

На правах рукописи



МАРЧЕНКО АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ТОЧЕНИЯ С УЧЁТОМ
ВИБРАЦИОННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И ТЕРМОФЛУКТУАЦИЙ
В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ**

2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону - 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет»

Научный руководитель

Лебедев Валерий Александрович, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Официальные оппоненты

Козлов Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Штин Антон Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Станки и инструменты» ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Защита диссертации состоится «24» сентября 2026 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета 24.2.297.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет» по адресу: 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, зал заседаний диссертационных советов ауд. 1-450.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» и на официальном сайте: <https://science.donstu.ru/apex/f?p=853:7:::NO:RP::>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации просим высылать по адресу: 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.297.01 В.П. Лапшину: e-mail: lapshin1917@yandex.ru, тел. 8(900)122-75-14

Автореферат разослан «__» июля 2026 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.297.01

кандидат технических наук, доцент

Лапшин Виктор Петрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из главных факторов, определяющих износостойкость инструментального режущего материала, является температура в зоне обработки. В результате многочисленных исследований тепловых явлений в зоне обработки разработаны теплофизические основы процесса резания и решен большой комплекс вопросов, раскрывающих основные закономерности их формирования и влияния на износ режущего инструмента; получены аналитические зависимости для их описания и оценки, разработаны методы и средства контроля. Доказано, что процесс резания металлов сопровождается значительным тепловыделением в зоне обработки, представляющего собой единство объёмных и флуктуационных процессов, обусловленных спецификой контактного взаимодействия, неоднородностью распределения напряжений и скоростей, зарождением и разрушением динамических структур трения, и их движением. Эти процессы протекают в объёмах, активизированных внешним воздействием.

Вместе с тем, как показывает анализ всех известных данных, сложность и нелинейность протекания термофлуктуационных процессов и недостаточная изученность ряда факторов, оказывающих влияние на тепловое состояние зоны резания, затрудняют корректную постановку задач, связанных с выбором режимов резания, обеспечением наиболее эффективных условий обработки и снижением износа инструмента.

Одним из таких вопросов является влияние технологических режимов обработки на температуру в зоне резания. Представленные работы в этой области в большинстве случаев посвящены изучению изменения средней температуры при вариации одного из параметров режимов резания, но воздействие вибраций, генерируемых самой технологической системой при определённых режимах обработки, на характер тепловыделения в контактной зоне не анализируется. При этом проводимые исследования показывают, что вибрации режущего инструмента и температура в зоне резания обладают высокой степенью корреляционной связи.

Не получил своего разрешения и вопрос, связанный с обоснованием влияния на температуру передней поверхности резца деформационных процессов на участке вторичной упруго-пластической деформации. Предложенная для их оценки расчетная модель не учитывает флуктуационный характер изменения входных параметров.

Решение этих и ряда других вопросов определяют актуальность, цель и задачи диссертационного исследования.

Цель работы: Установление закономерностей влияния вибровозмущений технологической системы на изменение температуры в зоне резания и разработка на этой основе, с применения методов численного моделирования, методики выбора рациональных режимов обработки точением, обеспечивающих повышение износостойкости режущего инструмента

Задачи исследований:

1. Установить взаимосвязь между кинематическими возмущениями технологической системы и флуктуациями процессов в зоне резания.
2. Разработать конечно-элементную модель деформационных процессов в контактной зоне на участке вторичных упруго - пластических деформаций.
3. Установить закономерности температурного распределения на передней поверхности резца с учётом колебаний параметров режимов резания.
4. Обосновать критерий оптимизации, учитывающий термофлуктуационные процессы в контактной зоне, и обеспечивающего минимизацию износа инструмента.
4. Разработать методику выбора рациональных режимов обработки с учётом влияния вибрационных возмущений на импульсные изменения контактной температуры.
5. Осуществить практическое применение результатов исследования на примере точения реакторных сталей.

Объектом исследования является процесс точения деталей лезвийным инструментом

Предмет исследования – влияние вибровозмущений технологической системы, деформационных и технологических флуктуаций на изменения мгновенной контактной температуры передней поверхности резца в процессе резания

Положения, выносимые на защиту: результаты исследования влияния вибровозмущений технологической системы на основные характеристики процесса резания; связь энергии вибраций в зоне резания с температурными изменениями, качеством поверхности и износостойкостью инструмента; анализ расчетной модели температуры передней поверхности резца; моделирование деформационных процессов в контактной зоне на участке вторичных пластических деформаций методом конечных элементов; оценка влияния режимов резания в моменты флуктуаций на импульсное изменение температуры передней поверхности; методические рекомендации по определению рациональных режимов точения сталей с учётом вибрационных возмущений и теплового состояния зоны резания.

Научная новизна проведённых исследований:

1. Установлена связь энергии вибраций в зоне резания, возбуждаемых вибровозмущениями технологической системы, с температурными изменениями, качеством поверхности и износостойкостью инструмента, позволяющая оценить степень влияния термофлуктуаций на трибологические и термодинамические параметры процесса резания (п. 6 паспорта специальности 2.5.5);

2. Разработаны методологические основы моделирования влияния деформационных и технологических флуктуаций на изменения температуры передней поверхности резца в процессе резания, позволяющие повысить точность расчета по фундаментальной зависимости, предложенной Чичинадзе–Шучевым для оценки тепловых эффектов в зоне резания, максимально приблизить её к реальным условиям и на их основе осуществить выбор рациональных режимов обработки (п.2 паспорта специальности 2.5.5).

Теоретическая значимость. Раскрыты закономерности влияния вибровозмущений технологической системы на основные характеристики процесса резания; деформационных и технологических флуктуаций на изменения температуры передней поверхности резца в процессе резания.

Практическая значимость. Разработана обобщённая методика выбора оптимальных режимов обработки с учётом влияния вибрационных возмущений на импульсные изменения контактной температуры в зоне резания.

Методы исследования и достоверность результатов. Теоретические исследования базируются на фундаментальных положениях теории резания и трения металлов, термодинамики, теплофизических процессов при изнашивании инструментальных материалов, использовании численных методов моделирования. Экспериментальные исследования выполнены с применением современных технических средств измерений, специально разработанных методик, предусматривали как лабораторные, так натурные испытания на отечественном оборудовании. Достоверность результатов решения поставленных задач подтверждается охватом достаточного объема научной литературы, согласованностью теоретических предпосылок с результатами их экспериментальной проверки, проверкой их применимости в условия АО «АЭМ – Технологии», завод «Атоммаш» в г. Волгодонске.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования докладывались: на: 1-й Международной научно-практической конференции «Интеллектуальная трибология в машиностроении». Санкт-Петербург, 2024; Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении». Москва, 2024; XVI международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии машиностроения, авиации и транспорта». Ростов-на-Дону, 2024; Всероссийской (национальной) научно-технической конференции «Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов», Ростов-на-Дону, 2024; XXI Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2023)», Таганрог, 2023; XI международной научно-технической конференции "Пром-

Инжиниринг", Сочи, 2025; Международном научном симпозиуме технологов-машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий», Ростов-на-Дону, 2022г.; международной научно-технической конференции «Машиностроительные технологические системы». Ростов-на-Дону, 2023-2025 г.

Публикации. Опубликовано 15 научных работ, в том числе 6 статей в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 2 статьи в изданиях, рецензируемых в информационной системе Scopus.

Личный вклад автора заключается в постановке и проведении экспериментальных исследований по установлению закономерностей влияния вибровозмущений технологической системы, деформационных и технологических флуктуаций на изменение температуры в зоне резания, разработке на этой основе, с применением методов численного моделирования, методики выбора рациональных режимов обработки; в обработке и интерпретации полученных результатов и отражении их в виде публикаций, научных докладах и рукописи диссертации.

Структура работы. Диссертационная работа включает введение, 5 глав, общие выводы, список использованных источников, состоящий из 139 наименований. Работа изложена на 141 странице, содержит 55 рисунков, 11 таблиц, 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность решаемых научно-технических задач, формулируются цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость предлагаемых решений

В первой главе рассмотрены тепловые и вибрационные аспекты процесса резания и износа лезвийного инструмента

В многочисленных трудах отечественных и зарубежных ученых, доказано что процесс резания сопровождается сложным контактным взаимодействием инструмента с деталью и с окружающей средой, в ходе которого часть полезной кинетической энергии преобразуется в немеханические виды энергии. Пара трения «инструмент – деталь» может рассматриваться как генератор собственных и поглотитель внешних тепловых, акустических, химических, сорбционных, диффузионных, усталостных и других процессов. Диссипация механической энергии при трении обуславливает появление в зоне контакта ряда эффектов, имеющих различную природу и степень интенсивности.

Большая часть работы внешних сил превращается в тепловую энергию, источниками которой в общем случае являются упругопластические деформации и структурно фазовые превращения. Выделенная в контакте поверхностей тепловая энергия расходуется на протекание обратимых (тепловая энергия – электрическая энергия – тепловая энергия) и необратимых (т.к. накопление теплоты в микрообъемах, химическая реакция, диффузионные явления, сорбционные процессы) процессов. Величина и распределение температур в зоне резания зависит от множества внешних факторов, в том числе, от геометрических параметров режущего клина, свойств внешней среды, размеров контактных площадок по задней и передней поверхностям и др., а также от «внутренних» факторов, обусловленных диссипативными свойствами самого контакта.

Обобщая и развивая это направление А.А Рыжкин в исследованиях своих и его учеников впервые показал, что трение в условиях резания сопровождается значительным тепловыделением в зоне обработки, являющегося следствием объёмных и флуктуационных процессов, активированных внешним воздействием, характером контактного взаимодействия инструмента с деталью, напряжённым состоянием в зоне резания, зарождением и разрушением кристаллических структур, и их движением.

Среди основных источников тепловых флуктуаций в зоне резания можно особо выделить следующие:

- дискретный характер возникновения, нарушения и смены фрикционных связей, обусловленный импульсным изменением давлений скоростей в нормальном и тангенциальном направлении;
- вибрации трибосистемы, обусловленные вибрациями технологической системы;
- неустойчивость внешних воздействий на трибосистему;

- цикличность процесса стружкообразования, упруго пластического деформирования и разупрочнения в контактном поверхностном слое.

Все выше перечисленные факторы имеют взаимообуславливающий и взаимозависимый характер, и в совокупности одновременно оказывают существенное влияние на изменение температуры в зоне резания и, как следствие, на интенсивность изнашивания инструмента.

В результате проведенных исследований тепловых процессов разработаны теплофизические основы процесса резания и решен большой комплекс вопросов, раскрывающих основные закономерности их формирования и влияния на износ режущего инструмента, получены аналитические зависимости для их описания и оценки, разработаны методы и средства контроля, установлены основные источники тепловых флуктуаций и характер их влияния на изменение теплового состояния зоны резания и интенсификацию износа инструмента.

Получены экспериментальные данные устанавливающие характер влияния вибраций на стойкость режущего инструмента и параметры качества обрабатываемой поверхности, позволившие сделать вывод о важности учета виброколебаний при оценке термофлуктуаций в процессе резания и обосновании режимов обработки на стадии разработки технологических процессов. Предложен экспериментальный аналог – относительная ТермоЭДС, адекватно оценивающий термодинамическое состояние контакта и позволяющий дать качественную оценку влияния тех или иных факторов на температурные флуктуации в трибосистеме «инструмент- деталь» и процесс износа инструмента

Однако, недостаточная изученность ряда факторов, оказывающих влияние на тепловое состояние зоны резания, затрудняют корректную постановку задач, связанных с выбором режимов резания, обеспечением наиболее эффективных условий обработки и повышением износостойкости инструмента. В качестве основных вопросов требующих своего разрешения в ходе диссертационного исследования следует выделить следующие:

- определить механизм влияния периодических колебаний технологических параметров обработки на температуру передней поверхности режущего инструмента;
- обосновать геометрические параметры пластически деформированного слоя в стружке и их влияние на температуру передней поверхности резца;
- установить корреляционную связь изменений температуры в зоне резания от вибросостояния технологической системы;
- определить критерий оптимизации температурных колебаний в зоне резания, обеспечивающего минимизацию износа инструмента.

Необходимость решения этих вопросов предопределила цель диссертационного исследования, направленного на установление закономерностей влияния вибровозмущений технологической системы на изменение температуры в зоне резания и разработка на этой основе, с применения методов численного моделирования, методики выбора рациональных режимов обработки точением, обеспечивающих повышение износостойкости режущего инструмента.

Вторая глава посвящена экспериментальной оценке влияния вибросостояния технологической системы на основные характеристики процесса резания. Экспериментальные исследования предусматривали продольное наружное точение образцов на универсальном токарном станке 16K20, оснащённом системой бесступенчатого регулирования оборотов Mitsubishi. Наружное продольное точение образцов осуществлялось твёрдосплавными пластинами Excelledge (Китай). В качестве образцов использовались тела вращения длиной 400 мм, с наружным диаметром в пределах 120-90 мм, изготовленные из сталей марок 15X2НМФА и 10ГН2МФА. Опыты проводились при подачах $S=0,097...0,26$ мм/об, скоростях резания $V=50-340$ м/мин и глубине обработке $t=0.5;1.0$ мм.

При помощи лабораторного измерительного стенда STD 201.1 (Рис.1) измерялись силы резания P_x , P_y , P_z (Н), виброускорения A_x , A_y , A_z (мм/с²) по трём координатным осям и средняя температура в зоне резания T , определяемая методом относительных ТермоЭДС. Полученный сигнал записывался при помощи цифровых преобразователей National Instruments (США).

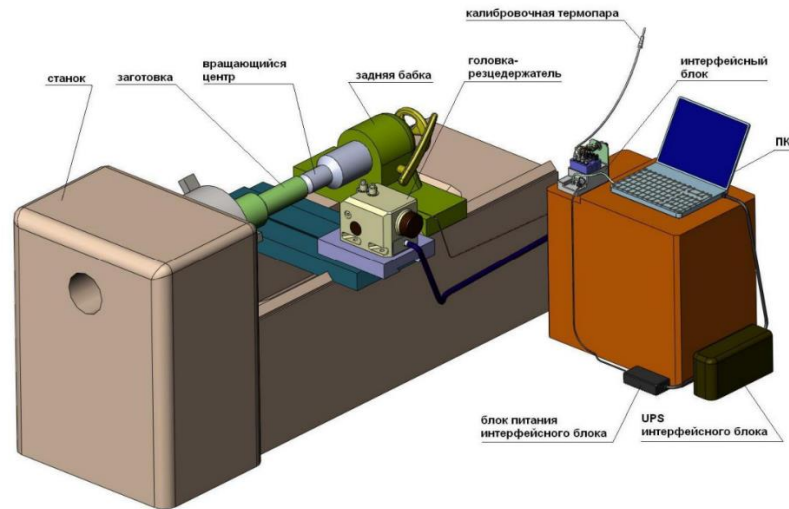


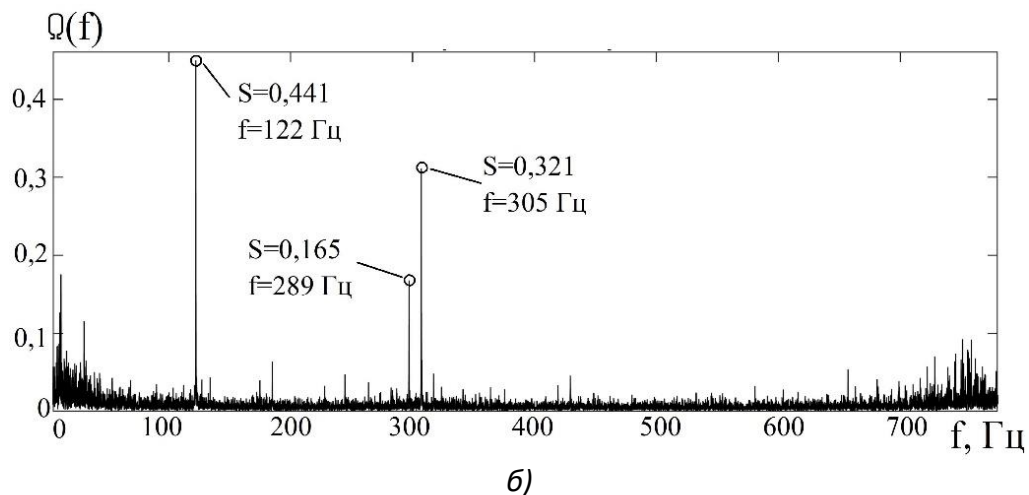
Рисунок. 1. Лабораторный стенд STD 201.1.

Визуализация и регистрация аналоговых сигналов производилась с помощью программного обеспечения L-Graph, последующая обработка осуществлялась с применением Matlab Signal Processing Toolbox. Коэффициент усадки стружки K_a определялся весовым методом на лабораторных весах Масса-К-150-1. Величина износа по задней грани h_z и геометрические параметры площадки контакта по передней поверхности измерялись на металлографическом инвертированном микроскопе ЛабоМЕТ-И4 с цифровой системой визуализации. Качество обработанной поверхности оценивалось на основании исследования и сравнения величины среднеарифметического отклонения профиля шероховатости R_a [мкм] с помощью портативного профилографа-профилометра Surftest SJ-210 (Япония). Планирование однофакторных экспериментов, статистическая обработка результатов и дисперсионный анализ проводились с помощью стандартных алгоритмов программы MathCAD и функции 1 Factor ANOVA.

Сигналы от вибропреобразователей были отфильтрованы цифровым полосовым фильтром (10–5000 Гц). Численный показатель энергии вибрационного сигнала инструмента $E_{\Delta V}$ оценивался согласно формуле:

$$E_{\Delta V} = \frac{1}{T} \int_0^T V S^2(t) dt,$$

где V_S – обозначение сигнала вибраций, τ – время реализации вибрационного сигнала или взятая продолжительность сигнала для оценки вибраций. определялся спектр их мощности в относительных единицах к дисперсии (Рис. 2).



б)

Рисунок 2. Пример спектра сигнала вибраций процесса резания dV/dt (материал - 10ГН2МФА, $V=130$ м/мин, $s=0,15$ мм/об, $t=0,5$ мм)

По результатам анализа спектральной характеристики выявлялись характерные для определённого режима обработки всплески, которые фактически определяют основные резонансные частоты технологической системы. Установлено, что зависимость вибрационного состояния процесса резания от скорости резания имеет нелинейный характер: кривая энергии вибрации во всех исследованных конфигурациях технологической системы при определённых скоростях проходит через минимум (рис.3.).

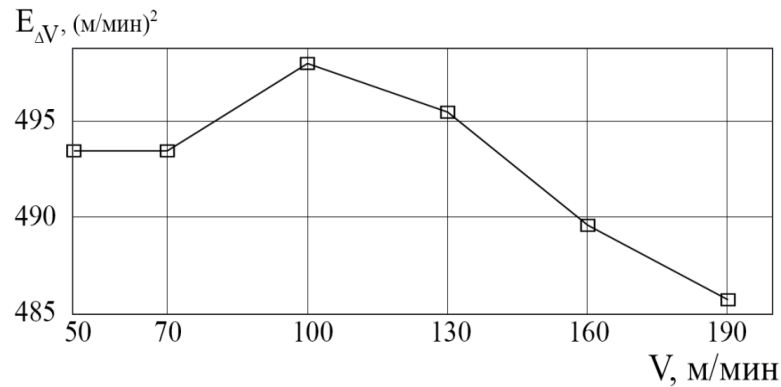


Рисунок 3. Зависимость энергии вибрационного сигнала $E_{\Delta V}$ от скорости резания V на примере точения стали 10ГН2МФА ($S=0,26$ мм/об, $t=1$ мм)

Для средней температуры в зоне обработки аналогично выявлено наличие скоростей, при которых величина данного показателя минимизируется. Причём при увеличении подачи в рамках диапазона, характерного для чистовой обработки, установленная форма кривой $T=f(V)$ сохраняется, однако точка экстремума сдвигается влево по оси ординат V , и, следовательно, скорость, начиная с которой фиксируется тренд на дальнейшее снижение температуры, уменьшается (рис.4).

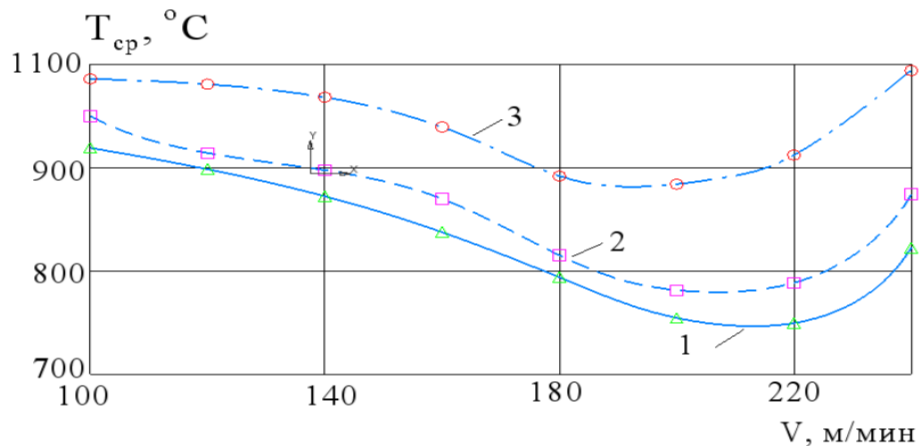


Рисунок 4. Зависимость средней температуры в зоне контакта от скорости резания V при различных подачах (материал заготовки - 10ГН2МФА, $t=0.5$ мм): 1 – $S=0.097$ мм/об; 2 – $S=0.15$ мм/об; 3 – $S=0.195$ мм/об.

Для оценки термофлуктуационных особенностей процесса резания параллельно со средней температурой T фиксировался сигнал относительных ТермоЭДС (рис.5, а), на основании которого рассчитывался коэффициент вариации ТермоЭДС $k_e=\sigma/a$, который является надёжным индикатором величины интенсивности изнашивания инструментального материала. На Рис. 5, б приведена зависимость коэффициента вариации ТермоЭДС от скорости резания имеющая экстремальный характер с выраженным минимумом, соответствующим минимальному износу.

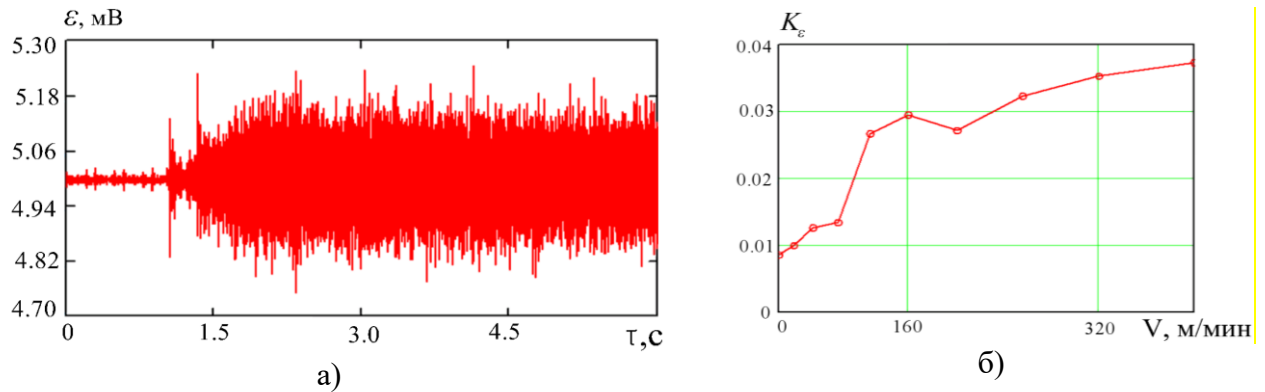


Рисунок 5. Термоэлектрические характеристики процесса точения: а – пример исходного сигнала относительной термоЭДС (сталь 10ГН2МФА, $V=70$ м/мин, $S=0.15$ мм/об, $t=0.5$ мм); б – зависимость коэффициента вариации относительных термоЭДС k_ε от скорости резания V (материал – сталь 15Х2НМФА, $S=0,275$ мм/об, $t=0.5$ мм)

Проведена оценка интенсивности изнашивания пластин по задней поверхности $J=h_3/L$, где h_3 – величина износа по задней поверхности, L – путь резания, за который величина достигнута h_3 . В результате сравнительного анализа кривых, описывающих зависимости средней температуры в зоне резания, суммарной энергии вибрационного сигнала, а также интенсивности изнашивания для исследуемых сталей, выявлено расхождение в положении минимума этих параметров по оси V (Рис.6).

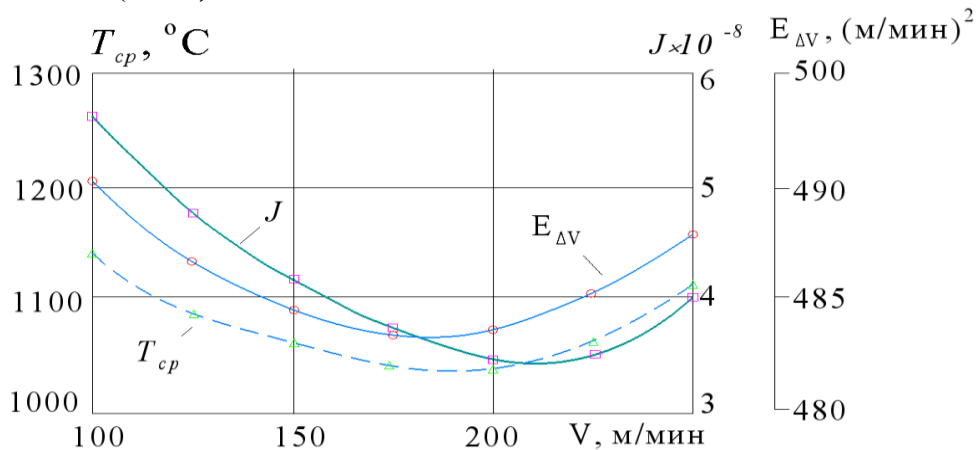


Рисунок 6. Зависимости износостойкости J , средней температуры T_{cp} и энергии вибраций $E_{\Delta V}$ от скорости точения V (материал - 15Х2НМФА, $S=0,25$ мм/об, $t=0.5$ мм).

Так, для условий обработки на рис. 6 параметр T минимизируется на отрезке скоростей резания $V=180-205$ м/мин. Эти значения в большей степени приближены к диапазону скоростей, характеризующимся снижением износа режущих пластин, чем при оценке по параметру $E_{\Delta V}$, но не совпадает с ним в полной мере. Этот факт подтверждает преобладание температурного фактора в процессе изнашивания при обработке жаропрочных сталей. Проведённые исследования позволяют сделать вывод, что минимизация средней температуры и суммарной энергии вибраций не позволяют с высокой степенью точности определить диапазон оптимальных скоростей резания при точении жаропрочных сталей, поскольку оба эти параметра по отдельности не учитывают термофлуктуационные эффекты в контактной зоне. В связи с этим актуальным является вопрос о введении нового критерия оптимизации, учитывающего изменения теплового состояния.

На Рис.7 представлены результаты исследований шероховатости поверхности по параметру Ra , характерные для различных подач при обработке острозаточенным инструментом.

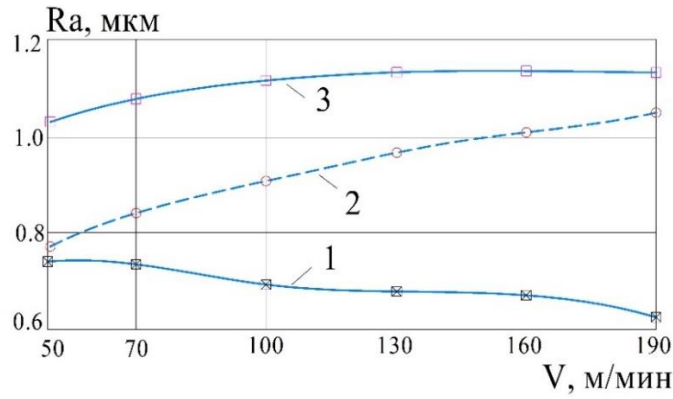


Рисунок 7 Зависимость среднеарифметического отклонения профиля шероховатости Ra от скорости резания V при чистовых подачах (материал сталь 10ГН2МФА, $t=0,5$ мм): 1 – $S=0.097$ мм/об; 2 – $S=0.195$ мм/об; 3 – $S=0.26$ мм/об.;

Установлено, на всех исследованных чистовых подачах и в диапазоне принятых скоростей обработки значения среднеарифметического отклонения профиля шероховатости Ra не выходят за пределы достаточно узкого диапазона: $Ra=0.8-2.5$ мкм.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния деформационных и технологических флуктуаций на изменения температуры передней поверхности резца в процессе резания. Тепловой канал диссипации энергии в процессе резания является доминирующим, а величина и распределение температур в зоне обработки зависит от множества внешних факторов, в том числе, от геометрических параметров режущего клина, свойств внешней среды, размеров контактных площадок по задней и передней поверхностям и др., а также от «внутренних» факторов, обусловленных диссипативными свойствами самого контакта.

В работах Рыжкина А.А., Чичинадзе А.В., Шучева К.Г, на основе применения гидродинамической аналогии, предложена аналитическая зависимость, описывающая температурное поле вдоль участка ВД на рабочей поверхности режущего инструмента в виде

$$T(x) = \left(\frac{\omega_{01}}{k_1 + m_1} + \frac{\omega_{02}}{\frac{x}{V_c} \cdot k_2^3 \cdot a_2} \cdot \left(\frac{x}{V_c} \cdot k_2^3 \cdot a_2 + 1 - 2 \cdot k_2 \cdot \sqrt{a_2 \cdot \frac{x}{V_c}} \cdot \frac{1}{\pi} - \exp\left(\frac{x}{V_c} \cdot k_2^2 \cdot a_2\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(k_2 \cdot \sqrt{a_2 \cdot \frac{x}{V_c}}\right) \right) \right) \cdot \left(\lambda_1 \cdot m_1 + \frac{2 \cdot \lambda_2}{\pi \cdot a_2 \cdot \frac{x}{V_c}} \right)^{-1} \quad (1)$$

где $x=0 \dots l_k/2$; ω_{02} – начальная плотность источника тепловыделения в заготовке:

$$\omega_{02} = \frac{q_0 \cdot k \cdot t_H}{t_{nl} \cdot h \cdot \left(1 - \exp\left(-k \cdot \frac{t_H}{t_{nl}}\right) \right)}$$

ω_{01} – максимальная объемная плотность источника тепловыделения от сил трения в теле инструмента, Вт/м²; q_0 – удельная мощность трения для передней поверхности, Вт/м²; $k_{1,2}$ – коэффициенты локализации источника теплоглощения для инструмента и обрабатываемого материала, м⁻¹; a_2 – коэффициент температуропроводности заготовки, м²/с; $\lambda_{1,2}$ – коэффициент теплопроводности твердого сплава и материала заготовки соответственно, Вт/м·°С; V_c – скорость движения стружки по передней поверхности, м/с; τ_k – средние касательные напряжения на передней поверхности, Па; t_{nl} – температура плавления материала заготовки, °С; k – Температурный коэффициент [°С], $k=7,143 \cdot 10^{-4} \cdot t_{nl}$; t_H – перепад температур внутри пластически

деформированного слоя, °С; m_l – коэффициент теплоотдачи для материала инструмента,

Исходной предпосылкой зависимости, является допущение, что распределение температуры вдоль длины тяжело нагруженного трибоконтакта описывается на основе анализа поверхностного пластически деформируемого микрообъёма в стружке, который рассматривается как зона квазивязкого течения материала. Этот процесс связан с выделением теплоты за счёт вязкой диссипации энергии трения.

Параметры, входящие в расчетную зависимость (1), подвергаются в процессе резания флуктуациям в результате воздействия на них вибрационных возмущений различного типа, что является причиной периодических или импульсных изменений температурного распределения на поверхности трибоконтакта. Конкретное изменение температуры для каждого квазистатического момента в эволюции системы резания определяется комплексом значений, которое в этот момент времени принимает каждый из параметров режимов обработки.

Одним из таких параметров является толщина пластически деформированного слоя в стружке h , определить которую возможно путём анализа микрошлифов, либо весьма приблизительно на основании эмпирических зависимостей.

С целью решения этой задачи в рамках диссертационного исследования использовано численное моделирование методом конечных элементов (МКЭ) в модуле АРМ FEM. Использована трёхмерная модели фрагмента стружки, высота и ширина поперечного сечения которого совпадают с расчётными размерами срезаемого слоя (a ; b), а длина равна длине контакта по передней поверхности для рассматриваемого квазистатического момента $H=l_k$ (Рис.8,а).

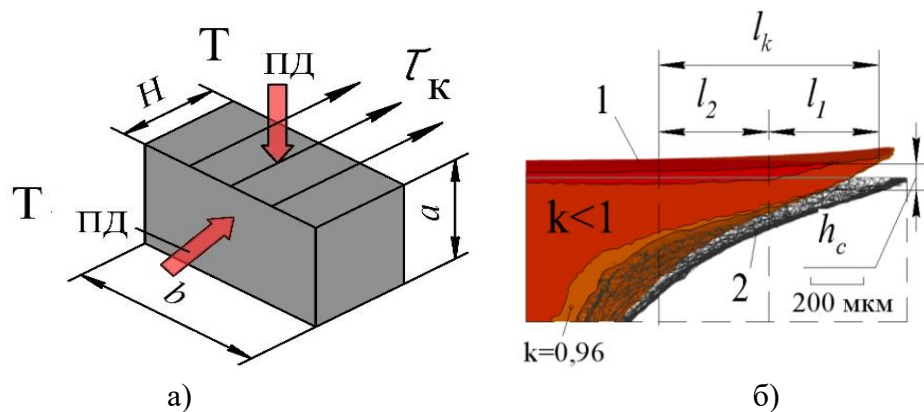


Рисунок 8. Схема нагружений модели фрагмента стружки (а) и пример результатов КЭ-расчёта (б).

1 – деформированная конструкция; 2 – недеформированная конструкция

К двум граням модели приложена температура $T_{пл}$, поступающая в стружку в результате тепловыделения на участке ПД; остальные грани имеют температуру окружающей среды T_0 (на рисунке не указано). Также к поверхности модели приложено действие средних касательных напряжений τ_k . Для определения толщины деформированного слоя, в частности, среднего значения h_c , при формировании карты результатов использовался фильтр, отражающий выбранные из области, где запас прочности по пределу текучести $k < 1$ (Рис.8, б).

Произведена оценка возможных изменений температуры на передней поверхности в результате вибрационных возмущений на примере точения заготовки $d=120$ мм из нержавеющей стали 10ГН2МФА твёрдосплавными пластинами Т15К6. Скорость резания $V=130$ м/мин, подача $s=0,15$ мм/об, глубина резания $t=0,5$ мм. Геометрия режущей части: передний угол $\gamma=10^\circ$, задний угол $\alpha=10^\circ$, главный угол в плане $\varphi=95^\circ$. Рассмотрен момент в эволюции системы, характеризуемый наступлением критического износа по задней грани $h_z=0,2$ мм (рис. 10, а). Длина участка ВД в этом случае составила $l_1=l_k/2=0,2225$ мм (рис. 10, б), а средняя фактическая температура в зоне резания 921°C .

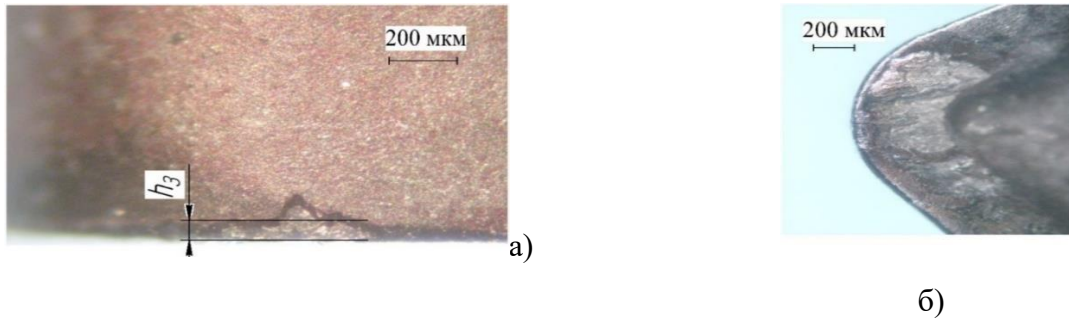


Рисунок 9. Оценка износа рабочих граней пластины: а - участок контакта на задней поверхности; б - участок контакта на передней поверхности

На основании данных спектр колебательных ускорений g проведено моделирование динамики процесса обработки, в котором технологические режимы резания представлены в виде:

$$\begin{aligned} V &= V_0 - \eta_z + v_z^\Delta; \\ s &= \int_{\tau-\tau_0}^{\tau} (V_2 - \eta_x + v_x^\Delta) d\tau; \\ t &= t_0 - H_Y + \Delta_Y, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\tau_0 = 1/\Omega$ – время одного оборота детали, s , Ω – частота оборота детали, Gz , $V_2 = s_0 \cdot \Omega$, мм/с.

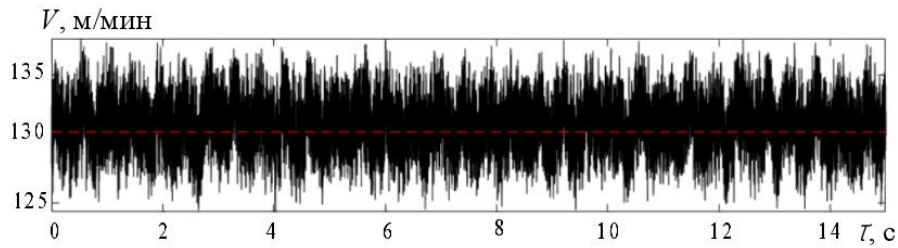


Рисунок 10. Характер изменения скорости резания V с учётом вибраций в цифровой модели.

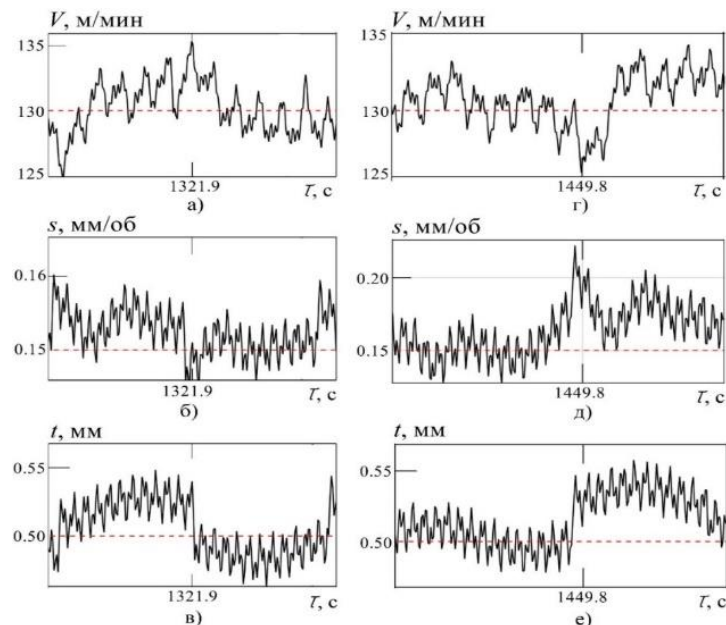


Рисунок 11. Определение значений режимов резания, соответствующих максимуму скорости резания (а-в) и подачи (г-е).

В результате цифрового моделирования изменения скорости резания (Рис 10) установлены максимальные и минимальные достигаемые значение V и соответствующие им значения подачи и глубины резания (Рис.11 а-в, табл.1). Аналогичная идентификация фактических значений параметров режимов резания в моменты выхода на экстремальные значения осуществлена также для подачи s (Рис.11 г-е, табл.1) и t (табл.1).

Из представленных в таблице 1 значений следует, что в результате комбинации режимов резания при наибольшем значении скорости V максимальная температура в момент флуктуации незначительно возрастает относительно номинального расчётного значения. При выходе параметра V на минимум 124,4 м/мин сопутствующее изменение s и t приводит к увеличению температуры до 1115,38 °С.

Таблица 1. Расчётные значение параметров процесса резания в моменты флуктуаций.

Состояние параметра в момент флуктуации	V , м/мин	s , мм/об	t , мм	K_a	V_c , м/мин	T_{III}^{max} , °С	A_T , °С
номинальное	130	0,15	0,5	2,797	46,47	1097,25	-
$V \rightarrow \max$	135,1	0,151	0,541	2,861	47,08	1100,31	18,130
$V \rightarrow \min$	124,4	0,189	0,524	2,641	49,23	1115,38	
$s \rightarrow \max$	130,5	0,225	0,548	2,524	51,47	1141,75	61,919
$s \rightarrow \min$	132,1	0,101	0,463	3,101	42,03	1079,83	
$t \rightarrow \max$	133,8	0,177	0,552	2,658	48,90	1112,37	15,120
$t \rightarrow \min$	132,7	0,146	0,446	2,861	45,43	1098,56	

Таким образом диапазон изменения температуры передней грани за счёт флуктуаций скорости резания составляет 18,13 °С. Наибольшее влияние на температуру передней поверхности оказывали флуктуации подачи. Так, при достижении параметром s максимума (рис.12, г-е) происходит повышение температуры контакта до 1141,75°С, при минимальной же подаче наблюдается её снижение до 1079,83 °С. Флуктуации подачи в эти моменты сопровождаются колебаниями глубины резания, что в комплексе приводит к изменению хода протекания деформационных процессов в зоне ПД, что приводит к значительному отклонению параметров, влияющих на температуру контакта - коэффициента усадки стружки K_a и скорости её скольжения V_c . При максимальных значениях S и t изменения температуры минимальны: сочетание фактических режимов обработки в момент таких флуктуаций нивелирует возможные значительные отклонения температуры трибоконтакта.

Результаты исследований подтвердили, что флуктуации параметров технологических режимов, вызванные вибрационными возмущениями в системе резания, приводят к изменению мгновенных контактных температур на передней грани инструмента. Отклонения мгновенной температуры в результате таких всплеск в большую или меньшую сторону относительно своего номинального значения являются несимметричными.

Четвертая глава посвящена определению рациональных режимов точения с учётом изменений теплового состояния зоны резания и вибрационных возмущений

Для оценки термофлуктуационных процессов, присущих определённой технологической системе, предложен новый параметр - **амплитуда импульсных изменений контактной температуры** (A_T), определяемый как разница между максимальной и минимальной мгновенными контактными температурами, достигаемыми при выходе параметров режимов резания на экстремальные значения в результате вибрационных возмущений.

Для каждой технологической системы при определённых начальных параметрах V , S и t характер изменений температуры, а, следовательно, и величина амплитуды A_T будут отличаться. Также логичным будет предположить и разницу в параметрах технологических режимов, при выходе которых на экстремальные значения будет иметь место наибольшее отклонение контактной температуры передней грани от номинальной величины. Приведённые

в работе исследования показывают, что предложенный показатель A_T может являться критерием оптимизации при выборе режимов резания,

На основе проведённых исследований предложена экспериментально-расчётная методика определения режимов точения, состоящая из следующих этапов:

I Этап. Вибромониторинг.

Содержание работ: определяются вибрационные ускорения по трём координатным осям X,Y,Z. Исследуются от 3 до 7 режимов точения (при варьировании скоростей резания/подачи/глубины резания) в зависимости от производственной необходимости и характеристик станка.

Оборудование: система вибрационного мониторинга, математическая программа MathCAD или MathLab.

Результат: амплитудно-частотные характеристики процесса резания на различных режимах.

II Этап. Моделирование динамики процесса резания.

Содержание работ: цифровое моделирование вариаций сил резания по трём осям и параметров режимов резания в ходе процесса точения. Поиск экстремальных значений параметров V , s и t на моделируемом временном отрезке. Определение оставшихся двух режимов резания для выявленных моментов экстремума и значений сил P_x , P_y , P_z достигаемых в системе в эти моменты.

Оборудование: математическая программа MathLab Simulink.

Результат: значения показателей V , s и t , P_x , P_y , P_z в моменты выхода параметров режимов резания на свои экстремальные значения.

III Этап. Идентификация трибodeформационных показателей.

Содержание работ: определение дополнительных входных данных для расчёта температур передней грани резца на основе полученных значений показателей V , s и t , P_x , P_y , P_z и толщины деформированного слоя в стружке h_c .

Оборудование: математическая программа MathCAD или MathLab, программа КЭ моделирования Компас 3D+APR FEM или Ansys.

Результат: входные данные для математической модели, по которой рассчитываются температуры передней грани резца.

IV Этап. Определение рациональных режимов обработки

Содержание работ: Расчёт температур передней грани резца в моменты флуктуаций параметров режимов резания. Определение зависимости амплитуды импульсных изменений контактной температуры от исследуемого параметра режима резания - $A_T(V)$; $A_T(S)$; $A_T(t)$.

Оборудование: математическая программа MathCAD или MathLab.

Результат: режимы обработки с минимальным уровнем термофлуктуаций, вызванных вибрационными возмущениями в системе резания $A_T \rightarrow \min$.

Высокая эффективность предложенной методики подтверждена экспериментально (рис.12).

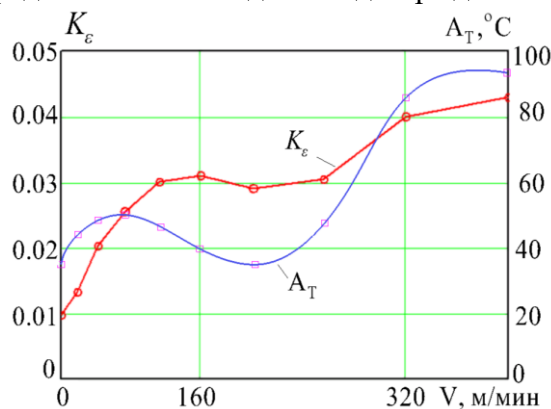


Рисунок 12. Зависимость температурной амплитуды A_T и коэффициента K_e от скорости точения V (сталь 15Х2НМФА, $S=0,198$ мм/об, $t=0.5$ мм).

Так, в проведённых опытах локальный минимум кривой $A_T(V)$ с достаточно высокой степенью точности совпадает с минимальным значением коэффициента вариации относительных термоЭДС. Таким образом, параметр A_T может служить индикатором износа инструмента, и чем выше величина данного показателя для скорости резания, тем интенсивнее будет происходить изнашивание инструментального материала.

В пятой главе представлено практическое применение результатов диссертационного исследования в технологических процессах обработки изделий атомного реактора, изготавливаемых на предприятии АЭМ-технологии «Атоммаш» в г. Волгодонске.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В диссертации содержится комплекс научно-технических решений задачи, направленной на повышение износостойкости режущего инструмента. Задача решена на основе установления закономерностей влияния вибровозмущений технологической системы на изменение температуры в зоне резания и разработка на этой основе, с применением методов численного моделирования, методики выбора рациональных режимов обработки точением.

Получены следующие основные выводы, научные и практические результаты:

1. Доказано, что для различных значений подач в пределах чистового диапазона зависимости средней температуры в зоне резания и энергии вибраций от скорости резания носят экстремальный характер, и проходят через минимум при определённых скоростях точения;

2. Установлено, что диапазоны скоростей чистового точения, при которых процесс резания характеризуется минимальными вибрационными возмущениями и средней температурой в контактной зоне, находятся вблизи интервала скоростей резания, обеспечивающих минимальные значения интенсивности изнашивания инструментального материала, однако, не совпадают с ним в полной мере.

3. Предложенная в качестве критерия -амплитуда импульсных изменений контактной температуры (A_T) позволяет с учетом термофлуктуационных эффектов, вызванных вибрационными возмущениями в системе резания, осуществить выбор рациональных режимов обработки.

4. Установлено, что отклонения температур от номинального значения в моменты флуктуаций асимметричны. Для различных систем резания наибольшие отклонения температуры от номинальной величины могут наблюдаться при выходе на экстремальное значение любого из параметров режимов резания: V , s , t .

5. Выявлено, что возможно существование таких конфигураций технологической системы резания, при которых фактические режимы обработки в момент флуктуаций нивелирует возможные значительные отклонения температуры трибоконтакта.

6. Доказано, что интервал скоростей резания, при которых амплитуда импульсных изменений контактной температуры (A_T) минимальна характеризуется минимальными коэффициентами вариации относительных ТермоЭДС и наибольшей износостойкостью инструмента.

7. Разработанная экспериментально-расчётная методика определения режимов точения, с учётом теплового состояния зоны резания и вибрационных возмущений, обеспечивает наибольшую эффективность при её использовании на оборудовании с высоким сроком эксплуатации и позволяет повысить эффективность его применения.

8. Практическое применение результатов исследований позволяет получить годовой экономический эффект от внедрения на единицу изделия корпуса атомного реактора 1.2млн рублей

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и информационной базе Scopus:

1. Влияние скорости резания на импульсные изменения температуры передней поверхности резца при точении жаропрочной стали 15X2НМФА / Гвинджилия В.Е., Фоминов Е.В., **Марченко А.А.**, Лавренова Т.В., Дебеева С.А. Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2025. Т. 27. № 3. С. 23-36.

2. Влияние периодических флуктуаций параметров режимов резания на температуру передней поверхности токарного резца / Фоминов Е.В., Гвинджилия В.Е., **Марченко А.А.**, Шучев К.Г. Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don). 2025. Т. 25. № 1. С. 32-42.

3. Диагностические признаки развития износа инструмента при моделировании динамики процесса резания / Гвинджилия В.Е., Фоминов Е.В., Лебедев В.А., Марченко А.А. Металлообработка. 2024. № 5 (143). С. 58-64.

4. Зависимость температуры передней поверхности токарного резца от эволюционных изменений трибodeформационных показателей процесса обработки / Фоминов Е.В., Гвинджилия В.Е., Фисунова Е.И., **Марченко А.А.**, Сухомлинова В.В. Транспортное машиностроение. 2024. № 2 (26). С. 23-30.

5. Thermoelectric characteristics of the process of steel turning by carbide inserts with combined coatings / Lebedev V.A., Aliev M.M., Fominov E.V., Fomenko A.V., Marchenko A.A., Mironenko A.E. Journal of Friction and Wear. 2023. Т. 44. № 2. С. 71-76.

6. Effect of thermoelectric properties on the frictional behavior of high-speed steels / Fominov E.V., Shuchev K.G., Aliev M.M., **Marchenko A.A.**, Lavrenova T.V. Russian Engineering Research. 2023. Т. 43. № 10. С. 1199-1203.

7. Моделирование температурного распределения на передней поверхности токарного резца с учётом геометрических параметров зоны вторичных пластических деформаций / Фоминов Е.В., **Марченко А.А.**, Сухомлинова В.В., Пятницкая О.А., Гладких Д.И. Транспортное машиностроение. 2023. № 2 (14). С. 4-11.

8. **Марченко, А. А.** Трибodeформационные и термодинамические показатели процесса чистового точения жаропрочной стали 10ГН2МФА / Воронежский научно-технический вестник. – 2025. – Т. 4, № 4 (54). – С. 4-11.

Статьи, опубликованные в научных изданиях:

9. Оценка трибологических показателей процесса точения жаропрочной стали 10ГН2НМФА / Гладких Д.И., Фоминов Е.В., Лебедев В.А., Гвинджилия В.Е., **Марченко А.А.** В сборнике: Интеллектуальная трибология в машиностроении: BALTTTRIBO-2024. Материалы 1-й Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 344-350

10. Зависимость температуры передней поверхности токарного резца от периодических флуктуаций режимов резания / Фоминов Е.В., Гвинджилия В.Е., Шучев К.Г., Алиев М.М., **Марченко А.А.** В сборнике: Научные технологии в машиностроении. Материалы XV Международной научно-технической конференции. В 2-х томах. Москва, 2024. С. 352-355.

11. Моделирование температуры передней поверхности токарного резца с учётом флуктуаций параметров режимов резания / **Марченко А.А.**, Фоминов Е.В., Гвинджилия В.Е. В сборнике: Научные технологии машиностроения, авиации и транспорта. Сборник трудов XVI международной научно-технической конференции. Ростов-на-Дону, 2024. С. 428-432.

12. Расчёт максимальной температуры передней поверхности токарного резца с учётом периодических флуктуаций значения подачи / Фоминов Е.В., Гвинджилия В.Е., Алиев М.М., **Марченко А.А.**, Лавренова Т.В. В сборнике: Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов. Сборник трудов Всероссийской (национальной) научно-технической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, доктора технических наук, профессора А.А. Рыжкина. Ростов-на-Дону, 2024. С. 460-463.

13. Зависимость температуры передней поверхности токарного резца от эволюционных

изменений в системе резания /Фоминов Е.В., Шучев К.Г., Гвинджилия Е.В., **Марченко А.А.**, Гладких Д.И. В сборнике: Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов. Сборник трудов Всероссийской (национальной) научно-технической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, доктора технических наук, профессора А.А. Рыжкина. Ростов-на-Дону, 2024. С. 463-466.

14. Моделирование процесса точения крупногабаритной детали с отверстием Гвинджилия В.Е., Гамалеева Е.И., **Марченко А.А.** В сборнике: Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАУ-2023). Сборник трудов XXI Всероссийской научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. Таганрог, 2023. С. 327-311.

15. Влияние оптимальных режимов резания на изнашивание режущих инструментов при обработке материалов резанием /Алиев М.М., Фоминов Е.В., Фоменко А.В., **Марченко А.А.** В книге: Развитие науки, технологий, образования в ххi веке: актуальные вопросы, достижения и инновации. Под общ. ред. Г. Ю. Гуляева. Пенза, 2022. С. 112-128.