

На правах рукописи



Анухин Иван Викторович

**Технологическое обеспечение и повышение качества на финишных
операциях изготовления деталей из специальных сплавов для
энергомашиностроения**

2.5.6. Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт Петербург

2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель

Радкевич Михаил Михайлович, доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Мнацаканян Виктория Умедовна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва.

Батуев Виктор Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии автоматизированного машиностроения Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет)», г. Челябинск.

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург

Защита диссертации состоится «12» декабря 2025 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета У.2.5.6.26 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, главный учебный корпус, ауд. 346.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан « » ноября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук

Хрусталева Ирина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Применение специальных сплавов в авиа- и ракетостроении позволяет значительно улучшить летные характеристики аппаратов. Основными преимуществами специальных сплавов по сравнению с другими конструкционными материалами являются высокая удельная прочность и хорошая коррозионная стойкость в большинстве агрессивных сред. Оборотной стороной высоких значений физико-механических свойств является низкая обрабатываемость резанием данных материалов.

Основной причиной плохой обрабатываемости специальных титановых сплавов является возникновение больших сил и высоких температур в зоне резания. Производство авиационных деталей характеризуется большими объемами снимаемого припуска (до 80 - 90% от объема заготовки), в сочетании с низкой скоростью резания данных материалов это приводит к значительным материальным затратам на механическую обработку.

Современная инструментальная промышленность предлагает высокопроизводительный инструмент для обработки специальных титановых сплавов, тем не менее скорость изготовления деталей из титановых сплавов очень низкая (например, для некоторых изделий машинное время составляет 300 - 400 ч). Применение современных обрабатывающих центров позволяет сократить сроки изготовления. Но стоимость содержания и эксплуатации данного оборудования очень высокая и часто его возможности используются нерационально, поэтому в данных случаях сокращение машинного времени не приводит к значительному снижению себестоимости продукции.

Повышение эффективности изготовления деталей из специальных сплавов, за счет рационального использования имеющегося оборудования и инструмента благодаря поиску и определению оптимальных параметров операции механической обработки, является актуальной задачей. Решение данной задачи позволит обеспечить снижение себестоимости, повышение производительности, а также поднять конкурентоспособность продукции.

Подбор параметров резания и обработки труднообрабатываемых материалов с применением новых видов сборного режущего инструмента становится сложной задачей:

- из-за малой изученности вновь созданных конструкционных сталей и сплавов;
- из-за большого разнообразия новых режущих инструментов, предлагаемых различными фирмами и, как правило, с неизвестными физико-механическими показателями свойств применяемых инструментальных материалов и покрытиями режущей части инструмента;
- по причине ухода с отечественного рынка некоторых импортных производителей металлорежущего инструмента.

Кроме того, проблемы, связанные с финишной лезвийной обработкой деталей являются характерными и для обработки труднообрабатываемых титановых сплавов. При обработке титановых сплавов основными проблемами являются интенсивный износ режущего инструмента по задней поверхности, что вызывает увеличение силы резания, а также ухудшение качества обработки. Эти трудности имеют место, прежде всего, при изготовлении деталей из титановых сплавов в авиа- и судостроении, химической промышленности, к которым предъявляются повышенные требования не только по удельной прочности, но и по жаропрочности и коррозионной стойкости. Основными причинами ускоренного износа режущих инструментов являются два фактора: пониженная теплопроводность сплавов на основе титана и большие контактные нагрузки при резании.

Выбор инструментов, проектирование приспособлений, расчет режимов резания при

обработке специальных титановых сплавов – задачи, над которыми работают ведущие мировые фирмы и предприятия. Комплексное решение таких задач усложняется тем, что необходимо одновременно осуществлять управление процессом обработки, обеспечивать заданную точность изготовления деталей в условиях интенсивного износа режущего инструмента. Чтобы избежать таких проблем, необходимо правильно подобрать параметры резания, в соответствии с конкретными требованиями и свойствами материала, которые обеспечат эффективную механическую обработку титана и его специальных сплавов.

Вследствие того, что титан и его сплавы сохраняют высокую твердость и прочность при повышенных температурах, на режущей кромке пластины возникают значительные силы резания. При этом в зоне резания выделяется значительное количество тепла, что может привести к деформационному упрочнению поверхностного слоя детали.

Отсутствие научной информации и рекомендаций по выбору марки инструмента, режимов финишной лезвийной обработки, позволяющих объективно оценить эффективность процессов изготовления деталей из труднообрабатываемых специальных титановых сплавов в условиях интенсивного износа режущего инструмента по известным критериям – производительности, себестоимости и качества поверхности, точности размеров требует проведения дополнительного научного исследования.

Вследствие вышесказанного, научно обосновать выбор рациональных параметров режима обработки труднообрабатываемых титановых сплавов при финишной лезвийной обработке, обеспечивающих требуемую точность, шероховатость поверхности, высокую производительность и низкую себестоимость изделий, является актуальной задачей.

Степень разработанности

В настоящее время создается большое количество новых жаропрочных титановых сплавов на металлургических заводах «Электросталь», «Русполимет», ВИАМ, и др. Изготовление деталей из титановых сплавов качественно отличается от механической обработки резанием других конструкционных материалов. Согласно исследованиям Д.Г. Евсеева, А.С. Верещаки, Ю.Г. Кабалдина, Л.В. Окорокова, В.Н. Подураева, Н.И. Резникова, А.Н. Резникова, Н.В. Талантова, М.А. Шатерина, В.И. Гузеева, С.С. Силина, Т.Н. Лоладзе, М. Бушера, Х. Клеменса, С. Майера и др., основные проблемы при резании жаропрочных сталей определяются следующими факторами: высоким упрочнением материала в процессе деформации резанием; низкой теплопроводностью обрабатываемого материала, приводящей к повышению температуры в зоне контакта и способствующей активизации адгезионных и диффузионных процессов; способностью сохранять исходную прочность и твердость при повышенных температурах, что приводит к высоким удельным нагрузкам на поверхности контакта детали с режущим инструментом; высокой твердостью, наличием карбидных фаз, что способствует интенсивному износу режущего инструмента; пониженной виброустойчивостью элементов технологической системы; образованием микронеровностей на поверхности обрабатываемой заготовки вследствие повышенной пластичности материалов, что приводит к резкому увеличению сил резания, повышению температуры в зоне резания и увеличению интенсивности износа режущего инструмента.

Принимая во внимание основные проблемы, имеющие место при обработке этих материалов, возникла необходимость изучения наиболее важных факторов и их влияния на эффективность обработки резанием высокопрочных жаропрочных титановых сплавов. Важным также является подход к выбору режимов обработки с целью минимизации энергосиловых параметров и управления тепловыми потоками в зоне резания для обеспечения заданной точности, параметров шероховатости поверхности и уменьшения интенсивности износа

режущего инструмента.

Цель исследования

Определение рациональных параметров технологического обеспечения процесса финишной лезвийной обработки деталей из специальных сплавов, повышение стойкости инструмента и эффективности изготовления при обеспечении заданной точности и шероховатости поверхности в тяжелых условиях обработки.

Задача исследования

Разработка совокупности модели и методики обеспечения заданного уровня эффективности обработки специальных сплавов при финишной лезвийной обработке в условиях низкой стойкости режущего инструмента.

Для достижения данной задачи и достижения цели необходимо:

1. Обосновать выбор основных параметров технологического процесса финишной обработки изделий из специальных сплавов на основе титана.

2. Исследовать влияние основных параметров финишной обработки на эффективность и требуемый уровень точности обработки титановых сплавов с использованием разных материалов режущей части инструмента с различными покрытиями.

3. Разработать математическую модель оценки стойкости инструмента в процессе операции финишной лезвийной обработки деталей типа «тел вращения» из специальных титановых сплавов.

4. Разработать научно обоснованную методику назначения рациональных технологических параметров финишной обработки специальных титановых сплавов, обеспечивающих требуемые уровни точности, параметров шероховатости поверхности при изготовлении деталей типа «тел вращения» в тяжелых условиях обработки.

Научная новизна

1. Установлены закономерности влияния параметров технологической системы на стабильность технологического процесса финишной обработки деталей из специальных сплавов.

2. Разработана математическая модель оценки стойкости режущей части инструмента в зависимости от параметров технологической системы в тяжелых условиях обработки.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в

1. Разработанной научно обоснованной методике выбора основных технологических параметров процесса финишной обработки деталей из титановых сплавов ВТ8 и ВТ41.

2. Разработанной математической модели расчета параметров технологического процесса операции финишной обработки деталей типа «тел вращения» из специальных титановых сплавов.

Практическая значимость работы:

1. Результаты моделирования позволяют выбрать наиболее рациональный вариант режима финишной обработки в условиях низкой стойкости режущего инструмента.

2. Предложенный научно-методический аппарат позволяет разработать практические рекомендации, направленные на достижение стабильности процесса и повышение стойкости режущего инструмента при финишной лезвийной обработке специальных титановых сплавов.

3. Разработки, полученные в результате исследования, применяются в процессе обучения студентов по специальности и направлению: «Технология машиностроения».

Объектом исследования является технологический процесс финишной лезвийной обработки деталей типа «тел вращения» из специальных титановых сплавов в тяжелых условиях обработки.

Предмет исследования: параметры режима технологической системы финишной обработки, обеспечивающие качество и точность размеров деталей при их изготовлении из специальных сплавов на основе титана в тяжелых условиях обработки.

Методология и методы исследования

Методы исследования базируются на научных основах технологии машиностроения, статистических методах исследований, компьютерном моделировании, научно-экспериментальных исследованиях, использовании современного оборудования, цифровых средствах измерения и контроля.

Положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель расчета параметров режима технологического процесса операции финишной лезвийной обработки деталей типа «тел вращения» из специальных титановых сплавов.

2. Методика научно обоснованного выбора рациональных параметров технологического процесса финишной обработки специальных титановых сплавов, обеспечивающая требуемый уровень точности при изготовлении различных деталей типа «тел вращения».

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов подтверждается представленным объемом достоверной статистической информации. При проведении исследований применялись стандартизованные методы статистической обработки экспериментальных данных и планирования экспериментов. В исследовании использовалась апробированная математическая модель.

Научные гипотеза и положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы теоретическими решениями, базирующимися на положениях механики и теплофизики процессов резания, механике деформируемого тела. При проведении экспериментальных исследований использованы аттестованные измерительные приборы. Достоверность и обоснованность результатов теоретических исследований подтверждена экспериментальными данными, а также данными производственных испытаний.

Материалы диссертационного исследования представлялись на следующих научно-практических конференциях: XLII научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (гор. Санкт-Петербург, 2013 г.); AER-Advances in Engineering Research (vol. 157, 2018 г.); Перспектива 2020 Материалы международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых №3. (2020 г.); Перспективные машиностроительные технологии (АЕТ Санкт-Петербург, 2022 г.).

Диссертация выполнялась при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00243; в рамках хоздоговорной научно-исследовательской работы с ОАО «Климов» по теме «Разработка методов и средств ускоренного определения оптимальных режимов резания перспективных титановых сплавов для изготовления деталей двигателя для ПСВ» (2013 г.); в рамках научно-исследовательской работы, являющейся утвержденной частью федеральной целевой программы по разделу «Разработка технологии механической обработки деталей из труднообрабатываемых материалов для авиационного двигателестроения на основе определения рациональных режимов резания и выбора эффективного инструмента» (2014-2016 гг.); а также в рамках хоздоговорной научно-исследовательской работы с ОАО «Климов» по теме «Выбор параметров обработки, выбор режущего инструмента и проведение операций предварительной механической обработки полуфабрикатов из интерметаллидных титановых сплавов ВИТ1 и

ВТИ-4» (2015 г.).

Разработанная методика определения рациональных режимов резания при точении специальных сплавов на основе модели взаимосвязи параметров обработки была апробирована на производственном комплексе ГК «Взлет», ЦНИИ КМ «Прометей» и АО «Морские навигационные системы».

Работа соответствует паспорту специальности – 2.5.6 «Технология машиностроения» пункту 3 «математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения» и пункту 8 «проблемы управления технологическими процессами в машиностроении»

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений (А – В). Основные материалы изложены на 117 страницах машинописного текста (136 страниц, включая приложения), в том числе содержат 36 таблиц, 26 рисунков, 103 библиографических наименования.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, степень разработанности, цель и задачи научного исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, применяемые методы исследования и изложено краткое содержание диссертационной работы.

В первой главе приведен литературный обзор экспериментальных и теоретических исследований по теме диссертации.

Проведен обзор основных свойств титановых сплавов и рассмотрены особенности в области их применения. По данным литературных источников титановые сплавы, в том числе жаропрочные, нашли широкое применение в авиационном и космическом двигателестроении за счет благоприятных свойств, главными из которых являются значительная удельная прочность, жаропрочность, небольшой удельный вес и способность противостоять коррозии. Их используют преимущественно для изготовления ответственных деталей (дисков, валов, лопаток и т.д.), которые в эксплуатационных условиях подвержены воздействию значительных вибрационных нагрузок при достаточно высоком температурном режиме. Обрабатываемость титановых сплавов резанием существенно зависит от их химического и фазового состава, типа и параметров микроструктуры. Основные проблемы при обработке титана – это низкая теплопроводность, большая склонность его к налипанию и задиранию. Решением проблемы повышения качества изделий занимались Силин С.С., Безъязычный В.Ф. Ими была разработана модель образования погрешности при точении деталей авиационных двигателей.

При назначении параметров режима точения необходимо решить одну из многих проблем, стоящих при обеспечении эффективности, точности, качества деталей, получаемых при операции тонкого точения

В настоящее время появляются новые специальные сплавы, для которых характерна труднообрабатываемость, определяющаяся несколько иными условиями поведения технологической системы, которые невозможно учесть в известных моделях. Это связано с тем, что труднообрабатываемые материалы имеют отличные физико-механические свойства и при точении таких сплавов и сталей в большей степени проявляется влияние температуры, сил резания, поверхностного упрочнения, что сильно сказывается на интенсивности износа режущего инструмента.

Для этого дополнительно необходимо было рассмотреть влияние основных параметров режима финишной лезвийной обработки на стойкость инструмента, таких как силы резания, материал и геометрия режущей части инструмента, и температуры в зоне резания.

Для получения более корректной модели оценивающей процесс обработки труднообрабатываемых сталей и сплавов необходимо провести исследование по установлению параметров, связанных с особенностями финишной лезвийной обработки труднообрабатываемых титановых сплавов.

Во второй главе изложена методология и методика проведения научного эксперимента, материалы, оборудование и приборы для изучения качества деталей.

Эксперименты проводились на спроектированной и изготовленной в ВШМ экспериментальной установке (Рис.1), которая представляет собой многопараметрический стенд для исследования обработки образцов деталей типа «тел вращения» из специальных титановых сплавов. Установка была разработана на базе станка модели Knuth Turnado 230/1000v, ее основные элементы - система измерения размерного износа режущего инструмента, система измерения температурного удлинения резца, тепловизор для измерения температуры в зоне резания, динамометр для измерения сил резания и прибор для измерения шероховатости поверхности профилометр marsurf PS1.

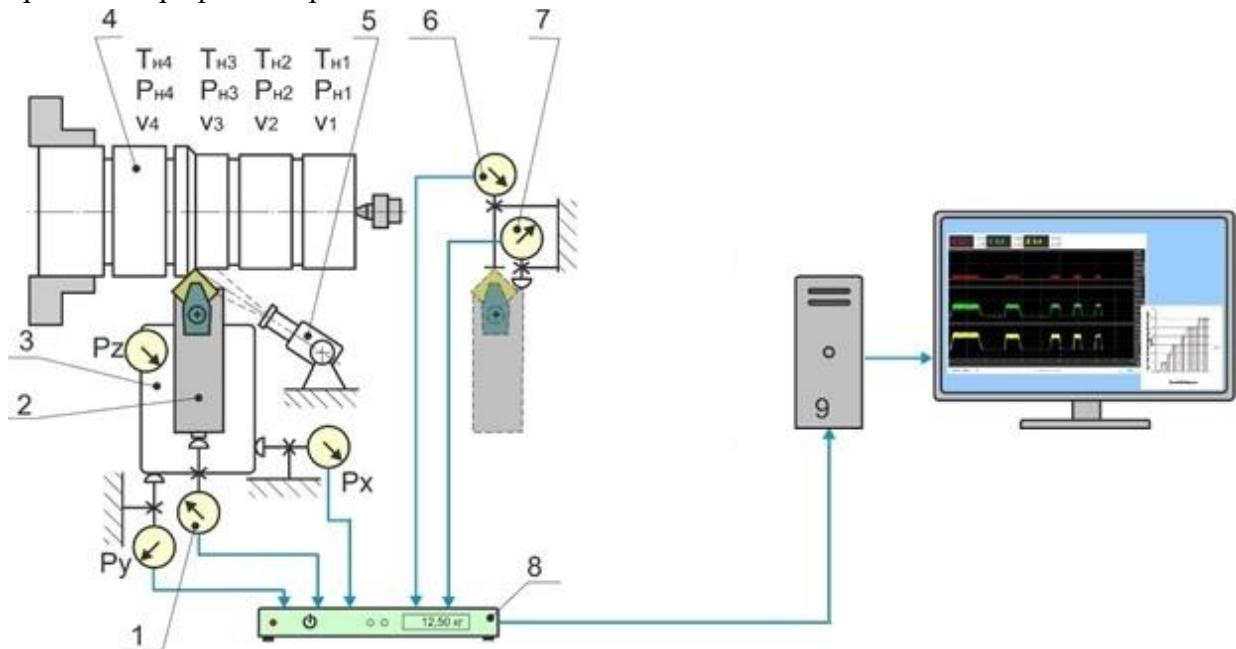


Рисунок 1 – Многопараметрический стенд для обработки образцов деталей.

1 – система измерения температурной деформации резца; 2 – резец; 3 – динамометр УДМ-600; 4 – заготовка из титана BT8; 5 – тепловизор BALTECH TR-01500; 6 – индуктивный датчик М-022-02 измерения положения вершины резца; 7 – индуктивный датчик М-022-02 измерения положения державки резца; 8 – блок сбора и обработки первичной информации; 9 – блок вторичной обработки информации.

Во время обработки фиксируются:

- размерный износ;
- износ резца по задней грани;
- составляющие силы резания и рассчитывается равнодействующая сил в режиме реального времени;
- измеряется температура в зоне резания (температура передней поверхности резца в

момент его выхода из зоны резания);

- измеряется в процессе резания температура верхней поверхности стружки;
- измеряется шероховатость поверхности;
- диаметр обработанной детали.

На данной установке благодаря оснащению ее разными модулями и системами измерения (Рис.2) можно было определять размерный износ режущего инструмента, величину температурного удлинения резца, силы резания, температуру в зоне резания непосредственно в процессе обработки (Рис.3).



Рисунок 2 – Вид установки с измерительными модулями.



Рисунок 3 – Визуализация измерения температуры в зоне резания с помощью тепловизора.

Для предварительной оценки влияния основных параметров финишной лезвийной обработки титановых сплавов на качество и эффективность обработки деталей были проведены предварительные эксперименты. Они были направлены на выявление и установление закономерностей воздействия температуры в зоне резания на изменения свойств материалов заготовки, режущего инструмента и общий характер физических явлений, которые имеют место в процессе резания при обработке жаропрочных титановых сплавов и сталей. Эксперименты проводили с использованием многопараметрического стенда, позволяющего измерять все параметры процесса финишной лезвийной обработки в процессе точения заготовок.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям, которые осуществлялись в два этапа. Первый этап заключался в проведении серии однофакторных экспериментов с целью

получения зависимостей размерного износа инструмента, его температурного удлинения, температуры в зоне резания, сил резания и параметров шероховатости поверхности от режимов финишной лезвийной обработки. Второй этап заключался в проведении полно факторного эксперимента с целью получения зависимости интенсивности износа, температуры в зоне резания и силы резания от параметров финишной лезвийной обработки.

При проведении предварительных экспериментов по обработке титановых жаропрочных сплавов доминирующим параметром, влияющим на точность обработки, был выявлен нелинейный характер износа режущего инструмента в процессе финишной обработки.

Следует отметить, в случае описания износа линейной зависимостью, его можно было бы скомпенсировать. Однако испытания показали, что характер зависимости износа от пути резания нелинейный и неравномерный, поэтому для построения модели оценки значений температуры, силы резания и интенсивности износа режущего инструмента от физико-механических характеристик обрабатываемого материала в тяжелых условиях обработки необходимо учитывать взаимовлияние параметров режима обработки и материала заготовки.

Поскольку сила резания при финишной лезвийной обработке оказывают главное влияние на интенсивность износа, необходимо было изучить это влияние. Кроме того, силы резания, также приводят к изменению температуры в зоне обработки, которая оказывает влияние на характер износа.

Экспериментальные исследования проводили на специализированном многопараметрическом стенде, с помощью которого можно было определять силу резания, температуру в зоне резания и износ режущей части инструмента непосредственно в процессе обработки.

Учитывая, что скорость резания в определенной степени оказывает влияние на температуру в зоне резания и силу резания, эксперимент проводили при варьировании скорости в пределах от 40 м/мин до 80 м/мин., определяя при этом все параметры режима обработки. Вместе с этим, в ходе проведения эксперимента определяли силы и температуру в зоне резания.

В результате получили, что в процессе чистового точения со $V=40$ м/мин составляющая силы резания $P=145$ Н, а температура в зоне резания $T=229^{\circ}\text{C}$, со $V=60$ м/мин - $P=231$ Н, $T=278^{\circ}\text{C}$, а при $V=80$ м/мин - $P=212$ Н, $T=314^{\circ}\text{C}$. Установлено, что минимальные значения интенсивности износа режущей части инструмента зафиксированы при $V=40$ м/мин и составили $0,79\ldots0,091$ мкм/км, а максимальные значения получены при $V=80$ м/мин и составили $4,86\ldots6,08$ мкм/км.

Таким образом, в результате реализованного эксперимента можно утверждать, что с увеличением скорости резания и температуры в зоне резания интенсивность износа возрастает. При температуре в пределах $291\ldots342^{\circ}\text{C}$ износ находится в пределах $4,86\ldots6,08$ мкм/км.

Чтобы увязать интенсивность износа, температуру в зоне резания и силу резания провели полно факторный эксперимент. В результате эксперимента получили уравнения регрессии, а после обработки их адекватности получили уравнения в натуральном виде.

$$Y_{u0} = 3,77 + 0,17Z_1 + 11,4Z_3 - 0,44Z_1Z_3$$

$$Y_T = 5,91 + 4,23Z_1 + 0,71Z_3 + 0,32Z_1Z_3$$

$$Y_P = 1,49 + 2,76Z_2 + 3,45Z_3 - 0,12Z_2Z_3$$

Анализ уравнения показывает, что скорость резания оказывает основное влияние, затем температура в зоне резания на интенсивность износа режущей части инструмента.

Четвертая глава посвящена разработке уточняющей модели для назначения рациональных режимов финишной лезвийной обработки специальных титановых сплавов.

Обычно, режимы резания назначают на основе стойкостных испытаний или справочных данных. Однако, эти рекомендации оказываются справедливыми лишь для тех конкретных условий, то есть для выбранных материала заготовки и марки режущего инструмента, применяемых при проведении испытаний.

Обзор существующих математических моделей показал, что в настоящее время не представлено математической модели, описывающей и устанавливающей совокупность взаимодействий параметров обработки в процессе резания, т. е. описывающей процесс точения с точки зрения взаимосвязи сил резания, износа инструмента и температуры в зоне резания от времени (пути резания). Также, без проведения многочисленных экспериментов, не представляется возможным определить момент возникновения предельно допустимого значения износа

Известны выражения, устанавливающие усредненные связи отдельных параметров процесса точения от выбранных режимов резания, материала режущего инструмента и заготовки, а также геометрических параметров режущего инструмента. Например, температура в зоне резания определяется по формуле:

$$T = C_T v^z s^y t^x, \quad (1)$$

где v – скорость резания, м/мин; s – подача, мм/об; t – глубина резания, мм; C_T – коэффициент, определяемый опытным путем; z, y, x – коэффициенты, характеризующие степень влияния скорости резания, подачи и глубины резания на температуру в зоне резания.

Оценка значений параметров силы резания рассчитывается по формулам:

$$P_z = C_{pz} t S^{0.75}, \quad (2)$$

$$P_x = C_{px} t^{1.2} S^{0.55}, \quad (3)$$

$$P_y = C_{py} t^{0.9} S^{0.75}, \quad (4)$$

где C_{pz}, C_{px}, C_{py} – постоянные, зависящие от обрабатываемого материала, м/мин; S – подача, мм/об; t – глубина резания, мм.

Стойкость режущего инструмента определяется по следующей формуле:

$$T = \sqrt[m]{\frac{C}{V}}, \quad (5)$$

где v – скорость резания, м/мин; m – показатель относительной стойкости; C – константа, зависящая от свойств обрабатываемого материала.

Обзор имеющихся на данный момент академических материалов показал, что в настоящее время нет математических моделей, описывающих совокупность взаимодействий рассматриваемых параметров обработки непосредственно в процессе точения. Чаще всего ограничиваются указанием критериев затупления резца, например, при какой величине износа резца следует прекратить процесс точения.



Рисунок 4 – Размерный износ резца от пути резания

Исключением является описание износа резца, предложенное Александром Павловичем Соколовским. За основу было принято, что износ резца в зоне нормального износа линеен, т.е. интенсивность износа постоянна (Рис.4). Характеристики износа резцов, приведенные Адольфом Матвеевичем Вульфом, показывают момент начала предельно допустимого износа, но не указывают на причины его появления (Рис.5).

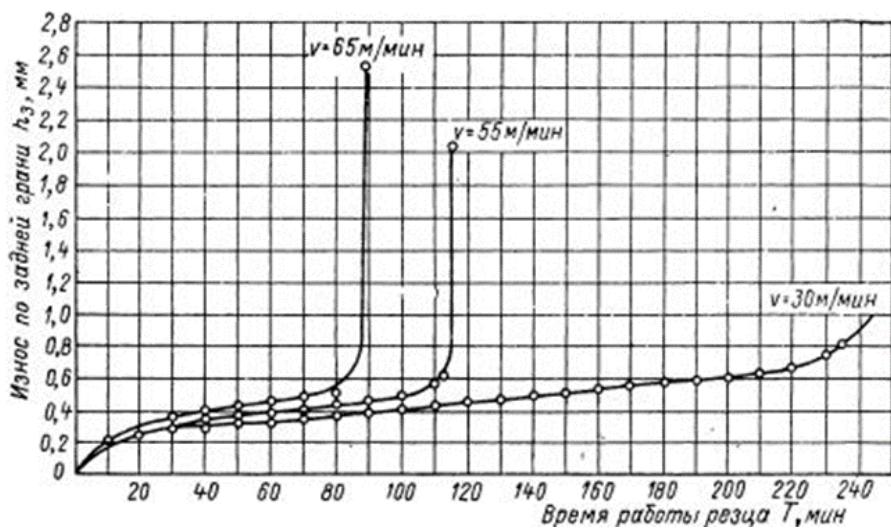


Рисунок 5 – Размерный износ резца от пути резания

Если бы износ имел линейную характеристику, то его можно было бы скомпенсировать. Однако, в результате проведения испытаний и выявления неравномерности характера кривой износа от пути резания, необходимо было:

1. Объяснить причины нелинейности износа резца в процессе точения.
2. Установить момент замены резца, т. е. определить его стойкость.
3. Найти методы снижения интенсивности и повышения стабильности износа резца в

процессе точения, т.е. создать условия, при которых износ резца носил бы линейный характер, что позволило бы в дальнейшем увеличить путь, пройденный инструментом, а следовательно его стойкость.

Основная цель разработки модели – обеспечение возможности проведения вычислительных экспериментов с последующим прогнозированием результатов погрешности при финишной лезвийной обработке. При этом, с помощью модели необходимо обеспечить возможность анализа влияния отдельных составляющих параметров обработки на суммарную погрешность обработки и отражение их взаимодействия и взаимосвязи.

В. Рейхелем был сформулирован принцип, согласно которому, определенному периоду стойкости резца для заданной пары инструмент-деталь соответствует одна и та же температура резания, не зависящая от комбинации элементов режима резания. Макаров Алексей Дмитриевич сформулировал и доказал следующее положение: оптимальным скоростям резания (для заданного материала режущей части инструмента) при различных комбинациях скорости резания, подачи и глубины резания соответствует постоянная температура в зоне резания (оптимальная температура резания). Следует отметить, что вышеуказанные принципы были сформулированы без учета изменения температуры от пути резания (от времени).

Для подтверждения всего вышесказанного были проведены дополнительные эксперименты, на основании которых была выведена математическая модель, связывающая и описывающая изменение основных параметров обработки в зависимости от пути резания. Структурная схема экспериментов представлена на рисунке 6.

Эксперименты были проведены для финишных лезвийных режимов обработки на материале BT8 при точении пластины SANDVIC VCGX160404-AL на пяти различных скоростях резания до полного износа, в результате чего были получены экспериментальные значения износа режущего инструмента, температуры в зоне резания и силы резания от пути резца в металле.

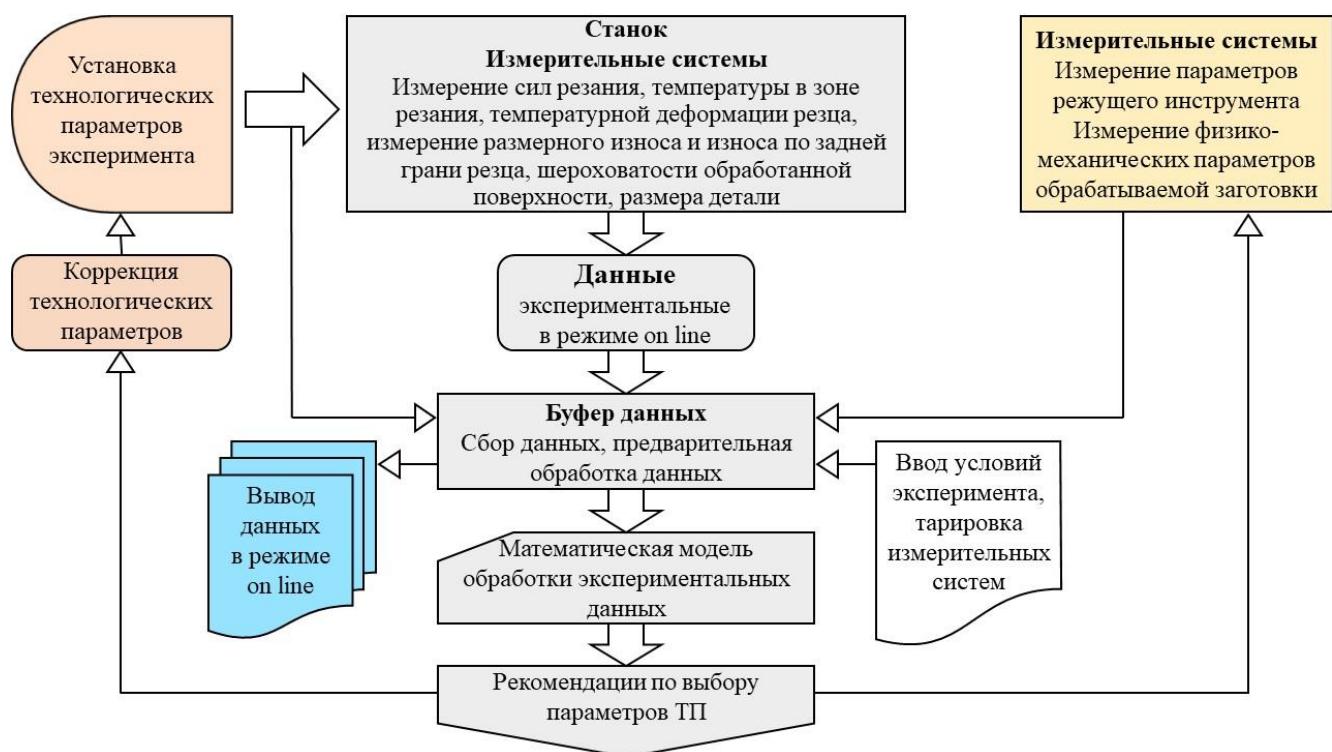


Рисунок 6 – Структурная схема экспериментальных исследований

На основании анализа экспериментальных были принятые следующие положения:

1. В качестве критерия оптимальности в начальный период обработки принимается минимальная интенсивность размерного износа, а значит и минимальный относительный износ, так как этот параметр позволяет объективно сопоставить режущие свойства инструмента при различных скоростях резания:

$$u_0 = \frac{dh(L)}{dL} \cdot \frac{\text{мм}}{\text{км}}, \quad (6)$$

где $h(L)$ – размерный износ на участке нормального износа, мм; L – путь резания на участке нормального износа, км.

2. Выбор оптимальных режимов резания ведется для финишной лезвийной обработки. Обработка заготовок производится на многопараметрическом стенде.

3. Выбор режимов резания сводится к определению оптимальной скорости резания в виду следующих факторов:

– выбор глубины резания при финишной лезвийной обработке, как правило, ограничивается припуском на чистовую обработку и может меняться в узких диапазонах значений;

– подача и геометрия режущего инструмента ограничиваются требованиями к качеству поверхности, в частности шероховатостью поверхности и определяются по известной зависимости:

$$R_Z \cong 1000 \frac{s^2}{8r}, \quad (7)$$

где R_Z – высотный параметр шероховатости поверхности, мкм; s – подача, мм/об; r – радиус закругления вершины резца, мм;

– пределы варьирования скорости резания при чистовом точении могут быть значительно шире, в сравнении с изменением глубины резания и подачи. Следует учитывать при окончательном выборе скорости резания, что этот параметр также влияет на качество поверхностного слоя детали, шероховатость поверхности.

4. Установлена закономерность постоянства оптимальной температуры в зоне резания, т. е. у каждой пары «обрабатываемый материал – материал режущего инструмента» существует одна температура обработки, при которой скорость размерного износа минимальна. Эта температура не зависит от различных комбинаций скорости резания, подачи, глубины резания и от геометрических параметров режущей части инструмента, а также применения СОТС. Поиск этой оптимальной температуры обработки является ключом к решению задачи по выбору рациональных режимов резания.

5. Известно, что температура в зоне резания при прочих равных условиях связана со скоростью, глубиной резания и подачей и определяется по формуле (1).

6. Проведенные исследования позволили сделать вывод, что стойкость режущего инструмента коррелирует с соотношением механических характеристик материалов «режущий инструмент – заготовка» только при температуре, которая возникает в зоне резания. Была выдвинута гипотеза, что максимальное значение разности физико-механических свойств материала режущего инструмента и материала заготовки соответствует оптимальной температуре, т.е. минимальному относительному износу.

7. Под ускоренным выбором режимов резания для инструмента понимается сведение к минимуму количества натурных экспериментов по подбору рациональных режимов для конкретного обрабатываемого материала. Выбор следует проводить на основе предлагаемой математической модели, построенной на результатах сравнения физико-механических свойств материала режущего инструмента с материалом заготовки при различных температурах нагрева.

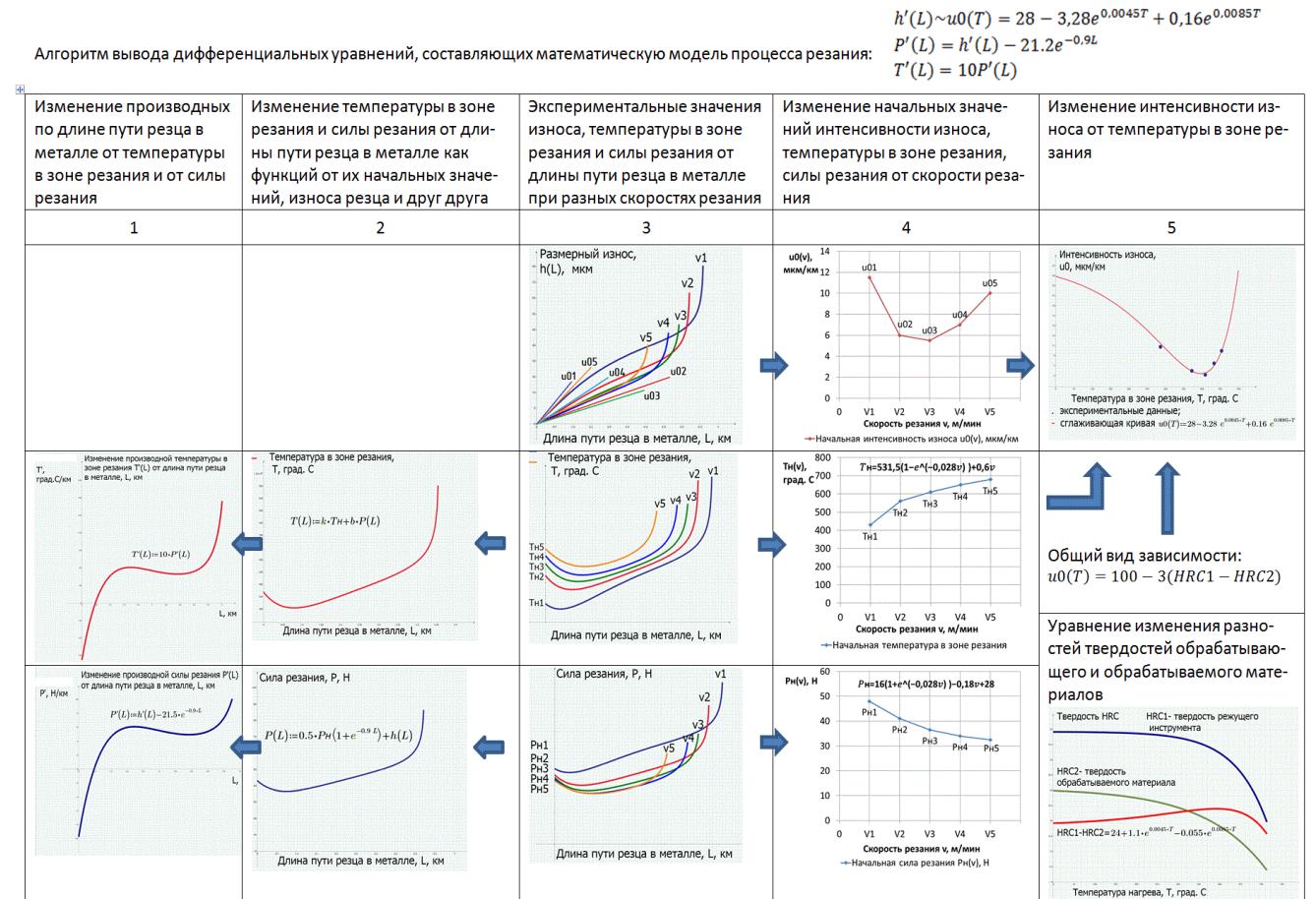


Рисунок 7 – Общий вид и алгоритм вывода математической модели

Рассмотрим описание уравнений представленной математической модели (Рис.7):

1. Изменение интенсивности износа во времени обработки как функции температуры в зоне резания.
2. Изменение силы резания во времени обработки как функции температуры в зоне резания и абсолютной величины износа в каждый конкретный промежуток времени.
3. Изменение температуры во времени обработки как функции изменения силы и интенсивности износа.

В процессе исследования была проведена проверка адекватности модели на соответствие полученным экспериментальным данным. Далее приведен график изменения износа резца и его интенсивности на основании экспериментальных данных, полученных при обработке титанового сплава ВТ8. А также построены теоретические кривые изменения износа и его производной при проведении численного эксперимента при тех же режимах резания и одинаковых начальных условиях с помощью предлагаемой математической модели (Рис.8).

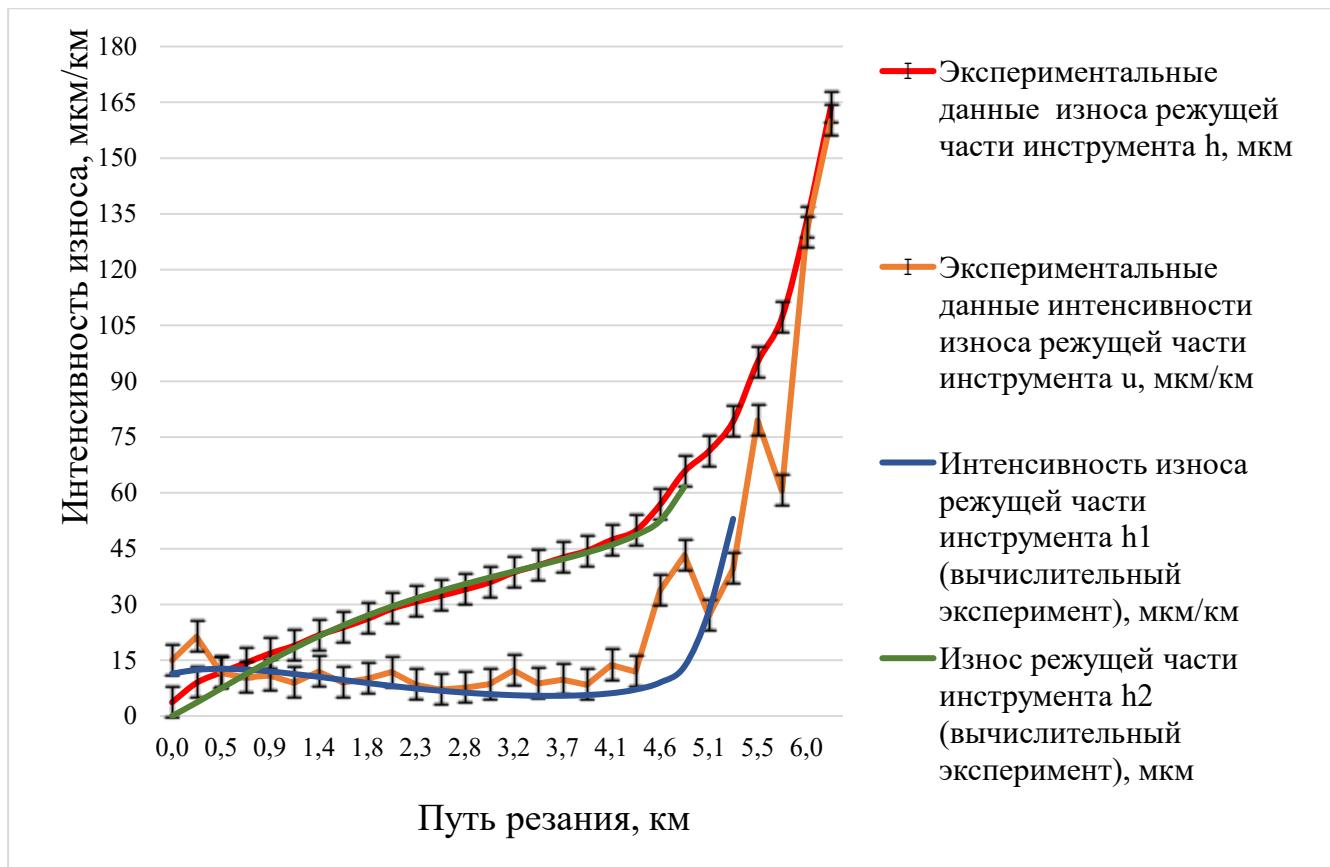


Рисунок 8 – Сравнение результатов натурного эксперимента по обработке сплава BT8 с результатами вычислительного эксперимента при одинаковых начальных условиях

Также разработана методика назначения рациональных параметров финишной лезвийной обработки в условиях интенсивного износа режущего инструмента при обработке специальных титановых сплавов и практические рекомендации по выбору рациональных режимов резания.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований в виде графических зависимостей, которые упрощают процесс назначения режимов точения на многопараметрическом стенде по оценке режимов резания при обработке заготовок типа тел вращения из титанового сплава BT8. С использованием твердосплавных пластин DNMG 150404 H13A и VCGX160404-AL H10.

Проведено сопоставление результатов исследований теоретических и экспериментальных данных, поставлен эксперимент по определению интенсивности износа инструмента.

Для подтверждения правильности использования методики для назначения рациональных параметров точения труднообрабатываемых титановых сплавов на основе математической модели были проведены эксперименты по обработке жаропрочного титанового сплава BT41, которые показали хорошую сходимость результатов.

Последовательность назначения выбора рациональных режимов резания при обработке специальных титановых сплавов приведена в таблице 1.

Таблица 1

Последовательность назначения выбора рациональных режимов резания при обработке специальных титановых сплавов

Действия	Определяемый вид зависимостей
1. Определение на стенде зависимости интенсивности износа, силы резания и температуры в зоне резания при остром резце от скорости резания.	$u0_H = f1(v)$ $P_H = f2(v)$ $T_H = f3(v)$
2. Построение зависимости интенсивности износа от температуры в зоне резания по экспериментальным данным.	$u0 = f4(T)$
3. Определение изменения разности твердостей «пары» от температуры нагрева.	$HRC1 - HRC2 = a + be^{\alpha T} + ce^{\beta T}$
4. Аппроксимация функции $f4$, методом наименьших квадратов в виде зависимости $HRC1 - HRC2 = a + be^{\alpha T} + ce^{\beta T}$.	$u0 = A + Be^{\alpha T} + Ce^{\beta T}$
5. Определение оптимальной температуры в зоне резания, соответствующей минимальной интенсивности износа (взять производную от выражения $f4$ и приравнять к 0). Решить полученное уравнение относительно температуры.	$u0' = B\alpha e^{\alpha T} + C\beta e^{\beta T} = 0$ Вычисляется значение T_o
6. Проведение многофакторного эксперимента для определения коэффициентов в формуле (1).	$T = C_T v^z s^y t^x$ (1)
7. Предварительное определение скорости резания, соответствующей минимальной интенсивности износа резца. Задача решается при подстановке в формулу (1) предварительно выбранных: подаче, глубины резания и оптимальной температуры.	$v_o = \left(\frac{T_o}{C_T s^y t^x} \right)^{\frac{1}{z}}$
8. Получение экспериментальных зависимостей силы резания и температуры в зоне резания от пути резца в металле – L , при предварительно выбранных параметрах: скорости резания v_o , подаче и глубины резания. Аппроксимация полученных зависимостей в виде формул.	$P(L) = 0,5P_H(1 + e^{\gamma L}) + wh(L)$ $T(L) = kT_H + qP(L)$
9. Взятие производных.	$P'(L) = 0,5\gamma P_H e^{\gamma L} + wh'(L)$ $T'(L) = qP'(L)$
10. Математическая модель процесса резания.	$h'(L) \sim u0(T) = 28 - 3,28e^{0.0045T} + 0,16e^{0.0085T}$ $P'(L) = h'(L) - 21.2e^{-0.9L}$ $T'(L) = 10P'(L)$ При аппроксимации $w \approx 1$

Продолжение таблицы 1

Действия	Определяемый вид зависимостей
<p>11. Уточнение выбора оптимальной скорости резания по максимальной стойкости резца, т.е. по максимальному пути, пройденному резцом в металле.</p> <p>Решение системы дифференциальных уравнений при различных скоростях резания. В качестве начальных условий принимаются значения, вычисленные по полученным зависимостям в пункте 1.</p> <p>По представленным результатам расчета скорость V1 является оптимальной.</p>	 <p>Размерный износ, $h(L)$, мкм</p> <p>Длина пути резца в металле, L, км</p>

Также в четвертой главе разработаны практические рекомендации и методика выбора рациональных режимов финишной лезвийной обработки специальных титановых сплавов. В процессе разработки технологического процесса финишной лезвийной обработки использование системы дифференциальных уравнений (таблица 1) предоставляет возможность оптимизации скоростей резания, что способствует осуществлению обработки с минимальной интенсивностью износа режущей части инструмента, при этом обеспечивая заданные параметры точности и шероховатости. Таким образом, при проектировании технологического процесса финишной лезвийной обработки специальных титановых сплавов возможно достижение снижения себестоимости и повышения производительности обработки деталей типа «тел вращения» на 20-30%.

Приведены рекомендации по выбору материала и покрытий режущей части инструмента, разработана методика выбора рациональных режимов обработки при изготовлении деталей из титановых сплавов BT8 и BT41.

Представленные рекомендации позволяют добиться минимального износа режущей кромки инструмента. Представлена номограмма, с помощью которой можно определить размерный износ режущей кромки инструмента для разных скоростей в процессе финишной лезвийной обработки. Аналогичные рекомендации приведены на основании производственных испытаний, применение которых позволило повысить производительность за счет увеличения стойкости режущей кромки инструмента на 25-30%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование технологического процесса финишной лезвийной обработки специальных жаропрочных сплавов показало, что начальная интенсивность износа режущего инструмента не является постоянной, а существенно изменяется в процессе точения. Экстраполяция величины размерного износа режущей части инструмента по начальной интенсивности приводит к завышенным оценкам его стойкости. Таким образом, подбор рациональных режимов финишного точения для начальных условий обработки специальных сплавов (острый резец) не гарантирует максимальной стойкости резца при выбранных изначально режимах резания.

В качестве критерия стойкости резца был принят путь, пройденный резцом в материале до момента перехода резца из зоны нормального износа в зону предельно допустимого износа,

т.е. момент потери режущей способности инструмента.

С целью исключения трудоемких и затратных экспериментов по определению истинной стойкости инструмента была разработана математическая модель оценки процесса финишной лезвийной обработки, учитывая взаимосвязи силы резания, температуры и износа от пути резания.

С помощью модели стало возможным провести вычислительный эксперимент. Изменяя скорость резания с любой дискретностью, можно определить точку перехода резца из зоны нормального в зону предельно допустимого износа для каждой скорости резания, тем самым определив истинную стойкость инструмента.

В процессе работы были получены следующие результаты:

1. Был обоснован выбор основных параметров технологического процесса финишной обработки изделий из специальных сплавов на основе титана.

2. Проведено исследование влияния основных параметров финишной обработки на эффективность и требуемый уровень точности обработки титановых сплавов с использованием разных материалов режущей части инструмента с различными покрытиями.

3. Разработана математическая модель оценки стойкости инструмента в процессе операции финишной лезвийной обработки деталей типа «тел вращения» из специальных титановых сплавов.

4. Была разработана научно обоснованная методика назначения рациональных технологических параметров финишной обработки специальных титановых сплавов, обеспечивающих требуемые уровни точности, параметров шероховатости поверхности при изготовлении деталей типа «тел вращения» в тяжелых условиях обработки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК РФ:

1. Анухин И.В., Анухин В.И., Мурашкин С.Л. Метод выбора режимов резания никелевых и титановых интерметаллидных сплавов для авиационного двигателестроения на базе математической модели. // Научно-Технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета №8. 2014. С. 80-90.

2. Анухин И.В., Анухин В.И., Любомудров С.А., Мурашкин С.Л. Метод выбора режимов резания интерметаллидных сплавов для авиационного двигателестроения на базе математической модели. // Университетский научный журнал №8. 2015. С. 91-101.

3. Анухин И.В., Анухин В.И., Любомудров С.А., Мурашкин С.Л. Выбор режимов резания труднообрабатываемых жаропрочных интерметаллидных сплавов тепловизионным методом. // СТИН №1 2015. С. 16-20.

4. Анухин И.В., Анухин В.И., Любомудров С.А., Мурашкин С.Л. Измерение температуры в зоне резания с помощью тепловизионного метода. // Металлообработка №1 2015. С. 6-12.

Публикации в рецензируемых журналах и изданиях в международных базах научного цитирования (Scopus):

5. Анухин И.В., Анухин В.И., Любомудров С.А., Мурашкин С.Л. Thermal Imaging in selecting the cutting conditions for high temperature intermetallic alloys. // Russian Engineering Research №7. 2015. С. 544-548.

Публикации в других изданиях:

6. Анухин И.В., Анухин В.И., Мурашкин С.Л., Слатин В.И. Метод выбора оптимальных режимов резания жаропрочных сплавов на базе математической модели. // Неделя науки

СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ. Ч.1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2013. С. 12-14.

7. Анухин И.В., Анухин В.И., Мурашкин С.Л., Слатин В.И. Измерение температуры в зоне резания тепловизионным методом. // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ. Ч.1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2013. С. 18-23.

8. Анухин И.В., Анухин В.И., Любомудров С.А. Тепловизионный метод измерения температуры в зоне резания при точении. // Современные научноемкие технологии, оборудование и инструменты в машиностроении (МТЕТ) №1. 2014. С. 118-130.

9. Анухин В.И., Мурашкин С.Л., Слатин В.И. Оценка точности тепловизионного метода измерения температуры в зоне резания при точении. // Неделя науки СПбГПУ. Научный форум с международным участием, материалы научно-практической конференции. Том Часть 2. Институт металлургии, машиностроения и транспорта СПбГПУ. 2015. С. 297-301.

10. Анухин И.В., Анухин В.И., Мурашкин С.Л., Слатин В.И. Измерение температуры в зоне резания при точении с помощью тепловизионного метода. Металлообработка. Издательство "Политехника". №1.2015. С.6-12.

11. Анухин И.В., Любомудров С.А., Хрусталева И.Н. Оценка точности тепловизионного метода измерения температуры в зоне резания при точении. // Тенденции развития науки и образования №49. 2019. С. 11-14.

12. Анухин И.В., Слатин В.И. Тепловизионный метод измерения температуры при точении. // Перспектива 2020, Материалы международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых №3. 2020. С. 26-32.

13. Анухин И.В., Любомудров С.А., Шабалин Д.Н. Описание и возможность применения тепловизионного метода измерения температуры резания в условиях производства. // Модели и методы развития технологий машиностроения в условиях цифровизации экономики России. 2022. С. 23-32.

14. Анухин И.В., Любомудров С.А., Шабалин Д.Н. Подбор оптимальных режимов резания с помощью измерения температуры при точении. // Перспективные машиностроительные технологии (АЕТ 2022). 2022. С. 34-37.