

*На правах рукописи*

**Минин Александр Олегович**



**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
КАЧЕСТВА РАСТАЧИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ  
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ  
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

*Специальность 2.5.6. Технология машиностроения*

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

Санкт-Петербург – 2025

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

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

*Максаров Вячеслав Викторович*

**Официальные оппоненты:**

*Бобровский Николай Михайлович*

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Гольятинский государственный университет», научно-исследовательская лаборатория «Промышленные технологии инженерии поверхности», главный научный сотрудник;

*Дмитриев Сергей Иванович*

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

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

Защита диссертации состоится **19 июня 2025 г. в 12:00** на заседании диссертационного совета ГУ.9 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а**.

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

Автореферат разослан 18 апреля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ЕФИМОВ  
Александр Евгеньевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** Благодаря отличительным технологическим и физико-химическим свойствам коррозионностойкие алюминиевые сплавы нашли свое применение во многих отраслях промышленности.

Такие сплавы обладают малым удельным весом и невысокой плотностью, низким электрическим сопротивлением, высокими пластичностью, теплопроводностью и коррозионной стойкостью. К тому же, алюминий, среди всех цветных металлов, имеет самую низкую стоимость.

Однако, изготовление изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов является сложной научно-технической задачей, что обусловлено образованием нароста на режущей части инструмента. В процессе обработки данных сплавов при сходе сливной стружки по передней поверхности возникают силы трения, замедляющие ее движение, что приводит к увеличению деформации в слоях металла, находящихся ближе к передней поверхности. С течением времени размер нароста увеличивается в результате наращивания новых слоев металла, изменяя при этом координаты вершины резца. Также при этом происходит формирование части нароста, нависающей над задней поверхностью резца, что приводит к изменению заднего угла и, как следствие, отклонению размеров получаемых отверстий и увеличению шероховатости обработанных поверхностей. В определенный момент эта часть нароста отделяется от основной массы металла и, попадая между задней поверхностью резца и обработанной поверхностью, вдавливается в уже обработанную поверхность, что приводит к увеличению шероховатости поверхности и образованию поверхности со следами надиров и вырывов.

Для обеспечения технологического качества поверхностей изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов возникает необходимость применения метода растачивания отверстий с использованием высокочастотного волнового воздействия. При финишной обработке изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов традиционный метод шлифования замещается чистовым

точением, что вызвано закупориванием поверхности шлифовального круга вследствие высокой пластичности обрабатываемого материала.

Компании не располагают передовыми технологиями, позволяющими гарантировать высокое качество обработки внутренних поверхностей. Достижение требуемого уровня качества изделий требует значительных усилий и времени, поскольку обеспечение качества внутренних поверхностей осуществляется преимущественно вручную или с использованием частично автоматизированных механических методов. Процедура шлифования внутренней поверхности до заданного значения шероховатости  $Ra \leq 1,6$  мкм выполняется несколькими специалистами — от оператора станка до сборщика, причем процесс обработки может длиться до двух часов.

В связи с вышесказанным, задача повышения показателей качества, снижения величины и периодичности наростообразования является весьма актуальной, а внедрение метода растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойкого алюминиевого сплава с применением высокочастотного волнового воздействия имеет важную практическую значимость.

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

Задачи увеличения эффективности механической обработки труднообрабатываемых материалов на металлорежущих станках рассматривались в работах Б.П. Бармина, Г.И. Грановского, И.Г. Жаркова, В.Н. Подураева, Б.Б. Чечулина, В.С. Кушнера, Ю.Г. Кабалдина, А.Д. Верещаки, Д.Ю. Дворецкого, К. Cheng, С. Brecher, J. Rech, Y. Kakino, E. Brinksmeier, X. Chen и других отечественных и зарубежных ученых.

Исследованию технологии высокочастотного воздействия в процессе обработки посвящены работы отечественных и зарубежных ученых: Ю.В. Холопова, А.Г. Палаева, В.А. Кулагина, А.Г. Григорьянца, В.И. Бабицкого, Y.C. Shin и других отечественных и зарубежных ученых.

Однако изучению формирования нароста при обработке изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов, способов снижения величины и периодичности наростообразования уделено недостаточно внимания.

При обработке коррозионностойких алюминиевых сплавов широкое применение нашли способы обеспечения качества поверхностей с применением высокочастотного волнового воздействия. Использование данных методов способно заменить процесс финишного шлифования и обеспечить технологическое качество поверхностей изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов.

Изучению влияния высокочастотного воздействия при обработке резанием на процесс наростообразования и вероятность наложения воздействий на автоколебания технологической системы не уделялось достаточного внимания.

В этой связи возникает потребность в проведении дополнительных теоретических и практических исследований, опирающихся на комплексный подход к обеспечению качественных и геометрических параметров изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов методом растачивания отверстий с применением высокочастотного волнового воздействия для исключения трудозатратного процесса шлифования внутренних поверхностей, что представляет собой значимую технологическую задачу, требующую разработки соответствующего решения.

**Объект исследования.** Процесс растачивания внутренних поверхностей изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов на основе высокочастотного волнового воздействия.

**Предмет исследования.** Шероховатость и микротвердость внутренних поверхностей изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов.

**Целью работы** является технологическое обеспечение качества и равномерного упрочнения поверхностного слоя растачиваемых отверстий в изделиях из коррозионностойкого алюминиевого сплава за счет применения высокочастотного волнового воздействия.

**Идея** заключается в технологическом обеспечении качества и равномерного упрочнения поверхностного слоя растачиваемых отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов при их обработке режущим инструментом, реализуется на основе

высокочастотного волнового воздействия в направлении, противоположном направлению сходящей стружки.

#### **Задачи исследования**

Для достижения цели исследования необходимо выполнить следующие задачи:

1. Провести комплексный анализ и обобщить теоретические и экспериментальные данные, приведенные в литературных источниках по технологическому обеспечению качества внутренних поверхностей изделий из коррозионностойкого алюминиевого сплава.

2. Разработать способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойкого алюминиевого сплава на основе высокочастотного волнового воздействия, включающий обоснование выбора схем обработки, рабочих движений и режимных параметров.

3. Экспериментально определить влияние технологических параметров растачивания на основе высокочастотного волнового воздействия на шероховатость и микротвердость поверхностей, величину и периодичность образования нароста.

4. Установить математические зависимости шероховатости и микротвердости обработанной внутренней поверхности от технологических параметров растачивания отверстий на основе высокочастотного волнового воздействия.

5. Разработать математическую модель технологической системы, учитывающую влияние технологических параметров растачивания на основе высокочастотного волнового воздействия на динамическую устойчивость системы.

6. Предложить практические рекомендации по выбору способа растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия и подбору значений технологических параметров, позволяющих обеспечить равномерную шероховатость и микротвердость поверхностей отверстий.

#### **Научная новизна работы:**

1. Установлены закономерности влияния величин частоты и направления воздействия, подачи резания и частоты вращения в процессе растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия на шероховатость и микротвердость обработанной внутренней поверхности из алюминиевого сплава марки АМц;

2. Разработана математическая модель технологической системы механической обработки, учитывающая применение высокочастотного волнового воздействия в направлении, противоположном сходу стружки, позволяющая оценить динамическую устойчивость системы при различных технологических параметрах и подтверждающая повышение динамической стабильности изготовления изделий из коррозионноустойчивых алюминиевых сплавов с заданными показателями шероховатости и микротвердости поверхности.

**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. Получены регрессионные математические зависимости и выявлены закономерности влияния технологических факторов (направление высокочастотного волнового воздействия, точка приложения, частота воздействия и конструкция волновода) высокочастотного волнового воздействия на шероховатость и микротвердость растачиваемых поверхностей, величину и периодичность образования нароста при растачивании отверстий в изделиях из коррозионноустойчивых алюминиевых сплавов.

2. Разработан способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионноустойчивого алюминиевого сплава (Патент на изобретение RU 2787289 C1), включающий высокочастотное волновое воздействие на зону резания.

3. Определены оптимальные режимные параметры растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия, позволяющие добиться улучшения шероховатости поверхности до значения  $Ra = 0,7 \dots 0,9$  мкм и сформировать микротвердость до значения  $H_v = 440$  МПа;

4. Результаты диссертационной работы внедрены в производственный процесс АО ВО «Электроаппарат» (акт внедрения от 18.12.2024).

**Методология и методы исследования.** Проведение исследований базировалось на современных положениях теории резания материалов, научных основах технологии машиностроения, статистических методах исследований и методиках математического моделирования. Экспериментальные исследования проведены на универсальном станке *JET GHB 1340A DRO*. При анализе результатов экспериментов применены статистические методы обработки данных, лабораторное оборудование: микроскоп инвертированный лабораторный *Leica DM ILM HC*, профилометр *Mitutoyo Surftest SJ-210*, виброметр *Pruftechnik Vib Xpert EX*, микротвердомер *ПМТ-3М*.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Разработанный и реализованный на практике способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойкого алюминиевого сплава АМц, включающий в себя схему обработки, сочетание рабочих движений и высокочастотное волновое воздействие в направлении, противоположном сходу стружки, позволяет обеспечить параметры шероховатости внутренних поверхностей в диапазоне  $Ra = 0,7 \dots 0,9$  мкм и равномерное упрочнение поверхностного слоя растачиваемых отверстий до значения  $H_v = 360 \dots 440$  МПа.

2. Использование установленных математических зависимостей между параметрами технологического процесса и высокочастотным волновым воздействием позволяет получить заданные параметры шероховатости поверхности и микротвердости при растачивании отверстий в изделиях из коррозионностойкого алюминиевого сплава АМц.

3. Математическая модель технологической системы механической обработки, учитывающая применение высокочастотного волнового воздействия в направлении, противоположном сходу стружки, позволяет оценить динамическую устойчивость системы при различных технологических параметрах и подтверждает повышение динамической стабильности изготовления изделий из коррозионностойкого алюминиевого сплава АМц с заданными параметрами шероховатости  $Ra = 0,7 \dots 0,9$  мкм.

**Степень достоверности результатов исследования** обеспечена необходимым объемом использованных методов математического

планирования эксперимента; проведением лабораторных экспериментов на установке для высокочастотного волнового воздействия, базируемой на универсальном станке *JET GHB 1340A DRO*; результатами промышленного опробования на производственном предприятии АО ВО «Электроаппарат», а также апробацией результатов исследований на всероссийских и международных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях:

Международный симпозиум, посвященный 110-летию В.Б. Алесковского и 115-летию Л.А. Сена «Нанозифика и наноматериалы» (г. Санкт-Петербург, 2022 г.); III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (г. Тула, 2022 г.); XIV Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием «Россия молодая» (г. Кемерово, 2023 г.); IV Всероссийская научно-техническая конференция «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (г. Тула, 2023 г.).

Методика растачивания отверстий в изделиях из коррозионно-стойкого алюминиевого сплава на основе высокочастотного волнового воздействия опробована в производственном процессе предприятия АО ВО «Электроаппарат».

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; проведении теоретических и экспериментальных исследований по выбору схемы обработки, сочетания рабочих движений, их значений, технологической среды; проведении экспериментальных исследований по определению влияния значений технологических факторов обработки на формирование шероховатости поверхности, величину и периодичность образования нароста на режущей части инструмента; проведении экспериментальных исследований влияния технологических и геометрических параметров режущего инструмента на обеспечение качества поверхностей изделий из коррозионно-стойких алюминиевых сплавов; проведении анализа

результатов экспериментальных исследований и подготовке рекомендаций по выбору режимных параметров обработки на основе высокочастотного волнового воздействия для последующего обеспечения технологического качества поверхностей изделий из коррозионностойкого алюминиевого сплава.

**Публикации.** Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на 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 на изобретение.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Содержит 133 страницы машинописного текста, 43 рисунка, 20 таблиц, список литературы из 106 наименований и 4 приложений на 14 страницах.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель, идея работы, научная ценность и задачи исследования.

**В первой главе** представлен аналитический обзор по вопросу изготовления и эксплуатации изделий из коррозионностойкого алюминиевого сплава, выявлены основные проблемы, возникающие при растачивании отверстий, а также рассмотрены современные методы обработки деталей из коррозионностойких сплавов с использованием высокочастотного воздействия.

На основе проведенного анализа обоснован выбор объекта и предмета исследования, сформирована цель и поставлены задачи.

**Во второй главе** представлены теоретические и экспериментальные исследования по разработке способа растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов, обеспечивающего снижение величины и периодичности наростообразования.

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

**В третьей главе** на основании разработанного технологического способа растачивания отверстий в изделиях из коррозионно-стойких алюминиевых сплавов проведено исследование влияния технологических параметров воздействия на шероховатость и микротвердость методом РЦКП. Получены регрессионные математические зависимости.

**В четвертой главе** описаны экспериментальные исследования растачивания отверстий в изделиях из коррозионно-стойкого алюминиевого сплава с применением высокочастотного волнового воздействия в рамках определения динамической устойчивости технологической системы. Исследования проводились на алюминиевом сплаве АМц.

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

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Разработанный и реализованный на практике способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионно-стойкого алюминиевого сплава АМц, включающий в себя схему обработки, сочетание рабочих движений и высокочастотное волновое воздействие в направлении, противоположном сходу стружки, позволяет обеспечить параметры шероховатости внутренних поверхностей в диапазоне  $Ra = 0,7...0,9$  мкм и равномерное упрочнение поверхностного слоя растачиваемых отверстий до значения  $H_v = 360...440$  МПа.**

В результате теоретических и экспериментальных исследований технологического обеспечения качества расточных поверхностей изделий из коррозионно-стойких алюминиевых сплавов разработан способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионно-стойкого алюминиевого сплава, который заключался в обработке внутренних поверхностей изделия с применением высокочастотного волнового воздействия в направлении, противоположном направлению схода стружки.

На основании исследований было выявлено, что установка магнитострикционного преобразователя на расточной оправке в направлении, противоположном направлению схода стружки (рисунок 1), и обеспечение жесткого контакта с режущим инструментом позволяют производить равномерное растачивание отверстий с применением высокочастотного волнового воздействия.

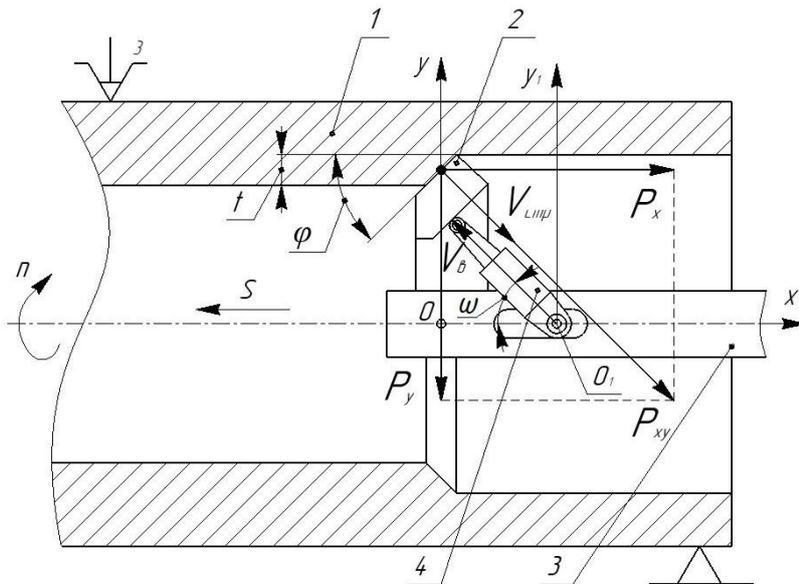


Рисунок 1 – Схема растачивания отверстий с применением высокочастотного волнового воздействия, где: 1 – заготовка; 2 – резец; 3 – расточная оправка; 4 – устройство высокочастотного воздействия, в состав которого входят: магнестрикционный преобразователь, концентратор высокочастотного воздействия и излучатель высокочастотного воздействия;  $S$  – подача резания, мм/об;  $t$  – глубина резания, мм;  $n$  – направление вращения заготовки;  $\omega$  – угол воздействия, °;  $V_{смп}$  – вектор направления схода стружки;  $V_в$  – вектор направления высокочастотного волнового воздействия;  $P_{xy}$  – равнодействующая сила резания, Н

Разработанный способ реализован на установке для выполнения высокочастотного волнового воздействия на базе универсального токарно-винторезного станка *JET GHB 1340A DRO* (рисунок 2).

В результате применения предложенного способа были получены образцы заготовок, позволяющие оценить количество дефектов на обработанной поверхности (рисунок 3).

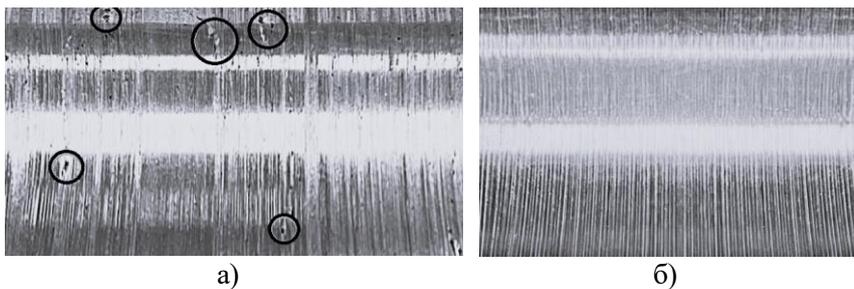


Рисунок 3 – Образцы поверхностей: а) обработка традиционным способом; б) растачивание на основе высокочастотного волнового воздействия

Так, при обработке традиционным способом на обработанной поверхности наблюдается большое количество вырывов, надиров и частиц нароста, закрепившихся на поверхности. При растачивании с применением высокочастотного волнового воздействия дефектов на обработанной поверхности не наблюдается.

Анализ стружки, полученной в процессе обработки (рисунок 4), также показал, что при растачивании традиционным способом наблюдается большое количество частиц нароста, закрепившихся на стружке с большой периодичностью, а при растачивании с применением высокочастотного волнового воздействия стружка имеет однородную форму без частиц наростообразования.

В результате применения разработанного способа растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов шероховатость поверхности уменьшилась практически в 3,5 раза в сравнении с шероховатостью поверхности после растачивания традиционным способом (рисунок 5).

Следует также отметить, что высокочастотное волновое воздействие за счет создания дополнительных колебаний в зоне резания позволяет снизить величину и периодичность наростообразования, что обеспечивает заданное качество обработанной поверхности.

Предложенный способ позволяет обеспечить параметры шероховатости внутренних поверхностей в диапазоне  $Ra = 0,7 \dots 0,9$  мкм и произвести равномерную бездефектную обработку по всей поверхности.

**2. Использование установленных математических зависимостей между параметрами технологического процесса и высокочастотным волновым воздействием позволяет получить заданные параметры шероховатости поверхности и микротвердости при растачивании отверстий в изделиях из коррозионностойкого алюминиевого сплава АМц.**

На основании разработанного технологического способа растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов проводились экспериментальные исследования по влиянию варьируемых параметров на формирование качественных характеристик инструмента: микротвердости  $H_v$  и шероховатости резьбовых поверхностей  $Ra$ .

В ходе исследования установлено, что применение разработанной схемы высокочастотного волнового воздействия позволяет обеспечить шероховатость рабочих поверхностей  $Ra = 0,726$  мкм, микротвердость до  $H_v = 440$  МПа.

На основании полиномиальных функций (рисунок б), а также статического анализа результатов экспериментов установлено, что на шероховатость расточных поверхностей изделий из коррозионностойкого алюминиевого сплава наибольшее влияние оказывают угол  $\omega$  и частота высокочастотного воздействия обработки  $f$ , затем частота вращения заготовки  $n$  и величина продольной подачи  $S$ ; на микротвердость наибольшее влияние оказывают частота высокочастотного воздействия обработки и величина продольной подачи, затем частота вращения заготовки и угол воздействия.

По результатам проведенных экспериментальных исследований выполнена статистическая обработка полученных данных, которая позволила получить регрессионные математические зависимости, учитывающие варьируемые технологические параметры высокочастотного волнового воздействия и позволяющие получить значения шероховатости и микротвердости при растачивании отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов:

1. Шероховатость рабочих поверхностей  $Ra$ , мкм (1):

$$Ra = 0,003fS - 112 \cdot 10^{-5}f^2 + 3,3 \cdot 10^{-6}fn + 67 \cdot 10^{-6}\omega^2 + 6,715S + 0,03306f - 0,00691\omega + 0,52325 \quad (1)$$

2. Микротвердость  $H_v$  (2):

$$H_v = 21097,500S^2 + 0,479nS + 11,230\omega S + 0,297f^2 + 7,1n^2 \cdot 10^{-5} - 3585,71S - 12,181f - 0,192n + 727,627 \quad (2)$$

Таким образом, полученные результаты являются основой для растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов с применением метода высокочастотного волнового воздействия.

**3. Математическая модель технологической системы механической обработки, учитывающая применение высокочастотного волнового воздействия в направлении, противоположном сходу стружки, позволяет оценить динамическую устойчивость системы при различных технологических параметрах и подтверждает повышение динамической стабильности изготовления изделий из коррозионностойкого алюминиевого сплава АМц с заданными параметрами шероховатости  $Ra = 0,7...0,9$  мкм.**

В ходе исследования были представлены этапы разработки математической модели. На основании решенных задач и проведенной аппроксимации разработана эквивалентная математическая модель. Полученная модель позволяет описать поведение двухконтурной модели.

Снижение амплитуды автоколебаний процесса в эквивалентной математической модели осуществляется через применение высокочастотного волнового воздействия в процесс растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойкого алюминиевого сплава с помощью варьирования параметров обработки.

В процессе исследований, направленных на определение устойчивости технологической системы (рисунок 7), была получена диаграмма области устойчивости при растачивании отверстий в изделиях из алюминиевого сплава марки АМц в границах параметров скорости резания  $V$  и ширины срезаемого слоя  $b_{рез}$ .

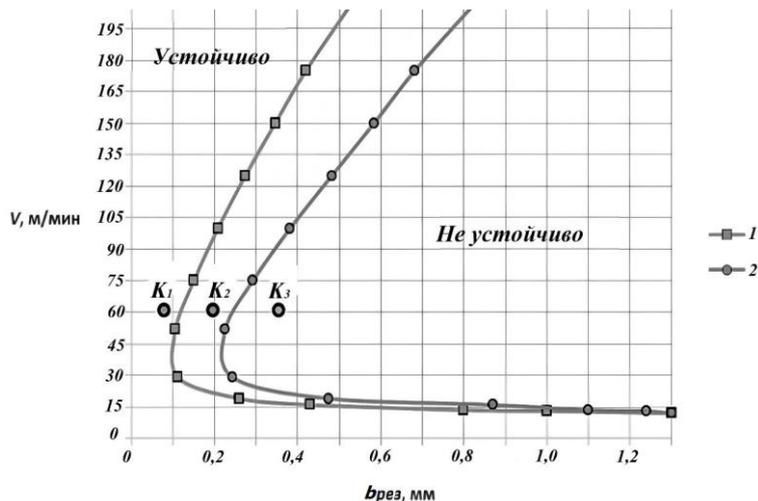


Рисунок 7 - Граница области устойчивости при растачивании поверхностей изделия из алюминиевого сплава АМц, где: 1 – традиционное растачивание, 2 – изготовление с применением высокочастотного волнового воздействия

Диаграмма содержит кривые распределения граничных условий, отражающие области устойчивости системы при традиционной токарной обработке и токарной обработке изделий из алюминиевого сплава марки АМц с применением высокочастотного волнового воздействия.

Как видно, правая граница является отражением области параметров обработки, при которых система является нестабильной. Отсюда можно сделать вывод, что обработка за пределами данной области приводит к ухудшению качественных и точностных показателей обработанной поверхности детали, что является следствием возникающих вибраций.

Наряду с этим режимные параметры обработки левой границы представляют процесс как стабильный. Режимные параметры резания в точках  $K_1$  и  $K_2$ , где:  $K_1$  – произвольная точка, принятая для традиционного процесса точения;  $K_2$  – точка для процесса растачивания отверстий с применением высокочастотного волнового воздействия, - обеспечивают абсолютную устойчивость системы. Тогда как в точке

$K_3$ , расположенной за границей устойчивости, система идентифицируется как динамически не устойчивая.

Исходя из вышесказанного, в точке  $K_1$  определен стабильный процесс обработки. При растачивании с применением высокочастотного воздействия в направлении, противоположном направлению схода стружки, в точке  $K_2$  отмечается снижение амплитуды колебательного процесса по сравнению с обработкой в точке  $K_3$ , находящейся в поле за границей устойчивости.

Ряд проведенных экспериментальных и теоретических исследований по влиянию высокочастотного волнового воздействия на динамическую устойчивость динамической системы доказал, что растачивание данным способом позволяет изменить условия виброактивности процесса и вводит систему в устойчивое состояние.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. На основании проведенного анализа установлено, что работоспособность элегазового трансформатора из коррозионностойких алюминиевых сплавов в агрессивных условиях и возможность их преждевременного разрушения существенно зависят от качества поверхностей внутренних отверстий, повышение которого можно достигнуть посредством растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия.

2. Разработан способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов (Патент на изобретение RU 2787289 C1), на основе высокочастотного волнового воздействия, выполняемого в направлении, противоположном направлению сходящей стружки, при котором в результате обработки происходит снижение величины и периодичности наростообразования и, как результат, улучшение шероховатости поверхностей.

3. Экспериментально определены диапазоны варьируемых технологических параметров обработки в пределах значений: диапазон частоты высокочастотного воздействия  $f = 10 - 30$  кГц, угла воздействия  $\omega = 0 - 60^\circ$ , подачи инструмента в соответствии с режимами работы токарного станка *JET GHB 1340A DRO*,  $S = 0,04 - 0,12$  мм/об,

а также частоты вращения заготовки  $n = 300 - 2000 \text{ мин}^{-1}$ ; и закономерности их влияния на шероховатость и микротвердость обработанной поверхности.

4. Получены математические зависимости шероховатости  $Ra$  и микротвердости  $H_v$  обработанной внутренней поверхности от комбинации технологических параметров растачивания отверстий с применением высокочастотного волнового воздействия, позволяющие оценить эффективность используемых режимов обработки.

5. Предложена и обоснована математическая модель технологической системы механической обработки с применением высокочастотного волнового воздействия, учитывающая особенности подсистемы «инструмент-заготовка» и подтверждающая существенное изменение динамической устойчивости технологической системы и граничных условий перехода к автоколебательному процессу.

6. Разработаны практические рекомендации применения способа растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов с диапазонами технологических параметров  $f$  от 15 и выше 25 кГц;  $\omega = 30-45^\circ$ ;  $n = 750-1250 \text{ мин}^{-1}$ ;  $S = 0,04-0,08 \text{ мм/об}$ .

7. Результаты проведенных исследований прошли промышленную апробацию на производственном предприятии АО ВО «Электроаппарат», что подтвердило возможность получения заданных значений шероховатости в результате растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия, не прибегая к финишной шлифовальной операции.

8. Перспективы дальнейшего развития исследований в области технологического обеспечения качества расточных поверхностей изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов на основе высокочастотного волнового воздействия заключаются в исследовании методов моделирования процесса обработки с учетом физических характеристик колебаний, предварительного моделирования процесса для подбора технологических параметров, конструктивных особенностей, а также в разработке универсальных способов и устройств для обработки поверхностей различных конфигураций.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Максаров, В.В. Применение ультразвуковых колебаний при механической обработке труднообрабатываемых материалов / В.В. Максаров, **А.О. Минин**, И.А. Бригаднов // Металлообработка. – 2021. – № 3 (123). – С. 13-21. – DOI: 10.25960/мо.2021.3.13. – EDN PYYWQD.

2. Минин, А.О. Влияние направления ультразвуковых колебаний на процесс токарной обработки / **А.О. Минин**, В.Е. Трушников, П.И. Романов // Металлообработка. – 2022. – № 2 (128). – С. 16-22. – DOI: 10.25960/мо.2022.2.16. – EDN YUWQXM.

3. Максаров, В.В. Влияние высокочастотного волнового воздействия в системе инструментального оснащения на качество обработки коррозионностойких алюминиевых сплавов / В.В. Максаров, **А.О. Минин**, П.И. Романов, И.П. Никифоров // Металлообработка. – 2022. – № 5-6 (131-132). – С. 32-40. – DOI: 10.25960/мо.2022.5-6.32. – EDN VMKSHT.

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

4. Максаров, В.В. Технологическое обеспечение качества расточных поверхностей изделий из алюминиевого сплава АМц на основе высокочастотного волнового воздействия / В.В. Максаров, **А.О. Минин**, В.П. Захарова // Цветные металлы. – 2023. – № 4. – С. 90-95. – DOI: 10.17580/tsm.2023.04.12. – EDN KFBYBM.

5. Максаров, В.В. Применение высокочастотного волнового воздействия для технологического обеспечения качества расточных поверхностей изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов / В.В. Максаров, **А.О. Минин**, Д.В. Васильков // Цветные металлы. – 2025. – № 1. – С. 76-83. - DOI: 10.17580/tsm.2025.01.11

*Публикации в прочих изданиях:*

6. Минин, А.О. Обработка отверстий в изделиях из алюминиевого сплава марки АМЦ на основе высокочастотного волнового воздействия / **А.О. Минин**, И.А. Филипенко // Нанозифика и наноматериалы: Сборник научных трудов Международного симпозиума, посвященного 110-летию В.Б. Алесковского и 115-летию Л.А. Сена,

Санкт-Петербург, 23–24 ноября 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. – С. 166-170. – EDN COSEKP

7. **Минин, А.О.** Ультразвуковые колебания, как способ повышения качества изделий из труднообрабатываемых материалов // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении: III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, Тула, 06–08 апреля 2022 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2022. – С. 128-130. – EDN REJLUY.

8. **Минин, А.О.** Повышение качества внутренних поверхностей изделий из алюминиевого сплава АМЦ на основе высокочастотного волнового воздействия // Россия молодая: Сборник материалов XIV Всероссийской, научно-практической конференции молодых ученых с международным участием, Кемерово, 18–21 апреля 2023 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 42308.1-42308.5. – EDN ULEMZC.

9. **Минин, А.О.** Технологическое обеспечение качества расточных поверхностей изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении: IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник трудов конференции, Тула, 18–20 апреля 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. – С. 135-137. – EDN WUGBQD.

*Патенты:*

10. Патент 2787289 Российская Федерация, МПК В23В 1/00 (2022.08), В23Р 23/04 (2022.08), В23В 25/00 (2022.08), В23Р 25/00 (2022.08). Способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов: Заявка № 2022115926: заявл. 14.06.2022: опубл. 09.01.2023 / Максаров В.В., Ефимов А.Е., **Минин А.О.**; заявитель СПГУ. - 12 с.: ил.

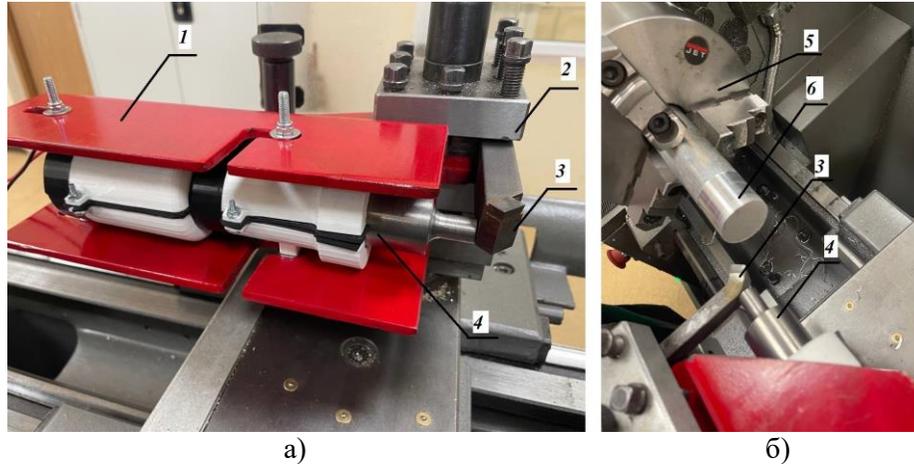


Рисунок 2 – Экспериментальная установка на базе станка *JET GHB 1340A DRO*: а) 1 – приспособление для закрепления магнитострикционного преобразователя с возможностью регулировки угла закрепления; 2 – резцедержатель; 3 – резец; 4 – магнитострикционного преобразователя; б) 5 – трехкулачковый патрон; 6 – заготовка

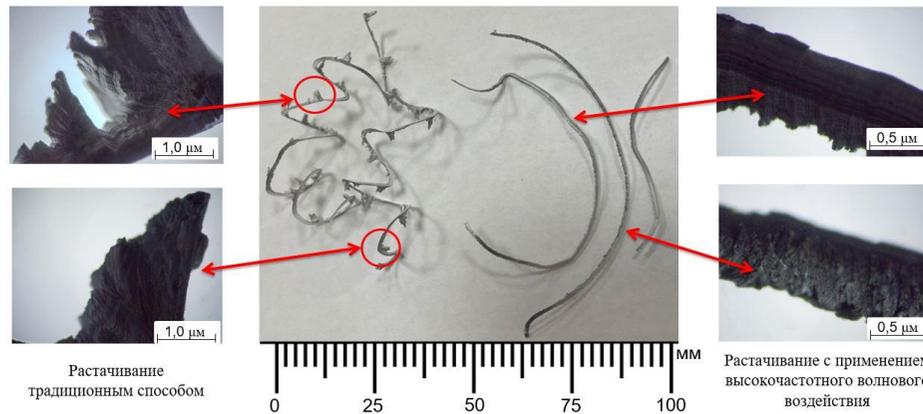
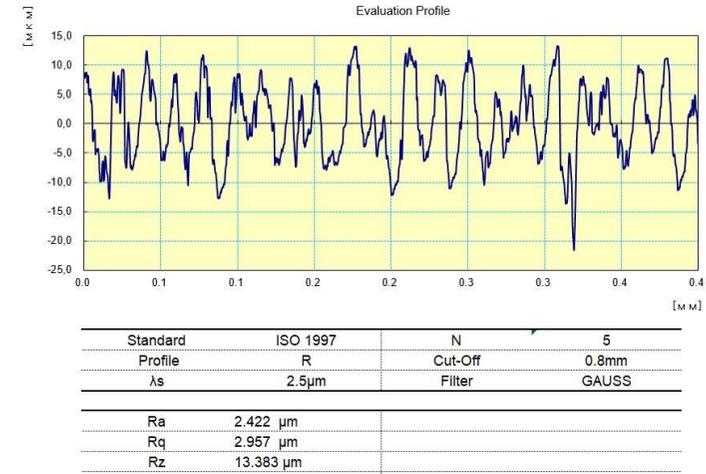
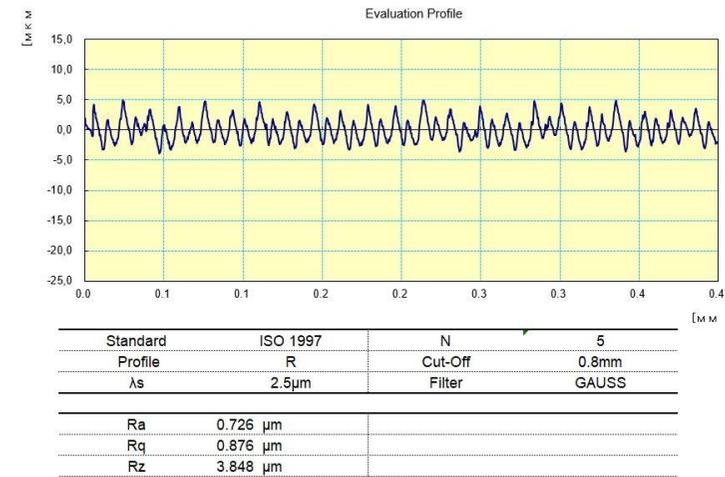


Рисунок 4 – Образцы стружки, полученные в результате традиционного растачивания и растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия

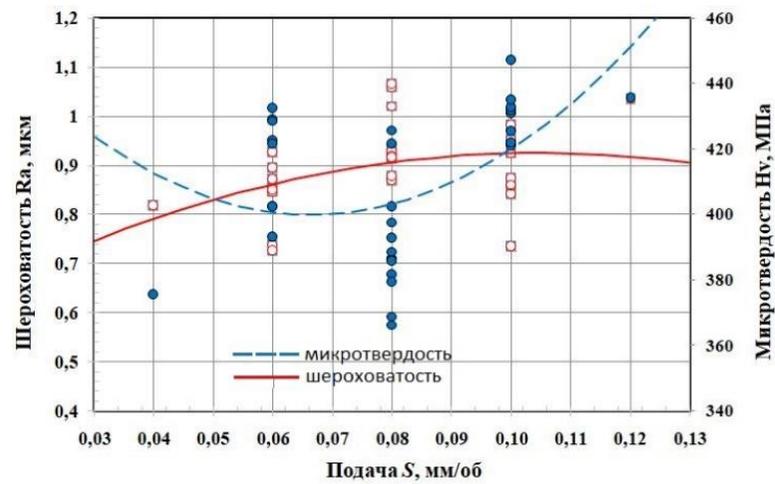


а)

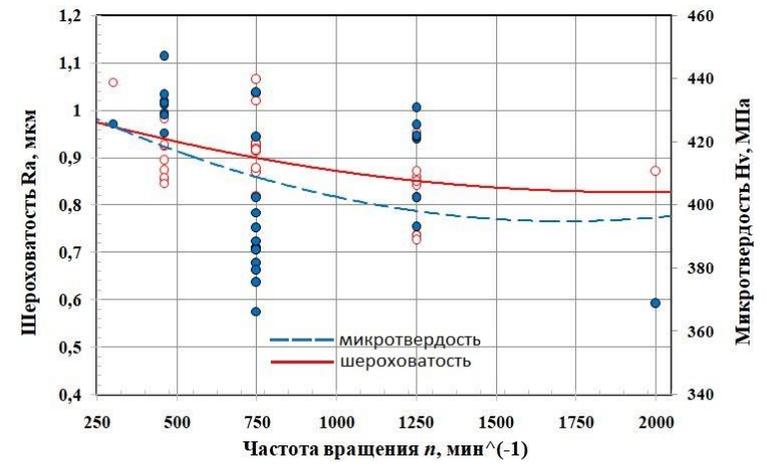


б)

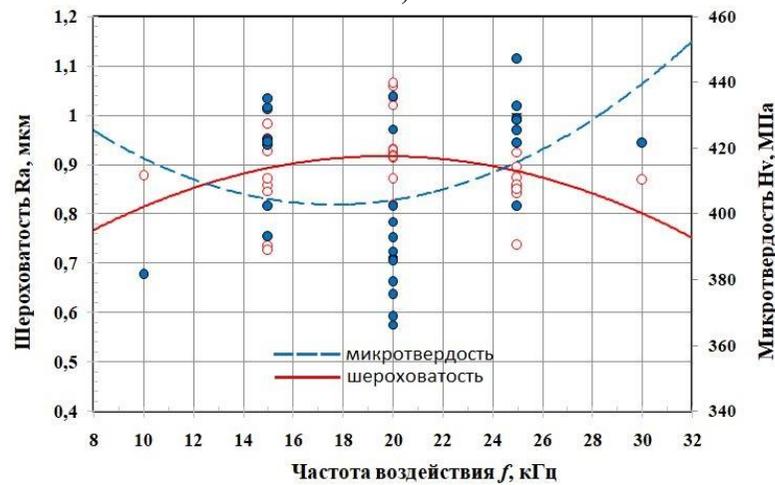
Рисунок 5 – Результаты предварительного эксперимента: а) профилограмма поверхности, полученной в результате традиционного растачивания; б) профилограмма поверхности в результате растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия



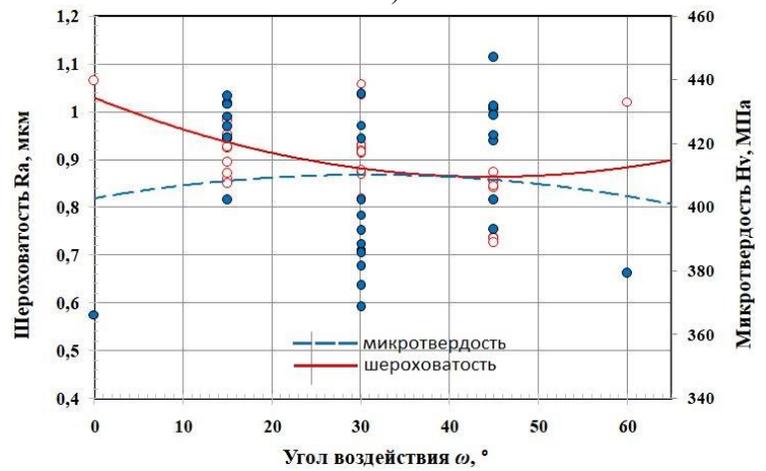
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6 – Графическая зависимость влияния технологических факторов растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия на шероховатость и микротвердость