

На правах рукописи



Карлина Юлия Игоревна

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ УДАЛЕНИЯ ЗАУСЕНЦЕВ НА
МАЛОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЯХ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ БЕРИЛЛИЕВОЙ
БРОНЗЫ БрБ2 И СПЛАВА 29 НК, НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ
РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА ТОЧЕНИЯ И
ПАРАМЕТРОВ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ**

Специальность 2.5.5 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО ИРНИТУ)

Научный руководитель **Журавлев Диомид Алексеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств ФГБОУ ВО ИРНИТУ, г. Иркутск

Официальные оппоненты: **Лившиц Александр Валерьевич**, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск

Никитенко Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологическая информатика и информационные системы», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж

Защита состоится 10 июня 2022 г. в 13:00 ч на заседании диссертационного совета 24.2.316.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КнАГУ») по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд.201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на официальном сайте организации https://sovnet.knastu.ru/diss_defense/show/173.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета, а также на электронную почту: diss.material@yandex.ru

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, к.т.н.:



Проценко Александр
Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Во многих высокотехнологичных отраслях промышленности – аэрокосмической, приборостроительной, военно-промышленном комплексе, наличие заусенцев на деталях не допускается. Тенденция к повышению точности и качества, уменьшению габаритных размеров изделий обуславливает необходимость минимизации размеров заусенцев и совершенствования технологий их удаления. Так, доля операций по удалению заусенцев в радиоэлектронной промышленности достигает до 50% от трудоёмкости выпуска детали. Отказ от применения ручной слесарной операции по удалению заусенцев под микроскопом значительно снижает трудоемкость выпуска деталей и повышает производительность труда.

Интенсификация процесса получения качественных малогабаритных высокоточных деталей, типичных для предприятий радиоэлектронной промышленности, базируется на новом подходе двухстадийного удаления заусенца с ростом производительности и качества обработки деталей. Двухстадийное удаление – это в данном случае точение с получением минимального размера корня заусенцев и последующее удаление заусенцев перспективным термоимпульсным методом.

В патентах на термоимпульсные установки и исследованиях, посвященных термоимпульсному удалению заусенцев, приведено описание систем высокоточного дозирования и управления режимами обработки, что позволяет использовать метод для высокоточных деталей. Множество исследований посвящено удалению заусенцев с деталей больших и средних габаритов. Применение термоимпульсного удаления заусенцев с малогабаритных высокоточных деталей имеет свои особенности. Условием успешного удаления заусенцев с таких деталей термоимпульсным методом является обеспечение допустимых размеров заусенцев на этапе лезвийной обработки.

В диссертационной работе выполнен комплекс исследований на примере производства деталей коаксиальных радиокомпонентов из бериллиевой бронзы и из сплава 29 НК на станках с ЧПУ. Коаксиальные радиокомпоненты состоят из внутреннего и наружного проводников и изолятора между ними. Для герметичных соединителей корпуса и внутренние проводники изготавливают из сплава 29 НК для получения согласованных по величине коэффициентов термического расширения спаев со стеклом С52-1. Для негерметичных соединителей проводники изготавливают из бериллиевой бронзы, которая обладает свойством упругости, что позволяет плотно обжать ламели гнезда.

Применяемые методы удаления заусенцев имеют различную стоимость в зависимости от количества и характера заусенцев. Неустойчивость технологии лезвийной обработки с точки зрения появления заусенцев приводит к неопределенности времени и затрат на дальнейшую обработку. В связи с этим, актуальной является задача выпуска малогабаритных деталей из бериллиевой бронзы и сплава 29 НК без заусенцев с минимальными издержками. Несмотря на имеющийся задел, проблема удаления заусенцев изучена недостаточно. Это подчеркивает актуальность и своевременность задач, решаемых в диссертационной работе.

Актуальность работы подтверждается тем, что исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90184.

Степень разработанности темы исследования

На основе литературного обзора установлено, что полностью предотвратить появление заусенцев на этапе лезвийной обработки материалов бериллиевая бронза и сплав 29 НК не удастся. Уровень развития термоимпульсного метода удаления заусенцев, систем управления дозированием газовой смеси, контроля давления и температуры позволяет применять его для удаления заусенцев с малогабаритных высокоточных деталей. Изучению процессов термоимпульсной обработки посвящены работы зарубежных и российских ученых L.K. Gillespie, Н.И. Пака, С.А. Шikuнова, С.И. Адонина, В.И. Манжалея, А.В. Лосева, С.И. Планковского, О.В. Шипуль, О.В. Трифонова, О.С. Борисова, J.K. Paik, И.С. Мануйловича. Анализ исследований показал, что созданные модели процесса удаления заусенцев термоимпульсным методом учитывают не все факторы, оказывающие влияние на процесс, а также являются достаточно сложными для применения ввиду наличия 25 факторов, комбинация которых оказывает влияние на результат вычислений. Исследований, отражающих влияние режимов лезвийной обработки на параметры заусенцев, необходимые для последующей термоимпульсной обработки малогабаритных высокоточных деталей проведено недостаточно.

Целью данного исследования является повышение эффективности процесса удаления заусенцев путем обеспечения рациональных параметров течения для создания благоприятных условий последующей физико-технической термоимпульсной обработки малогабаритных высокоточных деталей из бериллиевой бронзы БрБ2 и сплава 29 НК.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Оценить влияние параметров режима течения малогабаритных высокоточных деталей, выполненных из бериллиевой бронзы БрБ2 и сплава 29 НК, на размеры корней образующихся заусенцев для обеспечения минимальных размеров корней.
2. Экспериментально установить рациональные параметры режима резания, обеспечивающие минимальные размеры корня заусенцев.
3. Получить эмпирические регрессионные полиномиальные зависимости, раскрывающие взаимосвязь между параметрами режима течения и размерами заусенцев.
4. Экспериментально установить рациональные параметры термоимпульсной обработки деталей, обеспечивающие удаление заусенцев.
5. Разработать рациональный вариант заполнения камеры термоимпульсной установки деталями для обеспечения высокопроизводительного удаления заусенцев без повреждения поверхностей деталей.
6. Разработать для участка термоимпульсной обработки методику выбора оборудования, обеспечивающего высокопроизводительную обработку заготовок деталей.

Объектом исследования является процесс лезвийной и термоимпульсной обработки малогабаритных высокоточных деталей коаксиальных радиокомпонентов из бериллиевой бронзы БрБ2 и сплава 29 НК диаметром от 0,4 до 10 мм, длиной от 4 до 15 мм.

Предметом исследования являются взаимосвязи между параметрами режима точения заготовок деталей и параметрами остающихся заусенцев, а также взаимосвязь размеров заусенцев с режимами и производительностью термоимпульсного удаления заусенцев.

Научная новизна состоит в том, что

1. Установлена взаимосвязь между параметрами режима точения заготовок деталей и размерами заусенцев, образующихся на обработанной поверхности заготовки детали. Экспериментально установлено, что повышение скорости резания и подачи при точении более существенно влияет на увеличение толщины корня заусенцев в сравнении с глубиной резания.
2. Научно обосновано влияние параметров режима точения и условий лезвийной обработки на толщину корня заусенцев, при этом параметры режима резания назначают в зависимости от применяемого оборудования, режущего инструмента и используемой смазочно-охлаждающей технологической среды.
3. Получены эмпирические регрессионные зависимости, устанавливающие взаимосвязь параметров режима резания с получаемой толщиной корня заусенца. Для бериллиевой бронзы марки БрБ2 зависимость толщины корня заусенца описана полиномиальным уравнением второго уровня и устанавливает рациональный диапазон подачи, количества оборотов шпинделя (скорости резания) и квадратичную зависимость от глубины резания. Для сплава 29 НК полином устанавливает линейную зависимость толщины корня заусенца от количества оборотов шпинделя (скорости резания). Различие зависимостей в полиномиальных уравнениях объясняется особенностями физико-механических характеристик указанных материалов.
4. Экспериментально установлено, что применение термоимпульсного метода ограничено толщиной корня заусенца, при этом доказано, что значения толщины корня заусенца не должны превышать $1/4 - 1/6$ толщины стенки детали.
5. Установлены условия, обеспечивающие удаление заусенцев термоимпульсным методом с соблюдением требований по отклонениям геометрии деталей, по шероховатости поверхности и обеспечению максимальной производительности обработки. В число этих основных условий входят:
 - указанные выше ограничения по толщине корня заусенца,
 - вариант расположения деталей в камере термоимпульсной установки, обеспечивающий предотвращение повреждения деталей при обработке и обеспечивающий доступ горючей смеси ко всем поверхностям деталей,
 - величина давления горючей смеси, зависящая от характеристик термоимпульсной установки, суммарной площади обрабатываемой поверхности и теплопроводности материалов заготовок.

Теоретическая и практическая ценность работы

1. По результатам исследования влияния режимов лезвийной обработки на параметры заусенцев сформулированы рекомендации по установке режимов лезвийной обработки в зависимости от материала заготовки.
2. Экспериментально установлено, что при обеспечении нормируемой толщины корня заусенцев достигается полное удаление заусенцев с малогабаритных вы-

сокоточных деталей из бериллиевой бронзы и сплава 29 НК термоимпульсным методом. Применение термоимпульсного метода удаления заусенцев повышает степень автоматизации и стабильность технологии по времени.

3. Достигнуто сокращение затрат на подбор режимов термоимпульсной обработки в 2 раза за счет установки базового значения давления горючей смеси, рассчитываемого в зависимости от объема рабочей камеры и суммарной площади обрабатываемой поверхности заготовок из материалов с одинаковым уровнем теплопроводности при неизменных коэффициенте загрузки, температуре смеси и использовании газозооушной смеси пропан-кислород.
4. Разработан рациональный вариант размещения заготовок деталей в камере термоимпульсной установки, обеспечивающий качественное удаление заусенцев с малогабаритных легкоповреждаемых деталей. Размещение заготовок в несколько ярусов позволяет рационально использовать объем камеры и кратно количеству ярусов повышает производительность установки.
5. Предложена методика выбора оборудования для участка термоимпульсной обработки малогабаритных высокоточных деталей методом анализа иерархий, отличающаяся использованием нового расчета производительности установок при обработке рационально размещенных в камере деталей.

Методология и методы исследования

Экспериментальные методы проведены в виде натурных экспериментов – это экспериментальный подбор режимов резания и инструментов, при которых толщина корня заусенцев не более 0,088 мм, эксперимент по удалению заусенцев в термоимпульсной установке PULSAR VKF 3.250. Аналитические исследования параметров заусенцев выполнены с использованием положений теории резания металлов, математической статистики и методов планирования эксперимента, анализа факторов, влияющих на степень удаления заусенцев при термоимпульсной обработке поверхности деталей. Методологической основой является системный подход, базирующийся на комплексном анализе и классификации данных об изделии, производственной среде и процессах подготовки производства для разработки расчета времени термоимпульсной обработки на программу выпуска, методик ведения библиотеки управляющих программ и выбора режимов лезвийной обработки, выбора оборудования для термоимпульсной обработки.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследования влияния параметров режима лезвийной обработки на размеры заусенцев, остающихся на поверхности заготовки.
2. Регрессионные полиномиальные уравнения зависимости толщины корня заусенцев от параметров режима резания. В частности, для БрБ2 уравнение устанавливает рациональный диапазон подачи и количества оборотов шпинделя (скорости резания). Для сплава 29 НК полином устанавливает рациональный диапазон количества оборотов шпинделя (скорости резания).
3. Условия, обеспечивающие удаление заусенцев термоимпульсной обработкой с соблюдением требований чертежа детали (геометрические размеры, качество поверхности) и повышение производительности обработки до 6 раз.

4. Условия повышения производительности до 6 раз и качества обработки на 15% при рациональном варианте расположения заготовок деталей в камере термомпульсной установки.

Достоверность полученных результатов обеспечена корректностью постановки задачи, применением методов анализа и формализации процессов, проверкой адекватности выявленных закономерностей при помощи натурных экспериментов, удовлетворительным совпадением результатов исследований с мнением других авторов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на XII Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» 27 мая – 01 июня 2019 г., г. Иркутск; XIII Всероссийской научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» 23 декабря 2019 г., г. Иркутск; XIV Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» 21 – 26 сентября 2020 г., г. Иркутск; Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» 20 – 24 апреля 2021 г., г. Иркутск.

Публикации. Основные результаты работы по теме диссертации изложены в 16 работах, из них в изданиях, рекомендованных ВАК – 4, индексируемых в Scopus – 8.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из оглавления, введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 112 наименования. Работа выполнена на 133 страницах основного текста, включает 54 рисунка и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы с обоснованием актуальности темы, отражены цель работы и задачи исследования, показаны ее теоретическая и практическая значимость, научная новизна, степень достоверности и работоспособности.

В первой главе проведен анализ особенностей производства малогабаритных высокоточных деталей из бериллиевой бронзы и сплава 29 НК, проблемы возникновения заусенцев при лезвийной обработке, способов минимизации размеров и количества заусенцев и методов их удаления. Разработана классификация деталей для выбора методов удаления заусенцев и установки параметров лезвийной обработки. Определен перспективный метод удаления заусенцев с деталей, имеющих внутренние труднодоступные поверхности – термоимпульсный метод (таблица 1). На основе анализа номенклатуры деталей коаксиальных радиокомпонентов установлены параметры заусенцев для обеспечения качественного удаления термоимпульсным методом – толщина корня заусенца не более 0,088 мм. Выбраны критерии рационализации лезвийной обработки – нормативная толщина корня заусенца, обеспечение износостойкости инструмента, наименьшее время обработки на станке. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Таблица 1 – Сравнение способов удаления заусенцев

Способ удаления заусенцев	Критерии отбора по удалению заусенцев						
	С труднодоступных поверхностей	С малогабаритных деталей	Без нарушения ответственных элементов (резьба)	Без нарушения геометрии	Без изменения в материале	Трудоемкость низкая	Отсутствие брака
Ручная обработка	Да	Да	Да	Да	Да	Нет	Нет
Галтовка с полировкой крупными гранулами	Нет	Да	Нет	Да	Да	Да	Да
Направленная абразивная обработка мелкими гранулами	Да	Да	Нет	Нет	Да	Да	Да
Абразивная обработка щетками	Нет	Да	Нет	Да	Да	Да	Да
Электрохимическая обработка	Да	Да	Нет	Нет	Нет	Да	Нет
Ультразвуковая обработка	Да	Да	Да	Да	Нет	Да	Да
Термоэнергетический метод	Да	Да	Да	Да	Нет	Да	Да
Термоимпульсный метод	Да	Да	Да	Да	Да	Да	Да

Во второй главе описаны используемые в рамках настоящего исследования детали, изготавливаемые на прецизионных токарных станках продольного точения с ЧПУ CITIZEN SINCOM из материалов бериллиевая бронза Пруток БрБ2 ГОСТ 15835-2013 и прецизионный сплав 29 НК с заданным температурным коэффициентом линейного расширения Круг 6-B-h7 ГОСТ 149*55-77 29 НК ГОСТ 14082-78. Эти материалы по своим физико-химическим свойствам являются труднообрабатываемыми резанием. Для исследования характера и причин возникновения заусенцев, способов их удаления использованы аналитические и экспериментальные методы исследования. Экспериментальные методы проведены в виде натурных экспериментов – это экспериментальный подбор режимов резания и инструментов, при которых толщина корня заусенцев не превышает установленной нормы, экспериментальный подбор режимов, абразивных материалов и оборудования для галтовки наружных поверхностей с целью удаления заусенцев, эксперимент по удалению заусенцев в термоимпульсной установке PULSAR VKF 3.250. Характеристики заусенцев исследованы с использованием положений теории резания металлов, анализа факторов, влияющих на степень удаления заусенцев при термоимпульсной обработке поверхности деталей. При разработке алгоритмов выбора режимов лезвийной обработки, расчета времени термоимпульсной обработки на программу выпуска, методик ведения библиотеки управляющих программ и выбора оборудования для термоимпульсной обработки использован системный подход, базирую-

щийся на комплексном анализе и классификации данных об изделии, производственной среде и процессах подготовки производства.

В третьей главе на примере деталей Корпус коаксиального радиокомпонента из бериллиевой бронзы и Втулка ФИМД 713751.004 из сплава 29 НК, имеющих сложную геометрию проведен подбор режущих инструментов для точения и сверления и режимов обработки, при которых результаты обработки соответствуют критериям рациональности. Проведено сравнение подобранных значений режимов обработки и диапазонов значений, рекомендуемых производителем инструмента. Наилучшие результаты получены при использовании прецизионного режущего инструмента для микромеханики швейцарских фирм Utilis, Fraisa, IFANGER, Applitec, на инструментальную основу (субстрат) нанесено двухслойное покрытие, нижний слой нитрида титана с алюминием и верхний слой карбонитрида оксида алюминия с цирконием. Он имеет высокую износостойкость и высокую теплопроводность, необходимую для снижения температуры в области резания, и геометрию, обеспечивающую сочетание формы поверхностей режущей части и значений углов, которое обеспечивает достаточную прочность режущего клина инструмента, заданное качество обработанной поверхности, минимальные усилия резания. Для снижения температуры в области резания обработка производится с использованием масляной смазочно-охлаждающей технологической среды.

На процесс образования заусенцев на деталях коаксиальных радиокомпонентов при резании влияют физико-механические свойства материалов бериллиевая бронза и сплав 29 НК, а также технологические параметры, такие как степень износа лезвия, режимы обработки (глубина резания, подача, скорость резания), геометрия инструмента, использование смазочно-охлаждающей технологической среды, жесткость системы станок – приспособление - инструмент – деталь.

Описаны основные параметры, исследован характер заусенцев. Появление длинных тянущихся заусенцев с большой площадью крепления вдоль заусенца к поверхности детали является критичным для выбора дальнейшего метода удаления заусенцев. Толщина корня заусенцев достигает 0,1 мм (рис. 1).

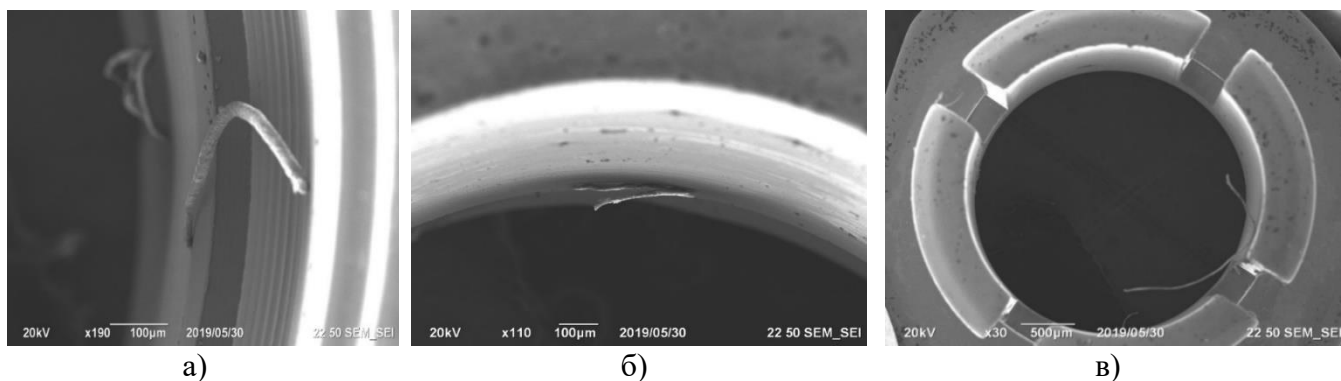


Рисунок 1 – Характер заусенцев на деталях из бериллиевой бронзы при увеличении скорости резания и подачи: а – длинные тянущиеся, с несколькими вершинами и одним корнем ($l_z = 3$ мм, $t_z = 0,051$ мм); б – длинные, прикрепленные к детали по длине (приваренные); в – имеющие прочное крепление к поверхности детали по длине заусенца

При обработке на подобранных экспериментально параметрах заусенцы корот-

кие, каплевидные, толщина корня до 0,03 мм. При увеличении скорости резания до 125 м/мин и подачи до 0,1 мм/об заусенцы длинные, тянущиеся, толщина корня до 0,08 мм (рис. 2).

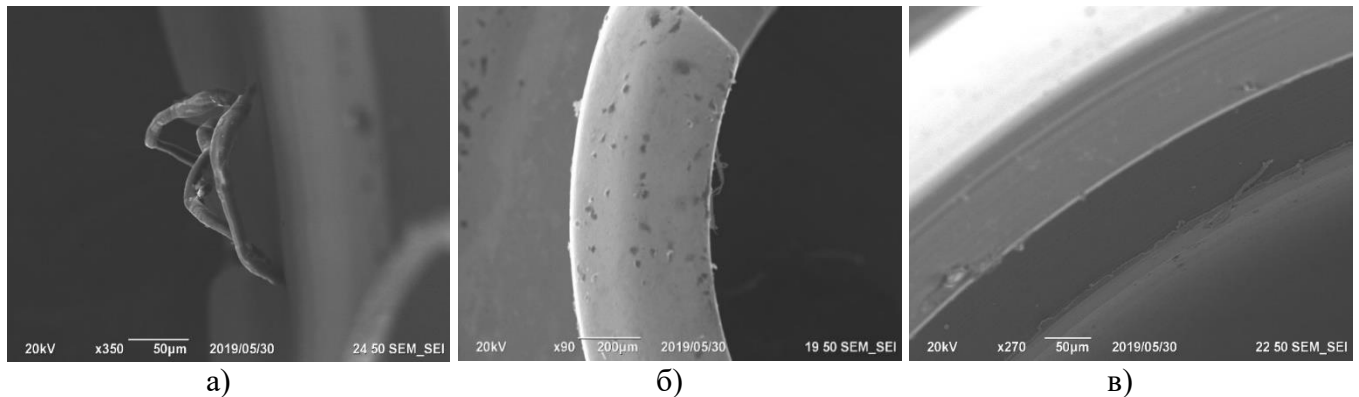


Рисунок 2 – Изменение характера заусенцев на деталях из бериллиевой бронзы: а – обработка на рекомендуемых производителем инструмента параметрах (верхние значения); б – мелкие каплевидные и тонкие (подача и скорость резания снижены); в – обработка на подобранных экспериментально параметрах

По результатам полного факторного эксперимента получены эмпирические регрессионные зависимости толщины корня заусенцев t_z в процессе точения: заготовки из БрБ2 пластиной для поперечного точения 744-1.0-R, описываемая уравнением регрессии в виде неполного квадратичного полинома

$$t_z = 0,3085 - 1,34017S - 0,00009n + 23,73563f^2, \quad (1)$$

где S – подача, мм/об;

n – количество оборотов шпинделя, об/мин;

f – глубина резания, мм.

и заготовки из сплава 29 НК пластиной для поперечного точения 744х-1.5-R, описываемая уравнением регрессии в виде неполного линейного полинома

$$t_z = 0,324523 - 0,000141n, \quad (2)$$

позволяющие установить параметры технологического процесса точения, обеспечивающие получение изделий из бериллиевой бронзы и сплава 29 НК с нормативной толщиной корня заусенцев.

Эксперимент проведен на значениях режимов, установленных исходя из рекомендаций производителя инструмента. Для бериллиевой бронзы подача S от 0,01 до 0,05 мм/об, количество оборотов шпинделя n от 4000 до 8000 об/мин (скорость резания от 63 до 126 м/мин), глубина резания f от 0,1 до 0,3 мм. Для сплава 29 НК S от 0,02 до 0,08 мм/об, n от 4000 до 6000 об/мин, глубина резания f от 0,5 до 1,5 мм. Результаты эксперимента совпадают с режимами, установленными в рамках опытной эксплуатации (рис. 3). На установленных режимах $S=0.03$ мм/об, $n=6000$ об/мин, $f=0.2$ мм для бериллиевой бронзы экспериментально получены заусенцы с максимальной толщиной корня 0,051 мм на новом инструменте. Эксперимент

показал, что при увеличении параметров до $S=0.05$ мм/об, $n=8000$ об/мин, $f=0,3$ мм толщина корня заусенца увеличивается до 0,08 мм. При этом наибольшее влияние оказывает увеличение количества оборотов шпинделя, в меньшей степени подача.

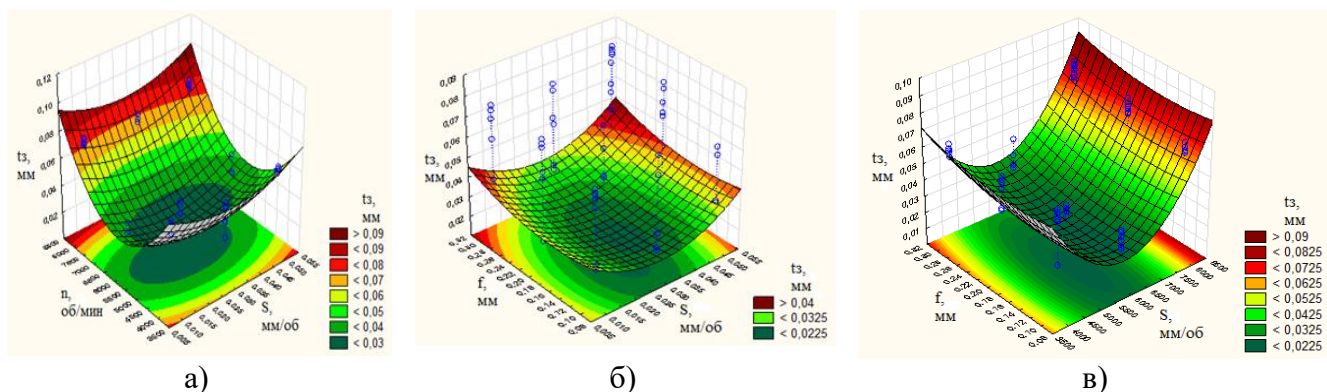


Рисунок 3 – Определение параметрической области с рациональными режимами для заготовок из бериллиевой бронзы, влияние на толщину корня заусенцев: а – подачи и количества оборотов шпинделя; б – глубины резания и подачи; в – количества оборотов шпинделя и глубины резания

На установленных режимах подача и глубина резания в пределах диапазона, рекомендуемого производителем, $n=5000$ об/мин для сплава 29 НК экспериментально получены заусенцы с максимальным размером 0,05 мм на новом инструменте (рис. 4).

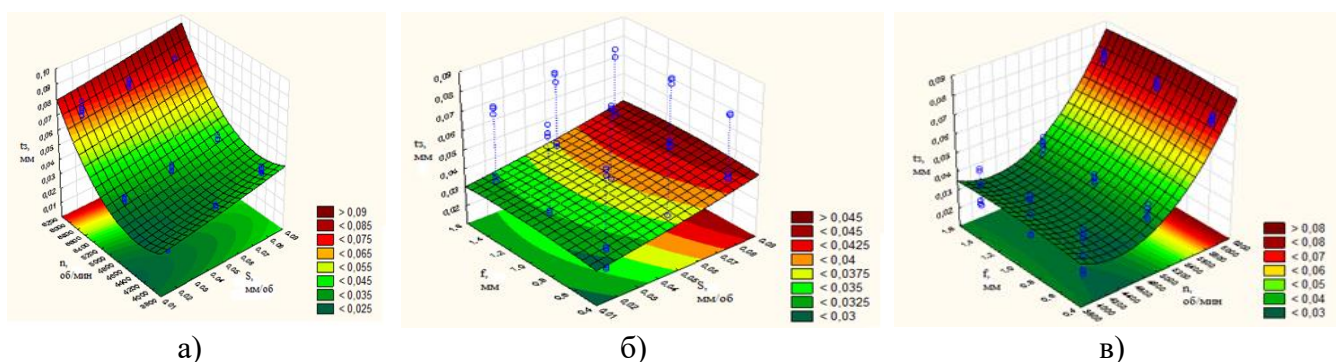


Рисунок 4 – Определение параметрической области с рациональными режимами для заготовок из сплава 29 НК, влияние на толщину корня заусенцев: а – подачи и количества оборотов шпинделя; б – глубины резания и подачи; в – количества оборотов шпинделя и глубины резания

Изменение глубины резания в диапазоне, рекомендуемом производителем, влияет незначительно. С учетом того, что с увеличением износа инструмента размер и количество заусенцев увеличиваются примерно в 2 раза, установленные в процессе опытной эксплуатации режимы совпадают со значениями функции желательности эксперимента. Установка рациональных режимов, показанных на рисунках 3 и 4 темно-зеленым цветом, обеспечивает повышение эффективности лезвийной обработки малогабаритных деталей из бериллиевой бронзы и сплава 29 НК и условия для термоимпульсного удаления заусенцев.

Разработаны рекомендации по установке параметров режима обработки:

– использовать оборудование и инструмент для микромеханики, смазочно-охлаждающую технологическую среду,

- для бериллиевой бронзы значения подачи S , количества оборотов шпинделя n ближе к минимальному значению диапазона, рекомендуемого производителем инструмента, обеспечат минимальную толщину корня заусенцев, для расчета рациональных параметров точения использовать зависимость 1,

- для сплава 29 НК значения количества оборотов шпинделя n ближе к среднему значению диапазона, рекомендуемого производителем инструмента, обеспечат минимальную толщину корня заусенцев, для расчета рациональных параметров точения использовать зависимость 2,

- значения могут быть увеличены до получения нормируемой толщины корня заусенца (для деталей коаксиальных радиокомпонентов не более 0,088 мм) до планового износа инструмента,

- стратегия обработки – заусенец не должен выходить на ответственную поверхность на кромках,

- рационально подобранные режимы вносить в справочник режимов обработки.

Полного удаления заусенцев не удается достичь установкой на станок стальных или керамических щеток. Абразивные круги на резиновой связке, установленные на станок, разрушаются масляной смазочно-охлаждающей жидкостью.

Установлено, что время удаления заусенцев галтовкой с деталей, полученных на подобранных режимах в 1,67 раза меньше, чем на режимах с повышенной подачей и скоростью резания, а удаление вручную занимает в 15 раз больше времени. Термоимпульсное удаление заусенцев с деталей в количестве 1000 штук в установке Pulsar VKF 3.250 производится за 20 минут, а удаление галтовкой с последующим ручным удалением заусенцев – за 2 часа и 5,5 человеко-часов.

На основе проведенного исследования процесса лезвийной обработки разработан алгоритм ведения справочника параметров лезвийной обработки и библиотеки управляющих программ.

В четвертой главе описан эксперимент по удалению заусенцев в лабораторной термоимпульсной установке Pulsar VKF 3.250 компании Альфа Стил. Для обработки выбраны легкоповреждаемые, с труднодоступными поверхностями детали из бериллиевой бронзы и сплава 29 НК, малоразмерные диаметром от 2 до 4 мм и высотой от 2 до 5 мм, и средне-размерные диаметром $5 \div 10$ мм и высотой от 6 до 10 мм. Начальные режимы обработки: температура сжигания $T = 3500$ °С, давление $P = 1800$ кПа, соотношение подачи газов под давлением P (C_3H_8) = 3,70 МПа и P (O_2) = 6,65 МПа, время сжигания 20-30 миллисекунд, соотношение смешивания пропан-кислород 1/2 – стехиометрические параметры. При подборе режимов давление снижено до 1760 кПа. Установлено, что при обработке на рациональном режиме шероховатость поверхности незначительно снижена, заусенцы полностью удалены, геометрия детали не изменена, геометрия резьбы сохранена (рис. 5, 6).

Скругление кромок на рациональном режиме не происходит. Применение двухкратной обработки или обработки на повышенном давлении приводит к скруглению кромок, но тонкостенные и ответственные элементы типа резьбы повреждены. Экспериментально подтверждено, что полное удаление заусенцев с толщиной корня 0,1 мм с тонкостенных деталей и деталей с резьбой (более 1/4 – 1/6 толщины стенки) приводит к нарушению геометрии деталей.

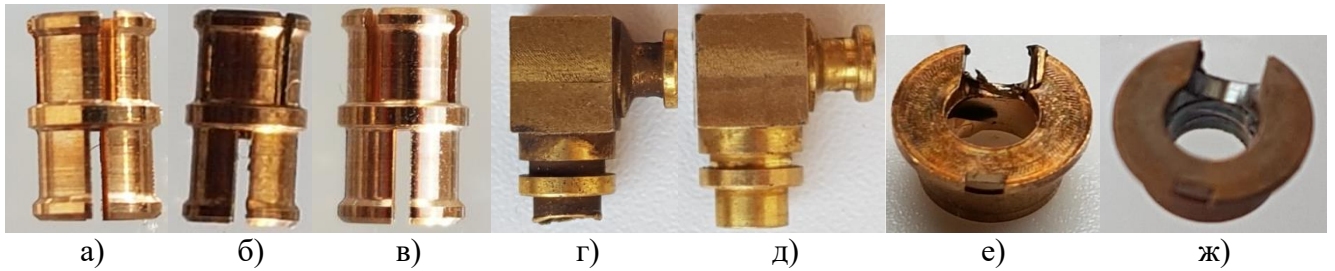


Рисунок 5 – Удаление заусенцев в термоимпульсной установке Pulsar VKF 3.250 с деталей из БрБ2: а – деталь до обработки с заусенцем в прорези ламели (габариты $D = 3,1$ мм, $L = 6,5$ мм); б – деталь после обработки, остались корни заусенцев в прорези ламели; в, д – детали после обработки на рациональном режиме, заусенцы $t_z \leq 0,07$ мм удалены, качество поверхности и размеры сохранены; г – деталь после обработки, заусенцы $t_z = 0,1$ мм удалены, но разрушена тонкостенная часть детали (габариты $H = 11$ мм, $L = 14,5$ мм); е – деталь до обработки с заусенцами $t_z > 0,1$ мм (габариты $D = 4$ мм, $L = 2$ мм); ж – деталь после двухкратной обработки на рациональном режиме, заусенцы удалены, поверхность матовая, размеры сохранены.

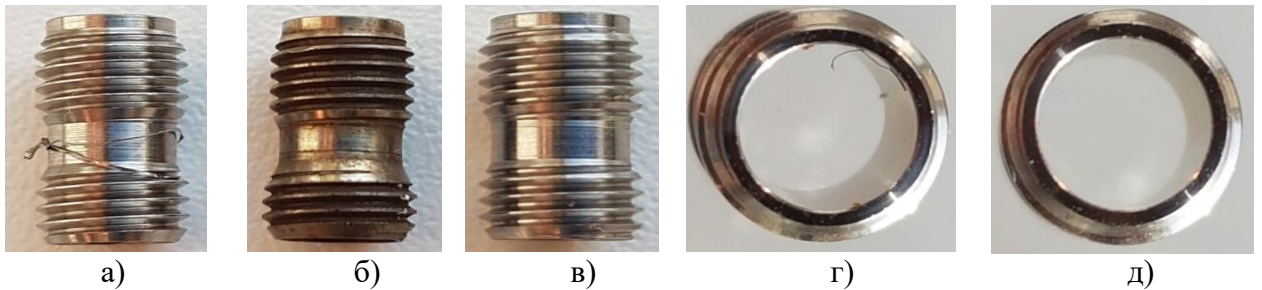


Рисунок 6 – Удаление заусенцев в термоимпульсной установке Pulsar VKF 3.250 с деталей из сплава 29 НК: а, г – деталь до обработки с длинными заусенцами (габариты $D = 6$ мм, $L = 10,2$ мм); б – деталь с заусенцем $t_z = 0,1$ мм после обработки при $P = 1,8$ МПа, поверхность опалена, скруглены края резьбы, заусенец удален; в, д – деталь после обработки на рациональном режиме, заусенцы удалены, качество поверхности и размеры сохранены

Представлены также результаты теоретического расчета режимов работы и параметров термоимпульсной установки Pulsar VKF 3.250. Пример расчёта зависимости давления смеси, объема рабочей камеры и суммарной площади обрабатываемой поверхности для установок Pulsar VKF показан в Приложении Ж диссертации. Результаты расчетов, особенно базового значения давления газовой смеси, подтверждены экспериментальным подбором значения давления. Погрешность вычисления составляет менее 1 %. Пример расчета базового значения давления газовой смеси в установке Pulsar VKF 3.250 показан в Приложении Ж-1.

Детали коаксиальных радиокомпонентов - малогабаритные, хрупкие, прецизионные. Для термоимпульсной обработки необходимо разместить детали так, чтобы защитить от повреждения при взрыве, обеспечить доступ газовой смеси ко всем поверхностям деталей, обеспечить минимальные затраты на размещение деталей в приспособлении. Известны подвесочные приспособления, корзины-качалки для мелких деталей типа «рамка», «елочка» с пружинным контактом, трубки с отверстиями для размещения цилиндрических деталей, размещение деталей в которых трудоемко. Наиболее подходящим вариантом размещения деталей является применение специального наладочного приспособления для групповой обработки в виде сетчатой корзины небольшой высоты с фиксирующей сет-

чатой крышкой для размещения деталей в один слой при помощи сменной наладки – разделительной решетки с ячейками, соответствующими размеру загружаемых деталей. Применение сменной наладки, позволит использовать единую базовую часть приспособления для всей номенклатуры деталей (таблица 2).

Таблица 2 – Выбор рационального варианта размещения деталей

Вид приспособления для групповой обработки	Критерии рациональности			
	Площадь поверхности минимальная	Время размещения минимальное	Доступ смеси ко всем поверхностям детали	Охват номенклатуры малогабаритных деталей
Контейнер с крышкой	нет	да	нет	да
Подвес с крючком-защелкой	да	нет	да	только с отверстием
Подвес с пружинным захватом	да	нет	нет	да
Трубка сетчатая	нет	нет	да	да
Контейнер небольшой высоты с крышкой и разделителем деталей	нет	да	да	да

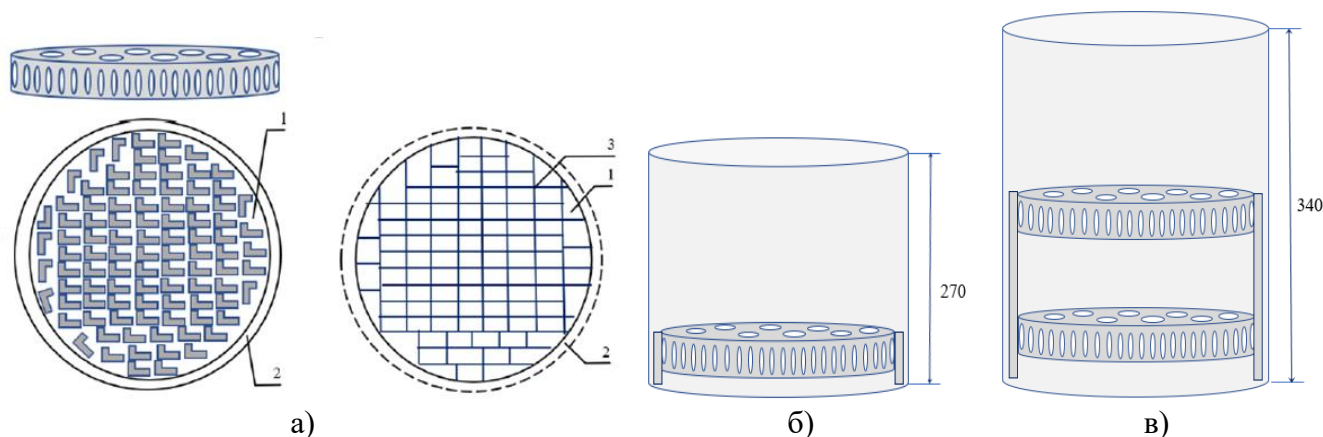


Рисунок 7 – Схематическое изображение рационального варианта размещения деталей: а – базовая часть приспособления и сменная наладка; б – одноярусное приспособление; в – двухярусное приспособление.

Так как при детонационном взрыве в камере цилиндрической формы силы направлены на крышку и дно камеры, то защита конструкции от разрушения и установка максимального давления в камере зависят от диаметра, а высота камеры может быть изменена. Предложено использование ярусной оснастки, позволяющей рационально использовать объем камеры икратно увеличить производительность установки при увеличении высоты камеры (рис. 7).

Расчет требуемой высоты камеры для удаления заусенцев в двухярусной оснастке проведен через требуемый объем газовой смеси при сохранении давления до 1,8 МПа. При высоте камеры 340 мм давление не превышает максимально допустимого, $P_{см} = 1,744$ МПа.

В завершающей части главы 4 представлена методика выбора оборудования для участка термоимпульсной обработки малогабаритных высокоточных деталей, а результаты выбора на основе методики изложены в приложении Ж диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена разработке рекомендаций по удалению заусенцев, образующихся при лезвийной обработке малогабаритных высокоточных деталей, выполненных из бериллиевой бронзы марки БрБ2 и сплава марки 29 НК. Решена актуальная научно-техническая задача, направленная на совершенствование лезвийной обработки и последующей физико-технической термоимпульсной обработки. Предложен комплекс технических решений, позволяющий удалить образующиеся заусенцы высокопроизводительно и с высоким качеством поверхностей. Например, для детали Корпус КАПД.724212.030 (-01,-02) из БрБ2 разработанные решения позволяют, в сравнении с применяемой на Иркутском релейном заводе технологией удаления заусенцев в галтовочном барабане и ручной обработкой, в 5 раз повысить производительность обработки и исключить брак по не устранению заусенцев в труднодоступных поверхностях в 1,5 раза. Для другой детали Втулка ФИМД.713751.004 из сплава 29 НК разработанные решения позволяют в 2,5 раза повысить производительность обработки и исключить брак по не устранению заусенцев в труднодоступных поверхностях и зарезам в 1,7 раза. Ожидаемый экономический эффект в год составляет до 30 % себестоимости для детали Корпус КАПД.724212.030 (-01,-02) и 20 % – для детали Втулка ФИМД.713751.004.

На основании полученных результатов исследования сформулированы следующие выводы:

1. Экспериментально установлено, что толщина корня заусенцев, остающихся после токарной обработки заготовок, выполненных из бериллиевой бронзы БрБ2 и сплава 29 НК, зависит от параметров режима резания при точении. Для бериллиевой бронзы БрБ2 в первую очередь на толщину корня заусенца влияет величина продольной подачи при точении, затем скорость резания и глубина резания. Для сплава 29 НК толщина корня заусенца зависит только от скорости резания.

Различие зависимостей объясняется особенностями физико-механических характеристик указанных материалов, а именно модулем Юнга, прочностью и теплопроводностью.

2. Определены рациональные параметры режима резания, обеспечивающие рациональные условия для последующей физико-технической термоимпульсной обработки. Применяемое оборудование, режущий инструмент, смазочно-охлаждающая технологическая среда и параметры режима резания не одинаково влияют на толщину корня заусенцев. Существуют особенности.

Для бериллиевой бронзы БрБ2 они следующие:

- минимальная толщина корня заусенцев, менее 0,048 – 0,051 мм, обеспечивается при величине подачи 0,02 – 0,04 мм/об, скорости резания 90 – 100 м/мин, глубине резания 0,2 – 0,3 мм;
- толщина корня заусенца увеличивается до 0,08 – 0,09 мм при подаче 0,05 – 0,07 мм/об, скорости резания 125 – 135 м/мин, глубине резания 0,4 – 0,6 мм.

Для сплава 29 НК особенности следующие:

- минимальная толщина корня заусенцев, менее 0,04 – 0,06 мм, образуется при

- величине подачи 0,02 – 0,08 мм/об, при глубине резания 0,5 – 1,5 мм, при скорости резания 95 – 100 м/мин;
- при увеличении скорости резания до 110 – 120 м/мин толщина корня увеличивается до 0,08 – 0,09 мм.
3. Полученные эмпирические регрессионные зависимости показали взаимосвязь толщины корня заусенцев с параметрами режима точения в определенной части диапазона значений, рекомендуемого производителем инструмента. Для деталей, выполненных из бериллиевой бронзы БрБ2, зависимости устанавливают толщину корня заусенцев при значениях продольной подачи и количества оборотов шпинделя (скорости резания) только из первой половины диапазона. При назначении повышенных значений подачи и количества оборотов шпинделя (скорости резания) толщина корня заусенцев значительно увеличивается и превышает предельно допустимый размер. Для деталей, выполненных из сплава 29 НК, зависимости устанавливают толщину корня заусенцев при значениях количества оборотов шпинделя (скорости резания) из средней части диапазона. При назначении количества оборотов шпинделя (скорости резания) ближе к максимальным значениям диапазона, толщина корня заусенцев значительно увеличивается и превышает предельно допустимый размер, а назначение скорости резания ближе к минимальным значениям необоснованно увеличивает время обработки на станке.
 4. Установлена взаимосвязь полноты удаления заусенцев физико-техническим термоимпульсным удалением с размерами заготовок деталей, а именно с толщиной их стенок. Полное удаление заусенцев без образования дефектов на детали обеспечивается при толщине корня заусенцев в пределах $1/4 - 1/6$ минимальной толщины детали.
 5. Установленные рациональные режимы термоимпульсной обработки обеспечивают полное удаление заусенцев при выполнении требований чертежа детали, качество обработанной поверхности и производительность обработки. Параметр давление горючей смеси установлен с учетом теплопроводности материала заготовок, площади обрабатываемой поверхности, характеристик установки. Если при назначенном давлении горючей смеси с детали, занимающей 30% объема камеры в данной установке удалены все заусенцы с толщиной корня, не превышающей установленную для обрабатываемой номенклатуры из расчета $1/4 - 1/6$ минимальной толщины стенки, то для деталей с одинаковым уровнем теплопроводности давление смеси изменяется в зависимости от изменения площади обрабатываемой поверхности.
 6. Разработанный вариант заполнения камеры термоимпульсной установки деталями обеспечивает высокопроизводительное удаление заусенцев без повреждения поверхностей деталей за счет ограничения перемещения во время обработки, обеспечения доступа газовой смеси ко всем поверхностям деталей, рационального использования объема камеры, использования сменной наладки для быстрого размещения деталей в приспособлении. Данный вариант заполнения камеры позволяет повысить производительность обработки кратно количеству ярусов приспособления при минимальных затратах на размещение деталей.

7. Предложенная методика выбора оборудования для участка термоимпульсной обработки малогабаритных высокоточных деталей методом анализа иерархий отличается использованием нового расчета производительности установок при обработке рационально размещенных в камере деталей. Использование такого расчета производительности установок позволяет обосновать рациональный выбор оборудования для участка термоимпульсной обработки для выполнения производственной программы.
8. Рекомендации по повышению эффективности лезвийной обработки и применению термоимпульсного удаления заусенцев испытаны в производственных условиях АО «Иркутский релейный завод». Результаты испытаний подтвердили представленные в диссертации разработки и рекомендованы для применения на полном объеме номенклатуры деталей после опытной эксплуатации.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Планируются исследования для расширенной номенклатуры малогабаритных высокоточных деталей, изготавливаемых из других материалов, изучение особенностей их производства, формализация требований и классификация для использования термоимпульсного метода удаления заусенцев.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах:

В научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Карлина, Ю.И. Удаление заусенцев с малогабаритных высокоточных деталей для сверхвысокочастотной электроники / Ю.И. Карлина, Д.А. Журавлев // Вестник ИрГТУ. – Иркутск:ИрГТУ, 2020. – Т. 24. – № 1. – С. 29-35.
2. Карлина, Ю. И. Перспективы применения термоимпульсного метода удаления заусенцев с малогабаритных высокоточных деталей коаксиальных радиокомпонентов сверхвысокочастотной микроэлектроники / Ю. И. Карлина, С.К. Каргапольцев, В.Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 65 № 1. – С. 8–13.
3. Карлина, Ю.И. Перспективы применения электрофизикохимических методов удаления заусенцев с малогабаритных высокоточных деталей сверхвысокочастотной электроники / Ю. И. Карлина, С.К. Каргапольцев, В.Е. Гозбенко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 66 № 2. – С. 15–22.
4. Карлина, Ю.И. Интеграция этапов подготовки производства высокоточных малогабаритных деталей на станках с числовым программным управлением / Ю.И. Карлина //Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2021. № 1 (69). С. 17-23.

В научных изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus

1. Karlina, Yu.I. Removal of burrs from small-size high-precise parts for shf electronics / Yu.I. Karlina, S.K. Kargapoltsev, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 378. – P. 012015.
2. Karlina, Yu.I. Removal of burrs from small-size high-precise parts for coaxial radio components / Yu.I. Karlina, S.K. Kargapoltsev, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 832. – P. 012089.
3. Karlina, Y.I. Overview of electro physicochemical methods for deburring small-sized high-precision details of coaxial radio components / Y.I. Karlina, S.K. Kargapoltsev,

- V.E. Gozbenko, A.I. Karlina, D.S. Leonovich // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1582. – P. 012041.
4. Karlina, Yu.I. Selection of tools and cutting modes for turning small-sized high-precision parts of micro-wave electronics from beryllium bronze / Yu.I. Karlina, S.K. Kargapol'tsev, V.E. Gozbenko, A.I. Karlina, D.S. Leonovich // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1064. – P. 012016.
 5. Karlina, Yu.I. Automation of preproduction processes for high-precision small-sized parts on CNC machines / Y.I. Karlina, S.K. Kargapol'tsev, V.E. Gozbenko, D.S. Leonovich. A.I. Karlina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1064. – P. 012017.
 6. Karlina, A.I. Algorithm for calculating the time of thermal pulse processing of small-sized high-precision parts / A.I. Karlina, V.A. Ershov, S.K. Kargapol'tsev, V.E. Gozbenko, Yu.I. Karlina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1064. – P. 012018.
 7. Karlina, Yu.I. Improvement of the technological process of processing parts of coaxial radio components using thermal impulse deburring / Yu.I. Karlina // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2032. – P. 012066.
 8. Karlina, Yu.I. Justification of the choice of a thermal deburring machine for deburring small parts of microwave electronics / Yu.I. Karlina, V.A. Ershov, V.A. Olentsevich. A.I. Karlina // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2032. – P. 012067.

В других изданиях:

1. Карлина, Ю.И. Точность обработки при изготовлении радиоэлектронных деталей / Ю.И. Карлина, Д.А. Журавлев, Д.С. Леонович, А.Д. Колосов // Сборник статей XII Всероссийской научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири». 27 мая – 01 июня 2019 г., г. Иркутск. – стр. 275-281.
2. Карлина, Ю.И. Проблемы интеграции этапов подготовки производства и обработки на станках с ЧПУ в условиях высокоточного производства / Ю.И. Карлина, Д.А. Журавлев, Т.А. Опарина // Сборник статей XIII Всероссийской научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири». 23 декабря 2019 г., г. Иркутск. – стр. 55-58.
3. Карлина, Ю.И. Влияние технологической наследственности на выбор методов удаления заусенцев с малогабаритных деталей СВЧ-электроники / Ю.И. Карлина, Д.А. Журавлев, Т.А. Опарина // Сборник статей XIV Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири»; 21 – 26 сентября 2020 г., г. Иркутск. – стр. 99-103.
4. Карлина, Ю.И. Установки для электрофизического удаления заусенцев / Ю.И. Карлина, Д.А. Лысенко // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири»; 20 – 24 апреля 2021 г., г. Иркутск, – т. 2, стр. 41-46.