

На правах рукописи



КРАЙНЕВ Дмитрий Вадимович

**МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНО-
ОРИЕНТИРОВАННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
СИСТЕМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ**

2.5.6. Технология машиностроения

2.5.5. Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения»
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Научный консультант доктор технических наук, профессор,
ЧИГИРИНСКИЙ Юлий Львович.

Официальные оппоненты: **ГУЗЕЕВ Виктор Иванович,**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный
университет (национальный исследовательский
университет)» (г. Челябинск), кафедра
«Технологии автоматизированного
машиностроения», заведующий;

МАКАРОВ Владимир Федорович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет» (г. Пермь), кафедра
«Инновационные технологии машиностроения»,
профессор;

АНЦЕВ Александр Витальевич,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет» (г. Тула), кафедра
«Машиностроение и материаловедение»,
заведующий, заместитель директора по научной
работе.

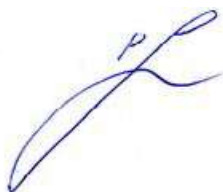
Ведущая организация ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный
университет» (г. Тольятти).

Защита состоится «18» декабря 2025 г. в 10:00 часов на заседании
диссертационного совета 99.2.072.02, созданного на базе Саратовского
государственного технического университета им. Гагарина Ю.А.,
Волгоградского государственного технического университета по адресу: 400005,
г. Волгоград, проспект им. В. И. Ленина, 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградского
государственного технического университета и на сайте www.vstu.ru по ссылке
<https://www.vstu.ru/upload/iblock/207/207e7618ee869bfcabffd0e6ce1fff73.pdf>

Автореферат разослан «___» сентября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Родионов Игорь Владимирович

Актуальность темы диссертационного исследования.

Повышение конкурентоспособности и эффективности производства в современных экономических реалиях требует модернизации производства, пересмотра структуры управления, повышения уровня автоматизации и роботизации, а также цифровизации и внедрения технологий Индустрии 4.0. На международном уровне это находит отражение в реализации таких стратегических инициатив как: Программа «Цифровая Европа» (DIGITAL); Региональная программа Digital CASA; Стратегия США по международному киберпространству. Не является исключением и Россия, где программа цифровизации производства продвигается на государственном уровне.

Многомерность задачи определяется сложностью производственной системы и взаимосвязанности отдельных бизнес-процессов и формирует необходимость комплексных решений, затрагивающих не только информационное, но и организационно-техническое обеспечение производства.

Цифровизация технологической подготовки и переход к интеллектуальному производству в условиях невозможности исключения неопределенности технологической информации требует развития адаптивных технологических систем, учитывающих физические закономерности лезвийной обработки, включая формирование свойств поверхностного слоя и изнашивание инструмента. Современные производственные системы, построенные на основе оборудования с ЧПУ, не обеспечивают полноценного управления процессом формирования комплекса эксплуатационных свойств изделия, поскольку в них, на аппаратном и программном уровнях, не реализованы средства перманентного оперативного мониторинга процесса резания и состояния элементов технологической системы и, тем более, возможность обратной связи по результатам оперативной диагностики и адаптивного управления технологической операцией. Таким образом, выявляется несоответствие между потребностями производства и функционально-техническими возможностями выпускаемого в настоящее время оборудования для обеспечения производственного процесса. Практические задачи повышения эффективности обработки за счет внедрения интеллектуализированных решений в производственную среду формируют актуальность разработки научно обоснованной методологии построения и организации интеллектуальных технологических систем механической обработки в условиях автоматизированного механообрабатывающего производства, а также необходимость создания систем управления стабильностью технологического процесса и качеством обработки резанием.

Степень разработанности темы исследования.

Процессы резания играют и в обозримой перспективе по-прежнему будут играть доминирующую роль в общем объеме металлообработки, несмотря на возникновение и развитие ряда других технологических методов. Это объясняется технологической гибкостью,

способностью осуществлять съем материала относительно больших объемов, обеспечивать качество в широком диапазоне требований, а также высокой производительностью и точностью обработки.

Изучением процесса резания и закономерностей его протекания посвящено большое количество работ отечественных (В.Ф. Безъязычный, В.Ф. Бобров, А.С. Верещака, С.Ф. Глебов, Г.И. Грановский, Н.Н. Зорев, Ю.Г. Кабалдин, В.А. Кривовухов, В.Д. Кузнецов, Т.Н. Лоладзе, А.Д. Макаров, В.Н. Подураев, А.Н. Резников, А.М. Розенберг, В.К. Старков, А.Г. Суслов, В.П. Табаков, Н.В. Талантов) и зарубежных (Е.М. Trent, F. Klocke, J.P. Davim, F. Taylor, M.E. Merchant, V.P. Astakhov, Y. Altintas) исследователей. К настоящему времени создано достаточно качественное теоретическое описание процесса резания, имеющее ограниченное прикладное применение, причиной чего являются сложный математический аппарат, отсутствие или недостаточная определенность исходной технологической информации, а также сложность и многофакторность контактного взаимодействия.

Диагностические и адаптивные системы управления, как правило, не принимают во внимание физические закономерности процесса резания, не учитывают влияние нестабильности геометрических и физико-механических характеристик обрабатываемой детали и формирование показателей качества поверхностного слоя, что в контексте внедрения цифровых технологий в рамках концепции *«Индустрия 4.0»* снижает адаптивные функциональные возможности и надежность контролируемых технологических операций.

Применение технологий AI (искусственный интеллект и нейросети) сопровождается серьезными проблемами: зависимость от программного и аппаратного обеспечения; необходимость обработки больших объемов информации с высоким быстродействием, то есть существенных вычислительных мощностей; требуются сложные рекурсивные алгоритмы, длительные процедуры подбора оптимальной структуры нейросети и большое время обучения. Генерация результатов в режиме «черного ящика» на практике затрудняет оценку достоверности и внесение изменений. Иначе говоря, технология нейросетей не отменяет необходимости анализа сложного взаимодействия в процессе резания, выявления степени влияния отдельных факторов и мониторинга процесса.

Разброс фактических характерных свойств материалов режущего инструмента и обрабатываемой заготовки неблагоприятно влияет на эффективность управления процессом обработки. Снижение уровня неопределенности исходной технологической информации и повышение оперативности функционирования производства подводит к необходимости организации необходимых потоков данных, в том числе и обратной связи, в единой информационной среде создания изделия, что обеспечит решение таких задач как: планирование, проектирование, проведение изменений и архивация. Это означает снижение

ресурсоемкости и трудоемкости проведения проектно-конструкторских работ, а также повышение производительность труда и в итоге прибыль организации.

Таким образом, возникает необходимость разработки и внедрения научно обоснованной методологии построения интеллектуальных технологических систем управления стабильностью технологического процесса и качеством обработки резанием.

Цель исследования: повышение эффективности механообрабатывающих производств за счет активного управления формированием качества изделий машиностроения по результатам оперативной диагностики состояния элементов технологической системы на основе физических закономерностей процессов лезвийной механической обработки.

Задачи исследования:

1. Выявление и количественное описание взаимосвязей между технологическими условиями обработки, мгновенным (фактическим) состоянием режущего инструмента и параметрами качества обрабатываемой и обработанной поверхностей, с учетом вариативности свойств материалов контактной пары «инструмент–заготовка».

2. Разработка методики перманентного мониторинга состояние элементов технологической системы, как основы построения адаптивных алгоритмов управления технологической операцией.

3. Количественная оценка информативности диагностических каналов с точки зрения их применимости для оперативного контроля состояния технологической системы и управления процессом обработки.

4. Разработка функциональной архитектуры и алгоритма функционирования интеллектуальной системы формирования комплекса эксплуатационных свойств изделия, интегрированной в цифровую среду технологической подготовки производства.

Научная новизна:

Решена актуальная научно-производственная проблема, связанная с обеспечением надежности и стабильности механообрабатывающего производства. Элементы решения обладают признаками научной новизны:

1. Разработана методология непрерывного мониторинга состояния технологической системы, включающая выделение информативных признаков, отражающих изменение состояния технологической системы, основанная на комплексном анализе сигналов сенсоров производственного оборудования, обеспечивающая возможность адаптивного управления процессом обработки и стабилизацию результатов обработки.

2. Выявлена и верифицирована система взаимосвязей между условиями обработки, физико-механическими и теплофизическими свойствами материалов контактной

пары «инструмент-заготовка», динамикой процессов изнашивания инструмента и формирования свойств обработанной поверхности.

3. Разработан подход к формированию и предложена информационная структура электронного паспорта режущего инструмента как сквозного цифрового объекта, обеспечивающего накопление и использование данных об условиях эксплуатации, остаточном ресурсе, результатах диагностики и рекомендациях по корректировке технологических режимов, интегрированная в контур цифровой технологической подготовки производства.

4. На основе выявленных закономерностей сформирована функциональная структура и предложен алгоритм и верифицированные математические модели системы адаптивного управления процессом лезвийной обработки, позволяющие трансформировать металлорежущее оборудование в интеллектуальную технологическую систему, обеспечивающую стабильное формирование комплекса эксплуатационных свойств изделия, интегрированную в цифровую производственную среду.

Научная значимость:

– Обосновано применение многоканальной диагностики в задачах оценки состояния режущего инструмента, что расширяет теоретические представления о процессах изнашивания режущего инструмента в реальных условиях эксплуатации.

– Обосновано направление развития методов интеллектуального анализа процессов формирования свойств механически обработанной поверхности за счёт комплексной обработки диагностических данных различной физической природы (термо-ЭДС, силы резания, вибрации, шероховатость).

– Разработана концепция электронного паспорта инструмента, что позволяет формализовать представление о жизненном цикле инструмента и создаёт теоретическую основу для интеграции моделей оценки ресурса инструмента в цифровые производственные системы.

– Установлены взаимосвязи и количественно описаны закономерности между параметрами технологического процесса, характеристиками инструментального материала, режимами обработки и динамикой износа режущей кромки.

– На основе физических представлений о процессах стружкообразования и изнашивания инструмента при резании обоснована возможность построения прогностических моделей остаточного ресурса режущего инструмента с учётом влияния реальных производственных факторов и ограничений.

– Разработанные теоретические положения и методические рекомендации могут служить основой для дальнейших исследований в области интеллектуального управления ресурсом технологической оснастки и создания адаптивных производственных систем.

Практическая значимость:

На основе методологии управления работоспособностью режущего инструмента при гарантированном обеспечении результата и стабильности процесса обработки:

- разработана функциональная схема адаптивного управления процессом формирования комплекса эксплуатационных свойств изделий машиностроения на основе результатов непрерывного мониторинга состояния режущего инструмента непосредственно в процессе обработки;
- разработаны практические рекомендации по реализации проактивного адаптивного управления процессом резания с учетом вариабельности свойств материалов контактной пары;
- разработаны практические рекомендации по оперативной оценке работоспособности режущего инструмента;
- разработана структура электронного паспорта инструмента, обеспечивающего интеграцию данных об остаточном ресурсе инструмента в системы планирования и управления производством (MES, ERP).

Внедрение предложенной системы в промышленное производство способствует снижению затрат на инструментальное обеспечение, увеличению времени безаварийной работы оборудования и общему повышению эффективности производственного процесса.

Методология и методы исследования

Теоретические исследования основывались на фундаментальных положениях: технологии машиностроения, теории резания материалов, материаловедения, механики разрушения и физики твердого тела. Достоверность результатов экспериментальных исследований обеспечивалась применением методики планирования эксперимента и статистическим анализом.

Экспериментальные исследования процесса резания проводились на токарно-револьверном станке с ЧПУ OKUMA-Pumori Genos L300-M, оснащенный системой ЧПУ OSP-P300L, а также датчиком привязки инструмента (Touch setter). Измерение силы резания производилось с помощью тензометрического токарного динамометра DKM 2010 (фирмы «TeLC» Германия). Измерение вибрационного сигнала в процессе резания производилась с помощью виброметра ZETLAB ZET 110, оснащенного акселерометром BC 110. Параметры микропрофиля обработанной поверхности и сменных многогранных неперетачиваемых пластин (СМНП) регистрировались с помощью профилометров «Mahr» MarSurf M 300 и Mitutoyo surftest sj-210.

Аналитический инструментарий, примененный в работе: средства металлографические исследований, включая электронную микроскопию и энергодисперсионный анализ (Versa 3D

Dual Beam); механические испытания (микротвердомер ПМТ-3М); теплофизические исследования (комплекс «Теплофон» КИТ-02Ц, универсальная система определения теплопроводности методом лазерной вспышки NETZSCH LFA 427); электрических свойств СМНП с многослойными износостойкими покрытиями, в том числе, с наномодифицированной рабочей поверхностью использовались: многофункциональный цифровой измеритель MS8226 DMM, измеритель иммитанса E7-25, измерительная ячейка для исследования объемных электрических свойств.

На защиту выносятся:

Методология построения функционально-ориентированных интеллектуальных технологических систем механической обработки, основанная на знании системы взаимосвязей свойств материалов, участвующих в процессе обработки, технологических условий обработки и свойств обработанной поверхности, знании физических закономерностей изнашивания режущего инструмента и взаимосвязей состояния инструмента со свойствами обработанной поверхности. Методология предусматривает необходимость непрерывного мониторинга состояния технологической системы, включающая выделение информативных признаков, отражающих изменение состояния технологической системы. Многоканальный мониторинг и комплексный анализ сигналов сенсоров производственного оборудования, обеспечивает возможность адаптивного управления процессом обработки и стабилизацию результатов обработки.

Методика интеллектуального мониторинга состояния элементов технологической системы как основы построения адаптивных алгоритмов управления технологической операцией на оборудовании с ЧПУ, технические принципы и критерии диагностики.

Концепция «Электронного паспорта инструмента» как основа адаптивной корректировки режимов резания и инструмент интеграции этапов технологической подготовки, операции механической обработки и планирования производства.

Функциональная архитектура и алгоритм функционирования интеллектуальной системы адаптивного управления формированием комплекса эксплуатационных свойств изделия, интегрированной в цифровую среду технологической подготовки производства.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов диссертационной работы обеспечивается комплексным подходом и применением современных методов исследования, необходимым и достаточным объемом экспериментальных исследований, также статистической обработкой и сопоставлением полученных результатов с данными других авторов.

Основные положения диссертационной работы представлены, доложены и обсуждены на 8-й Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии на современном этапе развития машиностроения (ТМ-2016)» (МАДИ, г. Москва, 2016 г.), XX Международной конференция по мягким вычислениям и измерениям (СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, 2017 г.), XI Международной научно-технической конференции ассоциации технологов-машиностроителей «Инновационные технологии машиностроения в транспортном комплексе» (БФУ имени И. Канта, г. Калининград, 2019 г.), XII Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении (ИНМАШ 2021) (НГТУ, г. Новосибирск, 2021 г.), 14-ой международной научно-технической конференции «Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли» (БГТУ, г. Брянск, 2022 г.), на межкафедральном семинаре на базе МГТУ им. Н. Э. Баумана в рамках XV Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении» (г. Москва, 2023 г.), на межкафедральном семинаре на базе ДГТУ в рамках XVI Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии машиностроения, авиации и транспорта» (г. Ростов-на-Дону, 2024 г.), на международных конференциях International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science 2018 – 2019 гг. и International Conference on Industrial Engineering 2016 – 2023 гг.

Личный вклад автора

Все результаты, приведенные в диссертации, получены лично автором, либо в соавторстве при его непосредственном участии. Постановка цели, задач и формулировка основных положений и выводов выполнены лично автором.

Публикации.

Основные материалы диссертации опубликованы в 108 печатных работах, в том числе: в 47 изданиях, рекомендованных ВАК, в 14 зарубежных изданиях индексируемых в МБД Web of Science и Scopus; получены 1 патент РФ на изобретение, 14 патентов РФ на полезные модели и 3 свидетельства на программы для ЭВМ; 3 монографии.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и выводы по работе, списка использованных источников из 287 наименований и 2 приложений, содержит 79 рисунков и 79 таблиц. Общий объем работы 312 страницы, в том числе 13 страниц приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и сформулировано содержание решаемой научной проблемы, цель и задачи исследования, изложены научная новизна, а также научная и практическая значимость.

В первой главе проведен анализ общего состояния технологической подготовки многономенклатурного производства, рассмотрены вопросы методологии управления динамическими техническими системами, а также цифровые средства повышения эффективности функционирования многономенклатурного производства. Рассмотрены и проанализированы литературные источники, затрагивающие вопросы технологической подготовки и управления операцией механической обработки. На основе выявленных проблем и намеченных направлений исследований, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, обеспечивающие ее достижение.

В условиях высокой динамики изменения ассортимента изделий и короткого жизненного цикла продукции эффективность и конкурентоспособность производства определяется способностью предприятия быстро перестраивать производственные процессы, обеспечивая стабильность и качество продукции при минимальных издержках. Применение оборудования с ЧПУ и систем автоматизированной подготовки не способны в полной мере обеспечить стабильность технологических процессов и требуемых результатов. Одним из наиболее уязвимых звеньев технологической системы является режущий инструмент, износ и поломки которого напрямую влияют на точность обработки и качество продукции. Это обуславливает необходимость систем мониторинга и прогнозирования ресурса инструмента на основе анализа текущих параметров процесса резания. Наиболее перспективным направлением является разработка функционально-ориентированных интеллектуальных технологических систем на основе многоканальной диагностики и их интеграция в единую цифровую информационную структуру предприятия, позволит повысить точность оценки состояния инструмента, обеспечить адаптивное управление процессом обработки и планирования производства.

Во второй главе подробно изложены методические основы и экспериментальная база, обеспечившие достоверность полученных результатов.

Экспериментальные исследования проводились на токарно-револьверном станке с ЧПУ OKUMA-Pumori Genos L300-M, оснащённом системой управления OSP-P300L, позволяющим выполнять токарные, фрезерные и резьбонарезные операции с использованием стационарного и приводного инструмента и обеспечить широкий спектр режимов резания. Таким образом, экспериментальная база позволила смоделировать реальные производственные условия многономенклатурного машиностроительного производства и обеспечить комплексную оценку различных факторов.

Для оценки универсальности методики применялись различные группы сталей: конструкционные легированные (40X, 30XMA); коррозионностойкие и жаропрочные мартенситные и ферритно-мартенситные (12X13, 40X13, 14X17H2, 12X18H10T); высоколегированные жаропрочные стали (13X11H2B2MФ, 08X21H6M2T). Использовались

горячекатаные сортовые заготовки, химический состав и свойства которых соответствовали требованиям ГОСТ. Такой выбор обеспечил воспроизводимость условий и позволил охватить широкий диапазон обрабатываемости материалов. В качестве режущего инструмента применялись серийные сменные неперетачиваемые многогранные пластины (Sandvik, Korloy), а также пластины с модифицированной поверхностью и наноструктурированным слоем.

Исследование динамики и стабильности процесса резания производилось с помощью тензометрического токарного динамометра DKM 2010 (фирмы «TeLC» Германия) и виброметра ZETLAB ZET 110, оснащенного акселерометром BC 110. Регистрация сигналов термо-ЭДС осуществлялась с помощью цифрового осциллографа Velleman PCS500. Параметры микропрофиля обработанной поверхности и СМНП регистрировались с помощью профилометров «Mahr» MarSurf M 300 и Mitutoyo surftest sj-210.

Комплекс металлографических исследований, включая электронную микроскопию и энергодисперсионный анализ проводился на сканирующем электронно-ионном микроскопе FEI Versa 3D Dual Beam. Теплофизические исследования свойств сменных режущих пластин выполнялись с использованием комплекса «Теплофон» КИТ-02Ц и универсальной системы определения теплопроводности методом лазерной вспышки NETZSCH LFA 427. Для подготовки образцов из твердосплавных пластин применялся электроэрозионный станок LK630. Анализ электрической проводимости и сопротивления СМНП с многослойными износостойкими покрытиями, в том числе, с наномодифицированной рабочей поверхностью проводились с помощью многофункционального цифрового измерителя MS8226 DMM, измерителя иммитанса E7-25 и измерительной ячейки для исследования объемных электрических свойств.

Для обработки результатов использовались методы математической статистики, включая: определение среднего значения и стандартного отклонения; коэффициент вариации для оценки стабильности процесса; критерии Стьюдента и Фишера для проверки репрезентативности выборки и достоверности моделей; коэффициенты корреляции для анализа связей между факторами; методы регрессионного анализа (полиномиальные, степенные и показательные модели). Особое внимание уделялось планированию экспериментов. Проведен, с обязательным выполнением комплекса условий Гаусса–Маркова, полный факторный эксперимент 3^3 , позволивший исследовать влияние основных факторов – скорости резания, подачи и параметров термо-ЭДС, – на ресурс инструмента и качество поверхности.

Для проверки достоверности регрессионных моделей применялись методы обратного нормирования, расчёта относительных погрешностей и статистический критерий Фишера.

Отдельное внимание уделено оценке фактора риска, который агрегирует неконтролируемые воздействия и погрешности.

В третьей главе рассмотрены фундаментальные закономерности процесса резания, механизмы износа инструмента, а также возможности применения различных каналов диагностики для оценки состояния технологической системы. Полученные результаты служат основой для разработки методологии многоканального мониторинга и построения интеллектуальных технологических систем.

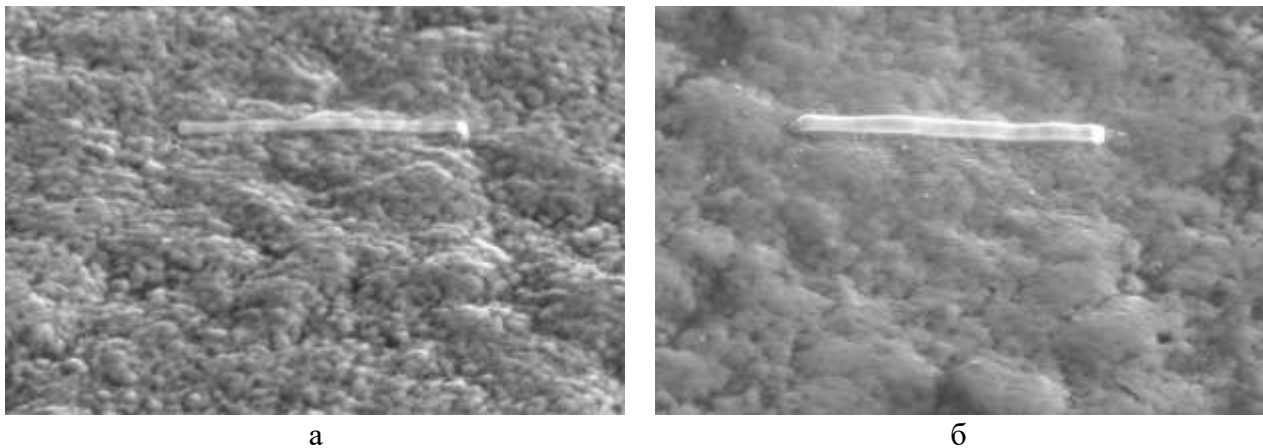
Процесс резания представляет собой сложное физико-механическое взаимодействие между инструментом и обрабатываемой заготовкой. В зоне контакта режущей кромки формируются высокие давления, температурные и силовые поля, сопровождающиеся пластической деформацией, трением и выделением тепла. Эти факторы в совокупности определяют интенсивность изнашивания инструмента и стабильность процесса обработки. Характер контактного взаимодействия при резании зависит от целого ряда факторов: механических свойств материала заготовки, геометрии инструмента и состояния его рабочей поверхности, режимов резания. При этом ключевую роль в формировании ресурса инструмента играют температурные и силовые нагрузки.

Взаимное влияние свойств контактной пары на динамику и закономерности процесса резания, износа режущего инструмента и формирование параметров качества обработанной поверхности достаточно полно описаны в научно-исследовательской литературе. Однако количественная оценка и прикладное применение аналитических зависимостей затруднено существенной вариативностью и неопределенностью технологической информации.

В производственных условиях именно режущий инструмент принимает на себя функцию основного направления стабилизации процесса резания. Однако даже СМНП ведущих производителей имеют ощутимый разброс свойств и, в итоге, величины периода стойкости, что сказывается на ходе операции и результатах обработки. Вариативность характеристик выражается непостоянством морфологии (рис. 1) и шероховатости поверхности (рис. 2) даже в рамках одной партии поставки, что отражается не только на качестве обработанной поверхности по механизму копирования дефектов, но и посредством влияния на характер контактного взаимодействия.

Причинами нестабильности режущих свойств инструмента и результирующего разброса периода стойкости сменных твердосплавных пластин с износостойкими покрытиями помимо внешних по отношению к инструменту факторов являются различного рода внутренние несовершенства в виде неравномерности слоя и размеров износостойких покрытий (рис. 3), непостоянство размеров зерен твердосплавной матрицы (рис. 4), а также

дефекты в виде микропор и трещин как в объеме твердосплавной матрицы, так и в поверхностных износостойких покрытиях (рис. 5).



а – образец 1; б – образец 2

Рис. 1 – Морфология поверхности сменных твердосплавных пластин с износостойким покрытием

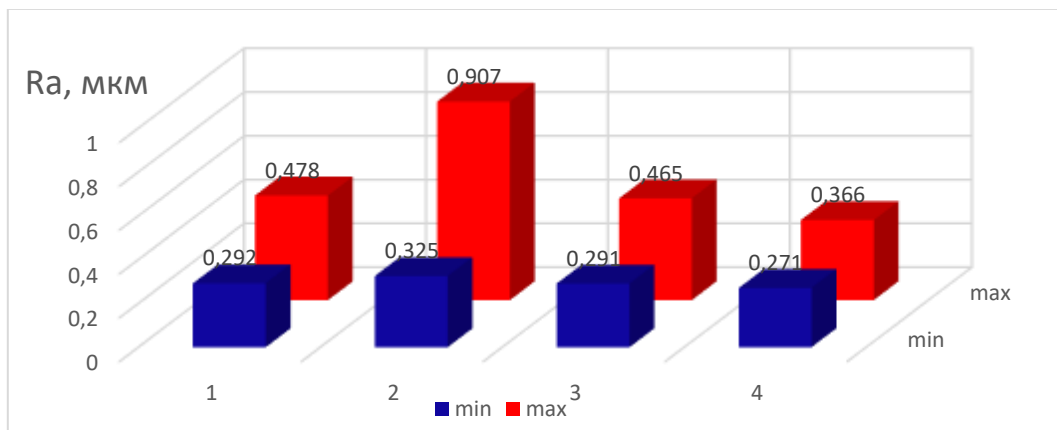
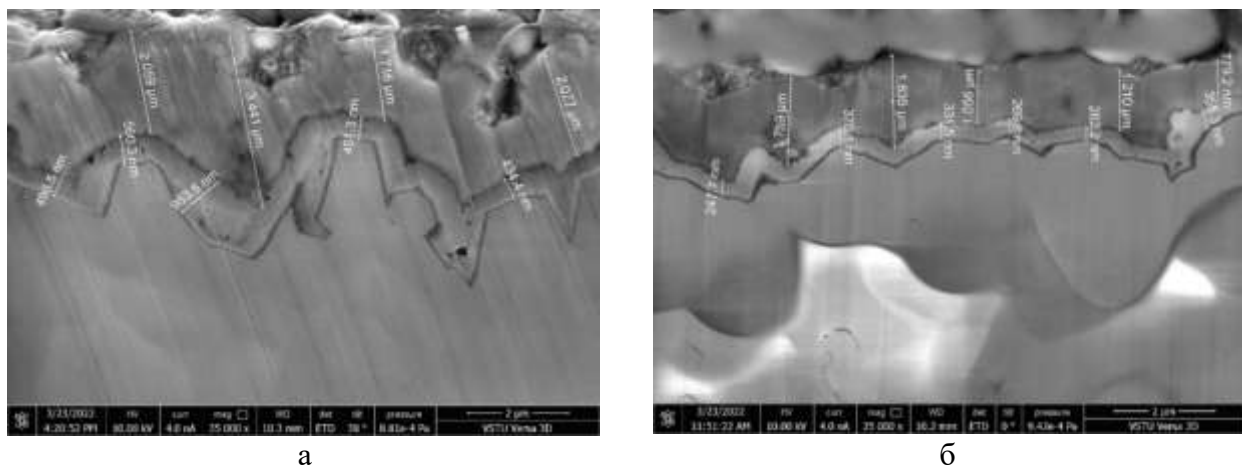
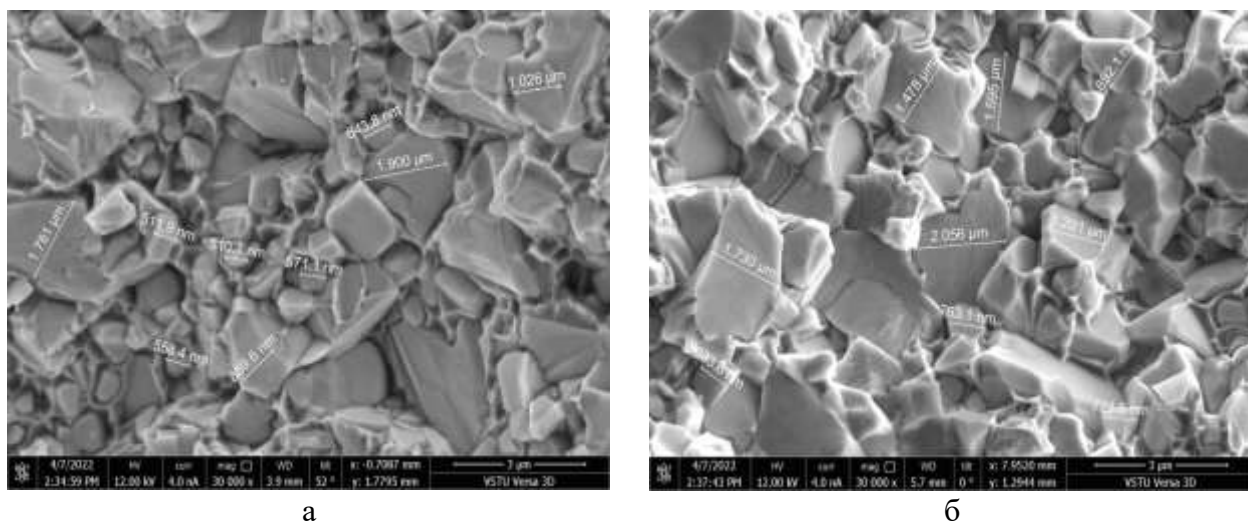


Рис. 2 – Разброс параметров среднего арифметического отклонения профиля Ra шероховатости поверхностей пластин



а – образец 1; б – образец 2

Рис. 3 – Структура поверхностного слоя твердосплавной пластины с многослойным износостойким покрытием



а – образец 1; б – образец 2
Рис. 4 – Внутренняя структура твердосплавной матрицы

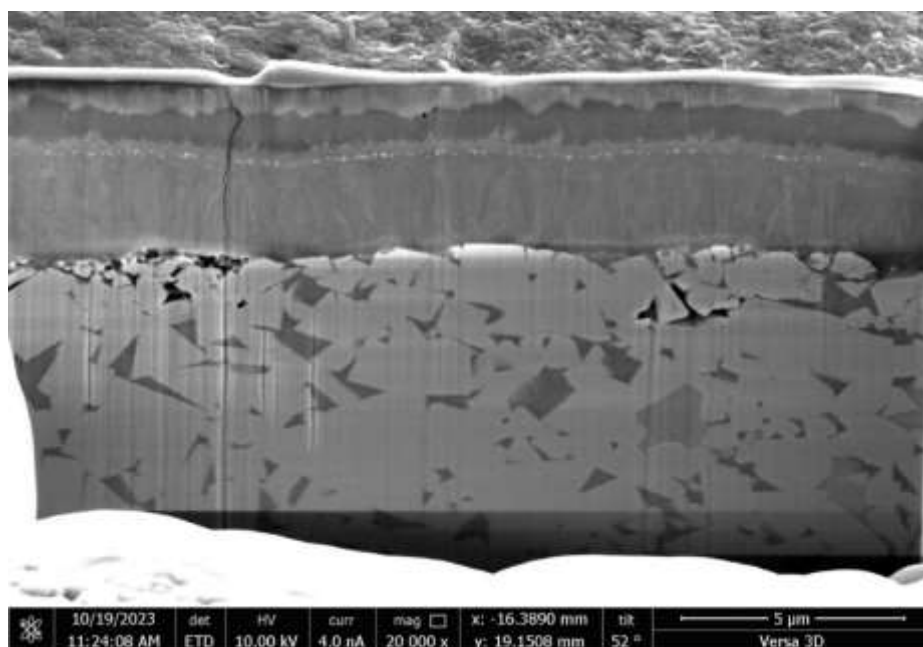


Рис. 5 – Дефекты в объеме поверхностных слоев СМНП

Указанные дефекты имеют случайный характер, определяются технологическими факторами и формируют разброс физико-механических и теплофизических свойств режущей пластины, в частности поверхностной микротвердости и теплопроводности, что подтверждается результатами проведенных исследований. Так было установлено, что разброс значений температуропроводности в температурном диапазоне 25 - 450°C сменных режущих пластин KORLOY NC9125 (группа обрабатываемости М, S) составил от 4 до 20%, пластин KORLOY PC8110 (группы обрабатываемости М, S, Н) и UNC805 (группа обрабатываемости S) – от 6 до 12% и от 5 до 12% соответственно.

Однако, количественная оценка теплофизических и физико-механических свойств СМНП требует лабораторных средств измерения, достаточно трудоемка, предполагает разрушающие методы. В результате ограничивается область выборочного контроля и

практически нереализуема в производственных условиях. Оценка же электропроводности СМНП посредством измерения полного электрического сопротивления не выявила ее функциональной количественной взаимосвязи с величиной теплопроводности и периодом стойкости режущего инструмента.

Интенсивность тепловыделения помимо физико-механических свойств, обрабатываемого и инструментального материалов, определяется режимами обработки и геометрией режущей части инструмента. Это обосновывает информативность сигнала термо-ЭДС, формируемого суммарным тепловым воздействием и его применимость в качестве интегральной оценки свойств контактной пары, что и было подтверждено результатами проведенных стойкостных испытаний серийно выпускаемых сменных твердосплавных пластин с износостойким покрытием и пластин с наномодифицированным поверхностным слоем (рис. 6, 7).

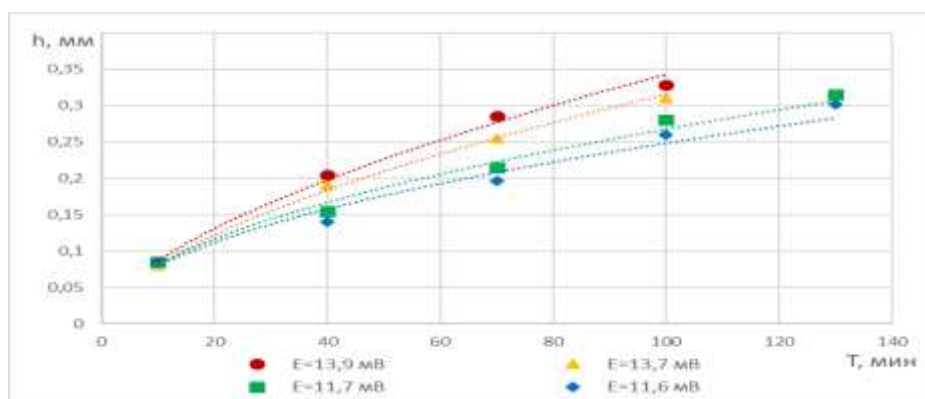


Рис. 6 – Зависимость величины фаски износа режущих пластин Sandvik Coromant WNMG 080408-MM 2220 (группа обрабатываемости М) от времени
(обрабатываемый материал – сталь 12Х13; режимы резания: $t=0,5$ мм, $S=0,1$ мм/об, $V=210$ м/мин)

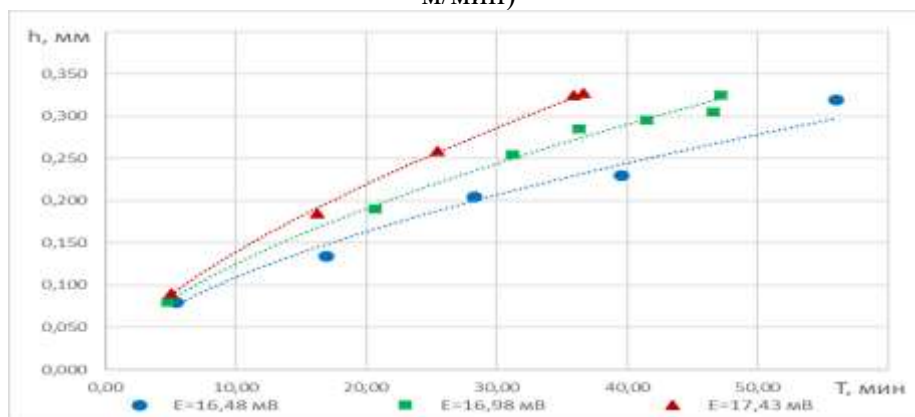


Рис. 7 – Зависимость величины фаски износа режущих пластин Korloy WNMG 080408-VP2 UNC805 (группа обрабатываемости S) от времени
(обрабатываемый материал – сталь 08Х21Н6М2Т; режимы резания: $t=0,5$ мм, $S=0,3$ мм/об, $V=80$ м/мин)

Комплексная интегральная оценка контактной пары инструмент-заготовка методом измерения термо-ЭДС при пробном проходе имеет более высокую достоверность результатов

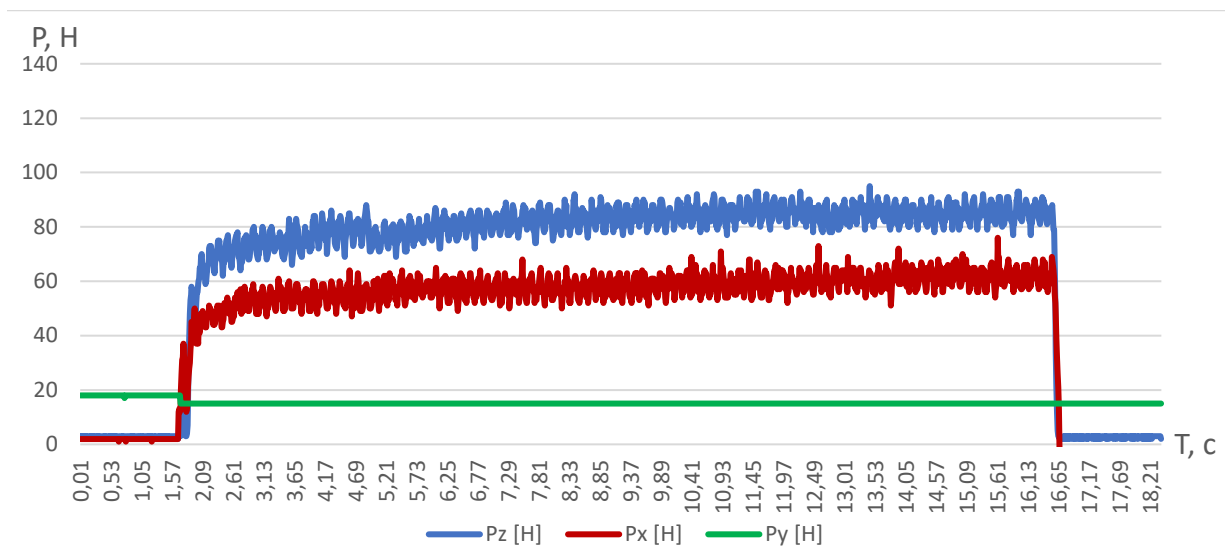
и практическую реализацию в производственных условиях, но ограничивается областью предварительной диагностики, что вызывает необходимость дополнения средствами «онлайн» диагностики.

В данном контексте преимущества получает косвенная диагностика процесса резания, которая вместе с относительной простотой дооснащения и модернизации оборудования позволяет получать информацию о ходе обработки и оперативно реагировать на «нежелательные» отклонения. Динамика и результаты обработки, интенсивность износа инструмента определяются главным образом характером контактного взаимодействия и деформационно-температурной напряженностью процесса резания. Взаимосвязь контактных напряжений и тепловых полей в зоне резания с величинами составляющих силы резания позволяет осуществлять мониторинг процесса посредством тензометрических измерений силы резания.

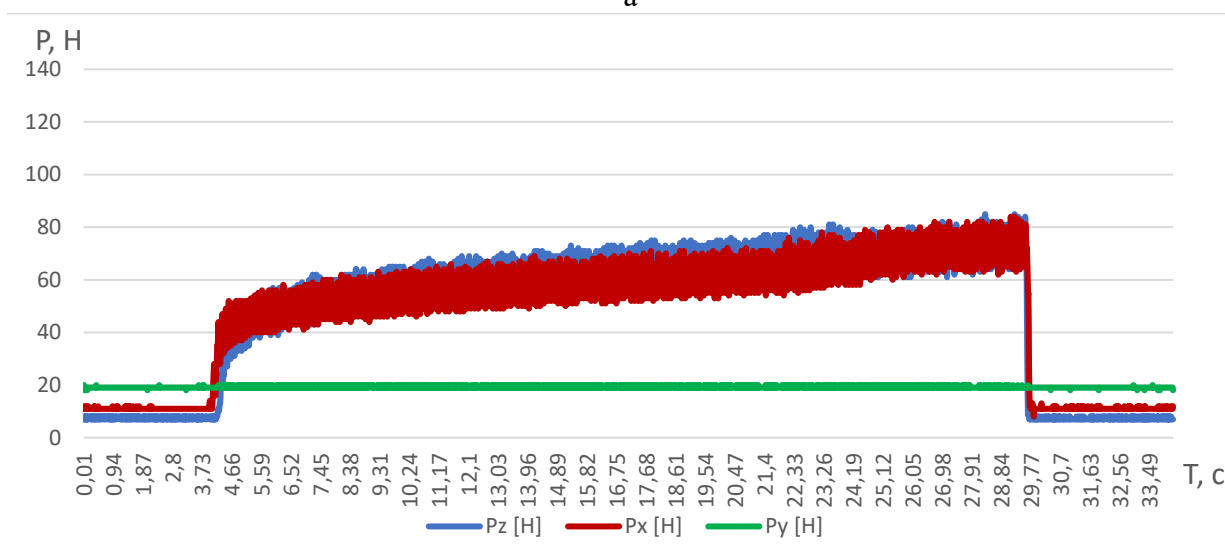
Информативность данного диагностического канала определяется его чувствительностью к вариативности теплофизических свойств режущего инструмента, уровню температурно-силовой напряженности, виду контактного взаимодействия и стабильности процесса резания. Так увеличение скорости резания сопровождается не только изменением величины и соотношения составляющих силы резания, но и угла наклона осциллограммы (рис. 8). В данном случае изменение интенсивности тепловыделения при обработке нержавеющей аустенитной стали 12X18H10T ведет к повышению пластичности обрабатываемого материала и увеличению зоны опережающей пластической деформации, что в большей степени отражается на величине осевой составляющей силы резания P_x .

Установлено, что на величину, соотношения и колебания составляющих силы резания помимо свойств обрабатываемого материала влияние оказывают характеристики инструмента (в частности коэффициент теплопроводности) и состояние поверхностного слоя заготовки, сформированное на предыдущих технологических операциях. Так, например, обработка нержавеющей сталей 12X18H10T, 14X17H2 и 13X11H2B2MФ СМНП с CVD (Korloy NC5330) вследствие худшего теплоотведения сопровождается более выраженным характером осевой составляющей силы резания P_x по сравнению с СМНП с PVD (Korloy PC8115).

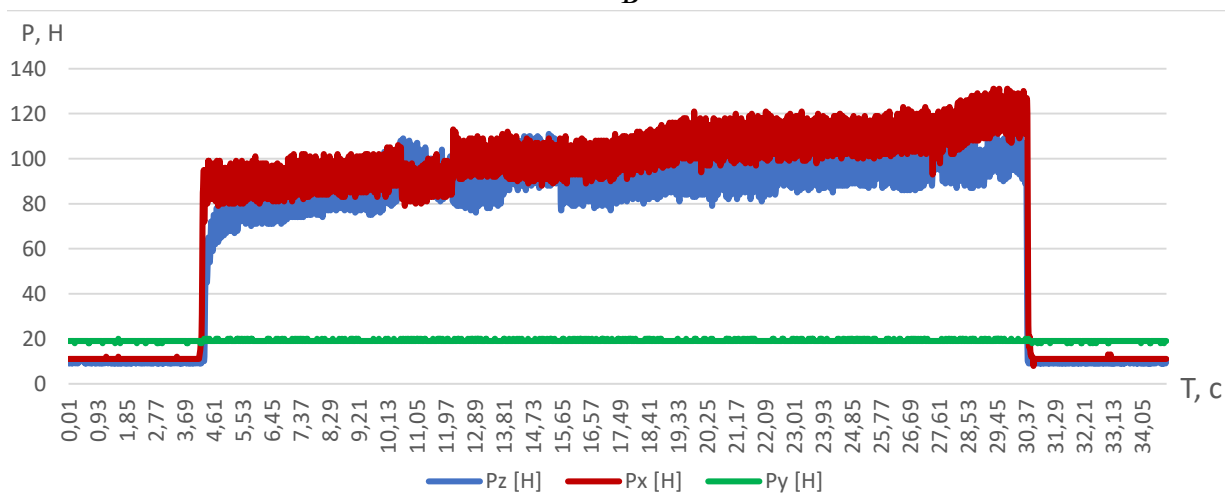
Прямое влияние на распределение деформации и на интенсивность тепловыделения при контактном взаимодействии оказывают остаточные деформации в обрабатываемом поверхностном слое. Локализация зоны опережающей пластической деформации за счет упрочнения поверхностного слоя ведет к снижению температурно-силовой напряженности процесса резания. В результате наблюдается не только снижение величины силы резания, но и уровня неустойчивости процесса, что наиболее ярко проявляется при обработке нержавеющей и жаропрочных сталей.



а



Б

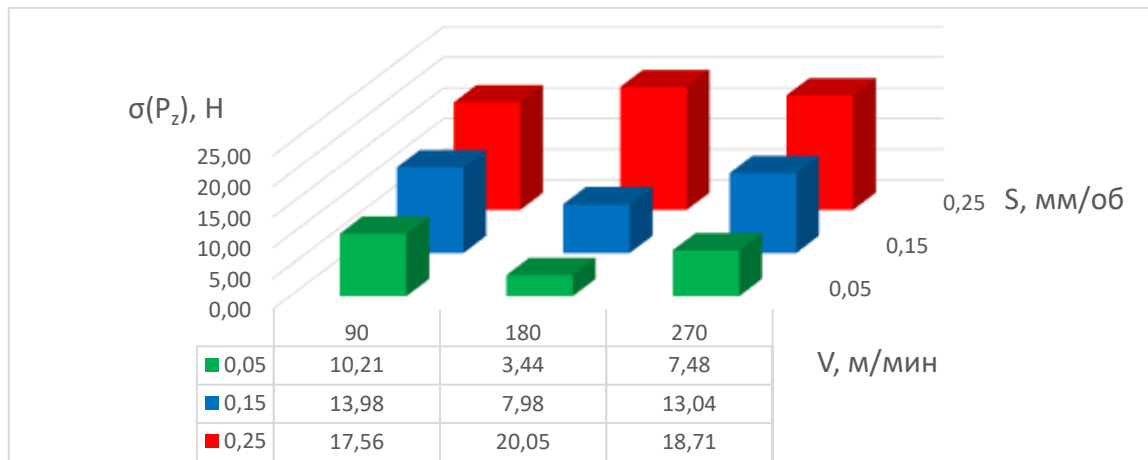


в

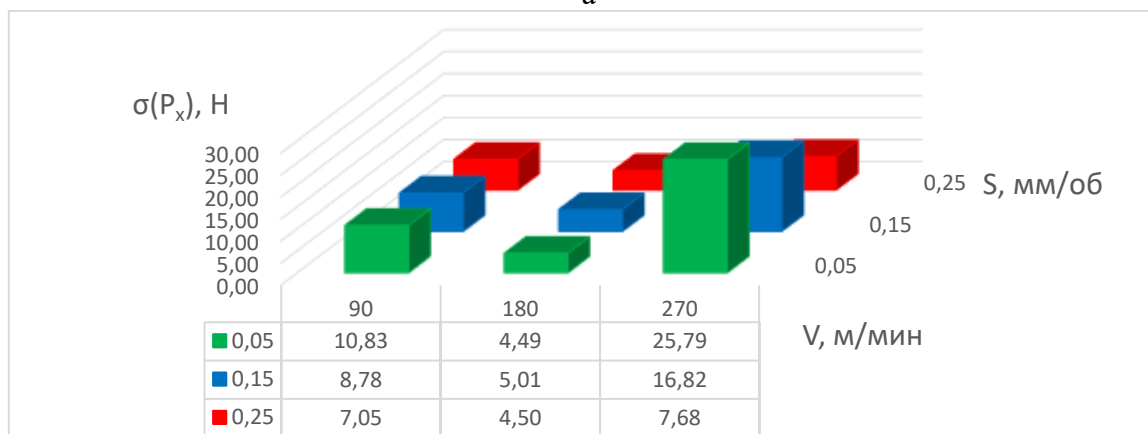
а) $V=90$ м/мин; б) $V=180$ м/мин; в) $V=270$ м/мин

Рис. 8 – Динамика изменения составляющих силы резания при точении стали 12X18H10T (Korloy NC5330; Режимы резания: $t=0,5$ мм, $S=0,05$ мм/об)

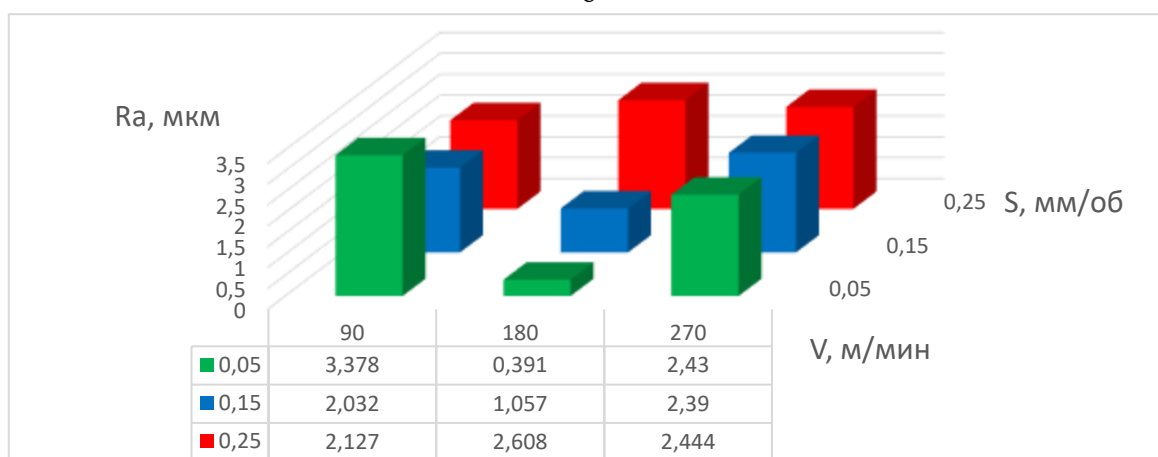
Взаимосвязь вида контактного взаимодействия, неустойчивости процесса резания и формирование параметров шероховатости обработанной поверхности (R_a) иллюстрируют диаграммы (рис. 9).



а



б



в

Рис. 9 – Изменение величины стандартного отклонения составляющих силы резания P_z (а), P_x (б) и среднеарифметического отклонения профиля R_a (в) при точении стали 12X18H10T твердосплавной пластиной Korloy NC5330 (глубина резания $t=0,5$ мм)

Повышенные колебания составляющих силы резания в зоне низких (по причине наростообразования на режущей кромке) и в зоне высоких скоростей (вследствие

циклического стружкообразования) сопровождаются существенным увеличением параметра R_a при малой подаче. С ростом подачи увеличивается влияние кинематического фактора на микропрофиль обработанной поверхности и уменьшением влияния неустойчивости контактного взаимодействия.

Таким образом, мониторинг составляющих силы резания позволяет оценивать температурно-силовую напряженность и стабильность процесса, сопоставить текущую операционную ситуацию с теоретическими физическими моделями, а также прогнозировать результаты обработки, что делает данный информационный канал необходимой и неотъемлемой составляющей интеллектуальной технологической систем механической обработки.

Однако, частотный диапазон и разрешающая способность экономически доступных и целесообразных к применению динамометрических систем мониторинга ограничивает применимость данного канала. Повышение надежности управления технологическим операциями определяет необходимость применения иных диагностических инструментов и построение систем на основе многоканальной диагностики.

Вибрационный мониторинг при доступности измерительных средств позволяет отслеживать неустойчивость процесса и определять его критический уровень в широком частотном диапазоне. Вибрация несет в себе информацию о зарождающихся и развивающихся дефектах оборудования, состоянии режущего инструмента, стабильности контактного взаимодействия и др.

Наиболее информативным параметром, характеризующим уровень вибраций и энергии неустойчивости процесса резания, является интегральная виброэнергия, определяемая как площадь спектрограммы вибрационного сигнала. Данный параметр отражает суммарную энергетическую активность колебаний, и, как показывает практика, растёт с увеличением износа, что позволяет: получить устойчивый параметр для численного сравнения; объективно оценивать текущее состояние инструмента; обнаруживать ранние признаки износа до его визуального проявления; прогнозировать остаточный ресурс. Метод прост поскольку исключает необходимость анализа каждого пика, эффективен и легко автоматизируется.

Уровень и интенсивность ее роста с развитием износа инструмента зависит от обрабатываемого материала, применяемой СМНП и режимов обработки, однако общая закономерность сохраняется. Однако стабильное развитие фаски износа по задней грани ведет к монотонному увеличению площади спектрограммы, в то время как развитие износа инструмента до значительно меньших величин, но при образовании нароста на режущей кромке сопровождается резким ростом площади спектрограммы. Так развитие величины 0,065 мм до 0,5 мм сопровождается увеличением площади спектрограммы не более 50 % (рис.10, а,

в), а сформировавшийся на режущей кромке нарост кратно (более чем в 10 раз) увеличивает интегральную виброэнергию (рис. 10, б, г).

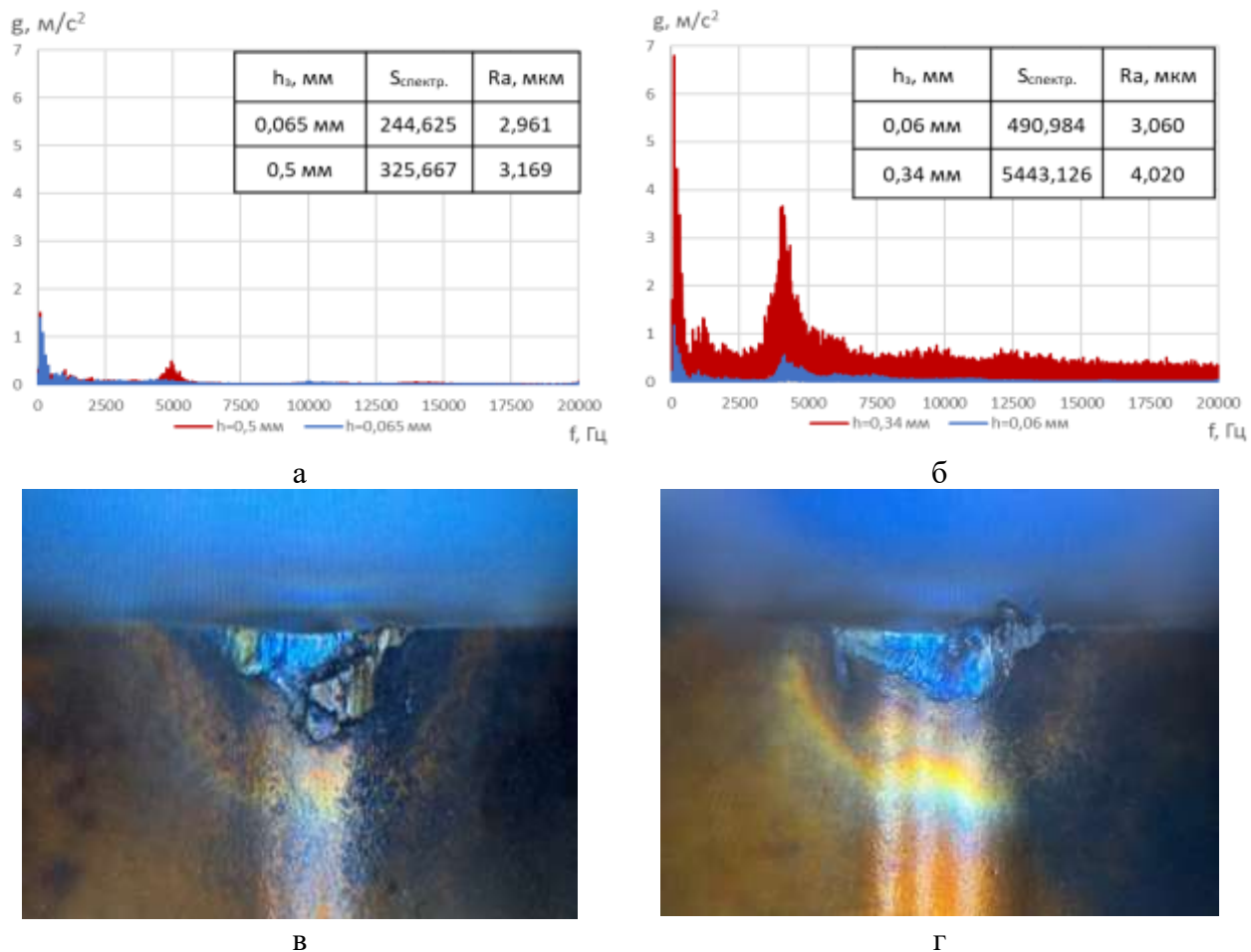


Рис. 10 – Взаимосвязь вибрационного сигнала, износа инструмента и шероховатости поверхности

(Сталь 40X13 Режимы резания: $t=0,5$ мм, $V=280$ м/мин, $S=0,3$ мм/об)

Прогрессирующий износ СМНП при отсутствии критических дефектов режущей кромки сопровождается увеличением площади спектрограммы вибрационного сигнала (рис. 11), что является индикатором нарастающей нестабильности процесса механической обработки. При этом среднее арифметическое отклонение Ra высота неровностей профиля Rz , существенно отличаются от расчётных кинематических значений, определяемых радиусом при вершине режущей пластины и величиной продольной подачи, и проявляют тенденцию к уменьшению. Однако, анализ профилограмм обработанной поверхности демонстрируют трансформацию характера поверхностного рельефа: от регулярного профиля при начальном износе к иррегулярному при снижении высотных параметров (рис. 12), что свидетельствует об усилении влияния на формирование микрогеометрии обработанной поверхности таких факторов как: деградация геометрии режущего инструмента; вибраций и деформационных процессов.

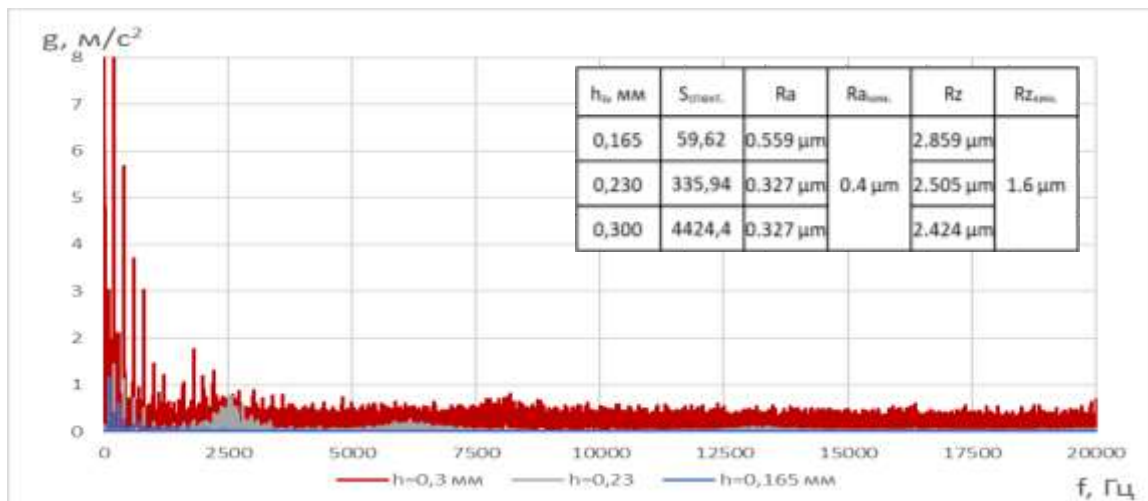
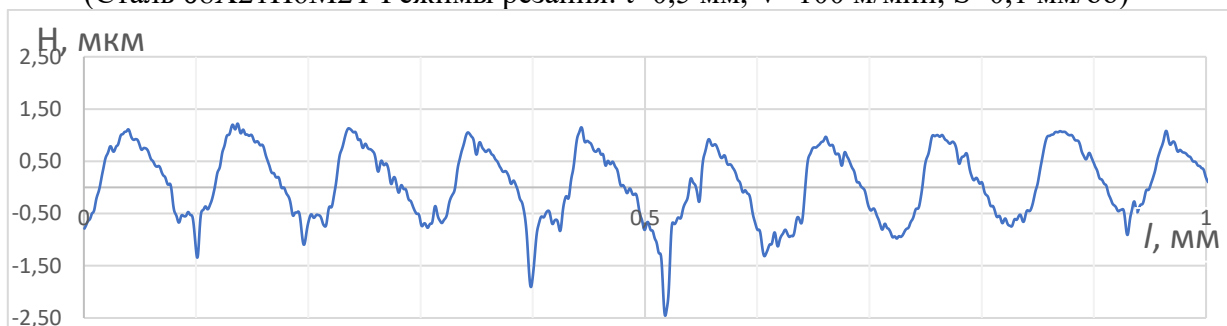


Рис. 11 – Взаимосвязь вибрационного сигнала, износа инструмента и шероховатости поверхности

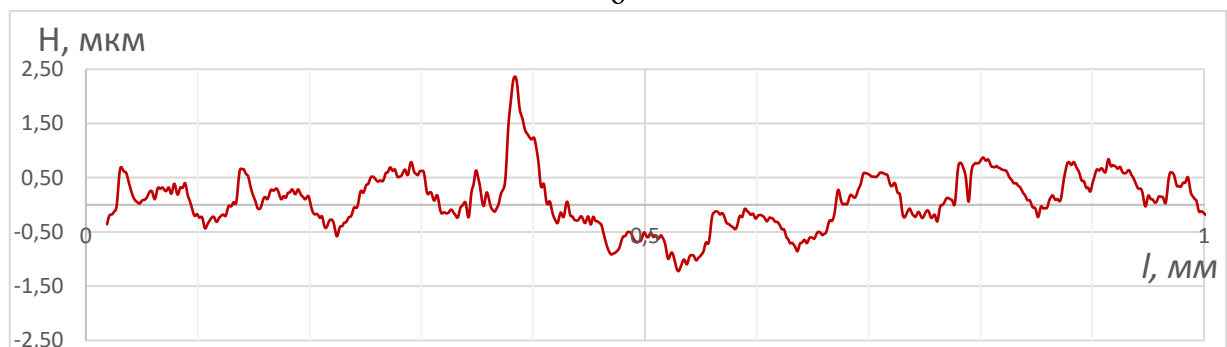
(Сталь 08X21H6M2T Режимы резания: $t=0,5$ мм, $V=100$ м/мин, $S=0,1$ мм/об)



а



б



в

Рис. 12 – Профилограммы обработанной поверхности при различной степени износа СМНП

а) $h_3 = 0,165$ мм; б) $h_3 = 0,23$ мм; в) $h_3 = 0,3$ мм

(Сталь 08X21H6M2T Режимы резания: $t=0,5$ мм, $V=100$ м/мин, $S=0,1$ мм/об)

Систематизация экспериментальных данных в рамках допустимой области режимов резания и характеристик контактной пары позволяет выявить закономерности изменения площади спектрограммы вибрационного сигнала (рис. 13), что в условиях стабилизации интенсивности изнашивания инструмента позволяет прогнозировать его остаточный ресурс, а также оценивать состояние режущей кромки с точки зрения управляемости процесса резания и формирования параметров качества обработанной поверхности.

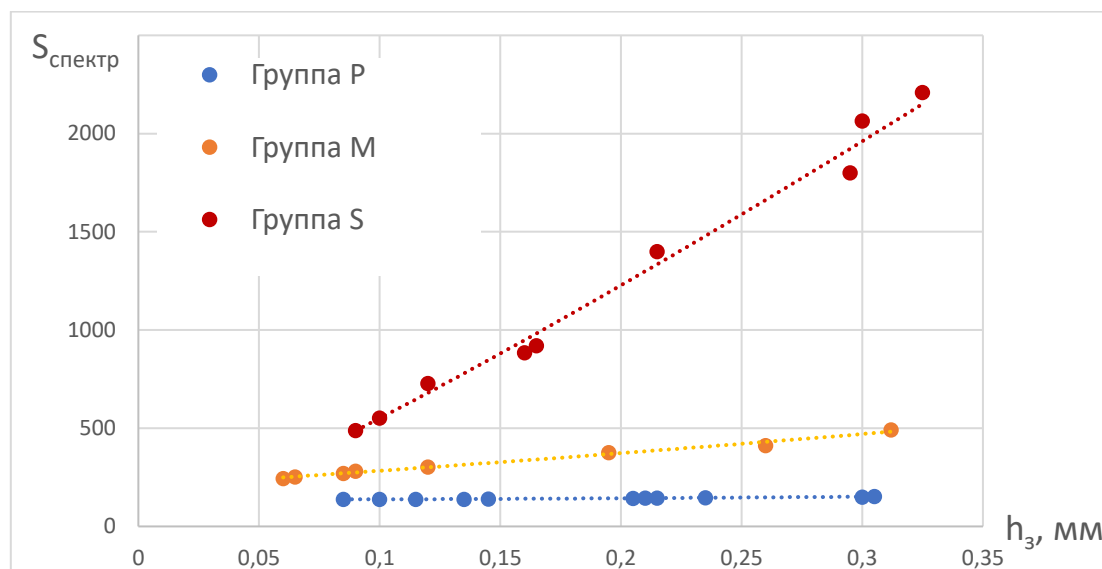


Рис. 13 – Зависимость изменения величины интегральной виброэнергии (площади спектрограммы вибрационного сигнала) от величины фаски износа по задней грани СМНП

Представленные на графике кривые получены: для конструкционной стали 40Х (группа обрабатываемости Р) и СМНП Sandvik WNMG 08 04 08-PM 4225; нержавеющей стали 40Х13 (группа обрабатываемости М) и СМНП Korloy WNMG080408-MM NC9125; жаропрочной стали 08Х21Н6М2Т (группа обрабатываемости S) и СМНП Korloy WNMG080408-VP2 UNC805. Разработаны регрессионные модели, применимые для повышения эффективности управления процессом обработки.

Таким образом, методология управления процессами механической обработки и построения интеллектуальных технологических систем требует учета: физических принципов контактного взаимодействия, механизмов изнашивания режущего клина, взаимосвязей условий обработки с параметрами микропрофиля поверхности.

Установлено и экспериментально доказано, что, в производственных условиях, более высокую достоверность результатов обеспечивает комплексная интегральная оценка свойств материалов контактной пары «инструмент-заготовка», получаемая при измерении термо-ЭДС при пробном проходе на фиксированных режимах резания.

Оценка температурно-силовой напряженности и стабильности процесса, необходимость сопоставления текущей ситуации с теоретическими физическими моделями непосредственно в ходе процесса резания требует мониторинга составляющих силы резания.

Мониторинг процесса резания посредством оценки уровня вибраций посредством измерения величины интегральной виброэнергии позволяет оценить стабильность обработки, текущее состояние и ресурс работоспособности режущего инструмента.

Многоэтапный мониторинг на основе многоканальной диагностики процесса резания позволяет уточнить область допустимых режимов применительно к состоянию элементов технологической системе и выполнить параметрическую оптимизацию с целью надежного обеспечения установленных требований к результату механической обработки.

В четвертой главе изложены концептуальные основы интеграции интеллектуальной технологической системы в цифровую среду машиностроительного предприятия. Обоснована необходимость цифровизации процессов технологической подготовки производства (ТПП), разработаны подходы к формализации и оптимизации проектных процедур, а также представлена концепция электронного паспорта инструмента (ЭПИ) как ключевого элемента цифрового производства.

Для обеспечения сквозной управляемости, воспроизводимости и интеллектуализации технологических решений с целью повышения эффективности производственных систем, гибкости и адаптивности к изменениям внешней среды предлагается комплексный системный подход, основанный на выделении и реализации пяти ключевых аспектов, каждый из которых формирует базис современной цифровой модели ТПП. Обобщённый вид архитектуры цифровой модели ТПП представлена на рис. 14.



Рис. 14 – Архитектура цифровой модели технологической подготовки производства (ТПП)

В условиях динамичного изменения производственных параметров и стремления к адаптивному управлению технологическими ресурсами особую актуальность приобретает

интеграция интеллектуальных механизмов в процессы нормирования и планирования. Одним из практико-ориентированных направлений внедрения создание интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР) является автоматизированная оценка ресурса работоспособности инструмента, позволяющая не только прогнозировать техническое состояние режущего инструмента, но и формировать обоснованные управленческие решения.

Ключевым элементом данного подхода является электронный паспорт инструмента, представляющий собой сквозной цифровой объект, накапливающий информацию об условиях эксплуатации, фактической загрузке, истории износа и восстановительных мероприятиях. Это позволяет осуществлять динамическую корректировку норм времени на технологические операции, с учетом реального состояния инструмента и производственной обстановки, тем самым повышая точность производственного планирования, снижая вероятность отказов и обеспечивая экономию ресурса оборудования.

Методология оценки работоспособности и ресурса режущего инструмента с реализацией концепции ЭПИ реализуется в виде трех функциональных этапов, каждый из которых включает совокупность последовательно выполняемых подэтапов (рис. 15).

Этап подготовки исходной технологической информации включает в себя комплекс процедур, направленных на инициализацию условий эксперимента и предварительную параметрическую настройку процесса. В рамках данного этапа реализуются следующие операции:

1.1 сортировка сменных режущих пластин по величине термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС) с целью кластеризации по потенциальной стойкости и обоснованного формирования групп инструментов;

1.2 предварительный выбор режимов резания (скорость резания V_c , глубина резания a_p , подача f_n) в соответствии с рекомендациями производителя инструмента и результатами предварительной сортировки;

1.3 определение допустимого диапазона подач, обеспечивающих требуемые параметры шероховатости обработанной поверхности, с учетом кинематической составляющей микропрофиля и радиуса при вершине режущего инструмента.

На этапе оперативного управления обеспечивается адаптация режимов резания под конкретный инструмент и заготовку с учетом фактического поведения пары инструмент-деталь, выявленного в процессе пробного прохода с регистрацией термо-ЭДС.

На этапе 2.1 посредством метода пробного прохода термо-ЭДС реализуется процедура уточнения области допустимых режимов резания после кластеризации СМНП и формирования ЭПИ (этап 1.1).

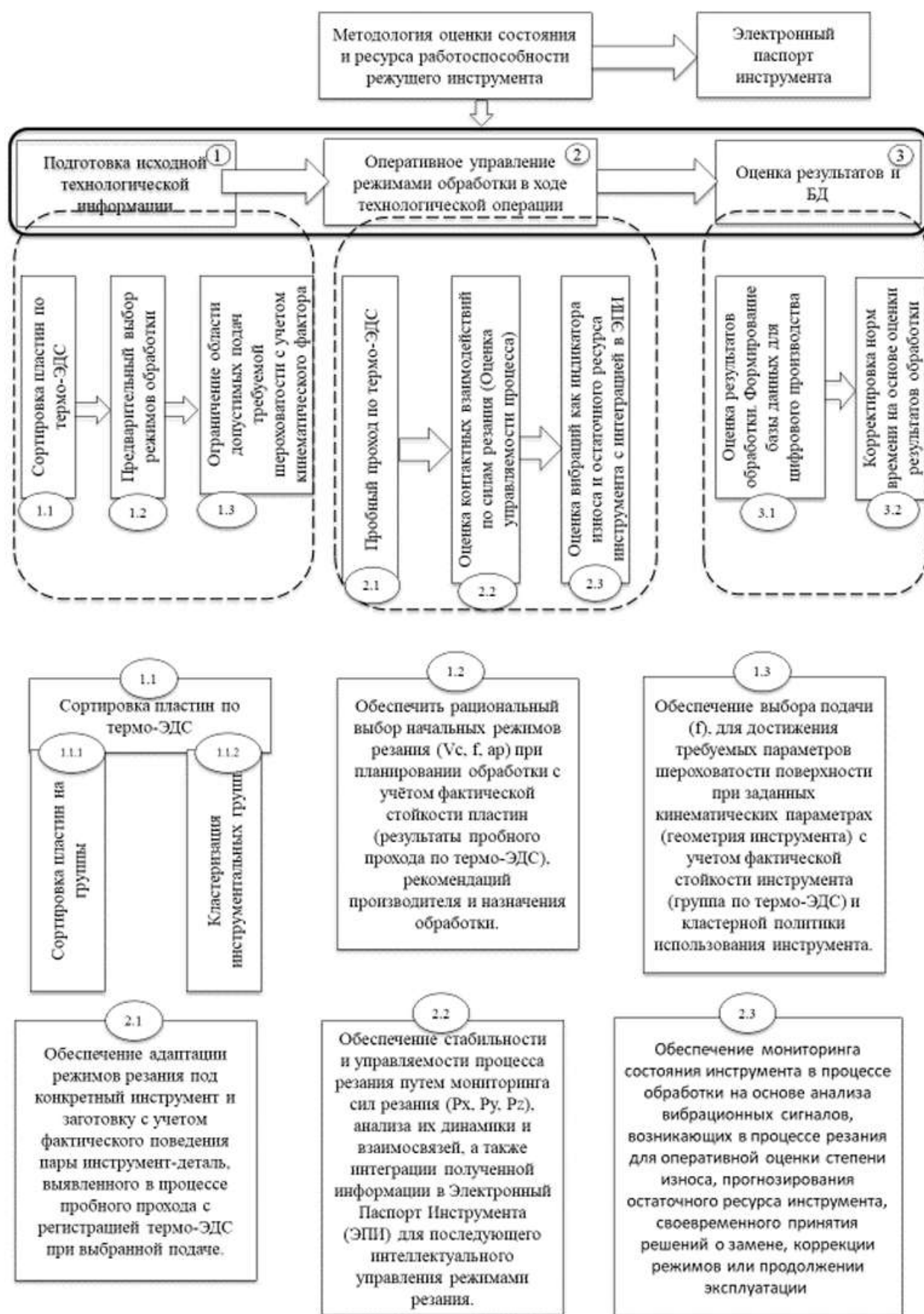


Рис. 15 – Методология оценки работоспособности и ресурса режущего инструмента. Формирование электронного паспорта инструмента (ЭПИ)

На этапе 2.2 осуществляется оценка контактных взаимодействий по силам резания и управляемости процессом резания с интеграцией в ЭПИ, стабилизация процесса резания за счет мониторинга контактных взаимодействий, предотвращение аварийных ситуаций (рост неустойчивости, появление нароста), поддержка интеллектуального управления режимами резания, постоянное обогащение ЭПИ информацией о фактическом поведении инструмента.

На этапе 2.3 осуществляется вибрационная диагностика для оценки состояния и остаточного ресурса режущего инструмента и управляемости процесса резания; принимаются решения о коррекции режимов или замене инструмента; расширяется цифровой профиль инструмента в структуре ЭПИ.

На третьем этапе осуществляется оценка результатов обработки и формирование базы для цифрового производства с интеграцией в ЭПИ, а также корректировка норм времени на основе оценки результатов обработки и базы данных ЭПИ с целью повышения эффективности производственного планирования.

На этапе 3.1 реализуется системная оценка результатов обработки с последующей фиксацией данных в ЭПИ для адаптации режимов резания под конкретные производственные условия, повышения стабильности и качества обработки, накопления достоверной статистики стойкости и режимов, формирования базы данных для цифрового и интеллектуального производства.

Для этого регистрируются результаты обработки по основным оценочным показателям таким, как геометрическая точность (отклонения от номинала по размерам и форме), параметры шероховатости (R_a , R_z и др.), реальный износ инструмента (фаска износа по задней грани, выкрашивания и прочие дефекты), фактическая стойкость режущего инструмента (количество обработанных деталей), время цикла и стабильность процесса.

Интеграция с ЭПИ реализуется посредством фиксирования результатов оценки в следующих полях блока ЭПИ: уникальный ID инструмента и заготовки; установленные режимы резания (V_c , f_n , a_p); фактический ресурс (шт. до износа $h > 0,3$ мм); результаты обработки (R_a , точность, износ); заключение: стабильно / нестабильно / критично; рекомендации: продолжить / заменить / скорректировать; метка: включить в обучающую выборку для цифрового моделирования.

На этапе 3.2 выполняется корректировка норм времени на основе оценки результатов обработки и базы данных ЭПИ, для чего по исходным паспортным данным (в том числе данным производителя инструмента), исходя из стандартных условий рассчитывается нормативное время обработки t_n и с учетом фактического времени обработки t_f определяется корректирующий коэффициент: $K_{\text{врем}} = t_f / t_n$.

Если $K_{\text{врем}} < 0,95$, возможно снижение нормы времени (ускорение процесса без потери качества). Если $K_{\text{врем}} > 1,05$, требуется повышение нормы времени или корректировка режимов/инструмента.

По результатам из n успешных операций/обработок формируется выборка по текущему техпроцессу, из которой рассчитывается средневзвешенный коэффициент $K_{\text{врем}}$ и уточнённая норма $t_{\text{кор}}$: $t_{\text{кор}} = t_n \times K_{\text{врем.средн}}$.

Алгоритм практической реализации этапа сводится к следующей последовательности действий:

1. После завершения обработки партии заполняется ЭПИ с фактическими параметрами.
2. Система автоматически рассчитывает отклонение t_f от t_n .
3. При накоплении данных по более чем 10 операциям формируется статистика.
4. Средние значения $K_{\text{врем}}$ записываются в базу норм времени.
5. САМ или ERP система обновляет расчёты производственных заданий.

Применение предлагаемых разработок позволяет: повысить качество и стабильность результатов механической обработки; сократить затраты на инструментальное обеспечение за счёт персонализированного выбора режимов и предотвращения преждевременной замены инструмента; повысить точность планирования загрузки оборудования и сократить время наладки благодаря цифровой интеграции ЭПИ; реализовать переход к динамическому нормированию и замкнутому контуру обратной связи между производством и ТПП; создать базу данных для обучения моделей прогнозирования ресурса и оптимизации режимов.

В пятой главе подробно изложены методы математического моделирования, алгоритмы статистической обработки экспериментальных данных и построение регрессионных моделей, предназначенных для описания закономерностей процесса резания и для обеспечения интеллектуальной технологической системы инструментами прогнозирования и адаптивного управления.

Для количественной оценки и математического обоснования системы взаимосвязей между технологическими условиями обработки, мгновенным (фактическим) состоянием режущего инструмента и параметрами качества обработанной поверхностей, с учетом вариативности свойств материалов контактной пары «инструмент–заготовка», а также оценки ресурса режущего инструмента был проведен регрессионный анализ.

В качестве управляемых технологических факторов, принятых к рассмотрению в рамках настоящего исследования, были выбраны:

– сигнал термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС) естественной термопары, возникающий в зоне контакта инструмент–заготовка, E (мВ);

– скорость продольной подачи режущего инструмента S (мм/об), непосредственно влияющей на кинематические характеристики процесса резания и параметры формируемой поверхности;

– скорость резания V (м/мин), определяющая тепловую и механическую нагрузку на режущий инструмент и заготовку.

В качестве анализируемых функций отклика в настоящем исследовании были принят период стойкости (T , мин), характеризующий долговечность режущего инструмента до достижения предельно допустимого уровня износа по задней поверхности.

Анализ охватывает следующие экспериментальные условия:

– обработка конструкционной стали 40Х инструментом WNMG 08 04 08-PM 4225 без модификации поверхностного слоя рабочей части; функция отклика – долговечность инструмента (период стойкости);

– обработка конструкционной стали 40Х инструментом WNMG 08 04 08-PM 4225 с наноструктурированным поверхностным слоем; функция отклика – долговечность инструмента (период стойкости);

– обработка коррозионнотойкой стали 12Х13 инструментом WNMG 08 04 08-MM 2220 без модификации рабочей поверхности; функция отклика – долговечность (период стойкости);

– обработка стали 12Х13 инструментом WNMG 08 04 08-MM 2220 с наномодифицированным поверхностным слоем рабочей части; функция отклика – долговечность (период стойкости).

Рассчитанные значения коэффициентов регрессии и оценка значимости построенных моделей стойкости приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет коэффициентов регрессии и проверка значимости

Вид модели	Коэффициенты регрессии без проверки значимости				Критерий Стьюдента вероятности 99,1 %
	a_0 (A_0)	a_1 (A_1), E	a_2 (A_2), S	a_3 (A_3), V	
сталь 40Х – СМНП WNMG 08 04 08-PM 4225 без модификации	0,0046	-0,11	-0,14	-0,60	0,11
сталь 40Х – СМНП WNMG 08 04 08-PM 4225 с наноструктурированным поверхностным слоем	0,13	-0,22	-0,15	-0,57	0,14
сталь 12Х13 – СМНП WNMG 08 04 08-MM 2220 без модификации	0,1	-0,62	-0,23	-0,54	0,004
сталь 12Х13 – СМНП WNMG 08 04 08-MM 2220 с наноструктурированным поверхностным слоем	0,05	-0,47	-0,22	-0,53	0,003

Так, нормированная модель стойкости СМНП WNMG 08 04 08-PM 4225 без

модификации при обработке стали 40X (для интервалов варьирования факторов: термо-ЭДС $E = 4,9 \dots 5,6$ мВ; $S = 0,1 \dots 0,3$ мм/об; $V = 120 \dots 280$ м/мин) имеет вид:

$$y = -0,11x_1 - 0,14x_2 - 0,6x_3. \quad (1)$$

Нормированная модель стойкости СМНП WNMG 08 04 08-PM 4225 с наноструктурированным поверхностным слоем при обработке стали 40X (для интервалов варьирования факторов: термо-ЭДС $E = 4,9 \dots 5,6$ мВ; $S = 0,1 \dots 0,3$ мм/об; $V = 120 \dots 280$ м/мин) имеет вид:

$$y = 0,13 - 0,22x_1 - 0,15x_2 - 0,57x_3. \quad (2)$$

Нормированная модель стойкости СМНП WNMG 08 04 08-ММ 2220 без модификации при обработке стали 12X13 (для интервалов варьирования факторов: термо-ЭДС $E = 4,9 \dots 5,6$ мВ; $S = 0,1 \dots 0,3$ мм/об; $V = 120 \dots 280$ м/мин) имеет вид:

$$y = 0,1 - 0,62x_1 - 0,23x_2 - 0,54x_3. \quad (3)$$

Нормированная модель стойкости СМНП WNMG 08 04 08-ММ 2220 с наноструктурированным поверхностным слоем при обработке стали 12X13 (для интервалов варьирования факторов: термо-ЭДС $E = 4,9 \dots 5,6$ мВ; $S = 0,1 \dots 0,3$ мм/об; $V = 120 \dots 280$ м/мин) имеет вид:

$$y = 0,05 - 0,47x_1 - 0,22x_2 - 0,53x_3. \quad (4)$$

Оценка относительной погрешности, стандартной ошибки и достоверности модели – в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры регрессионной модели

Область применения модели	Относительная погрешность модели, %			Стандартная ошибка модели	Критерий Фишера	Оценка достоверности / стабильности
	средняя	наибольшая	наименьшая			
сталь 40X – СМНП WNMG 08 04 08-PM 4225 без модификации	2,6	15	0,2	11,01	2,635	99,1
сталь 40X – СМНП WNMG 08 04 08-PM 4225 с наноструктурированием	6,0	24,1	0,34	12,22	2,516	98,9
сталь 12X13 – СМНП WNMG 08 04 08-ММ 2220 без модификации	5,95	19,3	0,4	11,41	3,169	99,7
сталь 12X13 – СМНП WNMG 08 04 08-ММ 2220 с наноструктурированием	5,56	17,9	0,19	10,9	3,487	99,8

Аналогично приведенной выше методике была получена модель прогнозирования величины среднего арифметического отклонения профиля обработанной поверхности R_a . Оценка достоверности, адекватности и относительной погрешности полученной регрессионной модели процесса лезвийной обработки представлена в таблице 3. Оценка значимости определяющих факторов приведена в таблице 4.

Таблица 3 – Параметры регрессионной модели

Вид модели	Достоверность, %	Относительная погрешность, %	Адекватность
Линейная, все факторы	99,90	209,27	адекватна
Линейная, значимые факторы		209,27	адекватна
Степенная, все факторы	94,00	52,44	адекватна
Степенная, значимые факторы		52,44	адекватна
Показательная, все факторы	99,90	260,27	адекватна
Показательная, значимые факторы		260,27	адекватна

Таблица 4 – Оценка значимости факторов

Вид модели	Значимость факторов						
	A0	A1 (P_z, H)	A2 (P_x, H)	A3 (P_y, H)	A4 (σ_{Pz}, H)	A5 (σ_{Px}, H)	A6 (σ_{Py}, H)
Линейная, все факторы	-0,284	0,685	0,444	0,142	0,427	0,424	0,284
Линейная, значимые факторы	-0,284	0,685	0,444	0,142	0,427	0,424	0,284
Степенная, все факторы	0,233	0,648	0,255	-0,115	0,510	0,341	0,532
Степенная, значимые факторы	0,233	0,648	0,255	-0,115	0,510	0,341	0,532
Показательная, все факторы	0,233	0,065	-0,293	-0,272	-0,215	-0,241	-0,264
Показательная, значимые факторы	0,233	0,065	-0,293	-0,272	-0,215	-0,241	-0,264

Уровень доверительной вероятности линейной и показательной модели по результатам анализа составил 99,9 %, однако в обоих случаях относительная погрешность превысила 200 %, что исключает их прикладного применения. Погрешность степенной модели составила 52,4 % при доверительной вероятности 94 %. Уровень значимости фактора риска ($A_0 = 0,233$) свидетельствует о наличии существенного влияния неучтенных факторов, что согласуется с теоретической моделью формирования микропрофиля обработанной поверхности. Однако значимость оцениваемых факторов подтверждает существенное влияние силовой нагруженности процесса резания на параметры шероховатости обработанной поверхности (таблица 4). При этом показательно, что согласно результатам регрессионного анализа на величину функции отклика значительное влияние оказывают не только величина, но и колебания составляющих силы резания. Наименьший уровень значимости из всех перечисленных факторов имеет в данном случае величина радиальной составляющей силы резания (P_y), что объясняется геометрией режущего инструмента, ориентированного на

чистовую обработку, а также принятыми мерами, нацеленными на исключение влияния жесткости технологической системы на результаты эксперимента.

Результаты регрессионного анализа подтверждают наличие существенной взаимосвязи силовой нагруженности процесса резания и параметров качества обработанной поверхности. Количественная оценка значимости факторов моделей подтверждают необходимость учета не только величины составляющих силы резания, но и их колебаний при мониторинге процесса резания с целью повышения надежности прогнозирования результатов обработки.

Наибольшее значение относительной погрешности моделей наблюдается в условиях дестабилизации процесса резания при наростообразовании или циклическом стружкообразовании, вероятность проявления которых повышается в граничных областях (соответственно нижней и верхней) рекомендованного диапазона скоростей резания.

При построении регрессионных моделей на основе диагностических сигналов вибрации в качестве функции отклика была принята величина фаски износа по задней грани, как показатель состояния СМНП. В качестве определяющего фактора была принята площадь под спектром вибраций как численная оценка интегральной виброэнергии.

Результаты регрессионного анализа для стали 40Х (группа обрабатываемости Р) представлены в таблице 5 и на рисунке 16.

Таблица 5 – Результаты регрессионного анализа для стали 40Х (группа обрабатываемости Р)

Параметр	Первый пар-р	Второй пар-р	Относительная погрешность, %			Стандартная ошибка	f рас.	Вывод
			Мин.	Сред.	Макс.			
Линейная модель	15,433	-2015,675	1,27	5,58	13,28	207,223	5,932	отличие неслучайное
Степенная модель	0,0000	11,777	0,94	7,43	19,25	17,717	23,06	отличие неслучайное
Показательная модель	0,002	1,085	0,25	7,90	20,15	19,250	19,54	отличие неслучайное

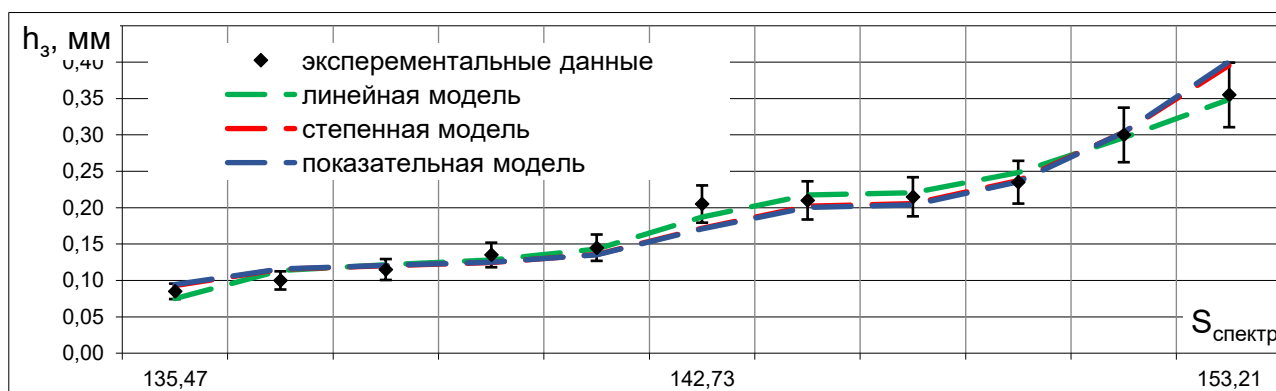


Рис. 16 – Регрессионные модели взаимосвязи фаски износа по задней грани СМНП (h_3) от площади спектрограммы вибрационного сигнала ($S_{\text{спектр}}$) (40Х, СМНП Sandvik WNMG 08 04 08-PM 4225, $t = 0,5$ мм, $V = 120$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об)

Достоверность всех приведенных моделей (рисунок 16) соответствует доверительной вероятности 99 %. Проверка по критерию Фишера подтвердила наличие установленной закономерности. Относительные погрешности регрессионных моделей не превысили 21 %. При этом в данном случае наименьшую величину погрешности имеет линейная модель.

Результаты регрессионного анализа для стали 40X13 (группа обрабатываемости М) представлены в таблице 6 и на рисунке 17.

Для стали 40X13 (группа обрабатываемости М) проверка по критерию Фишера подтвердила наличие установленной закономерности только для степенной модели. Достоверность модели (рис. 17) соответствует доверительной вероятности 99 %, средняя относительная погрешность составила 10,2 %, при максимальной величине погрешности 21,49 %.

Таблица 6 – Результаты регрессионного анализа для стали 40X13 (группа обрабатываемости М)

Параметр	Первый пар-р	Второй пар-р	Относительная погрешность, %			Стандартная ошибка	f рас.	Вывод
			Мин.	Сред.	Макс.			
Линейная модель	1,1077	-207,636	3,45	6,49	13,16	182,225	4,48	отличие случайное
Степенная модель	0,0001	2,544	1,81	10,20	21,49	28,930	8,85	отличие неслучайное
Показательная модель	12,8831	1,007	4,39	15,14	27,91	41,405	4,32	отличие случайное

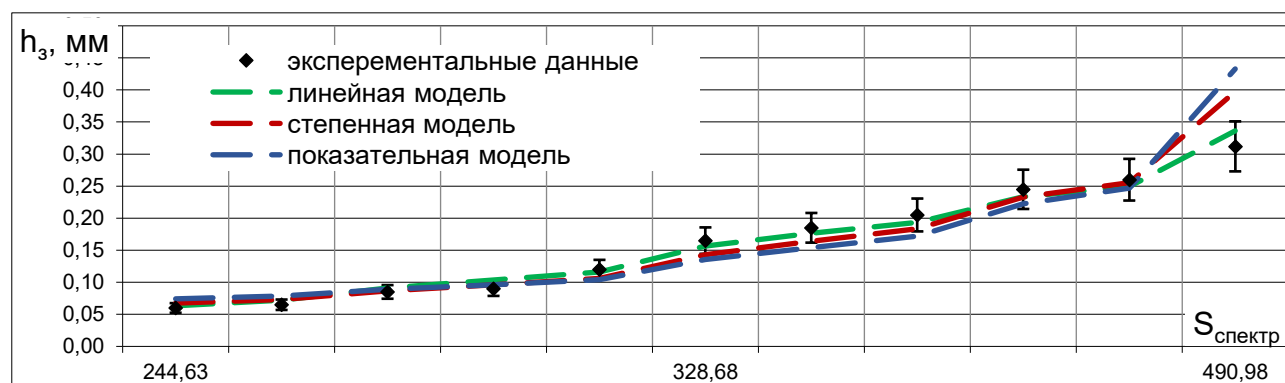


Рис. 17 – Регрессионные модели взаимосвязи фаски износа по задней грани СМНП (h_3) от площади спектрограммы вибрационного сигнала ($S_{\text{спектр}}$) (40X13, СМНП Sandvik WNMG 08 04 08-ММ 2220, $t = 0,5$ мм, $V = 155$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об)

Результаты регрессионного анализа для жаропрочной стали 08X21Н6М2Т представлены в таблице 7 и на рисунке 18. Достоверность всех приведенных моделей (рис. 18) соответствует доверительной вероятности 99 %. Проверка по критерию Фишера подтвердила наличие установленной закономерности. Относительные погрешности регрессионных моделей не превысили 18 % при средней величине не более 12%. При этом в данном случае наименьшую величину погрешности (0,9 – 8 %) имеет степенная модель.

Проведенный статистический анализ подтвердил наличие тесной взаимосвязи интегральной оценки виброэнергии с перманентным состоянием режущего инструмента. Полученные математические модели позволяют с установленным уровнем достоверности и требуемой точностью оценивать величину фаски износа СМНП, а также стабильность процесса резания.

Таблица 7 – Результаты регрессионного анализа для жаропрочной стали 08X21H6M2T

Параметр	Первый пар-р	Второй пар-р	Относительная погрешность, %			Стандартная ошибка	f рас.	Вывод
			Мин.	Сред	Макс.			
Линейная модель	0,1381	35,465	1,48	6,08	10,55	222,69	7,1	отличие неслучайное
Степенная модель	0,4584	0,860	0,90	4,36	8,06	12,65	43,7	отличие неслучайное
Показательная модель	78,0675	1,001	3,45	11,73	16,73	29,01	8,3	отличие неслучайное

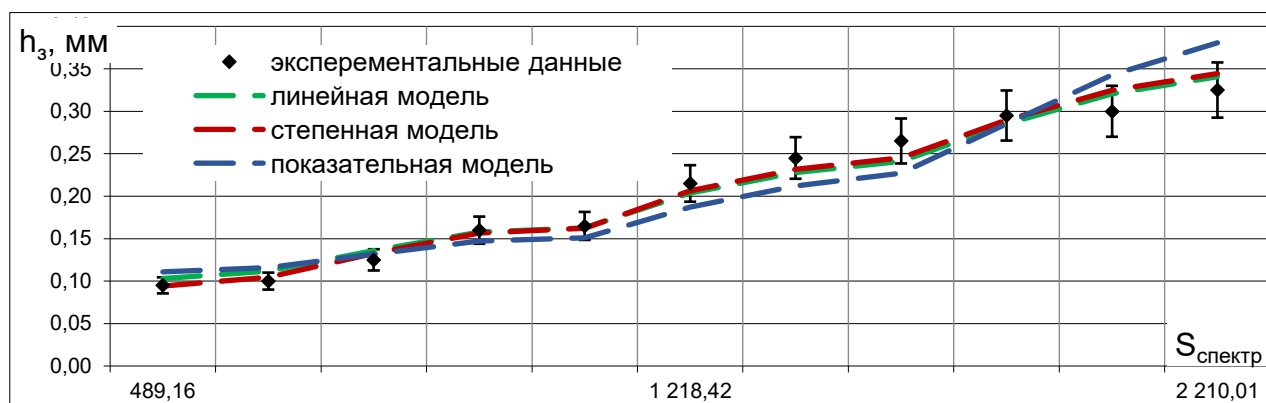


Рис. 18 – Регрессионные модели взаимосвязи фаски износа по задней грани СМНП (h_z) от площади спектрограммы вибрационного сигнала ($S_{\text{спектр}}$) (08X21H6M2T, СМНП Korloy WNMG080408-VP2 UNC805, $t = 0,5$ мм, $V = 80$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об)

Разработанная теоретическая концепция интеллектуальной технологической системы адаптивного управления формированием комплекса эксплуатационных свойств изделия, методология оценки работоспособности и ресурса режущего инструмента и создания математических моделей позволяют сформировать функциональную схему алгоритма работы интеллектуальной системы, интегрированной в цифровую среду технологической подготовки производства (рис. 19).

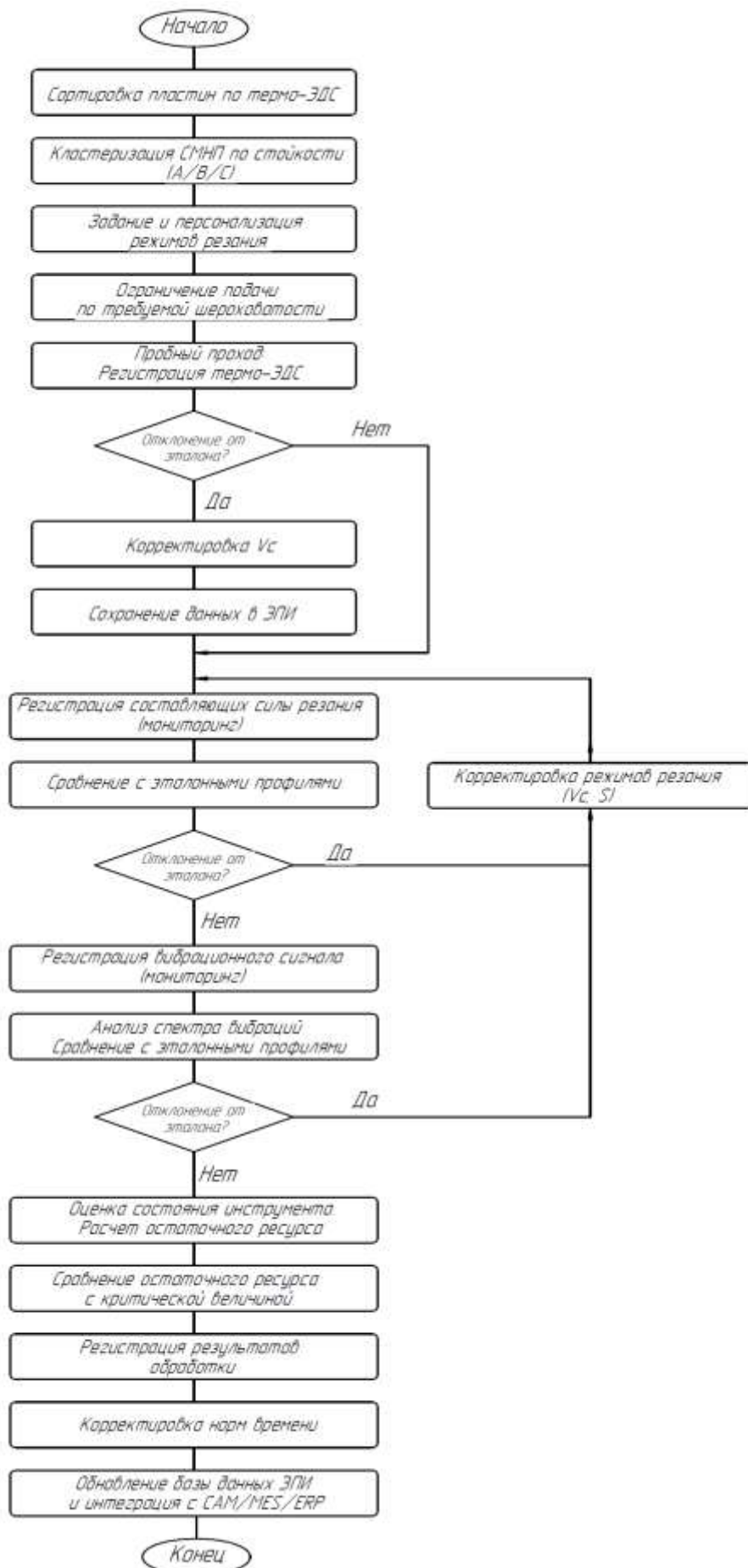


Рис. 19 – Функциональная схема алгоритма работы интеллектуальной системы

Заключение и выводы по работе

1. Выявлена актуальная научно-производственная проблема обеспечения надежности и стабильности результатов механообрабатывающего производства в условиях неопределенности исходной технологической информации и технической ограниченности применяемого оборудования и механизмов.

2. На основе систематизации и анализа результатов исследований закономерностей формирования качества обработанной поверхности и изнашивания режущего инструмента сформулированы концепция интеллектуального мониторинга процесса обработки, технические принципы и критерии диагностики:

–эффективное управление процессами механической обработки и построение функционально-ориентированных технологических систем, интегрированных в единую информационную среду предприятия, возможно только на основе понимания физических принципов контактного взаимодействия инструмента с заготовкой, механизмов изнашивания режущего клина и системы взаимосвязей условий обработки с параметрами микропрофиля обработанной поверхности;

–для повышения эффективности управления технологическими операциями необходимо применение предварительной диагностики элементов технологических систем как средства снижения технологической неопределенности и оперативного мониторинга как средства повышения стабильности и управляемости процесса обработки;

–повышение точности и достоверности прогнозных моделей требует аккумуляции актуальной технологической информации на основе информационных каналов обратной связи применительно к конкретным производственным условиям.

3. Выявлена и количественно описана система взаимосвязей между технологическими условиями обработки, мгновенным (фактическим) состоянием режущего инструмента и параметрами качества обработанной поверхности, с учетом вариативности свойств материалов контактной пары «инструмент–заготовка».

–Оценка функциональных свойств и прогноз стойкости режущего инструмента требует учета комплекса физико-механических характеристик, имеющих существенную вариативность, определяемую технологией производства режущего инструмента. Установлено и экспериментально доказано, что в производственных условиях более высокую достоверность результатов обеспечивает комплексная интегральная оценка свойств материалов контактной пары «инструмент-заготовка», получаемая измерением термо-ЭДС при пробном проходе на фиксированных режимах резания.

–Оценка температурно-силовой напряженности и стабильности процесса, необходимость сопоставления текущей ситуации с теоретическими физическими моделями

непосредственно в процессе обработки требует мониторинга составляющих силы резания. Данный информационный канал является необходимой и неотъемлемой составляющей интеллектуальной технологической систем механической обработки.

–Мониторинг процесса резания посредством оценки уровня вибраций позволяет оценить стабильность обработки, текущее состояние и ресурс работоспособности режущего инструмента. Измерение величины интегральной виброэнергии позволяет объективно оценивать текущее состояние и прогнозировать остаточный ресурс режущего инструмента. Использование площади под спектром вибраций как базового диагностического признака обеспечивает устойчивость оценки, снижает влияние шумов и погрешностей, а также делает возможной реализацию трендового анализа на протяжении жизненного цикла инструмента.

–Многоэтапный мониторинг на основе многоканальной диагностики процесса резания позволяет уточнить область допустимых режимов применительно к состоянию элементов технологической системе и выполнить параметрическую оптимизацию с целью гарантированного обеспечения установленных требований к результату механической обработки.

4. Разработана методика перманентного мониторинга состояния элементов технологической системы как основы для построения адаптивных алгоритмов управления технологической операцией на оборудовании с ЧПУ. Предложена концепция адаптивной корректировки режимов резания, интеграции «Электронного паспорта инструмента» (ЭПИ) с CAM/MES/ERP в целях повышения эффективности технологической подготовки и управления производственным процессом.

–Разработан прототип информационной структуры ЭПИ как сквозного цифрового объекта, включающая идентификаторы, группу стойкости, рекомендованные и уточнённые режимы, историю использования, результаты диагностики и прогноз остаточного ресурса.

–Оценка результатов обработки, зафиксированных в ЭПИ, позволяет перейти от статичных нормативов к гибкой адаптивной системе нормирования, что особенно важно в условиях вариативного и высокоточного машиностроения. Это обеспечивает переход к управлению производительностью обработки на основе реальных цифровых следов эксплуатации инструмента.

–Разработаны методические рекомендации по ограничению области допустимых подач для обеспечения требуемой шероховатости с учётом кинематических факторов и стабильности процесса, а также регламенты интеграции ЭПИ и диагностических данных с CAM/MES/ERP (автоматическое извлечение режимов при генерации УП, контроль соответствия в MES, рекомендации оператору).

5. Произведена количественная оценка информативности диагностических каналов с точки зрения их применимости для оперативного контроля состояния технологической системы и управления процессом обработки. Результаты получены при чистовом точении материалов групп обрабатываемости М, Р, S.

–Подтверждена функциональность и эффективность оценки ресурса работоспособности режущего инструмента на основе измерения сигнала термо-ЭДС пробного прохода. Величина средней относительной погрешности прогнозирования не превышает 6 % при доверительной вероятности 99 %.

–Выявлена существенная корреляционная зависимость между микрогеометрическими параметрами качества обработанной поверхности и силовой нагруженностью процесса резания, что подтверждает необходимость комплексного мониторинга не только абсолютных значений составляющих силы резания, но и колебаний силового фона обработки.

–Подтверждена функциональность и эффективность вибрационного мониторинга текущего состояния и ресурса работоспособности режущего инструмента в процессе обработки. Средняя относительная погрешность математических моделей не превышает 12 % при доверительной вероятности 99 %.

6. Разработаны функциональная архитектура и алгоритм функционирования интеллектуальной системы адаптивного управления формированием комплекса эксплуатационных свойств изделия, интегрированной в цифровую среду технологической подготовки производства.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований

Развитие систем ЧПУ за счёт включения аппаратных, программных и лингвистических средств, обеспечивающих непрерывный мониторинг и анализ состояния элементов технологической системы, что позволит средствами штатного оборудования осуществлять адаптивное управление процессом обработки и создаст основу построения интеллектуальной технологической системы.

Требуется совершенствование тензометрического оборудования станков с ЧПУ, в частности расширение его функциональных возможностей и диапазона рабочих частот, что обеспечит более высокую информативность и достоверность диагностики процессов резания.

Необходимым направлением повышения универсальности и воспроизводимости разрабатываемых методик является формирование и постоянное пополнение информационной базы для построения математических моделей управления условиями обработки, что требует дополнительных экспериментальных исследований на широком спектре конструкционных и инструментальных материалов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

в журналах из перечня ВАК при Минобрнауки РФ (всего 47)

1. Трансформация информационной структуры как инструмент повышения эффективности многономенклатурного производства / Ю. Л. Чигиринский, Д. В. Крайнев, Ж. С. Тихонова // Научные технологии в машиностроении. – 2024. – № 4(154). – С. 29–40. – DOI 10.30987/2223-4608-2024-4-29-40.
2. Трансформация взглядов на теорию резания при переходе к «цифре» / Ю. Л. Чигиринский, Д. В. Крайнев, Е. М. Фролов // Научные технологии в машиностроении. – 2024. – № 6(156). – С. 3–12. – DOI 10.30987/2223-4608-2024-6-3-12.
3. Возможность оценки режущих свойств твердосплавного инструмента с покрытием по теплофизическим свойствам / Д. В. Крайнев, Ж. С. Тихонова, А. В. Рогачев и др. // Современные научные технологии. – 2024. – № 5-1. – С. 64–70. – DOI 10.17513/snt.40006.
4. Возможность оценки режущих свойств твердосплавного инструмента с покрытием по электрофизическим свойствам / Д. В. Крайнев, Ж. С. Тихонова, А. В. Рогачев и др. // Современные научные технологии. – 2024. – № 6. – С. 30–36. – DOI 10.17513/snt.40060.
5. Оценка влияния нестабильности процесса резания на параметры шероховатости и обработанной поверхности / Д. В. Крайнев, Ж. С. Тихонова, А. М. Исламов, А. А. Бондарев // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2023. – № 8(279). – С. 21–24. – DOI 10.35211/1990-5297-2023-8-279-21-24.
6. Перспективы модернизации технологического станочного оборудования в формате концепции индустрия 4.0 / Ю. Л. Чигиринский, Д. В. Крайнев, Ж. С. Тихонова, Е. М. Фролов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2023. – № 4(68). – С. 136–148. – DOI 10.21685/2072-3059-2023-4-13.
7. Как научить систему ЧПУ решать технологическую задачу по выбору надежных значений параметров процесса металлообработки / А. Л. Плотников, Ю. Л. Чигиринский, Ж. С. Тихонова [и др.] // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 3(129). – С. 32–39. – DOI 10.30987/2223-4608-2022-3-32-39.
8. Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание / Ю. Л. Чигиринский, Д. В. Крайнев, Е. М. Фролов // Научные технологии в машиностроении. – 2022. – № 8(134). – С. 39–48. – DOI 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48.
9. Система адаптивного управления процессом механической обработки / Ж. С. Тихонова, П. А. Чегогонов, Е. М. Фролов, Д. В. Крайнев // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2021. – № 1(248). – С. 31–34. – DOI 10.35211/1990-5297-2021-1-248-31-34.
10. Вариант решения задачи интеграции элементов киберфизических систем в серийное металлорежущее оборудование / Е. М. Фролов, В. Г. Гусев, Д. В. Крайнев // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2019. – № 8(231). – С. 50–52.
11. Оперативная диагностика как средство повышения надежности функционирования систем ЧПУ / Д. В. Крайнев, Ж. С. Тихонова, А. А. Кожевникова, Д. С. Дубовова // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – № 12(207). – С. 18–20.
12. Снижение температурно-силовой напряженности процесса резания при использовании опережающего пластического деформирования / А. А. Бондарев, Я. Н. Отений, Ю. Н. Полянчиков, Д. В. Крайнев // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 3(57). – С. 40–44.

Статьи, индексируемые в реферативных базах Scopus и Web of Science (всего 14)

13. The Influence of Low-Temperature Plasma Modification on Contact Interactions of Cutting Tools / Н.С. Азиков, Б.М. Бржозовский, Д.В. Крайнев, Ж.С. Тихонова, Ю.Л.

Чигиринский // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2023. - Vol. 52, issue 4 (August). – P. 307-312. – DOI: <https://doi.org/10.3103/S1052618823040040>.

14. Method for assessing the thermophysical properties of the contact pair 'tool – steel workpiece' / Ю.Л. Чигиринский, Ж.С. Тихонова, Д.В. Крайнев // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2131 : Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021) (Divnomorskoe, Russia, 31 May – 6 June 2021) / Don State Technical University [et al.]. – IOP Publishing, 2021. – 5 p. – DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052012.

15. Thermo-EMF as Method for Testing Properties of Replaceable Contact Pairs / Ж.С. Тихонова, Д.В. Крайнев, Е.М. Фролов // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) (Sochi, Russian Federation, March 25-29, 2019). Vol. II, part 2 / ed. by A. A. Radionov [et al.] ; South Ural State University (National Research University), Moscow Polytechnic University, Platov South-Russian State Polytechnic University, Volgograd State Technical University. – Cham (Switzerland) : Springer Nature Switzerland AG, [2020]. – P. 1097-1105.

16. Experimental research method when developing a mathematical model for calculating cutting speed in the course of turning steels with a coated tool / Ж.С. Тихонова, Е.М. Фролов, Д.В. Крайнев, А.Л. Плотников // MATEC Web of Conferences. Vol. 298 : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment: Mechanical Engineering and Materials Science (ICMTMTE 2019) (Sevastopol, Russia, September 9-13, 2019) / ed. by S. Bratan ; Sevastopol State University, National University of Science and Technology «MISiS», Polzunov Altai State Technical University, Inlink Ltd., International Union of Machine Builders. – [Publisher : EDP Sciences], 2019. – 8 p.

17. Structuring Control of Facial Layer during Edge Cutting Machining / Д.В. Крайнев, А.С. Сергеев, Ж.С. Тихонова // Materials Science Forum. - 2019. - Vol. 973 : IX Int. Sci. and Techn. Conf. on Engineering – Innovation Technol. in Eng.: From Design to Production of Competitive Products (Volgograd, Sept. 2017) : Proc. / eds. A. Suslov, V. Lysak, Ju. Chigirinskiy [et al.] ; Volgograd St. Techn. Univ. - C. P. 51-55.

18. Cyber-Physical Machining Systems Based on Commercial CNC Equipment [Электронный ресурс] / Е.М. Фролов, Д.В. Крайнев, Ж.С. Тихонова // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon) (Sochi, Russia, 9-16 September, 2018) / Institute of Electrical and Electronics Engineers, South Ural State University (national research university), IEEE Russia Siberia Section, IEEE Russia Section, South Ural IEEE Chapter. – [Publisher: IEEE Xplore], 2018. – 4 p. – DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501684.

19. On-line Monitoring and Parameter Control of a Surface Microprofile [Электронный ресурс] / Д.В. Крайнев, А.А. Бондарев, Ю.Л. Чигиринский // Procedia Engineering. Vol. 206 : International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2017) (Saint-Petersburg, Russian Federation, May 16-19, 2017) / ed by A.A. Radionov ; Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, South Ural State University (national research university), Platov South-Russian State Polytechnic University and Far Eastern Federal University. – [Published by Elsevier Ltd.], 2017. – P. 1285–1291

20. The reliability improvement of CNC machining centers due to on-line diagnostics of the cutting process [Электронный ресурс] / Д.В. Крайнев, А.С. Сергеев, Ж.С. Тихонова, Куанг Чонг Нго // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM) (St. Petersburg, Russia, 24-26 May 2017) : Conference Proceeding / ed. by S. Shaposhnikov. – [Publisher: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE)], 2017. – P. 627-629. – DOI: 10.1109/SCM.2017.7970670.

21. Operational diagnostics as a mean of increase process efficiency of mechanical processing of machine parts [Электронный ресурс] / Д.В. Крайнев, А.А. Бондарев, И.Н. Козачухненко // 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) (Tomsk, Russia, 1-4 Dec. 2015) / Tomsk Polytechnic University. – P. 1-4. – DOI: 10.1109/MEACS.2015.7414962.

22. Automated Thrust Force Calculation of Machine Tool Actuators in Fastening and Turning Steels [Электронный ресурс] / А.С. Сергеев, Ж.С. Тихонова, Д.В. Крайнев // Procedia Engineering. Vol. 206 : International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2017) (Saint-Petersburg, Russian Federation, May 16-19, 2017) / ed by A.A. Radionov ; Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, South Ural State University (national research university), Platov South-Russian State Polytechnic University and Far Eastern Federal University. – [Published by Elsevier Ltd.], 2017. – P. 1148–1154.

Охранные документы (всего 18)

23. П. м. 227755 Российская Федерация, МПК В23В 25/06 Отрезной резец / Д.С. Субботин, В.С. Субботин, Е.М. Фролов, Д.В. Крайнев, О.А. Макарова, К.Р. Федорова, И.В. Литвинов; ФГБОУ ВО ВолГТУ. - 2024.

24. П. м. 229483 Российская Федерация, МПК В23В 25/06 Проходной резец / Д.С. Субботин, В.С. Субботин, Е.М. Фролов, Д.В. Крайнев, О.А. Макарова, К.Р. Федорова, А.Д. Панферов; ФГБОУ ВО ВолГТУ. - 2024.

25. П. м. 229484 Российская Федерация, МПК В23В 25/06 Расточной резец / Д.С. Субботин, В.С. Субботин, Е.М. Фролов, Д.В. Крайнев, О.А. Макарова, К.Р. Федорова, И.К. Демченко; ФГБОУ ВО ВолГТУ. - 2024.

26. П. м. 217049 Российская Федерация, МПК В23В 29/04, В23Q 17/09 Динамометрическая оправка / Ж.С. Тихонова, Д.В. Крайнев, Е.М. Фролов, Д.С. Субботин, Р.А. Рахматулин, И.В. Литвинов; ФГБОУ ВО ВолГТУ. - 2023.

27. Пат. 2399460 РФ, МПК В 23 В 1/00. Способ обработки деталей резанием с опережающим пластическим деформированием / Ю.Н. Полянчиков, П.А. Норченко, Д.В. Крайнев, А.Р. Ингеманссон, Л.А. Качалова, Л.С. Ангеловская; ГОУ ВПО ВолГТУ. - 2010.

28. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016610064 от 11 янв. 2016 г. РФ Прогнозирование результатов токарной обработки с опережающим пластическим деформированием для различных групп конструкционных материалов / А.А. Бондарев, Я.Н. Отений, Ю.Л. Чигиринский, Д.В. Крайнев; ВолГТУ. - 2016.

29. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016610745 от 19 янв. 2016 г. РФ Прогнозирование стойкости лезвий режущего инструмента при традиционной токарной обработке и обработке с опережающим пластическим деформированием / А.А. Бондарев, Я.Н. Отений, Ю.Н. Полянчиков, Д.В. Крайнев; ВолГТУ. - 2016.

30. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012611474 от 8 февраля 2012 г. РФ Расчёт величины среднего арифметического отклонения профиля обработанной поверхности при точении с опережающим пластическим деформированием и традиционным точении / Ю.Н. Полянчиков, Ю.Л. Чигиринский, Д.В. Крайнев, А.Р. Ингеманссон, Н.Г. Зайцева, А.В. Раздвогин; ВолГТУ. - 2012.

Подписано в печать 2025 г. Заказ № . Тираж экз.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура Times. Печать офсетная.

Усл. печ. л..

Отпечатано в типографии

Издательства ВолГТУ

400005, Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корпус 7