390/app9102134 // Applied Sciences (Switzerland). – 2019. – Vol. 9, Issue 10. – p. 2134.

64. Nagdeve, L. Development of novel finishing tool into Magnetic Abrasive Finishing process of Aluminum 6061 / L. Nagdeve, K. Dhakar, H. Kumar – DOI 10.1080/10426914.2020.1767295 // Materials and Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 35, Issue 10. – pp. 1129–1134.

65. Nahy, A. M. Optimizing the micro–hardness of a surface by magnetic abrasive finishing / A. M. Nahy, A. H. Kadhum – DOI 10.1088/1757–899X/870/1/012018 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 870, Issue 1. – p. 012018

66. Ni, Y. Study on flaw depth statistics and corresponding fatigue life of helicopter aluminium alloy structure | 直升机铝合金结构冲击凹坑缺陷深度统计及对应的疲劳性能研究 / Y. Ni, C. Zhou, J. Yu, J. Zou – DOI 10.16579/j.issn.1001.9669.2020.04.029 // Jixie Qiangdu/Journal of Mechanical Strength. – 2020. – Vol. 42, Issue 4. – pp. 941–946.

67. Qian, C. A review on magnetic abrasive finishing / C. Qian, Z. Fan, Y. Tian [et al.] – DOI 10.1007/s00170-020-06363-x // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2021. – Vol. 112, Issues 3–4, pp. 619–634.

68. Rośkiewicz, M. (2021). Improvement of fatigue life of riveted joints in helicopter airframes / M. Rośkiewicz, J. Godzimirski, M. Jasztal, J. Gąsior – DOI 10.17531/EIN.2021.1.17 // Eksploatacja i Niezawodnosc. – 2021. – Vol. 23, Issue 1. – pp. 165–175.

69. Singh, R. K. Advances in Magnetic Abrasive Finishing for Futuristic Requirements – A Review / R. K. Singh, D. K. Singh, S. Gangwar – DOI 10.1016/j.matpr.2018.06.422 // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5, No. 9. – pp. 20455–20463.

70. Singh, P. Manufacturing and performance analysis of mechanically alloyed magnetic abrasives for magneto abrasive flow finishing / P. Singh, L. Singh, S. Singh – DOI 10.1016/j.jmapro.2019.12.033 // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 50. – pp. 161–169.

71. Struzikiewicz, G. Evaluation of surface roughness and defect formation after the machining of sintered aluminum alloy AlSi10Mg / G. Struzikiewicz, A. Sioma – DOI 10.3390/ma13071662 // Materials. – 2020. – Vol. 13, Issue 7. – p. 1662.

72. Vlasova, V. Using composite materials in aircraft / V. Vlasova – DOI 10.1063/1.5133186 // 43rd Academic Space Conference: Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Russian Scientists – Pioneers of Space Exploration "Korolev Academic Space Conference" : AIP Conference Proceedings, Moscow, 28 January 2019 – 1 February 2019. – American Institute of Physics Inc., 2019. – Vol. 2171. – p. 030020.

73. Wang, L. High-fidelity multidisciplinary sensitivity analysis and design optimization for rotorcraft applications / L. Wang, B. Diskin, R. T. Biedron, E. J. Nielsen, O. A. Bauchau – DOI 10.2514/1.J056587 // AIAA Journal. – 2019. – Vol. 57, Issue 8. – pp. 3117–3131.

74. Xie, H. Study on the magnetic abrasive finishing process using alternating magnetic field: investigation of mechanism and applied to aluminum alloy plate / H. Xie, Y. Zou, C. Dong, J. Wu – DOI 10.1007/s00170-018-03268-8 // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 102, Issue 5–8. – pp. 1509–1520.

75. Yamaguchi, H. Development of a new precision internal machining processing on alternating magnetic field / H. Yamaguchi, T. Shinmura, M. Takenada // Precision Engineering. – 2003. – Vol. 27, Issue 1. – pp. 51–58.

76. Zamani, P. On the influence of riveting process parameters on fatigue life of riveted lap joint / P. Zamani, K. Farhangdoost – DOI 10.22055/jacm.2019.28827.1507 // Journal of Applied and Computational Mechanics. – 2020. – Issue 2. – pp. 248–258.

77. Zelinko, A. Influence of process parameters and initial surface on magnetic abrasive finishing of flat surfaces on cnc machine tools / A. Zelinko, F. Welzel, D. Biermann, V. Maiboroda – DOI 10.3390/jmmp5040108 // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2021. – Vol. 5, Issue 4. – p. 108.

78. Zou, Y. Study on surface quality improvement of the plane magnetic abrasive finishing process / Y. Zou, H. Xie, Y. Zhang – DOI 10.1007/s00170-020-05759-z // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 109, Issue 7–8. – pp. 1825–1839.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2800274

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), Ефимова Мария Владимировна (RU), Синюков Михаил Сергеевич (RU)*

Заявка № 2023105979

Приоритет изобретения 15 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 19 июля 2023 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 15 марта 2043 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт о внедрении результатов диссертации



Акционерное общество
«Проектно-изыскательский и научно-исследовательский
институт воздушного транспорта «Ленаэропроект»
(АО «ПИиНИИ ВТ «Ленаэропроект»)



УТВЕРЖДАЮ

И.о. главного инженера института
(1-й Зам. Генерального директора)

Коньвалов А.Н. КОНОВАЛОВ

«26» ноября 2025 г.

АКТ (СПРАВКА)

о внедрении (использовании) результатов
кандидатской диссертации
Ефимовой Марии Владимировны
по научной специальности 2.5.6. Технология машиностроения

Комиссия в составе:

Председатель: Заместитель генерального директора по науке АО «ПИиНИИ ВТ «Ленаэропроект» Харьков Никита Сергеевич;

Члены комиссии:

1. Руководитель испытательного центра Ефименко Михаил Николаевич;
2. Ведущий инженер управления специальных разделов проектной документации Гарбузов Валерий Викторович.

составили настоящий акт (справку) о том, что результаты диссертации на тему «Технологическое обеспечение качества поверхности сопрягаемых изделий из алюминиевых сплавов для летательных аппаратов на основе магнитно-абразивной обработки», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.6. Технология машиностроения, могут быть использованы в деятельности Акционерного общества «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт воздушного транспорта «Ленаэропроект» в виде:

- применения в технологическом процессе способа магнитно-абразивной обработки поверхностей изделий летательных аппаратов;

- методики расчета варьируемых параметров магнитно-абразивной обработки, обеспечивающей формирование качества обработанных поверхностей из алюминиевых сплавов разработанным способом (Патент № 2800274 С1 РФ);
- рекомендаций по подготовке поверхностей неразъёмных соединений для повышения долговечности соединений летательных аппаратов.

Данный вид обработки позволяет повысить качество поверхностей в процессе их окончательной обработки и увеличить ресурс неразъёмных соединений, применяемых в процессе изготовления изделий летательных аппаратов. Результаты диссертационного исследования могут быть также использованы при проектировании сборных алюминиевых ВПП.

Использование указанных результатов позволяет:

- улучшить качество обрабатываемой поверхности за счет снижения шероховатости в 3-5 раз и упрочнения поверхностного слоя примерно на 15-20%;
- повысить производительность труда при использовании автоматизированной обработки поверхности;
- повысить ресурс неразъёмных соединений обеспечив прочностью, усталостную долговечность и безопасность конструкции.

Решение принято членами комиссии АО «ПИИНИИ ВТ «Ленаэропроект».

Председатель комиссии


Заместитель генерального
директора по науке
(должность)


(подпись)

/Харьков Н.С./
(Ф.И.О)


Члены комиссии:

Руководитель испытательного
центра
(должность)


(подпись)

/Ефименко М.Н./
(Ф.И.О)

Ведущий инженер управления
специальных разделов проектной
документации
(должность)


(подпись)

/Гарбузов В.В./
(Ф.И.О)