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

На правах рукописи

Минин Александр Олегович

A

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

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 – 2025

оглавление

ВВЕДЕНИЕ
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И
ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО
СПЛАВА МАРКИ АМЦ 14
1.1 Особенности эксплуатации и изготовления изделий энергетического
комплекса 14
1.2 Особенности лезвийной обработки алюминиевых сплавов
1.3 Анализ методов обеспечения качества изделий из алюминиевых
сплавов
1.4 Выводы по Главе 1 27
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА РАСТАЧИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В
ИЗДЕЛИЯХ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО АЛЮМИНИЕВОГО
СПЛАВА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ВОЛНОВОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ
2.1 Анализ и обобщение существующих теоретических и экспериментальных
исследований 32
2.2 Способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойкого
алюминиевого сплава на основе высокочастотного волнового воздействия. 38
2.2.1 Способ растачивания отверстий с применением высокочастотного
волнового воздействия 39
2.2.2 Установка для реализации способа
2.3 Определение технологических параметров 43
2.3.1 Обоснование выбора направления и точки приложения
высокочастотного волнового воздействия 44
2.3.2 Обоснование выбора геометрических параметров режущего инструмента
2.3.3 Обоснование выбора сочетания рабочих движений 50
2.3.4 Определение диапазонов величин технологических параметров 52
2.4 Выводы по Главе 2

ГЛАВА З ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРО	B
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ Н	A
ШЕРОХОВАТОСТЬ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ПРИ РАСТАЧИВАНИ	И
ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ	56
3.1 Методика проведения экспериментальных исследований	56
3.2 Планирование эксперимента и разработка математических моделей	50
3.3 Влияние технологических параметров на шероховатость	54
3.4 Влияние технологических параметров на микротвердость	70
3.5 Визуальная оценка состояния внутренних поверхностей	77
3.6 Выводы по Главе 3	79
ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ВОЛНОВОГ	0
воздействия на процесс динамической устойчивост	И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВ	A
РАСТАЧИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ	31
4.1 Разработка математической модели эквивалентной технологическо	ой
системы растачиваемых поверхностей	32
4.2 Составление уравнений динамики эквивалентной технологическо	ой
системы механической обработки деталей типа «тел вращения» с учето	M
процесса стружкообразования) 0
4.3 Моделирование динамических характеристик технологической системы	И
шероховатости растачиваемых поверхностей изделий) 5
4.4 Исследования влияния параметров высокочастотного волновон	Г0
воздействия на процесс динамической устойчивости растачиваемы	IX
поверхностей изделий	98
4.5 Совершенствование технологического процесса обработки растачиваемь	IX
поверхностей корпуса элегазового трансформатора 10)1
4.6 Практические рекомендации по растачиванию отверстий в изделиях	ИЗ
коррозионностойкого алюминиевого сплава марки АМц с применение	M
высокочастотного волнового воздействия 10)2
4.7 Выводы по Главе 4 10)3

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	107
ПРИЛОЖЕНИЕ А Планирование экспериментального исс	следования и
его результаты	
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Технические характеристики станка, при	боров 122
ПРИЛОЖЕНИЕ В Патент на способ растачивания отверсти	й в изделиях
из коррозионностойких алюминиевых сплавов	
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт о промышленном внедрении	результатов
диссертации	

введение

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 отверстий использованием метода растачивания с высокочастотного волнового воздействия. При финишной обработке изделий коррозионностойких традиционный алюминиевых сплавов ИЗ 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

эффективности обработки Задачи увеличения механической труднообрабатываемых материалов на металлорежущих станках рассматривались в работах Б.П. Бармина, Г.И. Грановского, И.Г. Жаркова, Б.Б. Чечулина, В.С. Кушнера, Ю.Г. B.H. Подураева, Кабалдина, А.Д. Верещаки, Д.Ю. Дворецкого, К. Cheng, C. 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, Ү.С. 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 способы обеспечения применение нашли 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:

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 коррозионностойких алюминиевых сплавов с заданными показателями шероховатости и микротвердости поверхности.

научной Содержание диссертации соответствует паспорту 2.5.6. специальности Технология машиностроения 4 ПО пункту «Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска» и пункту 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 факторов влияния технологических (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 коррозионностойких алюминиевых сплавов.

2. Разработан способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойкого 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...0, 9 мкм и сформировать микротведость до значения $H_{\nu} = 440$ МПа;

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

Методология и методы исследования.

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

Положения, выносимые на защиту:

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...0,9 мкм и равномерное упрочнение поверхностного слоя растачиваемых отверстий до значения $H_{\nu} = 360...440$ 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 динамическую устойчивость оценить 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.

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 «Нанофизика 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 коррозионностойкого 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 поверхностей изделий ИЗ коррозионностойких качества 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 (пункты списка литературы № 39, 40, 41, 44, 48, 49, 50, 51, 82), в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени

кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение (Приложение В).

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.

Благодарности. Автор выражает благодарность декану механикомашиностроительного факультета Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, доктору технических наук, профессору Максарову Вячеславу Викторовичу за наставничество и помощь, оказанную при работе над диссертацией, а также коллективу кафедры машиностроения.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МАРКИ АМЦ

1.1 Особенности эксплуатации и изготовления изделий энергетического комплекса

В настоящее время одними из основных направлений развития экономики страны является разработка внедрение инноваций, И решений, наращивание производственных мощностей, отечественных машиностроения, развитие сельского хозяйства. химической промышленности и металлургии.

Основным показателем стабильного экономического роста государства служит равномерное и согласованное развитие всех участников хозяйственной деятельности [23]. В современных условиях, когда мировые экономические процессы подвержены постоянным изменениям, особую значимость приобретает способность каждой компании адаптироваться к новым вызовам и возможностям. За последние годы стало очевидно, что на промышленную деятельность значительное влияние оказывают внешние факторы, такие как изменения в международной торговле, колебания валютных курсов, санкции и другие макроэкономические события. Эти факторы могут существенно повлиять на стабильность работы предприятий и их конкурентоспособность [82].

Ключевые направления экономического роста городов Российской Федерации подчеркивают важность создания и развития промышленных комплексов. В условиях современной экономики, когда глобальная конкуренция усиливается, а требования к качеству продукции и услуг становятся все выше, промышленный сектор играет ключевую роль в обеспечении устойчивого роста и процветания регионов. Создание новых производственных мощностей, модернизация существующих предприятий и внедрение передовых технологий способствуют расширению промышленного производства [23]. Это, в свою очередь, ведет к повышению конкурентоспособности как отдельных товаров и услуг, так и всей экономической системы страны.

Расширение промышленного производства позволяет предприятиям увеличивать объемы выпуска продукции, улучшать ее качество и снижать себестоимость. Это российские более делает товары услуги И привлекательными для потребителей как внутри страны, так И на международных рынках [39, 40].

Кроме того, развитие промышленности способствует укреплению экономического потенциала государства. Промышленные комплексы обеспечивают стабильную налоговую базу, увеличивают экспортный потенциал и стимулируют инновации. Все это положительно сказывается на общем уровне благосостояния общества и укрепляет позиции России на мировой арене.

Машиностроительная промышленность, являясь одной из самых трудоемких отраслей, лучше других подходит для размещения предприятий непосредственно в пределах городских территорий. Такое расположение обусловлено рядом важных факторов. Во-первых, городские районы предоставляют удобный доступ к рынкам сбыта готовой продукции, что сокращает затраты на логистику и ускоряет процесс доставки товаров потребителям. традиционно обладают Во-вторых, города развитой инфраструктурой и высокой концентрацией квалифицированных трудовых ресурсов, что особенно важно для машиностроительных производств, требующих высококвалифицированного персонала. Кроме того, современные машиностроительные предприятия зачастую проектируются таким образом, чтобы минимизировать воздействие на окружающую среду, что делает их размещение в городах безопасным для экологии и здоровья горожан. Наконец, наличие хорошо развитых транспортных узлов, включая автомобильные магистрали и железнодорожные пути, облегчает доставку сырья И комплектующих, а также отправку готовой продукции, что является

критически важным аспектом для эффективной работы машиностроительного комплекса [40].

Увеличение числа предприятий, расположенных в границах крупных городов, приводит к росту потребления энергии, особенно электрической. За последние годы потребление электроэнергии в России увеличилось более чем на 40 %, достигнув к 2024 году уровня в 1350 млрд кВт·ч [3, 5, 38]. Около 60 % этого объёма приходится на промышленный сектор. Такой рост связан с рядом факторов, подчёркивающих необходимость обновления энергетической инфраструктуры.

Во-первых, расширение городского промышленного сектора требует большего объема энергоресурсов для поддержания работы оборудования, освещения и кондиционирования помещений. Современные производственные мощности требуют всё больше электричества для автоматизации процессов и внедрения инновационных технологий.

Во-вторых, увеличение численности населения в городах в результате появления новых рабочих мест также влияет на общий уровень энергопотребления. Рост урбанизации сопровождается увеличением спроса на бытовую технику, освещение жилых зданий и транспортные средства, работающие от электросети.

стремительное развитие цифровых Кроме того, технологий И ІТ-инфраструктуры, которая активно используется как в бизнесе, так и в способствует увеличению повседневной жизни, также нагрузки на энергетические сети. Центры обработки данных, серверные фермы и датаобъемов требуют значительных электроэнергии центры для своей бесперебойной работы.

Особое значение приобретает создание современных трансформаторных подстанций низкого и среднего напряжений, обеспечивающих передачу энергии в низковольтные сети для конечных потребителей. Размещение подобных объектов в условиях плотной городской застройки осложняется наличием множества коммуникаций и близко расположенных строений.

Решением становится внедрение трансформаторных подстанций нового типа, ключевым компонентом которых выступает элегазовый трансформатор (ЭТ) (рисунок 1.1). ЭТ (трансформаторы с использованием гексафторида серы, SF₆) находят применение благодаря ряду преимуществ по сравнению с традиционными масляными трансформаторами. Элегаз обладает высокой электрической прочностью, что позволяет использовать его в качестве изолятора даже при высоких напряжениях. Это свойство делает данные трансформаторы особенно подходящими для применения в высоковольтных сетях [24, 35].



Рисунок 1.1 – Стандартное представление элегазового трансформатора [24]

Благодаря высокой диэлектрической прочности ЭТ могут быть значительно компактнее традиционных масляных аналогов. Это особенно важно в условиях ограниченного пространства, например, в городских районах или на промышленных объектах.

В отличие от масла, которое является горючим веществом, элегаз не воспламеняется и не поддерживает горение. Это снижает риск пожаров и взрывов, что делает данные трансформаторы безопаснее в эксплуатации.

Элегаз практически не подвержен старению и деградации, что обеспечивает длительный срок службы трансформаторов. Кроме того, он не требует частой замены или обслуживания, что уменьшает эксплуатационные расходы. Хотя газ этого типа считается мощным парниковым газом, современные технологии позволяют минимизировать утечки газа и обеспечить его безопасное использование. При правильной эксплуатации и обслуживании ЭТ воздействие на окружающую среду минимально.

Элегаз хорошо проводит тепло, что способствует эффективному охлаждению трансформатора. Это помогает поддерживать оптимальную температуру работы оборудования и продлевает его срок службы [35, 37].

ЭТ менее подвержены воздействию влаги, пыли и других факторов окружающей среды, чем традиционные масляные трансформаторы. Это делает их более надежными в сложных климатических условиях.

Таким образом, ЭТ являются эффективным решением для высоковольтных сетей, где требуется высокая надежность, безопасность и долговечность оборудования.

Использование элегаза (SF₆) как изолятора обусловлено его выдающимися диэлектрическими свойствами: при атмосферном давлении и расстоянии между электродами в 1 см его электрическая прочность достигает 89 кВ/см, что значительно превосходит характеристики трансформаторного масла [33]. Кроме того, SF₆ обладает высокой теплоотдачей и эффективно гасит электрическую дугу, обеспечивая быстрое восстановление напряжения после прерывания токов короткого замыкания [46]. Такие соединения, как SO_2F_2 , SF_4 , SOF_2 , HF и SO_2 , появляющиеся в результате разложения элегаза под действием разрядом, образования фторидов серы и свободного фтора, вступающих в реакцию с водой и кислородом, способны постепенно разрушать изоляцию и элементы конструкции оборудования [46]. Таким образом, несмотря на высокую эффективность использования элегаза в электротехнических устройствах, необходимо учитывать потенциальные риски, связанные с его эксплуатацией, и принимать соответствующие меры предосторожности для минимизации возможных негативных последствий [24, 33].

Корпус ЭТ выполняет несколько функций. Во-первых, он обеспечивает защиту внутренних компонентов трансформатора от внешних воздействий, таких как механические повреждения и неблагоприятные погодные условия. Во-вторых, корпус создает герметичное пространство, которое заполняется элегазом (SF₆). Дефекты внутренней поверхности корпуса (рисунок 1.2): вырывы, надиры или налипающие частицы металла могут вызвать коронный разряд в газе, что нередко становится причиной отказа трансформатора.



Рисунок 1.2 – Внешний вид корпуса элегазового трансформатора: а) корпус элегазового трансформатора; б) эскиз корпуса элегазового трансформатора (составлено автором)

Высокая коррозионная стойкость, электропроводность и малая теплопроводность являются причиной выбора алюминиевого сплава АМц (таблица 1.1) в качестве материала для изготовления корпусов и цилиндров элегазового трансформатора (рисунок 1.3).

Таблица 1.1 – Процентный состав алюминиевого сплава АМц, согласно ГОСТ 4784-97

Al, %	Mn, %	Fe, %	Si, %	Cu, %	Mg, %	Zn, %	Ti, %
(алюминий)	(марганец)	(железо)	(кремний)	(медь)	(магний)	(цинк)	(титан)
96,35-97,5	1,0-1,5	0,7	0,6	0,05-0,2	0,2	0,1	0,1



Рисунок 1.3 – Цилиндры элегазового трансформатора [46]

Поверхности этих элементов должны иметь шероховатость в пределах Ra = 0,8-1,6 мкм, что определяется особенностями работы ЭТ. Достижение такого качества — сложный процесс, требующий значительных усилий и ручной доводки.

Недостаточная шероховатость поверхности может вызвать электрические пробои, повреждение рабочей зоны детали прожигом, аварию и, как следствие, поломку элегазового трансформатора [50].

1.2 Особенности лезвийной обработки алюминиевых сплавов

По информации ассоциации «Объединение производителей, поставщиков и потребителей алюминия», с 2016 года потребление

алюминиевых продуктов в России увеличилось на 60 % и составляет 1,15 млн тонн в год [39].

Доля отечественной алюминиевой промышленности в ВВП составляет 1,5 %, при этом Россия занимает второе место по объёмам производства первичного алюминия после Китая. С 2016 года по 2023 год внутреннее потребление алюминия в России увеличилось с 3,5 до 10 кг на душу населения. Именно по данному показателю принято судить об уровне развития промышленности в стране. Между тем российский рынок алюминиевой продукции имеет потенциал роста не менее чем до 2 млн тонн — за счёт увеличения потребления во всех потребляющих отраслях, среди которых выделяют авиастроение, энергетическое и химическое машиностроение.

Алюминий и его сплавы получили широкое распространение благодаря их физико-механическим свойствам. Детали, изготавливаемые из данных сплавов, обладают относительно небольшим весом, что делает их идеальными для использования в авиации, автомобилестроении и других отраслях, где важна экономия веса. Несмотря на лёгкость, к важным свойствам относится и высокая прочность сплавов, что позволяет использовать их в строительстве и машиностроении. Алюминий обладает естественной устойчивостью к коррозии благодаря образованию оксидной плёнки на поверхности, что позволяет использовать их в агрессивных средах, например, в морской среде, а также в условиях повышенной влажности. Данные сплавы имеют хорошую теплопроводность и электропроводность, что делает их рентабельными в электротехнике, теплообменниках и радиаторах охлаждения [39, 46, 52].

Легирование алюминия элементами вроде магния, марганца, меди или кремния влияет на его обрабатываемость [4, 9, 17]. Высокая вязкость сплавов приводит к образованию нароста на инструменте, наклепу на поверхности, перегреву, заклиниванию и износу режущих кромок, что усложняет получение требуемого качества [36, 93, 105].

Всё это подчёркивает важность преодоления технологических барьеров для обеспечения качества поверхностей и микротвёрдости. Растущие

требования к машиностроительной продукции и модернизация технологий диктуют необходимость разработки новых подходов, инструментов и оборудования [58, 89, 106].

Образование нароста является негативным фактором при необходимости обеспечения высоких показателей качества при обработке внутренних поверхностей изделий из алюминиевого сплава АМц. В этом случае при сходе стружки по передней поверхности инструмента возникают силы трения, которые замедляют её движение. Под влиянием этих сил возрастает деформация в слоях металла, расположенных близко к передней поверхности. В результате происходит отделение слоев металла от верхней части сходящей стружки, которые затем привариваются к передней поверхности, формируя нарост (рисунок 1.4) [66, 101].



Рисунок 1.4 – Микрофотография наростообразования в зоне резания, где: 1 – заготовка; 2 – стружка; 3 – наростообразование; 4 – режущий инструмент [31]

Образование нароста значительно сказывается на износе режущего инструмента, процессе механической обработки и качестве обработанной поверхности. Как известно, в случае образования нароста изменяется геометрия режущей части резца (рисунок 1.5, е) в результате увеличения угла γ до фактического значения угла $\gamma_{\rm H}$, образуемого наростом. В соответствие с

этим происходит и уменьшение угла резания δ до величины $\delta_{\rm H}$, что облегчает сход стружки.



Рисунок 1.5 - Модель процесса образования нароста и его срыва: а) наращивания новых слоев металла; б) формирование части нароста, свешивающей над задней поверхностью резца; в) формирование части нароста между задней поверхностью резца и обработанной поверхностью; г) закрепление части нароста на обработанной поверхности; д) вывод части части нароста со сходящей стружкой стружкой; е) изменение геометрических параметров режущей части; *n* – направление вращения заготовки; *V_{cmp}* – направление схода стружки; γ – передний уго*л;* α – задний угол (составлено автором)

Изменение углов режущей части резца в результате образования нароста в процессе растачивания отверстий приводит к изменению формы получаемых отверстий, ухудшению шероховатости обработанных поверхностей и возникновению вибраций, способных вызвать автоколебания системы [58, 72].

С течением времени нарост имеет свойство увеличиваться в размерах в результате наращивания новых слоев металла (рисунок 1.5, а), изменяя при этом координаты вершины резца, также при этом происходит формирование части нароста, свешивающей над задней поверхностью резца (рисунок 1.5, б), данный эффект приводит к изменению заднего угла, в результате вызывая отклонение размеров получаемых отверстий и увеличение шероховатости данных поверхностей. В определенный момент эта часть нароста отделяется от основной массы металла и, попадая между задней поверхностью резца и обработанной поверхностью (рисунок 1.5, в), вдавливается в уже обработанную поверхность (рисунок 1.5, г), что приводит к увеличению шероховатости поверхности и образованию поверхности со следами надиров и вырывов [36, 52].

Частицы нароста, оставшиеся на передней поверхности резца, также срываются и удаляются со стружкой (рисунок 1.5, д). Во время обработки происходит около 70-80 срывов в секунду, что объясняется, вибрациями, возникающими в процессе резания при наростообразовании [36, 100]. В процессе формирования налипания по обработанной поверхности заготовки и образования нароста происходит изменение толщины срезаемого слоя, что приводит к отклонению размеров обработанной поверхности на величину *h* (рисунок 1.5, е). Если в координате режущей кромки инструмента установленные геометрические параметры переднего угла γ_1 и заднего угла α_1 являются постоянными, то меняющаяся координата вершины в процессе обработки из-за увеличения нароста и его срыва приводит к непостоянному значению геометрических параметров переднего угла γ_2 и заднего угла α_2 [36, 52].

Изменения геометрических параметров режущего инструмента проявляются в следующем виде: величина переднего угла варьируется в диапазоне значений $\gamma 2\pm\delta$, тогда как задний угол подвержен колебаниям в пределах $\alpha 2\pm\Delta$. Эти параметры, характеризующие конфигурацию режущей кромки, не остаются постоянными в процессе обработки, что вызывает отклонения формы режущей части. Такая неустойчивость приводит к изменчивости силы резания, дестабилизируя процесс обработки и ухудшая качество поверхности заготовки.

Важно отметить, что нестабильные режимы резания могут вызывать вибрации в системе «инструмент-заготовка», что дополнительно усугубляет проблему. Вибрации способствуют образованию неровностей и дефектов на обработанной поверхности, делая её непригодной для дальнейшего использования в точных изделиях. Кроме того, нестабильное резание может ускорить износ инструмента, приводя к необходимости частой замены или заточки, что увеличивает расходы на производство.

Исследования, проведенные в работах [36, 72, 99], позволили установить, что при обработке алюминиевых сплавов изменение режимов резания может привести к уменьшению частоты образования нароста. Действительно, снижение подачи *S* до 0,1–0,2 мм/об, обработка со скоростью резания *V* менее 10 м/мин или свыше 60 м/мин может сократить процент и частоту появления нароста. Однако в случае с алюминиевым сплавом АМц такой подход неэффективен из-за высокой пластичности материала [52, 103].

Изменение геометрических характеристик инструмента также наростообразовании при изготовлении сказываются на изделий ИЗ алюминиевых сплавов. При растачивании коррозионностойких алюминиевых сплавов задний угол оказывает слабое влияние на силовые параметры, тогда как с увеличением переднего угла снижаются силы резания, что, как следствие, способствует снижению амплитуды колебаний, возникающих в ходе обработки [46]. Эта неоднородность амплитуд формирует периодические изменения шероховатости [80, 96, 104]. Угол λ определяет направление отвода стружки: при чистовой токарной обработке положительное значение λ может отрицательно повлиять на состояние обработанной зоны [36].

1.3 Анализ методов обеспечения качества изделий из алюминиевых сплавов

Труднообрабатываемые материалы, такие как алюминий, титан, нержавеющая сталь, жаропрочные сплавы и композиты, представляют собой сложные задачи для традиционных методов обработки. Для достижения высокого качества готовой продукции используется широкий набор технологий и подходов, каждый из которых обладает своими отличительными чертами и достоинствами.

К технологическим мероприятиям обеспечения качества изделий из труднообрабатываемых материалов относят следующие методы:

- 1. Выбор режимов механической обработки.
- Выбор геометрических параметров и материала режущего инструмента.
- 3. Выбор смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ).
- 4. Обеспечение достаточной жесткости технологической системы.
- 5. Применение финишной обработки.
- 6. Применение комбинированных способов изготовления изделий.

Высокоскоростная токарная обработка (*High-Speed Turning, HST*) — это метод обработки материалов, при котором используются высокие скорости вращения шпинделя станка и увеличенные значения подачи инструмента. Этот метод получил широкое распространение в производстве благодаря своим преимуществам, таким как высокая производительность, эффективность при обработке материалов с низкой теплопроводностью, таких как титан и никелевые сплавы, минимальный износ инструмента [91-93].

Наряду с этим к недостаткам данного метода можно отнести высокий риск возникновения вибраций, что может привести к ухудшению качества обработки и повреждению инструмента, а также ограниченность применения данного метода, так как такая обработка изделий из материалов с высокой пластичностью, таких как коррозионностойкие алюминиевые сплавы, является малоэффективной.

Существует также ряд методов финишной обработки, направленных на обеспечение требуемых физико-механических характеристик, уровня шероховатости и твердости поверхности изделий. Среди них особое место занимает шлифование, как наиболее распространенный и экономически выгодный метод финишной обработки [9, 46].

Шлифование алюминиевых сплавов представляет собой сложный и ресурсоемкий процесс, сопровождаемый множеством потенциальных проблем, которые необходимо учитывать для достижения качественного

результата. Одной из основных трудностей является быстрое засаливание абразивного инструмента, что приводит к снижению эффективности обработки, падению производительности и ухудшению качества поверхности. В процессе шлифования возникают микроразрушения, надиры, вырывы и другие дефекты, что негативно сказывается на итоговом качестве изделия. Кроме того, в обработанную поверхность внедряются частицы абразива (инородные объекты), что снижает надежность и долговечность материала. Температура свыше 300°C в зоне шлифования вызывает изменения в структуре поверхности, что еще больше усложняет достижение однородности и стабильности обработанного слоя. В результате на обработанной поверхности формируются зоны с различными физико-механическими свойствами, что делает ее неподходящей для дальнейшей эксплуатации [52, 94].

Трудоемкость и высокая чувствительность традиционных методов обеспечения качества к технологическим параметрам становятся ключевыми факторами, стимулирующими развитие новых и прогрессивных подходов. Помимо этого, в случае изменения требований к конструкции предварительно необходимо проводить корректировку технологических параметров в соответствие с конкретными характеристиками. В этой связи особенно перспективными оказываются комбинированные методы обработки, такие как растачивание с использованием высокочастотного волнового воздействия [32, 44, 47]. Такой метод позволяет изменять профиль поверхности детали благодаря снижению интенсивности и частоты образования нароста на инструменте, динамическую устойчивость при ЭТОМ повышая технологической системы.

1.4 Выводы по Главе 1

В результате проведенного анализа были сделаны следующие выводы:

1. Технологические требования, предъявляемые к промышленной продукции, подчеркивают важность исследований, направленных на

разработку и внедрение новых способов обработки материалов, способных удовлетворять этим требованиям. Эксплуатация ответственных изделий в условиях воздействия газовых и гидравлических потоков, повышенных температур и агрессивных химических сред приводит к их преждевременному разрушению.

2. В настоящее время предприятия, занимающиеся производством высоковольтного оборудования, сталкиваются с трудностями в достижении необходимой шероховатости растачиваемых поверхностей, поскольку передовые технологии ещё не получили широкого распространения на предприятиях.

3. Достижение заданного качества продукции представляет собой сложный и длительный процесс, при этом алюминий и сплавы на его основе продолжают быть одними из самых востребованных лёгких металлов.

4. Формирование нароста на передней поверхности режущего инструмента, образование вырывов и надиров, а также ухудшение качества обработанной поверхности остаются ключевыми проблемами при обработке алюминия.

5. Недостаточное внимание уделяется процессу растачивания внутренних поверхностей с применением высокочастотного волнового воздействия, не выявлены зависимости шероховатости и микротвердости внутренних поверхностей от технологических параметров высокочастотного воздействия; недостаточно изучено влияние высокочастотного волнового воздействия на колебания технологической системы, отсутствуют методики расчета и назначения технологических параметров процесса, технологическое оснащение для проведения растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия на станках.

На основании представленных выводов, поставлена цель и определены задачи исследования.

Цель работы. Технологическое обеспечение качества и равномерного упрочнения поверхностного слоя растачиваемых отверстий в изделиях из

коррозионностойкого алюминиевого сплава за счет применения высокочастотного волнового воздействия.

Идея исследования. Технологическое обеспечение 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.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА РАСТАЧИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Задачи повышения производительности изготовления изделий из труднообрабатываемых материалов металлорежущих станках на рассматривались в работах Г.И. Грановского, И.Г. Жаркова, Б.П. Бармина, B.H. Чечулина, B.C. Кушнера, Ю.Г. Подураева, Б.Б. 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.

Исследования направлены на определение способов, позволяющих обеспечить заданные показатели качества и точности обрабатываемых поверхностей изделий из труднообрабатываемых материалов и увеличить эффективность механической обработки.

В настоящее время традиционные способы изготовления изделий из алюминиевых сплавов причисляют к недостаточно производительным и экономически неэффективным. По этой причине новые методы обработки, заключающиеся в изменении характера воздействия на зону резания на основе химического, электрического или термического воздействия, получили широкое распространение на предприятиях. Комбинированные технологии производства, основанные на сочетании механического и физического воздействия, также являются одними из наиболее эффективных методов обеспечения качества.

Одно из основных направлений новых методов обработки связано со снижением величины и частоты наростообразования, что способствует повышению качественных характеристик обрабатываемой поверхности, а также увеличению микротвердости поверхности [46].

2.1 Анализ и обобщение существующих теоретических и экспериментальных исследований

В настоящее время широкое применение находят методы комбинированной токарной обработки с применением высокочастотного (ультразвукового) воздействия, позволяющие значительно улучшить качество обрабатываемых поверхностей, снизить износ инструмента и повысить производительность процесса. Основные методы включают использование высокочастотные колебаний, наложенных на традиционный процесс резания. Высокочастотная вибрация способствует снижению сил резания, улучшению качества поверхности и уменьшению образования нароста [18-20].

К основным методам комбинированной токарной обработки с высокочастотным воздействием относят:

1. Воздействие на режущий инструмент. В этом методе колебательная система крепится непосредственно к инструменту. Колебания передаются через инструмент в зону резания, что снижает трение между инструментом и заготовкой, уменьшает образование нароста на инструменте и улучшает шероховатость обработанной поверхности.

2. Воздействие на заготовку. В этом методе непосредственное воздействие осуществляется на обрабатываемое изделие, которое обеспечивает вибрационное движение заготовки относительно инструмента. Данный процесс позволяет уменьшить силы резания и улучшить качество обработки.

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.

Эти авторы внесли значительный вклад в развитие комбинированных методик токарной обработки с использованием ультразвука, исследуя теоретические аспекты, разрабатывая новые технологии и проводя эксперименты для оптимизации производственных процессов.

Количество методов ультразвукового воздействия достаточно велико, поскольку каждый из них обладает отличительной технологической методикой выполнения.

К наиболее эффективным методам высокочастотного воздействия относят воздействие на заготовку и на режущий инструмент.

В работах Холопова Ю.В. [61-63] рассматривается влияние ультразвукового воздействия на заготовку в радиальном направлении. В этом случае устройство подводится к заготовке и выступает в роли выглаживающего элемента (индентора) с шариком или роликом на конце. В результате применения такого способа происходит традиционная токарная обработка с параллельно происходящим ультразвуковым выглаживанием, что приводит к уменьшению шероховатости вследствие сглаживания неровностей. Но выбранное направление высокочастотного воздействия причиной приложения может послужить повышенного износа узлов технологической системы за счет снижения динамической устойчивости системы [64, 65].

Известно устройство для чистового точения и финишной обработки поверхностей деталей ультразвуком [64]. Для подавления нежелательных колебаний, возникающих при обработке деталей, и укрепления их поверхностей за счет насыщения высокодисперсными материалами используется токарный резец, размещенный перед ультразвуковым излучателем в направлении их движения вдоль обрабатываемой поверхности. Применение данного устройства расширяет технологические возможности, улучшает качество обработанных поверхностей и уменьшает время, необходимое для их обработки [64].

Недостатком устройства (рисунок 2.1) и способа обработки является приложение ультразвуковых колебаний в радиальном направлении. В результате воздействия на заготовку в радиальном направлении происходит наложение ультразвуковых колебаний на колебания технологической системы, что приводит к появлению резонанса и, как результат, снижению качества получаемых поверхностей. Также в результате ультразвукового воздействия в радиальном направлении происходит повышение износа узлов станка.



Рисунок 2.1 – Схема устройства для чистового точения и финишной обработки поверхностей деталей ультразвуком, где: 1 – заготовка; 2 – упорный стержень; 3 – излучатель ультразвука; 4 – резец; *S* – подача резания;

n – направление вращения заготовки; *А* – амплитуда колебаний [64]

Известна система для ультразвуковой обработки поверхностей деталей [65], где для использования продольных колебаний каретка излучателя ультразвука поворачивается таким образом, чтобы ультразвуковое воздействие было направлено преимущественно нормально относительно обрабатываемой поверхности детали. Использование данной системы обеспечивает не только рост производительности и улучшение качества поверхностей, но и сокращение времени технологического процесса.

Недостатком системы ультразвуковой обработки деталей (рисунок 2.2) является ориентация колебаний перпендикулярно к обрабатываемой поверхности. При выполнении ультразвукового воздействия на заготовку по нормали возможно наложение ультразвуковых колебаний на колебания системы, что приводит к появлению резонанса и, как следствие, возбуждению значительных вибраций, что негативно сказывается на работе оборудования и качестве обрабатываемых деталей. Также повышается нагрузка на резец в результате приложения ультразвуковых колебаний в противоположном направлении, что приводит к увеличению износа.



Рисунок 2.2 – Схема системы для ультразвуковой обработки поверхностей деталей, где: 1 – заготовка; 2 – излучатель ультразвука; 3 – резец; *S* – подача резания; *n* – направление вращения заготовки; *A* – амплитуда колебаний [65]

В работах Палаева А.Г. [59, 68, 69] рассматривается ультразвуковое воздействия в поверхностном слое заготовки (рисунок 2.3). В результате такого способа воздействия, сочетание знакопеременных нагрузок со статической нагрузкой и локальное поглощение ультразвуковой энергии способствуют упрощению пластического деформирования, что обеспечивает получение низкой шероховатости поверхности, упрочнённого слоя и сжимающих остаточных напряжений. Недостатком применяемого метода является ультразвуковое воздействие в радиальном направлении, что приводит к повышению биения заготовки, тем самым увеличивается нагрузка на подшипники, шестерни и другие подвижные элементы станка, что ускоряет их износ и снижает срок службы технологической системы. Также биение приводит к появлению волнистостей, неравномерной шероховатости поверхности и несоответствию заданным размерам.



Рисунок 2.3 - Схема ультразвукового воздействия в поверхностном слое заготовки, где: 1 – генератор ультразвука; 2 – токарно-винторезный станок; 3 – 3-х кулачковый патрон; 4 – заготовка; 5 – ультразвуковая колебательная

система в технологическом устройстве; 6 – резцедержатель [59]

Известно устройство для растачивания отверстий В изделиях ИЗ сплавов коррозионностойких алюминиевых (рисунок 2.4). Отличительной особенностью данного устройства является выбор направления ультразвукового воздействия таким образом, чтобы при закреплении магнитострикционного устройства на расточной оправке, направление воздействия совпадало с направлением подачи резания [45, 60]. Результатом такой обработки является то, что энергия бегущих волн по стержню державки не позволяет образовывать нарост при сходе стружки по передней поверхности инструмента и, соответственно, налипание слоев нароста на обрабатываемую поверхность заготовки, что оказывает положительное влияние на качество обработки и обеспечивает улучшение шероховатости поверхности детали. Недостатком данного устройства является направление приложения ультразвуковых колебаний, так как повышается износ режущего инструмента в результате увеличения пройденного им пути. При разработке данного устройства не учтена вероятность наложения ультразвуковых колебаний на автоколебания системы, что может привести к возникновению резонанса.


Рисунок 2.4 - Устройство для растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов, где: 1 – заготовка; 2 – расточной резец; 3 – магнитострикционный преобразователь; 4 – ультразвуковой генератор;

5 – резцедержатель; 6 – борштанга; 7 – концентратор ультразвука; *n* – направление вращения заготовки; *A* – амплитуда колебаний; *S* – направление подачи [60]

Теоретический анализ процесса высокочастотного воздействия позволил выявить ключевые элементы оптимальной схемы обработки растачиваемых поверхностей и конструкции установки для реализации этого метода.

Прежде всего, необходимо обеспечить плотный контакт высокочастотного преобразователя с поверхностью режущего инструмента. Это позволит обеспечить равномерное воздействие, исключить появление биений в процессе обработки, а также обеспечить динамическую устойчивость технологической системы и тем самым получить равномерное качество обработанной поверхности за счет постоянства технологических параметров [41, 46, 80].

Кроме того, следует определить направление высокочастотного волнового воздействия с целью исключения наложения колебаний на путь инструмента, а также исключить влияние колебаний на узлы технологической системы.

2.2 Способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойкого алюминиевого сплава на основе высокочастотного волнового воздействия

На основании анализа приведенных выше существующих способов высокочастотного воздействия в процессе токарной обработки разработан способ, при котором растачивание внутренних поверхностей с применением высокочастотного волнового воздействия предлагается проводить таким способом, который обеспечит снижение величины и периодичности наростообразования, вследствие чего позволит обеспечить заданное качество и равномерное упрочнения поверхностного слоя отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов [48, 49, 51].

Для осуществления способа предлагается применять магнитострикционный преобразователь, который необходимо сосредоточить относительно направления схода стружки так, чтобы высокочастотное волновое воздействие выполнялось в противоположном направлении (рисунок 2.5, б), что позволит исключить наложение колебаний на путь резца (рисунок 2.5, а). Применение такой схемы растачивания является возможным за счет применения специального приспособления с возможностью изменения угла и направления воздействия. Таким образом, будет обеспечена наибольшая эффективность применения высокочастотного волнового воздействия в процессе растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойкого алюминиевого сплава [41, 49, 67]. Способ состоящей предлагается осуществлять при помощи установки, ИЗ магнитострикционного преобразователя, генератора сигналов, лабораторного блока питания, а также специального приспособления для ориентации магнитострикционного преобразователя.



Рисунок 2.5 – Модель растачивания отверстий в изделиях из алюминиевого сплава на основе высокочастотного волнового воздействия: а) в направлении подачи резания; б) в направлении противоположном направлению сходящей стружки; где: 1 – заготовка; 2 – излучатель высокочастотного воздействия; 3 –резец; 4 – высокочастотное волновое воздействие; V_{cmp} – вектор направления схода стружки; V_s – вектор направления высокочастотного волнового воздействия; *S* – подача резания; *A* – амплитуда колебаний [41]

2.2.1 Способ растачивания отверстий с применением высокочастотного воздействия

Схема растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия представлена на рисунке 2.6 где:

1 – заготовка;

2-резец;

3 – расточная оправка;

 4 – магнитострикционный преобразователь с концентратором высокочастотного воздействия;

S – подача резания, мм/об;

t – глубина резания, мм;

n – направление вращения заготовки, мин⁻¹;

 ω – угол воздействия, °;

V_{стр} – вектор направления схода стружки;

 V_{e} – вектор направления высокочастотного волнового воздействия; P_{xy} – равнодействующая сила резания, Н [65].



Рисунок 2.6 – Способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов с применением высокочастотного волнового воздействия [67]

Способ осуществляется следующим образом. Заготовка 1 устанавливается в 3-х кулачковый патрон, в резцедержатель устанавливается стержень расточной оправки 3, на котором закрепляется расточной резец 2 и магнитострикционный преобразователь 4. При закреплении угол наклона магнитострикционного преобразователя определяется относительно направления вектора схода стружки так, чтобы направление высокочастотного волнового воздействия в процессе работы было противоположно заданному направлению. Также при установке необходимо обеспечить плотный контакт волновода, который закреплен на преобразователе, в точке контакта с расточным резцом [39, 67]. Далее с помощью магнитострикционного преобразователя 4 осуществляется генерация высокочастотных колебаний, с дальнейшей передачей воздействия. На этапе обработки заготовки 1 высокочастотный преобразователь 4, поджатый к поверхности расточного резца 2, выполняющего движение в направлении подачи резания *S*, формирует энергию бегущих волн от точки контакта с передней поверхностью расточного резца до зоны резания в направлении V_{e} , противоположном направлению схода стружки V_{cmp} [39, 67].

Изменение направления высокочастотного волнового воздействия относительно направления схода стружки выполняется с помощью фиксирующего приспособления (рисунок 2.7). Исходя из этого, обеспечивается изменение положения преобразователя относительно оси фиксирующего устройства на 180 градусов, а также дает возможность регулировать вылет преобразователя за счет специальной формы отверстий [39, 67].



Рисунок 2.7 – Экспериментальная установка на базе станка *JET GHB 1340A DRO*: a) 1 – приспособление для закрепления магнитострикционного преобразователя с возможностью регулировки угла закрепления;

2 – резцедержатель; 3 – резец; 4 – магнитострикционного преобразователь;

б) 5 – трехкулачковый патрон; 6 – заготовка (фото автора)

Процесс растачивания отверстий с применением высокочастотного воздействия по предлагаемому способу начинается с придания

вращения заготовке и подвода расточного резца, закрепленного на расточной оправке с сориентированным магнитострикционным преобразователем [39, 67].

2.2.2 Установка для реализации способа

Растачивание внутренних поверхностей втулок выполняли в соответствии с представленным способом с использованием подготовленной установки высокочастотного воздействия (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Установка для реализации способа растачивания отверстий на основе высокочастотного волнового воздействия; 1 - лабораторный блок питания *Longwei LW–K3010D*; 2 – лабораторный генератор сигналов *JUNCE JDS6600 60M*; 3 – высокочастотное устройство (фото автора)

Для возбуждения колебаний в магнитострикционном преобразователе необходимо выполнить следующие действия: 1 – последовательно соединить блок питания с генератором сигналов и приставкой для подмагничивания вибратора электрическим током, к которым подключается магнитострикционный преобразователь; 2 – на лабораторном блоке питания выбрать необходимые силу тока и напряжение, а на генераторе сигналов необходимые форму волн, напряжение и частоту колебаний (Приложение Б). После чего необходимо открыть канал генератора, к которому подключен преобразователь.

На ранних этапах экспериментальных исследований в качестве излучателя магнитострикционного материала применялся ферритовый стержень диаметром d = 8 мм и длиной l = 10 мм, вокруг которого на корпус в два слоя наматывалась медная проволока диаметром d = 0.8 мм. В результате выполнения растачивания возбуждении колебаний магнитострикционном преобразователе при В происходило разрушение ферритового стрежня, так как на определенных частотах возникали резонансные эффекты, приводящие к значительным колебаниям магнитной проницаемости и других параметров. В ходе исследований ферритовый стержень был заменен стержнем из пермендюра, что позволило обеспечить высокую магнитную проницаемость и выполнять растачивание на более высоких частотах.

Применяемая конструкция крепления преобразователя позволяет оснащать станки без применения специального инструмента, используя лишь приспособления для закрепления различных типов. При необходимости регулирования частоты воздействия f для обработки поверхностей нужные значения задаются путём настройки генератора сигналов, а направление воздействия регулируются при помощи креплений на приспособлении.

Сменные концентраторы расширяют возможности преобразователя, так как возможно использовать волноводы другой конструкции и размеров в зависимости от применяемой частоты и типа поверхности контакта.

2.3 Определение технологических параметров

Осуществление способа растачивания отверстий с применением высокочастотного волнового воздействия и подготовленной установки позволяет обеспечить качество растачиваемых поверхностей при заданных технологических параметрах высокочастотного волнового воздействия.

Главной задачей исследований выступает определение закономерностей влияния таких факторов, как частота воздействия f, скорость вращения заготовки n, величина подачи резания S и угол воздействия ω на параметры шероховатости и микротвердости обработанной поверхности.

2.3.1 Обоснование выбора направления и точки приложения высокочастотного волнового воздействия

Одной из основных характеристик протекания высокочастотного волнового воздействия является затухание механических колебаний. Оно представляет собой явление снижения интенсивности звуковой волны по таким причинам, как рассеяние механических колебаний, переход волны от источника в другую среду, увеличивающееся расстояние от источника [40, 41].

При использовании способа высокочастотного волнового воздействия стоит уделить внимание форме концентратора, так как этот фактор может привести к повышенному затуханию звуковых волн. При применении высокочастотного воздействия выделяют три основные формы концентраторов: конические, экспоненциальные и ступенчатые (рисунок 2.9) [41, 81].



Рисунок 2.9 – Основные типы концентраторов высокочастотного волнового воздействия: а) концентратор экспоненциальной формы; б) концентратор конической формы; в) ступенчатый концентратор (составлено автором)

В рамках исследования проводилось экспериментальное моделирование волнового воздействия процесса распространения высокочастотного при осуществлении способа отверстий растачивания В изделиях ИЗ коррозионностойких алюминиевых сплавов, с целью определения процента колебаний при использовании затухания концентраторов разных типов. Исследование проводилось в программной среде *COMSOL Multiphysics*, выполнено в 2D системе (рисунок 2.10), при этом все физико-механические свойства материалов, геометрические параметры и другие необходимые условия были учтены.



Рисунок 2.10 – Распространение высокочастотных колебаний в зависимости от формы концентратора: а) ступенчатый концентратор; б) конический концентратор; в) экспоненциальный концентратор; V_{cmp} – вектор направления схода стружки; V_{e} – вектор направления высокочастотного волнового воздействия (составлено автором)

На ранних этапах исследований было установлено, что максимальное значение скорости волны достигается в теле концентратора в момент подачи сигнала на магнитострикционный преобразователь, вследствие за эталонное значение скорости был принят диапазон V = 1...1, 2 м/с. В процессе моделирования фиксирование результатов выполнялось с диапазоном времени [0, T_0 *30], с шагом $T_0/20$, где T_0 – период, равный обратному значению частоты колебаний, сек.

В результате проведения исследования максимальное значение скорости волны в зоне резания было достигнуто при использовании концентратора ступенчатой формы на 7,5·10⁻⁵ секундах, при этом значение скорости находится в диапазоне 0,4...0,5 м/с, что составляет около 55 % затухания звуковой волны (рисунок 2.10, а). В случае применения других форм концентраторов затухание звуковых волн в зоне резания составляло от 70 до 90 %.

Максимальное затухание в случае применения концентраторов ступенчатой формы можно объяснить следствием рассеяния колебаний из-за неоднородности формы, в результате чего происходит уменьшение амплитуды, вызванное отражением от стенок концентратора [83].

Для достижения больших амплитуд смещений при минимальной нагрузке применяются ступенчатые концентраторы (рисунок 2.11). Их коэффициент усиления амплитуды определяется отношением площади входного сечения к площади выходного сечения, что соответствует квадрату отношения диаметров выходного и входного сечений.



Рисунок 2.11 - Распределения амплитуд колебаний и механических напряжений: а) конический концентратор; б) экспоненциальный концентратор; в) ступенчатый концентратор; *F* – механическое напряжение; *A* – амплитуда

колебаний (составлено автором)

Проводилось исследование влияния расстояния от точки приложения высокочастотного волнового воздействия до зоны резания (рисунок 2.12).

Моделирование проводили с использованием ступенчатого концентратора, так как данный тип позволил обеспечить наименьший процент затухания.



Рисунок 2.12 - Распространение высокочастотных колебаний в зависимости от точки приложения: V_{cmp} – вектор направления схода стружки; V_{e} – вектор направления высокочастотного волнового воздействия; L_1 - L_3 – расстояния от вершины резца до точки приложения воздействия, мм (составлено автором)

Магнитострикционный преобразователь закреплен в направлении подачи резания, что также позволит оценить процент затухания при изменении направления воздействия. Выполнены три группы исследований с расстояниями контакта от зоны резания $L_1 = 55$ мм; $L_2 = 75$ мм; $L_3 = 95$ мм. Минимальное расстояние L_1 установлено в соответствие с габаритными размерами магнитострикционного преобразователя.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что по мере увеличения расстояния от точки контакта концентратора до зоны резания

значительно увеличивается доля затухания колебаний. При этом применение высокочастотного волнового воздействия на расстоянии 95 мм приводит к определённым эффектам в зоне резания, а именно практически полному затуханию колебаний, что снижает эффективность применяемого способа.

Описывая исследование распространения высокочастотного волнового воздействия в направлении подачи резания, можно также зафиксировать высокий процент затухания механических колебаний даже на минимальном расстоянии контакта. Данный эффект объясняется тем, что в результате преломления траектории распространения звуковой волны, волновое воздействие достигает зоны резания посредством отражения от стенок резца, при этом и происходит процесс рассеяния [74, 78].

2.3.2 Обоснование выбора геометрических параметров режущего инструмента

В При растачивании отверстий изделиях коррозионностойкого ИЗ алюминиевого сплава с применением высокочастотного волнового воздействия правильный подбор геометрических параметров и материала режущей части инструмента приобретает особое значение. Высокочастотные волны, воздействуя на зону резания, способствуют улучшению условий обработки, снижая силы трения и облегчая процесс формирования стружки. Геометрические параметры должны быть оптимизированы для максимальной эффективности применяемого способа, что способствует снижению износа инструмента и повышению качества обработки. Выбор материала режущей части, обладающего высокой износостойкостью и низкой теплопроводностью, также позволяет повысить эффективность растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия [22, 28, 88].

Твердые сплавы на основе титан-карбидных композиций являются наиболее распространенными материалами для токарной обработки алюминиевых сплавов. Они обеспечивают высокую износостойкость и стойкость к абразивному воздействию, а также высокую жесткость и устойчивость к деформациям. Эти материалы обладают высоким модулем упругости, что позволяет минимизировать

48

изгибы и прогибы при резании, что является немаловажным, так как при растачивании с применением высокочастотного волнового воздействия, помимо воздействия сил резания, появляется дополнительная сила в виде поджатия концентратора к поверхности резца [29, 30, 38].

Применение твердого сплава T15K6 в качестве инструментального материала позволит обеспечить более стабильный процесс резания, предотвратить перегрев инструмента и деформацию заготовки и выполнять обработку с высокой скоростью резания.

На основании того, что появляется дополнительная сила в виде поджатия концентратора к поверхности резца, необходимо дополнительно исследовать жесткость системы «инструмент» в зависимости от вылета резца и поперечного сечения державки.

С увеличением сечения державки $h \times b$ до максимально возможного значения увеличивается и общая жесткость инструмента [67]. В случае выполнения растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия на токарновинторезном станке *JET GHB 1340A DRO* за максимальное значение сечения державки принимаем $h \times b = 16 \times 16$ мм.

Рекомендуется выбирать минимально возможный вылет резца, чтобы минимизировать изгибающие моменты и повысить жесткость системы. Это помогает избежать вибраций и обеспечивает более точное позиционирование инструмента относительно заготовки. С учетом габаритных размером применяемого магнитострикционного преобразователя, закрепленного на расточной оправке, значение вылета резца должно составлять не менее 80 мм.

Геометрические параметры режущей части инструмента играют ключевую роль в процессе растачивания алюминия с применением высокочастотного волнового воздействия, оказывая существенное влияние на эффективность обработки, качество поверхности и долговечность инструмента [7].

Рекомендуется выбирать значение переднего угла γ в диапазоне 10°...18°, что облегчает врезание инструмента в мягкий и вязкий материал, снижает силы резания и уменьшает трение [8].

Оптимальным считается задний угол $\alpha = 8^{\circ} \dots 12^{\circ}$, что позволяет уменьшить трение между задней поверхностью инструмента и обрабатываемой поверхностью, улучшая качество поверхности и снижая износ инструмента [7, 8].

При выборе значений главного угла в плане φ и угла наклона режущей кромки λ необходимо сопоставить особенности выполнения растачивания с использованием высокочастотного волнового воздействия. Угол $\lambda = 0^{\circ}$ дает возможность спрогнозировать направление схода стружки, так как при таком значении угла сход стружки происходит в направлении по нормали к режущей кромке, что позволяет повысить эффективность обработки за счет точного выбора направления воздействия. Рекомендуемый радиус при вершине *r* составляет 0,4–0,8 мм. Такой радиус способствует плавному входу инструмента в материал [8, 57].

Таким образом, в качестве инструментального материала выбран твердый сплав T15K6. Геометрические параметры режущего инструмента: радиус при вершине резца r = 0,5 мм; главный угол в плане $\varphi = 60^{\circ}$; угол наклона режущей кромки $\lambda = 0^{\circ}$; главный передний угол $\gamma = 10^{\circ}$; задний угол $\alpha = 12^{\circ}$.

2.3.3 Обоснование выбора сочетания рабочих движений

Параметры шероховатости и микротвердости обработанной поверхности непосредственно определяются комбинацией выбранных рабочих движений. Выбор комбинации рабочих движений, в свою очередь, зависит от способа растачивания с использованием высокочастотного волнового воздействия.

При изготовлении изделий из труднообрабатываемых материалов резанием, как и говорилось в 1 главе, обработка проводится при малых значениях подачи резания S < 0,1 мм/об и на высоких скоростях V > 60 м/мин.

С учетом особенностей обработки изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов обработка с низкой подачей и на высоких скоростях не дает необходимый эффект, так как величина и периодичность наростообразования снижаются незначительно (рисунок 2.13), вследствие чего достижение высоких показателей качества поверхности является трудоемким процессом и требует применения дополнительной финишной обработки.



Рисунок 2.13 - Образцы стружки, полученные в результате традиционного растачивания и растачивания с применением высокочастотного волнового

воздействия (составлено автором)

Предлагаемый способ растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия позволяет обеспечить необходимые параметры шероховатости поверхности $Ra \leq 1,6$ мкм за счет применения воздействия в направлении, противоположном направлению схода стружки, что позволяет повысить эффективность обработки на низких подачах резания и повышенных скоростях.

Предварительные исследования показали, что растачивание отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов традиционным способом позволяет достичь шероховатости поверхности в диапазоне Ra = 2,4...3,6 мкм (рисунок 2.14при изменении режимных параметров В диапазоне S = 0,04...0,12 мм/об и частоты вращения заготовки в диапазоне n = 300...2000 мин⁻¹. В результате применения волнового воздействия высокочастотного обеспечиваются параметры шероховатости обработанной поверхности в диапазоне Ra = 0, 7...1, 1 мкм при использовании тех же режимных параметров.

51





2.3.4 Определение диапазонов величин технологических параметров

Частота вращения заготовки *n* и величина подачи резания *S* ограничены техническими характеристиками станка *JET GHB 1340A DRO*. Были определены значения частоты вращения заготовки в диапазоне от 300 до 2000 мин⁻¹ и подачи

резания в пределах от 0,04 до 0,12 мм/об. В качестве заготовок выступали втулки из сплава АМц с диаметром 300 мм и длиной 150 мм.

В результате выполнения предварительной серии испытаний фиксировались значения технологических параметров высокочастотного волнового воздействия: частота воздействия f = 20 кГц; угол воздействия $\omega = 30^{\circ}$ в соответствие с направлением схода стружки.

Получены снимки внутренней поверхности после растачивания традиционным способом и по предлагаемому способу с помощью установки высокочастотного воздействия (рисунок 2.15). Результаты предварительных исследований показали, что применение частот воздействия ниже ультразвуковых частот f < 18 кГц также позволяет снизить величину и периодичность наростообразования.



а) Традиционное растачивание

 б) Растачивание с применением высокочастотного волнового воздействия

Рисунок 2.15 – Снимки внутренних поверхностей при традиционном растачивании и растачивании с применением высокочастотного волнового воздействия при: а) n = 1250 мин⁻¹, S = 0,06 мм/об, t = 0,25 мм;
б) n = 1250 мин⁻¹, S = 0,06 мм/об, t = 0,25 мм; f = 15 кГц, ω = 30° (составлено автором)

Анализ результатов показал, что в случае растачивания без применения высокочастотного волнового воздействия необходимый эффект не достигается, так

как нарост уменьшается незначительно, на обработанной поверхности наблюдаются надиры, вырывы и налипание частиц нароста, а также периодичность образования нароста, закрепившегося на стружке, изменяется незначительно, что говорит о малой эффективности влияния режимных параметров на процесс наростообразования при обработке резанием коррозионностойких алюминиевых сплавов и, как следствие, на качество получаемых изделий.

Из вышесказанного делаем вывод о том, что необходимо исследовать частоты в диапазоне ниже ультразвуковых частот, а также направления высокочастотного воздействия, не удовлетворяющие условиям растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия.

Диапазон частоты вращения заготовки и подачи резания выбираем в соответствии с параметрами станка *JET GHB 1340A DRO*: n = 300-2000 мин⁻¹, S = 0,04-0,12 мм/об, определяя границы значений частоты воздействия f = 10 - 30 кГц и угла воздействия $\omega = 0-30^{\circ}$.

2.4 Выводы по Главе 2

По результатам исследований были сформулированы следующие выводы:

1. Разработан способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов с применением высокочастотного волнового воздействия, позволяющий обеспечить равномерное снижение величины и периодичности наростообразования, равномерное качество и микротвердость обрабатываемой внутренней поверхности.

2. Подготовлена установка для реализации предлагаемого способа, компоновка которой позволяет выполнять растачивание с применением высокочастотного волнового воздействия в зависимости от направления схода стружки.

3. Установлено, растачивании отверстий ЧТО при В изделиях ИЗ коррозионностойких алюминиевых сплавов с применением высокочастотного волнового воздействия в качестве магнитострикционного материала необходимо обладающий применять пермендюровый стержень, высокой магнитной проницаемостью, более высокой механической прочностью и позволяющий выполнять обработку на более высоких частотах.

4. В результате моделирования процесса распространения высокочастотных колебаний установлены основные закономерности влияния формы концентратора и точки приложения воздействия на эффективность предлагаемого способа.

5. В ходе проведения серии предварительных экспериментов установлены диапазоны варьируемых технологических параметров обработки и значения статических параметров.

6. Вследствие анализа теоретических и экспериментальных исследований установлены оптимальные значения геометрических параметров режущей части инструмента, величины вылета, поперечного сечения державки, обеспечивающие повышение жесткости технологической системы при растачивании отверстий с применением высокочастотного волнового воздействия.

ГЛАВА З ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ПРИ РАСТАЧИВАНИИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ

Обеспечение качества поверхностей изделий из коррозионностойкого алюминиевого сплава марки АМц посредством высокочастотного волнового воздействия достигается при выборе таких технологических параметров обработки, которые обеспечат требуемую кинематику процесса. Важной особенностью высокочастотного волнового воздействия выступает его направление, противоположное направлению схода стружки, что оказывает значительное влияние на образование нароста и улучшает процесс обработки. Однако оптимальные значения частоты колебаний, при которых такое воздействие достигает максимальной эффективности, остаются неопределенными [95,97,98].

Также неизвестны значения частоты вращения заготовки, угла высокочастотного волнового воздействия и величина подачи резания, которые гарантируют достижение требуемых величин шероховатости и микротвердости обработанной поверхности [27, 46, 48].

Цель настоящей главы заключается в установлении закономерностей изменения шероховатости и микротвердости растачиваемых поверхностей в зависимости от комбинаций технологических параметров обработки, а также в построении соответствующих математических моделей.

3.1 Методика проведения экспериментальных исследований

Для разработки математических моделей зависимости шероховатости и микротвердости от варьируемых технологических параметров высокочастотного волнового воздействия и сокращения числа экспериментов применялась теория планирования эксперимента, заключающаяся в использовании центрального композиционного плана [1, 57, 73].

Варьируемые параметры в процессе проведения эксперимента: значение подачи резания *S* и величина частоты вращения заготовки *n*, частота высокочастотного воздействия *f*, угол высокочастотного воздействия ω . Частота

высокочастотного воздействия ограничивалась значениями, доступными для настройки на генераторе сигналов. Угол высокочастотного воздействия ω регулировался путём изменения положения магнитострикционного преобразователя в приспособлении относительно расточного резца.

Эксперименты выполнялись на токарном станке JET GHB 1340A DRO, в устройство резцедержателе которого размещалось для осуществления высокочастотного волнового воздействия. Направление воздействия определялось согласно предложенному методу, предполагающему предварительную ориентацию устройства относительно поверхности резца таким образом, чтобы высокочастотное волновое воздействие происходило направлении, В противоположном движению сходящей стружки.

К статическим параметрам относились фиксированные характеристики, не изменяемые в процессе исследований: геометрические параметры заготовок и конструкция магнитострикционного преобразователя.

Измеряемыми величинами выступали шероховатость *Ra* и микротвердость *H_v* растачиваемых поверхностей.

Значения варьируемых и статических параметров приведены в таблицах 3.1 – 3.2.

		Уровень					
Варьируемые параметры	Символ	-2	-1	0	+1	+2	
 Величина подачи резания (мм/об) 	S	0,04	0,07	0,08	0,10	0,12	
2. Частота вращения (мин-1)	п	300	460	750	1250	2000	
3. Частота высокочастотного волнового воздействия (кГц)	f	10	15	20	25	30	
4. Угол высокочастотного волнового воздействия (°)	ω	0	15	30	45	60	

Таблица 3.1 – Варьируемые технологические параметры (составлено автором)

Статические параметры	
Обрабатываемая заготовка	Втулка из алюминиевого сплава марки АМц с диаметром 300 мм и длиной 150 мм
Глубина резания	0,25 мм
Применяемый инструмент	 Инструментальный материал Т15К6. Геометрические параметры режущего инструмента: радиус при вершине резца r = 0,5 мм; главный угол в плане φ = 60°; вспомогательный угол в плане φ₁ = 30°;
	 угол наклона режущей кромки λ = 0°; главный передний угол γ = 10°; задний угол α = 12°.

Таблица 3.2 – Статические технологические параметры (составлено автором)

Посредством применения профилометра *Mitutoyo Surftest SJ-210* был выполнен контроль шероховатости растачиваемых поверхностей (рисунок 3.1) (приложение Б). Профилограмма поверхности, полученная в результате измерений шероховатости представлена на рисунке 3.2.





Рисунок 3.1 – Профилометр Mitutoyo Surftest SJ-210 (фото автора)

Рисунок 3.2 – Результат измерения шероховатости внутренней поверхности (составлено автором)

По результатам измерений определено среднее значение шероховатости *Ra*, мкм (3.1):

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} R_{ai}, \qquad (3.1)$$

где *n* – количество выполненных измерений, *i* – номер текущего измерения.

Измерение микротвердости проводили на микротвердомере ПМТ-3М (рисунок 3.3) (приложение Б).



Рисунок 3.3 – Микротвердомер ПМТ-3М (фото автора)

С целью визуальной оценки и съемки поверхности в результате традиционного растачивания и растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия применялся лабораторный инвертированный микроскоп *Leica DM ILM HC* (рисунок 3.4) (приложение Б).



Рисунок 3.4 – Визуальная оценка обработанной поверхности с применением лабораторного микроскопа *Leica DM ILM HC* (фото автора)

3.2 Планирование эксперимента и разработка математических моделей

Количество опытов, необходимое для установления закономерностей достижения равномерной шероховатости на стадии финишной обработки, устанавливалось с учётом следующих условий: сокращение числа экспериментов, применение обоснованных процедур с точным соблюдением этапов, использование математических методов для обработки данных и построение моделей, удовлетворяющих критериям адекватности.

С учетом нелинейных свойств высокочастотного волнового воздействия, при которых шероховатость и микротвердость зависят от технологических параметров нелинейно, для построения регрессионной модели в виде полинома второй степени был выбран план второго порядка.

Уравнение регрессии (3.2) приобретает следующий вид:

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

где *b* – коэффициент уравнения регрессии;

 x_i, x_i – значение факторов.

k – общее число факторов.

Общее число опытов, определяется по из следующего выражения (3.3):

$$N = N_{\rm g} + 2k + N_0, \tag{3.3}$$

где $N_{\rm g}$ – число опытов в ядре плана;

2k – число опытов в «звездных точках»;

 N_0 – число опытов в «центре плана».

Основные параметры ротатабельного центрального композиционного плана (РЦКП), необходимые для составления матрицы, приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Установленные характеристики ротатабельного центрального композиционного плана (составлено автором)

Характеристика	Число факторов	Число опытов в ядре плана	Величина «звездного плеча	Число опытов в «звездных точках»	Число опытов в «центре плана»	Общее число опытов
Обозначение	k	N _я	α	2 <i>k</i>	N ₀	Ν
Значение	4	24 (ПФЭ)	2,000	8	7	31

Уровни варьируемых факторов сформированы в зависимости от интервала их изменения. Поскольку частота вращения заготовки ограничена характеристиками токарного станка, для нее был задан адаптивный интервал варьирования.

Каждому уровню варьируемых факторов соответствовали кодовые значения, которые указаны в таблице 3.4.

Габлица 3.4 – Уровни вар	ьируемых факторов	(составлено а	втором)
--------------------------	-------------------	---------------	---------

Факторы	Величина подачи резания S, (мм/об)	Частота вращения заготовки п , (мин ⁻¹)	Частота высокочастотного волнового воздействия f, (кГц)	Угол высокочастотного волнового воздействия ω , (°)
Основной уровень (X _{i0})	0,08	750	20	30
Интервал варьирования (ΔX_i)	0,02		5	15
Верхний уровень (<i>x_i</i> = +1)	0,10	1250	25	45
Нижний уровень (<i>x_i</i> = -1)	0,06	460	15	15
Звездная точка + α ($x_i = +2$)	0,12	2000	30	60
Звездная точка - α ($x_i = -2$)	0,04	300	10	0

Расчет коэффициентов уравнения регрессии был произведен по формулам (3.4-3.7):

$$b_0 = c_1 \sum_{u=1}^N y_u - c_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u, \qquad (3.4)$$

$$b_i = c_3 \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u, \tag{3.5}$$

$$b_{ij} = c_4 \sum_{u=1}^{N} (x_i x_j)_u y_u, \tag{3.6}$$

$$b_{ii} = c_5 \sum_{u=1}^{N} x_{iu}^2 y_u + c_6 \sum_{i=1}^{k} \sum_{u=1}^{N} x_{iu}^2 y_u - c_2 \sum_{i=1}^{N} y_u, \qquad (3.7)$$

где *y*_{*u*} – экспериментальное значение.

Матрица плана представлена в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Матрица плана эксперимента (составлено автором)

Область	Номер	Значение варьируемого фактора				Код фактора				
плана	та	S, мм/ об	<i>п</i> , мин ⁻¹	f , кГц	ω , °	<i>x</i> ₀	<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃	<i>x</i> ₄
	1	0,10	1250	25	45	+1	+1	+1	+1	+1
	2	0,06	1250	25	45	+1	-1	+1	+1	+1
	3	0,10	460	25	45	+1	+1	-1	+1	+1
	4	0,06	460	25	45	+1	-1	-1	+1	+1
	5	0,10	1250	15	45	+1	+1	+1	-1	+1
	6	0,06	1250	15	45	+1	-1	+1	-1	+1
	7	0,10	460	15	45	+1	+1	-1	-1	+1
Ядро	8	0,06	460	15	45	+1	-1	-1	-1	+1
плана	9	0,10	1250	25	15	+1	+1	+1	+1	-1
	10	0,06	1250	25	15	+1	-1	+1	+1	-1
	11	0,10	460	25	15	+1	+1	-1	+1	-1
	12	0,06	460	25	15	+1	-1	-1	+1	-1
	13	0,10	1250	15	15	+1	+1	+1	-1	-1
	14	0,06	1250	15	15	+1	-1	+1	-1	-1
	15	0,10	460	15	15	+1	+1	-1	-1	-1
	16	0,06	460	15	15	+1	-1	-1	-1	-1
	17	0,12	750	20	30	+1	+2	0	0	0
	18	0,04	750	20	30	+1	-2	0	0	0
	19	0,08	2000	20	30	+1	0	+2	0	0
Звездные	20	0,08	300	20	30	+1	0	-2	0	0
точки	21	0,08	750	30	30	+1	0	0	+2	0
	22	0,08	750	10	30	+1	0	0	-2	0
	23	0,08	750	20	60	+1	0	0	0	+2
	24	0,08	750	20	0	+1	0	0	0	-2
	25	0,08	750	20	30	+1	0	0	0	0
	26	0,08	750	20	30	+1	0	0	0	0
	27	0,08	750	20	30	+1	0	0	0	0
Центр	28	0,08	750	20	30	+1	0	0	0	0
	29	0,08	750	20	30	+1	0	0	0	0
	30	0,08	750	20	30	+1	0	0	0	0
Звездные точки Центр	31	0,08	750	20	30	+1	0	0	0	0

Вспомогательные константы *с* для ротатабельных планов были выбраны в соответствие с таблицами, представленными в трудах, посвященных применению статистических методов планирования экспериментов [46, 57].

Дисперсия воспроизводимости рассчитывалась согласно выражению (3.8):

$$S_{y}^{2} = \frac{1}{N_{0}-1} \sum_{j=1}^{n_{0}} (y_{j} - \overline{y})^{2}.$$
 (3.8)

Дисперсию каждого коэффициента модели *S_b* определяли по формулам (3.9-3.16), а ковариации коэффициентов *cov_{bb}* по формулам (3.17-3.18):

$$S_{b_0}^2 = c_1 S_y^2, (3.9)$$

$$S_{b_0} = c_7 S_y, (3.10)$$

$$S_{b_i}^2 = c_3 S_y^2, (3.11)$$

$$S_{b_i} = c_8 S_y, \tag{3.12}$$

$$S_{b_{ij}}^2 = c_4 S_y^2, (3.13)$$

$$S_{b_{ij}} = c_9 S_y,$$
 (3.14)

$$S_{b_{jj}}^2 = (c_5 + c_6)S_y^2, (3.15)$$

$$S_{b_{jj}} = c_{10} S_y, (3.16)$$

$$cov_{b_0 b_{ii}} = -c_2 S_y^2, (3.17)$$

$$cov_{b_{ii}b_{jj}} = c_6 S_y^2,$$
 (3.18)

Доверительные интервалы коэффициентов определяли по уравнению (3.19):

$$\Delta b_i = t_{a;f_1} \cdot S_{b_i}, \tag{3.19}$$

где $t_{a;f_1}$ – критерий Стьюдента [57];

 $S_{b_i}-$ среднеквадратичная ошибка коэффициента регрессии.

Статистическая значимость коэффициентов устанавливалась по формулам (3.20-3.23):

$$|b_0| \ge t_{a;f_1} \cdot S_{b_0}, \tag{3.20}$$

$$|b_i| \ge t_{a;f_1} \cdot S_{b_i}, \tag{3.21}$$

$$|b_{ii}| \ge t_{a;f_1} \cdot S_{b_{ii}},$$
 (3.22)

$$|b_{ij}| \ge t_{a;f_1} \cdot S_{b_{ij}}.$$
 (3.23)

Дисперсия неадекватности модели определяется исходя из выражения (3.24):

$$SS_{\text{Head}}^2 = \frac{SS_{\text{Head}}}{f_2}, \qquad (3.24)$$

где $SS_{\text{неад}}$ – сумма квадратов, связанная с дисперсией неадекватности, f_2 – число степеней свободы.

Сумма квадратов, связанная с дисперсией неадекватности, рассчитывается по формуле (3.25):

$$SS_{\text{неад}} = N_0 (y_0^p - \overline{y}_0)^2 + \sum_{u=1}^{24} (y_u^p - y_u^3)^2, \qquad (3.25)$$

Число степеней свободы, связанное с оценкой дисперсии (3.26):

$$f_2 = N - \frac{(k+2)(k+1)}{2},\tag{3.26}$$

где *N* – общее число выполненных опытов,

k – количество варьируемых факторов.

Проверка адекватности модели проводилась с использованием F-критерия Фишера исходя из выражения (3.27):

$$F_{\rm p} = \frac{SS_{\rm Heag}^2}{S_y^2}.$$
 (3.27)

Условие $F_{p} < F_{табл}$ позволяет оценить адекватность полученной модели [57].

3.3 Влияние технологических параметров на шероховатость

Данные экспериментальных исследований, оценивающих влияние технологических параметров высокочастотного волнового воздействия на шероховатость растачиваемых поверхностей, приведены в приложении A, таблица А.1. Результаты расчета коэффициентов регрессионной модели представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Результаты расчетов коэффициентов регрессионного уравнения шероховатости (составлено автором)

Коэффи- циент	Значе- ние	Среднее значение ӯ	Дисперсия опыта S ² _y	Дисперсия коэффициен- та, S ² _b	Средне- квадратич- ная ошибка, <i>S_b</i>	Доверитель- ный интервал				
b_0	0,922			0,0000058509	0,00241885	0,005926175				
b_1	0,032									
<i>b</i> ₂	-0,040			0.00000171	0.00120621	0.003200461				
<i>b</i> ₃	-0,003			0,0000171	0,00130031	0,003200401				
b_4	-0,036									
<i>b</i> ₁₂	0,005									
<i>b</i> ₁₃	0,0003	0.00155140	0,000040952 4	2 0,000040952 4						
<i>b</i> ₁₄	-0,002	0,92157142			4	4	9 4 0.0000256	0.00000256	0.001500851	0.002010625
b ₂₃	0,005						0,0000230	0,001399831	0,003919035	
b ₂₄	-0,013									
b ₃₄	0,021									
<i>b</i> ₁₁	-0,014									
<i>b</i> ₂₂	-0,005			0.00000142	0.001106917	0.002022201				
b ₃₃	-0,028]		0,0000143	0,001190817	0,002932201				
b44	0,015									

В соответствии с рассчитанными коэффициентами уравнение регрессии имеет вид (3.28):

$$y_{Ra} = 0,922 + 0,032x_1 - 0,04x_2 - 0,003x_3 - 0,036x_4 + 0,005x_1x_2 + 0,0003x_1x_3 - 0,002x_1x_4 + 0,005x_2x_3 - 0,013x_2x_4 + 0,021x_3x_4 - 0,014x_{11} - 0,005x_{22} - 0,028x_{33} + 0,015x_{44}.$$
(3.28)

В результате оценки адекватности модели по F-критерию Фишера было определено расчетное значение $F_{pacy} = 0,26957432$, табличным значением при $\alpha = 0,05$ является $F_{madon} = 2,742$. Поскольку $F_{pacy} < F_{madon}$, модель признана адекватной для анализа совместного влияния технологических параметров на шероховатость. Расчетные значения приведены в таблице 3.7.

-			-				
Номер опыта	<i>Ra</i> экс.	<i>Ra</i> расч.	Δy_{Ra}^2	Номер опыта	Ra экс.	<i>Ra</i> расч.	Δy_{Ra}^2
1	0,841	0,85891449	0,00032093	13	0,951	0,95773749	0,00004539
2	0,737	0,78880945	0,00268422	14	0,871	0,88033245	0,00008709
3	0,873	0,94450425	0,00511286	15	0,981	1,01132725	0,00091974
4	0,854	0,89589921	0,00175554	16	0,926	0,95542221	0,00086567
5	0,734	0,81314833	0,00626446	17	1,035	0,92812339	0,01142261
6	0,726	0,74424329	0,00033282	18	0,818	0,80211331	0,00025239
7	0,859	0,91673809	0,00333369	19	0,871	0,82327859	0,00227733
8	0,846	0,86933305	0,00054443	20	1,059	0,98395811	0,00563129
9	0,861	0,91850365	0,00330667	21	0,869	0,80528451	0,00405966
10	0,849	0,83989861	0,00008284	22	0,877	0,81795219	0,00348664
11	0,925	0,95409341	0,00084643	23	1,021	0,90827919	0,01270598
12	0,894	0,89698837	0,0000893	24	1,064	1,05395751	0,00010085

Таблица 3.7 – Экспериментальные и расчетные значения отклика уравнения шероховатости (составлено автором)

Уравнение регрессии (3.28) было раскодировано, получена модель (3.29).

$$3,3 \cdot 10^{-6} fn + 28 \cdot 10^{-5} f\omega - 5 \cdot 10^{-6} n^2 - 2,8 \cdot 10^{-6} n\omega + 67 \cdot (3.29)$$

 $10^{-6}\omega^2 + 6,715S + 0,03306f - 91 \cdot 10^{-6}n - 0,00691\omega + 0,52325.$

После исключения незначительных слагаемых получена окончательная модель (3.30).

$$Ra = 0,003fS - 112 \cdot 10^{-5}f^{2} + 3,3 \cdot 10^{-6}fn + 67 \cdot 10^{-6}\omega^{2} + 6,715S + 0,03306f - 0,00691\omega + 0,52325.$$
(3.30)

Таким образом, получены полиномиальные математические модели влияния технологических параметров на шероховатость внутренней поверхности (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Математические модели влияния технологических параметров на шероховатость (составлено автором)

Технологический параметр	Математическая модель
Величина подачи резания S	$Ra = 0,648 + 7,218S - 35S^2$
Частота вращения п	$Ra = 1,061 - 42,6n \cdot 10^{-6} - 5n^2 \cdot 10^{-8}$
Частота высокочастотного волнового воздействия f	$Ra = 0.565 + 0.044f - 112f^2 \cdot 10^{-5}$
Угол высокочастотного волнового воздействия ω	$Ra = 1,057 - 389\omega \cdot 10^{-5} + 67\omega^2 \cdot 10^{-6}$

Анализ выявил, что наименьшая величина шероховатости растачиваемых поверхностей достигается при *S* в диапазоне 0,04–0,08 мм/об (рисунок 3.5, а). Это подтверждает информацию, описанную в литературных источниках [6, 22], о снижении шероховатости вследствие снижения подачи резания и доказывает, что для растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия это высказывание является справедливым. Повышение частоты вращения заготовки *n* $M H H^{-1}$ выше значения 1250 (рисунок 3.5, б) обеспечивает снижение шероховатости, что также доказывает справедливость высказываний [6, 22] в отношении растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия.



Рисунок 3.5 – Графики влияния а) величины подачи резания, б) частоты вращения, в) частоты высокочастотного волнового воздействия, г) угла высокочастотного волнового воздействия на шероховатость *Ra*, мкм при обработке внутренней поверхности (составлено автором)

Установлено, что оптимальные частоты высокочастотного волнового воздействия *f* для обработки внутренних поверхностей составляют до 15 кГц и выше 25 кГц (рисунок 3.5, в), обеспечивая шероховатость *Ra* от 0,7 до 0,9 мкм.

Частоты в диапазоне 15–25 кГц показали менее эффективные результаты – шероховатость превышает 0,9 мкм.

Установлено, что увеличение угла воздействия ω от 0 до 45° способствует снижению шероховатости *Ra* до 0,7 мкм, при этом в пределах от 45 до 60° величина шероховатости увеличивается. Это объясняется тем, что при высокочастотном волновом воздействии с углом $\omega = 0^{\circ}$ выполняется воздействие в направлении подачи резания, что вызывает увеличение пути резца и, как следствие, снижению стойкости инструмента. Ухудшение же шероховатости при увеличении угла ω до 60° вызывает воздействие высокочастотных колебаний на узлы станка, что приводит к появлению вибраций системы.

точной Для более оценки влияния варьируемых параметров на необходимо рассмотреть шероховатость поверхности совместное влияние параметров высокочастотного воздействия технологических волнового на шероховатость внутренней поверхности Ra.

Получены математические модели, позволяющие оценить комбинированное влияние варьируемых параметров на шероховатость (таблица 3.9).

Таблица 3.9 – Математические модели комбинированного влияния технологических параметров на шероховатость (составлено автором)

Комбинация технологических параметров	Математическая модель				
Подача резания S + частота	$Ra = 7,158S + 0,044f - 35S^2 - 0,001f^2 + 0,003Sf$				
воздействия f	+ 0,217				
Подача резания S + угол	$Ra = 7,399S - 0,003\omega - 35S^2 + 6,7\omega^2 \cdot 10^{-5}$				
воздействия ω	$-0,006S\omega + 0,690$				
Подача резания S + частота	$Ra = 6595S - 109n \cdot 10^{-5} - 35S^2 - 5n^2 \cdot 10^{-8}$				
вращения <i>n</i>	+ 0,001Sn + 0,757				
Частота вращения <i>n</i> + частота	$Ra = 0.042f - 10.86n \cdot 10^{-5} - 0.001f^2 - 5n^2 \cdot 10^{-8}$				
воздействия f	$+ 0,33 fn \cdot 10^{-5} + 0,675$				
Частота вращения <i>n</i> + угол	$Ra = 4,14n \cdot 10^{-5} - 0,002\omega - 5n^2 \cdot 10^{-8} + 6,7\omega^2$				
воздействия ω	$\cdot 10^{-5} - 0,28n\omega \cdot 10^{-5} + 1,054$				
Частота воздействия f + угол	$Ra = 0,036f - 0,01\omega - 0,001f^{2} + 6,7\omega^{2} \cdot 10^{-5}$				
воздействия ω	$+ 0,0003f\omega + 0,790$				

Установлено, что значение шероховатости Ra < 0,9 мкм достигается при подаче резания S менее 0,08 мм/об и угле воздействия ω в диапазоне от 15° до 45°

включительно (рисунок 3.6, а). При таких значениях *S* и ω влияние воздействия на путь резца и элементы технологической системы исключается.



Рисунок 3.6 – Комбинированное влияние на величину шероховатости: а) подачи резания S и угла воздействия ω; б) подачи резания S и частоты воздействия f;
в) подачи резания S и частоты вращения n; г) частоты воздействия f и частоты вращения n; д) частоты вращения n и угла воздействия ω;
е) угла воздействия ω и частоты воздействия f (составлено автором)

Шероховатость Ra < 0,7 мкм удается обеспечить также при подаче резания *S* ниже 0,06 мм/об и частоте вращения *n* свыше 1250 мин⁻¹ (рисунок 3.6, в). Однако при частоте воздействия *f* от 15 до 25 кГц и угле ω менее 15° влияние этих параметров на шероховатость остается минимальным. В рамках проведения экспериментальных исследований для указанных значений удалось снизить значение *Ra* с 1,06 мкм до 0,7–0,8 мкм.

График совместного влияния частоты вращения n и частоты воздействия *f* на *Ra* (рисунок 3.6, г) подтверждает сделанные ранее выводы. Шероховатость *Ra* < 0,76 мкм обеспечивается при n > 1250 мин⁻¹ и *f* в диапазонах до 15 кГц и выше 25 кГц.

Таким образом, каждый рассмотренный технологический параметр влияет на шероховатость. Минимальная шероховатость достигается при: подаче резания S = 0,04-0,06 мм/об, частоте вращения n > 1250 мин⁻¹, частоте воздействия f до 15 или свыше 25 кГц, угле $\omega = 30-45^{\circ}$.

3.4 Влияние технологических параметров на микротвердость

Результаты исследований влияния параметров высокочастотного волнового воздействия на величину микротвердости растачиваемых поверхностей представлены в приложении А, таблица А.2.

Коэффициенты регрессионной модели приведены в таблицах 3.10, 3.11.

Таблица 3.10 – Микротвердость поверхности при высокочастотном волновом воздействии (составлено автором)

Номер опыта	H_{v}	Номер опыта	H_{v}	Номер опыта	H_{v}	Номер опыта	H_{v}	Номер опыта	H_v
1	430,688	8	422,929	15	434,897	22	381,531	29	402,259
2	402,288	9	425,214	16	432,444	23	379,323	30	388,682
3	446,983	10	421,516	17	435,574	24	366,374	31	385,778
4	428,736	11	432,582	18	375,380	25	397,619		
5	420,878	12	428,687	19	368,846	26	386,357		
6	392,998	13	421,742	20	425,774	27	386,494		
7	431,787	14	402,318	21	421,369	28	392,714		

Таблица 3.11 – Результаты расчета уравнения регрессии удельного съема материала (составлено автором)

Коэффи- циент	Значе- ние	Среднее значение у	Диспер- сия опыта S ² _y	Дисперсия коэффи- циента, S ² _b	Средне- квадратич- ная ошибка, <i>S_b</i>	Доверитель- ный интервал
b ₀	391,748			5,877	2,424	5,939
<i>b</i> ₁	9,719					
<i>b</i> ₂	-10,637			1 71 4	1 200	2 200
<i>b</i> ₃	5,683			1,/14	1,309	3,208
<i>b</i> ₄	0,158					
<i>b</i> ₁₂	2,872					
b ₁₃	0,0003					
<i>b</i> ₁₄	3,370	391,415	41,134	2.571	1 (02	2.029
b ₂₃	1,678			2,571	1,603	3,928
b ₂₄	-1,610					
b ₃₄	1,469					
<i>b</i> ₁₁	8,439					
b ₂₂	6,397	1		1.420	1 100	2.020
b ₃₃	7,432	1		1,438	1,199	2,939
b44	0,282	1				

Уравнение регрессии имеет следующий вид (3.32):

 $y_{H_{\nu}} = 391,748 + 9,719x_1 - 10,637x_2 + 5,683x_3 + 0,158x_4 + 0,158x_5$

$$2,872x_1x_2 + 0,0003x_1x_3 + 3,370x_1x_4 + 1,678x_2x_3 - 1,610x_2x_4 + (3.32)$$

 $1,469x_3x_4 + 8,439x_{11} + 6,397x_{22} + 7,432x_{33} + 0,282x_{44}.$

Расчетное значение F-критерия Фишера составило $F_{pacy} = 1,878$, табличным значением при $\alpha = 0,05$ является $F_{madon} = 2,742$. По результатам анализа модель признана адекватной для оценки совместного влияния параметров на микротвердость. Расчетные значения приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Расчетные и экспериментальные значения отклика уравнения удельного съема материала (составлено автором)

Номер опыта	<i>Н_v</i> экс.	$H_{m v}$ расч.	$\Delta y_{H_v}^2$	Номер опыта	<i>Н_v</i> экс.	<i>Н_v</i> расч	$\Delta y_{H_v}^2$
1	430,688	427,000	13,604	13	421,741	408,444	176,835
2	402,288	395,078	51,993	14	402,318	390,002	151,690
3	446,983	442,395	21,053	15	434,897	424,108	116,401
4	428,736	421,960	45,920	16	432,444	417,153	233,817
5	420,878	409,341	133,121	17	435,574	444,942	87,768
6	392,998	377,420	242,701	18	375,380	406,065	941,614
7	431,787	431,445	0,117	19	368,846	396,064	740,805
8	422,929	411,012	142,020	20	425,774	438,610	164,774
9	425,214	420,227	24,874	21	421,369	432,843	131,645
10	421,516	401,784	389,363	22	381,531	410,111	816,844
11	432,582	429,181	11,563	23	379,323	393,191	192,323
12	428,687	422,225	41,754	24	366,374	392,560	685,712
		•	•			Σ	5558,311

Уравнение регрессии (3.32) декодировано, получена модель (3.33).

 $H_{\nu} = 21097,500S^{2} + 0,003fS + 0,479nS + 11,230\omega S + 0,297f^{2} + 0,001fn + 0,020f\omega + 0,000071n^{2} - 0,00036n\omega + 0,00125\omega^{2} - (3.33)$

 $-3585,71S - 12,181f - 0,192n - 1,087\omega + 727,627.$

После исключения незначительных слагаемых сформирована окончательная модель (3.34).

$$H_{v} = 21097,500S^{2} + 0,479nS + 11,230\omega S + 0,297f^{2} + 7,1n^{2} \cdot 10^{-5} - -3585,71S - 12,181f - 0,192n + 727,627.$$
(3.34)

Получены полиномиальные модели влияния каждого параметра на микротвердость (таблица 3.13). Анализ показал, что максимальное значение H_v достигается при определенных условиях: частоте высокочастотного волнового воздействия в диапазоне до 15 кГц и свыше 25 кГц (рисунок 3.7, в). Это объясняется
изменением сил резания за счет применения высокочастотного волнового воздействия в процессе растачивания.

Таблица 3.13 – Математические модели влияния технологических параметров на микротвердость (составлено автором)

Технологический параметр	Математическая модель
Величина подачи резания S	$H_{v} = 21097,5S^2 - 2889,8S + 487,909$
Частота вращения <i>n</i>	$H_{v} = 7,107n^{2} \cdot 10^{-5} - 0,142n + 458,315$
Частота высокочастотного волнового воздействия <i>f</i>	$H_{v} = 0,297f^{2} - 10,755f + 487,928$
Угол высокочастотного волнового воздействия ω	$H_{v} = 1,253\omega^{2} \cdot 10^{-3} - 0,064\omega + 392,551$



Рисунок 3.7 – Графики влияния а) величины подачи резания, б) частоты вращения, в) частоты высокочастотного волнового воздействия, г) угла высокочастотного волнового воздействия на микротвердость H_v при

В результате повышения подачи резания *S* от 0,06 мм/об до 0,12 мм/об наблюдается повышение микротвердости поверхности, что объясняется

обработке внутренней поверхности (составлено автором)

деформированием поверхностного слоя обрабатываемого металла в результате наклепа [22]. Для обоснования незначительного снижения величины микротвердости при повышении подачи от 0,04 мм/об до 0,06 мм/об необходимо провести анализ комбинированного влияния подачи с другими варьируемыми параметрами.

В данном случае изменение угла воздействия ω носит незначительных характер, при этом наибольшее значение микротвердости наблюдается все же при значениях угла от 30° до 45°, что подтверждает снижение величины вибраций системы. Необходимо также провести исследование комбинированного влияния, так как изменение угла в совокупности с изменением других варьируемых параметров, возможно, позволит получить большие значения микротвердости.

В результате увеличения частоты вращения заготовки *n* наблюдается снижение микротвердости поверхности, что объясняется снижением времени воздействия сил резания, интенсифицирования трения, в результате чего происходит уменьшение наклепа поверхностного слоя [6, 7].

Разработаны модели совместного влияния параметров на микротвердость (таблица 3.14), проведена их оценка (рисунок 3.8).

Таблица 3.14 – Математические модели комбинированного влияния технологических параметров на микротвердость поверхности (составлено автором)

Комбинация	Математическая молель	
технологических параметров	титетити теския модель	
Подача резания S + частота	$H_v = 21097,5S^2 - 2889,86S - 10,755f + 0,298f^2$	
воздействия f	+ 0,003Sf + 583,093	
Подача резания S + угол	$H_{v} = 21097,5S^{2} - 3226,7S - 0,963\omega + 1,253\omega^{2} \cdot 10^{-3}$	
воздействия ω	$+ 11,23S\omega + 515,663$	
Подача резания S + частота	$H_{v} = 21097,5S^{2} - 3248,75S - 0,180n + 7,107n^{2} \cdot 10^{-5}$	
вращения <i>n</i>	+ 0,479Sn + 583,191	
Частота вращения <i>n</i> + частота	$H_{\nu} = 0,298f^2 - 11,594f - 0,164n + 7,107n^2 \cdot 10^{-5}$	
воздействия f	$+ 0,001 fn \cdot 10^{-3} + 571,274$	
Частота вращения <i>n</i> + угол	$H_{n} = 7,107n^{2} \cdot 10^{-5} - 0,131n + 0,203\omega + 1,253\omega^{2} \cdot 10^{-3}$	
воздействия ω	$-0,4n\omega \cdot 10^{-3} + 451,085$	
частота воздействия f + угол	$H_{\nu} = 0.298f^2 - 11.342f - 0.456\omega + 1.253\omega^2 \cdot 10^{-3}$	
воздействия ω	$+ 0,02f\omega + 500,482$	



Рисунок 3.8 – Совместное влияние на микротвердость: а) подачи резания S и угла воздействия ω; б) подачи резания S и частоты воздействия f;
в) подачи резания S и частоты вращения n; г) частоты воздействия f и частоты вращения n; д) частоты вращения n и угла воздействия ω;

е) угла воздействия ω и частоты воздействия f (составлено автором)

Установлено, что значение микротвердости $H_v > 420$ МПа удается обеспечить при подаче резания S от 0,04 до 0,06 мм/об. При этом значение угла воздействия ω должно составлять от 30° (рисунок 3.8, а). Для данных значений подачи резания S и угла воздействия ω обеспечиваются необходимые условия, способствующие

75

также и получению заданных параметров шероховатости. Микротвердость поверхности $H_v > 430$ МПа удается обеспечить при подаче резания *S* до 0,06 и свыше 0,08 мм/об и частоте воздействия *f* свыше 25 кГц. Однако при недостаточной частоте вращения п влияние этого параметра на микротвердость практически отсутствует (рисунок 3.8, в, г).

О сделанных ранее выводах свидетельствует график комбинированного влияния частоты вращения заготовки *n* и угла воздействия ω (рисунок 3,8 д). Микротвердость поверхности $H_v > 436$ Мпа удается обеспечить при минимальной частоте вращения заготовки $n \le 460$ мин⁻¹, при этом угол воздействия должен быть в значениях $\omega \le 45^{\circ}$. Комбинированное влияние частоты воздействия *f* и угла воздействия ω (рисунок 3,8, е), описывается следующим образом – чем выше значение частоты воздействия *f*, практически при любом значении угла воздействия ω , тем выше микротвердость поверхности H_v .

Таким образом, установлено, что каждый рассмотренный параметр влияет на микротвердость H_{ν} . Сформулированы выводы о взаимосвязи технологических параметров растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия. Максимальные значения микротвердости внутренней поверхности $H\nu$ достигаются при следующих значениях технологических параметров: подача резания *S*=0,08-0,12 мм/об; частота вращения заготовки *n*=750-1250 мин⁻¹; частота воздействия *f* до 20 и свыше 25 кГц; угол воздействия ω =30-45°.

В результате исследований установлено, что каждый анализируемый параметр оказывает влияние на величину микротвердости H_v и значение шероховатости *Ra*. Сформулированы заключения о взаимосвязи технологических параметров растачивания с использованием высокочастотного волнового воздействия. Наибольшие значения микротвердсти внутренней поверхности H_v достигаются при следующих варьируемых параметрах: S = 0,08-0,12 мм/об, n = 750-1250 мин⁻¹, *f* до 20 и свыше 25 кГц, $\omega = 30-45^\circ$. Графические зависимости шероховатости и микротвердости от варьируемых параметров представлены на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 – Графическая зависимость влияния технологических факторов растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия на шероховатость и микротвердость (составлено автором)

3.5 Визуальная оценка состояния внутренних поверхностей

Проведена визуальная оценка состояния внутренних поверхностей при традиционном растачивании и после обработки с различными параметрами. Цель визуальной оценки – выявить дефекты поверхностного слоя, оценить равномерность обработки и общее качество поверхности.

Выбраны две комбинации параметров, обеспечивающие максимальную микротвердость и минимальную шероховатость:

1. Подача резания S = 0,1 мм/об, частота вращения заготовки n = 750 мин⁻¹, частота высокочастотного волнового воздействия f = 30 кГц, угол высокочастотного волнового воздействия $\omega = 15^{\circ}$.

2. Подача резания S = 0,04 мм/об, частота вращения заготовки n = 1250 мин⁻¹, частота высокочастотного волнового воздействия f = 25 кГц, угол высокочастотного волнового воздействия $\omega = 30^{\circ}$.

77

Получены снимки поверхностей при традиционном растачивании и после растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия для каждого набора параметров (рисунок 3.10). Высокочастотное воздействие позволяет полностью или частично устранить вырывы и надиры, обеспечивая однородность поверхностного слоя.

Растачивание с применением

Растачивание

a)

б)



Рисунок 3.10 – Внутренняя поверхность при традиционном растачивании и после растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия с технологическими параметрами: а) S = 0,1 мм/об, n = 750 мин⁻¹, f = 30 кГц, $\omega = 15^{\circ}$; б) f = 25 кГц, $\omega = 30^{\circ}$, S = 0,04 мм/об, n = 1250 мин⁻¹ (составлено автором)

Очевидно, качество обработанной внутренней ЧТО поверхности И эффективность процесса зависят от сочетания технологических параметров высокочастотного волнового воздействия. Тем не менее, независимо от выбранных значений параметров отмечается положительная динамика В изменении шероховатости и микротвердости. Это позволяет сделать вывод об эффективности предложенного подхода и разработанных моделей.

Сочетания параметров высокочастотного волнового воздействия оказывают влияние на качество внутренней поверхности и результативность обработки. При

любых комбинациях параметров фиксируется благоприятное изменение шероховатости *Ra* и микротвердости *H_v*.

В результате применения высокочастотного волнового воздействия удается снизить величину и периодичность наростообразования и, как следствие, избежать появление вырывов и надиров на обработанной поверхности.

3.6 Выводы по Главе 3

1. В ходе экспериментов выявлены закономерности влияния отверстий технологических параметров растачивания с использованием высокочастотного волнового воздействия по предлагаемому способу на шероховатость и микротвердость поверхности.

2. Разработаны математические модели как отдельных влияния технологических параметров, так И ИХ сочетания на шероховатость И микротвердость поверхности.

3. Установлено, что варьируемые параметры, рассматриваемые В экспериментальном исследовании, оказывают влияние на величину шероховатости поверхности *Ra*. Сформулированы выводы о взаимосвязи технологических параметров обработки с применением высокочастотного волнового воздействия. Минимальные значения шероховатости растачиваемой поверхности достигаются при следующих значениях технологических параметров: частота воздействия f до 15 и свыше 25 кГц; угол воздействия ω = 30-45°; подача резания S = 0,04- 0,06 мм/об; частота вращения заготовки $n \ge 1250$ мин⁻¹.

4. Определено, что варьируемые параметры, рассматриваемые В исследовании, влияние экспериментальном оказывают на значение микротвердости поверхности H_{ν} . Наибольшие значения $H_{\nu} = 440$ МПа достигаются при следующих параметрах: подача резания S = 0,08–0,12 мм/об, частота вращения заготовки n = 750-1250 мин⁻¹, частота воздействия f до 15 или свыше 25 кГц, угол воздействия $\omega = 30-45^{\circ}$. При этом шероховатость поверхности составляет Ra = 0.8 мкм.

5. Сочетания технологических параметров растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия оказывают влияние на качество и микротвердость внутренней поверхности отверстий. Независимо от выбранных значений технологических параметров наблюдается положительная динамика в изменении шероховатости Ra и микротвердости H_{ν} .

ГЛАВА 4 ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРОЦЕСС ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА РАСТАЧИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ

В технической литературе, посвящённой обеспечению качества поверхностного слоя деталей из коррозионностойких алюминиевых сплавов [28, 70, 75], отмечается, что на формирование шероховатости преимущественно влияют значительные амплитуды автоколебаний технологической системы механической обработки (TCMO). Причины возникновения автоколебаний в TCMO и их перехода в нестабильное состояние отличаются сложной физической природой, а энергия, поддерживающая эти колебания, генерируется в рабочих процессах между элементами системы, образующими замкнутый контур [34, 69, 77].

Анализ влияния нестабильного автоколебательного процесса как фактора, определяющего качественные характеристики поверхностного слоя, является осуществимым за счет математического моделирования поведения эквивалентной технологической системы [28, 34]. Для разработки такой модели ТСМО необходимо выполнить следующий набор задач:

• определить первоначальную модель технологической системы с учетом внутренних (координатных) связей;

• установить статические параметры подсистем этой модели;

• выделить подсистемы, наиболее восприимчивые к колебательным процессам, на основе анализа их статических характеристик;

• выявить структурные взаимосвязи (рабочие процессы) между отобранными подсистемами;

• провести аппроксимацию нелинейных дифференциальных уравнений.

Помимо базовой математической модели, необходимо включить параметры высокочастотного волнового воздействия как фактора, уменьшающего амплитуду автоколебаний за счет изменения характера рабочих процессов.

После составления эквивалентной модели ТСМО с учетом высокочастотного воздействия следующим этапом становится выбор:

- метода решения линейных дифференциальных уравнений;
- среды имитационного моделирования для реализации выбранного метода.

На основе виртуальных виброграмм динамических характеристик ТСМО, сформированных в ходе моделирования, определяется среднеарифметическое отклонение профиля [34]. Результаты расчетов дают возможность оценить влияние выбранной динамической характеристики на шероховатость поверхности с применением высокочастотного волнового воздействия и без него, построив соответствующую графическую зависимость. Сравнение результатов моделирования обработки заготовки использованием высокочастотного С воздействия и без него помогает определить режимы, обеспечивающие требуемые значения шероховатости поверхности в соответствии с заданным технологическим процессом [13, 28, 34].

4.1 Разработка математической модели эквивалентной технологической системы растачиваемых поверхностей

Эквивалентная технологическая система станка может быть представлена как совокупность множества упругих подсистем, взаимодействующих между собой через рабочие процессы [34, 79, 84]. В отношении влияния автоколебаний на качественные характеристики обработанной поверхности ключевую роль играют упругие элементы «инструмент – заготовка». Их свойства определяются такими параметрами, как жесткость упругих элементов, приведенная масса, сила демпфирования и другими [53–55].

При контакте между подсистемами возникают силовые воздействия на упругий элемент, которые вызывают относительные смещения, формируя при этом так называемое подвижное соединение [56]. Взаимодействие подсистем определяет исходную модель как автономную и замкнутую, обеспечивая постоянную генерацию механической энергии для поддержания автоколебаний [42, 43].

Особенность упругих подсистем с большим числом степеней свободы заключается в наличии координатных связей [53, 85]. Эти связи проявляются в том,

что распределенная сила резания увеличивает толщину снимаемого слоя, что, в свою очередь, вызывает обратный эффект – изменение сил резания и трения. Этот процесс можно описать иначе: смещения одновременно являются как входными координатами рабочего процесса, так и выходными координатами упругих подсистем.

В модели следует учитывать следующие типы связей: статические, скоростные, динамические и инерционные. Их выбор обусловлен следующими факторами [27, 84, 86]:

• статическая связь возникает в ТСМО между поступательными перемещениями, когда смещение массы (подсистемы) представляет собой сумму деформаций нескольких упругих элементов, связанных с другими массами. Это происходит при несовпадении направления сил с главными осями жесткости подсистемы.

• в упругой системе силы демпфирования проявляющиеся, когда демпфирование по одной координате влияет на демпфирование по другой, являются причиной возникновения скоростной связи.

• инерционная связь возникает в системе с множеством масс, когда равнодействующая сил инерции не совпадает с центром жесткости.

Для оптимизации исходной модели необходимо определить параметры, характеризующие упругие подсистемы для модели технологической системы станка *JET GHB 1340A DRO*.

Как показывает априорная модель (рисунок 4.1), замкнутая система TCMO металлорежущего оборудования обладает множеством независимых переменных, каждая из которых связана с собственной парциальной частотой (таблица 4.1). При разработке эквивалентной математической модели TCMO допустимо исключить некоторые степени свободы [55, 84, 85], если их частоты колебаний отличаются на порядок от основных частот системы. Таким образом, для оценки амплитуды автоколебаний технологической системы механической обработки первоочередной задачей является определение парциальных частот и числа

степеней свободы, задающих параметры колебательных контуров в расчетной модели [55, 84, 85].



Рисунок 4.1 – Модель ТСМО токарно-винторезного станка (составлено авторами) Таблица 4.1 - Обозначение параметров станка *JET GHB 1340A DRO* (составлено автором)

Этомонт	Параметр					
Элемент подсистемы станка	Координаты	Жесткость упругих систем	Приведенная масса упругих систем	Коэффициент демпфирования		
	X	C_{1x}	m_{1x}	b_{1x}		
Шпиндель	У	c_{1y}	m_{1y}	b_{1y}		
	Z	C_{1Z}	m_{1z}	b_{1z}		
Заготовка	X	<i>C</i> _{2<i>x</i>}	m_{2x}	b_{2x}		
	У	<i>C</i> _{2<i>y</i>}	m_{2y}	b_{2y}		
	Z	C_{2Z}	m_{2z}	b_{2z}		
Инструмент	X	<i>C</i> _{3<i>x</i>}	m_{3x}	b_{3x}		
	У	C _{3y}	m_{3y}	b_{3y}		
	Z	C_{3Z}	m_{3z}	b_{3z}		
Задняя бабка	Х	C_{4x}	m_{4x}	b_{4x}		
	У	C_{4y}	m_{4y}	b_{4y}		
	Z	C_{4Z}	m_{4z}	b_{4z}		
Крутильная система	-	Cφ	J	b_{arphi}		

Измерение собственных частот выполнялось методом ударного возбуждения с последующей регистрацией сигнала устройством *NI Compact RIO* (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Платформа *NI CompactRIO* для фиксирования затухающих колебаний (фото автора)

Затухающие колебания подсистем станка измерялись пятикратно. Частота *f*_c, Гц, рассчитывалась по соответствующей формуле (4.1).

$$f_c = \frac{n}{l},\tag{4.1}$$

где *l* – период колебаний, сек; *n* – количество полных колебаний [34].

Тогда логарифмический декремент λ определяется исходя из выражения (4.2)

$$\lambda = (ln \cdot \frac{A_i}{A_{i+n}})/n, \tag{4.2}$$

где A_i и A_{i+n} – амплитуды колебаний, отстающих друг от друга на количество периодов, м [34].

Результаты измерений свободных колебаний и логарифмических декрементов затухания представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Частоты собственных и логарифмических декрементов затухания станка *JET GHB 1340A DRO* (составлено автором)

Узлы станка	Координаты	<i>f</i> с, Гц	±f <i>с</i> , Гц	λ	$\pm \Delta \lambda$
Шпиндельный узел	x y z	159 371 152	4 15 3	0,36 0,34 0,37	0.04 0.05 0.05
Заготовка	x y z	128 305 122	3 11 3	0,45 0,3 0,41	0.04 0.03 0.03
Закрепленный инструмент	x y z	129 85 79	3 2 2	0,39 0,29 0,25	0.07 0.04 0.06
Задняя бабка	x y z	154 358 148	8 11 7	0,35 0,47 0,32	0.05 0.07 0.04
Узлы станка	Частота вращения n, об/мин	<i>fc</i> , Гц	±f <i>с</i> , Гц	λ	±Δλ
Привод главного движения	300 460 750 1250 2000	141 127 122 118 114	5 5 6 4 3	0,46 0,55 0,59 0,67 0,72	$0,04 \\ 0,03 \\ 0,04 \\ 0,04 \\ 0,05$

Коэффициент жесткости подсистем определялся в соответствие с выражением (4.3):

$$c = \frac{P - P_0}{\delta},\tag{4.3}$$

где P_0 – нагрузка, H; δ – перемещение; м, c – жесткость системы, МН/м.

Нагрузка прикладывалась в направлениях трёх компонент силы резания P_x , P_y , P_z . Схемы нагружения подсистем «заготовка» и «инструмент» показаны на рисунках 4.3 и 4.4.



Рисунок 4.3 – Определение величины жесткости подсистемы «заготовка» (составлено автором)



Рисунок 4.4 – Определение жесткости подсистемы «инструмент» (составлено автором)

Крутильная жесткость привода измерялась с помощью поводка при заблокированном роторе двигателя (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 – Измерение значения деформации крутильной подсистемы, где: 1 –поводок; 2 - шпиндель; 3 – ротор; 4 – коробка скоростей (составлено автором)

Измерения проводились для шпинделя с частотами вращения $300...2000 \text{ мин}^{-1}$. Угол φ , ^о закручивания определялся по показаниям индикатора (4.4).

$$\varphi = \arcsin \cdot \frac{\mu}{L},\tag{4.4}$$

где *L* – плечо поводка, м.

В таком случае (4.5):

$$c_{\varphi} = \frac{P - P_0}{\varphi},\tag{4.5}$$

где c_{φ} – коэффициент крутильной жесткости; P_0 – нагрузка, Н [14, 34].

Для учета температурных эффектов испытания на статическую жесткость выполнялись на прогретом станке после трёх часов работы, имитирующей реальные условия.

Значения приведённой массы и момента инерции определялись в соответствие с полученной жесткостью подсистем (4.6–4.7). Значения приведённой массы, жесткости и сил сопротивления приведены в таблице 4.3.

$$m = \frac{c}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2},\tag{4.6}$$

где m – приведенная масса, кг; с – жесткость, МН/м; f – частота собственных колебаний, Гц.

$$J = \frac{c_{\varphi}}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2}.$$
(4.7)

где J - момент инерции, кг·м²; c_{φ} - крутильная жесткость, кН·м/рад. Таблица 4.3 – Параметры узлов токарного станка *JET GHB 1340A DRO* (составлено автором)

Узлы станка	Координаты	Жесткость с, МН/м	Приведенная масса <i>m</i> , кг	Коэффициент демпфирования <i>b</i> , кН·с/м
Шпиндельный узел	x y z	111,5 264,9 106,7	111,8 48,8 117,1	13,2 12,3 12,8
Заготовка	x y z	51,2 172,6 50,3	79,2 47,0 85,7	9,1 8,6 8,6
Закрепленный инструмент в суппорте	x y z	65,4 17,5 19,7	99,7 61,4 80,0	10,0 3,0 3,2
Задняя бабка	x y z	138,8 245,4 118,2	148,4 48,6 136,8	16,0 13,3 13,0
Узлы станка	Частота вращения n, об/мин	Крутильная жесткость <i>с</i> _φ , кН·м/рад	Момент инерции Ј, кг∙м²	Коэффициент демпфирования <i>b</i> _{\$\varphi\$} , Н·м·с
Привод главного движения	300 460 750 1250 2000	171,2 78,5 44,3 15,9 9,7	0,22 0,12 0,08 0,03 0,02	28,3 16,9 10,9 4,4 3,1

На основе этих параметров можно исключить степени свободы, слабо влияющие на смещение инструмента.

В частности, степень свободы по оси *X* исключается, так как подсистемы в этом направлении обладают высокими демпфирующими свойствами, жесткостью и массами.

По данным затухания крутильной системы (видно значительное рассеяние энергии во всех диапазонах частот вращения шпинделя, что позволяет исключить крутильную систему из расчетной модели из-за её минимального влияния на вибрации ТСМО.

Эквивалентная модель ТСМО для обработки деталей типа «тела вращения» получена в результате аппроксимации модели (рисунок 4.6).



Рисунок 4.6 – Эквивалентная динамическая модель ТСМО с двумя степенями свободы: *P* – сила резания, H; *Q* – сила трения, H; *m_z*, *m_y* – приведенные массы, кг; *c_z*, *c_y* – коэффициенты жесткости, МН/м; *b_z*, *b_y* – коэффициенты демпфирования, кH·с/м (составлено автором)

4.2 Составление уравнений динамики эквивалентной технологической системы механической обработки деталей типа «тел вращения» с учетом процесса стружкообразования

Для описания динамических параметров с учётом высокочастотного волнового воздействия необходимо составить уравнения движения эквивалентной TCMO и описать процесс стружкообразования. Особое внимание уделялось запаздыванию силы резания относительно припуска и трения как ключевым факторам автоколебаний.

Силы резания и трения возникают при взаимодействии подсистем «инструмент – заготовка» [10, 22, 34]. Математическое описание пластической деформации металла требует тщательного подхода, так как существующие модели отражают процесс лишь приближённо [27, 53, 54].

Перед тем как переходить к математическому моделированию процесса стружкообразования, необходимо для большей ясности изложить качественную сторону деформационного процесса срезаемого слоя металла при механической обработке [12, 34] (рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 - Модель процесса формирования стружки при механической обработке, где: 1 – инструмент; 2 – заготовка; 3 – стружка; *t* – глубина резания, мм (составлено автором)

Процесс включает фазы: зарождение упругопластической деформации и активную пластическую деформацию [11, 21]. При контакте инструмента 1 со стружкой 3 возникают силы Q и P по осям Y и Z соответственно, а также сжимающие σ_1 , σ_2 и касательные τ_1 , τ_2 напряжения на поверхностях *OM* и *LO*, растягивающие σ_3 и касательные τ_3 напряжения на *KO*.

Принимаем во внимание, что поверхность *LM* остаётся свободной от нагрузок [34, 85, 87]. Смещение инструмента по оси Z на ΔZ вызывает превышение предела прочности $\tau 3$ на *KO*, формируя трещину.

Дальнейшее движение раскрывает трещину, создавая новые свободные поверхности и ускоряя деформацию в зоне *OML* по границам сдвига βl и $\beta 2$, вытягивая зёрна металла в эллипсы под действием сдвиговых деформаций [34]. В результате этого деформированный слой отделяется от обрабатываемой поверхности, приобретая форму сливной стружки [86].

На этапе активной фазы стружкообразования (рисунок 4.8), инструмент смещается от заданной позиции по направлениям ΔY и ΔZ . Это вызывает запаздывание в изменении действующих сил Q и P.



Рисунок 4.8 – Модель процесса пластической деформации срезаемого слоя с развитой зоной сдвига, где: 1 – инструмент; 2 – заготовка; 3 – стружка;

t – глубина резания, мм (составлено автором)

Процесс механической обработки, включающий несколько стадий формирования срезаемого слоя, можно математически представить с использованием упрощений [34, 84, 85].

В этой связи можно записать следующие интегральные уравнения (4.8-4.9):

$$l_P = \int_{t=0}^{\tau_P} (V + \Delta \dot{z}) dt = V \cdot \tau_P \int_{t=0}^{\tau_P} \Delta \dot{z} \cdot dt, \qquad (4.8)$$

$$l_Q = \int_{t=0}^{\tau_Q} (V + \Delta \dot{z} + \xi \cdot \Delta \dot{y}) dt = V \cdot \tau_Q + \int_{t=0}^{\tau_Q} (\Delta \dot{z} + \xi \cdot \Delta \dot{y}) dt, \qquad (4.9)$$

где τ_P – время запаздывания в направлении действия силы *P*, сек; τ_Q - время запаздывания в направлении действия силы *Q*, сек; $\Delta \dot{z}$ – приращение скорости в контуре *z*; $\Delta \dot{y}$ – приращение скорости в контуре *y*; *t* – время, сек; ξ – коэффициент усадки стружки [34].

Выделив постоянные компоненты из времён запаздывания τ_P и τ_Q , можно записать уравнения для определения постоянных величин запаздывания в процессе механической обработки (4.10-4.11):

$$\tau_P = \frac{l_P}{V_S},\tag{4.10}$$

где τ_P - время запаздывания силы резания *P*, сек; V_S – скорость скольжения, м/с.

$$\tau_Q = \frac{l_Q}{V_S}.\tag{4.11}$$

где τ_Q - время запаздывания силы резания Q, сек

Равнодействующая сил резания выражается в следующем виде (4.12): (4.12)

$$P_S = \sqrt{P_Z^2 + P_X^2 + P_Y^2},$$

Где *P*_S –равнодействующая сил резания, H;

P_Z, *P_X*, *P_Y* — составляющие этой силы вдоль осей координат *Z*, *X u Y*, H.

Сила трения определяется следующим образом (4.13):

$$Q_S = f \cdot P_S, \tag{4.13}$$

где Q_S – сила трения, H; f – коэффициент трения.

Представленные формулы рабочих процессов носят эмпирический характер. Для более точного отражения этих процессов их следует преобразовать в такой вид (4.14-4.15):

$$\Delta P(t) = P_s \cdot y(t), \tag{4.14}$$

$$\Delta Q(t) = f \cdot \Delta P(t). \tag{4.15}$$

Предполагается, что в любой момент времени выполняется следующее соотношение (4.16):

$$\begin{cases} P \cdot (t + \tau_P) = -P_s \cdot x \equiv \Delta P(t) \\ Q \cdot (t - \tau_Q) = f \cdot P(t) \equiv \Delta Q(t) \end{cases}$$
(4.16)

Разложив линейную часть системы (4.16) в ряд Тейлора, получаем выражение (4.17-4.18) для вычисления времени запаздывания τP , силы резания ΔP , а также времени запаздывания τQ и силы трения ΔQ [85]:

$$\tau_P = \frac{\Delta P(t) - P(t)}{\dot{P}(t)}; \qquad (4.17)$$

$$\tau_Q = \frac{\Delta Q(t) - Q(t)}{\dot{Q}(t)}.$$
(4.18)

С учётом уравнений (4.8), (4.9), (4.17) и (4.19) после преобразований получаем (4.19):

$$\begin{cases} T_P \cdot \dot{P} + \left(1 + \frac{\dot{z}}{V}\right) \cdot P + \alpha \cdot \left(1 + \frac{\dot{z}}{V}\right) \cdot y = 0\\ T_Q \cdot \dot{Q} + \left(1 + \frac{\dot{z} + \xi \cdot \dot{y}}{V}\right) \cdot Q - f \cdot \left(1 + \frac{\dot{z} + \xi \cdot \dot{y}}{V}\right) \cdot P = 0 \end{cases}$$
(4.19)

На основании вышеизложенного, движение двухконтурной технологической системы механической обработки станка с учётом координатной связи, описывается дифференциальными уравнениями с использованием формулы (4.19) [55, 87]. При этом подсистема «заготовка» считается абсолютно жёстким телом (4.20):

$$\begin{cases} m_{y} \cdot \ddot{y} + b_{y} \cdot \dot{y} + c_{y} \cdot y = Q \\ m_{z} \cdot \ddot{z} + b_{z} \cdot \dot{z} + c_{z} \cdot z = P \\ T_{P} \cdot \dot{P} + \left(1 + \frac{\dot{z}}{V}\right) \cdot P + \alpha \cdot \left(1 + \frac{\dot{z}}{V}\right) \cdot y = 0 \quad , \qquad (4.20) \\ T_{Q} \cdot \dot{Q} + \left(1 + \frac{\dot{z} + \xi \cdot \dot{y}}{V}\right) \cdot Q - f_{i} \cdot \left(1 + \frac{\dot{z} + \xi \cdot \dot{y}}{V}\right) \cdot P = 0 \end{cases}$$

где *m*y, *m*z – приведённые массы соответствующих контуров, кг; *b*y, *b*z – коэффициенты рассеяния энергии, кH·с/м; *c*y, *c*z – коэффициенты жёсткости, МН/м.

Применяя метод аппроксимации, описанный в научных источниках [55, 85, 86], получаем систему линейных дифференциальных уравнений, учитывающую процесс стружкообразования (4.21):

$$\begin{cases} T_{y2}^{2} \cdot \ddot{y} + T_{y1} \cdot \dot{y} + y = Q \\ T_{z2}^{2} \cdot \ddot{z} + T_{z1} \cdot \dot{z} + z = P \\ T_{P}\dot{P} + P = -k_{y} \cdot y - T_{z1} \cdot \dot{z} \\ T_{Q}\dot{Q} + Q = P - T_{ky} \cdot y - T_{kz2} \cdot \dot{z} \end{cases}$$
(4.21)

где T_{y2} и Tz2 – постоянные времени, сек; T_{y1} и T_{z1} – постоянные времени демпфирования, сек; T_P и T_Q – постоянные компоненты сил, H; k_x – коэффициент передачи замкнутого контура; T_{kz1} и T_{kz2} – постоянные времени демпфирования, сек.

4.3 Моделирование динамических характеристик технологической системы и шероховатости растачиваемых поверхностей изделий

Моделирование динамических характеристик технологической системы и анализ влияния параметров, заданных через переключатель, проводились в программной среде *LabVIEW* [2, 25, 26].

линейных дифференциальных Система уравнений С постоянными коэффициентами описывалась методом через передаточные функции, позволяющие обозначить отдельное уравнение эквивалентной технологической системы как типовое звено. Для получения динамических характеристик каждое звено подвергалось преобразованию Лапласа. С учётом изложенного, замкнутая структурная схема эквивалентной ТСМО представлена на рисунке 4.9 с учётом принципов теории управления динамическими системами [15, 16, 35].



Рисунок 4.9 – Структурная схема двухконтурной технологической системы растачиваемых поверхностей изделий (составлено автором)

Центральным элементом замкнутой системы является контур у. Каждое типовое звено содержит соответствующую передаточную функцию. Процесс передачи «сигнала» через взаимосвязанные звенья основан на концепции автоколебаний, связанных с запаздыванием сил резания *P* и трения *Q* относительно смещения. Это явление отражается в схеме следующим образом:

Звенья 2 и 4 описывают запаздывание сил P и Q. Сила Q, выходящая из звена 4, поступает на вход колебательного звена 5, откуда через отрицательную обратную связь по y с коэффициентом k_y передаётся в звено суммирования 1. Звенья 7, 8, 9 и 10 отражают демпфирующее воздействие контуров y и z, пропорциональное амплитудам A_y .

Из схемы видно, что поведение системы (форма граничной кривой) определено в основном контуре y, а внутренние обратные связи по производным \dot{y} и \dot{z} с коэффициентами вида T_k лишь увеличивают рассеяние энергии системы, которое расширяет область устойчивости.

Параметры замкнутой технологической системы определены в соответствии со значениями в Таблице 4.3:

• жесткость: $c_{\rm V} = 17.5 \cdot 10^6 \, \text{H/m}; \ c_{\rm Z} = 19.7 \cdot 10^6 \, \text{H/m};$

- приведенные массы: $m_V = 61,4$ кг; $m_Z = 80,0$ кг;
- коэффициенты демпфирования: $b_V = 3.0 \cdot 10^3 \text{ H} \cdot \text{c/m}; b_Z = 3.2 \cdot 10^3 \text{ H} \cdot \text{c/m}.$

Коэффициент усадки стружки, определяющий изменение глубины деформируемой зоны в имитационной модели, выбирается на основе заданных диапазонов режимов обработки и материала режущей части инструмента [34]. Для режимов механической обработки заготовки с применением высокочастотного волнового воздействия были приняты следующие значения:

для алюминиевого сплава АМц: глубина резания $t_{\text{рез}} = 0,25$ мм; подача S = 0,08 мм/об; частота вращения n = 1250 мин⁻¹; $\xi = 1,52$; $\xi' = 1,18$.

После ввода экспериментально определённых параметров в виртуальный стенд на осциллограмме виброускорений было отмечено положительное воздействие высокочастотного волнового воздействия на снижение автоколебаний в эквивалентной технологической системе при растачивании поверхностей изделия (рисунок 4.10).



Рисунок 4.10 – Лицевая панель вибродиагностического стенда (фото автора)

С использованием таких данных, как амплитуды виброускорений, геометрические характеристики режущего инструмента и параметры обработки, появляется возможность определить среднеарифметическое отклонение профиля *Ra* [86].

Сравнительный анализ полученных зависимостей показал, что обработка алюминиевого сплава без высокочастотного волнового воздействия не обеспечивает достижения требуемого значения шероховатости поверхности Ra = 1,6 мкм, установленного действующим технологическим процессом.

С другой стороны, применение способа растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов на основе высокочастотного волнового воздействия является эффективным методом уменьшения общей амплитуды автоколебаний. Это позволяет не только достичь требуемых значений шероховатости, но и снизить её в 3,5 раза, что подтверждают исследования, описанные в 3 главе.

4.4 Исследования влияния параметров высокочастотного волнового воздействия на процесс динамической устойчивости растачиваемых поверхностей изделий

Задачей экспериментальных исследований выступает оценка воздействия растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойкого алюминиевого сплава марки АМц на технологию изготовления детали «корпус». Такой подход даёт возможность определить границы устойчивости системы и установить рабочие режимы разработанного метода при различных параметрах обработки. В процессе изучения устойчивости была построена диаграмма стабильной области для обработки в зависимости от скорости резания *V* и ширины срезаемого слоя *b*_{*peз*}.

На рисунке 4.11 обозначены кривые граничных условий, отображающие зоны устойчивости при обработке с высокочастотным волновым воздействием и при традиционном растачивании. Правая граница указывает на параметры, при которых система становится нестабильной, что ухудшает качество поверхности изза вибраций. Левая граница соответствует стабильному процессу [84].

98



Рисунок 4.11 – Граница области устойчивости при растачивании поверхностей изделия из алюминиевого сплава АМц, где: 1 – традиционное растачивание, 2 – изготовление с применением высокочастотного волнового воздействия (составлено автором)

Точки K_1 (традиционное растачивание) и K_2 (с высокочастотным воздействием) обеспечивают устойчивость по скорости резания, тогда как точка K_3 , расположенная за пределами устойчивости, характеризует динамически нестабильную систему.

Эксперименты на установке *Prüftechnik VibXpert EX* (рисунок 4.12, приложение Б) при растачивании сплава АМц с высокочастотным воздействием показали снижение вибраций по сравнению с обычным процессом.



Рисунок 4.12 – Базирование вибродиагностического прибора *VIB XpertEX* при выполнении растачивания (составлено автором)

Таким образом, в точке K_1 процесс стабилен (рисунок 4.13, а), в K_2 амплитуда колебаний уменьшается (рисунок 4.13, б), а в K_3 , за границей устойчивости, возрастает (рисунок 4.13, в).



Рисунок 4.13 – Осциллограммы виброускорений: а – при традиционном растачивании в точке *K*₁; б – при растачивании с применением высокочастотного воздействия в точке *K*₂; в – при традиционном растачивании в точке *K*₃,

за границами области устойчивости (составлено автором)

Метод растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия рекомендуется для чистовой обработки поверхностей деталей типа «тела вращения» из пластичных алюминиевых сплавов, так как при низких оборотах и малой подаче неустойчивость ухудшает качество, геометрию и стойкость инструмента.

4.5 Совершенствование технологического процесса обработки

растачиваемых поверхностей корпуса элегазового трансформатора

Достижение высокого качества поверхностей корпуса элегазового трансформатора представляет собой важную задачу, поскольку несоблюдение требований к шероховатости в отдельных зонах приводит к нарушениям электромагнитного поля, вызывающим пробои. Электрический пробой тока может привести к прожиганию корпуса и поломке устройства. В связи с этим все внутренние поверхности корпуса и экрана ЭТ должны изготавливаться с применением технологического процесса, который гарантирует не только требуемое качество ответственных поверхностей, но и обладает высокой производительностью [24, 46].

В технологическом процессе производства корпусов и экранов завершающей операцией является шлифование. Эта операция проводится в ручном или полуавтоматическом режиме с использованием абразивных губок, бумаги или кругов. На шлифование затрачивается до 35 % общей трудоёмкости изготовления корпуса трансформатора. Применение абразивных инструментов на жёсткой или гибкой основе приводит к шаржированию, а ручная обработка увеличивает риск неравномерности качества внутренней поверхности [22, 46, 102].

Увеличить производительность процесса изготовления корпуса ЭТ (таблица 4.4) и добиться равномерного качества поверхности становится возможным за счёт достижения заданной шероховатости при чистовом растачивании с использованием высокочастотного волнового воздействия.

Таблица 4.4 – Технологический процесс изготовления корпуса ЭТ (составлено автором)

Номер операции	Наименование операции
005	Заготовительная
010	Фрезерная
015	Слесарная
020	Токарная
025	Шлифовальная
030	Контрольная

101

Растачивание отверстий с применением высокочастотного волнового воздействия повышает эффективность, гарантирует получение требуемой величины шероховатости и существенно снижает трудоёмкость производства. Предлагаемый технологический процесс представлен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Предлагаемый технологический процесс изготовления корпуса ЭТ (составлено автором)

Номер операции	Наименование операции
005	Заготовительная
010	Фрезерная
015	Слесарная
020	Токарная с применением высокочастотного волнового воздействия
025	Контрольная

4.6 Практические рекомендации по растачиванию отверстий в изделиях из коррозионностойкого алюминиевого сплава марки АМц с применением высокочастотного волнового воздействия

Анализ результатов экспериментальных исследований влияния способа растачивания отверстий в изделиях из коррозионностоких алюминиевых сплавов, а также качества поверхности позволяет сделать вывод о том, что применение высокочастотного волнового воздействия позволяет значительно снизить величину и периодичность наростообразования, тем самым обеспечить заданные показатели шероховатости Ra и микротвердости H_{ν} .

Способ растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия позволяет обработать внутреннюю поверхность корпуса ЭТ из алюминиевого сплава марки AMц с обеспечением шероховатости поверхности Ra = 0.8-0.9 мкм, тем самым обеспечить устойчивость к пробоям тока и прожигу корпуса. По результатам применения способа на операции № 020 было установлено повышение производительности в 8-12,5 раз.

Установлены технологические параметры растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия: частота f и угол воздействия ω , частота

вращения *n*, подача резания *S*. В результате варьирования параметров возможно обеспечить шероховатость внутренней поверхности R_a =0,726 мкм, а также обеспечить микротвердость поверхности H_v =440 МПа.

Обработку внутренних поверхностей изделий из алюминиевого сплава АМц рекомендуется осуществлять со следующими технологическими параметрами: частота воздействия f до 15 и свыше 25 кГц; угол воздействия ω =30-45°; частота вращения заготовки n = 750-1250 мин⁻¹; подача резания S =0,04-0,08 мм/об.

4.7 Выводы по Главе 4

1. Проведённые экспериментальные и теоретические исследования технологической системы для растачивания поверхностей изделия позволило на основании сравнительного анализа пренебречь степенями свободы, перемещения по которым не вызывает смещение инструмента, и произвести переход от сложной многомерной замкнутой системы к пониженной эквивалентной модели.

2. На основе разработанной эквивалентной модели сформирована система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая динамику подсистем с учётом особенностей стружкообразования, которая после преобразования по методу В.Л. Вейца упрощается до линейных уравнений.

3. Для анализа изменений механических свойств. вызванных применением высокочастотного волнового воздействия, при моделировании поведения TCMO В математическую модель введён переключатель, функционирующий на основе неравенств.

4. Проведённое имитационное моделирование эквивалентной замкнутой TCMO в среде *NI LabVIEW* с учётом переключателя, регулирующего смену механических свойств, выявило уменьшение уровня автоколебаний по амплитудно-временной характеристике.

5. Опираясь на амплитуду автоколебаний как основной фактор, влияющий на формирование шероховатости, установлено, что применение высокочастотного волнового воздействия при растачивании отверстий снижает уровень вибраций, и, следовательно, микрогеометрические параметры обрабатываемой поверхности.

Ряд проведенных экспериментальных и теоретических исследований по 6. влиянию высокочастотного волнового воздействия на динамическую устойчивость динамической доказал, что растачивание с применением системы воздействия высокочастотного волнового позволяет изменить условия виброактивности процесса и вводит систему в устойчивое состояние.

7. Экспериментально установлено, что растачивание с применением высокочастотного волнового воздействия позволяет обеспечить равномерное качество по всей обрабатываемой поверхности, тем самым исключая трудоемкую финишную шлифовальную операцию из технологического процесса изготовления корпуса и экранов элегазового трансформатора.

8. Даны практические рекомендации по применению высокочастотного волнового воздействия в процессе растачивания отверстий, что позволит обеспечить шероховатость внутренней поверхности до Ra=0,726 мкм, а также обеспечить микротвердость $H_{\nu}=440$ МПа.

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 отверстий растачивания В изделиях ИЗ коррозионностойких (Патент изобретение алюминиевых сплавов на RU 2787289 C1), основе высокочастотного волнового воздействия, на 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 мин⁻¹; и закономерности их влияния на шероховатость и микротвердость обработанной поверхности.

4. Получены математические зависимости шероховатости Ra И микротвердости H_{ν} обработанной внутренней поверхности от комбинации параметров растачивания отверстий технологических 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

105

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 свыше 25 кГц; $\omega = 30-45$ °; n = 750-1250 мин⁻¹; S = 0,04-0,08 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 c 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю.П., Маркова, Е.В., Грановский, Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий, издательство наука, Москва 1976, 278 с.

2. Анкудинов, В.Е. Компьютерное моделирование процессов переноса и деформации в сплошных средах: Учеб. пособие: 1-е издание / В.Е. Анкудинов, Д.Д. Афлятунова, М.Д. Кривилев, Г.А Гордеев. – Ижевск: Изд-во Удмуртский университет, 2014. – 108 с.

3. Аракелян, В.Г. Физическая химия элегазового электротехнического оборудования. — М.: Издательство МЭИ, 2001. — 300 с.

4. Армарего, И.А. Обработка металлов резанием. Обработка металлов резанием / И. А. Армарего, Р. Х. Браун. – Москва: Машиностроение, 1977. – 325 с.

 Балобанов, Р.Н., Лопухова, Т.В., Зацаринная, Ю.Н. Влияние времени эксплуатации элегазового оборудования на состояние изоляции/ Р.Н. Балобанов, Т.В. Лопухова, Ю.Н. Зацаринная // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – №16 – С. 122–124.

6. Бармин, Б.П. Вибрации и режимы резания. М., «Машиностроение», 1972, 72 стр.

7. Бармин, Б.П. Технология обработки резанием деталей из труднообрабатываемых материалов: [обзор] / Б.П. Бармин. – Москва: НИИ информтяжмаш, 1972. – 41 с.: табл. – (Механосборочное производство: обзорная информация / Научно-исследовательский институт информации по тяжелому, энергетическому и транспортному машиностроению; 12-72-2). - Авт. указан на 2-й с. обл.: 0.33.

8. Благовский, О.В. Управление формированием остаточных напряжений в ответственных деталях при их изготовлении с использованием ультразвуковых колебаний: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / О. В. Благовский. – 2015. – 151 с.

9. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение. – 1975. – 344 с.

10. Бржозовский, Б.М. Динамический мониторинг технологического

оборудования / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, И.Н. Янкин и др.; СГТУ – Саратов: издательство СГТУ, 2008. – 312 с.

11. Ванчурин, А.Н. Автоматизация и управление процессом стружкодробления обрабатываемого материала при предварительном пластическом воздействии / А.Н. Ванчурин. – Дисс. канд. техн. наук – СПб.: СЗТУ, 2006. – 221 с.

Васильков, Д.В. Моделирование процесса стружкообразования на основе кусочно – линейной аппроксимации / Д.В. Васильков, В.Л. Вейц. // СПбИмаш – 1998. – №1. – С. 16 – 21.

13. Вейц, В.Л. Динамика и управление процессом стружкообразования при лезвийной механической обработке / В.Л. Вейц, В.В. Максаров. – СПб.: СЗПИ, 2000. – 160 с.

14. Вейц, В.Л. Динамика и управление процессом стружкообразования при лезвийной механической обработке / В.Л. Вейц, В.В. Максаров. – СПб.: СЗПИ, 2000. – 160 с.

Вейц, В.Л. Повышение устойчивости технологической системы при управлении реологическими параметрами процесса стружкообразования /
 В.Л. Вейц, В.В. Максаров. // Машиностроение и автоматизация производства: Межвуз. сб. Вып. 16. – СПб.: СЗПИ, 1999. – С. 19 – 29.

Вейц, В.Л. Повышение устойчивости технологической системы при управлении реологическими параметрами процесса стружкообразования /
 В.Л. Вейц, В.В. Максаров. // Машиностроение и автоматизация производства: Межвуз. сб. Вып. 16. – СПб.: СЗПИ, 1999. – С. 19 – 29.

17. Верещака, А.С. Резание материалов: Учебник/ А.С. Верещака, В.С. Кушнер. – М.: Высш. шк., 2009. – 535 с.: ил.

 Волков, Г.А.; Зильбершмит, В.В.; Бабицкий, В.И. [и др.].
 Энергетические аспекты ультразвуковой интенсификации обработки металлов // Доклады Академии Наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение"
 Российская академия наук", 2010. – Т. 431. – №. 4. – С. 479-481.
19. Волосатов, В. А. Работа на ультразвуковых установках: Учебник для полготов. Рабочих на пр-ве. 2-е изд., испр., доп. – М.: Высш. шк. 1984. – 192 с., ил.

20. Волосатов, В.А. Ультразвуковая обработка. Ленинград, изд-вл "Лениздат", 1973 г., 248 с.

21. Горбунов, О.И. Автоматизация и управление процессом стружкодробления при тонком точении материала аустенитного класса / О.И. Горбунов. – Дисс. канд. техн. наук – СПб.: СЗТУ, 2009. – 199 с.

22. Грановский, Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с., ил.

23. Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисюров, А.И. [и др.]. Разработка технологии и нового оборудования для ультразвуковой ударной обработки сварных соединений //Сварочное производство. – 2015. – №. 9. – С. 38-42.

24. Гура, Ю.Л. Силовой трансформатор с элегазовым заполнением [Текст]
/ Ю.Л. Гура // Электрик. – 2009. – № 1–2, 9.

25. Егоров, В.И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности /В.И. Егоров. – СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 77 с.

26. Егоров, В.И. Точные методы решения задач теплопроводности. Учебное пособие / В.И. Егоров. – СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 77 с.

27. Ефимов, А.Е. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностного слоя на основе моделирования переходных процессов /
В.В. Максаров, Р.В. Вьюшин, А.Е. Ефимов // Металлообработка. – 2017. – №2. – С. 39–45.

28. Жарков, И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – М.: Машиностроение, 1986. – 186 с.

29. Жесткость, точность и вибрации при механической обработке / под ред.
 В.А. Скрагана. – М. – Л.: Машгиз, 1956. – 194 с.

30. Зарс, В.В. Вопросы самовозбуждения вибраций металлорежущих станков / В.В. Зарс. – Дис. докт. техн. наук – Л.: ЛПИ, 1972. – 238 с.

31. Зорев, Н.Н. Исследование элементов механики процесса резания. М., МАШГИЗ, 1952

32. Клубович, В.В. Ультразвук в процессах самораспространяющегося высокотемпературного синтеза: монография / В.В. Клубович, М.М Кулак, Б.Б. Хина. Мн.: БНТУ, 2006. -279 С.

33. Кох, Д. Свойства SF6 и его использование в коммутационном оборудовании среднего и высокого напряжения [Текст] / Д. Кох // Техническая коллекция Schneider Electric. – 2003. – № 2. – С. 22.

34. Кошелева, Е.В. Технологическое обеспечение качества прецизионных поверхностей деталей типа "тел вращения" из титановых сплавов: специальность 05.02.08 "Технология машиностроения": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кошелева Елена Викторовна, 2018. – 173 с. – EDN ITZAUM.

35. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.

36. Кушнер, В.С., Жавнеров А.Н., Удодова А.В. Повышение режущих свойств инструмента при обработке резанием жаропрочных сплавов // ОНВ. 2011. №2 (100).

37. Лопухова, Т.В., Зацаринная, Ю.Н., & Балобанов, Р.Н. (2013). Особенности конструкции трансформаторов с элегазовой изоляцией. Вестник Казанского технологического университета, 16 (4), 218-220.

38. Максаров, В.В. Анализ реологических уравнений для моделирования процесса резания / В.В. Максаров, Е.Б. Козлова. // Машиностроение и автоматизация производства: Межвуз. сб. – СПб.: СЗПИ, 1999. – №13 – С.47 – 51.

39. 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/mo.2022.5-6.32. – EDN: VMKSHT

40. 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.

41. 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/mo.2021.3.13. – EDN: PYYWQD.

42. Максаров, В.В. Теория и методы моделирования и управления процессом стружкообразования при лезвийной механической обработке / В.В. Максаров. – Дисс. док. техн. наук – СПб.: ГТУ, 1999. – 340 с.

43. Максаров, В.В. Теория и практика моделирования и управления в области прогнозирования динамических свойств технологических систем /
В.В. Максаров, Ю. Ольт. // Металлообработка. – 2012. – № 2. – С.7 – 13.

44. Максаров, B.B. Технологическое обеспечение качества расточных поверхностей изделий ИЗ алюминиевого АМц сплава на основе высокочастотного волнового воздействия / В.В. Максаров, А.О. Минин, В.П. Захарова // Цветные металлы. -2023. - № 4. - C. 90-95. DOI: 10.17580/tsm.2023.04.12.

45. Максаров, В.В. Технологическое обеспечение качества поверхностей изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов при токарной обработке / В.В. Максаров, А.Д. Халимоненко, Т.С. Голиков, Д.Д. Максимов // Металлообработка. – 2020. – № 5-6(119-120). – С. 3-12.

46. Максимов, Д.Д. Технологическое обеспечение и повышение качества сложнопрофильных поверхностей из алюминиевого сплава марки АМц: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Максимов Дмитрий Дмитриевич, 2024. – 160 с. – EDN LLAPIA.

47. Маслов, Е.Н. Основные направления в развитии теории резания абразивным, алмазным и эльборовым инструментом: Новости технологии: Серия «Обработка деталей абразивным, алмазным и эльборовым инструментом» / Е. Н. Маслов, Н. В. Постникова. – Москва: Машиностроение, 1975. – 48 с.

48. Минин, А.О. Ультразвуковые колебания, как способ повышения качества изделий из труднообрабатываемых материалов / А.О. Минин // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении: Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Тула, 06-08 апреля 2022 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2022. – С. 128-130.

49. **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/mo.2022.2.16. – EDN: YUWQXM.

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

51. Минин, А.О. Технологическое обеспечение качества расточных поверхностей изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов / А.О. Минин // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении: Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции, Тула, 18-20 апреля 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. – С. 135-137.

52. Мороз, Л.С., Чечулин Б.Б., Полин И.В. и др. Титан и его сплавы. Санкт-Петербург: Государственное союзное издательство судостроительной промышленности, 1960.514 с.

53. Мурашкин, Л.С. Исследования динамики процесса резания / Л.С. Мурашкин. – Дис. док. техн. наук – Л.: ЛПИ, 1958. – 348 с.

54. Мурашкин, Л.С. Прикладная нелинейная механика станков / Л.С. Мурашкин, С.Л. Мурашкин. – Л.: Машиностроение, 1977. – 192 с.

55. Мурашкин, С.Л. Колебания и устойчивость движения систем станков с

нелинейными характеристиками процесса резания / С.Л. Мурашкин. – Дис. докт. техн. наук. – Л.: ЛПИ, 1980. – 548 с.

56. Мурашкин, С.Л. Технология машиностроения, Колебания и точность при обработке материалов резанием: Учеб. пособие / С.Л. Мурашкин, А.Г. Схиртладзе, А.М. Соловейчик, Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, Б.Я. Розовский, В.В. Дегтярев. Под редакцией С. А. Мурашкина СПб.: Изд–во СПбГПУ, 2003, 280 с.

57. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Новик Ф.С., Арсов Я.Б. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с., ил.

58. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент: Учеб. пособие для машиностроит. техникумов. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент / ред. С.А. Рубинштейн, Г.В. Левант, Н.М. Орнис, Ю.С. Тарасевич. – Москва: Машиностроение, 1968. – 392 с.

59. Палаев, А.Г. Технология, оборудование ультразвуковой-упрочняющефинишной обработки металлов и контроль качества / А.Г. Палаев, А.И. Потапов, В.В. Максаров, Н.А. Палаев// Металлообработка. – 2011. – № 6(66). – С. 38-41.

60. Патент № 199454 U1 Российская Федерация, МПК В24В 39/02. Устройство для растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов: № 2020110211: заявл. 10.03.2020: опубл. 02.09.2020 / В.В. Максаров, В.А. Красный, Т.С. Голиков; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

61. Патент № 2124430 С1 Российская Федерация, МПК В24В 39/00, 1/04.
Устройство для ультразвуковой упрочняюще-чистовой обработки поверхностей:
№ 98100977/02: заявл. 20.01.1998: опубл. 10.01.1999/ Ю.В. Холопов; заявитель Ю.В. Холопов.

62. Патент № 2201863 С1 Российская Федерация, МПК В24В 39/00, 39/04. Устройство для ультразвуковой финишной обработки поверхностей: № 2001128845/02: заявл. 25.10.2001: опубл. 10.04.2003/ Ю.В. Холопов; заявитель Ю.В. Холопов.

63. Патент № 2205735 С2 Российская Федерация, МПК В24В 39/00, 35/00,
1/04. Устройство для ультразвуковой финишной обработки поверхностей: №
2001122207/02: заявл. 08.08.2001: опубл. 10.06.2003/ Ю.В. Холопов,
С.В. Розбицкий; заявитель Ю.В. Холопов.

64. Патент № 2238839 С1 Российская Федерация, МПК В24В 39/00, 39/04.
Устройство для чистового точения и финишной обработки поверхностей деталей ультразвуком: № 2003124125/02: заявл. 31.07.2003: опубл. 27.10.2024/
Ю.В. Холопов; заявитель Ю.В. Холопов.

65. Патент № 2252128 С1 Российская Федерация, МПК В24В 39/00, 1/04.
Система для ультразвуковой обработки поверхностей деталей: № 2004100795/02:
заявл. 08.01.2004: опубл. 20.05.2005/ Ю.В. Холопов, С; заявитель Ю.В. Холопов.

66. Патент № 2718503 С1 Российская Федерация, МПК В23К 26/342, В23К 26/144, В23К 26/70. Способ формирования поверхностного композиционного слоя в металлах: № 2019136910: заявл. 18.11.2019: опубл. 08.04.2020 / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.Р. Асютин, А.А. Дренин, А.В. Пересторонин; заявители А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.Р. Асютин, А.А. Дренин, А.А. Дренин, А.В. Пересторонин.

67. Патент № 2787289 С1 Российская Федерация, МПК В23В 1/00, В23Р 23/04, В23В 25/00, В23Р 25/00. Способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких алюминиевых сплавов: № 2022115926: заявл. 14.06.2022: опубл. 9.01.2023 / В.В. Максаров, А.Е. Ефимов, А.О. Минин; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

68. Патент № 94176 U1 Российская Федерация, МПК В06В 3/00. Ультразвуковой преобразователь: № 2010100043/22: заявл. 11.01.2010: опубл. 20.05.2010 / А.Г. Палаев, А.Н. Палаев; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Северо-западный государственный заочный технический университет (СЗТУ). 69. Патент № 94488 U1 Российская Федерация, МПК В06В 3/00. Ультразвуковая колебательная система: № 2010100204/22: заявл. 11.01.2010: опубл. 27.05.2010 / А.Г. Палаев, А.Н. Палаев; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Северозападный государственный заочный технический университет (СЗТУ).

70. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов. Учеб. пособие для вузов. М., «Высш. школа», 1974.

71. Пуш, В.Э. Малые перемещения в станках / В.Э. Пуш. – М.: Машгиз, 1961. – 123 с.

72. Розенберг, А. М. Элементы теории процесса резания металлов [Текст]
/ А. М. Розенберг, А. Н. Еремин. — Москва; Свердловск: Машгиз. [Урало-Сиб. отдние], 1956. — 319 с.: ил.: 23 см.

73. Сидняев, Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебное пособие для магистров: учебное пособие для студентов и аспирантов вузов, обучающихся по специальности «Прикладная математика»: Магистр. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных / Н. И. Сидняев. – Москва: Юрайт, 2012. – 399 с.

74. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов. Попилов Л.Я., Л., «Машиностроение», 1971 г. 544 стр. Табл. 278. Илл. 274. Библ. 369 назв.

75. Старков, В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.

76. Суранов, А.Я. Справочник по функциям LabView / А.Я. Суранов. – М.:ДМК Пресс, 2007. – 536 с.

77. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов. – Москва: Машиностроение, 1987. – 206 с.

78. Тлустый, Дж. Сравнительное использование ударного и гармонического возбуждения при исследовании конструкций металлорежущих

станков / Дж. Тлустый, К.С. Лоу, К. Партибаи. // Труды Американского общества инженеров–механиков. Конструирование и технология машиностроения. Пер. с англ. – М.: Мир – 1974. – №1 – С. 89 –99.

79. Тлустый, И. Автоколебания в металлорежущих станках / И. Тлустый. // Пер. с чеш. – М.: Машгиз, 1956. – 395 с.

80. Ультразвук и диффузия в металлах. Кулемин А.В., М., «Металлургия», 1978. 200 с.

81. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. А. И. Марков. Издательство «Машиностроение», 1968. стр. 365.

82. Филипенко, И.А. Обработка отверстий в изделиях из алюминиевого сплава марки АМц на основе высокочастотного волнового воздействия / И.А. Филипенко, А.О. Минин // Нанофизика 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.

83. Шутилов, В. А. Основы физики ультразвука: Учеб. Пособие. – Л.: Издво Ленингр. ун-та, 1980 – Ил. – 78, табл. – 22, библиогр. – 109 назв. с. 1-280.

84. Эльясберг, М.Е. Автоколебания металлорежущих станков / М.Е. Эльясберг. // Теория и практика. – СПб.: Изд. ОКБС, 1993. – 180 с.

85. Эльясберг, М.Е. Определение оптимального состава гаммы горизонтально-расточных станков / М.Е. Эльясберг, А. И. Фукс. — М.: НИИМАШ, 1969. — 65 с.

86. Эльясберг, М.Е. Повышение устойчивости автоколебательной системы при воздействии периодического изменения скорости резания / М.Е. Эльясберг, М.Г. Биндер. // Станки и инструмент. – 1989. – №10. – С. 19 – 21; №11. – С. 6 – 8.

87. Эльясберг, М.Е. Упрощенная модель многоконтурной динамической системы для расчета станка на устойчивость при резании / М.Е. Эльясберг, В.А. Демченко. // Станки и инструмент, 1987. – №8 – С. 4 – 7.

88. Ящерицын, П. И. Основы резания материалов и режущий инструмент:
[Учебник для машиностроит. спец. вузов] / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко,
Н.И. Жигалко. – 2-е изд., доп. и перераб. – Мн.: Выш. школа, 1981. – 560 с., ил.

89. Ahmed, N., Mitrofanov, A. v., Babitsky, V. I., & Silberschmidt, V. v. (2007). Analysis of forces in ultrasonically assisted turning. Journal of Sound and Vibration, 308(3–5), 845–854. DOI: 10.1016/j.jsv.2007.04.003.

90. Airao, J., Nirala C. K. Analytical Modeling of Machining Forces and Friction Characteristics in Ultrasonic-Assisted Turning Process //Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2022. – T. 144. – №. 2. doi.org/10.1115/1.4052129

91. Airao, J., Nirala C. K. Machinability analysis of Titanium 64 using ultrasonic vibration and vegetable oil //Materials and Manufacturing Processes. – 2022. – T. 37. – №. 16. – C. 1893-1901. doi.org/10.1080/10426914.2022.2065015

92. Arka, G.N. et al. Acoustic horn tool assembly design for ultrasonic assisted turning and its effects on performance potential //Materials and Manufacturing Processes. – 2022. – T. 37. – № 3. – C. 260-270. doi.org/10.1080/10426914.2021.2016819

93. Astashev, V.K., Pichugin, K.A., Li, X., Meadows, A., & Babitsky, V.I. (2020). Resonant Tuning of Langevin Transducers for Ultrasonically Assisted Machining Applications. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 67(9), 1888–1896.

94. Bertolini, R., Ghiotti A., Bruschi S. Cryogenic ultrasonic vibration assisted turning to texturize AZ31 magnesium alloy surfaces //Discover Mechanical Engineering.
2022. – T. 1. – №. 1. – C. 6. doi.org/10.1007/s44245-022-00007-y

95. Brecher, C. et al. Optimal process parameters for parallel turning operations on shared cutting surfaces //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2015. – T. 95. – C. 13-19.

96. Brinksmeier, E. et al. Cutting forces, tool wear and surface finish in high speed diamond machining //Precision Engineering. – 2017. – T. 49. – C. 293-304.

97. Deswal, N., Kant R. Experimental investigation on magnesium AZ31B alloy during ultrasonic vibration assisted turning process //Materials and Manufacturing

Processes. – 2022. – T. 37. – №. 15. – C. 1708-1714. doi.org/10.1080/10426914.2022.2039701

98. Hoang, T.D. et al. Ultrasonic assisted nano-fluid MQL in deep drilling of hard-to-cut materials //Materials and Manufacturing Processes. – 2022. – T. 37. – №. 6. – C. 712-721. doi.org/10.1080/10426914.2021.1981936

99. J. Airao and C.K. Nirala, Machinability of Ti-6Al-4V and Nimonic-90 in ultrasonic-assisted turning under sustainable cutting fluid, Materials Today: Proceedings, doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.312.

100. Li, X., Meadows, A., Babitsky, V., & Parkin, R. (2015). Experimental analysis on autoresonant control of ultrasonically assisted drilling. Mechatronics, 29, 57–66. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2015.05.006.

101. Maurotto, A., Roy, A., Babitsky, V.I., & Silberschmidt, V. v. (2012). Analysis of machinability of Ti- and Ni-based alloys. Solid State Phenomena, 188, 330– 338.

102. Morshed, R.M., Navid W.U., Showkhin S.A. Improvement of Surface Roughness by Ultrasonic Vibration of Aluminum Drilling: дис. – Department of Mechanical and Production Engineering (MPE), Islamic University of Technology (IUT), Board Bazar, Gazipur-1704, Bangladesh, 2023.

103. Peng, P. et al. Study on the edge defects of high volume fraction 70% SiCp/Al composites in ultrasonic-assisted milling //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2022. – T. 122. – No. 1. – C. 485-498. doi.org/10.1007/s00170-021-08586-y

104. Rech, J., Moisan A. Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels //International Journal of Machine Tools and Manufacture. $-2003. - T. 43. - N_{\odot}$. 5. -C. 543-550.

105. Sun, Y.J. et al. Kinematic analysis of the dynamic contact in ultrasonicassisted cutting based on the moving frame method //Journal of Materials Processing Technology. – 2022. – T. 309. – C. 117756. doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117756 106. Zhou, W. et al. Towards understanding the ploughing friction mechanism in ultrasonic assisted grinding with single grain //International Journal of Mechanical Sciences. – 2022. – T. 222. – C. 107248. doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107248.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Планирование экспериментального исследования и его результаты

Таблица А.1 – Результаты экспериментального исследования по определению влияния технологических параметров обработки на шероховатость внутренней поверхности *Ra*, мкм (составлено автором)

Номер опыта	<i>x</i> ₀	<i>x</i> ₁	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃	<i>x</i> ₄	$x_{1}x_{2}$	x_1x_3	x_1x_4	$x_{2}x_{3}$	$x_2 x_4$	$x_{3}x_{4}$	x_{1}^{2}	x_{2}^{2}	x_{3}^{2}	x_{4}^{2}	Ra
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1	1	1	1	0,565
2	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	1	1	1	1	0,628
3	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	1	1	1	1	0,521
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	1	1	1	1	0,545
5	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	1	1	1	1	0,539
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	1	1	1	1	0,598
7	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	1	1	1	1	0,653
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	1	1	1	1	0,773
9	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	1	1	1	1	0,794
10	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	1	1	1	1	0,905
11	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	1	1	1	1	0,534
12	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	1	1	1	1	0,815
13	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	1	1	1	1	0,894
14	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	1	1	1	1	0,865
15	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	1	1	1	1	0,915
16	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1	1	1	1	1,02
17	+1	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0,853
18	+1	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	1,21
19	+1	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0,945
20	+1	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0,535
21	+1	0	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0,508
22	+1	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0,615
23	+1	0	0	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0,718
24	+1	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0,788
25	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,784
26	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,745
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,694
28	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,801
29	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,754
30	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,723
31	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,715

Таблица А.2 – Результаты экспериментального исследования по определению влияния технологических параметров обработки микротвердость H_{ν} , МПа (составлено автором)

Номер опыта	x_0	x_1	<i>x</i> ₂	<i>x</i> ₃	<i>x</i> ₄	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	$x_{2}x_{3}$	$x_2 x_4$	x_3x_4	x_{1}^{2}	x_{2}^{2}	x_{3}^{2}	x_{4}^{2}	H_{v}
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1	1	1	1	430,688
2	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	1	1	1	1	402,288
3	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	1	1	1	1	446,983
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	1	1	1	1	428,736
5	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	1	1	1	1	420,878
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	1	1	1	1	392,998
7	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	1	1	1	1	431,787
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	1	1	1	1	422,929
9	+1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	1	1	1	1	425,214
10	+1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	1	1	1	1	421,516
11	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	1	1	1	1	432,582
12	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	1	1	1	1	428,687
13	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	1	1	1	1	421,742
14	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	1	1	1	1	402,318
15	+1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	1	1	1	1	434,897
16	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1	1	1	1	432,444
17	+1	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	435,574
18	+1	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	375,38
19	+1	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	368,846
20	+1	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	425,774
21	+1	0	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	421,369
22	+1	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	381,531
23	+1	0	0	0	+2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	379,323
24	+1	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	366,374
25	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	397,619
26	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	386,357
27	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	386,494
28	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	392,714
29	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	402,259
30	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	388,682
31	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	385,778

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Технические характеристики станка, приборов

Таблица Б.1 – Технические характеристики прибора *SURFTEST SJ-210* (составлено автором)

Модель	SJ-210 P				
N⁰	178930 – 2 D				
Назначение	Измерение шероховатости				
Диапазон	измерений				
По оси Z	360 мкм				
Блок п	ривода				
Скорость измерения	0,25 мм/с; 0,5 мм/с; 0,75 мм/с				
Дат	тчик				
Метод измерений	Индуктивность дифференциальная				
Щуп	Алмазный наконечник				
Радиус опоры	40 мм				
Измерительное усилие	0,75 мН				
Дисплейный блок					
Профили	Профиль шероховатости (R); R-Motif; DF-Профиль и др.				
Стандарты шероховатости	ENISO; VDA; JIS; ANSI и пользовательские				
Длина оценки (L)	0,08 мм; 0,25 мм; 0,8 мм; 2,5 мм				
Допуск	Цветная индикация				
Интерфейс	USB; Digimatic				
Источник питания	Блок или аккумулятор				

Таблица Б.2 – Технические характеристики микротвердомера $\varPi MT\text{-}3M$ (составлено

автором)

Характеристика	Значение						
Испытательные нагрузки	0,0196~4,9 H						
Предел допускаемой погрешности нагрузок в диапазонах основном/дополнительном, не более	±2 %						
Выдержка образца под нагрузкой	10-15 сек						
Используемые индентора	Алмазная пирамидка квадратного сечения, алмазная пирамидка ромбического сечения, алмазная пирамидка треугольного сечения						
Расстояние от индентора до опорного столика	0~70 мм						
Расстояние от центра отпечатка до станины	100 мм.						
Габаритные размеры, мм. (ДхШхВ)	270x290x470						
Macca	22 кг						
Электропитание	~220V/50Hz						
Мощность	0,02 кВт						

Таблица Б.3 – Технические характеристики инвертированного микроскопа *Leica DM* 2500 (составлено автором)

Параметр прибора	Характеристика						
	Проходящий свет:						
Metol Koutpactupopauug	светлое/темное поле, фазовый контраст,						
метод контрастирования	поляризация, интерференционный контраст						
	Отраженный свет: флуоресценция						
Оси проходящего света	Осветитель в отдельном корпусе						
	Флуоресцентный осветитель отраженного света, для						
	окуляров с полем зрения до 22, включает: 5-						
	позиционный револьвер для фильтров центрируемые						
Оси отраженного света	апертурную и полевую диафрагмы заслон для						
	подавления излишнего света						
	Серый фильтр и заслонка светового пучка,						
	переключаемые						
	С держателем конденсора						
X/V CTOTHER	Телескопическая ручка перемещения столика,						
АЛ Г СТОЛИК	устанавливаемая справа или слева						
	Право/левостороннее управление						
Револьверная турель смены	Ручная 6-ти/7-ми позиционная для объективов с						
объективов	резьбой M25 пластина призмы объектива						
	Колесо фокусировки для грубой/точной фокусировки						
	Регулировка высоты						
Фокусировка	Скорость включения (дополнительно)						
	Два режима установки шага точной фокусировки (1 и						
	4 мкм)						

Таблица Б.4 – Технические характеристики станка токарно-винторезного JET GHB-

1340A DRO (составлено автором)

Параметр	Значение
Напряжение, В	400
Диаметр обточки над станиной, мм	330
Конус шпинделя	МК-5
Ширина станины, мм	187
Мощность двигателя, кВт	2
Масса, кг	650
Макс. размер резца, мм	16x16
Количество метрических резьб	23
Диапазон метрической резьбы, мм	0,45-10
Длина, мм	1905
Ширина, мм	762
Высота, мм	1200

Таблица Б.5 – Технические характеристики лабораторного блока питания Longwei LW-K3010D (30B 10A) (составлено автором)

Параметр	Значение				
Тип блока питания	Импульсный				
Номинальное напряжение питания	220/110 B				
Диапазон регулировки выходного	0 - 30 B				
напряжения					
Диапазон регулировки токовой	0 10 4				
защиты	0 - 10 A				
Индикония	Напряжение, ток (три или четыре				
пндикация	значащие цифры)				
Габариты	233*71*159 мм (д*ш*в)				
Масса	1.335 кг				

Таблица Б.6 – Технические характеристики генератора сигналов JUNCE JDS6600 -

60М (составлено автором)

Параметр	Значение
Характеристики генератора сигналов	
Количество каналов	2
Полоса пропускания	60 МГц
Частота дискретизации	266 МВыб/с
Диапазон частот	0,01 мкГц - 60 МГц
Длина волны	2048 бит
Вертикальное разрешение	14 бит
Волновые характеристики	
Форма сигналов	синусоидальная, прямоугольная, треугольная,
	импульсная (коррекция рабочего цикла),
	пилообразная, шумовая, Partia Sine, CMOS, DC
	level, Half-wave, Full-Wave, Pos-Ladder, Neg-
	Ladder, Noise, Exponential Rise, Exponential Fall,
	Tone, Sinc Pulse, Lorentz Pulse и произвольные
	сигналы
Частотные характеристики	
Синусоидальный сигнал	0,01 мкГц - 60 МГц
Прямоугольный сигнал	0,01 мкГц - 15 МГц
Пилообразный сигнал	0,01 мкГц - 15 МГц
Импульсный сигнал	0,01 мкГц - 6 МГц
TTL/CMOS	0,01 мкГц - 6 МГц
Произвольный сигнал	0,01 мкГц - 6 МГц
Время нарастания сигнала	≤15 нс
Диапазон регулировки длительности	30 нс - 4000с
импульса	
Разрешение	0,01 мкГц
Точность частоты	± 20 ppm
Стабильность частоты	±1 ppm / 3 часа
Характеристики синусоидального сигн	ала
Гармоническое искажение	<1 МГц: ≥45 дБ
	1 МГц - 20 МГц: ≥ 40 дБ
Полное гармоническое искажение	< 0.8% (20 Гц - 20 кГц)
Характеристики прямоугольного сигн	ала
Выброс	$\leq 5\%$
Рабочий цикл	0,1 - 99,9%
Характеристики пилообразного сигнал	18
Линейность	>98% (0,01 Гц - 10 кГц)
Амплитудные характеристики	
Диапазон выходной амплитуды	2mVpp-20Vpp
Частота	$\leq 10 \ M\Gamma$ ц
Разрешающая способность по	1 мВ
амплитуде	
Стабильность амплитуды	± 0,5% / 5 часов
Выходной сигнал	
Импеданс	50 Om ± 10%

Параметр	Значение							
Характеристики смещения постоянного тока								
Амплитуда выходного сигнала	>4 B							
Диапазон регулировки смещения	от -9,99 В до 9,99 В							
Разрешение смещения	0,01 B							
Фазовые характеристики								
Диапазон	0 - 359,99°							
Разрешение	0,01°							
TTL/CMOS выход								
Низкий уровень	&< 0,3 B							
Высокий уровень	1 - 10 B							
Время нарастания/спада	≤20 нс							
Характеристики частотомера								
Диапазон	1 Гц - 100 МГц							
Точность измерения	время захвата: 0,01 - 10 с							
Характеристики счетчика								
Диапазон измерения	0 - 4294967295							
Режим	2 вида режима сопряжения, DC и AC							
Режим подсчета	ручной							
Диапазон входного сигнала	2mVpp-20Vpp							
Измерение ширины длительности импульса	0,01 мкс (разрешающая способность), 20 с							
	(максимальное измеряемое время)							
Период	0,01 мкс (разрешающая способность), 20 с							
	(максимальное измеряемое время)							
Характеристики генератора качающейся частоты								
Каналы	СН1 или СН2							
Тип развертки	линейная, логарифмическая							
Длительность периода изменения частоты	0,1 - 999,9 c							
Диапазон настройки	произвольно устанавливается между							
	начальной и конечной точками							
Режимы свипирования	вверх, вниз, вверх-вниз							
Характеристики генератора пачки импулы	сов							
Количество импульсов	1 - 1048575							
Режимы	Manual Trig, CH2 Trig, Ext.Tring (AC),							
	Ext.Tring (DC)							
Общие характеристики								
Дисплей	2,4-дюймовый цветной ТFT дисплей, 320 х							
	240 пикселей							
Языки меню	английский							
Интерфейс	USB, UART с уровнями TTL							
Питание	$DC 5 B \pm 0.5 B$							
Рабочая температура	0 - 40°C							
Влажность	< 80%							
Габариты	194 х 178 х 69 мм							
Вес нетто	600 г							

Таблица Б.7 – Технические характеристики прибора для вибродиагностики Pruftechnik VibXpert EX (составлено автором)

Параметр	Значение					
	2 аналоговых канала (А и В), настраиваемые:					
	• Напряжение (AC/DC, ±30 B max.)					
	• Ток (AC/DC, ±30 мА max.)					
	• ICP® сигнал (2 мА, 24 В max.)					
	• LineDrive сигнал (10 В, 10 мА max.)					
измерительные каналы	1 аналоговый канал: датчик температуры (NiCrNi)					
	1 цифровой канал:					
	1+импульсный вход (скорость вращения, триггер,					
	фазовая отметка).					
	Импульсный и АС сигналы: 0В26В или -26В 0В					
	Частотный диапазон 0.5 Гц до 40 кГц					
Параметры – аналоговый	Динамический диапазон (измеренный/общий) 96 дБ					
измерительный канал (А и В)	136 дБ					
	Частота дискретизации < 131 кГц на канал					
Drwowy	На стробоскоп: TTL					
Быходы	На наушники и для обработки сигнала					
Помати	RAM, внутренняя 64 МБ					
Память	Флеш-карта (CompactFlash) 1 ГБ					
Дисплей	LCD, с подсветкой, 480×320 пикселей (1/2 VGA)					
	Скорость вращения 10200000 об/мин / ±1‰/ ±1					
	об/мин					
пределы измерении/точность	Температура -50+1000°С (NiCrNi)/ ±1% / ±1°С					
	Ускорение зависит от подсоединенного датчика					
	Fmin 0.5 Гц 10 Гц, настраиваемая					
	Fmax 200 Гц 51.2 кГц, настраиваемая					
БПФ	Число линий 400 102400					
	Окна Rectangular, Hanning, Flattop, Hamming,					
	Blackman, Bartlett, Kaiser					

Продолжение таблицы Б.7

Параметр	Значение
	Многорежимный (без маршрута)
	• Значения величин: вибрация (ускорение,
	скорость, смещение), ток, напряжение (AC / DC),
	ударные импульсы (состояние подшипников),
	температура, скорость вращения
	• Сигналы: спектр (амплитуда, огибающая),
	временной сигнал, кепстр, фаза (cross-channel),
	орбиты, измерения при выбеге, определение
	собственных частот
	Сбор данных (по маршруту)
Режимы работы	• Навигация посредством «дерева», списка или
	графиков
	 Оптимизация процесса для быстрого сбора
	данных
	Балансировка (дополнительно)
	• Динамическая балансировка в 1 или 2
	плоскостях
	Запись (дополнительно)
	• Запись общих значений и спектра
	• Триггер по времени/событию
	• История записеи
Питание	Литий-ионный аккумулятор (7.2В / 4.8Ач).
	Перезаряжаемыи. Время зарядки < 5 часов
	Хранения -20°С +60°С
Гемпературныи диапазон	Рабочии -10°С +50°С
	Зарядки 0°С +50°С
Класс защиты	1Роз, пылезащищенный и водонепроницаемый
Взрывобезопасность	EXII 2 G Ex 1b IIC T4
Размеры	250 x 220 x 37 мм (ДхШхВ)
Bec	2.3 кг

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Патент на способ растачивания отверстий в изделиях из коррозионностойких

алюминиевых сплавов

RU (11) (51) MIIK B23B 1/00 (2006.01) B23P 23/04 (2006.01) B23B 25/00 (2006.01) B23P 25/00 (2006.01) ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ (52) CIIK B23B 1/00 (2022.08); B23P 23/04 (2022.08); B23B 25/00 (2022.08); B23P 25/00 (2022.08) (21)(22) Заявка: 2022115926, 14.06.2022 (72) Автор(ы): Максаров Вячеслав Викторович (RU), (24) Дата начала отсчета срока действия патента: Ефимов Александр Евгеньевич (RU), 14.06.2022 Минин Александр Олегович (RU) Дата регистрации: (73) Патентообладатель(и): 09.01.2023 федеральное государственное бюджетное Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 14.06.2022

образовательное учреждение высшего N образования "Санкт-Петербургский горный уни верси тет" (RU) -(45) Опубликовано: 09.01.2023 Бюл. № 1 8 (56) Список документов, цитированных в отчете Адрес для переписки: о поиске: Максаров В.В. и др. 1 190106, Санкт-Петербург, 21 линия, В.О., 2, "Технологическое обеспечение качества N ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский ГУ", поверхностей изделий из коррозионно-стойких 8 Патентно-лицензионный отдел алюминиевых сплавов при токарной обработке", Металлообработка N 5-6 (119-120), G 2020, c.3-12. RU 2293012 C2, 10.02.2007. CN 113043155 A, 29.06.2021. CN 109434268 A, 08.03.2019. C

(54) СПОСОБ РАСТАЧИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ИЗДЕЛИЯХ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

(57) Реферат: 6 Изобретение относится к растачиванию отверстий в изделиях из коррозионных 2 алюминиевых сплавов. Осуществляют установку заготовки в кулачковый патрон, а стержня 8 расточной оправки в резцедержатель. Осуществление генерации уль колебаний с дальнейшей ультразвуковых передачей N ультразвукового воздействия с помощью магнитострикционного преобразователя и формирование энергии бегущих волн до зоны резания в режиме двойной амплитуды. Расточной резец закрепляют в стержень расточной оправки. R С помощью осевого элемента расточной оправки **устана** вливают магнитострикционный преобразователь, угол наклона которого

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

определяют относительно направления вектора схода стружки. Направление ультразвукового волнового воздействия в процессе работы противоположно указанному направлению вектора схода стружки. Ультразвуковая головка поджата к приливу на передней поверхности расточного резца, выполняющего движение в направлении подачи, и формирует энергию бегущих волн от точки контакта с приливом передней поверхности расточного резца в направлении, противоположном направлению вектора схода стружки. В результате повышается качество поверхностей в результате растачивания отверстий в изделиях и снижается износ режущего инструмента. 7 ил., 1 пр.

(19)

2 787 289⁽¹³⁾ C1

π

.

131

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт о промышленном внедрении результатов диссертации

Утверждаю

Первый заместитель генерального директора АО ВО «Электроаппарат» Грицаев А.Н.

Дата (18» декабря 2024 г. METHADBAL

АКТ о внедрении результатов кандидатской диссертации Минина Александра Олеговича по научной специальности 2.5.6. Технология машиностроения

Комиссия в составе:

<u>Председатель</u>: первый заместитель генерального директора – Грицаев Алексей Николаевич

Члены комиссии:

Главный конструктор - Карпов Андрей Леонидович

Советник генерального директора по технологии – Григуть Валерий Николаевич

составили настоящий акт (справку) о том, что результаты диссертации на тему «Технологическое обеспечение качества растачиваемых поверхностей изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов на основе высокочастотного волнового воздействия», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в производственном процессе АО ВО «Электроаппарат» при разработке технологии обработки внутренних поверхностей корпусов элегазовых трансформаторов.

Обработка внутренних поверхностей корпусов посредством растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия по предлагаемому способу позволила достигнуть заданного качества поверхности, повысить эксплуатационные характеристики изделия.

Результаты применения высокочастотного волнового воздействия в процессе растачивания внутренней поверхности корпуса элегазового трансформатора показали, что шероховатость поверхности может достигать Ra = 0,7 - 0,9 мкм по всей поверхности изделия, при этом обеспечивается снижение величины и периодичность наростообразования.

Результаты диссертационного исследования Минина А.О. могут быть использованы в технологических процессах финишного изготовления внутренних поверхностей элегазовых трансформаторов, которым К предъявляются повышенные требования по качеству.

обработки Благодаря применению предлагаемого способа для внутренних поверхностей элегазовых трансформаторов посредством растачивания с применением высокочастотного волнового воздействия, возможно повысить эффективность процесса обработки вышеуказанных изделий.

Председатель комиссии

Первый заместитель

Генерального директора

Члены комиссии:

Главный конструктор

Советник генерального директора по технологии

Грицаев А.Н. Карпов А.Л.

Григуть В.Н.