

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Волгоградский государственный технический университет

На правах рукописи



Крайнев Дмитрий Вадимович

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

Специальность 2.5.6 Технология машиностроения

2.5.5 Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
Доктор технических наук, профессор
Чигиринский Юлий Львович

Волгоград 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. Анализ состояния вопроса.....	10
1.1 Общее состояние вопросов технологической подготовки многономенклатурного производства.....	10
1.2 Методология и методы управления динамическими техническими системами.....	55
1.3 Цифровые средства повышения эффективности функционирования многономенклатурного производства.....	61
1.4 Общая характеристика работы.....	73
Глава 2. Методика проведения экспериментальных исследований.....	79
2.1 Технические характеристики и функциональные возможности металлорежущего оборудования, применённого в экспериментальных исследованиях.....	79
2.2 Выбор обрабатываемых и инструментальных материалов.....	81
2.3 Вспомогательное оборудование, использованное в экспериментальных исследованиях.....	83
2.4 Применение методов математической статистики для обработки и интерпретации результатов экспериментальных исследований.....	97
Глава 3. Закономерности процесса резания и информационные каналы мониторинга.....	118
3.1 Взаимосвязь характера контактного взаимодействия и интенсивности износа режущего инструмента с физико-механическими характеристиками контактной пары.....	118
3.2 Вопросы оперативной диагностики характеристик режущего инструмента в производственных условиях.....	135
3.3 Информативность диагностических каналов мониторинга процесса механической обработки.....	162
3.4 Выводы.....	189

Глава 4. Интеграция интеллектуальной технологической системы в процессы технологической подготовки в цифровом производстве (теоретическая концепция).....	191
4.1 Формализация, оптимизация и цифровизация процессов технологической подготовки производства в условиях Индустрии 4.0.....	192
4.2 Методология оценки работоспособности и ресурса режущего инструмента. Создание ЭПИ.....	196
4.3 Выводы.....	223
Глава 5. Математическое и информационное обеспечение интеллектуальной технологической системы.....	225
5.1 Информативность теплофизического канала диагностики процесса резания.....	225
5.2 Информативность силового канала мониторинга.....	247
5.3 Информативность вибрационного канала мониторинга.....	252
5.4 Алгоритм методики оценки работоспособности и ресурса режущего инструмента с формированием электронного паспорта инструмента (ЭПИ).....	256
5.5 Выводы.....	259
Заключение и выводы по работе.....	261
Список использованных источников.....	265

Введение

Современные мировые реалии, включая быстроменяющийся рынок, усложняющиеся требования к продукции и условия импортозамещения, ставят отечественные промышленные отрасли перед рядом вызовов, вынуждая проводить фундаментальные изменения нацеленные на повышение конкурентоспособности эффективности производства. Это требует модернизации производства, пересмотра структуры управления, повышения уровня автоматизации и роботизации, а также цифровизации и внедрения технологий Индустрии 4.0. Поскольку данные изменения затрагивают не только локальные, но и международные рынки, а также неотъемлемо связаны с вопросами экономической безопасности, они вынуждают правительства ведущих стран инициировать программы стратегического развития на государственном и международном уровне. Среди таких подобных инициатив можно отметить: Программа «Цифровая Европа» (DIGITAL) [224], Региональная программа Digital CASA («Цифровая Центральная Азия — Южная Азия») [223], Стратегия США по международному киберпространству и цифровой политике [174].

Не является исключением и Россия. Так Распоряжением Правительства РФ [1] была утверждена государственная программа цифровизации производства целью, которой является обеспечение технологического суверенитета, интенсификация развития и повышение конкурентоспособности российских компаний.

Основополагающей отраслью любой экономики является машиностроение, поскольку она обеспечивает создание необходимых технологий и оборудования. Но именно здесь особенно остро проявляются сложности внедрения цифровых технологий, поскольку это требует не только разработки необходимого программного обеспечения и модернизации оборудования, но и интеграции уровня физического и цифрового. Повышение автономности производственного оборудования и его эволюция до уровня интеллектуальных технологических систем в условиях невозможности исключения неопределенности технологической

информации требует развития адаптивности, а значит средств мониторинга, анализа и разработки оптимальных управляющих воздействия с целью нивелирования отклонений. Принимая во внимание сложность производственной системы, взаимосвязанность отдельных бизнес-процессов и многомерность задачи это означает необходимость комплексных решений, затрагивающих не только информационное, но и организационно-техническое обеспечение производства.

Современные цифровые 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.

В условиях цифровизации технологической подготовки производства и перехода к интеллектуальному производству возникает необходимость формирования адаптивных технологических решений, основанных на физических закономерностях лезвийной обработки, включая процессы формирования свойств поверхностного слоя и изнашивания инструмента.

Таким образом, **актуальность исследования** определяется несоответствием между потребностями производства и функционально-техническими возможностями выпускаемого в настоящее время оборудования для обеспечения производственного процесса.

Объектом исследования является автоматизированное механообрабатывающее производство, функционирующее на основе интеграции современных машиностроительных технологий с средствами информационно-цифровой инженерии.

Предмет исследования - организационные, физические, временные и информационные взаимодействия между элементами системы управления

стабильностью процесса и результатами механической обработки при использовании интеллектуальных технологических систем.

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

Полученные в ходе исследования результаты, разработанные теоретические положения и методология подготовки механообрабатывающего производства вносят существенный научный вклад технологическую науку. В частности:

– 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

Результаты исследования обладают высокой практической значимостью для задач повышения эффективности и надёжности технологических процессов механической обработки.

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.

Исследования выполнены в рамках выполнения НИР:

- «Научное обоснование и реализация цифровых технологий низкотемпературного плазменного формирования композитных структур на поверхностях прецизионных геометрически сложных металлических изделий», НИР № 19-19-00101. Российский научный фонд. 2020-2021, № 22-19-35026. Российский научный фонд. 2022.

- «Определение рациональных условий эксплуатации твердосплавного инструмента с наноструктурированным поверхностным слоем рабочей части по критерию повышения долговечности при точении конструкционных материалов различных групп», НИР № 101-01/2021 (26/365-21). Волгоградский государственный технический университет, 2021.

- «Изучение свойств наноструктурированного режущего инструмента и его контактных взаимодействий с обрабатываемым материалом», НИР № 101П-01/2022 (26/448-22). Волгоградский государственный технический университет, 2022; № 26/537-23. Волгоградский государственный технический университет, 2023.

Глава 1. Анализ состояния вопроса

1.1 Общее состояние вопросов технологической подготовки многономенклатурного производства

В современных условиях российская экономика сталкивается с огромным количеством вызовов, что определяет необходимость комплексного развития отраслей производственной сферы. Ограничения внешней торговли и уход иностранных компаний оказали существенное влияние на развитие обрабатывающей промышленности. Несмотря на то, что обрабатывающие отрасли в период 2021 – 2023 гг. имели один из наилучших показателей роста, их динамика была достаточно нестабильной. Здесь можно отметить рост сферы ОПК за счет гособоронзаказа и спад в сфере автомобилестроения [179]. Существенное неблагоприятное воздействие на производственную деятельность оказали санкционные ограничения в отношении поставок оборудования, технологий, а также рост стоимости материалов и комплектующих [95]. Текущая ситуация подчеркивает уязвимость традиционного отношения к экономической безопасности и самостоятельности государства. Тем не менее, рядом экспертов отмечается значимый потенциал восстановительного подъема отечественной промышленности и необходимость работы в данном направлении. Любые кризисные времена помимо вызовов предоставляют и большие перспективы для развития.

Вместе с тем в мировой экономике наблюдаются процессы структурной трансформации, основанные на принципах четвертой промышленной революции и цифровизации технологического базиса. Создаются новые рынки и отраслевые секторы. Происходит перераспределение капиталов и рабочей силы. Перестраиваются промышленные производства и модернизируются технологии. Возникают новые центры экономического влияния и перераспределяются роли регионов и стран. Как результат обостряется конкурентная борьба на государственном уровне, в том числе в научно-технологической сфере.

Стимулирование технологических инноваций в погоне за лидерством в конкурентной борьбе и статусом сверхдержавы будущего за счет научно-технологической сферы стало трендом экономической политики как развитых, так и развивающихся стран. Примером может служить принятый в апреле 2021 г. в США закон [270], в котором определен список национальных ключевых технологий, для развития которых Национальному фонду науки выделяется сумма в 127 млрд долларов на пять лет.

Россия обладает значительным научно-техническим заделом и потенциалом, но в то же время имеет существенное количество нерешенных проблем. Долгосрочное устойчивое развитие страны предполагает необходимость индустриализации в отдельных отраслях промышленности, непосредственно связанных с производством средств производства – станкостроении, инструментальной промышленности, транспортном машиностроении и др. Новый технологический базис, основанный на широкомасштабном использовании ключевых технологий четвертой промышленной революции, во всем мире рассматривается как ключевой драйвер глобального роста [98, 99].

Не стоит забывать, что основой экономики, без которой ее стабильное развитие практически не реализуемо, является промышленное производство и, прежде всего, обрабатывающая промышленность с высокой долей наукоемкой продукции [109]. Мировой опыт лишь подтверждает данный тезис. Так, в 2021 году валовой внутренний продукт (ВВП) США составил 22,9 трлн долл., при этом на долю промышленности пришлось 30%. Лидер по доле промышленности в ВВП: Китай – 32,6% (при ВВП 16,9 трлн долл. в 2021 году), Япония – 18% (при ВВП 5,1 трлн долл. в 2021 году), Великобритания – 18,6% (при ВВП 3,1 трлн долл. в 2021 году). Для России характерна более высокая доля промышленности – 31,3% (при ВВП 1,6 трлн долл. в 2021 году), а обрабатывающие производства дали 16,1% от валовой добавленной стоимости (ВДС) в 2021 году [202].

Однако при соизмеримой доле промышленности в ВВП Россия существенно отстает от наиболее развитых стран по уровню производительности труда, который во многом определяет конкурентоспособность экономики. Более чем в 2 раза

сохраняется отставание от Австрии, Бельгии, Дании, Нидерландов, Франции, Швеции, Норвегии, США, Швейцарии; от 1,5 до 2,0 раз – от Германии, Великобритании, Финляндия, Австралии, Турции, Японии, Канады, Ю. Кореи и др. Кроме того, по данному показателю отставание России составляет: Польше – в 1,32 раза, Венгрии – 1,24, Румынии – 1,16 раз. Помимо того, что низкий уровень производительности труда имеет ряд негативных последствий, в глобальном масштабе это ставит под угрозу экономическую независимость страны [36].

По мнению авторов [36, 202] причины отмеченного выше отставания кроются в череде кризисов: 1996, 2009, 2014 и 2020 годов, затронувших обрабатывающий сектор, необходимости адаптации к резкому изменению условий и рыночным отношениям, когда первоочередным являлось не развитие предприятий, а вопросы его выживания. В результате чего не решенными оказались такие фундаментальные проблемы как: высокий износ и устаревшее оборудование, низкий уровень автоматизации производства, а также недостаток квалифицированных кадров.

В то же время наблюдается тенденция роста доли наукоемкой продукции. Конструкции машин и аппаратов постоянно усложняются, объяснимым становится и необходимость обеспечения постоянно растущих функциональных требований к отдельным деталям и их поверхностям в соответствии с современным уровнем развития науки и техники. Кроме того, все большую роль играет кастомизация продукции без потерь надежности, долговечности и ремонтпригодности.

По данным Института статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ наблюдается рост вовлеченности малых производственных предприятий в выпуск инновационной продукции, что можно связать с уходом с рынка зарубежных конкурентов и комплексом мер поддержки со стороны государства. В 2023 г. фактический объем новых и усовершенствованных товаров и услуг, произведенных МПП, составил 185,6 млрд руб., что на 26,2% превысило уровень 2021 г [74].

Несмотря на то, что удельный вес малых предприятий отстает от показателей лидеров, таких как США и Европейский союз [13], статистика свидетельствует о

растущей роли именно малых предприятий в производстве инновационной продукции на прорывных направлениях. Так по данным работы [180] порядка 80% товаров (работ, услуг) малых предприятий связано с реальным обновлением производства, на одного сотрудника приходится в 2,5 раза больше инноваций, внедрение которых происходит на 1 год быстрее и при затратах на 75% меньше, чем крупными предприятиями. При этом малые предприятия имеют дело с выпуском продукции невысокой серийности с большим количеством одновременно находящихся в работе заказов и высокой динамичностью производства. В итоге можно констатировать, что в настоящее время доля единичного и мелкосерийного типов машиностроительных производств (многономенклатурного машиностроительного производства) составляет до 25-30 % в общем объеме продукции машиностроения [49]. Фактически, это означает снижение серийности производства и рост удельного веса предприятий с многономенклатурным типом производства в общей структуре машиностроения [168].

Функционирование многономенклатурного производства сопряжено с такими факторами, как динамично изменяющийся спрос на продукцию и высокая динамика производства; сочетание различных типов производства; короткий жизненный цикл изделий; нехватка оборотных средств; рост производственных затрат; широкий диапазон изменения длительности производственного цикла изделий; большая доля унифицированных, нормализованных и стандартизованных деталей; наличие дискретных и непрерывных процессов; тесная связь оперативного управления производством с другими функциональными подсистемами управления предприятием. Все вышеперечисленное диктует свои требования к процессам управления и подготовки производства с ориентацией на обеспечение эффективной загрузки технологического оборудования, планирования работы производственных участков при сохранении высокой гибкости [43].

Эффективность работы и конкурентоспособность машиностроительного предприятия определяется не только уровнем технологического оборудования и

квалификацией рабочих, но и правильной организацией управления производственными процессами. Особенности организации устанавливает серийность производства. Каждый тип производства обуславливает построение ресурсных потоков, применяемых станков, транспортную систему и многое другое. Специфические особенности многономенклатурного производства вызывают многофакторные проблемы управления при решении задач планирования, организации и регулирования производства с оперативным реагированием и высокими требованиями к достоверности получаемых результатов (рисунок 1.1) [199].



Рисунок 1.1 – Проблемы технологической подготовки многономенклатурного производства

Возможности предприятия по изготовлению продукции определяются наличием соответствующего технологического оборудования обеспечивающего выполнение тех или иных методов обработки и формообразования. Так, для организации процесса многономенклатурного машиностроительного производства преимущественно используются станки с числовым программным управлением (далее ЧПУ), которые позволяют существенно повысить эффективность производства [159].

Уровень производства металлообрабатывающего оборудования является одним из ключевых показателей развития экономики страны [120]. Оперативные данные Росстата [187] отражают положительную динамику производства не только металлорежущих станков (в 2023 г. произведено 9269 единиц, что на 14 % больше чем в 2022 г.), но и доли станков с ЧПУ (435 единиц в 2022 г. и 879 единиц в 2023 г., прирост составляет более 45 %). Здесь отдельно следует отметить рост доли производств станков с ЧПУ в общем объеме производства.

Многооперационные станки с ЧПУ являются предпочтительной альтернативой широкому станочному парку, обеспечивают высокую гибкость производства, имеют широкие возможности по геометрии изготавливаемых деталей, высокие точностные показатели и повторяемость. Такие станки экономят производственные площади, имеют высокий коэффициент загрузки, могут быть достаточно легко интегрированы в единую информационную сеть предприятия, что также создает дополнительные преимущества. Оборудование с ЧПУ позволяет существенно повысить производительность обработки. Вместе с тем растет стоимость приобретения и монтажа, а также обслуживания, эксплуатации, квалификации персонала, средств программирования и моделирования.

Конкурентоспособность производства определяется не только парком оборудования и его технологическими возможностями, но и оперативностью реализации всех этапов технологической подготовки без потерь надежности производственного процесса и обеспечения требуемого качества изделий. А особенности организации производства, напрямую влияют на методологию технологической подготовки производства.

Основной задачей технологической подготовки производства с точки зрения машиностроительного предприятия является обеспечение требуемых параметров качества выпускаемых деталей с высокой надежностью и производительностью, при соблюдении принципов ресурсосбережения и экономичности, в том числе и за счет загрузки технологического оборудования. Решение данной задачи требует мероприятий на различных уровнях, включая организационное и методическое обеспечение [200].

Отправной точкой разработки технологического процесса изготовления изделия безусловно является конструкторская документация, которая содержит весь перечень требований, предъявляемых к объекту производства и его отдельным элементам. Поскольку в конечном итоге все сводится к технологии изготовления элементарных составляющих, а именно деталей, входящих в конструкцию изделия, то речь идет о геометрической форме, точности отдельных размеров, требованиях по точности формы и расположения поверхностей, параметрах качества поверхностей и т. д.

Однако, помимо перечисленного существенное влияние на особенности построения технологического процесса оказывают условия производства и задачи проектирования.

Исходными данными для проектирования технологического процесса являются: комплект конструкторской документации; годовая программа выпуска и общий план производства; сроки технологической подготовки производства; условия производства, включая кооперацию с производственными партнерами, технологическое и кадровое обеспечение, производственные площадки.

Помимо того, при проектировании учитываются требования нормативной документации (стандартов), документация на технологическое оборудование и оснастку, производственные инструкции и др.

В конечном итоге, технологический процесс призван обеспечить все параметры точности и качества деталей, а в итоге и всего изделия в целом, установленные конструкторской документацией и техническими условиями, при минимизации затрат ресурсов и себестоимости изготовления. В данном контексте, поскольку технологический процесс разрабатывается не с целью производства единичного экземпляра, а серийного выпуска, немаловажным является обеспечение стабильности осуществления как всего производственного цикла, так и отдельных операций, а также надежности обеспечения заданных требований.

Поскольку технологический процесс — это достаточно сложная система, включающая такие отдельные элементы как операции, операторов технологического оборудования, заготовки, оборудование, технологическая

оснастка, информация, энергия, вспомогательные материалы и др. Каждый из этих элементов оказывает влияние на надежность и результат обработки. Поэтому вариативность перечисленных элементов напрямую определяет стохастический характер производства.

Этап технологического проектирования как раз и призван нивелировать неблагоприятные воздействия данных факторов для чего могут применяться такие средства как интеграция обработки, резервирование в технологическом процессе, использование параллельных связей элементов, повышение надежности отдельных технологических элементов, а также обеспечение требуемых показателей на финишных операциях технологического процесса и обкатка запускаемого технологического процесса [108].

Согласно ГОСТ Р 113.00.04-2020 [2] технологический процесс может быть представлен соответствующей схемой, отображающей взаимосвязь между стадиями (рисунок 1.2). Схема позволяет проиллюстрировать не только последовательность технологических операций, но и вариативность технологического процесса. То есть, отдельные операции технологического процесса образуют как последовательную, так и параллельные структуры, что также облегчает анализ надежности технологического процесса.

Согласно теории надежности технических систем вероятность безотказной работы может быть рассчитана по теореме умножения вероятностей. Так вероятность безотказной работы системы, состоящей из последовательно соединенных элементов, определяется как:

$$P = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_i = \prod_{i=1}^n p_i, \quad (1.1)$$

где P - вероятность безотказной работы системы;

$p_1, p_2, \dots, p_i$ - вероятность безотказной работы элементов, входящих в систему;

n - количество элементов в системе.

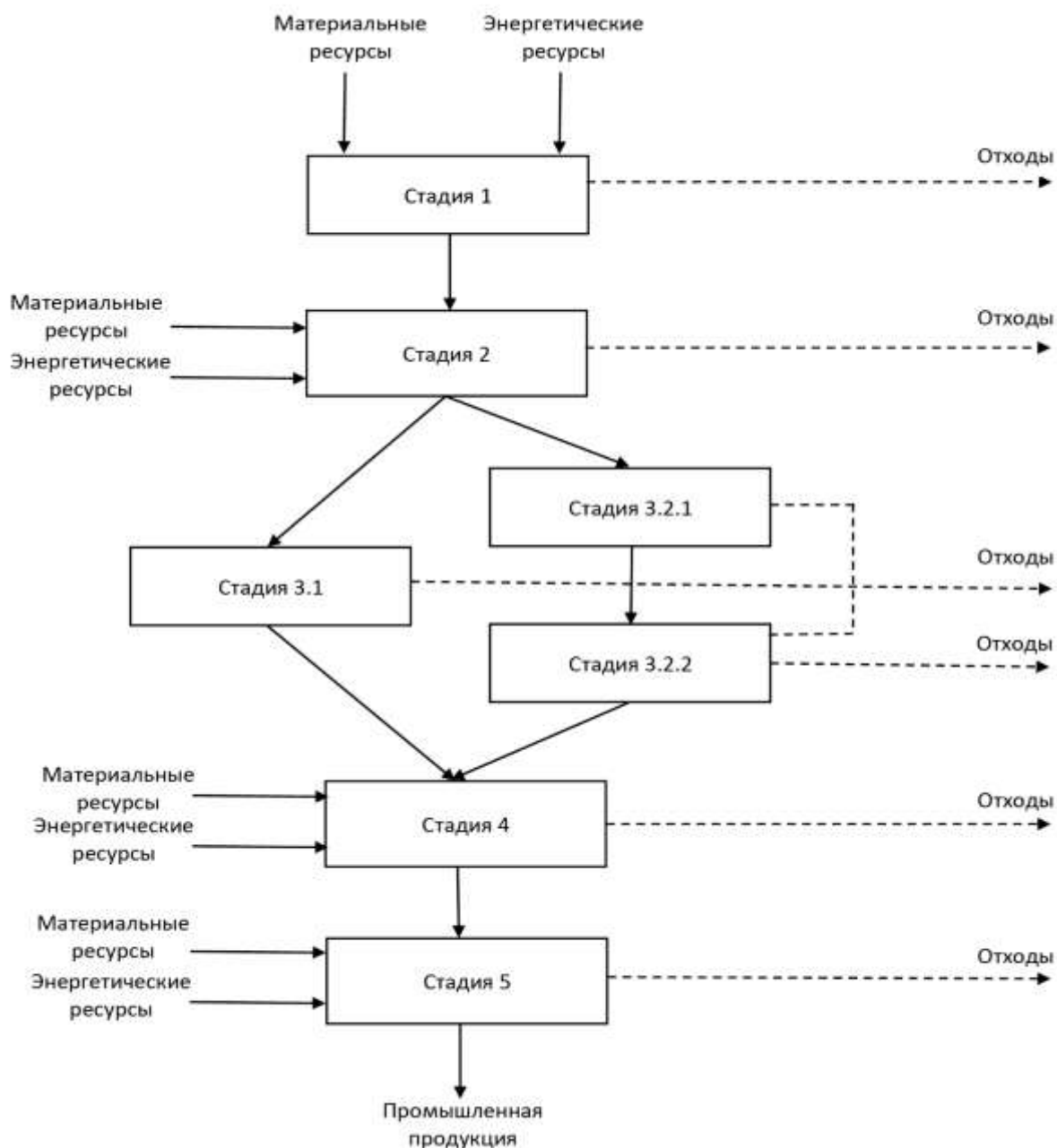


Рисунок 1.2 – Пример общей схемы описания технологического процесса

Вероятность безотказной работы системы, состоящей из параллельно соединенных элементов, определяется как:

$$P = 1 - q_1 \cdot q_2 \cdot \dots \cdot q_i = 1 - \prod_{i=1}^n q_i, \quad (1.2)$$

где P - вероятность безотказной работы системы;

$q_1, q_2 \dots q_i$ - вероятность отказов элементов, входящих в систему;

n - количество элементов в системе.

Выражение 1.2 может быть представлено в следующем виде:

$$P = 1 - (1 - p_1) \cdot (1 - p_2) \cdot \dots \cdot (1 - p_i) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i), \quad (1.3)$$

где P - вероятность безотказной работы системы;

$p_1, p_2, \dots, p_i$ - вероятность безотказной работы элементов, входящих в систему;

n - количество элементов в системе.

Таким образом, последовательное соединение элементов снижает надёжность системы. Причем вероятность безотказной работы системы ниже, чем надёжность самого ненадежного элемента. При этом с увеличением количества параллельно соединенных элементов увеличивает общую надёжность [123, 153, 184].

С точки зрения обеспечения надёжности технологического процесса как сложной технической системы целесообразным является маршрут обработки с минимальным количеством последовательных связей и наличием альтернативных методов осуществления отдельных этапов (операций).

Сокращение количества операций осуществимо за счет применения многооперационных станков с ЧПУ, обеспечивающих максимальную концентрацию операций на одной позиции, что в том числе повышает коэффициент использования оборудования.

Наличие альтернатив реализации отдельных этапов технологического процесса также повышает надёжность производства при условии полноценной технологической подготовки и работоспособности оборудования, оснастки и инструмента.

Резервирование предусматривает возможность выполнения обработки на различных позициях, что наилучшим образом реализуется на станках с ЧПУ. В современных условиях данный подход воплощается в применении сборных и групповых переналаживаемых станочных приспособлений, что позволяет в кратчайшие сроки заменить вышедшие из строя узлы и детали.

Исключение из технологического процесса уникальных операций также позволяет устранить фактор риска, который может как привести к значительным потерям времени, так и сделать обеспечение требуемых показателей недостижимыми текущих условиях.

Отдельным моментом необходимо упомянуть прямую зависимость надежности производства от четко организованной и соблюдаемой производственной дисциплины. Так применительно к металлообрабатывающему оборудованию и оснастке это прежде всего ведение системы планово-предупредительного обслуживания и ремонта.

Немаловажно соблюдение производственной дисциплины персоналом, что обеспечивается знанием должностных инструкций, систематическое выполнение порядка подготовки и обслуживания рабочего места, соблюдением мер техники безопасности и прочее.

Традиционно надежность разработанного технологического процесса обеспечивается соблюдением принципов, заложенных теоретическими положениями технологии машиностроения, а именно: принципы выбора технологических баз, формирование технологических баз на первых операциях, принципа технологического наследования и тд.

Таким образом, в процессе технологической подготовки производства (ТПП) решаются технологические, экономические и организационные задачи, каждая из которых тесно взаимосвязана с другими. В первую очередь (рисунок 1.3) проводится анализ конструктивных особенностей детали (требуемая точность размеров, параметры качества поверхностей и физико-механические свойства материала детали) с целью определения технологических задач. В дальнейшем контур детали дифференцируется на модули поверхностей, для которых выбираются методы формообразования и параметры процесса обработки. В зависимости от типа и технических характеристик определяется перечень допустимых методов обработки каждой поверхности и применяемого технологического оборудования.

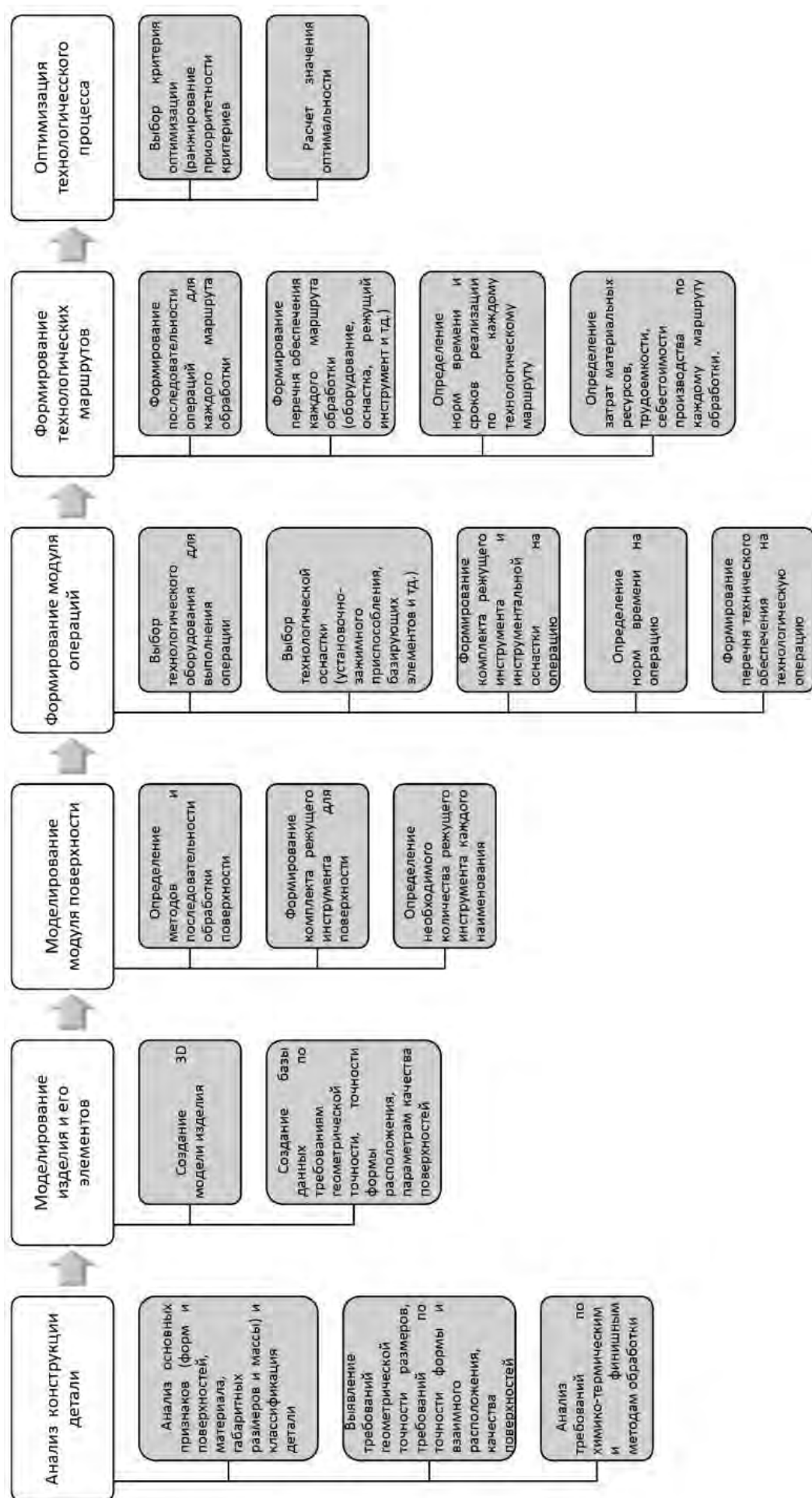


Рисунок. 1.3. – Декомпозиционная схема технологической подготовки производства

Для каждого маршрута обработки составляются комплекты режущего инструмента и технологической оснастки. Определяются режимы резания и нормы времени. Помимо того, выявляется трудоемкость операций и загрузка станков, определяется необходимое количество и разновидности оборудования, количество и квалификацию работников, устанавливаются нормы расхода материалов и многое другое [199].

Невысокая серийность выпуска продукции в условиях многономенклатурного производства сказывается на существенной доле затрат на технологическую подготовку, которые могут достигать до 25 % от себестоимости изготовления [9]. В общем объеме затрат на технологическую подготовку до 80 % составляют затраты связанные с проектированием и изготовлением специальной технологической оснастки (40 % - проектирование, 60 % - изготовление), 5 % составляют затраты, связанные с решением общих вопросов, 5 % составляют затраты на проектирование технологических процессов, 7 % - затраты на управление ТПП, 3 % - затраты на программирование и настройку программных средств [152].

Основными принципами характерными для технологических процессов являются:

- Этапность структуры технологического процесса, на которых обеспечивается выполнение определенных задач и требований;
- Последовательность технологических решений с четким разделением на задачи первичного и более низшего уровней;
- Широкое применение типовых технологических решений согласно сформированным теоретическим положениям и производственному опыту;
- Отслеживание производственного процесса с возможностью внесения корректировок и изменений на уровне технологической службы.

Повысить эффективность технологической подготовки производства и достичь максимальных экономических показателей предприятия возможно с помощью средств автоматизации и поддержки принятия решений. Как отмечают многие авторы успешность такой системы определяется рациональными, научно

обоснованными принципами системного подхода в технической подготовке и организации производства, применением прогрессивных технологических процессов. Без этого автоматизация управления не сможет обеспечить повышения производительности труда, окупаемость предприятия, а в некоторых случаях будет лишь препятствовать развитию. Кроме того, система должна учитывать существующую информационную инфраструктуру предприятия и иметь экономико-математическую модель комплексного управления технологическим процессом на предприятии.

Особую актуальность автоматизация процесса технологической подготовки в условиях многономенклатурного производства приобрела в связи с необходимостью обеспечения технологической независимости. В данном направлении стал активно развиваться сегмент малого бизнеса, силами которого реализуется существенный объем задач реинжиниринга.

Решение таких задач, кроме всего прочего, требует значительного объема проектных работ, а также развертывания производственных мощностей, освоение новых производств и практически непрерывного процесса технологической подготовки. Существенно увеличиваются простои оборудования необходимые для его настройки и переналадки. То есть для эффективного реинжиниринга требуется не только трансфер технологий и проектно-конструкторские работы, но и обязательная автоматизация проектных и производственных циклов, в том числе внедрение систем автоматизации технологического проектирования и подготовки производства. требуются надежные и корректные для применения системы автоматизации. Существующие системы автоматизации слабо адаптированы к условиям единичного и мелкосерийного производства, вследствие чего практически не применимы для субъектов малого или среднего предпринимательства [90]. Это обстоятельство обуславливает актуальность диссертационного исследования.

В связи с тем, что многономенклатурное производство не имело широкого распространения до недавнего времени, разработки автоматизированных систем проектирования и управления технологическими процессами недостаточно

приспособлены для указанных условий, ограничены по своим возможностям и как следствие имеют невысокую эффективность. В результате возникают проблемы как на этапе технологической подготовки производства, так и при управлении технологическими процессами, что в конечном итоге увеличивает циклы производства новой продукции. Решение видится в информационной интеграции систем автоматизации и управления [49].

На данный момент на рынке представлены ряд программных средств, которые в большинстве своем не обладают нужным конкретному предприятию инструментарием и не учитывают специфики его деятельности. Функциональность таких систем зачастую ограничена типовыми задачами и требует серьезной доработки, которая обычно затруднена в силу отсутствия качественной документации для встроенных в них инструментальных средств проектирования, а также отсутствием описаний, имеющих структуру данных. Даже любая незначительная доработка подобной системы требует обращения к производителю, огромных временных и финансовых затрат, а в случае, если разработчиком является зарубежная фирма, то эти затраты возрастают в десятки раз, что в конечном итоге растягивает процесс внедрения таких систем в практическую деятельность предприятия на несколько лет и значительно увеличивает затраты на их внедрение и эксплуатацию.

То есть на данном этапе существует значительное количество программных средств автоматизации проектных решений, однако их интеграция в единую универсальную систему затруднена по вышеуказанным причинам.

Следовательно, необходимо учитывать условия функционирования конкретных предприятий, а единый инструмент автоматизации процесса технологической подготовки целесообразно реализовывать на модульном принципе с возможностью адаптации к фактическому производству [7]. В частности, можно говорить о необходимости учитывать серийность производства и все сопутствующие ей особенности технологической организации.

Еще одним немаловажным фактором играющим существенную роль в процессе технологической подготовки является существенный вероятностный

характер, определяемый большим числом воздействующих и как правило противоречивых факторов, что существенно усложняет алгоритмизацию.

Поэтому немаловажным вопросом является организация эффективной системы оперативного управления в связи с необходимостью учета динамики спроса и динамики производства. Такая система должна обладать гибкостью к динамике номенклатуры и объемов выпуска; исключать укрупненные и условные планово-учетные единицы; обеспечивать высокую точность оперативных плановых заданий и согласованность целей и показателей на отдельных периодах для различных структурных подразделений; вести подетальный оперативно-производственный учет; осуществлять регулярный контроль, анализ и регулирование производства [89]. Более того, оперативная система управления для различных типов производства (единичного, мелко-, средне- и крупносерийного) должна строиться на единой методологической основе, с едиными алгоритмами и моделями.

Высокая загрузка персонала, оборудования, сложности синхронизации операций в рамках маршрута обработки, увеличение сроков выполнения задач на каждом этапе ведет к росту длительности изготовления изделий в условиях многономенклатурного производства. Кроме того, в процессе производства часто возникает необходимость корректировок, что еще больше усложняет технологическую подготовку производства.

Одной из ключевых проблем, снижающих эффективность производства, становятся непроизводственные потери, связанные с выполнением работы не предусмотренной производственным заданием, но вызванной производственной необходимостью.

В качестве главной причины непродуктивных потерь отмечается необходимость согласования требований технологического процесса и текущих производственных условий. Зачастую производственные подразделения применительно к текущей ситуации и на основе своей квалификации заменяют технологическое оборудование и оснастку, схему базирования, а также режущий инструмент и режимы обработки, что может вести к появлению брака [61].

Следует отметить, что к браку может вести не только недостаточная компетентность конструкторских, технологических и производственных подразделений, а также низкий уровень взаимодействия между ними. Кроме того, нарушается график выпуска продукции и затрудняется планирование, учет контроль, анализ и регулирование производства и в итоге сбалансированность целей и показателей результативности деятельности предприятия, оперативное управление производственными запасами и затратами. Важность вопросов оперативного управления, учета и управления незавершенного производства подтверждается и работами авторов [48].

Как правило, производство сложной наукоёмкой продукции подразумевает: большой объем конструктивных доработок; высокий уровень материалоемкости и энергоемкости; низкий уровень коэффициента использования материалов; высокую трудоемкость изготовления специальной оснастки; различный уровень возможностей автоматизации операций; большое число и разнообразие технологических и контрольных операций; высокие требования к квалификации основных производственных рабочих; - широкую номенклатура применяемого оборудования и оснастки и другое [93].

Производственные возможности крупных предприятий значительно превышают возможности небольших игроков на рынке инноваций, однако их инертность и профильная направленность деятельности позволяют малому бизнес находить свободные ниши деятельности. Именно использование станков с ЧПУ и цифровых средств автоматизации дают возможность производить продукцию на уровне крупных конкурентов.

Однако с ростом технологических возможностей при использовании станков с ЧПУ все еще остаются нерешенные проблемы связанные с их вынужденным простоем для операций отладки и переналадки, что ведет к сокращению времени эффективной работы до 25-40 % от действительного фонда времени. Продуктивное время работы станка является одним из ключевых показателей финансовой эффективности.

Суммарное время работы станков с ЧПУ при обработке сложных и высокоточных деталей с невысокой серийностью, что соответствует условиям многономенклатурного производства, сопоставимо со временем отладки управляющей программы [40]. Более того, по данным автора [39] по результатам оценки работы участка токарных станков с ЧПУ среднее количество пробных деталей превысило 3, а максимальное количество – 10, причиной чего являлся брак из-за несоответствия действительных значений параметров детали допустимым. И основным препятствием обеспечения надежности выпуска и сокращения сроков наладки приводится отсутствие достоверной методики прогнозирования параметров качества на этапе технологической подготовки производства.

Эффективность производства не ограничивается потерями и затратами на настройку станка и подбор режимов обработки. Доля оборудования в общей себестоимости изделий машиностроения составляет порядка 30%, в то время как доля режущего инструмента – 3,5% и редко выходит за пределы 1,5 – 10%. Но выход из строя инструмента вызывает дополнительные потери в виде повышенного процента брака, интенсификации износа оборудования, а также простоя оборудования на соответствующую подналадку [69].

Затраты времени на выявление и ликвидацию отказов режущего инструмента составляют в среднем 10% общего времени работы станочного оборудования. При этом в 47% случаев отказ или потеря работоспособности инструмента происходит из-за износа, 21% – из-за поломки, 22% –выкрашивание, 10% – скалывание [68]. Стойкость инструмента только в рамках одной партии может колебаться в пределах 15 – 35% (некоторые пластины вырабатывают свой ресурс лишь на 65%) [51].

Приведенные оценки во многом соотносятся со статистической оценкой результатов анализа операций механической обработки в автомобильной промышленности, включая производство штампов и пресс форм, приведенных в зарубежной литературе [14]: правильная геометрия выбирается только для менее 30% режущего инструмента; рациональный режим обработки используется только для 48% операций; только 57% инструментов используются до достижения суммарной расчетной стойкости; правильный инструментальный материал

выбирается только для менее 30% используемых инструментов; рациональные марки СОЖ и условия ее подвода в зону обработки применяются только для 42% операций.

Во многом стабильность технологической операции обеспечивается определенным комплексом свойств инструмента, которые определяются технологией изготовления. В зависимости от решаемых задач инструмент должен обладать высокой твердостью, сопротивлением истиранию, иметь высокую вязкость для работы в условиях ударных нагрузок и др.

Стабильный износ предоставляет ресурс времени работы инструмента до критической величины. Образование же сколов и выкрашивания режущей кромки имеет вероятностный характер, который проблематично спрогнозировать. Такой характер износа чаще всего свидетельствует о некорректном выборе характеристик или назначении режимов резания.

Состояние режущего инструмента в значительной степени определяет качество изготовления и его выход из строя может привести к серьезным проблемам [287]. Возможность оценки износа имеет решающее значение для обеспечения требуемой точности и качества поверхностного слоя обрабатываемого изделия во время механической обработки [255]. Своевременная замена режущего инструмента до катастрофического износа исключает появление брака и производственных потерь, повышает эффективность процесса [244].

Кроме того, оценка износа и прогнозирование срока службы инструмента необходима для достижения устойчивого производства, поскольку они обеспечивают научную основу для принятия важных решений, таких как планирование технического обслуживания и управление запасами [280].

В автоматизированном производстве на базе станков с ЧПУ вопросы прогнозирования периода стойкости и мониторинга состояния режущего инструмента стоят особо остро. Высокая производительность обработки в данных условиях обеспечивается за счет применения инструментов с многослойными износостойкими покрытиями. На срок службы инструмента могут оказывать влияние: геометрические параметры инструмента; режимы резания; СОТС;

состояние оборудования и вспомогательного инструмента; жёсткость системы СПИД (станок, приспособление, инструмент, деталь). Режущие свойства сменных пластин определяются не только геометрическими параметрами, но и характеристиками износостойких многослойных покрытий, твердосплавной матрицы и др. Количественная оценка данных параметров достаточно трудоемка и как правило требует разрушающих методов контроля.

Совершенствование технологического оборудования и режущего инструмента являются традиционными направлениями повышения эффективности технологических процессов.

Современные станки позволяют повысить производительность и точность обработки за счет: повышения уровня автоматизации; применения современных устройств ЧПУ; использования прогрессивных конструкций станочных узлов, механизмов и устройств; концентрация операций; сокращение вспомогательного времени; много инструментальная обработка и многое другое.

Основные направления совершенствования станков с ЧПУ направлены на обеспечение конкурентных преимуществ и повышение наиболее важных функциональных технических характеристик. Подобные модернизации направлены на: повышение жесткости конструкции станков и демпфирующих характеристик станин; повышение мощности шпинделей; совершенствование конструкций направляющих; совершенствование инструментальной оснастки, а также точности установки и повторяемости режущего инструмента [81].

Немаловажными являются вопросы оценки работоспособности оборудования, необходимости обслуживания и исключения внеплановых простоев из-за поломок, для чего станки с ЧПУ оборудуются системами мониторинга их состояния [164].

Так же, говоря о развитии современного технологического оборудования с ЧПУ, нельзя не отметить наличие целого ряда систем контроля и диагностики: системы мониторинга состояния оборудования и его элементов; системы контроля вибраций; системы компенсации тепловых деформаций (с внесением

соответствующих коррекций в траекторию инструмента и режимы работы при выполнении программе обработки детали).

Следует отметить, что вышеназванные системы используются для оценки работоспособности станка, в качестве индикаторов аварийных ситуаций и минимизации поломок и не реализуют полный потенциал своих возможностей.

Помимо оснащения станков измерительных датчиков линейных и угловых перемещений (энкодеров) фирм HEIDENHAIN, RENISHAW, MARPOSS, BALLUFF (точность измерений – до ± 1 мкм) [57] существенно повышают оперативность и точность настройки системы привязки инструмента вне станка или на станке с помощью измерительного шупа или оптического измерительного мостика [81].

Таким образом, совершенствование технологического оборудования с ЧПУ преимущественно направлено на повышение его технических характеристик, обеспечения сохранности основных узлов и элементов станка и не способно в полной мере нивелировать отклонение параметров процесса резания и результатов обработки за установленные пределы.

Производители режущего инструмента предлагают решения, ориентируясь на группы обрабатываемости сталей или же подгруппы (что уже предполагает некоторое варьирование свойств обрабатываемого материала без учета фактических отклонений химического состава, физико-механических свойств материала даже с учетом требований стандартов). Рекомендации относительно режимов резания сводятся к определенному диапазону варьирования глубины, подачи и скорости резания, то есть определяют области допустимых значений.

В условиях современного металлообрабатывающего производства, в особенности при применении станков с ЧПУ, широко используется сборный режущий инструмент, оснащенный сменными твердосплавными пластинами с многослойными износостойкими покрытиями. Исключение составляет только инструмент для обработки группы цветных металлов и сплавов. Износостойкие покрытия позволяют повысить срок службы инструмента, стойкость к нагрузкам в

2-6 раз, термостойкость и скорость обработки свыше 25%, а также снизить расход инструмента и СОЖ.

Повышение износостойкости инструмента обеспечивается за счет функциональности отдельных слоев покрытия, в частности: снижения интенсивности окислительных процессов; формирования термоизоляции; предотвращения адгезионных и диффузионных процессов и т. д. [198].

По данным исследовательской компании Global Market Insights [257] объем рынка режущего инструмента в 2021-2023 гг. вырос с 40,7 до 44,4 млрд. долларов США. При этом не менее 40 % этого рынка приходится именно на сборный режущий инструмент. А по данным компаний SANDVIK и WOLFSTAR [143] доля сменных твердосплавных пластин с износостойким покрытием в общем объеме составляет 80 – 90 %.

По ряду понятных причин доступ до полной информации о характеристиках сменных твердосплавных пластин и тем более технологии их производства каждого производителя ограничен. Это серьезно затрудняет получение аналитических зависимостей, которые могли бы выступить базой для эффективного управления процессом обработки и его оптимизации.

Следует понимать, что разделение обрабатываемых материалов по группам обрабатываемости в своей основе имеет не наличие тех или иных легирующих или модифицирующих добавок, а характер процесса контактного взаимодействия и стружкообразования при резании (рисунок 1.4). Так для обработки чугунов характерно хрупкое разрушение с образованием элементной стружки, для группы цветных металлов и сплавов – образование сливной стружки с отсутствием колебаний температурно-деформационной напряженности. Обработка же нержавеющей и жаропрочных сталей сопровождается высокой деформационно-температурной напряженностью со существенной неустойчивостью, характеризующейся колебанием сил и температур в зоне резания. В подобных условиях контактного взаимодействия интенсифицируются такие механизмы износа инструмента как адгезионный, диффузионный. Высокие температуры в зоне

резания оказывают влияние на деформацию режущего клина, оказывая дополнительное неблагоприятное воздействие на режущие свойства инструмента.

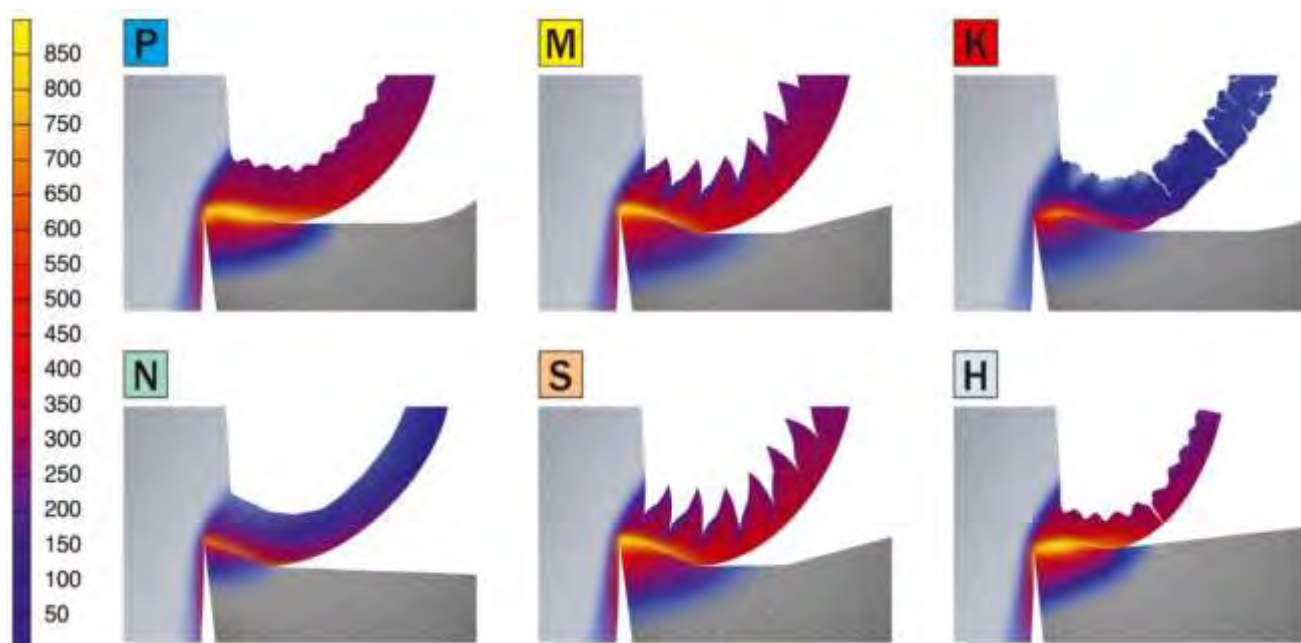


Рисунок 1.4 – Распределение температурных полей при контактном взаимодействии в процессе резания материалов соответствующих групп обрабатываемости [273]

Ведущие производители режущего инструмента в качестве факторов, оказывающих наибольшее влияние на обрабатываемость указывают (приведены по степени уменьшения доли влияния): вид обрабатываемого материала с точки зрения металлургии и механических свойств; микро- и макро-геометрия режущей кромки; материал режущего инструмента (марка сплава), покрытие и прочее. Интересно, что к второстепенным факторам относят: параметры резания, режущие усилия, термическая обработка материала, состояние поверхностного слоя, включения в материале, закрепление инструмента и условия обработки в целом [273].

Таким образом, группы обрабатываемости определяют характер стружкообразования, виды износа, сопровождающие процесс резания соответствующих материалов, исходя из чего подбирается микроструктура твердосплавной матрицы, количество, состав и характеристики износостойких покрытий. С учетом вида обработки определяется рекомендуемая геометрия режущей пластины и форма стружколома. Подобный подход позволяет повысить

эффективность подбора инструмента, однако создает технические барьеры для автоматизации и адаптивного управления процессом обработки.

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

Современные задачи повышения точности и надежности механической обработки, особенно в условиях высоких требований к качеству изделий и усложняющихся форм, требуют разработки моделей, способных адекватно отражать реальные процессы в зоне резания. При этом следует понимать, что процесс механической обработки – это синергичная совокупность множества элементарных физических и химических явлений: деформационных, термических, диффузионных и тд. Стохастический характер этой сложной системы определяется существенной неоднозначностью химического состава, теплофизических и механических свойств материалов инструмента и обрабатываемой заготовки [133, 200]. Соответственно вариативность этих характеристик усложняют задачу надежного поддержания динамики технологической операции в установленных пределах и обеспечения заданных результатов обработки.

Несмотря на то, что пластическая деформация, разрушение и тепловые явления характерны для всех процессов резания, их взаимное влияние, а также многофакторность и динамический характер контактного взаимодействия существенно усложняют задачу управления технологической операцией и обеспечения требуемых результатов обработки.

Изучением процесса резания и закономерностей его протекания занимались большое количество исследователей. Данной тематике посвящены работы В.Ф. Боброва, Г.И. Грановского, Н.Н. Зорева, Ю. Г. Кабалдина, Т.Н. Лоладзе, А.Д. Макарова, В.Н. Подураева, А.Н. Резникова, А.М. Розенберга, В.К. Старкова, Н.В. Талантова и многих других. Так, в работах Н. В. Зорева рассматривается

взаимосвязь характеристик процесса резания и их влияние на процесс механической обработки. В работах А.Н. Резникова рассматриваются аспекты тепловых явлений, протекающих в процессе резания. Исследованиями механики процесса стружкообразования и теории резания занимались Т.Н. Лоладзе и Н.В. Талантов.

Работы В.Ф. Боброва, В.Н. Макарова и Ю.Г. Кабалдина посвящены рациональному выбору режимов обработки, материала и геометрии режущего инструмента, а также описанию закономерностей процесса резания. Исследованиям закономерностей износа режущего инструмента посвящены работы В.П. Табакова и А.С. Верещаки. В работах А.Г. Суслова и В.Ф. Безъязычнова раскрывается влияние технологических режимов процесса обработки на формирование параметров качества обработанной поверхности. Также значительный вклад в теорию резания внесли российские ученые такие как В.Д. Кузнецов, С.Ф. Глебов, В.А. Кривовухов и другие.

Таким образом, закономерности контактного взаимодействия, механика износа режущего инструмента, формирования поверхности обработанной детали при резании достаточно хорошо изучены. Однако, аналитические зависимости, приведенные в справочно-нормативной литературе, базируются на существенно усредненных значениях физико-механических и других характеристик материалов, что не позволяет в полной мере решить задачу обеспечения требуемых результатов механической операции согласно установленных требований. Отсутствие единой унифицированной теории, методологии и математического аппарата для прикладных вычислений, которые позволили бы в необходимой степени формализовать закономерности процесса резания для решений задач технологической подготовки и эффективного управления, по-прежнему вызывает интерес исследователей и инициирует новые работы по данной тематике.

Так среди современных работ целесообразно отметить исследования А. Л. Воронцова, Н. М. Султан-Заде и А. Ю. Албагачиева. Отмечается [44] неразрывная связь процессов резания с процессами обработки металлов давлением. Автор указывает, что при исследовании и анализе процессов резания помимо

фундаментальных уравнений механики необходимо учитывать начальное состояние тела (начальные условия) и влияние окружающей среды на протекающие в теле процессы (граничные условия). Вместе они образуют «краевые условия» и позволяют перейти к «краевой задаче»: по заданным условиям на границах пространственно-временной области определить с помощью математической модели среды параметры процессов, происходящих во всем объеме этой области.

Решение краевой задачи с использованием системы дифференциальных уравнений связи напряжений и скоростей деформации, а также кинематических уравнений и условий неразрывности позволит определить важнейшие показатели деформации.

Анализ процесса резания согласно [45] необходимо начинать с определения кинематического, напряженного и деформированного состояний заготовки, с целью дальнейшего определения характеристик стружкообразования и параметров процесса резания на основе предлагаемой авторами расчетной схемы. В работе [47] приводится математический аппарат для определения температурных полей и контактных температур при резании металлов. Результаты расчета по предлагаемой методике позволят не только проследить взаимосвязь отдельных составляющих процесса резания, но и определить оптимальные параметры обработки.

Однако, несмотря на основательность проведенных авторами исследований и математической проработке предлагаемой теории, приведенные методики базируются на справочных и экспериментальных данных. Так например, для расчёта процессов механической обработки металлов с наличием пластических деформаций необходимо знание кривой упрочнения, т. е. зависимости напряжения σ_s текучести материала от накопленной деформации ϵ_i . Кроме того, наиболее значимым управляющим фактором, влияющим на закономерности пластического деформирования является температура, в чем согласны большинство исследователей [140, 157, 177]. То есть для подобных расчетов технологу необходимы кривые упрочнения обрабатываемого материала в зависимости от

температуры. В работе [46] отмечается, что кривые упрочнения для требуемой температуры в справочниках отсутствуют. Поэтому в практических расчётах обычно используют аппроксимирующие кривые.

Следует также учитывать, что конкретный вид кривой существенно зависит не только от материала, но и от величины накопленной деформации ϵ_i , то есть в очередной раз подтверждает существенное влияние предыдущего перехода и характеристик исходной поверхности на процесс резания, а следовательно, и закономерно на параметры обработанной поверхности.

Препятствием для практического использования предлагаемых методик в условиях реального производства является сложность математического аппарата, о чем говорят и сами авторы. И с целью его упрощения применяются ряд допущений и аппроксимаций. Это в свою очередь неблагоприятно сказывается на точности и достоверности полученных результатов. Кроме того, получение количественных оценок с помощью приведенных формул требует справочных данных, либо данных, полученных экспериментальным путем, что в большинстве случаев возможно лишь в условиях лабораторных исследований.

При моделировании сложных технологических систем в процессе обработки особенно важно учитывать нелинейные, переходные и вибрационные явления, возникающие при взаимодействии режущего инструмента с заготовкой. В этом контексте существенный научный интерес представляет подход, предложенный в работах Д. В. Василькова и соавторов [28, 29]. Для расчёта динамики контактного взаимодействия в зоне резания используется метод кусочно-линейной аппроксимации на основе реологических представлений и механизмах фазового переключения между скольжением и схватыванием в трибосопряжениях.

В основу метода закладываются ряд научных принципов. Во-первых, контактные взаимодействия на передней и задней поверхностях режущего инструмента моделируются как периодическая смена двух фаз: фазы схватывания (адгезии) и фазы скольжения (деформации). Учет адгезионной и деформационной составляющих позволяет более точно отражать микропроцессы в зоне резания по сравнению с традиционными моделями.

Для описание упруго-диссипативного поведения контактной зоны в каждой фазе применяются реологические модели Кельвина — Фойхта, Прандтля и Сен-Венана, описывающие упруго-диссипативное поведение контактной зоны в каждой фазе. Для фазового перехода используется функция переключения, зависящая от относительной скорости и контактного давления, что делает модель адаптивной к текущему состоянию системы. Кроме того, система описывается в пространстве переменных состояния, что позволило сократить численную сложность при сохранении физической достоверности описания.

В качестве достоинств данной методики отмечаются: физическая обоснованность за счет учета адгезионно-деформационных явлений, характерных для высокоскоростного резания; математическая строгость и гибкость — за счет возможности точного описания переходных процессов; применимость к анализу таких параметров качества обработанной поверхности как шероховатость и остаточные напряжения; перспективность интеграции инженерных расчетов в САМ-системы и интеллектуальные ЧПУ-комплексы.

Однако методика характеризуется высокой сложностью численного решения и необходимостью профессиональной подготовки. Физические модели не учитывают вариабельности свойств материалов контактной пары в состоянии поставки и под воздействием температур. В моделях не учитываются размеры контактных площадок по передней и задней поверхности, изменение геометрии режущего клина и износа инструмента, а также случайные возмущений в процессе резания.

Вопросы формализации контактного взаимодействия при резании и изучения закономерностей износа режущего инструмента и формирования параметров качества обработанной поверхности вызывали и по-прежнему вызывают интерес и зарубежных ученых. Так среди наиболее авторитетных специалистов в теории резания и физики процессов металлообработки целесообразно отметить британского учёного Эдварда М. Трента (E. M. Trent), а также немецкого ученого Фрица Клоке (F. Klocke).

Труды Трента заложили основы современного понимания механики резания и остаются актуальными до настоящего времени как в фундаментальной, так и прикладной инженерной науке. Ключевой работой автора является монография [274, 183], выдержавшая несколько изданий и дополняемая в соавторстве с Р. К. Wright [274]. В этой работе системно изложены вопросы стружкообразования, сил резания, температурного режима, контактных явлений, износа инструмента и выбора режущих материалов. Кроме того, значительное внимание уделено практическим аспектам обработки – выбору инструментов, условий резания, охлаждающих жидкостей.

В ряде статей, опубликованных в ведущих международных изданиях [275] (*CIRP Annals*, *Wear*, *Journal of Mechanical Engineering Science*), Е. М. Trent рассмотрел распределения давления, трения и температуры в зоне резания, влияние геометрии инструмента и режима на устойчивость процесса и характер износа.

Однако теория резания, описанная автором, ориентирована в основном на стационарные процессы. Кроме того, не достаточное внимание уделено вопросам неустойчивости контактного взаимодействия и вибрациям, которые характерны для высокоскоростной и прерывистой обработки. Несмотря на фундаментальность, часть материалов (особенно по инструментальным материалам и покрытиям) к настоящему времени нуждается в обновлении, поскольку появились новые композиции, технологии нанесения износостойких покрытий, а также наноструктурированные покрытия.

Модель процесса резания, предложенная Ф. Клоке описывает взаимодействие инструмента с заготовкой, учитывает деформационные и тепловые процессы, трение [241]. Согласно данной модели, стружка формируется в результате деформации и отделения материала из зоны первичных деформаций с дальнейшим перемещением по передней поверхности инструмента с образованием зоны вторичных деформаций. Автор рассматривается зависимости сил резания, крутящего момента и температуры режущей кромки от режимов резания (глубины, подачи и скорости резания). В работе [242] приведены методы численного моделирования процессов формообразования с широким применением метода

конечных элементов (FEM). Однако, модель Клоке не позволяет учитывать износ режущего инструмента, поскольку рассматривается только идеально острая кромка, когда радиус скругления значительно меньше толщины реза, а также имеет ограниченную область применения по виду образуемой стружки.

Энергетический подход, предложенный португальским ученым Дэвимом (Davim J.P.) [254] в отличие от вышеизложенного позволяет учитывать износ режущего инструмента. Так для определения силы резания составляется уравнение энергетического баланса системы, включающее энергию расходуемую на: пластическую деформацию снимаемого слоя; на трение инструмента и стружки; трение инструмента и заготовки; образование новой поверхности. В качестве достоинства методики в обзорных публикациях [146] отмечается близость расчета к производственным условиям, в то же время трудоемкость и методическую неопределенность расчета – в качестве недостатка.

Существенный интерес представляют работы американского исследователя Астахова В.П. (Viktor P. Astakhov). Среди разработок автора можно отметить: методику расчётного определения силы и мощности резания металла, учитывающую влияние тепловой энергии и энергии деформации; метод оценки ресурса режущего инструмента на основе предельного количества энергии; метод оптимизации обработки металлов резанием на основе принципа наименьшей энергии пластической деформации [14, 211, 212]. В своих исследованиях Астахов В.П. опирается как на работы Фредерика Уинслоу Тейлора (F. Taylor), Мёрчанта (M.E. Merchant), так и на исследования А.Д. Макарова, чья концепция оптимальной температуры резания стала основой предложенного принципа наименьшей энергии пластической деформации. В своих работах Астахов В.П. большое внимание уделяет не только деформационной, но тепловой напряженности процесса резания, широко использует моделирование методом конечных элементов, проводит анализ современных методов оценки температурной напряженности процесса резания.

Автор критикует «традиционную» теорию резания за ее абстрактность и недостаточный прикладной характер, а также несовершенство применяемых на практике измерительных методик (в частности измерения сил резания). Однако, его

работы также не лишены ряда допущений и упрощений. В частности, не учитываются вариативность характеристик обрабатываемого материала и режущего инструмента, усредненный характер справочных данных и констант, износ режущего инструмента, а также неустойчивость и динамичность процесса контактного взаимодействия.

Вопросы механики резания, динамики технологических систем, виброустойчивости и интеллектуального управления ЧПУ охватываются работами Юсуфа Алтинтаса (Y. Altintas), (*Лаборатория производственной автоматизации, MAL*) Университет Британской Колумбии (Канада). Алтинтасом разработаны теоретические и прикладные модели, направленные на: аналитическое описание самовозбуждающихся вибраций (chatter) [207]; построение диаграмм устойчивости (cutting stability lobes) для выбора режимов резания без вибраций [216]; моделирование сил резания и динамики фрезерных процессов с учетом геометрии инструмента, теплообразования и деформаций [256]; интеграцию моделей в адаптивные ЧПУ-системы и виртуальные среды программирования [208]; применение разработок к высокоскоростной, микро- и пятикоординатной обработке, включая обработку композитов.

В работах Алтинтаса предложено аналитическое выражение для границ устойчивости, что позволяет использовать метод не только в исследованиях, но и в САМ-системах и ЧПУ. Полученные модели устойчивости используются в промышленности для выбора безопасных и эффективных режимов резания, особенно при фрезеровании жёстких или дорогостоящих деталей. Работа легла в основу инструментов оптимизации режимов в Siemens NX, Mastercam, CATIA Machining и др.

Однако, разработанные модели основаны на предположении о линейной динамике станка и процесса резания, тогда как в реальности присутствуют нелинейные и стохастические эффекты (биения, люфты, трение, износ). Не учитываются температурные деформации и износ инструмента, способные существенно изменить динамику системы. Для точного применения модели требуются данные о жёсткости и демпфировании технологической системы, что не

всегда доступно на производстве без специальных измерений. Модели не чувствительны к особенностям пластического течения, микротрещин, локального упрочнения в зоне резания.

Обзор отечественных и зарубежных работ в области теории резания и закономерностей контактного взаимодействия, а также их аналитического описания выявляют общность физических принципов и исследовательских трендов, что становится аргументом в пользу достоверности и объективности научных результатов.

Однако, аналитическое описание процессов резания имеет несколько общих недостатков: ограниченность количества факторов аналитической модели, в число которых как правило не включены входные и текущие параметры процесса, такие как износ инструмента, вариативность физико-механических свойств контактной пары, влияние СОТС и других; принимаемые допущения или упрощения (условное выделение элементов технологической системы из общего, приближенные или упрощенные расчетные формулы, пренебрежение взаимным динамическим влиянием факторов, отброс погрешностей); использование сложных нелинейных математических моделей или систем дифференциальных уравнений. Все вышеописанное ведет к необходимости построения и развития систем адаптивного управления начиная с уровня технологических операций и переходов.

На рынке существует множество диагностических систем, отвечающих за надежность и контроль процесса механической обработки изделий в автоматизированном производстве, они используют разные принципы и подходы. Среди готовых коммерческих продуктов следует отметить такие как: PROMETEC PRomos (Германия), NORDMANN (Швейцария), ARTIS Orantec (США) [210], MONTRONIX Diagnostic Tools (Германия) [5], Brankamp iMBoard (Германия), Brancamp CMS (Германия) [167], Machine Tool Diagnostics (Россия) [50].

Производители рассмотренных систем работают в тесной интеграции с ведущими станкостроительными (например, Brankamp System Prozessautomation и ARTIS с Siemens) или инструментальными компаниями (PROMETEC входит в структуру Sandvik Coromant) [166]. Это подтверждает востребованность

направления и интерес мировых промышленных лидеров, а также определяет основные тенденции развития разрабатываемых продуктов – обеспечение работоспособности станочных комплексов с ЧПУ и режущего инструмента. Исключением в данном случае выступает система Machine Tool Diagnostics, разработанная в московском технологическом университете СТАНКИН, что объясняется в большей степени не отсутствием интереса и поддержки со стороны производственных предприятий, а упадком отечественной станкостроительной отрасли недостаточной финансовой поддержкой со стороны государства.

Общими особенностями приведенных систем является использование нескольких независимых каналов контроля. В частности, сенсорный комплект PROMETEC Promos может включать датчики: усилия, растяжения, интервала, полезной мощности, момента вращения, вибрации, шума и каталитический [167].

Принцип работы системы основан на записи и анализе цифровых сигналов различными способами. Данные сравниваются с заранее установленными пороговыми значениями, определяющими нормальный режим работы. Выход уровня сигнала за пороговое значение является маркером нештатной работы или аварийной ситуации.

В дальнейшем неисправности классифицируются на «станочные» или «нестаночные». Например, если в процессе работы фиксируются превышение заданных характеристик, которое не наблюдается на холостом ходу, то система делает вывод о некорректности выбранных режимов обработки. Аналогично превышение заданных характеристик при работе некоторой отдельной инструментальной позиции характеризует выход из строя режущего инструмента. Оценка трендов изменения сигналов от инструмента или отдельных узлов позволяет прогнозировать признаки износа и оповещать о необходимости замены.

Следует отметить, что при работе всех приведенных систем не принимаются во внимание физические закономерности процесса резания, не учитывается влияние нестабильности геометрических и физико-механических характеристик обрабатываемой детали и формирование показателей качества поверхностного слоя [30, 79]. В контексте внедрения цифровых технологий в рамках концепции

«Индустрия 4.0» это, безусловно, отразится на автономности адаптивных систем управления так или иначе опирающихся на оперативную сенсорную информацию из зоны резания. В результате снижаются адаптивные функциональные возможности и надежность контролируемых технологических операций. Поэтому поиск информативных каналов получения данных о ходе процесса резания, работоспособности инструмента, технологического оборудования и характеристиках формируемой в результате обработки информации является крайне важным и значимым.

Среди наиболее популярных методов оценки можно выделить следующие: метод вибродиагностики и виброакустической диагностики; метод диагностики на основе измерения силы резания; метод диагностики на основе контроля мощности, потребляемой двигателем станка; метод диагностики на основе измерения температуры либо термоЭДС в зоне резания; методы оптической диагностики.

Исследованиям методов оптической диагностики посвящены работы отечественных и зарубежных исследователей. Среди подобных методов диагностики можно выделить: методы оценки состояния режущего инструмента [149, 185, 228, 286]; методы оценки формы стружки [226,268], позволяющие анализировать износ режущего инструмента; методы оценки морфологии и микрогеометрии обработанной поверхности [226, 268].

Оптическая оценка состояния режущего инструмента позволяет: выявлять и оценивать небольшие дефекты на режущей кромке, виды износа, а также использовать машинное обучение для повышения эффективности диагностики. Однако, методика требует остановки обработки для проведения необходимых измерений. Существенное влияние на достоверность результата оказывает отражающая способность поверхности. Точность оценки зависит от применяемого оборудования и в ряде случаев определяется величиной 0,05-0,1 мм. Эффективность применения метода снижается при интенсивном стружкообразовании, запыленности и применении смазочно-охлаждающих жидкостей.

Форма образуемой стружки определяется физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, режимом резания и геометрическими параметрами инструмента, а кроме того, отражает особенности контактного взаимодействия в зоне резания. Однако, является косвенным методом оценки, характеризуется сложностью реализации, также высокой чувствительностью к оптическим помехам и загрязнению и рядом других.

Достаточно близкие недостатки имеют и методы оптической диагностики параметров качества обработанной поверхности. Кроме того, отмечается неоднозначность и сходство дефектов поверхности изделий, необходимость больших объёмов экспериментальных данных. Вариативность поверхностных дефектов усложняют подбор пороговых и оптимальных параметров.

Таким образом, рассмотренные методы достаточно сложны, имеют существенные ограничения при реализации в производственных условиях и в большинстве случаев требуют наличия самообучающихся систем.

В отечественной практике предпринимались попытки создания подобных систем. В качестве примера можно привести самообучающуюся технологическую систему с адаптивным управлением параметрами качества поверхностного слоя деталей машин, разработанную в Брянском государственном техническом университете Петрешиным Д.И. и Суловым А.Г. [134]. Оценка характеристик процесса резания осуществляется посредством замеров сил резания с помощью тензодатчиков, оценка температуры в зоне резания – посредством замеров сигнала термоЭДС и оценка шероховатости обработанной поверхности – с помощью лазерного оптического датчика optoNCDT 1700-2. Система имеет ЧПУ с возможностью самообучения, в основе работы которой заложено создание математического обеспечения и автоматизированной базы данных. Управление обработкой выполняется на основании математической модели расчета параметра шероховатости (среднего арифметического отклонения профиля R_a). Положенная в основу математическая модель имеет ограниченное применение по маркам обрабатываемых сталей, не учитывает влияния инструментального материала и характеристик поверхностного слоя обрабатываемой детали. Введение же

комплексного расчетного параметра качества обработанной поверхности, включающего расчетные значения параметра шероховатости, величину растягивающих напряжений и поверхностную микротвердость по математическим моделям, приведенным в справочно-нормативной литературе, обеспечивает определенное преимущество.

Однако, использование в данном случае усредненных справочных данных ведет к повышенной ошибке результата расчета. Так же следует отметить несовершенство отдельных элементов диагностики, в частности оценки шероховатости поверхности с помощью лазерного оптического датчика. Кроме того, для самообучения системы и построения необходимых математических моделей необходима обработка пробной партии деталей, что накладывает дополнительные сложности и усложняет автоматизацию. Анализ же физико-механических свойств, химического состава материала обрабатываемой заготовки и тем более параметров поверхностного слоя с высокой надежностью, что позволило бы нивелировать погрешность константных характеристик, заложенных в базовую математическую модель, требует применения в производственных условиях лабораторно-испытательного оборудования и в реальных условиях излишне трудоемко и сложно реализуемо.

Разработкой методов вибрационной и виброакустической диагностики занимаются авторы работ [1, 245, 249, 284]. Сложность этих методов обусловлена трудностью расшифровки суммарного сигнала и выделения необходимой составляющей. Кроме того, возникают сложности из-за необходимости расположения датчиков непосредственно в зоне резания и изменения характера сигнала при смене технологического оборудования.

В ряде работ [182, 237, 243] рассматриваются методы диагностики на основе измерения температуры и термоЭДС в зоне резания. Однако применение данных методов вызывает определенные сложности. Технологические ограничения применимости устройств связаны: с возникновением паразитных составляющих сигнала термо-ЭДС, в том числе за счет активного теплообмена с державкой в

процессе резания; возникновением погрешности измерения в связи с непостоянством контакта токосъемника и другие.

Применение нашел метод диагностики износа режущего инструмента на основе контроля мощности, потребляемой двигателем станка, рассмотренный в работах [8, 165, 173, 222]. Относительная простота реализации указного подхода к измерению отмечается в качестве его основного достоинства. К недостаткам данного метода стоит отнести малое быстродействие ввиду значительного влияния времени переходных процессов электрической цепи на формирование установившихся значений диагностического параметра, влияние частоты вращения шпинделя на выходные параметры мощности, потребляемой на холостом ходу, а также недостаточная надежность при работе на многофункциональных станках, при различных параметрах инструмента и режимов резания. Помимо отмеченных выше недостатков, применительно к пересчету значений отдельных составляющих сил резания, косвенный подход требует существенно большего времени вычислений, не учитывает трение элементов станочного оборудования и непригоден для многоосевого процесса резания.

Развитием описанного подхода посвящены работы [233, 235], в качестве недостатков которых можно отметить необходимость сложной обработки сигналов, специальной архитектуры датчиков, а также влияние параметров резания. Промышленная применимость работ [225, 234] обеспечивается использованием технологий нейросетевого обучения, что требует достаточно трудоемкого обучения.

Одним из наиболее распространенных, информативных, физически обоснованных и точных методов мониторинга процесса резания и состояния режущего инструмента является измерение составляющих силы резания и связанного с ней крутящего момента [75, 173]. В рамках данной методики исследования проводятся как на базе серийно выпускаемых динамометров [221], так и разрабатываются новые конструкции измерительных систем [258].

На практике измерение составляющих силы резания осуществляется с использованием следующих типов оборудования: пьезоэлектрических

динамометров, обеспечивающих высокую точность и частотный отклик; тензорезистивных элементов, интегрируемых в узлы зажима инструмента; многоосевых силовых датчиков, встроенных в стол или державку; гибридных систем, в которых силовые параметры оцениваются косвенно, например, через вибросигналы, синхронизированные с данными ЧПУ.

К ограничениям метода относятся: необходимость оснащения станка специальными измерительными узлами — пьезоэлектрическими или тензорезистивными датчиками, либо многоосевыми динамометрами; подверженность сигнала влиянию вибраций, динамической неустойчивости и переходных процессов при изменении режимов резания; сложности интеграции в существующее оборудование без модернизации его кинематической схемы или изменения конструкции шпиндельного узла.

В современной научной литературе рассматривается не только прямая регистрация сил резания, но и интеграция полученных сигналов в интеллектуальные системы предиктивной аналитики с применением методов машинного обучения и нейросетевых моделей, что существенно расширяет функциональность и точность прогнозирования остаточного ресурса инструмента.

Существуют методы оценки износа инструмента и его работоспособности на основе резистентных покрытий, уменьшение которых ведет к резкому увеличению электрического сопротивления [219]. Недостатком данного метода является его низкая информативность и применимость.

Поскольку перечисленные методы диагностики имеют определенные недочеты и несовершенства, в числе которых недостаточная информативность, универсальность и другие, то перспективным направлением становится применение диагностических систем на основе двух или более методов. К таковым можно отнести работы [264, 272], а также существующие коммерческие продукты, представленные ранее [50], при работе которых оперативная информация включает в себя данные с динамометрических датчиков, датчиков акустической эмиссии, вибродатчиков, оценку затрачиваемой мощности и других. Это позволяет получить более объективную и достоверную информацию. Однако описанные системы

предназначены для диагностики и прогнозирования выхода из строя режущего инструмента, не учитывают сущности и закономерностей процесса обработки и как следствие не используют всех возможностей и ресурсов в направлении управления обработкой с целью повышения эффективности процесса.

Авторы работ [209, 214, 220, 230, 247, 252] исследуют взаимодействие машинного обучения, сигналов силы/вибрации и моделей для доступа к мониторингу инструментов и устойчивости процесса с различными архитектурами: от классических CNN до современной гибридизации с трансформерами и edge решений. Их объединяет общая цель – повысить автономность, точность и устойчивость обработки через интеллектуальные подходы. Авторы охватывают как классические задачи мониторинга износа, так и устойчивость к вибрациям, включая прецизионную и высокопроизводительную механообработку. Также к достоинствам можно отнести использование передовых методов машинного обучения (CNN, ViT, CBR, LSTM) и интеллектуального анализа сигналов (вейвлет-преобразования, спектральный анализ), что обеспечивает высокую точность мониторинга состояния инструмента и процесса обработки. Работы соответствуют современным трендам цифровизации производства, включая разработку автономных, интеллектуальных систем управления. Однако проанализированные работы имеют ряд недостатков. Многие модели показывают высокую точность только в пределах конкретных условий или обучающих выборок, что снижает их переносимость на другие типы станков, материалов или режимов обработки. Большинство исследований не учитывает влияние износа инструмента, температуры и структурных изменений материала на динамику сигналов и устойчивость процесса. Модели на основе глубокого обучения требуют больших массивов данных, что затрудняет их внедрение на предприятиях с ограниченными возможностями сбора данных. Хотя демонстрируется высокая точность в лабораторных условиях, отсутствуют масштабные промышленные верификации, что сдерживает широкое внедрение.

В современных условиях перехода к интеллектуальному и устойчивому производству значительное внимание уделяется встраиваемым системам

мониторинга, обеспечивающим адаптацию режимов обработки в реальном времени. В этой связи представляет интерес работа Somkiat Tangjitsitcharoen, Nattawut Sukksomcheewin и Alessio Faccia [269], в которой рассматривается применение интеллектуальных моделей для оценки качества деталей при токарной обработке на основе анализа динамики сил резания.

Авторы предложили методику, основанную на регистрации сигналов силы резания в процессе обработки с помощью встроенного динамометра и их последующей обработки с применением вейвлет-преобразования Дабеша. Полученные сигналы служат входными параметрами для построения моделей прогнозирования качества поверхности, таких как: нелинейная регрессия; многослойный персептрон (MLP) с алгоритмом Levenberg–Marquardt.

Целевыми переменными выступали три критерия качества: шероховатость поверхности (R_a/R_z), прямолинейность и круглость получаемых деталей. Результаты экспериментов показали, что модель на основе нелинейной регрессии продемонстрировала более высокую точность предсказания, чем нейросетевая структура, что объясняется ограниченным размером обучающей выборки и спецификой данных.

Работа обладает рядом существенных достоинств: демонстрируется интеграция интеллектуальной системы мониторинга непосредственно в станок, что расширяет возможности цифровизации механообработки; осуществляется онлайн-связь между параметрами резания и выходными характеристиками качества, что особенно ценно для адаптивных производств; подход сочетает в себе методы обработки сигналов, машинного обучения и теории резания, создавая основу для универсальных платформ управления качеством; в рамках концепции устойчивого производства решается задача снижения количества брака, энергопотребления и времени переналадки.

К недостаткам исследования следует отнести: ограниченность применимости разработанной системы исключительно к токарной обработке; отсутствие учёта износа инструмента и термодинамических факторов, влияющих на динамику сигналов; отсутствие анализа переносимости моделей на иные обрабатываемые

материалы или конфигурации оборудования; применённая нейросетевая модель недостаточно масштабируема для промышленных условий без дополнительных модификаций и расширения обучающей базы.

В целом работа демонстрирует значительный потенциал для реализации интеллектуальных адаптивных систем мониторинга, интегрируемых в станки нового поколения. Разработанный подход может быть положен в основу интеллектуальных модулей в рамках цифровых двойников механообрабатывающих систем.

Повышение эффективности производства требует не только внесения необходимых корректировок при выполнении технологических операций, но оптимальной организации и обеспечения функционирования и взаимодействия технологического оборудования и подразделений, начиная с этапа технологической подготовки. В современной научной литературе большее внимание уделяется методологическому обеспечению цифровой трансформации процессов технологической подготовки производства (ТПП). Отдельно следует отметить актуальность вопросов ТПП для условий многономенклатурного и мелкосерийного машиностроения.

Важное место в формировании научно-методических основ автоматизации ТПП занимает цикл исследований, выполненных под руководством и при участии Н. М. Капустина. Его труды, охватывающие период с 1970-х по начало 2000-х годов, можно рассматривать как научно-технический фундамент для эволюции автоматизированных систем подготовки производства (АСУ ТПП), предшествующих современным PLM- и CAPP-системам.

В работах [83, 85] автором предложены структурированные принципы формализации проектных процедур, включая выбор маршрутов обработки, базирования, режимов и оснащения, что стало основой для алгоритмического описания техпроцессов. Большое внимание уделено диалоговому взаимодействию технолога и системы, что предвосхищает современные концепции интеллектуальной поддержки принятия решений в цифровых средах. В издании [82] предложен системный подход к автоматизации ТПП, охватывающий

моделирование операций, структуру CAPP-сред, интеграцию с CAD/CAM-системами и принципы внедрения CALS-технологий. Эти подходы легли в основу современных методик цифровой трансформации производственной инженерии.

В исследованиях Н.М. Капустина последовательно рассматривается вопрос снижения длительности ТПП за счёт использования ЭВМ для выбора оборудования и операций, генерации управляющих программ, оценки технологичности конструкций и планирования маршрутов обработки [84, 91]. По сути, автор заложил принцип моделирования знаний технолога в виде логических процедур и алгоритмов, реализуемых в виде экспертных систем. труды Капустина формируют устойчивую методологическую базу, на которую могут опираться современные исследования по цифровизации и интеллектуализации ТПП, особенно в условиях многономенклатурного машиностроительного производства.

В контексте формирования научно-методологических основ цифровизации ТПП значительное внимание заслуживают труды профессора Б. М. Базрова, посвящённые фундаментальной проработке принципов формализации, оценки и автоматизации технологической подготовки в машиностроении.

Наиболее системно данное направление раскрыто в его монографии [16], где изложена комплексная структура ТПП как иерархической технической системы, включающей справочную инфраструктуру, процедуры базирования, координации размерных цепей и цифровое описание конструкции. Особое внимание уделяется вопросам информационного моделирования, подсистемы баз и координат, а также методам оценки технологичности на ранних стадиях жизненного цикла изделия.

В серии статей [17, 18, 20, 21] автор обосновал модульный подход к проектированию технологических процессов, который обеспечивает высокий уровень унификации и адаптивности процедур ТПП. Предложенные подходы позволяют эффективно решать задачи технологической подготовки в условиях многономенклатурного производства, где требуется быстрое конфигурирование маршрутов, оснастки и параметров обработки.

Новизной работ Б. М. Базрова также является разработка методов согласования конструкторских и технологических баз с учётом влияния на

точность координатных и размерных цепей. Это обеспечивает повышение точности сборки и снижение производственных ошибок, особенно при переходе к цифровым двойникам и адаптивному управлению качеством. Исследования Б. М. Базрова охватывают как базовые положения технологической инженерии, так и конкретные прикладные алгоритмы, необходимые для создания цифровой среды подготовки производства. Эти подходы логично интегрируются в концепции цифрового предприятия и сквозной информационной модели изделия, формируя прочный методологический фундамент для цифровой трансформации ТПП.

Одним из ключевых направлений современных исследований в области цифровизации технологической подготовки производства (ТПП) является формализация проектных процедур, автоматизация принятия технологических решений и повышение эффективности планирования в условиях многономенклатурных механообрабатывающих производств. Существенный вклад в разработку методологических и алгоритмических основ этой области внесён в работах П. Ю. Бочкарёва [113, 114, 115, 116, 121].

В ряде публикаций под его авторством предложены модели формализованного представления технологических решений, включая маршрутные и операционные структуры, а также алгоритмы автоматизированного выбора технологических баз, режимов и последовательностей операций. Исследования ориентированы на создание машиночитаемых технологических моделей, пригодных для внедрения в среду PLM/CAM/CAPP-систем. Это особенно актуально для предприятий, работающих с широкой номенклатурой изделий и часто меняющимися условиями производства.

Особо следует выделить разработку методики автоматизированного отбора проектных решений, основанной на уровне критичности и функционального назначения элементов конструкции. Такой подход позволяет значительно сократить трудоёмкость разработки техпроцессов и обеспечить адаптивность технологической подготовки к изменениям в изделии или производственном ресурсе.

Также в трудах П. Ю. Бочкарёва раскрыта проблематика оценки технологичности изделий, что имеет принципиальное значение для ранней диагностики производственных рисков и для принятия конструктивно-технологических компромиссов на этапе разработки.

Работы П. Ю. Бочкарёва закладывают теоретические и практические основания для цифровой трансформации процедур ТПП, ориентированной на снижение трудозатрат, повышение согласованности инженерных решений и достижение адаптивности технологической подготовки к реалиям высокоизменчивого производственного контекста.

Теоретические и прикладные аспекты структурирования, формализации и цифровизации процедур маршрутного проектирования затрагиваются в работах Ю. Л. Чигиринского. В его публикациях [192, 196, 197] системно обоснована необходимость перехода от фрагментарной и эмпирической подготовки производства к информационно-логическим моделям ТПП, основанным на единых цифровых представлениях справочной и нормативной информации. Разработанные автором подходы к формализации структуры маршрутных технологических процессов позволяют обеспечить машиночитаемость и автоматизацию подготовки, в том числе при высокой вариативности продукции.

Особое внимание уделено интеграции справочных и нормативных данных с PLM-системами, а также построению цифровых двойников технологических процессов. Это создаёт предпосылки для внедрения интеллектуальных систем поддержки принятия решений и замыкания обратной связи от производственного уровня (MES/CNC) к инженерному.

Таким образом, труды Ю. Л. Чигиринского формируют методологическую базу для цифровизации ТПП, обеспечивая структурную согласованность этапов маршрутного проектирования; адаптацию проектных процедур к условиям цифрового машиностроительного производства; подготовку среды для внедрения цифровых двойников и интеллектуальных инструментов проектирования.

Производственная деятельность любого предприятия включает целую совокупность последовательных и взаимосвязанных действий, называемых бизнес-

процессами. Современные же экономические тенденции, рост доли наукоемкой и кастомизированной продукции актуализируют вопросы повышения эффективности механообрабатывающих производств и требуют комплексного подхода, включая технологические, организационные и информационные методы [80]. В указанных условиях решения требуют многофакторные проблемы управления, планирования, организации и регулирования производства с оперативным реагированием и высокими требованиями к достоверности получаемых результатов.

Под комплексным решением на производственно-технологическом уровне подразумеваются как технико-технологических, так и организационно-информационных методов и средств повышения эффективности.

В перечень технико-технологических средств должны быть включены не только развитие технологий создания режущего инструмента, но и повышение уровня автоматизации, технологической автономности и адаптивности технологических операций нацеленные на решение вопросов снижения затрат, технологической подготовки, надежности и стабильности результатов операций, в частности процессов обработки на станках с ЧПУ. Возможности повышения эффективности за счет автоматизации ограничены слабой адаптируемостью существующих методик управления, технологической подготовки, информационного и методического обеспечения, а также представленных на рынке программных продуктов.

Поэтому в данном случае невозможно обойтись и без организационно-информационных инструментов. Требуется повышение уровня взаимодействия между отдельными технологическими операциями, подразделениями и службами. Необходимы анализ и оптимизация процессов с целью сокращения простоев. Требуется наращивание информационной базы предприятия с целью как инструмента снижения рассогласования запланированных и фактических результатов деятельности и повышения надежности установленных прогнозов.

1.2 Методология и методы управления динамическими техническими системами

Производственное предприятие, равно как и технологический процесс можно отнести к сложным динамическим системам, состоящим из большого количества элементов разного уровня иерархии (технологическое оборудование, производственные участки, производственные подразделения и т.д.), которые выполняют определенные функции. Комплекс компонентов системы объединяются материальными, энергетическими, информационными, технологическими и другими связями и обеспечивают реализацию всего спектра производственных процессов, включая технологические, вспомогательные и обслуживающие. Отдельные элементы предприятия также могут рассматриваться как сложные технические системы. Это справедливо не только в отношении производственного оборудования, информационных систем, но и в отношении производственных процессов, технологических операций, структурных подразделений и т.д.

Представление объекта управления в виде сложной системы позволяет: анализировать структуру и иерархию элементов системы; выявлять факторы, оказывающие наибольшее влияние на результат; проводить оптимизацию и производственных и повышать эффективность управленческих решений. Результативность использования ресурсов (труда, капитала, материалов и т. д.) в процессе производства продукции, а также способность реагировать на изменения в условиях рыночной экономики напрямую определяют конкурентоспособность предприятия.

Любая система подвержена как внутренним, так и внешним воздействиям и динамическим процессам, поэтому ее устойчивость определяется способностью сохранять баланс нивелируя отклонения за счет соответствующих управленческих реакций. Неустойчивость в той или иной степени характерна для любой сложной системы. Оптимальное функционирование системы предполагает не состояние покоя, а колебание отклонений в рамках регламентированных, для чего требуется

адаптивное управление системой. Поэтому, методология управления сложными системами предполагает высокую адаптивность в принятии решений элементами этих систем, включающую возможность изменения ранее принятых решений [160].

Стандартный подход в рамках теории управления включает в себя: анализ исходных данных об объекте управления и создание математического описания свойств системы (математическая модель); формулировка целей управления; синтез алгоритма управления; оценка результатов и совершенствование эффективности системы управления. При необходимости процесс повторяется [181].

Система может быть описана детерминированными или стохастическими математическими моделями. Как детерминированная, так и стохастическая математические модели основываются на определенном наборе достоверных данных и актуальной информации о прошлых событиях.

Детерминированная модель выражается в строгой зависимости результата от изменения заранее определенных параметров и факторов. К детерминированным моделям относятся формулы фундаментальных и специальных наук. Детально проработанные модели с максимальным учетом параметров могут быть заложены в основу оптимизации технической системы [27].

Однако, в отличие от стохастической модели детерминированная не учитывает неопределенность исходных данных, что в ряде случаев может приводить к погрешности прогноза.

Моделирование вероятных событий при применении стохастических моделей, разработанных с помощью статистических методов и алгоритмов, позволяют прогнозировать варианты развития в зависимости от случайных факторов, которые невозможно предсказать точно.

Недостатками стохастических моделей помимо существенного объема необходимых вычислений являются: отсутствие связи с физическими принципами описываемых процессов; сложность анализа; высокая чувствительность к ошибкам измерения; ограниченны к применению с точки зрения оптимизации.

Фактически стохастическая математическая модель позволяет оценить вероятность развития сценариев или определенных событий, на основании анализа статистического набора данных и выполнить их ранжирование на уровне систем поддержки принятия решения.

В любом случае математическое описание динамической системы является необходимым компонентом для создания системы управления. Для описания различных процессов и динамических систем при их изучении или построении математических моделей широко применяются дифференциальные уравнения.

Дифференциальные уравнения являются основным аппаратом анализа и синтеза динамических систем, применяемых в теории управления [181].

Вместе с тем, что дифференциальные уравнения облегчают качественное описание различных процессов, получить их решение достаточно сложно или зачастую невозможно. Поэтому для решения систем дифференциальных уравнений применяются численные методы, требующие существенных вычислительных мощностей и больших расчетов, что ставит вопрос о целесообразности и области применения описанного подхода.

В этом контексте математические (статистические) модели имеют существенные преимущества по сравнению с физическими, поскольку позволяют дать количественные взаимосвязи между параметрами процесса и его результатом. Более того, применение регрессионного анализа в качестве инструмента создания базовой математической модели позволяет не только оценить вероятность прогноза и погрешность, но и совершенствоваться за счет дополнения массива исходных данных.

В качестве одного из направлений повышения точности и надежности прогнозирования рассматривается применение нейронных сетей, которые призваны дополнить результаты регрессионного анализа, преодолеть физическую несогласованность в традиционных подходах к прогнозированию работоспособности инструмента. [267, 279, 281].

Отметим, что применение нейронных сетей сопровождается серьезными проблемами. В первую очередь это зависимость от программного и аппаратного

обеспечения. Необходимость обработки больших объемов информации требует высокого быстродействия и, следовательно, существенных вычислительных мощностей. Во-вторых, требуются сложные рекурсивные алгоритмы, длительные процедуры подбора оптимальной (а чаще, рациональной) структуры нейросети и большое время обучения. Генерация результатов на основе некоторого опыта в режиме «черного ящика» на практике затрудняет оценку достоверности и внесение изменений.

Результаты расчетов с использованием AI (искусственный интеллект и нейросети обычно рассматриваются как синонимы), также как и традиционные методы прогнозирования, имеют вероятностный характер, а значит не избавлены от недостатков статистического анализа [259]. Добавим, что результаты нейросетевого прогнозирования чрезвычайно чувствительны к достоверности исходной информации. В то же время, надежность исходной информации рассматривается специалистами в области искусственного интеллекта, чаще всего, как понятие, производное от релевантности (частоты повторяемости) [190].

Таким образом, технология нейросетей не отменяет необходимости анализа сложного взаимодействия в процессе резания, выявления степени влияния отдельных факторов и мониторинга процесса.

Фундаментальным элементом любой системы управления техническими системами является обратная связь, позволяющая оценить эффект воздействия на систему и необходимость дальнейшей корректировки.

В условиях дефицита достоверных данных о результатах функционирования исследуемой системы процесс управления приобретает характер интуитивного, что существенно снижает эффективность принимаемых решений и может привести к негативным последствиям работы всей системы. Отсутствие обратной связи и объективной информации о параметрах работы системы создаёт существенные ограничения для реализации научно обоснованного подхода к управлению и требует разработки альтернативных методов принятия управленческих решений.

Правильно же организованная обратная связь позволяет устранить воздействие нежелательных факторов и повысить производительность системы.

Поскольку главной задачей управления динамической системы является обеспечение заданных условий функционирования системы, что предполагает оптимизацию и механизмы адаптивного управления, нереализуемые без обратной связи и постоянного потока измерительной информации о состоянии системы, то время реакции становится одной из ключевых характеристик системы управления, в частности в случае управления технологической операцией на станке с ЧПУ.

Основными барьерами промышленной реализации систем управления являются стохастическая природа математических моделей, положенных в основе алгоритмов управления, необходимость наработки значительного объема баз данных.

Следует также учитывать, что увеличение количества компонентов, в частности измерительных датчиков усложняет систему, что не только ведет к увеличению стоимости аппаратной части, но и затрудняет анализ диагностической информации. То есть в данном случае необходимо соблюдение принципа необходимого и достаточного количества измерительных датчиков.

Если же рассматривать адаптивное управление операцией, выполняемой на станке, то возможность полноценной работы измерительных систем в зоне обработки ограничивает характер процесса резания.

Одной из характерных особенностей сложных систем является наличие неоднородных связей, что при выборе варианта решения приводит к внутреннему противоречию поскольку улучшение одной из характеристик системы неизбежно снижает другие. Нахождение наилучшего сочетания режимов функционирования системы требует оптимизации [87].

Оптимизация необходима на всех этапах развития и функционирования сложных технических систем, как на этапе создания, так и при управлении. Процесс оптимизации является одним из элементов методологии, методов и средств системного анализа систем, а также применяется при: планировании (выбора из имеющихся вариантов или выбора из прогнозных оценок); организации (оптимальное распределение имеющихся ресурсов); регулировании (координация и управление); контроле (выявление и устранение недостатков, обеспечение необходимой информацией). При том на каждом из этапов жизненного цикла технической системы может решаться несколько задач оптимизации [147].

Как известно, выделяют структурную, параметрическую виды оптимизации. Отличие структурной оптимизации сводится к нахождению наилучшей организации структуры. Применительно к производству как сложной системе это может быть структура технологического маршрута, операции, выбор оборудования и т. д. То есть при структурной оптимизации последовательно решаются задачи технологического проектирования, разделяя их на взаимосвязанные уровни. Иначе говоря, при структурной оптимизации оперируют неупорядоченными переменными, не обязательно являющимися числовыми [131].

При параметрической оптимизации определяют оптимальные параметры процесса (например, режимов обработки при выполнении технологического перехода) обеспечивающих экстремальное (наилучшее) значение целевой функции, согласно установленной задаче.

Решение задач структурной и параметрической оптимизации позволяет повысить эффективность функционирования сложной технической системы, в данном случае элементов производства.

Таким образом, одной из ключевых задач методологии управления сложными техническими системами является создание математической модели, с достаточной надежностью и достоверностью описывающей функционирование системы. Сопутствующими задачами являются определение показателей эффективности, формализация целевой функции и области допустимых решений. Для генерации алгоритма управления системой необходимо обеспечение обратной связи и механизма регулирования количественных характеристик функционирования системы.

1.3 Цифровые средства повышения эффективности функционирования многономенклатурного производства

К настоящему времени созданы и функционируют технологии, имеющие достаточный потенциал для решения большинства проблем, в частности в условиях многономенклатурного производства.

Одним из перспективных направлений развития производственной сферы, реализуемых на государственном уровне, является цифровизация. Концепция «цифрового производства» изложенная в рамках государственной программы «Развитие промышленности и повышение её конкурентоспособности», утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 года №328, предполагает, что интеллектуализация производственных систем на основе современных информационных технологий станет одним из основных факторов повышения конкурентоспособности российских промышленных предприятий [151].

Существенное повышение эффективности и адаптивности производства возможно за счет комплексной автоматизации производственного процесса в рамках целостной концепции изменения производственной системы нового типа, охватывающей все основные аспекты: организацию, технологию, проектирование и изготовление [154].

На современных машиностроительных предприятиях широко используются такие цифровые решения как САПР, объединяющие CAD/CAE/CAM и PDM-системы. Последние осуществляют управление проектными данными инженерно-технической информации на всех этапах проектирования и координируют работу CAD/CAE/CAM систем. Управление массивами данных на всех этапах жизненного цикла изделия осуществляют PLM-системы. Они же обеспечивают интеграцию не только САПР, но и MES, ERP, PDM, SCM, CRM и других автоматизированных систем [42].

Схему взаимодействия модулей информационной среды функционирования производства целесообразнее представить в привязке к основным этапам жизненного цикла изделия (рисунок 1.5). Так на начальной стадии жизненного цикла (на этапе проектирования) осуществляется разработка изделия с использованием программных решений CAD и CAE систем, которые совместно формируют единый комплекс технологий автоматизации, реализующих полный цикл проектных процедур. Причем гибридные CAD/CAE-системы позволяют совмещать решение CAD и CAE задач (генерация моделей, анализ и модификация

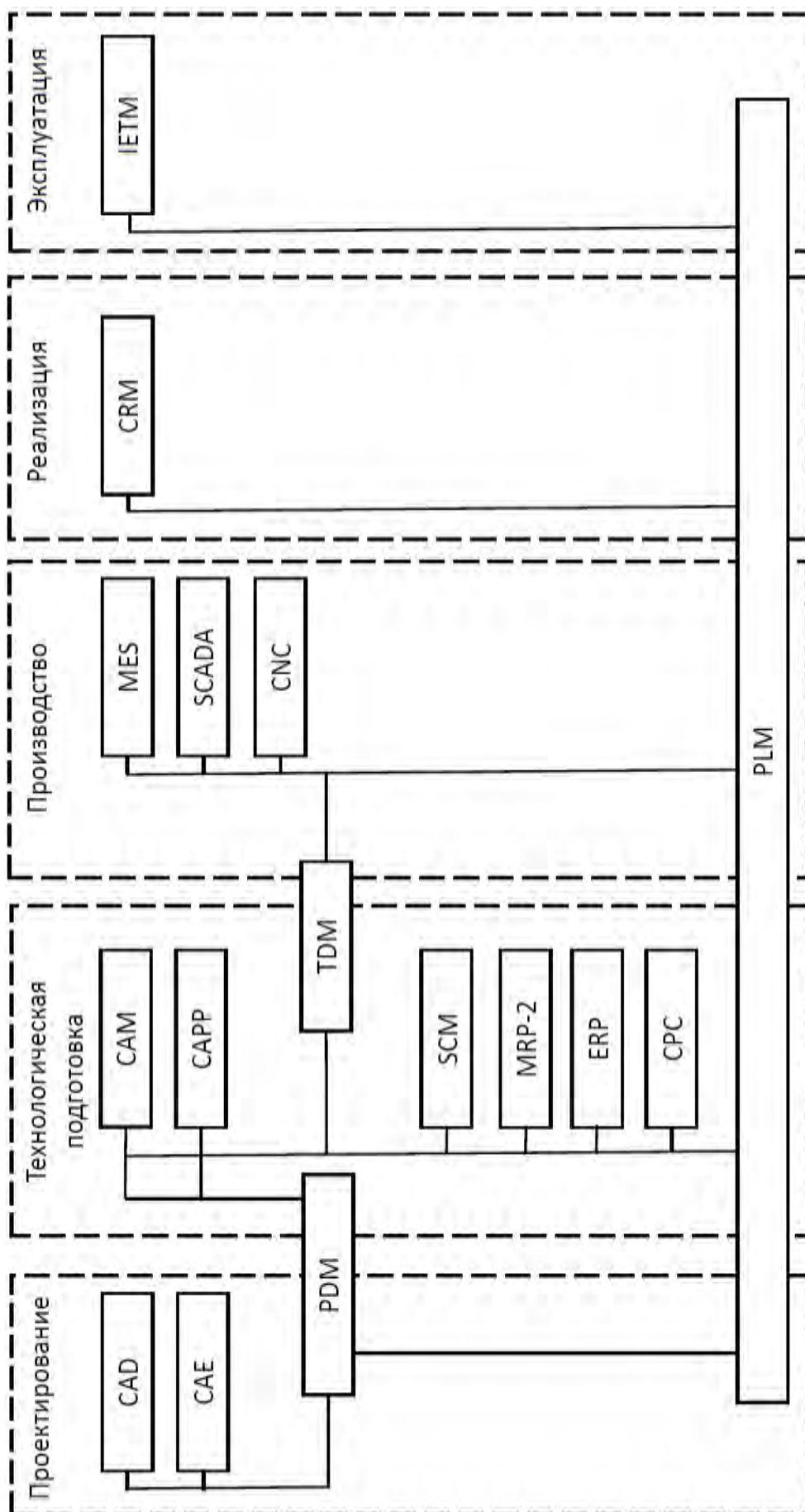


Рисунок 1.5 – Схема взаимодействия модулей информационной среды функционирования производства

геометрии деталей, обмен данными между CAD- и CAE-моделями) без привлечения PDM-систем.

На этапе подготовки производства данные из проектных систем поступают в планирующие и координирующие модули CAM (Computer-Aided Manufacturing) — для подготовки управляющих программ и CAPP (Computer-Aided Process Planning) — для проектирования технологических процессов (ТП) и оформления технологической документации. PDM, как система управления данными изделия увязывает взаимодействие CAD/CAE и CAM/CAPP систем и их интеграцию в PLM-систему.

Для интеграции проектных и плановых решений на данном этапе и формирования цифровой модели производства помимо отмеченных выше систем к PLM-среде предприятия подключаются такие элементы как: SCM (Supply Chain Management) — управление цепочками поставок; MRP-2 (Manufacturing Resource Planning) — планирование ресурсов; ERP (Enterprise Resource Planning) — комплексное управление ресурсами предприятия; CPC (Collaborative Product Commerce) — организация совместной работы над продуктом, в том числе с участием внешних контрагентов.

Фактическое выполнение технологических операций осуществляется с использованием: MES (Manufacturing Execution System) — систем оперативного управления производством; SCADA — систем диспетчеризации и мониторинга; CNC — станков с числовым программным управлением. Эти системы формируют цифровое представление производственного процесса и позволяют организовать обратную связь с PLM и ERP-уровнями для оперативного контроля и корректировки.

На этапе реализации продукции для сбора, обработки, анализа и хранения данных о клиентах, контроля и повышения продаж, общего управления бизнесом могут широко применяться CRM-системы (Customer relationship management). А на этапе эксплуатации изделия — организационно-технические системы IETM (Interactive Electronic Technical Manual), предназначенные для автоматизированной

подготовки сопроводительной документации на сложные технические изделия в электронном виде.

Однако, особое внимание необходимо уделить TDM-системам (Tool Data Management), которые занимают ключевое вспомогательное место на стыке между CAM, PLM, MES и CNC, и выполняют критически важные функции в цифровой технологической подготовке производства, такие как: управления данными о режущем инструменте, оснастке и приспособлениях. Данный модуль осуществляет: подбор инструмента для УП в CAM; проверку его наличия и пригодности (MES/ERP); передачу параметров инструмента на станок (CNC); хранение данных о ресурсе, истории использования и геометрии (PLM/TMS).

Как уже отмечалось ранее, в производственной практике отмечается не исключаемый разброс фактических свойств режущего инструмента, усугубляющийся вариативностью свойств обрабатываемой заготовки, что неблагоприятно влияет на эффективность управления процессом обработки. В данном случае именно TDM модуль может быть наполнен необходимой дополнительной информацией о режущем инструменте и истории его эксплуатации с тем, чтобы снизить уровень неопределенности исходной технологической информации. Повышение оперативности функционирования системы закономерно подводит к необходимости в ряде случаев организации прямого потока информации между TDM модулем и программными средствами технологической подготовки (CAM, CAPP) и производства (MES, SCADA, CNC).

В настоящее время достаточно четко прослеживается тенденция интеграции изначально специализированных CAD/CAE/CAM систем в единую среду создания изделия «от идеи до реализации», что функционально должно обеспечить 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 [41].

Одним из примеров практической реализации описанной выше концепции является САПР ТП ВЕРТИКАЛЬ, в которой на основе импортированной модели

изделия создается комплексная структурно-графическая база данных технологического процесса [31], что позволяет связать цифровую модель изделия с технологическим маршрутом ее изготовления и механическими переходами технологического процесса (рисунки 1.6, 1.7). Теоретической основой создания данной системы стали разработки профессора Базрова Б.М. [19].

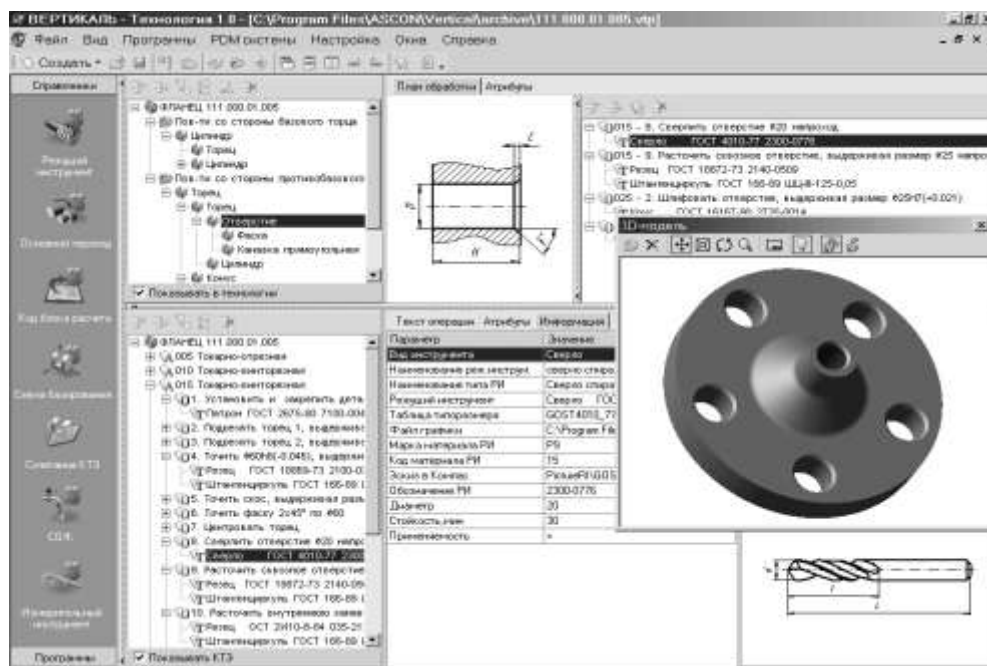


Рисунок 1.6 – Пример реализации объектной модели технологии в САПР ТП ВЕРТИКАЛЬ



Рисунок 1.7 – Дерево конструктивных элементов объекта производства во взаимосвязи с механическими переходами технологическим процессом обработки (САПР ТП ВЕРТИКАЛЬ)

Для полноценной интеграции в единую информационную систему предприятия помимо графического массива технологическая составляющая базы данных должна включать: паспортные данные оборудования, а также его размещение по цехам и участкам; классификатор и параметры технологической оснастки (приспособлений, режущего, вспомогательного, измерительного инструмента); нормативы времени на основные и вспомогательные виды работ; справочные данные по параметрам операционной технологии; нормативно-справочная информация; математический аппарат для автоматизированного расчета режимов обработки и определения норм времени на переходы и операции (в процессе проектирования с привлечением встроенной экспертной системы).

Помимо того, целесообразным является хранение: архива разработанных технологических процессов, а также типовых переходов; библиотека технологических процессов для различных условий производства.

Проектные варианты маршрутов технологического процесса, включающие характеристики оборудования оснастки, режущего инструмента, режимов резания и норм времени формируют сетевую структуру графов проектируемой технологии.

В рамки концепции единой информационной автоматизированной среды укладывается и совершенствование математического и методического аппарата конструкторского и размерного анализа изделия, позволяющие системе автоматизированного планирования технологических процессов выбирать рациональные технологии изготовления [121].

Разработанные программные средства помогают решать и задачи планирования, направленные на снижение производственных затрат за счет исключения простоя оборудования. Для составления расписаний как всего производства, так и отдельных производственных подразделений (цеха и участки) применяются системы планирования и обеспечения производственного процесса (APS, MES, ERP). К сожалению, перечисленные средства не лишены определенных недостатков. Функциональные алгоритмы данных систем имеют эвристический характер и зачастую не учитывают транспортные операции, а также переналадку оборудования, регулирование режимов обработки или настройку исполнительного

размера и др. Как следствие разработанные планы-графики и производственное расписание будут с высокой вероятностью нарушаться [64].

Таким образом, существующие средства цифровизации позволяют существенно повысить уровень взаимодействия отдельных этапов подготовки и функционирования производства, доступность необходимой информации и оперативность ее передачи, но для комплексного решения задачи повышения эффективности предприятия необходимо соответствующее информационное обеспечение.

В качестве информационного обеспечения при технологической подготовке традиционно используются справочные данные, сведенные в табличные логические модели. Классическим примером тому являются таблицы достижимой экономической точности обработки, которые охватывают наиболее распространенные методы обработки и содержат сведения о точности размеров, шероховатости поверхности и величине дефектного слоя. На этом принципе основываются основные справочные и учебные материалы для технологических специальностей. Табличные базы не требуют значительных объемов хранилищ, являются доступными и не вызывают затруднений в работе, однако не лишены определенных недостатков.

Прежде всего, не учитывается стохастический характер процесса обработки, фактор технологической наследственности (фактически не учитывается предыдущие операции, в том числе изменение параметров поверхностного слоя детали) и зависимость результатов обработки от технологических возможностей конкретного производства. Названные проблемы требуют существенного расширения объема информационной базы и, в ряде случаев, модернизации логической структуры информационных массивов.

Прежде всего, не учитывается стохастический характер процесса обработки, а также фактор технологической наследственности (фактически не учитывается предыдущие операции, в том числе изменение параметров поверхностного слоя детали). Создание и развитие новых технологических методов обработки, требующих существенного расширения информационной базы.

Все вышеперечисленное выступает предпосылкой изменения принципов построения информационного обеспечения технологической подготовки. Одним из наиболее перспективных направлений является технология хранения и обработки больших объемов информации с использованием многомерных информационных структур – OLAP-систем (англ. Online Analytical Processing) [192].

Технология заключается в создании многомерной организации информационной базы больших массивов данных. В литературе подобная структура визуализируется в виде «информационного гиперкуба» (рисунок 1.8).

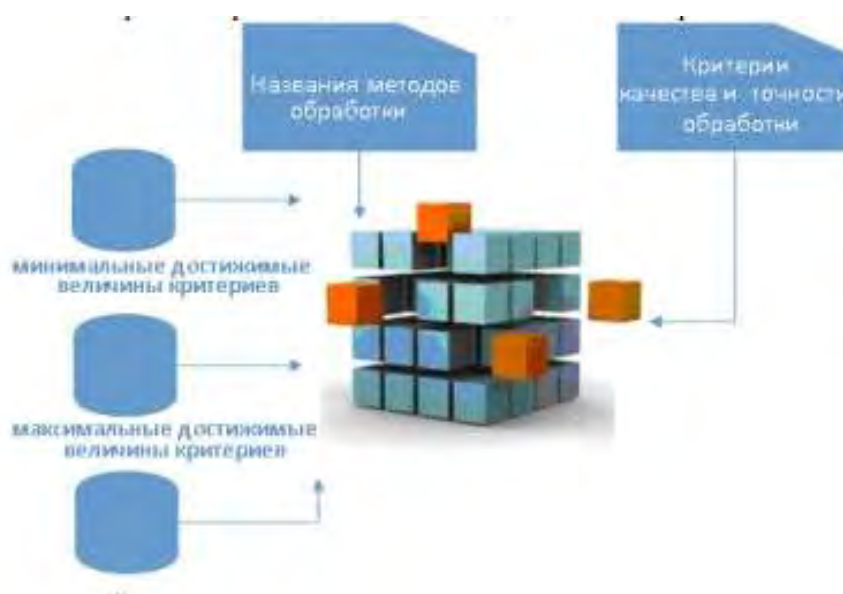


Рисунок 1.8 – Общая схема OLAP структуры

В работах Ю.Л. Чигиринского [218] достаточно полно проанализированы и проработаны вопросы наполнения базы данных на основе OLAP структуры технологической информацией, включая информационные таблицы точности и тп. Так автором обосновывается целесообразность использования гибридных HOLAP-структур, что позволяет упростить переход к оптимальному проектированию с использованием вероятностных таблиц точности обработки. Кроме того, единый информационный массив может расширяться за счет наработки данных в рамках конкретного предприятия на основе анализа существующих и создаваемых методов обработки. Тем самым нарабатывается информационное обеспечение,

актуализированное применительно к условиям конкретного производства и определяющее высокую надежность и достоверность сформированных моделей [192].

Помимо базы данных, систематизирующей существенный объем технологической информации и обеспечивающей поиск и доступ до необходимых ячеек, требуются и другие средства автоматизации.

Это требует наполнение информационных структур данными непосредственно с производства (участков, операций и т. д.). Существенно облегчают решение данной задачи цифровые измерительные средства, современные модели которых позволяют работать с поддержанием технологии беспроводной передачи данных не только между прибором и компьютером, но и между отдельными приборами. Подобные возможности закономерно ведут к эволюции производственных систем измерения и контроля, а также учета измерительной информации. Однако даже эти средства не позволяют в полной мере обеспечить сплошной контроль изделия на всех этапах производства.

Кроме того, некоторые характеристики как выпускаемых изделий или же, например режущего инструмента требуют использования разрушающих методов контроля, что в условиях производства не всегда является приемлемым.

Вместе с тем контроль и измерения требуются и при выполнении технологических операций с целью обеспечения формирования требуемых параметров изделия в установленном допуске. Характер же большинства процессов обработки существенно ограничивают использование прямых измерений, в отличие от косвенных измерений. Это позволяет не только выполнять мониторинг хода технологической операции, но и строить системы адаптивного управления, в том числе на базе технологического оборудования с ЧПУ.

Иначе говоря, естественное развитие производственного оборудования до уровня цифровых технологических систем [71], обладающих определенной степенью автономности за счет приобретения «технологического интеллекта» [79] позволяет не только решить задачу повышения эффективности операций, но и информировать о длительности, динамике технологических операций

вышестоящие системы управления производством. Таким образом, цифровое производство должно опираться на разработки, связанные с применением адаптивного управления производственными процессами» [42].

Цифровые производственные системы, как следующий этап развития систем адаптивного управления и обладающие технологическим интеллектом, должны строиться на информационных каналах мониторинга процесса резания, применимых в производственных условиях и не требовать существенного изменения принципов построения технологического оборудования.

Поскольку в условиях реального производства в качестве информационных каналов отслеживания хода процесса обработки при вышеописанных условиях могут быть использованы косвенные характеристики (измерения термо-ЭДС, динамометрические, виброакустические измерения), то повышение уровня надежности системы возможно за счет их интеграции и совместного анализа. Кроме того, это требует накопления информационного массива данных в памяти с целью обучения и развития системы. Коррекцию же режимов резания целесообразно построить в виде многоуровневой поэтапной оптимизации в соответствии с требуемыми характеристиками результата обработки [200].

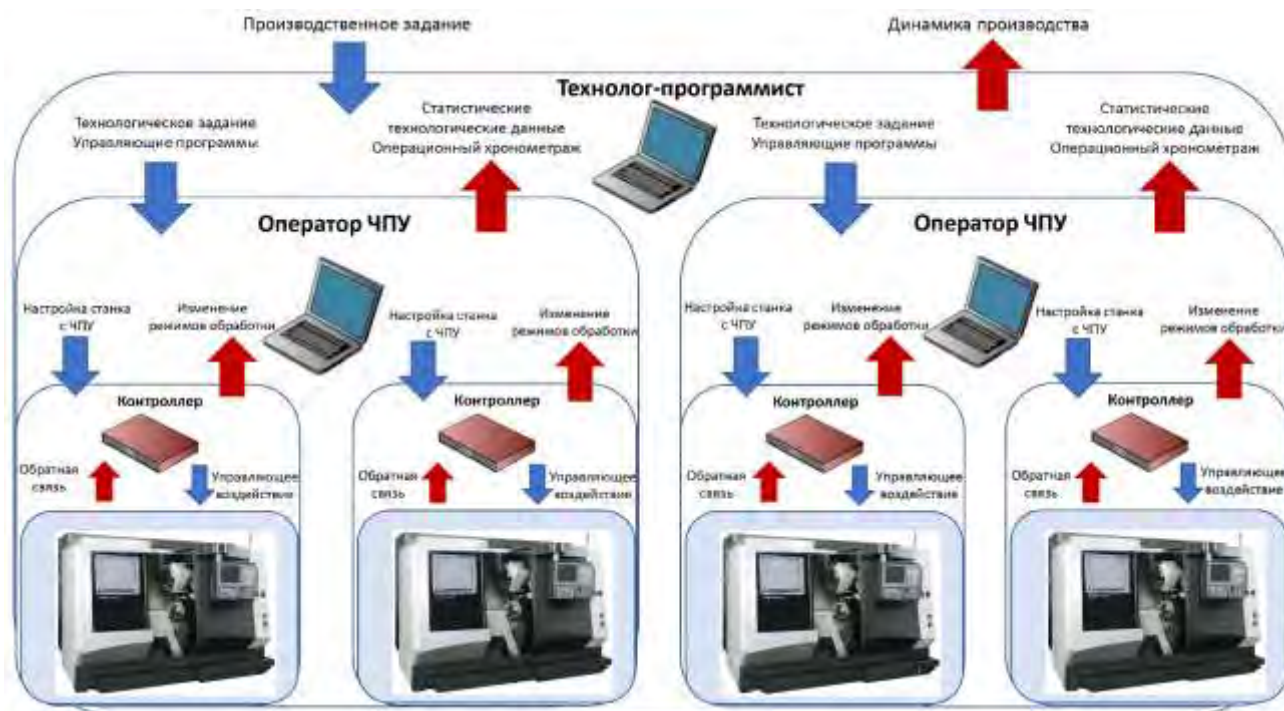


Рисунок 1.9 – Схема взаимодействия цифровой производственной системы с информационной средой предприятия

Расширение возможностей технологического оборудования с ЧПУ за счет установки модуля адаптивного управления и интеграция производственной системы в информационную сеть позволяет изменить порядок технологической подготовки и оперативного управления производственным подразделением (рисунок 1.9).

Получив производственное задание, включающее параметрическую цифровую модель изделия, объем выпуска и прочую информацию о технологическом оборудовании, оснастке и инструменте и тд., технолог с помощью соответствующих программных средств (CAM, CAPP) может разработать пооперационный маршрут обработки, управляющие программы для требуемых станков с ЧПУ и распределить технологические задания по подразделениям. После укомплектования и настройки занятых производственных единиц оборудования операторами ими же осуществляется контроль выполнения обработки. При штатном режиме работы с цифровой производственной системы по каналам обратной связи поступает информация о динамике и длительности технологической операции, которая учитывается в MES и других производственных системах более высокого уровня. В случае выхода за допустимую область регулирования режимов обработки адаптивная система сообщает оператору о невозможности обеспечения требований и необходимости корректировки технологической операции (изменении схемы базирования, последовательности обработки и т. д.) для передачи информации технологу.

Это позволяет не только сократить длительность этапа технологической подготовки, накопить базу технологической информации применительно к данному производству, но и повысить эффективность оперативного управления.

Однако, базовым элементом любого машиностроительного производства является технологическое оборудование. Поскольку именно из стабильности динамики и результатов отдельных операций формируются характеристики производимой продукции. Результаты огромного количества исследований подтверждают, что ход и стабильность процесса резания, определяемые особенностями контактных и деформационных процессов в зоне

стружкообразования оказывает существенное влияние не только на динамику станка и износостойкость режущего инструмента, но и параметры обработанных поверхностей производимых деталей. Причем с ростом скорости резания, а значит температуры и деформации данное влияние становится еще более выраженным [201].

Поэтому развитие технологического оборудования до уровня цифровых производственных систем, обладающих достаточным уровнем автономности и адаптивности, является основой и ключевым направлением в рамках концепции трансформации производственной системы и интеграции цифровых технологий, в частности в условиях многономенклатурного производства.

1.4 Общая характеристика работы

Таким образом, на основании предварительных экспериментальных исследований, а также в результате аналитического обзора современного научно-технического уровня в области технологической подготовки производства, была **выявлена актуальная научно-производственная проблема** обеспечения надежности и стабильности результатов машиностроительного производства при условии, что применяемое оборудование и механизмы имеют ограниченные технические возможности обеспечения стабильности.

Установлено, что современные цифровые 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.

В условиях цифровизации технологической подготовки производства и перехода к интеллектуальному производству возникает необходимость

формирования адаптивных технологических решений, основанных на физических закономерностях лезвийной обработки, включая процессы формирования свойств поверхностного слоя и изнашивания инструмента.

Учитывая 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, особое значение приобретают практические задачи повышения эффективности обработки путём внедрения интеллектуализированных решений в производственную среду. В связи с этим сформулирована **тема диссертационного исследования**: «Методология построения функционально ориентированных интеллектуальных технологических систем механической обработки».

Объектом исследования является автоматизированное механообрабатывающее производство, функционирующее на основе интеграции современных машиностроительных технологий с средствами информационно-цифровой инженерии.

Предмет исследования - организационные, физические, временные и информационные взаимодействия между элементами системы управления стабильностью процесса и результатами механической обработки при использовании интеллектуальных технологических систем.

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.

В соответствии с поставленной целью в диссертационной работе решаются следующие основные **задачи исследования**:

5. 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».

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

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

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

Методы и средства исследования: при выполнении диссертационной работы использовался комплекс методов, соответствующих научным специальностям 2.5.5 и 2.5.6:

Теоретические исследования основывались на положениях технологии машиностроения, теории резания, материаловедения, механики контактного взаимодействия и разрушения, физики твёрдого тела. Для количественного анализа использовались методы математического моделирования, методики факторного анализа, планирование экспериментов, статистического анализа.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях на оборудовании, оснащённом системами числового программного управления (ЧПУ), средствами измерения параметров резания и диагностирования элементов технологической системы. Применялись современные технологические измерительные комплексы, цифровые системы регистрации и обработки сигналов, а также программно-аппаратные средства автоматизации, соответствующие требованиям к построению интеллектуализированных производственных систем.

Достоверность полученных результатов, научных положений и выводов обеспечивается использованием обоснованных методов планирования экспериментов, корректным применением средств математического моделирования и статистического анализа, а также подтверждается результатами экспериментальных исследований, выполненных с применением современного технологического оборудования, высокоточных измерительных систем и лабораторно-исследовательских установок.

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

Полученные в ходе исследования результаты, разработанные теоретические положения и методология подготовки механообрабатывающего производства вносят существенный научный вклад технологическую науку. В частности:

- 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

Результаты исследования обладают высокой практической значимостью для задач повышения эффективности и надёжности технологических процессов механической обработки.

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.

Апробация результатов

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.

Основные результаты и положения диссертационного исследования представлялись 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 (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "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» (Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград, 2019 г.), XII Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении (ИНМАШ 2021) (Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, 2021 г.), 14-ой международной научно-технической конференции «Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли» (Брянский государственный технический университет, г. Брянск, 2022 г.), на межкафедральном семинаре на базе Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана в рамках XV Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении» (г. Москва, 2023 г.), на межкафедральном семинаре на базе ФГБОУ ВО «ДГТУ» от 26.09.2024 г. в рамках XVI Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии машиностроения, авиации и транспорта» (г. Ростов-на-Дону, 2024 г.).

Глава 2. Методика проведения экспериментальных исследований

2.1 Технические характеристики и функциональные возможности металлорежущего оборудования, применённого в экспериментальных исследованиях

Экспериментальные исследования процесса резания проводились на токарно-револьверном станке с ЧПУ OKUMA-Pumori Genos L300-M (Россия/Япония) (рисунок 2.1). Станок предназначен для высокопроизводительной обработки деталей с возможностью выполнения токарных работ, фрезерных и резьбонарезных работ с использованием как стационарного, так и вращающегося инструмента, устанавливаемого в револьверную головку.

Станок оснащен системой ЧПУ OSP-P300L, а также датчиком привязки инструмента (Touch setter), который состоит из фиксированной базы и мобильной «Руки».



Рисунок 2.1 – Токарно-револьверный станок с ЧПУ OKUMA-Pumori Genos L300-M (Россия/Япония)

Основные технические характеристики токарно-револьверного станка с ЧПУ OKUMA-Pumori Genos L300-M приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики токарно-револьверного станка с ЧПУ OKUMA-Pumori Genos L300-M

Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра
1	2	3
1. Параметры рабочей зоны:		
Максимальный диаметр над станиной	мм	520
Максимальный диаметр над суппортом	мм	370
Максимальный диаметр обработки	мм	300
Максимальная обрабатываемая длина	мм	450
2. Перемещения по осям		
Перемещение по оси X	мм	235
Перемещение по оси Z	мм	520
Перемещение по оси C	град.	360° (0,001°)
3. Параметры шпинделя		
Частота вращения главного шпинделя	об/мин	25 - 3000
Количество диапазонов скоростей вращения	-	2
Регулирование частоты вращения в диапазоне	-	Бесступенчатое
Присоединительный конец шпинделя	-	JIS A2-8
Диаметр отверстия шпинделя	мм	80
Наружный диаметр шпинделя	мм	120
4. Параметры инструментального револьвера		
Тип револьверной головки тип	-	M-V12 VDI
Количество одновременно установленного инструмента	шт	12
Частота вращения приводного инструмента	об/мин	4500
Сечение державки резца	мм	25×25
Время индексирования револьверной головки	сек	0,1
5. Параметры перемещений		
Ускоренные перемещения	м/мин	X: 20, Z:25 (X:20, Z:20)
Диапазон осевых подач при резании	мм/об	0,001-1000
6. Мощность приводов		
Мощность главного мотора-шпинделя (30 мин./постоянно)	кВт	15/11
Мощность приводного инструмента	кВт	3,3
Мощность привода продольных перемещений по осям	кВт	X: 2.5; Z: 3.8
Мощность помпы	кВт	0,8
7. Габаритные параметр станка		
Высота	мм	1740
Площадь под станком (длина, ширина)	мм	2280 × 1800
Масса станка с системой ЧПУ	кг	4000 (6600)

2.2 Выбор обрабатываемых и инструментальных материалов

В качестве обрабатываемых материалов применялись конструкционные легированные стали 40Х и 30ХМА – группа обрабатываемости «Р» согласно ГОСТ Р ИСО 513-2019, нержавеющей стали группы обрабатываемости «М» согласно ГОСТ Р ИСО 513-2019 (коррозионностойкая жаропрочная сталь мартенситного класса 40Х13, коррозионностойкая жаропрочная сталь мартенсито-ферритного класса 12Х13, коррозионностойкая жаропрочная сталь мартенситно-ферритного класса 14Х7Н2 и конструкционная криогенная сталь аустенитного класса 12Х18Н10Т), а также жаропрочные высоколегированные стали 13Х11Н2В2МФ и 08Х21Н6М2Т ГОСТ 5632-2014. В качестве заготовок использовался прокат сортовой стальной горячекатаный круглый по ГОСТ 2590-2006. Обрабатываемые материалы использовались в состоянии поставки. Химический состав обрабатываемых материалов по ГОСТ 5632-2014 и ГОСТ 4543-2016, механические свойства по ГОСТ 5949-2018.

Химический состав обрабатываемых материалов приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Химический состав

Сталь	Химический состав, %											
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti	Mo	W	V
40Х	0.36 - 0.44	0.17 - 0.37	0.5 - 0.8	до 0.3	до 0.035	до 0.035	0.8 - 1.1	до 0.3				
12Х13	0.09 - 0.15	до 0.8	до 0.8	до 0.6	до 0.025	до 0.03	12 - 14					
40Х13	0.35 - 0.44	до 0.6	до 0.6	до 0.6	до 0.025	до 0.03	12 - 14					
14Х17Н2	0.11 - 0.17	до 0.8	до 0.8	1.5 - 2.5	до 0.025	до 0.03	16 - 18	до 0.3	до 0.2			
12Х18Н10Т	до 0.12	до 0.8	до 2	9 - 11	до 0.02	до 0.035	17 - 19	до 0.3	5 - 8			
13Х11Н2В2МФ	0.1 - 0.16	до 0.6	до 0.6	1.5 - 1.8	до 0.03	до 0.03	10.5 - 12			0.35 - 0.5	1.6 - 2	0.18 - 0.3
08Х21Н6М2Т	до 0.08	до 0.8	до 0.8	5.5 - 6.5	до 0.025	до 0.035	20 - 22		0.2 - 0.4	1.8 - 2.5		

В качестве инструментального материала при проведении экспериментальных исследований применялись как серийно выпускаемые сменные многогранные неперетачиваемые пластины (СМНП), так и пластины с

наноструктурированным поверхностным слоем и измененными электрофизическими свойствами марок Sandvik и Korloy (таблица 2.3). Геометрические параметры, классификация и система обозначений сменных неперетачиваемых многогранных твердосплавных пластин регламентированы межгосударственным стандартом ГОСТ 19042-80 (ИСО 1832-85).

Таблица 2.3 – Краткая характеристика режущего инструмента

Группа обрабатываемости	Краткое описание
P	Тип основы - (SUBSTRATE) HC, метод нанесения износостойкого покрытия – CVD, область применения по ISO – чистовая и получистовая обработка, тип покрытия – мультислойное CVD покрытие, включающее в себя слои $Ti(CN)/Al_2O_3/TiN$, с дополнительной обработкой поверхности для снижения внутренних напряжений в покрытии.
Обозначение инструмента: Sandvik WNMG 08 04 08-PM 4225	Рекомендованные производителем режимы обработки: $t=0.5-4$ мм; $S=0.15-0.5$ мм/об; $V=250-305$ м/мин
M	Тип основы - (SUBSTRATE) HC, метод нанесения износостойкого покрытия – CVD, область применения по ISO – чистовая и получистовая обработка, тип покрытия – мультислойное CVD покрытие, включающее в себя слои $Ti(CN)/Al_2O_3/TiN$, с дополнительной обработкой поверхности для снижения внутренних напряжений в покрытии.
Обозначение инструмента: Sandvik WNMG 08 04 08-MM 2220	Рекомендованные производителем режимы обработки: $t=0.5-4$ мм; $S=0.1-0.45$ мм/об; $V=155-285$ м/мин
M	Тип основы – (SUBSTRATE) HC, метод нанесения износостойкого покрытия – CVD, область применения по ISO – чистовая и получистовая обработка, тип покрытия – мультислойное CVD покрытие, включающее в себя слои $Ti(CN)/Al_2O_3/TiN$, с дополнительной обработкой поверхности для снижения внутренних напряжений в покрытии.
Обозначение инструмента: Korloy WNMG080408-MM NC9125	Рекомендованные производителем режимы обработки: $t=0.5-4$ мм; $S=0.12-0.45$ мм/об; $V=90-220$ м/мин
S	Тип основы - (SUBSTRATE) HC, метод нанесения износостойкого покрытия – Ultra Coating CVD покрытие.
Обозначение инструмента: Korloy WNMG080408-VP2 UNC805	Рекомендованные производителем режимы обработки: $t=0.2-2$ мм; $S=0.1-0.3$ мм/об; $V=30-80$ м/мин

Геометрические параметры, классификация и система обозначений сменных неперетачиваемых многогранных твердосплавных пластин регламентированы межгосударственным стандартом ГОСТ 19042 – 80 (ИСО 1832-85).

2.3 Вспомогательное оборудование, использованное в экспериментальных исследованиях

Для обеспечения достоверности, воспроизводимости и корректности проведения экспериментальных исследований по оценке работоспособности и ресурса режущего инструмента, а также для реализации системы многоканальной диагностики, в лабораторных и производственных условиях применялся ряд вспомогательного оборудования. Его функциональное назначение заключалось в подготовке, мониторинге, регистрации параметров и обеспечении требуемой точности измерений.

Всё вспомогательное оборудование проходило предварительную калибровку и поверку в соответствии с требованиями действующих стандартов и методик. Его применение обеспечило реализацию принципов многоканальной диагностики, способствовало повышению точности оценки параметров процесса резания и позволило сформировать достоверную экспериментальную базу для последующего статистического анализа.

Экспериментальные исследования температуропроводности и теплопроводности выполнены методом лазерной вспышки (Рисунок 2.2) на приборе LFA 467 [246]. Устройство обеспечивает автоматическое измерение тепло- и температуропроводности образца в диапазоне температур ($-100 \dots +500$ °C). Диапазон измерения теплопроводности ($0,1 \dots 4000$ Вт/(м*К)), температуропроводности – ($0,01 \dots 2000$ мм²/с). Относительная погрешность измерений не превышает 5 %. Метод исследования представляет собой современную высокотехнологичную модификацию известного метода «горячей плиты» [127], позволяющего определять теплопроводность однородных и многослойных образцов относительным способом – в сравнении с эталоном.

Нижняя поверхность образца нагревалась импульсом ксеноновой лампы длительностью 0.6 мс и энергией до 10 Дж. Изменение температуры верхней поверхности образца регистрировалось ИК детектором (МСТ).



Общий вид

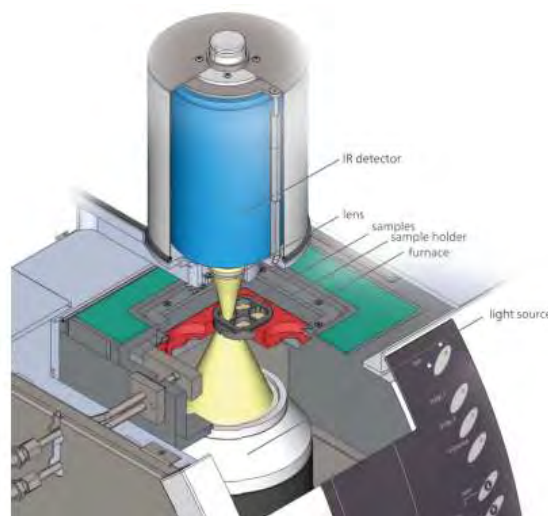
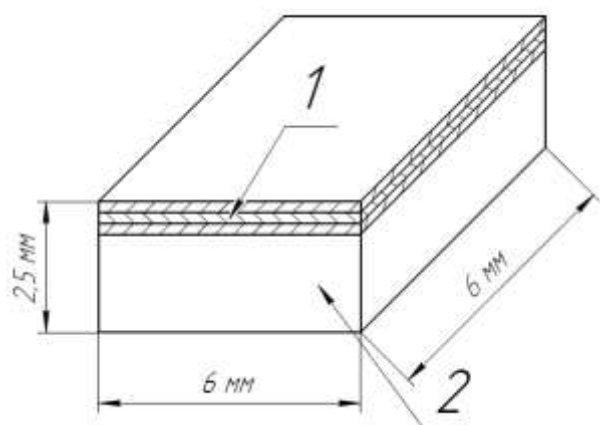


Схема измерения

Рисунок 2.2 – Прибор для измерения теплофизических характеристик материалов

Образцы для оценки теплофизических свойств режущего инструмента вырезались из многогранной твердосплавной пластины методом электрической эрозии на электроэрозионном проволочно-вырезном станке LK630 (рисунок 2.3). Одна из площадок образца имеет исходное износостойкое покрытие, а другая – твердосплавный субстрат.



исходные неперетачиваемые пластины



вырезанные образцы

Рисунок 2.3 – Образец для измерения теплопроводности твердого сплава с многослойным износостойким покрытием:

(1) многослойное износостойкое покрытие; (2) твердосплавная основа

Измерения проводились после термостатирования образцов в течение 60 мин при постоянной температуре. Интервал времени между «выстрелами» составлял 7 мин. Серия измерений выполняется в автоматическом режиме с фиксацией результатов в протоколе (Рисунок 2.4). В протокол заносятся усредненные по серии «выстрелов» (вспышек) – 3..7 «выстрелов» в серии, – значения температуропроводности и теплопроводности и статистические оценки полученных значений.

Температуропроводность (Средн.) - NETZSCH LFA Анализ

Основная информация

База данных :	proteus8.3.mdb	Примечание (измер.) :	---
Прибор :	LFA 467 (LFA46700A-0168-L)	Ср таблица :	A2 - A2
Код образца :	Резец	Таблица расширения :	dL_const
Дата :	03.10.2023	Печь :	LFA 467 Steel
Материал :	A2 - A2	Прободержатель :	4 samples square/6.0mm
Нач. плотность (20,0 °C) /(г/см ³) :	14,111	Лампа :	LFA 467 Flash Lamp
Образец :	A2	Термопара печи :	E
Тип :	Один слой	Термопара образца :	E
Положение образца :	A2	Хр / Тп образца :	4,00 / 4,00
Область Детектирования (Диаметр)/мм :	3,7	Хр / Тп печи :	4,00 / 4,00
Фильтр% :	0	Код вычисления :	Стандартный + к.и./1-0-1/1-0
Толщина (RT) /мм :	2,7400	Газ 2 MFC :	HELIUM
Диаметр /мм :	5,800	Защитный MFC :	HELIUM
Сенсор :	MCT		
Оператор :	Нилидин Д.А.		

Результаты

Номер выстрела	Температура °C	Температуропроводность мм ² /сек	Станд. откл. мм ² /сек	Неопределенность %	Теплопроводность Вт/(м*К)	Вычисление Ср. Дж/(г*К)
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	25,0	23,450	0,090	1,1	67,472	0,204
8, 9, 10, 11, 12, 13, 14	50,0	22,344	0,044	1,1	65,004	0,206
15, 16, 17, 18, 19, 20, 21	100,0	20,761	0,100	1,0	61,181	0,209
22, 23, 24, 25, 26, 27, 28	150,0	19,448	0,204	0,9	56,725	0,207
29, 30, 31, 32, 33, 34, 35	200,0	18,666	0,219	0,9	55,306	0,210
36, 37, 38, 39, 40, 41, 42	250,0	18,435	0,148	0,9	55,652	0,214
43, 44, 45, 46, 47, 48, 49	300,0	18,095	0,135	0,8	53,765	0,211
50, 51, 52, 53, 54, 55, 56	350,0	17,794	0,108	0,7	54,237	0,216
57, 58, 59, 60, 61, 62, 63	400,0	17,457	0,181	0,7	52,765	0,214
64, 65, 66	450,0	17,201	0,079	0,6	53,388	0,220

Создано программным обеспечением NETZSCH Proteus

Рисунок 2.4 – Пример протокола исследований на приборе LFA 467

Удельная теплоемкость (C_p) определялась относительным методом с использованием в качестве эталонов образцов из РОСО графита. Для обеспечения равной черноты с поверхностями эталона, на поверхности исследуемых образцов напылялись слои графита.

Для комплексной оценки 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.

Комплексные электрические свойства твердосплавного режущего инструмента с многослойными износостойкими покрытиями и, в том числе, с наномодифицированной рабочей поверхностью в рамках настоящего исследования оценивались по величине полного электрического сопротивления образца. Исследовались поверхностное и объемное электрическое сопротивление (электрическая проводимость) твердосплавных пластин.

Измерения поверхностной электропроводности выполнены на образцах с нанесенным по всей поверхности многослойного износостойкого покрытия на каждой из внешних поверхностей, исключая поверхность центрального сквозного отверстия.

Измерения проводились на постоянном токе при помощи многофункционального цифрового измерителя MS8226 DMM. Разрешение прибора в диапазоне 400 Ом составляет 0,1 Ом, паспортная относительная погрешность 1 %, разрешение в диапазоне 40 МОм – 10 кОм, паспортная относительная погрешность не более 2 %. Прикладываемое к исследуемому образцу в процессе измерения постоянное напряжение не превосходит 9 В. Измерения проводились при комнатной температуре, поскольку для материалов износостойкого покрытия (карбиды, оксиды, нитриды, карбонитриды), относящимся к соединениям с диэлектрическим типом проводимости [156], электропроводность возрастает при повышении температуры. Следовательно, измерения при комнатной температуре дают нам минимальное значение электропроводности (максимальное значение электрического сопротивления) по отношению к их значениям в процессе резания.

Перед началом измерений каждая поверхность подвергалась очистке для удаления возможных загрязнений, повышающих поверхностную проводимость.

К измеряемой поверхности на расстоянии 10 мм друг от друга прикладывались выходные концы измерительных щупов мультиметра. Каждое измерение повторялось 10 раз для каждой исследуемой грани образца. Наибольшее

и наименьшие значения, полученные при измерениях, отбрасывались. Как заведомо ошибочные, поскольку усилие прижима измерительных щупов в поверхности образца может влиять на результаты измерений в силу пьезорезистивных свойств исследуемых материалов – при увеличении усилия прижима измеренное электрическое сопротивление снижается.

Измерения объемного сопротивления производились в специальной измерительной ячейке (Рисунок 2.5). Исследуемый образец 1 помещался между плоскими электродами 2 и 3. Верхний электрод 3 прижимался к образцу посредством пружины 4, чем обеспечивалось постоянство усилия прижима в процессе измерения.

Внутри корпуса измерительной ячейки 5 помещен диэлектрический цилиндр из эбонита, изолирующий шток верхнего измерительного электрода 6 от корпуса. Подключение к измерительным щупам осуществлялось при помощи медных облуженных контактов 7.

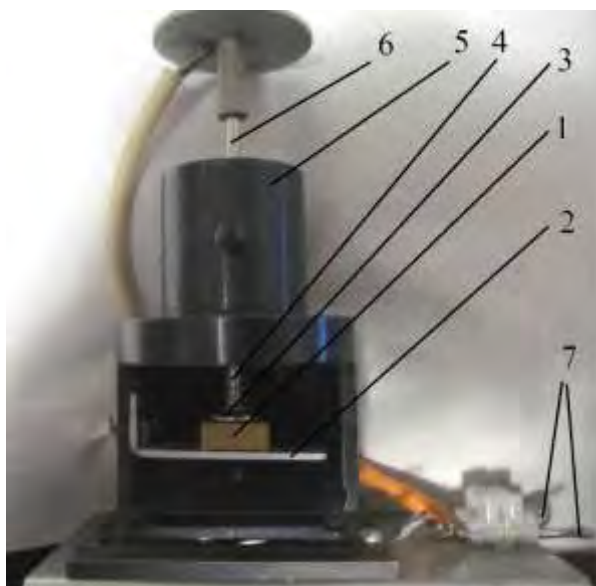


Рисунок 2.5 – Измерительная ячейка для исследования объемных электрических свойств.

Работоспособность ячейки тестировалась с помощью магазина сопротивлений Р33, подключенного последовательно с ячейкой к измерительному прибору. Разрешающая способность магазина Р33 составляет 0,1 Ом, класс точности 0,2 [171].

Для исключения поверхностной проводимости, величина, которая, как правило, превосходит объемную проводимость, износостойкое покрытие удалялось со всех ребер образца таким образом, чтобы остающаяся покрытая поверхность каждой грани была отделена от соседних покрытых областей.

Всего было проделано по 10 измерений на постоянном токе с помощью мультиметра MS8226 DMM для каждой пары граней (3 – 5 и 4 – 6).

Для исследования поверхностного и объемного сопротивления образцов также использован измеритель иммитанса E7-25 (Рисунок 2.6) производства белорусского объединения МНИПИ. Прибор позволяет производить измерения активной проводимости на переменном токе частотой 1.0, 50.0, 100.0 кГц в диапазоне $10^{-11} \dots 10^1$ сименс. Пределы измерений активного сопротивления $10^{-5} \dots 10^9$ Ом. Относительная погрешность в диапазоне измеряемых значений сопротивления до 100 Ом на измерительной частоте 1000 Гц не превосходит 0,25 %, на частоте 50 кГц не превосходит 0,5 %.



Рисунок 2.6 – Общий вид прибора для измерения электрического сопротивления условно диэлектрических материалов

Перед началом проведения измерений проводилась экспресс-проверка измерителя иммитанса E7-25. В качестве эталона применялся проволочный резистор ПЭ-15 номиналом $220 \text{ Ом} \pm 10\%$. Проволочный резистор был выбран на том основании, что такие резисторы имеют наименьшую температурную зависимость сопротивления (ТКС).

По результатам проведенных измерений (не менее 10) определялись: среднее значение, стандартное отклонение (STDV), а также коэффициент вариации.

Комплекс металлографических исследований СМНП проводился методами *FIB*микроскопии и спектрального анализа на микроскоп *FEI Versa 3D* (рисунок 2.7), который имеет следующие характеристики:

- разрешение эл.пучка: 0.8 нм при 30 кВ СПЭМ;
- разрешение ионного пучка: 5 нм при 30 кВ СПЭМ.



Рисунок 2.7 – Микроскоп FEI Versa 3D

Данный микроскоп позволяет исследовать поверхностные и подповерхностные области любых образцов (нанометрового и микрометрового масштаба), а также изготавливать кросс-секции объекта исследования; исследовать токопроводящие образцы в режиме высокого вакуума или токопроводящие и непроводящие образцы в режиме высокого и низкого вакуумов. Программное обеспечение *Auto Slice* и *View G3* позволяет выполнять трехмерный анализ характеристик широкого спектра материалов.

Профилограммы микронеровностей поверхности СМНП, а также обработанных поверхностей и значения показателей шероховатости R_a , R_z , R_q регистрировались с помощью профилографа-профилометра «Mahr» MarSurf M 300, (рисунок 2.8), а также с помощью портативного измерителя шероховатости Mitutoyo surftest sj-210 (рисунок 2.9).



Рисунок 2.8 – Профилограф-профилометр MarSurf M 300



Рисунок 2.9 – Профилометр Mitutoyo surftest sj-210

Основные технические характеристики профилографа-профилометра «Mahr» MarSurf M 300 и портативного измерителя шероховатости Mitutoyo surftest sj-210 представлены в таблицах 2.4 и 2.5 соответственно.

Таблица 2.4 – Характеристики профилографа-профилометра MarSurf M 300

Принцип измерения	Метод ощупывания
Щуп	Индуктивный опорный щуп
Единицы измерения	с возможностью выбора
Диапазон измерения в мм	0,35
Разрешение профиля	8 нм
Вертикальная шкала	автоматическая/с возможностью выбора
Горизонтальная шкала	В завис. от отсечки шага
Содержимое журнала	R-профиль, MRK, P-профиль (MOTIF), результаты
Фильтр в соответствии с ISO/JIS	Гауссовский фильтр, фильтр Ls
Укороченный ход в соответствии с ISO/JIS	С возможностью выбора
Длина оценки l_n в соответствии с ISO/JIS	1,25 мм, 4 мм, 12,5 мм
Число n базовых длин в соответствии с ISO/JIS	С возможностью выбора: 1-5
Скорость контактирования	0,5 мм/с
Наконечник щупа	5 μ m
Измерительное усилие (Н)	0,00075
ЖК-дисплей	Цветной дисплей высокого разрешения, 3,5", 320 x 240 пикселей
Печать	Регистрация с указанием времени (автоматически/вручную)
Принтер	Термопринтер, 384 точки на горизонтальную строку, 20 символов на строку
Скорость печати	Прибл. 6 строк в секунду соответствует прибл. 25 мм/с
Термобумага	Диаметр: 40,0 мм -1,0 мм, ширина: 57,5 мм -0,5 мм, с покрытием
Функция калибровки	Динамическая
Интерфейсы	Блок привода, комплект питания, USB, MarConnect
Относительная влажность	от 30 % до 85 %
Класс защиты	M 300 = IP 42, RD 18 = IP 40
Диапазон температур эксплуатации	+5°... +40 °C
Диапазон температур хранения	-15°... +55 °C
Электропитание	Никель-металлгидридная батарея, емкость: прибл. 1000 измерений (в завис. от числа и длины распечаток протоколов), подключаемый комплект питания с тремя адаптерами для питания от сети, для напряжения питания от 90 до 264 В
Габариты (Д x Ш x В) блока привода в мм	130 × 70 × 50 мм
Габариты (Д x Ш x В) измерительного прибора в мм.	190 × 140 × 75 мм
Вес блока оценки	Прибл. 1 кг

Таблица 2.5 – Характеристики профилометра Mitutoyo surftest sj-210

Диапазон:	360 мкм
Измерительное усилие:	0,75 мН
Угол измерительного наконечника:	60°
Радиус измерительного наконечника:	2 мкм
Масса:	500 г
Диапазон измерения:	16 мм 4,8 мм (S-тип)
Ход траверсы:	17,5 мм; 5,6 мм (S-тип)
Скорость измерения:	Измерение: 0,25 мм/с; 0,5 мм/с; Возврат: 0,8 мм/с
Длина кабеля:	1 м
Метод измерения:	Индукционный способ
Щуп:	Алмазный наконечник
Радиус опоры:	40 мм
Профили:	Первичный профиль (P), профиль шероховатости (R), DIN 4776
Диапазон отображения:	Ra, Rq: 0,01 мкм – 100 мкм Ry, Rz, Rt, R3z, Rvk, Rpk, Rk, Rp: 0,02 мкм – 350 мкм Vo: 0,000 – 10,00 (мм ³ /см ²) S, Sm: 2 мкм – 4000 мкм Pс: 2,5/см – 5000/см Mr 1, Mr 2: 0 – 100% mr: 1 – 100%
Дисплей:	Цветной ЖК-дисплей 6 см (2.4“) с подсветкой
Стандарты шероховатости:	DIN, ISO, ANSI, JIS
Выборка длины:	SJ-210: 0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм SJ-210R: 0,08 мм, 0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм SJ-210S: 0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм
Количество базовых длин:	x 1, x 3, x 5, x L
Цифровой фильтр:	2CR-75%, 2CR-75% (с корректировкой по фазе)
Длина отсечки:	lc: 0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм, ls: 2,5 мкм, 8 мкм
Питание:	Посредством преобразователя переменного тока (7,5 В 1,5 Вт пост.тока) встроенная или аккумуляторная батарея
Интерфейс:	Интерфейс ввода-вывода RS-232 C, выход DIGIMATIC
Автоматический переход в спящий режим:	Автоматически, после 30 с.

Для регистрации сигнала термоЭДС использовался цифровой осциллограф *Velleman* модели *PCS500* (рисунок 2.10) с частотой дискретизации измеряемого сигнала 0,001...50 МГц, совместимый с персональным компьютером через *LPT* порт.

Для снижения наводок при измерении и фиксировании сигнала термоЭДС в электрических цепях использовался экранированный кабель *SAT-700* с площадью

квадратного сечения медной жилы $1,5 \text{ мм}^2$, а все электрические установки и приборы регистрации сигнала были заземлены.



Рисунок 2.10 – Цифровой осциллограф *Velleman* модели *PCS500*

Методика тарировки СМНП и съема сигнала термоЭДС детально приведена в работах [140, 169, 170, 186].



Рисунок 2.11 – Тензометрический токарный динамометр DKM 2010

Измерение силы резания производилось с помощью тензометрического токарного динамометра DKM 2010 (фирмы «TeLC» Германия), встроенного в резцедержатель в специальной оправке и интегрированного с персональным компьютером (рисунок 2.11). Устройство позволяет выполнять измерения тангенциальной, радиальной и осевой составляющих силы резания. Основные характеристики прибора представлены в таблице 2.6. Программное обеспечение

ХКМ-2000 Trialversion позволяет фиксировать и сохранять осциллограммы сил резания (рисунок 2.12).

Таблица 2.6 – Основные характеристики динамометра DKM 2010

Характеристика	Параметры
Диапазон измерений сил резания по осям, X, Y, Z, Н	0-2000
Разрешающая способность измерений, Н	1
Диапазон регулирования частоты сбора данных, Гц	5-100
Габариты прибора, мм: длина x ширина x высота	206x60x70

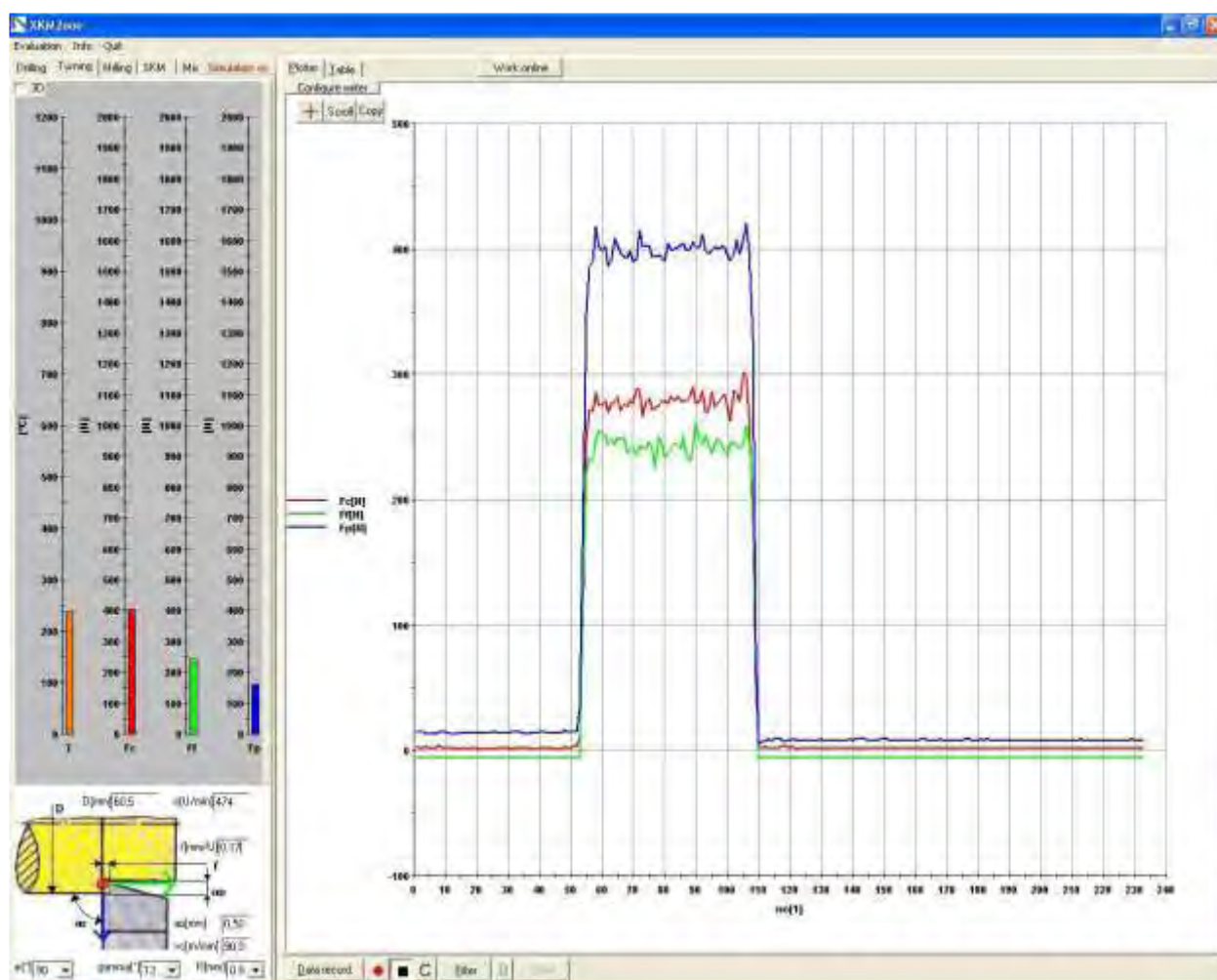


Рисунок 2.12 – Фрагмент интерфейсного меню динамометра DKM 2010

Измерение вибрационного сигнала в процессе резания производилась с помощью виброметра ZETLAB ZET 110, оснащенного акселерометром BC 110

(рисунок 2.13). ZETLAB ZET 110 предназначен для измерения параметров сигналов с различных датчиков, измерения уровней шума и уровней вибрации, отображения измеряемых параметров на экране и непрерывной записи сигналов во встроенную энергонезависимую память объемом до 2 Гб. Основные характеристики виброметра приведены в таблице 2.7.



Рисунок 2.13 – Виброметр ZETLAB ZET 110, оснащенный акселерометром BC 110

Таблица 2.7 – Основные характеристики виброметра ZETLAB ZET 110

Характеристика	Значение
Количество аналоговых входов	1
Тип входа	ICP/по напряжению
Входное сопротивление	100 кОм
Частотные диапазоны одновременно анализируемых сигналов	DC...200 000 Гц
Максимальная частота преобразования по каналу	500 кГц
Количество разрядов АЦП	16
Антиэлайзинговая фильтрация сигналов	до 20 кГц
Максимальное входное напряжение при единичном коэффициенте усиления	$\pm 8,3$ В
Программируемые коэффициенты усиления	20, 40, 60* дБ
Динамический диапазон при частотном диапазоне до 100 Гц	126 дБ
Динамический диапазон при частотном диапазоне до 1 кГц	116 дБ
Динамический диапазон при частотном диапазоне до 10 кГц	106 дБ

Продолжение таблицы 2.7

Динамический диапазон при частотном диапазоне до 100 кГц	96 дБ
Уровень собственных шумов во всей полосе пропускания при максимальном коэффициенте усиления, приведенный к входу	5 мкВ
Объем встроенной энергонезависимой памяти	до 2 Гб
Скорость обмена по шине HighSpeed USB 2.0	480 Мбит/с
Габаритные размеры	180 × 80 × 35 мм
Вес	0,46 кг

Акселерометр ВС 110 предназначен для измерения вибрационного и ударного ускорения в диагностических системах, а также для лабораторных исследований в условиях сильных электромагнитных полей. Основные характеристики акселерометра приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Основные характеристики акселерометр ВС 110

Характеристика	Значение
Чувствительность	100 мВ/г
Частотный диапазон	0,5...10000 Гц
Относительная поперечная чувствительность	≤ 5 %
Амплитудный диапазон	±50 g
Собственные шумы, СКЗ	<0,5 mg
Температурный диапазон	−40...+70°C
Напряжение питания	+18...30 В
Ток питания	3 мА
Уровень постоянного напряжения на выходе	10...13 В
Выходное сопротивление	500 Ом
Материал корпуса	нержавеющая сталь
Тип соединителя	SMA
Масса	30 г

2.4 Применение методов математической статистики для обработки и интерпретации результатов экспериментальных исследований

2.4.1 Терминологический аппарат и базовые категории математической статистики, применяемые в исследовании

В настоящем исследовании используются фундаментальные термины и понятия математической статистики, представленные, в частности, в работах [191, 194], и адаптированные к специфике экспериментальных и производственных исследований.

Опыт (испытание, наблюдение) — это однократное фиксированное наблюдение за реализацией исследуемого процесса в условиях, характеризующихся неизменными входными параметрами. Данный вид наблюдения не допускает оценки статистических характеристик, таких как погрешности или вариативность результатов (см. таблицу 2.9).

Таблица 2.9 – Характеристики наблюдений в зависимости от условий проведения

Вид наблюдения	Повторяемость наблюдений	Постоянство входных параметров	Возможность оценки погрешностей	Возможность построения модели
Опыт	однократно	постоянные	нет	нет
Эксперимент	многократно	постоянные	да	нет
Исследование	многократно	переменные	да	да

Эксперимент определяется как совокупность повторных наблюдений (опытов), проводимых при одних и тех же неизменных условиях. Повторяемость результатов позволяет осуществлять количественную оценку погрешностей и варьированности наблюдаемых величин. Количество опытов n в рамках эксперимента подбирается с учетом требований к статистической значимости и воспроизводимости результатов. Исследование трактуется как серия экспериментов, проводимых в условиях, допускающих изменение одного или нескольких входных параметров. Исследования подразделяются на лабораторные,

осуществляемые в контролируемой среде и, как правило, в соответствии с заранее сформулированным планом эксперимента; производственные, проводимые в естественных (реальных) условиях функционирования исследуемой системы.

Вероятность наступления события определяется как отношение числа опытов, в которых зафиксировано наступление данного события, к общему количеству проведённых опытов. Формально, вероятность P принадлежит интервалу $[0;1]$.

Доверительная вероятность – это установленное пороговое значение вероятности, как правило, близкое к единице. В случае, если вероятность наступления события превышает заданное доверительное значение, данное событие считается достоверным в рамках принятого уровня статистической значимости.

Случайная величина – это количественный параметр, подлежащий измерению в ходе эксперимента и принимающий различные значения в зависимости от условий и случайных факторов. Обозначается как (x_i) .

Среднее значение случайной величины используется как оценка её наиболее вероятного значения и определяется, в случае дискретной совокупности, как среднее арифметическое (2.1):

$$\overline{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (2.1)$$

Стандартное отклонение (2.2) служит мерой разброса значений случайной величины относительно её среднего значения. Оно рассчитывается с учетом природы рассматриваемой случайной величины и объёма выборки:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \overline{X})^2}{n}}. \quad (2.2)$$

Представленные определения и зависимости составляют основу для построения математических моделей и последующего анализа результатов исследования.

2.4.2 Оценка стабильности случайной величины

Под стабильностью технологического процесса в настоящем исследовании понимается его способность сохранять неизменность статистических характеристик параметров в течение определённого интервала времени при отсутствии внешних воздействий. Формально это свойство трактуется как постоянство распределений вероятностей соответствующих случайных величин, описывающих поведение системы или материала, в рамках заданных условий функционирования [194].

Если рассматривать стабильность применительно к конкретной случайной величине, например, измеряемому параметру материала – она интерпретируется как повторяемость её значений при многократных измерениях в идентичных условиях. Иначе говоря, речь идёт о воспроизводимости результатов, отражающей устойчивость характеристик объекта исследования.

Для количественной оценки стабильности случайной величины в работе используется коэффициент вариации (2.3), определяемый как отношение стандартного отклонения к среднему значению:

$$V = \frac{S}{\bar{X}}. \quad (2.3)$$

Таблица 2.10 – Сравнение понятий «однородность» [265] и «стабильность»

Значения коэффициента вариации	Качественная оценка однородности	Качественная оценка стабильности
$V \leq 0,17$	высокая однородность	процесс стабильный
$0,17 < V \leq 0,33$	удовлетворительная однородность	
$V > 0,33$	неоднородность процесс	процесс нестабильный

Для выборочных совокупностей большого объема, характеризующихся нормальным законом распределения, применение коэффициента вариации в качестве критерия оценки стабильности демонстрирует высокую степень согласованности с общепринятыми статистическими подходами [193].

При малых значениях коэффициента вариации, свидетельствующих о незначительной относительной дисперсии случайной величины, интегральная

вероятность, рассчитываемая в предположении нормального распределения, стремится к единице. При общепринятом критерии стабильности $V \leq 0,33$ интегральная вероятность (2.4), рассчитанная для нормального распределения (таблица 2.11), $\Phi \geq 0,9973$, что соответствует стабильному процессу.

$$\Phi(V) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{1/V} V^{-2} \cdot e^{-1/2 \cdot V^{-2}} dV. \quad (2.4)$$

Таблица 2.11 – Интеграл вероятности

V	Интеграл вероятности	V	Интеграл вероятности
100,000	0,50398936	0,313	0,99931286
2,000	0,69146246	0,303	0,99951658
1,667	0,72574688	0,294	0,99966307
1,429	0,75803635	0,286	0,99976737
1,250	0,78814460	0,278	0,99984089
1,111	0,81593987	0,270	0,99989220
1,000	0,84134475	0,263	0,99992765
0,909	0,86433394	0,256	0,99995190
0,833	0,88493033	0,250	0,99996833
0,769	0,90319952	0,244	0,99997934
0,714	0,91924334	0,238	0,99998665
0,667	0,93319280	0,233	0,99999146
0,625	0,94520071	0,227	0,99999459
0,588	0,95543454	0,222	0,99999660
0,556	0,96406968	0,217	0,99999789
0,526	0,97128344	0,213	0,99999870
0,500	0,97724987	0,208	0,99999921
0,476	0,98213558	0,204	0,99999952
0,455	0,98609655	0,200	0,99999971
0,435	0,98927589	0,196	0,99999983
0,417	0,99180246	0,192	0,99999990
0,400	0,99379033	0,189	0,99999994
0,385	0,99533881	0,185	0,99999997
0,370	0,99653303	0,182	0,99999998
0,357	0,99744487	0,179	0,99999999
0,345	0,99813419	0,175	0,99999999
0,333	0,99865010	0,172	1,00000000
0,323	0,99903240	0,169	1,00000000

2.4.3 Оценка репрезентативности статистической выборки

Одним из ключевых этапов статистического анализа экспериментальных данных является определение минимально необходимого количества повторений опытов, обеспечивающего репрезентативность выборки. В рамках настоящего исследования данный вопрос рассматривается на основе критериального подхода, изложенного в [191], с опорой на соблюдение условий устойчивости оценок параметров случайной величины.

1. Условие стабильности среднего значения.

Репрезентативность выборки предполагает, в частности, устойчивость среднего значения измеряемой случайной величины при последовательном увеличении объема выборки. Под устойчивостью в данном контексте понимается статистическая незначимость изменения среднего значения при добавлении нового наблюдения. Это означает, что два средних значения считаются эквивалентными с заданной вероятностью, если их различие не превышает величину, обусловленную естественной вариацией измеряемого параметра.

Пусть $\bar{Y}_{n-1}$ – среднее значение случайной величины, рассчитанное по результатам первых $n-1$ опытов, а $\bar{Y}_n$ – среднее значение, полученное по результатам всех опытов. Стандартное отклонение $\sigma^{(n-1)}$, характеризующее вариативность результатов, рассчитывается на основе первых $n-1$ измерений, кроме последнего.

Для количественной оценки степени изменения среднего значения используется критерий Стьюдента, рассчитываемый по следующей формуле (2.5):

$$t = \frac{|\bar{Y}_n - \bar{Y}_{n-1}|}{\sigma^{(n-1)} \cdot \sqrt{n}} \leq T_{\alpha}(n-1). \quad (2.5)$$

Гипотеза о несущественном изменении среднего значения при увеличении количества опытов от $n-1$ до n может считаться подтвержденной с достоверностью

α , если расчетное значение критерия не превышает (5) стандартного значения $T\alpha(n-1)$, для доверительной вероятности α и числа степеней свободы $n-1$.

2. Условие постоянства погрешности

Наряду с требованием устойчивости среднего значения, при оценке репрезентативности статистической выборки необходимо учитывать также постоянство дисперсии, отражающее неизменность влияния случайных погрешностей на результат измерений по мере увеличения числа опытов. С практической точки зрения это условие предполагает, что по мере накопления наблюдений оценка стандартного отклонения не должна демонстрировать статистически значимых колебаний.

Пусть по результатам первых $n-1$ опытов определено стандартное отклонение $\sigma^{(n-1)}$, а по результатам n опытов – стандартное отклонение $\sigma^{(n)}$. Для оценки значимости различий между этими величинами применяется критерий Фишера (2.6), позволяющий установить, является ли наблюдаемое изменение дисперсии статистически обоснованным, либо может быть отнесено к случайным флуктуациям [Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

$$F = \max \left\{ \left(\frac{\sigma^{(n-1)}}{\sigma^{(n)}} \right)^2, \left(\frac{\sigma^{(n)}}{\sigma^{(n-1)}} \right)^2 \right\}. \quad (2.6)$$

Гипотеза о неизменности среднеквадратичного отклонения при увеличении количества опытов от $n-1$ до n считается подтверждённой с заданной доверительной вероятностью α , если рассчитанное значение критерия Фишера, определяемое по формуле (2.6), не превышает табличного критического значения $F_{m,k}(1-\alpha)$, соответствующего уровню значимости α и соответствующим степеням свободы m . При этом число степеней свободы для F-распределения принимается на единицу меньше числа проведенных опытов, причем число степеней свободы m соответствует большему стандартному отклонению (2.7).

$$\begin{aligned} m = n - 1, \quad k = n - 2, \quad \sigma^{(n)} > \sigma^{(n-1)} \\ m = n - 2, \quad k = n - 1, \quad \sigma^{(n-1)} > \sigma^{(n)} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Повторения опытов можно прекратить, если выполняется неравенство (2.8):

$$F_{m,k}(1 - \alpha) \leq F. \quad (2.8)$$

Прекращение повторений опытов допускается при одновременном выполнении обоих критериев: (2.5) – по среднему значению и (2.8) – по стандартному отклонению. Первый из них проверяется в тех случаях, когда известно или предполагается, что случайные факторы, влияющие на процесс, остаются неизменными от опыта к опыту. Второй критерий становится определяющим в условиях возможной вариативности погрешностей между измерениями.

В рамках данного исследования проводилась проверка обоих условий, что позволяет повысить достоверность оценки репрезентативности. В качестве минимально необходимого числа опытов принято максимальное из значений, полученных на основе критериев (2.5) и (2.8).

2.4.4 Оценка корреляционной связи случайных величин

Для анализа взаимной независимости технологических факторов, а также для количественной оценки степени их влияния на функцию отклика, характеризующую результат исследуемого процесса, в настоящем исследовании применяется коэффициент корреляции [3, 191, 227, 265]. Данный статистический показатель позволяет оценить степень линейной взаимосвязи между двумя случайными величинами, например, между технологическим параметром X и выходной характеристикой процесса Y .

Численное значение коэффициента корреляции определяется по одной из следующих формул (2.9, 2.10):

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n\sigma_x\sigma_y}, \quad (9)$$

или

$$R_{xy} = \frac{\overline{XY} - \bar{X} \cdot \bar{Y}}{\sigma_x\sigma_y}, \quad (10)$$

где n – количество пар значений случайных величин X и Y ;

$\bar{X}, \bar{Y}$ – средние значения случайных величин X и Y , соответственно;

$\overline{XY}$ – среднее значение попарных произведений случайных величин X и Y ;

σ_x, σ_y – стандартные отклонения случайных величин X и Y , соответственно.

Коэффициент корреляции R_{xy} принимает значения в интервале $[-1;1]$, где:

$R_{xy} > 0$ указывает на прямую (положительную) линейную зависимость: с увеличением X значение Y , как правило, также увеличивается;

$R_{xy} < 0$ – на обратную (отрицательную) зависимость: при росте X значение Y уменьшается;

$R_{xy} = 0$ – на отсутствие линейной зависимости между переменными.

Абсолютное значение $|R_{xy}|$ характеризует силу линейной связи между величинами: значения, близкие к 1, свидетельствуют о высокой степени линейной зависимости; значения, близкие к 0, говорят об её слабой выраженности или отсутствии.

Следует подчеркнуть, что высокое значение коэффициента корреляции является основанием для утверждения о наличии линейной зависимости между переменными. Однако низкое значение коэффициента не исключает существование иной, нелинейной формы зависимости. В этом случае можно говорить лишь о малой вероятности наличия именно линейной взаимосвязи между величинами X и Y .

2.4.5 Выбор спецификации модели и построение плана полнофакторного эксперимента

В технических науках при статистическом моделировании процессов широкое применение находят регрессионные модели, позволяющие описывать зависимость отклика системы от влияющих факторов. Такие модели, как правило, строятся с использованием методов регрессионного анализа [3, 63, 155, 191] и могут быть представлены в одной из следующих функциональных форм:

полиномиальной
$$R = b_0 + \Phi_1 b_1 + \Phi_2 b_2 + \dots + \Phi_n b_n = b_0 + \sum_{j=1}^n b_j \Phi_j, \quad (11)$$

степенной
$$R = b_0 \cdot \Phi_1^{b_1} \cdot \Phi_2^{b_2} \cdot \dots \cdot \Phi_n^{b_n} = b_0 \cdot \prod_{j=1}^n \Phi_j^{b_j}, \quad (12)$$

или показательной
$$R = b_0 \cdot b_1^{\Phi_1} \cdot b_2^{\Phi_2} \cdot \dots \cdot b_n^{\Phi_n} = b_0 \cdot \prod_{j=1}^n b_j^{\Phi_j}, \quad (13)$$

В качестве факторов Φ_j в модель включаются исключительно управляемые технологические параметры – такие переменные, значения которых могут быть активно изменены, зафиксированы на заданном уровне или контролируются в процессе функционирования системы. Это позволяет обеспечить воспроизводимость результатов и проводить целенаправленную оптимизацию условий протекания технологического процесса.

Коэффициенты регрессии b_j интерпретируются следующим образом:

- b_0 отражает совокупное влияние неучтённых или неконтролируемых факторов (в том числе случайных);
- каждый из коэффициентов b_j при $j \geq 1$ характеризует вклад соответствующего технологического фактора Φ_j в формирование отклика и является количественной мерой степени его влияния при прочих равных условиях.

Модели (глава 5), построенные в реальном масштабе переменных R и Φ_j , будем называть исходными. Для общего определения вида функции отклика используется [191, 265] термин «спецификация модели». Комплект переменных

величин – функция отклика (численное представление результата процесса, зависимая переменная) и аргументы (факторы или объясняющие, независимые переменные), – образуют координатное пространство, размерность которого всегда на единицу больше количества факторов.

Основная задача регрессионного анализа заключается в определении оптимальных значений параметров модели, обеспечивающих наилучшее согласование расчетных значений функции отклика, получаемых на основе аналитических выражений (2.11–2.13), с экспериментально наблюдаемыми данными. Под наилучшим приближением понимается минимизация отклонений между эмпирическими и модельными значениями в соответствии с выбранным критерием качества аппроксимации (например, методом наименьших квадратов).

Вторая важнейшая составляющая регрессионного анализа — это оценка статистической достоверности полученной модели, включающая проверку значимости коэффициентов регрессии, адекватности модели экспериментальным данным и устойчивости полученных оценок. Такой подход позволяет не только получить эмпирически обоснованное математическое представление исследуемого процесса, но и обеспечить его интерпретируемость, обоснованность и воспроизводимость в практических условиях.

Результаты исследований, выполненных в рамках различных научных школ в области технологии машиностроения – в частности, в Брянске, Воронеже, Волгограде, Москве, Санкт-Петербурге, Саратове, Челябинске и других научных центрах – свидетельствуют о том, что при моделировании реальных процессов механической обработки наилучшее соответствие эмпирическим данным, как правило, обеспечивают исходные модели степенного вида (2.12) и показательные модели (2.13).

Построение регрессионной модели второго порядка требует проведения экспериментов при трёх уровнях варьирования каждого из факторов, что соответствует трехпозиционному планированию. В качестве уровней принимаются значения факторов, нормированные по шкале: минимальный уровень (–1), средний (0) и максимальный уровень (+1), что представлено в табл. 2.12.

Минимально необходимое количество опытов для построения модели второго порядка определяется исходя из числа управляемых факторов n (независимых переменных модели) и рассчитывается по следующему выражению:

$$m = 3^n, \quad (2.14)$$

где n – количество управляемых технологических факторов (объясняющих или независимых переменных модели).

В условиях проведения полного факторного эксперимента с тремя управляемыми переменными для удобства представления используется система условных обозначений: независимые (управляемые) технологические факторы обозначаются как x_1, x_2, x_3 (см. табл. 2.12). Кроме того, в модель включается псевдофактор x_0 , интерпретируемый как агрегированная величина, учитывающая совокупное влияние всех статистически незначимых условий, сопровождающих проведение экспериментов. В целях обеспечения консервативной оценки устойчивости модели при проведении расчетов принимается, что влияние псевдофактора x_0 является максимально возможным, то есть ему приписывается условный уровень $+1$, что позволяет зафиксировать фоновый уровень погрешностей и обеспечить более реалистичную интерпретацию результатов моделирования, особенно при последующем анализе устойчивости и адекватности модели.

Таблица 2.12 – План полнофакторного эксперимента 3^3

№ эксперим.	Уровни факторов			
	x_0	x_1	x_2	x_3
1.	1	-1	-1	-1
2.	1	0	-1	-1
3.	1	1	-1	-1
4.	1	-1	0	-1
5.	1	0	0	-1
6.	1	1	0	-1
7.	1	-1	1	-1
8.	1	0	1	-1
9.	1	1	1	-1
10.	1	-1	-1	0
11.	1	0	-1	0
12.	1	1	-1	0
13.	1	-1	0	0
14.	1	0	0	0

Продолжение таблицы 2.12

15.	1	1	0	0
16.	1	-1	1	0
17.	1	0	1	0
18.	1	1	1	0
19.	1	-1	-1	1
20.	1	0	-1	1
21.	1	1	-1	1
22.	1	-1	0	1
23.	1	0	0	1
24.	1	1	0	1
25.	1	-1	1	1
26.	1	0	1	1
27.	1	1	1	1

Эффективное применение многофакторных регрессионных моделей возможно только при соблюдении определённых требований, известных в теории математической статистики как условия Гаусса–Маркова [191]. Выполнение этих условий гарантирует корректность оценок параметров модели, их несмещённость, состоятельность и минимальную дисперсию среди всех линейных несмещённых оценок.

В рамках настоящего исследования к числу обязательных условий относятся следующие:

1. Управляемость факторов. Все переменные модели должны представлять собой управляемые технологические факторы, значения которых могут быть целенаправленно заданы, зафиксированы и контролируемы в процессе эксперимента.

2. Попарная взаимная независимость факторов. Для исключения эффекта мультиколлинеарности между объясняющими переменными необходимо обеспечить низкую степень корреляции между ними. Практически это проверяется по абсолютным значениям коэффициентов парной корреляции (см. формулы 9 и 10), которые должны быть существенно меньше единицы.

3. Совместимость факторов. Предполагается возможность проведения экспериментов при любых допустимых комбинациях значений факторов. Это

условие означает, что пространство эксперимента должно быть полностью достижимым с технологической точки зрения.

4. Сопоставимость переменных. Числовые значения факторов и функции отклика должны быть приведены к единой безразмерной шкале, что обеспечивает корректность сравнительного анализа и интерпретации коэффициентов модели. Такая нормализация также способствует улучшению вычислительной устойчивости при построении регрессионных уравнений.

5. Ротатабельность экспериментального пространства. Под ротатабельностью понимается геометрическая симметрия области варьирования факторов и функции отклика относительно начала координат. Это свойство обеспечивает эквивалентность отклика при одинаковом удалении от центра плана эксперимента в любом направлении. Формально ротатабельность позволяет проверить (2.15) единство масштабных шкал всех переменных модели и служит одним из критериев корректности выбора экспериментального плана.

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \approx 0; \sum_{i=1}^m y_i \approx 0; \quad (2.15)$$

где m – объем (количество строк) плана экспериментов; $i \in [1; m]$.

Следует отметить, что мгновенные значения случайных величин, полученные в результате непосредственных наблюдений в ходе эксперимента, как правило, не удовлетворяют требованиям условий Гаусса–Маркова. Это обусловлено рядом объективных причин, связанных с особенностями исходных переменных, характеризующих технологические факторы и функцию отклика (см. таблицу 2.13).

Во-первых, различные переменные, входящие в модель, имеют разные физические размерности и масштабные уровни, что препятствует их прямому сопоставлению в рамках единого координатного пространства. Несопоставимость численных значений факторов и отклика нарушает условие сопоставимости переменных, необходимое для обеспечения корректной интерпретации коэффициентов регрессии и достоверности выводов.

Во-вторых, в силу естественных различий в шкалах варьирования факторов, исходное координатное пространство, сформированное на основе измеренных значений, не обладает свойством ротатабельности. Отсутствие геометрической симметрии экспериментальной области относительно начала координат исключает выполнение одного из ключевых условий Гаусса–Маркова, обеспечивающего инвариантность модели к направлениям в пространстве факторов.

То есть необработанные экспериментальные данные в натуральных единицах измерения не могут напрямую использоваться для построения корректных многофакторных регрессионных моделей. Это требует предварительной трансформации переменных – в частности, их нормализации или кодирования – с целью приведения к безразмерному и ротатабельному пространству, удовлетворяющему статистическим требованиям.

Таблица 2.13 – Интервалы варьирования технологических факторов и функций отклика

Тип	Переменная		Размерность	Интервал варьирования			Условное обозначение
Фактор	ТермоЭДС	E	мВ	4	...	20	x_1
Фактор	Скорость подачи	S	мм/об	0,1	...	0,3	x_2
Фактор	Скорость резания	V	м/мин	100	...	300	x_3
Функция	Период стойкости	T	мин	90	...	250	$Y(T)$
Функция	Шероховатость	Ra	мкм	1	...	10	$Y(Ra)$

С целью приведения экспериментальных данных к виду, удовлетворяющему условиям Гаусса–Маркова, в настоящем исследовании была выполнена нормализация переменных, обеспечивающая их сопоставимость и соблюдение ротатабельности координатного пространства модели. В зависимости от типа используемой спецификации модели, применяются следующие формы нормирующих преобразований:

линейной

$$y_i = 2 \cdot \frac{R_i - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} - 1; \quad x_{ji} = 2 \cdot \frac{\Phi_{ji} - \Phi_j^{\min}}{\Phi_j^{\max} - \Phi_j^{\min}} - 1; \quad (2.16)$$

$$\text{степенной } y_i = 2 \cdot \frac{\ln\left(\frac{R_i}{R_{\min}}\right)}{\ln\left(\frac{R_{\max}}{R_{\min}}\right)} - 1; \quad x_{ji} = 2 \cdot \frac{\ln\left(\frac{\Phi_{ji}}{\Phi_j^{\min}}\right)}{\ln\left(\frac{\Phi_j^{\max}}{\Phi_j^{\min}}\right)} - 1; \quad (2.17)$$

$$\text{показательной } y_i = 2 \cdot \frac{\ln\left(\frac{R_i}{R_{\min}}\right)}{\ln\left(\frac{R_{\max}}{R_{\min}}\right)} - 1; \quad x_{ji} = 2 \cdot \frac{\Phi_{ji} - \Phi_j^{\min}}{\Phi_j^{\max} - \Phi_j^{\min}} - 1. \quad (2.18)$$

При расчёте коэффициентов регрессии используются нормированные значения исходных данных, представленные в безразмерной форме, сопоставимые по масштабному фактору. Такая предварительная обработка переменных обеспечивает выполнение условий Гаусса–Маркова и позволяет провести количественное сравнение влияния различных независимых переменных на функцию отклика. Благодаря унификации шкалы измерения, коэффициенты регрессии отражают не только направление, но и относительную силу воздействия соответствующих факторов на результат процесса.

Кроме того, при формировании экспериментального плана интервалы варьирования переменных (в частности, для степенной модели (2.17)) были целенаправленно расширены. Это обеспечивает гарантированное включение предельных значений технологических факторов в рассматриваемые диапазоны варьирования [10]:

$$\begin{aligned} R_{\max} &= \max(R) + 0,05 \cdot [\max(R) - \min(R)]; \\ R_{\min} &= \min(R) - 0,05 \cdot [\max(R) - \min(R)]; \\ \Phi_j^{\max} &= \max(\Phi_j) + 0,05 \cdot [\max(\Phi_j) - \min(\Phi_j)]; \\ \Phi_j^{\min} &= \min(\Phi_j) - 0,05 \cdot [\max(\Phi_j) - \min(\Phi_j)]; \end{aligned} \quad (2.19)$$

В результате применения нормирующих преобразований (2.16–2.18) осуществляется переход от исходного координатного пространства (в котором переменные представлены в реальных физических величинах) к преобразованной системе координат, в которой переменные представлены в нормированной, безразмерной форме.

Такое преобразование не только обеспечивает сопоставимость факторов, но и приводит к линеаризации модели независимо от её исходной спецификации – будь то полиномиальная, степенная или показательная зависимость (2.11–2.13). В нормированном пространстве все указанные виды моделей могут быть приведены к линейной форме, представленной в общем виде как:

$$y = a_0 + x_1 a_1 + x_2 a_2 + \dots + x_n a_n = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j x_j. \quad (2.20)$$

Поскольку в результате нормирования интервалы варьирования всех факторов приводятся к единому масштабу, становится возможным проведение сравнительного анализа степени влияния каждой из независимых переменных на функцию отклика. В такой безразмерной системе координат коэффициенты регрессии отражают относительную значимость факторов, что позволяет объективно интерпретировать их вклад в формирование результата процесса.

Следует отметить, что регрессионные модели могут быть построены не только на основе строго запланированных варьирований управляемых факторов, как это имеет место в лабораторных условиях, но и с использованием наблюдений за контролируемыми, но не полностью управляемыми параметрами. Такая постановка экспериментального исследования характерна для производственных условий, в которых варьирование факторов по заранее заданным уровням затруднено или невозможно по технологическим, организационным либо экономическим причинам. Такой подход носит наименование «производственный эксперимент», в отличие от «лабораторного эксперимента».

При изменении границ диапазонов (2.19) перед выполнением нормирования (2.16...2.18) строгое соблюдение плана эксперимента (таблица 2.12) невозможно. В частности, значения факторов в каждом эксперименте не обязательно принимают только предельные или средние (табл. 2.12) значения:

– количество экспериментов не должно быть меньше минимально допустимого, определяемого по спецификации модели (2.11...2.13) с учетом количества независимых факторов (2.14);

– для каждого фактора количество уровней в интервале $[0; +1]$ не должно существенно отличаться от количества уровней в интервале $[-1; 0]$ – таким образом

проверяется условие ротатабельности плана $\sum_{i=1}^m x_{ji} \approx 0$;

– выполнение условия $\sum_{i=1}^m x_{ji}^2 \approx m$ обеспечивает ортогональность плана.

2.4.6 Расчет статистических параметров и оценка достоверности модели

Для нормированной регрессионной модели, построенной при условии статистической независимости объясняющих переменных, расчет коэффициентов регрессии выполняется по аналитическому выражению:

$$a_j = \frac{\sum_{i=1}^m y_i \cdot x_{ji}}{\sum_{i=1}^m x_{ji}^2}, \quad (2.21)$$

где x_{ji} – нормированные значения j -го фактора в i -м эксперименте.

В случае учета дополнительного фактора, отражающего влияние неконтролируемых условий или совокупного фона внешних возмущений — так называемого «фактора риска», соответствующий коэффициент регрессии рассчитывается аналогично:

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{m}. \quad (2.22)$$

2.4.7 Оценка статистической значимости технологических факторов

Коэффициенты регрессии a_j , рассчитанные по выражениям (2.21) и (2.22), относятся к модели, построенной в нормированном координатном пространстве (2.16–2.18). Степень влияния фактора определяется абсолютным значением

соответствующего коэффициента регрессии a_j : наибольшее по абсолютной величине значение a_j соответствует фактору, оказывающему максимальное влияние на функцию отклика; меньшие по величине коэффициенты указывают на менее значимое воздействие.

Знак коэффициента регрессии отражает характер влияния фактора:

$a_j > 0$ – возрастающая зависимость: при увеличении значения фактора x_j значение функции отклика y также увеличивается;

$a_j < 0$ – убывающая зависимость: при увеличении значения фактора x_j значение функции отклика уменьшается;

$a_j \approx 0$ – отсутствие статистически значимого влияния: изменение фактора x_j не оказывает существенного воздействия на значение функции отклика.

Заключение об отсутствии влияния фактора на функцию отклика, основанное на малом абсолютном значении коэффициента регрессии a_j , требует формального статистического обоснования. Для этого необходимо проверить, насколько рассчитанное значение коэффициента регрессии согласуется с гипотезой о его равенстве нулю ($a_j = 0$). Оценка выполняется с использованием t-критерия Стьюдента [227, 265, 191], позволяющего количественно определить степень отклонения коэффициента регрессии от нулевого значения и, следовательно, установить статистическую значимость соответствующего фактора в модели.

Статистическая значимость каждого фактора в регрессионной модели оценивается путём сравнения расчётного значения t-критерия Стьюдента (2.5, 2.23), определяемого на основе величины соответствующего коэффициента регрессии и оценки погрешности экспериментов, с критическим табличным значением данного критерия $T_{n-1}(\alpha)$.

Критическое значение $T_{n-1}(\alpha)$ выбирается в соответствии с заданным уровнем достоверности α и числом степеней свободы $n-1$, где n – количество независимых факторов, включённых в модель.

$$t_j = \frac{|a_j - 0|}{\sigma_{(y)} \cdot \sqrt{2-1}} = \frac{|a_j|}{\sigma_{(y)}} \quad (2.23)$$

Погрешность эксперимента в нормированной системе координат определяется величиной стандартного отклонения функции отклика

$$\sigma(y) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y})^2}}{m}. \quad (2.24)$$

Факторы, для которых расчётное значение t-критерия Стьюдента оказывается меньше соответствующего табличного значения, следует относить к статистически незначимым. В этом случае значение соответствующего коэффициента регрессии может быть принято равным нулю с вероятностью не менее α , что соответствует заданному уровню достоверности.

$$A_j = \begin{cases} a_j, & \text{при } t_j \geq T_\alpha(n-1) \\ 0, & \text{при } t_j < T_\alpha(n-1) \end{cases}. \quad (2.25)$$

2.4.8 Укрупненная оценка стабильности процесса лезвийной обработки

Коэффициенты регрессии нормированной модели (2.20, 2.25) представляют собой количественные оценки степени влияния соответствующих факторов на функцию отклика (см. разд. 2.4.6).

Особое место в модели занимает псевдофактор X_0 , интерпретируемый как фактор риска. В нормированном координатном пространстве эксперимента данный фактор агрегирует совокупность погрешностей всех величин, входящих в модель, включая: статистически значимые параметры (результат процесса и независимые факторы); случайные и неучтённые влияния, возникающие в процессе проведения эксперимента.

Таким образом, коэффициент регрессии при псевдофакторе характеризует степень совокупного воздействия случайных факторов и погрешностей на функцию отклика.

Если абсолютное значение коэффициента регрессии фактора риска (a_0 или A_0) существенно меньше, чем абсолютные значения коэффициентов при нормированных технологических факторах, это позволяет сделать качественный

вывод о незначительном влиянии погрешностей на результат и, следовательно, о достаточно высокой стабильности исследуемого процесса.

2.4.9 Оценка достоверности модели

Для обеспечения корректной оценки достоверности и практической применимости многофакторной регрессионной модели необходимо выполнить обратное преобразование от нормированного координатного пространства к исходной системе координат эксперимента. Последовательность обратного преобразования параметров модели и переменных приведена в табл. 2.14.

Таблица 2.14 – Алгоритм обратного нормирования функции отклика

Шаг преобразования		Расчетная формула
1	Для каждой строки плана эксперимента рассчитать нормированное значение функции отклика с учетом всех (2.26) или только статистически значимых (2.27) факторов	$y'_i = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j x_{ij}, \quad (2.26)$ $y''_i = A_0 + \sum_{j=1}^n A_j x_{ij}. \quad (2.27)$
2	«Восстановить» прогнозируемые значения функции отклика ($R^{\text{мод}}$) для каждой строки плана, выполнив преобразование в соответствии со спецификацией исходной модели: линейной (2.28), степенной или показательной (2.29).	$R_i^{\text{мод}} = \frac{y_i^{\text{мод}} + 1}{2} \cdot (R_{\max} - R_{\min}) + R_{\min} \quad (2.28)$ $R_i^{\text{мод}} = \left(\frac{R_{\max}}{R_{\min}} \right)^{\frac{y_i^{\text{мод}} + 1}{2}} \cdot R_{\min} \quad (2.29)$
3	Для каждой строки плана эксперимента (табл. 1.6) рассчитать значения квадратичной (2.30) и относительной (2.31) погрешности	$\delta_i^{(2)} = (R_i - R_i^{\text{мод}})^2 \quad (2.30)$ $\delta_i^{(\%) } = \frac{ R_i - R_i^{\text{мод}} }{ R_i^{\text{мод}} }. \quad (2.31)$
4	Рассчитать стандартную ошибку модели (2.30)	$S_{\text{мод}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^{(2)}}{n}}. \quad (2.32)$
5	Рассчитать стандартное отклонение статистической выборки	$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}{n}}. \quad (2.33)$

Продолжение таблицы 2.14

6	Рассчитать критерий Фишера (2.34) и статистическую оценку значимости построенной модели из условия (2.35). Если условие (2.35) справедливо с вероятностью не менее $(1-\alpha)$, можно считать, что построенная модель достоверна (адекватна) с вероятностью α .	$f = \left(\frac{S}{S_{\text{mod}}} \right)^2, \quad (2.34)$ $f \geq F_{1-\alpha}(n-1; n-1). \quad (35)$
7	Рассчитать среднюю относительную погрешность модели (2.36)	$\overline{\delta^{(\%)}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^{(\%)}}{n} \quad (36)$

Модель, представленная в исходной спецификации (2.11–2.13), выполняет функцию расчётного инструмента, предназначенного для прогнозирования результатов процесса при заданных значениях входных факторов.

2.4.10 Количественная оценка стабильности процесса

Величина вероятности α , определяемая из условия (2.35) на основе оценки уменьшения дисперсии статистической выборки вследствие выделения закономерных воздействий на результат процесса, является не только мерой статистической значимости выявленной зависимости, но и показателем стабильности исследуемого процесса [193].

Такой подход согласуется с рекомендациями [155], в которых стабильность определяется как способность процесса сохранять результаты за счёт снижения влияния случайных возмущений на оцениваемую характеристику. Таким образом, высокая величина α одновременно свидетельствует о достоверности обнаруженной закономерности и о минимальном уровне случайных флуктуаций, воздействующих на результат, что является признаком устойчивого функционирования технологической системы.

Глава 3. Закономерности процесса резания и информационные каналы мониторинга

3.1 Взаимосвязь характера контактного взаимодействия и интенсивности износа режущего инструмента с физико-механическими характеристиками контактной пары

Как уже отмечалось ранее резание является сложным многофакторным процессом, характер контактного взаимодействия инструмента и заготовки при котором, определяется, в первую очередь, комплексом свойств обрабатываемого материала. Свойства материала в свою очередь во многом определяются строением кристаллической решетки. Так гранецентрированная кубическая решетка, характерная для аустенитных сталей, обеспечивает высокую пластичность и прочность. Объемно-центрированная кубическая решетка ферритных нержавеющей сталей обеспечивает высокую прочность при приемлемой пластичности, а также магнитные свойства и устойчивость к агрессивным средам. Мартенситные стали с объемно-центрированной тетрагональной решеткой имеют высокую износостойкость, режущую способность и магнитные свойства, но низкую коррозионную стойкость. Дуплексные стали сочетают в себе свойства аустенитной и ферритной фазы.

Тип кристаллической решетки определяет механизмы пластической деформации в процессе резания (двойникование или скольжение, а также количество систем возможного скольжения) и пластичность материала [78]. Однако, стали и сплавы, выпускаемые металлургическими заводами, имеют поликристаллическую структуру. Затвердевание расплава сопровождается зарождением и ростом центров кристаллизации, в результате чего формируется зернистая структура с произвольной ориентацией кристаллических решеток элементов. Кроме того, несовершенство технологических методов, а также наличие тех или иных примесей и добавок создают дефекты структуры в виде нарушений

периодичности атомов и связей между ними, искажающих кристаллическую решетку и оказывающих влияние на свойства материала.

Иначе говоря, реальные стали и сплавы обладают сложным строением с масштабными уровнями иерархии. Пластическая деформация в процессе резания изменяет структуру материала на всех масштабных уровнях и ведет к его разрушению. В результате деформации происходит поворот и изменение формы зерен, а также дробление их на фрагменты. Области пластической деформации имеют неравномерное распределение и сосредотачиваются вокруг крупных зерен или кластеров. Под действием касательных напряжений происходит смещение либо зерен, либо кристаллических структур (дислокаций или атомов) внутри зерен друг относительно друга [86, 128]. В процессе движения дислокации происходит последовательный разрыв и восстановление связей в кристаллической решетке.

С физической точки зрения за счет внешнего воздействия происходит накопление энергии в материале посредством эволюции дефектов различных структурных уровней и роста их плотности, то есть рост плотности дислокаций внутри и на границах зерен [92]. Механическая энергия, затрачиваемая на пластическую деформацию металла, преобразуется во внутреннюю накопленную энергию упругой деформации и кинетическую, то есть тепловую энергию, генерируемую процессами движения и аннигиляции дефектов различных структурных уровней [150]. За счет «внутреннего трения» при движении дислокаций и атомов происходит диссипация энергии и выделение тепла в зоне локализации деформации [118]. В процессе пластической деформации небольшая часть энергии поглощается металлом, причем с ростом степени деформации эта доля снижается. Остальная энергия преобразовывается в теплоту [132].

Рост степени деформации вызывает рост сопротивления деформации за счет искажения кристаллической решетки - удлинения и поворота зерен. Рост скорости деформации оказывает меньшее воздействие на сопротивление.

Однако за счет выделенного тепла происходит рост температуры металла, что ведет к его разупрочнению и уменьшает степень деформации. Кроме того, с увеличением степени деформации уменьшается температура рекристаллизации,

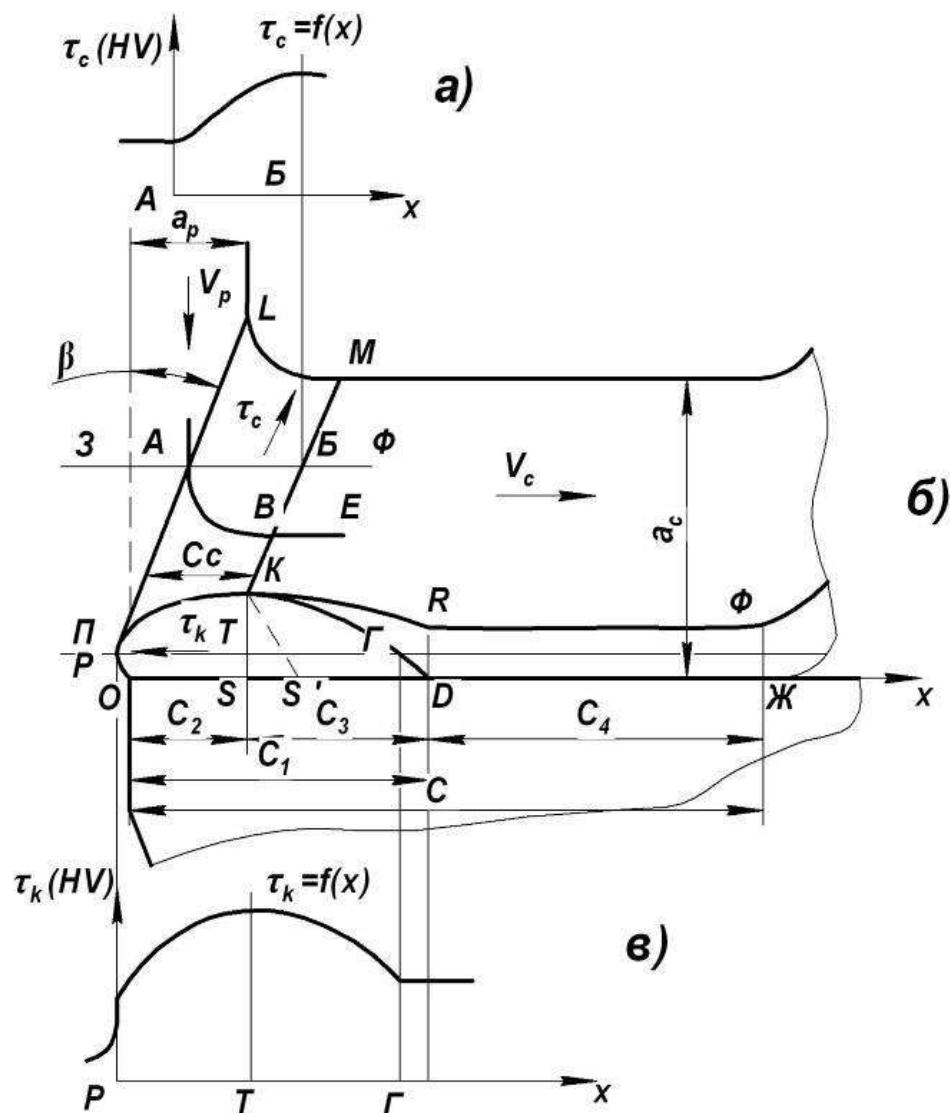
что интенсифицирует температурное разупрочнение. Увеличение скорости деформации способствует повышению температуры, снижая потери тепла в окружающую среду и тем самым интенсифицируя температурное разупрочнение.

Таким образом, пластическая деформация, являясь основным физическим процессом резания материалов практически полностью предопределяет термодинамические условия его протекания, характер стружкообразования и резания в целом. Взаимное действие двух противостоящих процессов, деформационного упрочнения и температурного разупрочнения формируют характер процесса стружкообразования и контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой заготовки при резании, которые в общем случае качественно описываются схемой (рисунок 3.1) [141].

Процесс пластического деформирования металла при превращении удаляемого слоя в стружку протекает в зоне стружкообразования (фронте сдвига) с параллельно расположенными начальной РЛ и конечной КМ границами (рисунок 3.1). Данная зона представляет собой семейство параллельно расположенных плоскостей скольжения, при пересечении которых во время движения каждый элементарный объем металла последовательно деформируется, обретая текстуру под действием касательных напряжений, сформированных силами со стороны передней поверхности инструмента. Положение указанной зоны характеризуется углом сдвига β , измеряемым между вектором скорости резания и ориентированными плоскостями скольжения. Данный параметр отражает температурно-деформационную напряженность процессов, протекающих в зоне резания.

Параллельно с процессами во фронте стружкообразования существуют явления, сопровождающие контактное взаимодействие, в частности, по передней поверхности инструмента.

Согласно [177] при обработке сталей твердосплавным инструментом с режимами и условиями резания (в том числе, соответствующими получистовому и чистовому точению), при которых образуются сливные стружки, а по передней поверхности формируются пластический и вязкий контакты (участки С1 и С4),



а – закон изменения сопротивления пластическому деформированию в зоне стружкообразования; б – реальная схема процесса резания; в – закон изменения сопротивления пластическому деформированию в зоне контактного взаимодействия

Рисунок 3.1 – Реальная схема процесса резания и закономерности изменения сопротивления пластическому деформированию в зонах стружкообразования и контактного взаимодействия

В процессе перемещения контактных объемов обрабатываемого материала вдоль участка упрочнения С2 происходит их последовательное деформирование в условиях сдвига, совмещенного со сжатием.

Упрочнение нижних прирезцовых слоев обуславливает необходимость постоянного повышения напряжений, необходимых для реализации контактных пластических деформаций. Поэтому процесс распространяется в контактные объемы стружки, где сопротивление деформированию ниже.

Так происходит увеличение высоты зоны контактных пластических деформаций на участке С2 (верхняя граница области схематично представлена на рисунке 6 кривой РК). Далее по длине участка разупрочнения С3 в зоне KRD (рисунок 3.1) происходит динамический возврат (снятие упрочненного состояния) элементарных объемов. На участке вязкого контакта С4 имеет место переход от пластического течения к граничному трению и смена объемного очага тепловыделения на источник в тонком граничном с инструментом слое.

Уровень сопротивления пластическому деформированию по длине полного контакта и размеры участков С1, С2, С определяют величину интегральной суммы действующих напряжений и, следовательно, сил резания.

Следует отметить, что в процессе резания помимо зоны пластической деформации источником тепловыделения является трение стружки по передней поверхности и трение по задним поверхностям инструмента. Согласно данным источника [34] в заготовку может поступать до 47 % тепла при резании, в то время как в инструмент – до 5 %, а в случае высокоскоростной обработки до 5 % и до 20 % соответственно. Лишь небольшой процент в окружающую среду, в то время как основной объем тепла уходит со стружкой. При этом увеличение скорости резания увеличивает долю до 99 % [32].

Тем не менее интенсивное тепловыделение в процессе резания с высокими скоростями ведет к увеличению температуры в зоне резания и на поверхности режущего инструмента до значений свыше 800°C. Влияние температурно-скоростного фактора растет с увеличением скорости деформации и уменьшением теплопроводности и теплоемкости.

Температура в зоне резания оказывает существенное влияние на закономерности стружкообразования и процесса резания, во многом определяя интенсивность износа инструмента и его стойкость. От температуры на передней

границы инструмента зависит коэффициент трения, который определяет направление равнодействующей силы, а значит расположение плоскости скалывания, формируемой в направлении действия максимальных касательных напряжений [96].

Процесс стружкообразования стабилизируется при достижении равновесия напряжений, действующих на обрабатываемый материал заготовки и режущий инструмент, что обеспечивает устойчивый съем материала с постоянной скоростью. Нарушение такого равновесия приводит к потере устойчивости процесса.

По дислокационной теории неоднородность деформации является следствием, прежде всего статистической природы размножения, движения и взаимодействия дефектов кристаллической структуры металлов. К неоднородно-напряженному состоянию деформированного металла приводит большое количество и случайное расположение отдельных дислокаций и полос скольжения. К неоднородной деформации приводят также различная длина полос скольжения, скопление отдельных дислокаций и полос скольжения у каких-либо препятствий (например, границ зерен); фрагментация зерен и миграция границ зерен и их утолщение, наличие двойников; образование сложных дислокационных структур в виде сплетений, клубков, жгутов и др.; сложные превращения упрочняющих фаз, обрабатываемых материалов с изменением их формы, размеров и характера распределения по объему.

Вместе с особенностями температурно-деформационного цикла и неоднородностью пластической деформации неустойчивость резания [101] в широком диапазоне изменения скорости обработки обусловлена циклическостью стружкообразования.

На высоких скоростях резания из-за больших градиентов температурного поля и наложении фаз сдвиговой деформации и деформации сжатия по условной плоскости сдвига происходит адиабатический сдвиг, формирующий циклическую стружку, что свидетельствует о высокой температурно-силовой напряженности процесса резания, а также колебании температур и сил резания. Результатом

нестабильности процесса стружкообразования могут стать вибрации и неоднородный износ режущего инструмента, проявляющийся в образовании микро- и макро-дефектов режущей кромки.

Помимо температурно-деформационного цикла процесса пластической деформации в зоне стружкообразования неустойчивость может быть вызвана образованием элементных и суставчатых стружек скалывания на низких скоростях резания, а также циклом контактного пластического деформирования поверхностей инструмента с обрабатываемым металлом с формированием и срывом нароста. Однако в производственных условиях режущий инструмент работает на существенно более высоких скоростях поэтому данные условия можно принять неактуальными.

Особо ярко цикличность стружкообразования и неустойчивость процесса резания выражена при обработке нержавеющей и жаропрочных сталей, что объясняется целым комплексом причин.

Указанные материалы имеют высокую вязкость, в особенности аустенитные и дуплексные стали, что способствует налипанию на режущий инструмент и затрудняет стружкодробление.

Высокая прочность и пластичность жаропрочных и нержавеющей сталей, которые чаще всего имеют структуру аустенита с гранцентрированной кристаллической решеткой, приводит к высокому упрочнению в процессе пластической деформации резанием, оказывает влияние на длину контакта и контактные напряжения. Удаление того же объема металла требует большей работы сил резания и большей энергии для предварительной деформации более пластичного материала [205]. В результате силы резания при обработке нержавеющей и жаропрочных сталей увеличиваются в 1,5-2 раза по сравнению с углеродистой сталью 45 [117, 144].

Наличие в структуре нержавеющей и жаропрочных сталей мелкодисперсных твердых включений таких как карбиды и интерметаллиды активизирует абразивный износ режущего инструмента.

Другой неблагоприятный фактор, оказывающий влияние на процесс резания, определяется свойством нержавеющей и жаропрочных сталей сохранять прочность и твердость в широком диапазоне температур.

Низкая теплопроводность нержавеющей и жаропрочных сталей (до 2-3 раз ниже углеродистых сталей) усложняет отвод тепла и повышает температуру в зоне резания, усугубляет характер контактного взаимодействия и интенсифицирует износ режущего инструмента.

Высокая склонность данных материалов к вибрациям в процессе резания по причине неоднородности деформации и температурно-деформационных циклов при стружкообразовании ведет к переменным силовым и тепловым нагрузкам и отрицательно влияет не только на стойкость инструмента, но и точность размеров и качество обработанных поверхностей.

Исследованию закономерностей процесса резания нержавеющей и жаропрочных сталей, а также поиску направлению повышения эффективности обработки посвящены большое количество работ начиная с 60-х годов прошлого века [4, 55, 125, 142, 177, 203]. Однако, данная тематика по-прежнему вызывает интерес как у отечественных, так и иностранных авторов и научных коллективов, что только подтверждает значимость и актуальность направления исследования, а также определяет широту и многозадачность проблемы.

Одним из главных факторов, интенсифицирующих износ инструмента с ростом скорости резания, является температурное воздействие [77].

Согласно классическим представлениям помимо абразивного износа инструмента вследствие истирающего воздействия твердых включений обрабатываемого материала при сравнительно высоких скоростях резания, приводящих к температурам резания свыше 600°C возможны структурные превращения и термический механизм износа. Кроме того, высокие температуры активизируют окислительные реакции поверхностей инструмента повышая их хрупкость и тем самым интенсифицируя их разрушение. Высокие температуры и контактные давления провоцируют явления диффузии и адгезии контактной пары. В первом случае происходит снижение функциональных характеристик

инструмента, а во втором под действием циклического характера нагрузок может приводить к вырывам частиц с режущих поверхностей и разрушению. Высокая температура и контактные давления так же могут вызывать деформацию режущего клина, изменяя условия протекания контактного взаимодействия.

Так же хорошо известна и взаимосвязь динамических процессов при резании, износа инструмента, точности и качества обработки. В результате повышенного износа изменяются характеристики контактного взаимодействия, увеличиваются силы резания, а также неустойчивость процесса, что ведет к снижению точности и качества формируемых поверхностей, а кроме того, требует особенного внимания при изготовлении прецизионных деталей машин [76]. Поэтому вопросы оценки состояния и прогнозирования стойкости режущего инструмента являются необходимым условием обеспечения надежности технологической операции.

Подбор геометрических параметров режущего инструмента главным образом направлен на создание оптимальных условий для удаления необходимого дефектного и избыточного слоя материала, а также формирования требуемых параметров качества обработанной поверхности. Структура и состав современного режущего инструмента, который в наиболее распространенном виде представляет собой композицию твердосплавной матрицы и износостойких покрытий, призваны сохранять в процессе резания нивелируя неблагоприятное воздействие отдельных механизмов износа.

Влияние физико-механических свойств на процесс обработки нержавеющей и жаропрочных сталей при резании твердосплавными инструментами, а также определяющая роль таких факторов как теплопроводность и температура резания подтверждается не только отечественными [125, 177], но и зарубежными исследователями [236, 260]. Кроме того, в работах [276, 122] отмечается взаимосвязь интенсивности накопления повреждений режущих лезвий и износа инструмента при обработки нержавеющей и жаропрочных сталей от длины контакта и величины контактных напряжений.

Существенное влияние адгезионного износа процесс резания результатам при высокоскоростной обработке нержавеющей, высоколегированных и

жаропрочных сталей по причине их низкой теплопроводности, высокой пластичности, а также близости химического состава инструментального и обрабатываемого материала отмечается в работах иностранных исследователей [215, 239, 251, 253].

На основании публикаций [106, 107, 177], в которых доля адгезионного и абразивного износа оценивается примерно одинаковыми автор работы [] отмечает, что в результате адгезионного схватывания формируются твердые частицы, включающие элементы инструментального материала, которые совместно с твердыми включениями обрабатываемого материала интенсифицируют абразивное истирание режущего инструмента. То есть адгезионный механизм износа помимо своего прямого отрицательного воздействия способствует более активному течению абразивного износа.

В работе [250] по результатам исследования износа твердосплавного инструмента с вольфрамокобальтовой твердосплавной матрицей и износостойким покрытием TiAlN при обработке высокохромистой стали 02X13H4M формулируются выводы о том, что адгезионный износ инструмента возникает при разрушении покрытия и обусловлен сродством Fe, содержащемся в обрабатываемом материале и Co – в инструментальном. Адгезионный износ включает диффузию элементов, циклический процесс адгезии, разрыва и разрушения. Зарождению адгезионного износа способствуют контактные напряжения, температурное поле, а также и истирание поверхностного покрытия инструмента. В результате в твердой фазе WC происходит распространение трещин и снижается прочность режущего инструмента. В работе также отмечается интенсификация адгезионного износа при высоких растягивающих напряжениях и температурном перепаде.

По данным авторов [188] при обработке на относительно низких скоростях резания, то есть в условиях относительно невысоких контактных температурах преобладают адгезионно-усталостный и абразивный виды изнашивания. По другим данным [103, 100] как адгезионно-усталостный, так и диффузионный механизмы износа могут существовать в широком диапазоне скоростей.

Интенсификация данных механизмов износа в диапазоне высоких скоростей резания характерна для обработки материалов склонных к циклическому стружкообразованию, а также в значительной степени определяется маркой твердого сплава.

Качественно влияние различных механизмов износа проиллюстрировано в работе [206], согласно которой при обработке в диапазоне низких скоростей резания действуют адгезионный, усталостный и абразивный износ. Причем с ростом скорости степень их влияния сначала возрастает (в большей степени именно адгезионного механизма износа), а затем снижается. В определенном диапазоне скоростей усталостный износ практически исчезает, но с ростом температурной составляющей интенсифицируются термические усталостные повреждения, окисление, диффузионный износ, а также деформация режущего клина, которые в влияние которых в совокупности активно увеличивается с ростом скорости резания, а значит и температуры в зоне резания.

Кроме того, различие в интенсивности влияния отдельных механизмов износа в том числе определяется кристаллическими структурами, фазовым составом и свойствами обрабатываемого материала.

Следует отметить, что по данным авторов [101, 102] при обработке материалов склонных к циклическому стружкообразованию как диффузионный, так и адгезионно-усталостный механизмы износа могут существовать в широком диапазоне скоростей. Интенсификация данных механизмов износа наблюдается при высоких скоростях резания и в значительной степени определяется маркой твердого сплава.

Повышение износостойкости инструмента обеспечивается за счет функциональности отдельных слоев покрытия, в частности: снижения интенсивности окислительных процессов; формирования термоизоляции; предотвращения адгезионных процессов и тд. К практически повсеместному применению режущих твердосплавных пластин с многослойными износостойкими покрытиями, доля которых в общей массе по данным поставщиков достигает до 90%, способствовала Необходимость повышения производительности обработки и

широкое распространение оборудования с ЧПУ. Износостойкие покрытия позволяют повысить срок службы инструмента, стойкость к нагрузкам в 2-6 раз, термостойкость и скорость обработки свыше 25%, а также снизить расход инструмента и СОЖ.

Износостойкие инструментальные покрытия оказывают влияние на площадь контакта стружки с передней поверхностью инструмента, за счет чего меняется мощность теплового потока, проходящего через режущий инструмент [176]. Данные работ [277, 52, 119] свидетельствуют о том, что применение износостойких покрытий позволяет снизить значения всех составляющих сил резания, параметры шероховатости обработанной поверхности и повысить стойкость режущего инструмента.

Характерные особенности процесса контактного взаимодействия при резании материалов по группам обрабатываемости определяют выбор состава износостойкого покрытия. Так с целью снижения интенсивности адгезионного-усталостного механизма износа, как правило, используются покрытия TiN, имеющие высокую химическую пассивность. Применение покрытий TiN снижает наростообразование, силовую и температурную напряженность процесса резания. Однако при обработке вязких алюминиевых, а также титановых и хромоникелевых сплавов эффективность покрытия существенно падает.

С ростом скорости и температуры резания интенсифицируется окислительный механизм износа. Твердые сплавы группы ВК теряют термодинамическую устойчивость при температурах 600...1200°C, группы ТК и ТТК – при 900...1200°C. Покрытия оксидного слоя Al_2O_3 позволяют создать барьер интенсивному окислению и коррозии, поскольку данные процессы для них интенсифицируются при температурах 1000°C [23, 62].

С целью повышение механических свойств инструмента могут применяться покрытия TiC, TiCN и другие. Так карбид титана (TiC) имеет высокий уровень прочности, стойкость к абразивному воздействию, а также жаропрочность и коррозионную стойкость. Покрытия TiC позволяют значительно повысить прочность инструмента. Покрытия на основе TiCN имеют высокую твердость и

износостойкость, соответственно повышают твердость инструмента, снижают коэффициент трения. Высокими тепло- и износостойкостью, а также стойкостью к окислительному износу обладают покрытия TiAlN. Такие покрытия создают тепловой барьер практически изолирующий инструментальный материал и перераспределение теплового потока в стружку [105].

Таким образом, износостойкие покрытия оказывают влияние и на характер контактных процессов при резании в том числе за счет взаимодействия

Существенное влияние на параметры наносимых покрытий, а следовательно, на режущие свойства инструмента оказывает технология их нанесения. Основные распространённые методы нанесения износостойких покрытий, CVD (Chemical Vapor Deposition) и PVD (Physical Vapor Deposition), имеют свои преимущества и недостатки, определяемые технологическими особенностями процесса нанесения [198].

Метод химического осаждения из газовой среды обеспечивает одинаковую толщину нанесенного покрытия при значительной толщине слоя и хорошей адгезии. При этом метод позволяет обеспечить высокую производительность и возможность одновременной обработки большого количества изделий. В качестве минуса технологии в различных источниках приводятся: сниженные прочностные характеристики, недостаточная адгезия, растягивающие поверхностные напряжения, а также ограниченные возможности нанесения покрытий на острые кромки.

Плотность, однородность и высокая прочность адгезии к подложке CVD-покрытий повышают работоспособность инструмента в условиях непрерывного резания. Метод химического осаждения из газовой среды обеспечивает одинаковую толщину нанесенного покрытия при значительной толщине слоя и хорошей адгезии. При этом метод позволяет обеспечить высокую производительность и возможность одновременной обработки большого количества изделий.

Однако, высокая температура (900-1000°C), при которой осуществляется процесс CVD неблагоприятно сказывается на свойствах твердосплавной матрицы,

за счет повышения склонности к сколам и трещинам в результате хрупкого разрушения. Это ограничивает применение инструмента в условиях ударных и циклических нагрузках, в том числе имеющих место при фрезеровании со значительными припусками.

Физический метод осаждения применяется для нанесения покрытий на малоразмерные элементы, обеспечивает покрытие острых режущих кромок, отсутствие взаимодействия с основой, поверхностные напряжения сжатия. В качестве недостатков метода отмечается дороговизна и длительность метода, неравномерность покрытия и другие. Сочетание вязкости и высокой твердости инструмента с PVD-покрытиями обеспечивают стойкость инструмента при знакопеременных нагрузках.

Различия свойств износостойких покрытий и технологии нанесения определяют области их рационального применения.

Применение износостойких многослойных покрытий оказывает существенное влияние на характер контактного взаимодействия при резании. Меняя фрикционные свойства инструмента износостойкие покрытия определяют изменения длины контактных участков по передней поверхности. Происходит перераспределение тепловых потоков, уменьшается степень пластической деформации в зоне стружкообразования, а также снижаются все составляющие силы резания [188].

Однако степень данного влияния зависит не только от состава покрытий и величины слоя, но совершенства технологии и режима нанесения покрытий. Оптимальность характеристик износостойких покрытий определяются условиями работы режущего инструмента.

Например, по сведениям автора работы [278], при точении с высокими скоростями резания более эффективными оказываются покрытия со значительной толщиной. Это объясняется высокими температурами и интенсификацией коррозионно–окислительных и диффузионных процессов, для которых покрытия выполняют роль барьера.

В работе [232] результатом исследования инструмента с многослойным композитным наноструктурированным покрытием $\text{Ti-TiN}-(\text{Ti,Al,Si})\text{N}$ формулируется вывод о нецелесообразности применения покрытий толщиной менее 2 мкм и более 10 мкм из-за низких эксплуатационных свойств. Однослойные покрытия небольшой толщины (не способны оказывать существенного влияния на износ инструмента, в частности окислительный механизм. С ростом же толщины покрытия растут зернистость и внутренние межкристаллитные напряжения, а в многослойной структуре формируются дефекты и внутренние отслоения. Между тем, оптимальная толщина износостойкого слоя покрытия различного состава и структуры зависит от условий обработки и свойств обрабатываемого материала.

Режущий клин инструмента находится в сложно напряженном состоянии под температурно-силовым воздействием. При этом полная длина контакта стружки с поверхностью инструмента определяется взаимодействием деформационного упрочнения и температурного разупрочнения. В результате распределение напряжений в указанных пределах имеет немонотонный характер. Максимальное значение напряжений наблюдается в диапазоне 0,35-0,5 длины участка контакта. Для этой же области характерен и наибольший уровень контактных температур [177, 188].

Концентрация температурно-силового воздействия и разница коэффициентов линейного теплового расширения отдельных структурных элементов многослойного износостойкого покрытия и твердосплавной матрицы закономерно приводит к образованию трещин. Данный вывод подтверждается результатами работы [188], согласно которой первые микротрещины возникают на расстоянии около 0,5 длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента, то есть в зоне наиболее интенсивного теплового воздействия. В дальнейшем под действием адгезионно-усталостных процессов происходит увеличение количества трещин и их распространение по направлению к режущей кромке.

Кроме того, температурно-силовое воздействие на инструмент приводит к упругопластической деформации режущего клина, что еще большее негативное

воздействие. На участке пластического контакта образуются поперечные трещины, расположенные вдоль режущей кромки, перпендикулярно направлению схода стружки. Интенсивность разрушения износостойких покрытий различается в зависимости от состава режущей пластины и назначенных режимов резания, однако имеет общий качественный характер [188].

При этом, в работе [97] утверждается, что для материалов различных групп обрабатываемости при обеспечении оптимальной скорости резания температура в зоне резания сохраняется постоянной. Автор работ [10, 11] на основе исследований обработки жаропрочных сталей и сплавов отмечает, что свойства обрабатываемого материала определяют величину оптимальной скорости резания, а свойства режущего инструмента – максимальную температуру его работоспособности.

Вместе с тем режущие свойства пластины определяются не только характеристиками многослойных износостойких покрытий, но и твердосплавной матрицы. На суммарные физико-механические характеристики влияют процентное содержание отдельных элементов, а также зернистость матрицы. Уменьшение размеров зерна увеличивает плотность упаковки. Площадь межфазных контактов определяет силы, удерживающие карбидные зерна в инструментальном материале и соответственно интенсивность адгезионно-усталостного износа. От объемного содержания фаз зависит прочность твердого сплава, то есть способность сопротивляться хрупким сколам и разрушениям, а также сопротивление пластической деформации под действием возникающих в процессе резания высоких температур и давлений. Кроме того, свойства твердосплавного субстрата в значительной мере определяют эффективность покрытий на режущих инструментах [6].

Согласно традиционным представлениям, мелкозернистый твердый сплав обеспечивает более высокие значения твердости и износостойкости, что необходимо для чистовой обработки. Крупнозернистая матрица позволяет обеспечить более высокие значения статической и ударной прочности, что необходимо в условиях черновой обработки. Однако, использование специальных технологий производства зерен карбида вольфрама и изготовления композиции, а

также специальные добавки в составе сплава позволяют некоторым производителям режущего инструмента получать мелкозернистые сплавы с высокими показателями твердости (92,1 HRA) и изгибной прочности (4300 МПа) [229, 67].

Немаловажное значение имеет и равномерность распределение связки по объему твердосплавной матрицы. Как правило, содержание связки в импортном инструменте не превышает 7%. Связка распределяется по объему в виде тонких прожилок толщиной не более 1 мкм. Уменьшение доли связки снижает адгезию. Однако увеличение содержания кобальта усиливает неблагоприятное влияние углерода и ухудшает свойства сплава [136].

Пористость и графитовые включения оказывают отрицательное влияние на стойкость режущего инструмента. Углерод присутствует на всех этапах производства твердого сплава и его избыточное содержание приводит к формированию сгруппированных либо распределенных графитовых включений. В то же время обезуглероживание также отрицательно влияет на прочность и твердость инструментальной пластины. Исключение данных дефектов требует совершенствования технологии производства, в том числе применения вакуумного компрессионного оборудования и тд. [136].

Таким образом, отдельные элементы многослойных износостойких покрытий и твердосплавной матрицы при качественном сохранении общей динамики контактного взаимодействия влияют на интенсивность отдельных процессов и явлений. Это выражается в количественном изменении величины износа инструмента и результатов обработки. Достоверная оценка и надежность прогноза затрудняется сложным многофакторным характером процесса резания. Несовершенство технологии изготовления и колебание фактических характеристик режущего инструмента вызывает необходимость его диагностики в производственных условиях [217, 271].

3.2 Вопросы оперативной диагностики характеристик режущего инструмента в производственных условиях

Как уже отмечалось ранее, свойства обрабатываемых сталей и сплавов определяются: химическим составом, формой кристаллической решетки и внутренней структурой, наличием внутренних дефектов всех видов и др. На обрабатываемость материала существенное влияние могут оказывать свойства поверхностного слоя заготовки, сформированные на предыдущем технологическом этапе. При этом наличие неоднородностей структуры или химического состава вызывает локальное отклонение свойств материала [130]. Кроме того, следует учитывать непостоянство припуска вследствие отклонения размеров заготовки.

Разброс свойств машиностроительных сталей и сплавов согласно литературным источникам [94, 172] численно оценивается коэффициентом вариации от 2 до 11% по пределу прочности, от 3 до 21% по пределу текучести. Такой же порядок имеет разброс значений твердости и теплофизических характеристик материалов. При этом труднообрабатываемые материалы отличаются еще большей нестабильностью свойств по сравнению с конструкционными сталями. Существенный разброс свойств имеют и инструментальные твердые сплавы (например, коэффициент вариации предела прочности при изгибе составляет 0,034...0,190).

С точки зрения статистической оценки вариации разброса свойств как обрабатываемых, так и инструментальных материалов являются достаточно однородными. Однако, такая оценка является достаточно односторонней. Только лишь вариативность характеристик заготовки влечет за собой изменение контактных нагрузок и температуры в зоне резания, определяющих интенсивность износа инструмента [53, 54]. В условиях реального производства существенное влияние на стойкость инструмента помимо свойств, обрабатываемого и инструментального материалов, оказывают жесткость, статистическую и динамическую точность технологического оборудования, жесткость и точность

оснастки. В итоге даже в рамках одной партии поставки режущего инструмента разброс стойкости может составлять 15—35 %, а необходимость обеспечения надежности выполнения операций на станках с ЧПУ приводит к чрезмерному расходу режущего инструмента [110].

Согласно результатам статистических исследований в производственных условиях, приводимых в работе [73] 53,1 % твердосплавных пластин, было заменено до наступления нормативного износа, 10,8 % пластин – в связи с разрушением, 36,2 % пластин – из-за превышения величины нормативного износа. Преждевременный выход из строя режущего инструмента ведет к простоям технологического оборудования, время которого может достигать 20 % от общего объема [10]. Что еще хуже, преждевременная поломка инструмента при чистовой или окончательной обработке поверхностей с высокой вероятностью ведет к браку детали. В результате растут производственные затраты и себестоимость выпускаемой продукции.

Следует отметить, что характеристики металлорежущего оборудования и технологической оснастки контролируются техническими службами производственного предприятия и могут быть обеспечены своевременным контролем, а также проведением регламентированного технического обслуживания и необходимым ремонтом. Входной же контроль исходных заготовок на предмет соответствия требованиям стандартов не способен в полной мере устранить неопределенность свойств заготовок как в объеме отдельного образца, так и в пределах отдельной партии.

Учету вариативности периода стойкости лезвийного инструмента посвящено исследование [10], результаты которого подтверждают многофакторность и стохастический характер процесса резания. В работе предлагается методика оценки параметров стойкостных зависимостей инструмента на основе обобщенной модели отказов по статистическим данным, которая позволяет оптимизировать время работы инструмента до замены с целью повышения эффективности его эксплуатации. В том числе при обработке новых конструкционных и инструментальных материалов, когда отсутствует необходимая справочно-

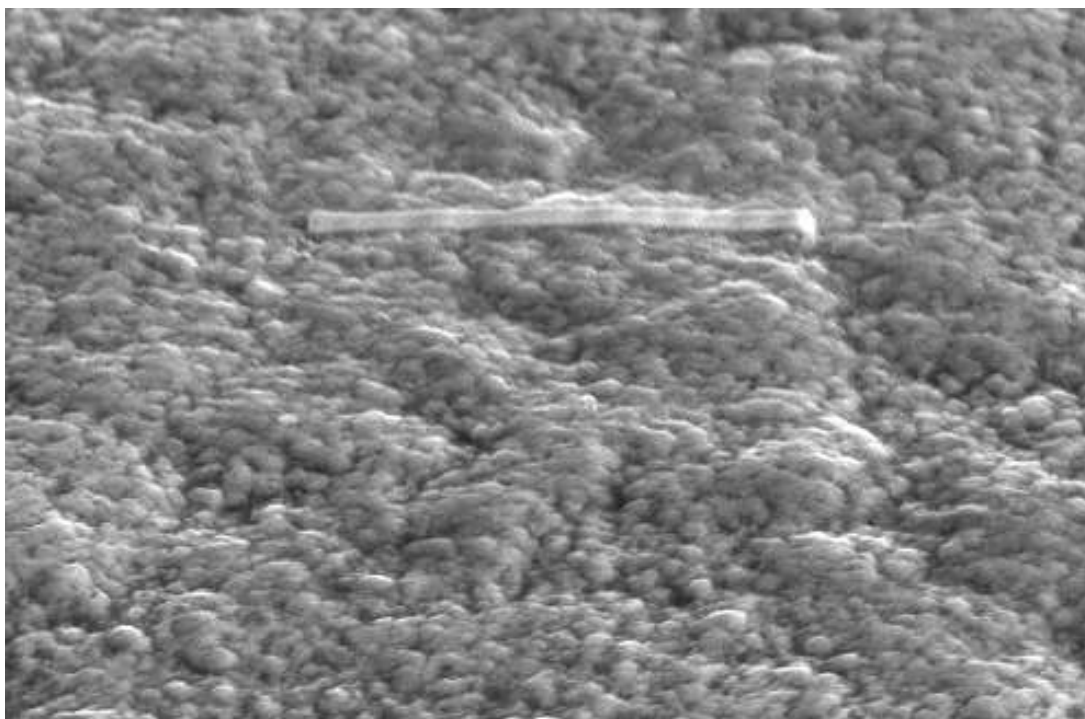
методическая база. Подобный подход на наш взгляд может быть применим на этапе оптимизации отлаженной технологии с подобранными режимами в условиях достаточно высокой серийности производства, но не представляет инструментарий для управляемого воздействия на ход операции с целью нивелирования отклонений и рассогласования с требуемыми результатами.

Вместе с тем, именно режущий инструмент в производственных условиях зачастую играет ключевую роль в процессе резания и принимает на себя функцию основного направления его стабилизации. Геометрия инструмента напрямую влияет на качество обработки. Конструкция – определяет эффективность гашения вибраций. Материал режущего инструмента определяет способность противостоять нагрузкам и тепловым воздействиям и в итоге его долговечность и износостойкость. В связи с чем закономерным является широкое распространение на рынке импортного инструмента, разброс стойкости которого кратно меньше отечественных аналогов. На практике по разбросу стойкости сменных режущих пластин можно судить о его качестве. Причинами колебания стойкости являются: неоднородность структуры твердосплавной матрицы, неравномерное распределение связки, пористость, графитовые включения и др. [136, 138].

Образование пор в объеме твердосплавной матрицы ведет к ухудшению физико-механических свойств и стойкости сменных пластин. Поры выступают источником вторичных дефектов таких как внутренние разрывы и трещины [104]. В частности, в твёрдом сплаве, не прошедшем горячее изостатическое уплотнение с целью уменьшения свободного избыточного объема, образование субмикронных трещин приводит к снижению прочности на изгиб на 30% [24]. Образование указанных дефектов закономерно уменьшает и твердость матрицы.

Таким образом, количественные характеристики сменной режущей пластины определяются не только структурой твердосплавной матрицы, износостойкими покрытиями, но и внутренними дефектами, доля которых во многом зависит от технологии производства пластины и отдельных технологических этапов.

Оценить качество твёрдосплавного инструмента с износостойкими покрытиями возможно методами металлографии, сканирующей электронной микроскопии и спектрального химического анализа.



а



б

а – образец 1; б – образец 2

Рисунок 3.2 - Морфология поверхности сменных твердосплавных пластин с износостойким покрытием

Проведенные исследования сменных твердосплавных пластин с износостойкими покрытиями различных производителей позволили подтвердить вариативность характеристик инструмента.

Так в результате исследования с помощью сканирующего электронного микроскопа Versa 3D DualBeam было установлено непостоянство морфологии поверхности сменных пластин даже рамках даже одной партии (рисунок 3.2).

С целью формирования ионного колодца для изучения состава и структуры приповерхностных слоев режущей пластины на поверхность наносилось защитное покрытие для обеспечения ровных стенок. Длина слоя защитного покрытия (светлая полоса на рисунке 3.2) составляет порядка 25 мкм.

Микрофотографии демонстрируют существенное отличие морфологии поверхности пластин позволяющее сделать вывод о вариативности коэффициента трения, а следовательно, прямом влиянии на характер контактных процессов.

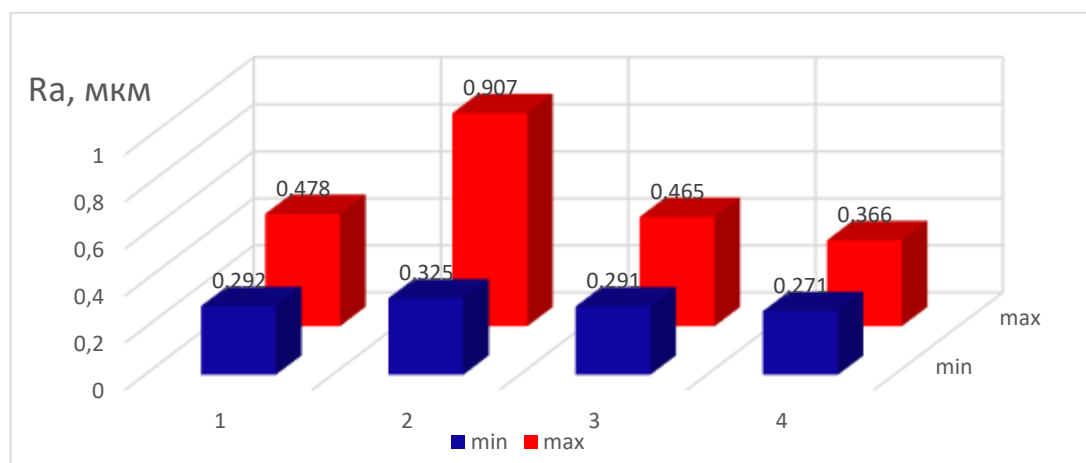
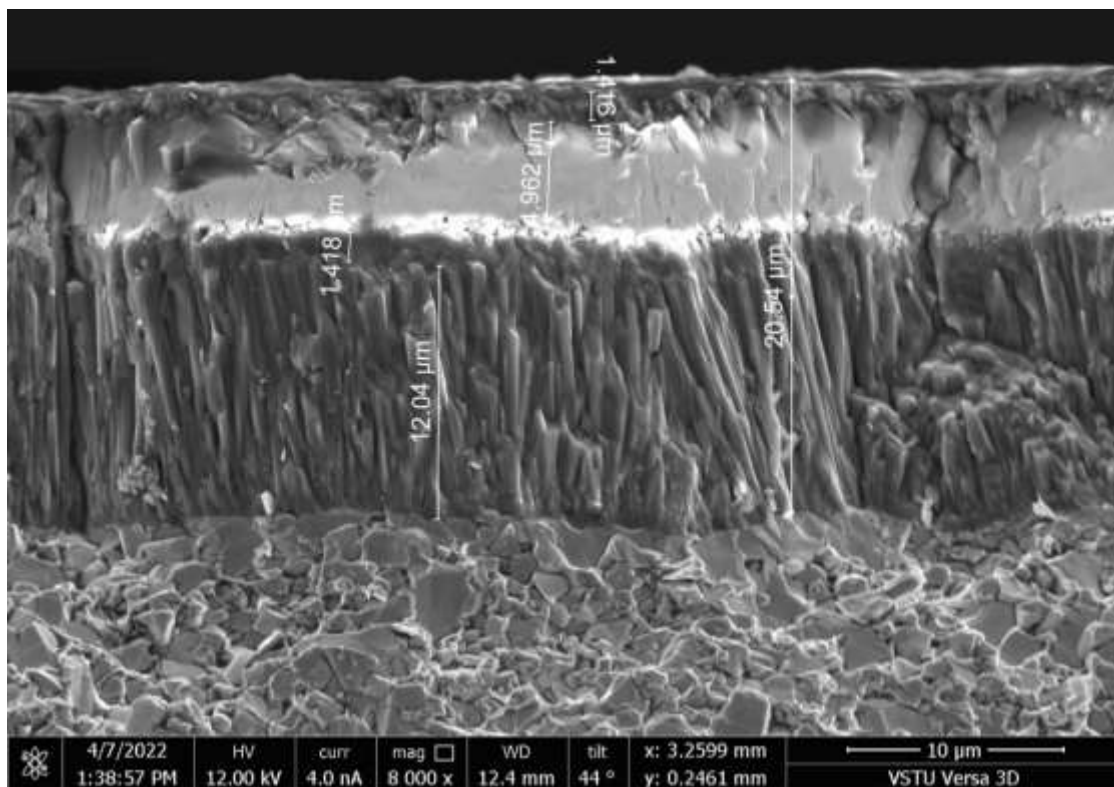


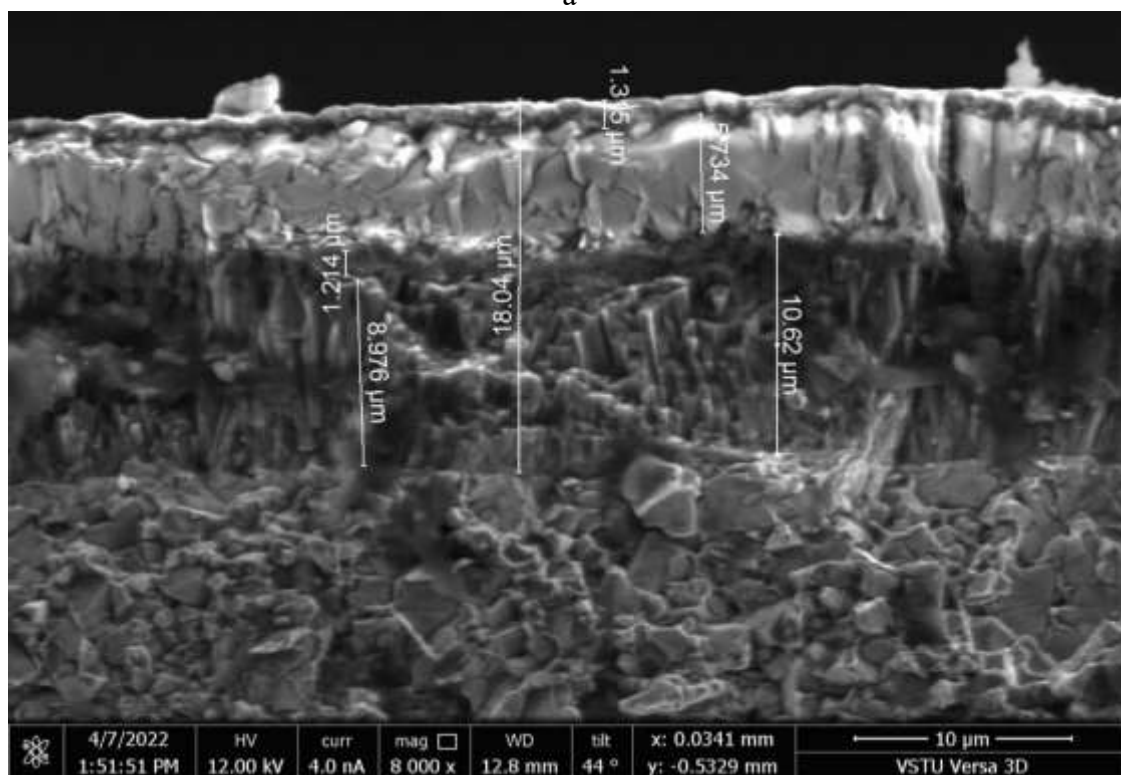
Рисунок 3.3 – Разброс параметров среднего арифметического отклонения профиля Ra шероховатости поверхностей пластин

Измерение параметров шероховатости поверхностей сменных твердосплавных пластин в рамках партии поставки (рисунок 3.3) также выявило существенный разброс параметров микропрофиля (от 20 до 75%), который не всегда в высокой степени коррелирует с вариативностью морфологии поверхности, что может быть объяснено различной разрешающей способностью примененных сканирующего электронного микроскопа Versa 3D DualBeam и профилометра

Mitutoyo Surftest SJ-210. Однако результаты подтверждают тезис о нестабильности микрогеометрии серийно выпускаемых режущих пластин.



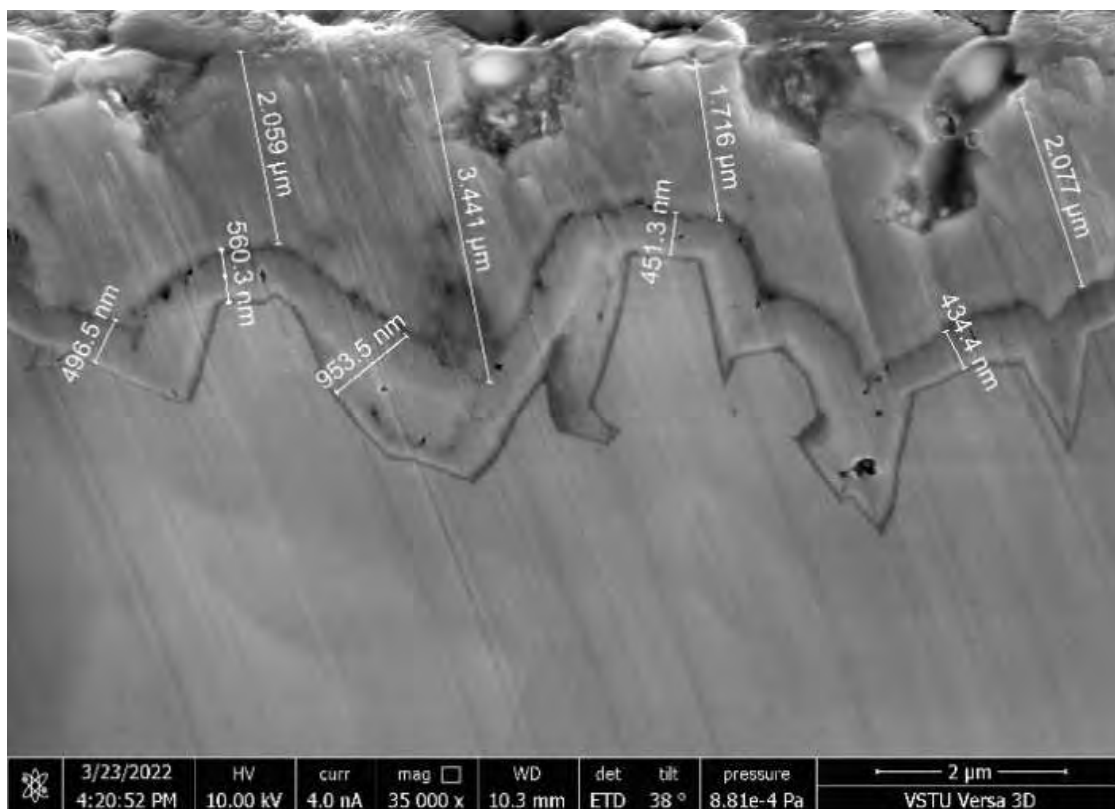
а



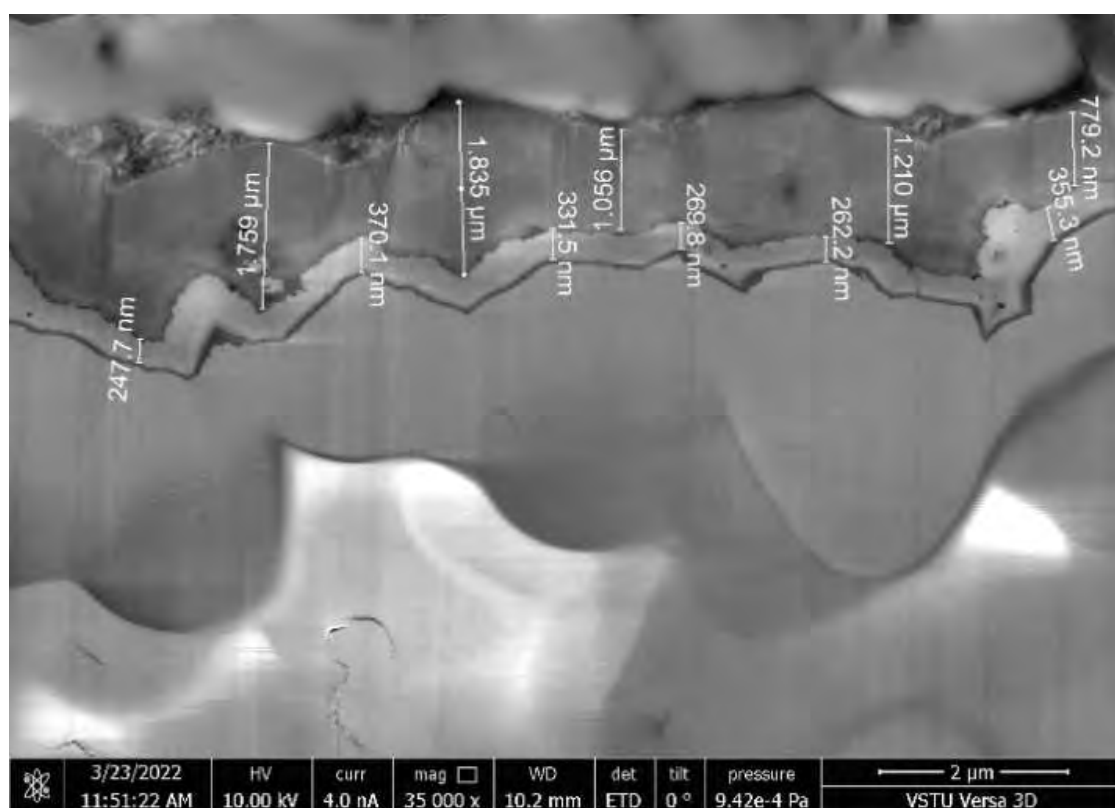
б

а – образец 1; б – образец 2

Рисунок 3.4 – Структура поверхностного слоя твердосплавной пластины с многослойным износостойким покрытием (Sandvik Coromant)



а

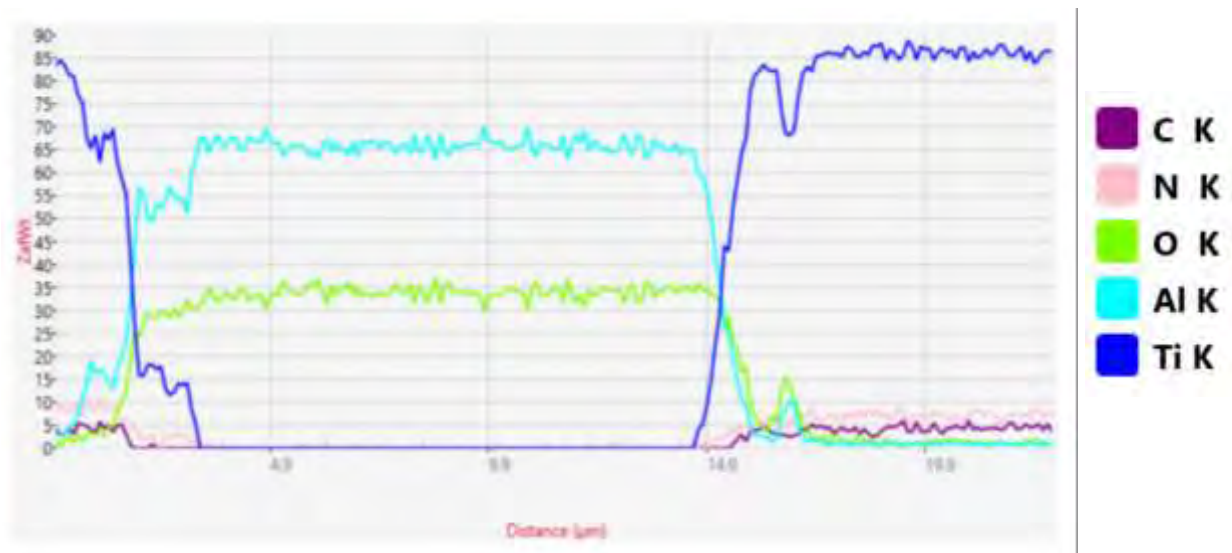


б

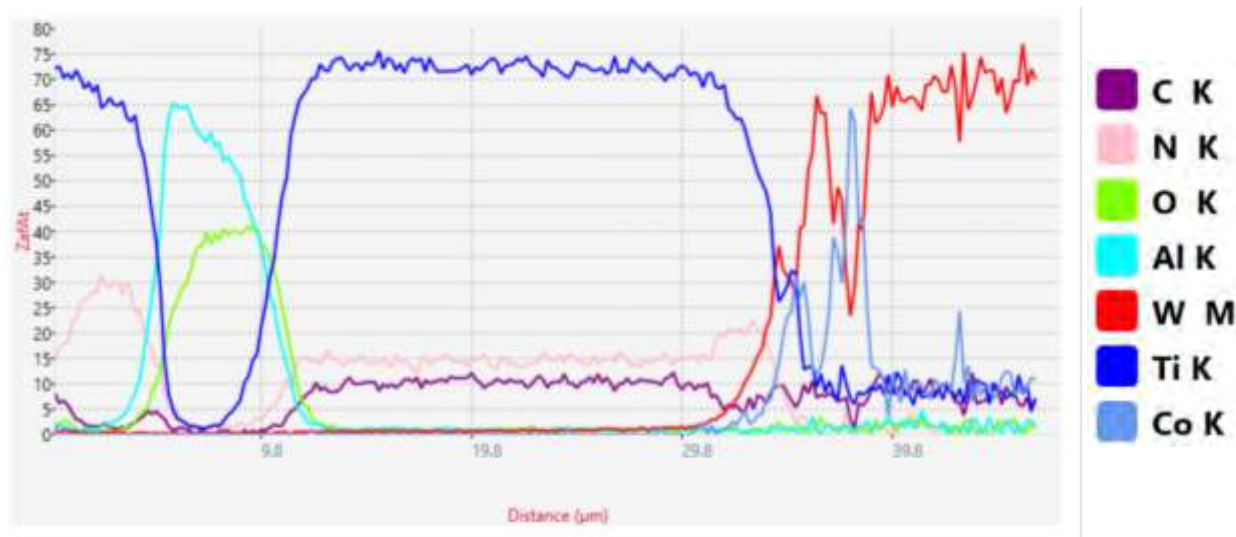
а – образец 1; б – образец 2

Рисунок 3.5 – Структура поверхностного слоя твердосплавной пластины с многослойным износостойким покрытием (Korloy)

Анализ поверхностного слоя сменных твердосплавных пластин с износостойким покрытием одной группы обрабатываемости ряда производителей выявил различие по толщине слоя покрытия (рисунки 3.4, 3.5) при сопоставимом химическом составе (рисунок 3.6). При этом в рамках одной партии поставки наблюдается различная степень неравномерности отдельных слоев покрытия, что можно отнести к несовершенству технологии их нанесения.



а



б

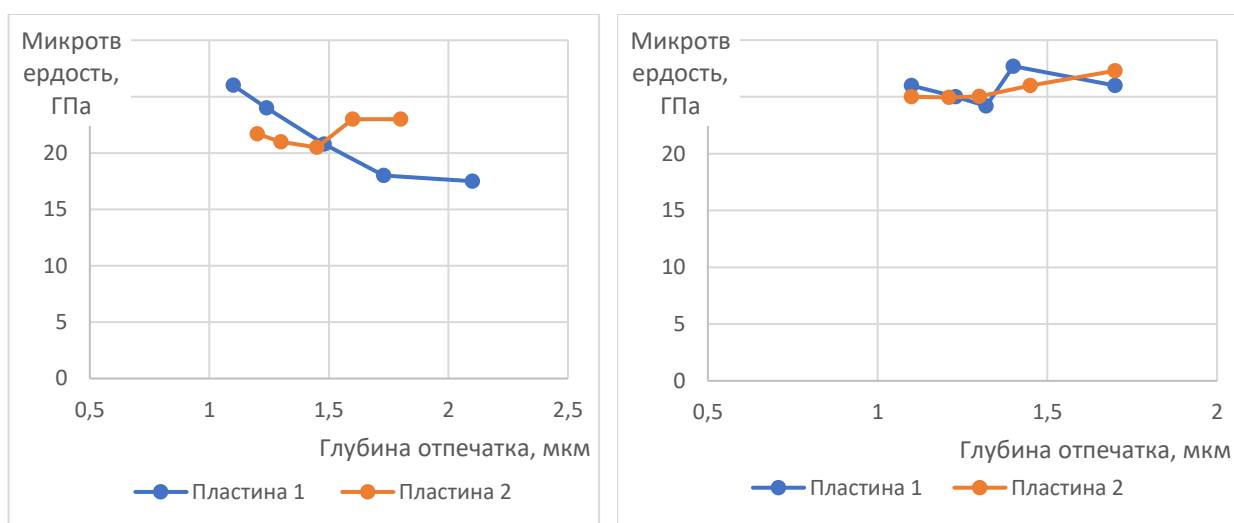
а – пластина Sandvik Coromant 1; б – пластина Korloy

Рисунок 3.6 – Спектральный анализ поверхностного износостойкого покрытия сменных режущих пластин

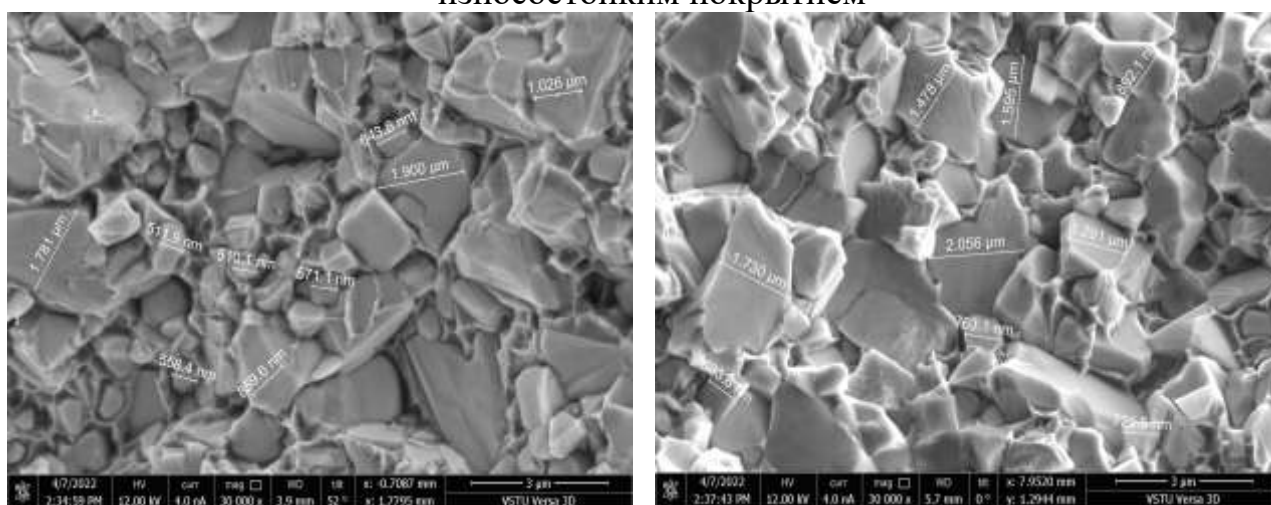
Так поверхностные покрытия обеих пластин (рисунок 3.6) включают слои (начиная с объемов твердосплавной матрицы): нитрида (TiN), оксида алюминия

(Al₂O₃) и карбонитридов титана (Ti(CN)). При этом следует отметить не только существенно большую толщину слоя Al₂O₃ пластины Sandvik, но и несколько отличные доли и колебания отдельных химических элементов по пластинам, что позволяет говорить о качественном отличии применяемых технологий нанесения износостойких покрытий.

Произведенная оценка микротвердости поверхностного слоя сменных режущих пластин, выполненная по методике [129] иллюстрирует вариативность измеренных значений и подтверждает тезис о разбросе физико-механических характеристик инструмента (рисунок 3.7).



а – пластина Korloy твердый сплав NC9125; б – пластина Korloy твердый сплав PC8110
Рисунок 3.7 – Значение микротвердости поверхности твердосплавных пластин с износостойким покрытием



а – пластина №1, б – пластина №2
Рисунок 3.8 – Внутренняя структура твердосплавной матрицы

Кроме того, в объеме твердосплавной матрицы наблюдается вариативность размера зерен (рисунок 3.8). А в некоторых случаях были зафиксированы внутренние дефекты, в частности микротрещины и поры (рисунок 3.9, 3.10).

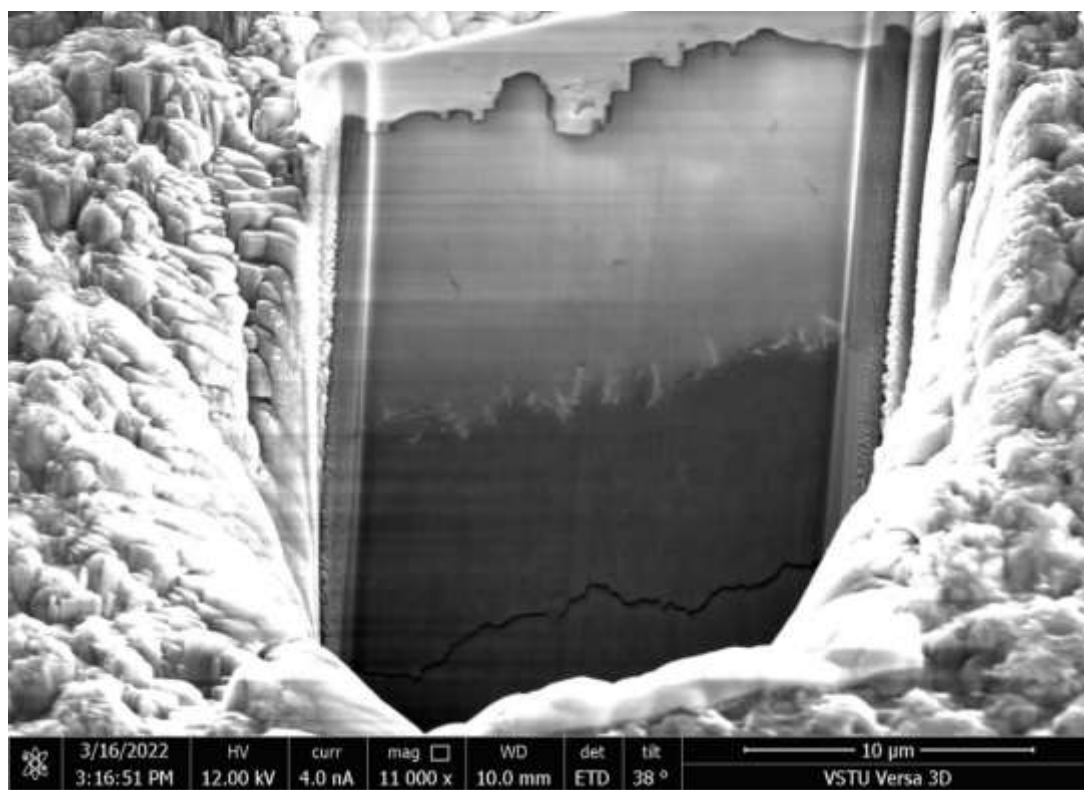


Рисунок 3.9 – Микротрещина в объеме твердосплавной матрицы инструмента, обнаруженная методом *FIB* микроскопии

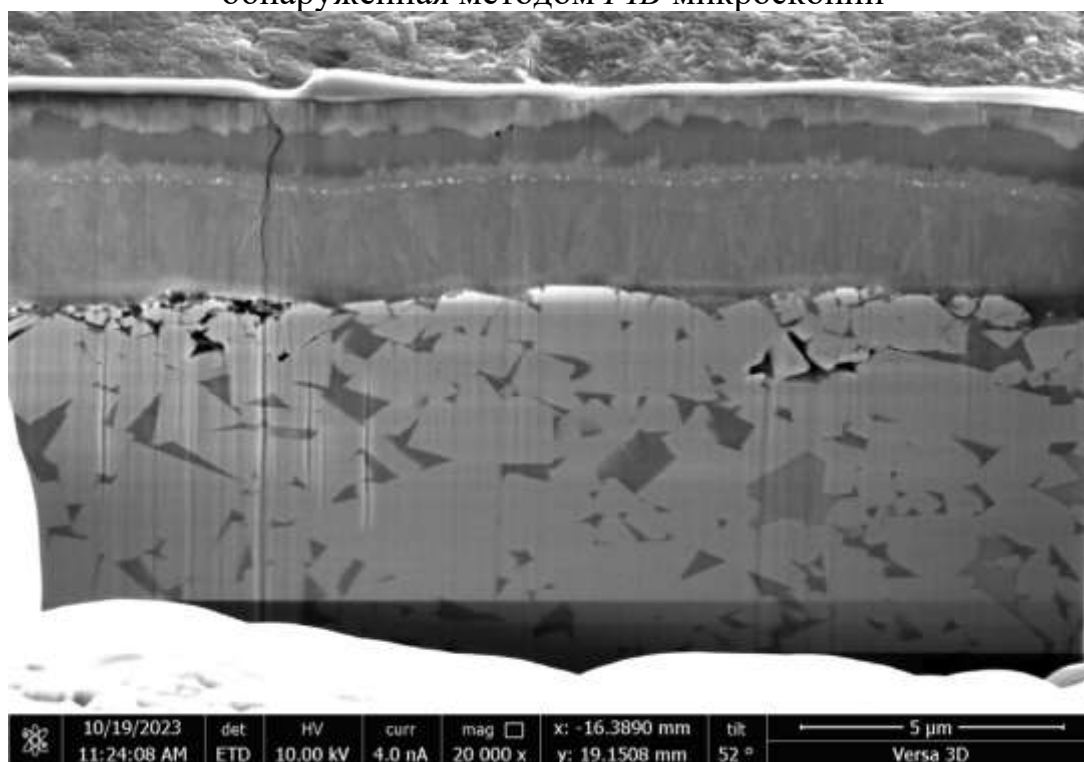


Рисунок 3.10 – Дефекты в виде пор и микротрещин в объеме поверхностных слоев сменной режущей пластины

Таким образом, причинами нестабильности режущих характеристик 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, непостоянство размеров твердосплавных зерен матрицы, а также дефекты в виде микропор и трещин как в объеме твердосплавной матрицы, так и в поверхностных износостойких покрытиях. Дефекты режущей пластины имеют случайный характер и определяются технологическими факторами. Оценка микрогеометрии поверхности режущей пластины может быть выполнена с помощью профилометров достаточно оперативно. Полноценный анализ морфологии поверхности требует оптического контроля и более трудоемок. Оценка же внутренних дефектов затруднительна в связи со стохастическим характером их формирования и распределения, отсутствия проработанных методик неразрушающего контроля и трудоемкостью металлографических методов. Все это делает применение описанных методов приемлемым только для производственных лабораторий и может быть реализовано только в виде выборочного контроля входного контроля режущего инструмента.

Существенное влияние на характер контактного взаимодействия и интенсивность износа инструмента оказывает температурная напряженность процессе резания, поэтому оценка теплопроводности твердосплавных пластин с износостойкими покрытиями имеет чрезвычайное значение для прогнозирования их стойкости в условиях вариативности характеристик.

По выборке сменных режущих пластин Sandvik Coromant CNMM 250924 HR 4425 (группа обрабатываемости Р) и CNMM 250924 MR 2220 (группа обрабатываемости М) были проведены измерения теплопроводности методом «горячей плиты» в измерителе теплопроводности «КИТ-02Ц «Алмаз». Средние значения коэффициентов теплопроводности (λ) для каждой твердосплавной пластины приведены в таблицах 3.1 и 3.2 соответственно.

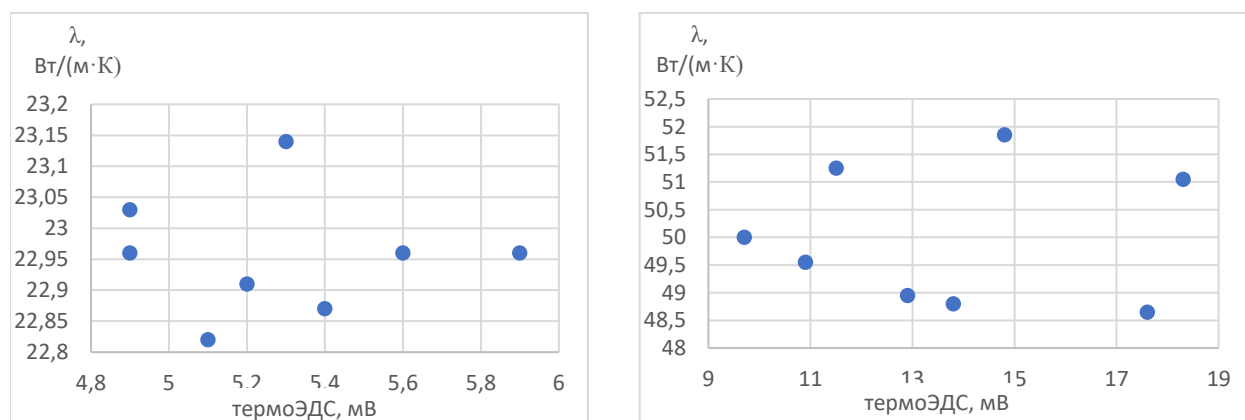
Таблица 3.1 – Теплопроводность сменных режущих пластин Sandvik Coromant CNMM 250924 HR 4425 (группа обрабатываемости Р)

№ пластины	1	2	3	4	5	6	7	8
ТермоЭДС, мВ	4,9	5,1	4,9	5,2	5,9	5,3	5,6	5,4
λ , Вт/(м·К)	22,8	22,96	23,0	22,91	22,96	23,0	22,96	22,92

Таблица 3.2 – Теплопроводность сменных режущих пластин Sandvik Coromant CNMM 250924 MR 2220 (группа обрабатываемости М)

№ пластины	1	2	3	4	5	6	7	8
ТермоЭДС, мВ	18,3	11,5	9,7	12,9	10,9	14,8	17,6	13,8
λ , Вт/(м·К)	51,05	51,25	50,0	48,95	49,55	51,85	48,8	48,65

Поскольку коэффициент вариации для режущих пластин групп обрабатываемости Р и М равны соответственно 0,004 и 0,025, то результаты измерений в выборке можно считать стабильными. Однако, так как в обоих случаях разброс значений коэффициента теплопроводности находятся в пределах 10%-ного интервала, определяемого допустимой погрешностью измерения, то рассеивание значений можно принять случайным.

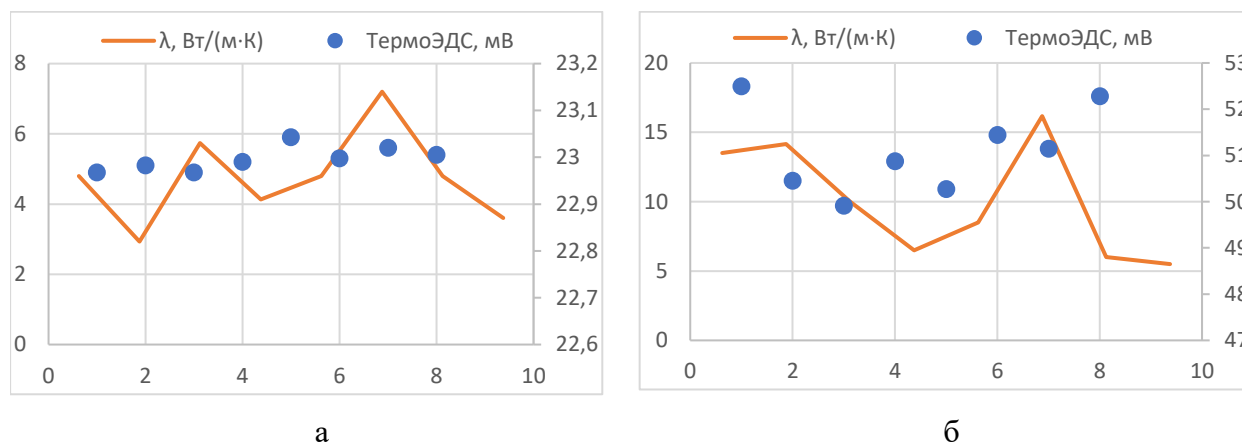


а (а - группа обрабатываемости Р; б – группа обрабатываемости М)

Рисунок 3.11 – Графическое представление корреляционной связи между термо-ЭДС и коэффициентом теплопроводности

Отдельно необходимо отметить отсутствие четкой корреляции между полученными значениями теплопроводности и термоЭДС в рамках проведенных

исследований (визуально проиллюстрировано на рисунках 3.11 и 3.12). Вероятность корреляционной связи для пластин групп обрабатываемости Р и М не превышает соответственно 2% и 4%.



(а - группа обрабатываемости Р; б – группа обрабатываемости М)

Рисунок 3.12 – Коэффициент теплопроводности и термо-ЭДС

Примененный в работе метод измерения теплопроводности («горячей плиты») имеет ряд ограничений. В частности, относительно размеров контролируемых образцов и геометрии контактных поверхностей [37]. Таким образом, метод контроля является разрушающим. Кроме того, не соответствие контролируемых образцов установленным границам сопряжено с непрогнозируемым увеличением погрешности измерения, а следовательно, потере достоверности результатов. Для большинства применяемых на практике режущих пластин данный метод становится малоприменимым.

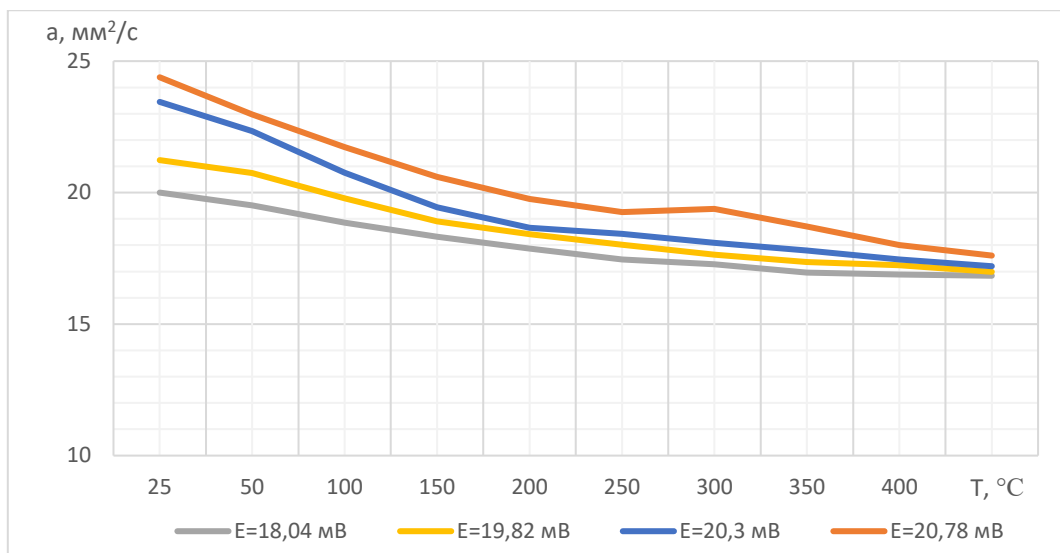
С целью повышения точности результата для слоистых материалов предполагается определение эффективного коэффициента теплопроводности в соответствии с удельной долей (оценивается по толщине) каждого слоя в отдельности. Так в работе [70] приводятся данные о наиболее распространённых видах твердосплавной основы, структурах покрытий для групп обрабатываемых материалов, способах нанесения покрытия, условий обработки согласно ISO и соответствующих толщинах покрытий.

Таблица 3.3 – Теплопроводность твердосплавной основы в зависимости от группы обрабатываемого материала и характеристик износостойких покрытий

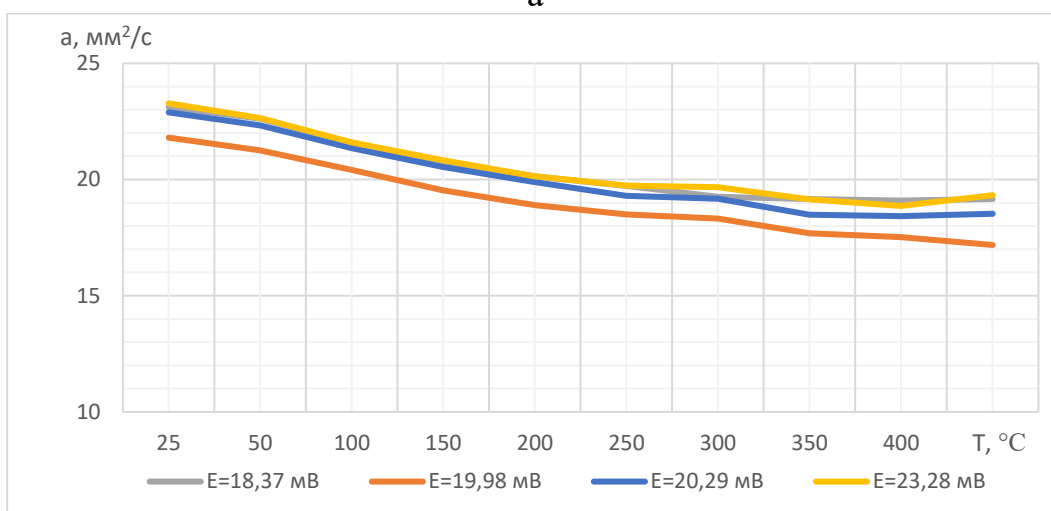
Группа обрабатываемого материала и вид обработки по ISO			P01-P05	P10-P20	P25-P40	M05-M20	M25-M35
Теплопроводность твердосплавной основы λ , Вт/(м • К)			23	27	41	50	52
Группа обрабатываемого материала по ISO	Тип покрытия	Структура покрытия	Вид обработки по ISO	Толщина покрытия, мкм	Теплопроводность покрытия λ , Вт/(м • К)		
P	CVD	TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN	05	22	30,2		
			15	18	31,1		
			25	16	34,3		
			35	14	34,5		
	PVD	TiAlN-TiN	15	9,5	39,4		
			25	8	48,4		
			35	8	48,4		
M	CVD	TiCN-Al ₂ O ₃ -TiN	15	9,5	38,1		
			25	9,5	38,6		
	PVD	TiAlN-TiN	05	8	54,2		
			15	8	54,2		
			25	8	55,3		

Приведенная информация весьма полезна на этапе технологической подготовки производства. Как уже было установлено ранее, отклонения размеров и состава отдельных структурных элементов серийно выпускаемых сменных твердосплавных пластин с износостойкими покрытиями от расчетных значений с целью оперативной диагностики режущих свойств инструмента не позволяет применения описанных выше допущений.

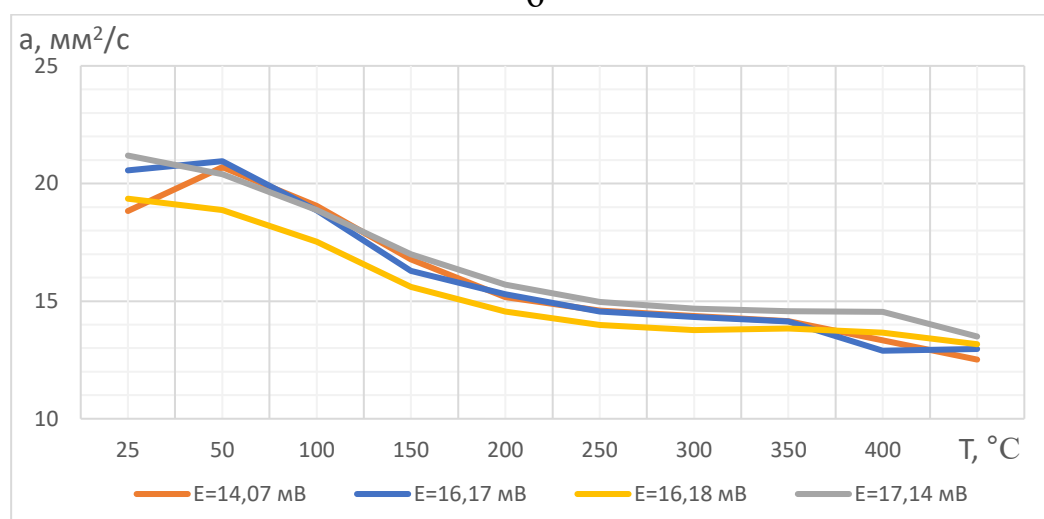
Определенными преимуществами в данном направлении предоставляет измерения температуропроводности методом лазерной вспышки на приборе LFA 467. Метод позволяет определять теплопроводность однородных и многослойных образцов относительным способом – в сравнении с эталоном. Как и в предыдущем случае, измерение требует подготовки контролируемых образцов. Однако, их геометрические размеры позволяют производить измерения более широкого типоразмера сменных режущих пластин. Более того, методика измерений позволяет отследить динамику изменения температуропроводности в достаточно широком диапазоне температур (-100 ...+500 °С).



а



б



в

(а - KORLOY PC8110, группы обрабатываемости М, S, Н; б - KORLOY NC9125, группа обрабатываемости М, S; в - KORLOY UNC805, группа обрабатываемости S)

Рисунок 3.13 – Изменение коэффициента температуропроводности сменной режущей пластины в зависимости от температуры

Так результаты измерений сменных режущих пластин Korloy различных групп обрабатываемости также выявил определенную вариативность с общей тенденцией уменьшения значений температуропроводности с ростом температуры (рисунок 3.13). При этом разброс значений температуропроводности во всем рассматриваемом температурном диапазоне сменных режущих пластин KORLOY NC9125 (группа обрабатываемости M, S) составил от 4 до 20%, пластин KORLOY PC8110 (группы обрабатываемости M, S, H) и UNC805 (группа обрабатываемости S) – от 6 до 12% и от 5 до 12% соответственно.

Теплопроводность материала может быть определена как:

$$\lambda = a \cdot c \cdot \rho , \quad (3.1)$$

где λ - коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;

a - коэффициент температуропроводности, м²/с;

c - удельная теплоемкость, Дж/кг·К;

ρ - плотность, кг/м³.

Учитывая, что изобарная удельная теплоемкость зависит от структуры и химического состава, а плотность материала не постоянна во всем диапазоне температур – подобный расчет для слоистой структуры режущей пластины будет иметь определённые допущения, в результате чего достоверность результата существенно снизится.

Более того, как и в предыдущем случае существенной корреляции между величиной температуропроводности и термоЭДС установлено не было. Необходимость же подготовки образцов для измерения исключает возможность нахождения взаимосвязи между периодом стойкости отдельных пластин и величиной температуропроводности, а значит сплошной диагностики режущего инструмента в производственных условиях.

Поскольку механизм электропроводности и теплопроводности в металлах обусловлен одними и теми же факторами, то с целью проверки возможности оценки работоспособности сменных инструментальных пластин в работе были проведены исследования электрических свойств твердосплавного режущего инструмента с многослойными износостойкими покрытиями.

Оценка электропроводности сменных инструментальных пластин проводилась через измерение обратной величины, полного электрического сопротивления. Необходимо отметить, что полное электрическое сопротивление определяется совокупностью электрофизических свойств (удельное сопротивление, удельная электропроводность) отдельных слоев износостойкого покрытия (формула 3.2), включающих карбиды, нитриды, оксиды и карбонитриды, и зависит от технологии производства и толщины отдельных слоев. Величины удельного сопротивления материалов отдельных слоев износостойкого покрытия представлены в таблице 3.4 [266, 15, 112, 163, 178, 189].

Таблица 3.4 – Удельное электрическое сопротивление материалов, составляющих многослойное CVD-покрытие

Расположение слоя по отношению к матрице		Материал	Удельное сопротивление при 20 °С, Ом*см*10 ⁻⁶		Температурный коэффициент сопротивления
3	внешний	TiN	металлоид *	21,7...25,0	0,016
2	промежуточный	Al ₂ O ₃	диэлектрик	1*10 ¹⁶ ...1*10 ¹⁷	-8,16*10 ¹²
1	внутренний	Ti[CN]	металлоид *	23,2...27,0	0,016
0	твердый сплав (матрица)		металлоид *	9,7...15,0	0,004
* примечание:			термин «металлоид» в данном контексте используется в значении: «вещество, не являющееся металлом, но близкое к металлам по физическим свойствам»		

Качественно характер Удельное сопротивление многослойного токопроводящего материала может быть определено в соответствии с известными правилами расчета сопротивления участка электрической цепи, включающей несколько последовательно соединенных резисторов (4).

$$r_{\Sigma} = \frac{\sum_i r_i \cdot h_i}{\sum_i h_i}. \quad (3.2)$$

где r_{Σ} – «эффективное» удельное сопротивление твердосплавной пластины с многослойным покрытием;

r_i и h_i – удельное электрическое сопротивление и толщина каждого i -го слоя, включая основной слой (твердосплавную матрицу).

Качественная зависимость удельного электрического сопротивления от температуры представлено на рисунке 3.14. Как видно из рисунка наибольшее удельное электрическое сопротивление из всех элементов рассматриваемого износостойкого покрытия имеет оксид алюминия ($r = 1 \cdot 10^{16} \dots 1 \cdot 10^{17}$ мкОм*см), который при обычных условиях является диэлектриком. Однако, при повышенных температурах, которые достигаются в процессе резания на практически применяемых скоростях при получистовой и чистовой обработке удельное сопротивление оксида алюминия уменьшается практически, на 11 десятичных порядков, и он себя как токопроводящий материал. Кроме того, «эффективное» электрическое сопротивление в меньшей степени от электрофизических свойств твердосплавной матрицы, материалов внешнего (TiN) и внутреннего (Ti[CN]) слоев износостойкого покрытия. Существенное влияние на удельное сопротивление оксида алюминия могут оказать примеси (химическая чистота), а также технология нанесения и исходное сырье [37].

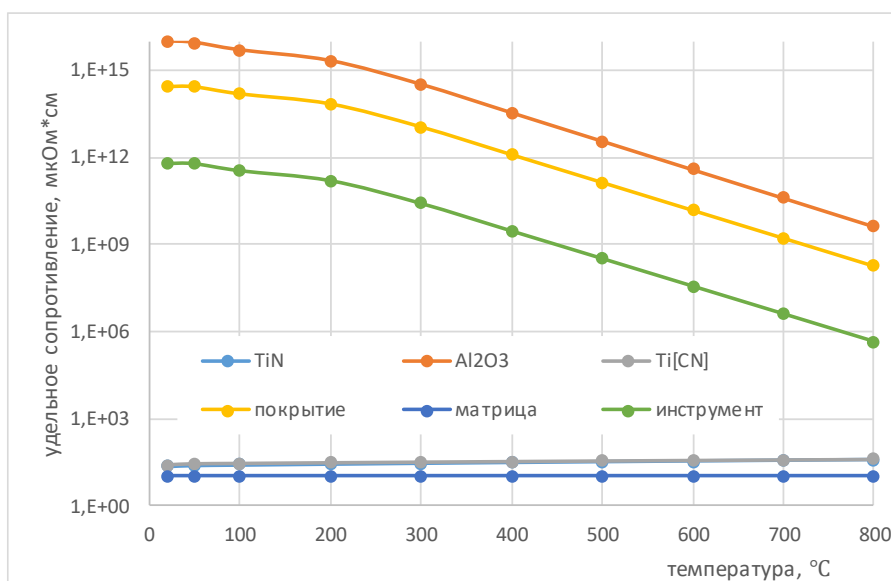


Рисунок 3.14 – Изменение удельного электрического сопротивления при увеличении температуры

Для количественной оценки электрического сопротивления пластин из всей выборки предварительно тарированных по величине термо-ЭДС пробного рабочего хода сменных режущих пластин групп обрабатываемости М и S были отобраны несколько образцов, для которых были проведены измерения согласно описанной в главе 2 методике.

Результаты измерений электрического сопротивления пластин группы обрабатываемости М представлены в таблице 3.5, группы обрабатываемости S – в таблице 3.6.

Таблица 3.5 – Протокол измерений полного электрического сопротивления (группа применимости инструмента М)

Величина термоЭДС пластины, мВ	Сопротивление, Ом*10 ⁻³		
	Частота переменного тока, кГц		
	1	10	100
17,61	523	501	527
	543	553	572
	595	605	619
	537	420	447
	538	542	562
Среднее	547,2	524,2	545,4
Стандартное	27,73	69,05	64,07
Коэф. вариации	0,05	0,13	0,12
18,34	562	618	644
	601	614	602
	882	885	914
	730	728	818
	482	490	512
Среднее	651,4	667	698
Стандартное	156,99	148,14	164,15
Коэф. вариации	0,24	0,22	0,24
19	597	600	618
	672	674	685
	693	662	674
	692	690	729
	529	534	552
Среднее	636,6	632	651,6
Стандартное	71,85	64,53	68,30
Коэф. вариации	0,11	0,10	0,10
19,3	909	928	964
	900	896	903
	895	907	931
	1003	993	1006
	1006	1145	1136
Среднее	942,6	973,8	988
Стандартное	56,74	102,82	91,21
Коэф. вариации	0,06	0,11	0,09

Было установлено, что рассеивание измеренных значений электрического сопротивления сменных режущих пластин группы обрабатываемости М (таблица

3.5) можно для отдельных случаев можно охарактеризовать как среднее (коэффициент вариации находится в пределах 0,1...0,2) и даже значительное (коэффициент вариации находится в пределах 0,2...0,33). Сами совокупности значений можно считать однородными, но имеющих существенную величину относительной погрешности – до 60 %.

Таблица 3.6 – Протокол измерений полного электрического сопротивления (группа применимости инструмента S)

Величина термоЭДС пластины, мВ	Сопротивление, Ом*10-3		
	Частота, кГц		
	1	10	100
16,45	1067	1067	1066
	1227	1198	1252
	1337	1358	1423
	1356	1350	1358
	1315	1327	1359
Среднее	1260,4	1260	1291,6
Стандартное	118,86	125,78	140,25
Коэф. вариации	0,09	0,10	0,11
16,58	923	927	954
	804	806	814
	828	837	852
	1015	1020	1022
	895	928	940
Среднее	893	903,6	916,4
Стандартное	83,57	84,64	83,30
Коэф. вариации	0,09	0,09	0,09
16,59	575	592	615
	692	711	721
	720	717	735
	655	669	703
	652	656	683
Среднее	658,8	669	691,4
Стандартное	54,61	50,41	46,96
Коэф. вариации	0,08	0,08	0,07
16,9	635	632	646
	549	575	629
	616	638	631
	497	485	491
	482	490	512
Среднее	555,8	564	581,8
Стандартное	68,64	74,06	73,97
Коэф. вариации	0,12	0,13	0,13

Рассеивание значений электрического сопротивления сменных режущих пластин группы обрабатываемости S (таблица 3.6) существенно меньше, как и величина относительной погрешности, которая составила от 18 до 28 %.

Результаты измерений теплопроводности и электропроводности носят качественный характер, поскольку не было выявлено функциональной количественной взаимосвязи между этими величинами, так же как их взаимосвязи с величиной термо-ЭДС пробного прохода, а также периодом стойкости режущего инструмента.

С учетом результатов исследования структурной и параметрической вариативности композитной структуры, а также трудоемкости проведения измерений тепло- и электрофизических характеристик сменных твердосплавных пластин с износостойкими покрытиями данное направление диагностики может быть применено для повышения надежности, но не позволяет в необходимой степени нивелировать нестабильность режущих свойств инструмента при реализации технологической операции.

В отличие от теплофизических и электрофизических характеристик режущего инструмента, величина термо-ЭДС пробного прохода дает интегральную оценку свойств контактной пары. Градиент температур как результат деформационных и трибологических процессов при резания инициирует протекание термотоков через контактные поверхности инструмента. Поскольку в процессе резания инструмент взаимодействует с обрабатываемым материалом по передней и задней поверхности, то величина термо-ЭДС формируется суммарным тепловым воздействием [161]. Интенсивность тепловыделения определяется помимо физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов режимами обработки и геометрией режущей части инструмента [22, 148]. Геометрия параметры инструмента оказывают влияние на длину участков контактного взаимодействия, а значит на интенсивность тепловыделения. На распределение тепловых потоков оказывает влияние теплопроводность режущего инструмента, что в совокупности с электропроводностью композиционной

структуры сменной режущей пластины определяют величину измеренной термо-ЭДС.

С одной стороны многофакторность и синергетичность характера контактного взаимодействия при резании усложняет оценку режущей способности и прогноза периода стойкости инструмента по его отдельным характеристикам или их сочетанию, с другой обосновывают целесообразность использования инструментов комплексной интегральной диагностики, к которым относится метод измерения термо-ЭДС при пробном проходе. Работоспособность методики предварительной диагностики износостойкости режущего инструмента подтверждено результатами проведенных стойкостных испытаний сменных твердосплавных пластин с износостойким покрытием.

Сравнительные графики изменения фаски износа по задней поверхности сменных твердосплавных пластин в зависимости от времени резания представлены ниже (рисунки 3.15 – 3.19). В преобладающем количестве случаев наблюдалась тенденция роста интенсивности износа сменных режущих пластин, имеющих повышенное значение величины термоЭДС, измеренного при предварительной тарировке.

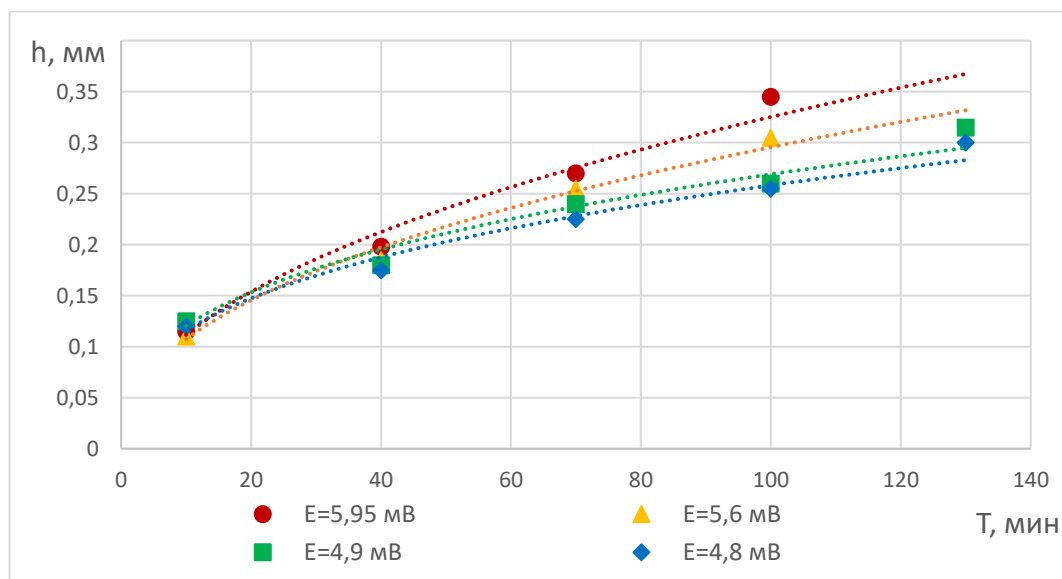


Рисунок 3.15 – Зависимость величины фаски износа режущих пластин Sandvik Coromant WNMG 080408 PM 4425 (группа обрабатываемости P) от времени (обрабатываемый материал – сталь 40X; режимы резания: $t=0,5$ мм, $S=0,1$ мм/об, $V=280$ м/мин)

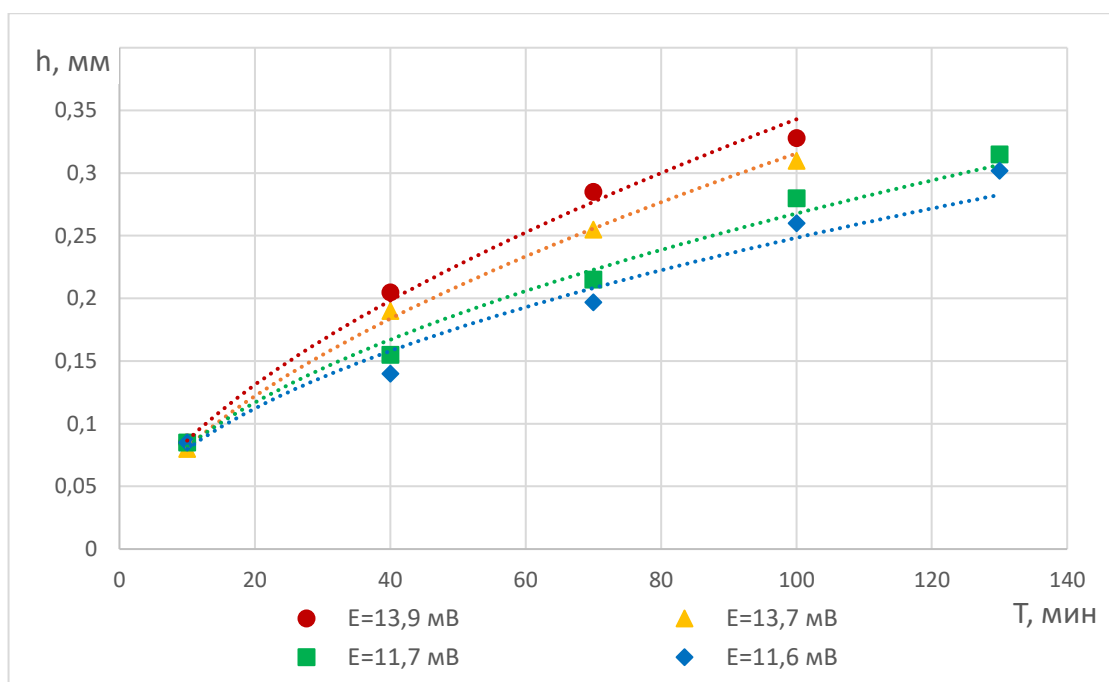


Рисунок 3.16 – Зависимость величины фаски износа режущих пластин Sandvik Coromant WNMG 080408-MM 2220 (группа обрабатываемости М) от времени (обрабатываемый материал – сталь 12Х13; режимы резания: $t=0,5$ мм, $S=0,1$ мм/об, $V=210$ м/мин)

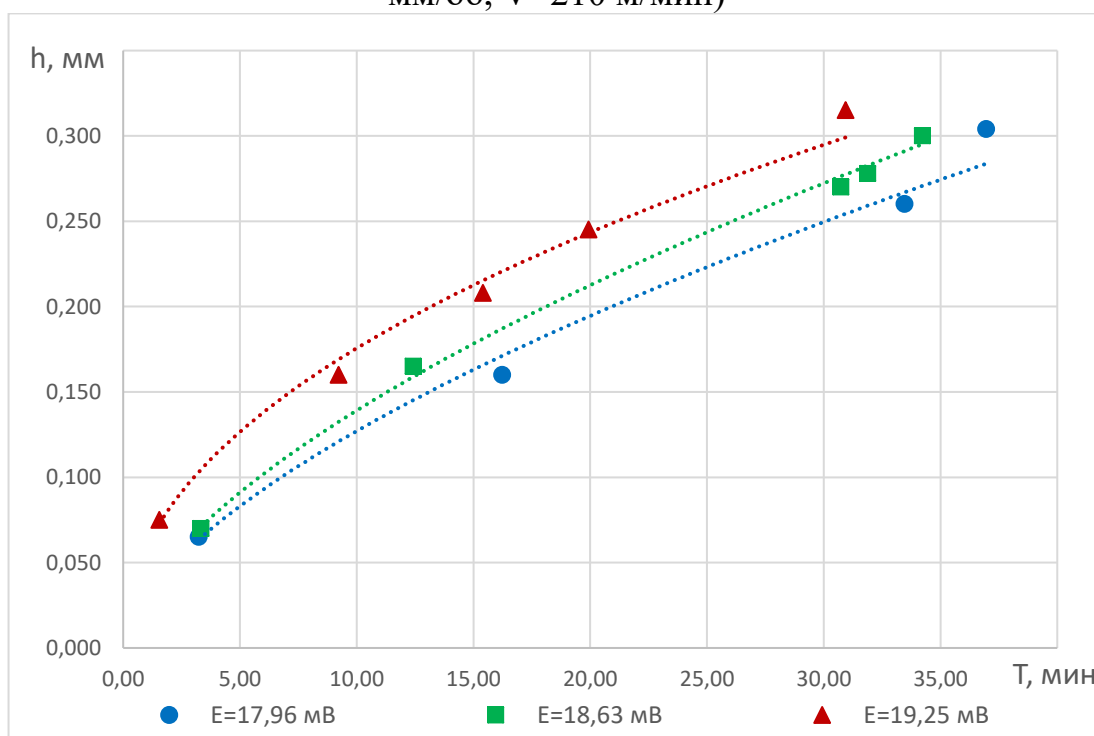


Рисунок 3.17 – Зависимость величины фаски износа режущих пластин Korloy WNMG 080408 MM NC9125 (группа обрабатываемости М) от времени (обрабатываемый материал – сталь 40Х13; режимы резания: $t=0,5$ мм, $S=0,3$ мм/об, $V=220$ м/мин)

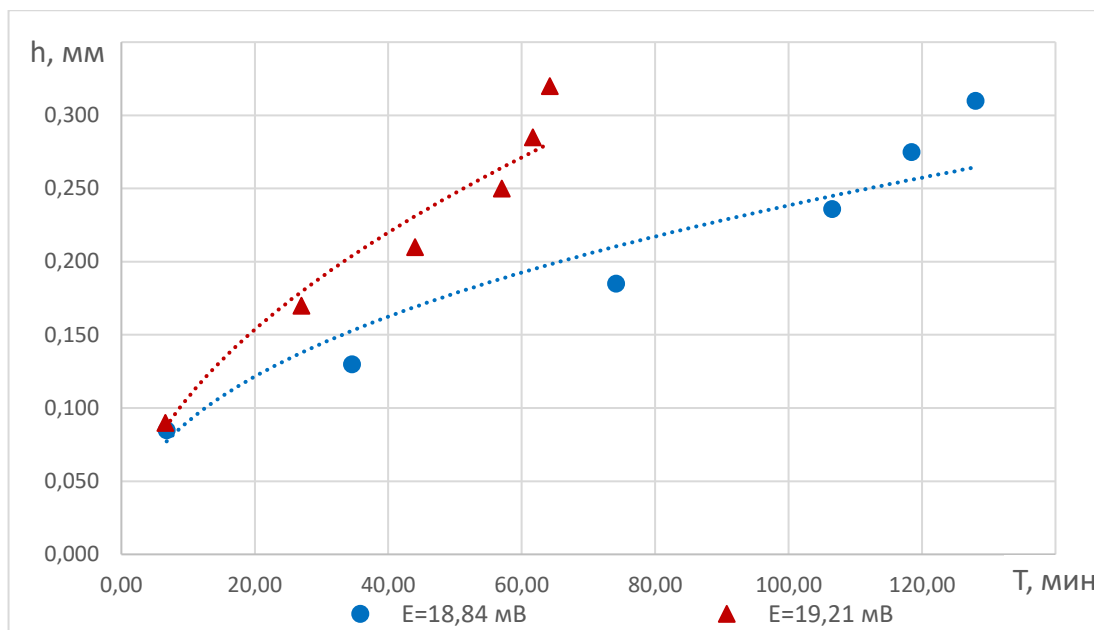


Рисунок 3.18 – Зависимость величины фаски износа режущих пластин Korloy WNMG 080408 MM NC9125 (группа обрабатываемости М) от времени (обрабатываемый материал – сталь 40X13; режимы резания: $t=0,5$ мм, $S=0,2$ мм/об, $V=155$ м/мин)

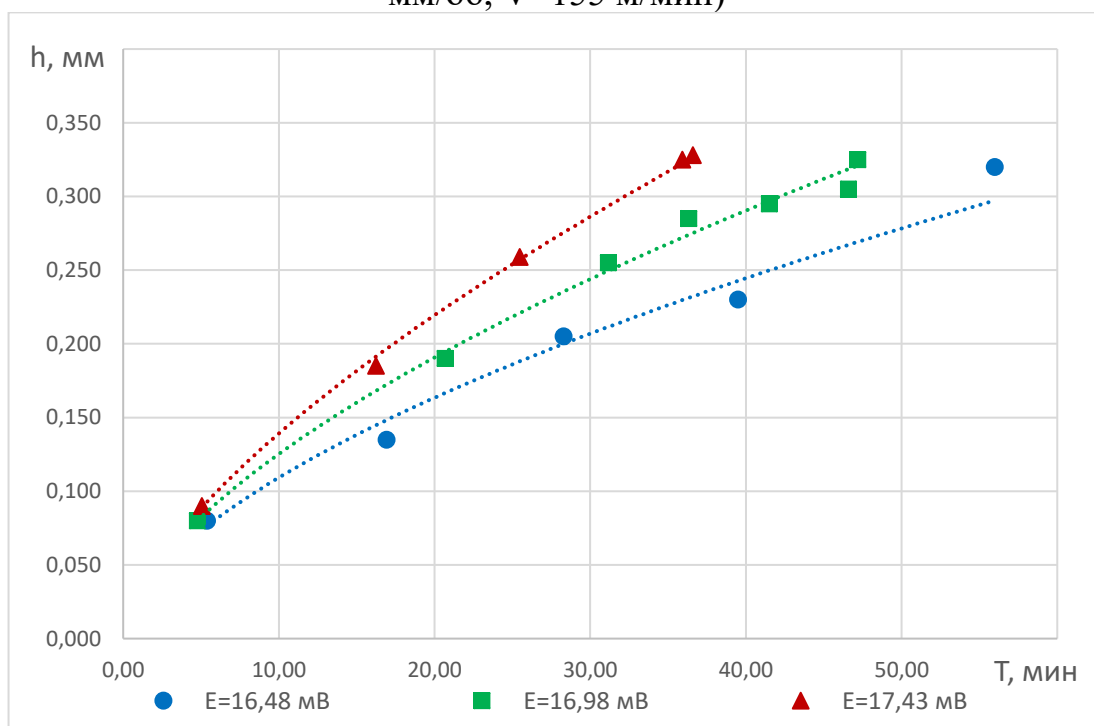
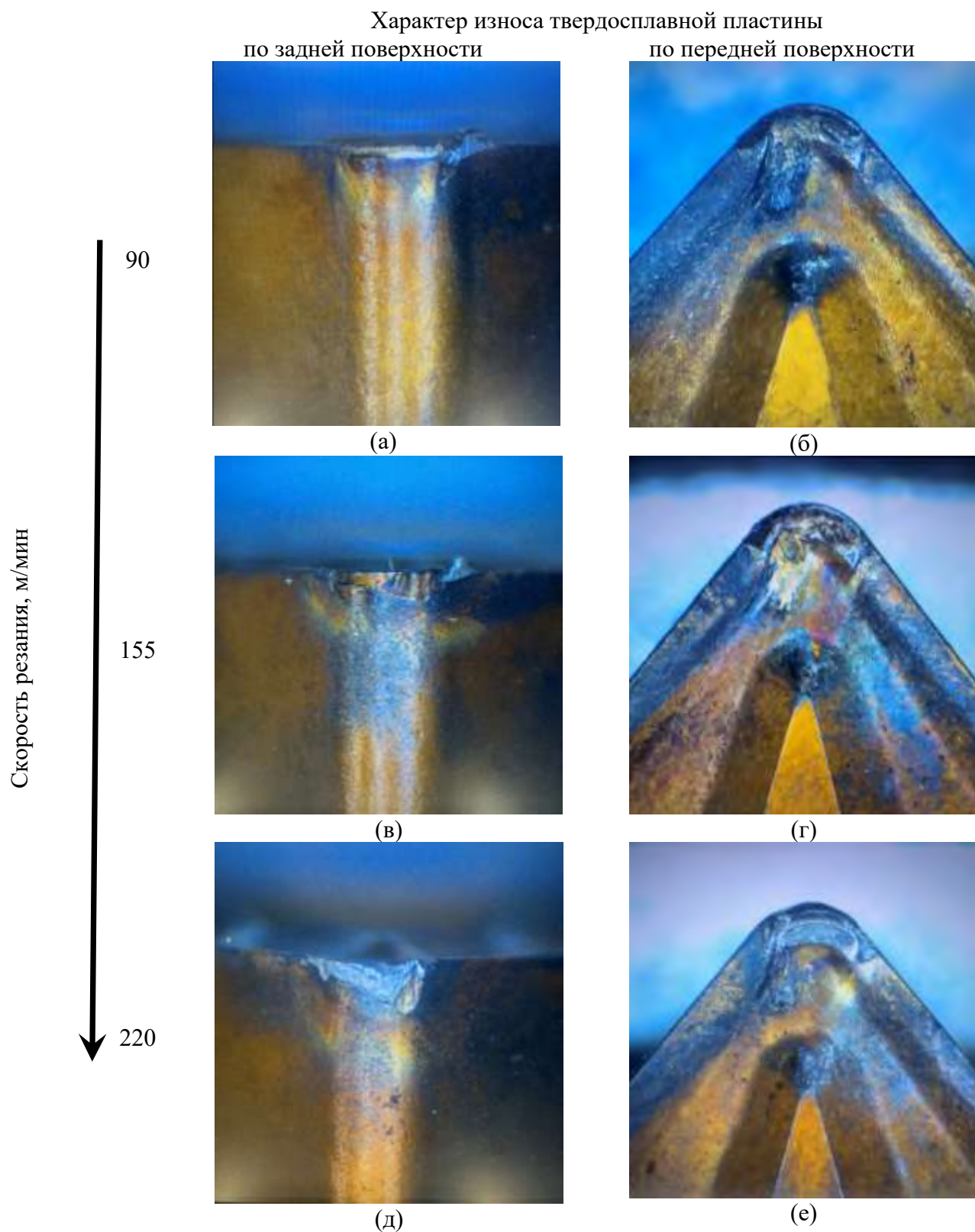


Рисунок 3.19 – Зависимость величины фаски износа режущих пластин Korloy WNMG 080408-VP2 UNC805 (группа обрабатываемости S) от времени (обрабатываемый материал – сталь 08X21H6M2T; режимы резания: $t=0,5$ мм, $S=0,3$ мм/об, $V=80$ м/мин)

При обработке рассматриваемых сталей на скорости близкой к нижней границе рекомендованных режимов наблюдается относительно равномерная фаска

износа по задней поверхности пластины с элементами наплаивания обрабатываемого материала на режущую кромку (рисунок 3.20, а, б).



С увеличением скорости резания происходит интенсификация температурного воздействия, что проявляется в изменении характера изнашивания и формировании неравномерной фаски износа (рисунок 3.20, в, г). Интенсификация теплового воздействия совместно со значительной нагрузкой ведет к деформации режущего клина. Кроме того, воздействие высокой температуры интенсифицирует диффузионные процессы и, в совокупности с абразивным износом, приводит к лункообразованию (рисунок 3.20, д, е), что в дальнейшем вызывает выкрашивание кромки пластины, деформацию режущего клина и преждевременный выход инструмента из строя.

Характерной особенностью износа режущих пластин при обработке сталей группы «S», в дополнение к явлениям, описанным выше, явилось образование «бороздок» и «зазубрин» на режущей кромке инструмента (рисунок 3.21). интенсивность образования таких проточин повышается при ужесточении технологических режимов, в частности, при повышении скорости резания и подачи до верхних границ диапазонов, рекомендованных производителем инструмента (рисунок 3.21, в, г).

Результаты стойкостных испытаний (таблицы 1 – 4 приложения 1) подтверждают уменьшение стойкости инструмента (T , мин) с увеличением величины термо-ЭДС (E , мВ) пробного прохода. То есть гипотеза о возможности предварительной оценки режущих свойств твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями по термо-ЭДС пробного рабочего хода подтверждается.

Таким образом, оценка функциональных свойств и прогноз стойкости режущего инструмента требует учета сложного комплекса физико-механических характеристик, имеющих существенную вариативность, определяемую технологией производства сменных твердосплавных пластин с износостойкими покрытиями. В связи с чем 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. Кроме того, не требуется существенной

модернизации технологического оборудования. Вместе с тем, рассматриваемый метод ограничен областью предварительной диагностики.

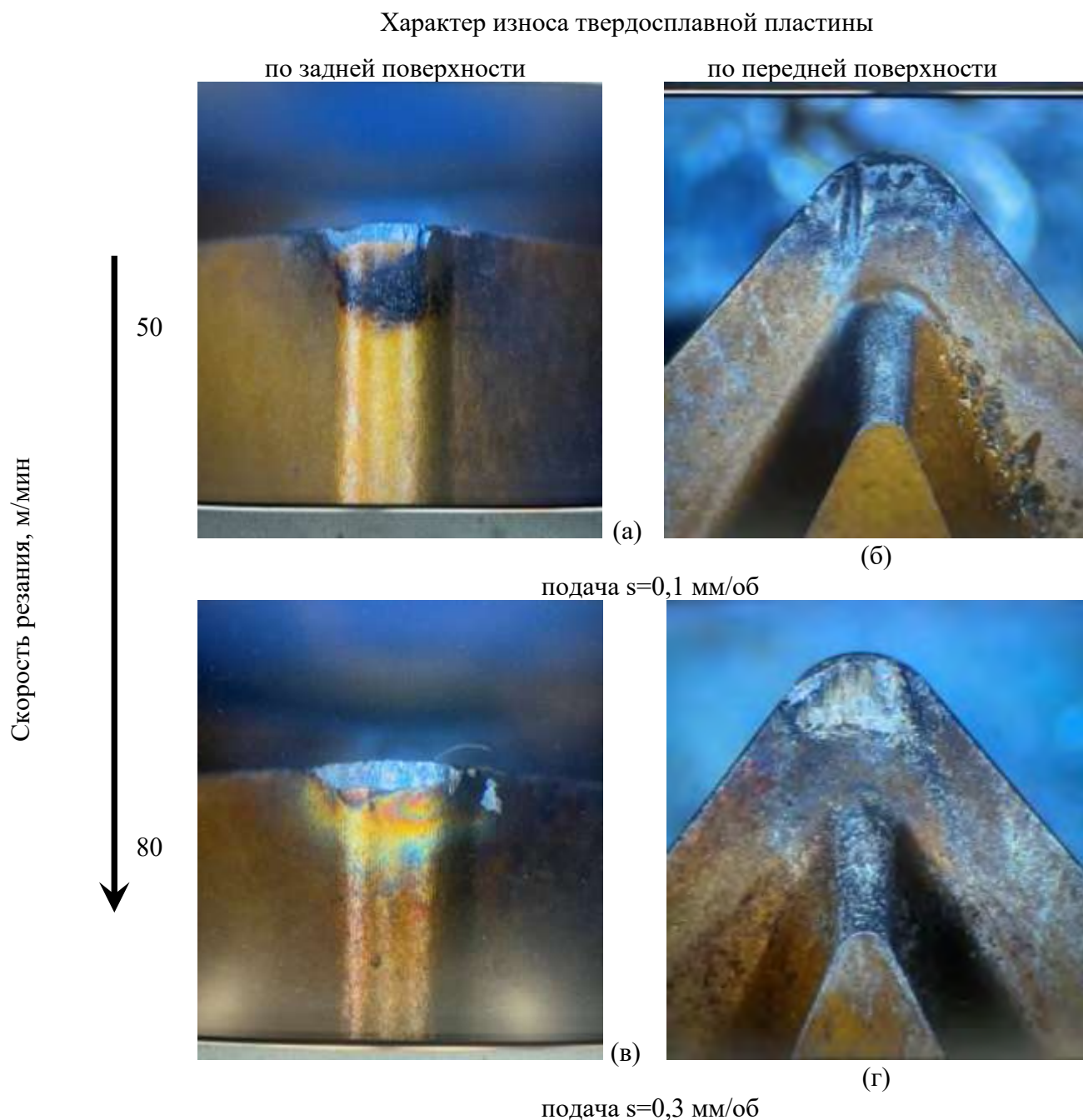


Рисунок 3.21 – Изменение характера износа режущей пластины при обработке стали группы «S» (глубина резания $t=0,5$ мм)

Поэтому повышение эффективности управления технологической операцией и надежности обеспечения требуемых результатов обработки в условиях применения оборудования с ЧПУ вызывает необходимость дополнения средствами «онлайн» диагностики.

3.3 Информативность диагностических каналов мониторинга процесса механической обработки

Дестабилизация процесса резания и снижение надежности обеспечения требуемых параметров качества детали происходит в результате стохастического воздействия различных возмущающих факторов, таких как колебание геометрии заготовки, физико-механических свойств обрабатываемого материала, вибрации и прочих. Предварительная оценка контактной пары посредством измерения сигнала термо-ЭДС позволяет в некоторой степени нивелировать разброс характеристик как инструмента, так и обрабатываемого материала, однако не способна полностью исключить все случайные воздействия. Выбор же каналов обратной связи из зоны резания определяется приоритетностью решаемых задач и оптимальностью управления процессом. В данном случае немаловажным фактором становится возможность интеграции соответствующих систем в конструкцию промышленно выпускаемого технологического оборудования. Реалии современного производства по большей степени исключают целый спектр «лабораторных» и оптических средств измерения. В данном контексте преимущества получает косвенная диагностика процесса резания, которая вместе с относительной простотой дооснащения и модернизации оборудования позволяет получать информацию о ходе обработки, состоянии режущего инструмента, а также фиксировать резкие и скачкообразные отклонения в короткий интервал времени. Следовательно, позволяет оперативно реагировать на подобные «нежелательные» отклонения.

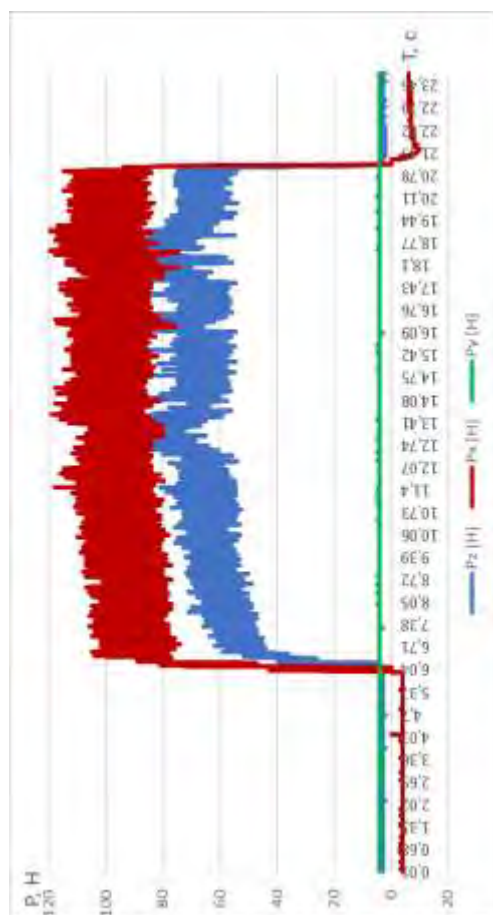
Динамика и результаты обработки, интенсивность износа инструмента определяются главным образом характером контактного взаимодействия и деформационно-температурной напряженностью процесса резания. Взаимосвязь контактных напряжений и тепловых полей в зоне резания с величинами составляющих силы резания рассматривается в работах авторов [26, 139, 177], что подтверждает возможность мониторинга процесса резания и оценки вариативности

параметров обрабатываемой заготовки и инструмента посредством тензометрических измерений силы резания.

На величину и соотношения составляющих силы резания оказывают влияние геометрия, режимы обработки, изменение температурно-деформационной картины в зоне резания. Данный диагностический канал является чувствительным и к вариативности теплофизических свойств режущего инструмента. Так обработка СМНП с CVD (Korloy NC5330) и PVD (Korloy PC8115) износостойкими покрытиями сопровождается несколько отличной силовой картиной.

При точении пластинами Korloy NC5330 вследствие худшего теплоотведения осевая составляющая силы резания P_x имеет более выраженный характер. Увеличение степени деформации прирезцовых слоев материала сопровождается тепловыделением и ростом его пластичности. Более высокий уровень температур в зоне резания и объем зоны опережающей деформации ведет к повышенным значениям радиальной P_z и осевой P_x составляющих силы резания, что наблюдается как при обработке аустенитной 12X18H10T, так и мартенситно-ферритной 14X17H2 нержавеющей сталей, а также жаропрочной стали 13X11H2B2MФ.

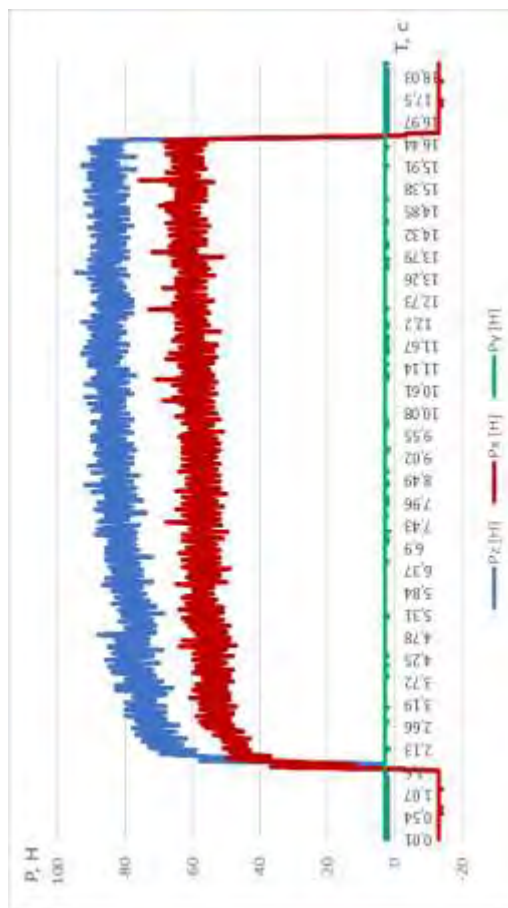
Кроме того, в результате проведенных исследований было установлено (рисунки 3.22 – 3.24), что на закономерности контактного взаимодействия при резании и на величину составляющих силы резания оказывает влияние не только свойства обрабатываемого материала, режущего инструмента, но и параметры поверхностного слоя заготовки, сформированные на предыдущих технологических операциях. В процессе резания под действием силового воздействия происходит разрушение поверхностной структуры, смещение и поворот кристаллов, а также поверхностно упрочнение [35]. Остаточные деформации в обрабатываемом поверхностном слое напрямую влияют на распределение деформации при контактом взаимодействии и на интенсивность тепловыделения, что сказывается на уровне и колебаниях составляющих силы резания.



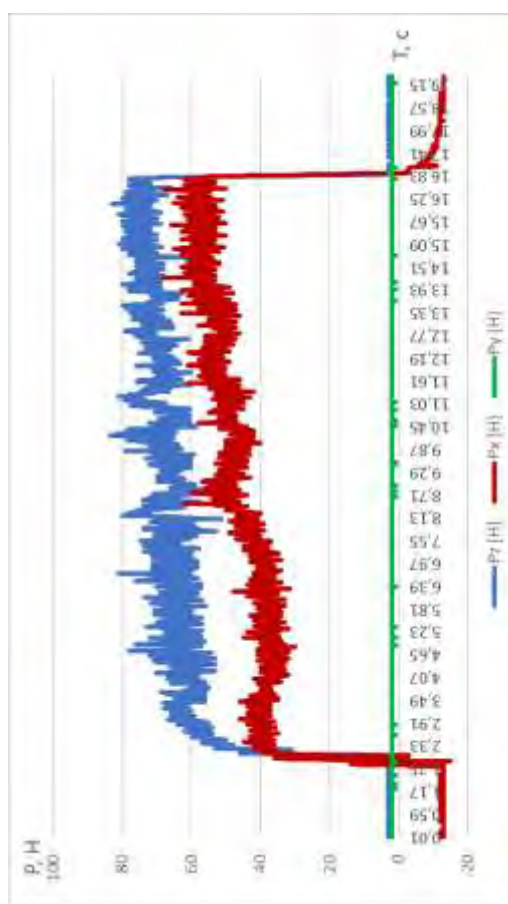
а



б

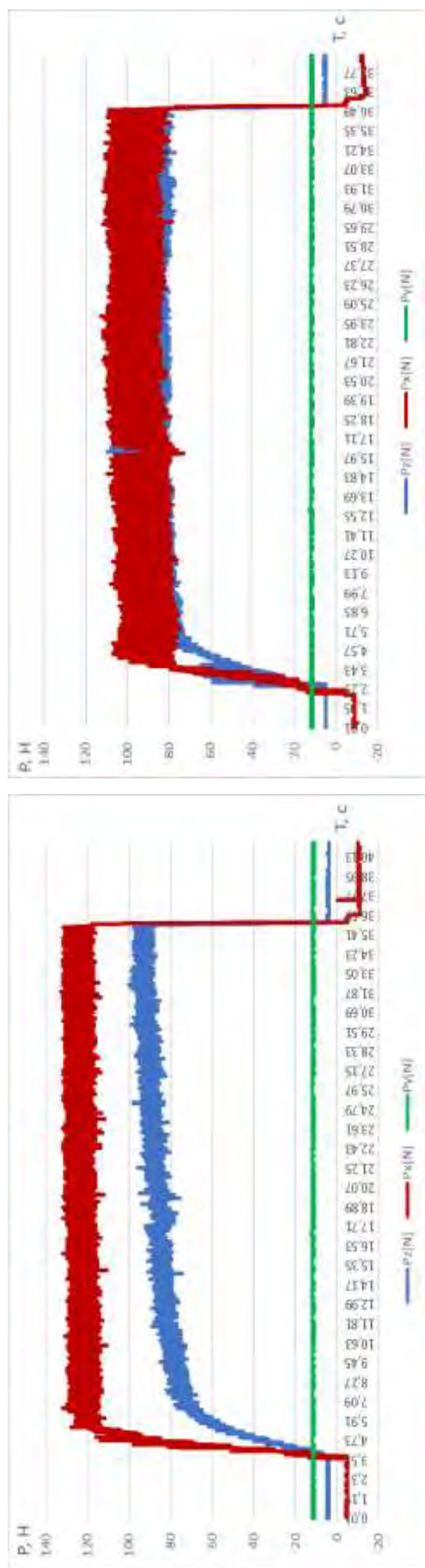


в

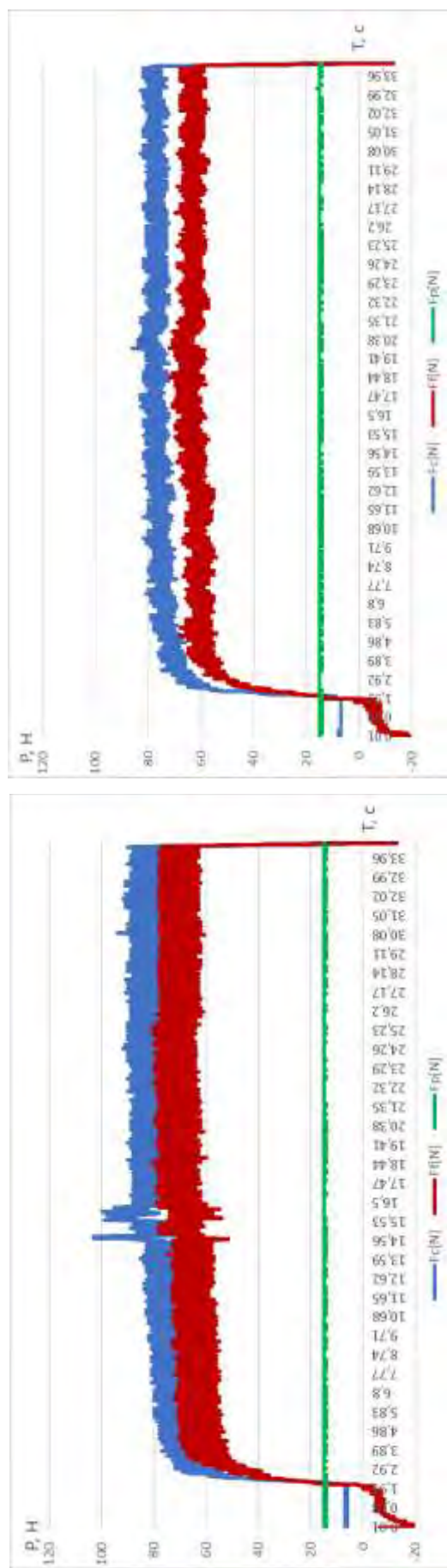


г

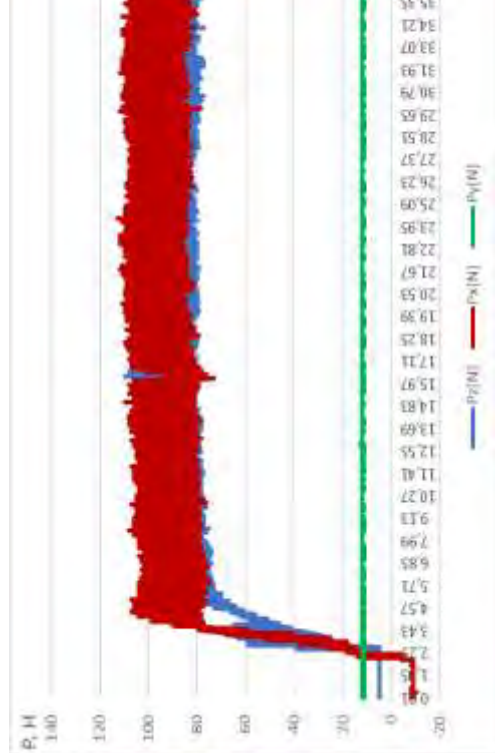
а) $h_{\text{упр}}=0$ Korloy NC5330; б) $h_{\text{упр}}=0,75$ мм Korloy NC5330; в) $h_{\text{упр}}=0$ Korloy PC8115; г) $h_{\text{упр}}=0,75$ мм Korloy PC8115
Рисунок 3.22 – Динамика изменения составляющих силы резания при точении стали 12Х18Н10Т
(Режимы резания: $t=0,5$ мм, $V=90$ м/мин, $S=0,05$ мм/об)



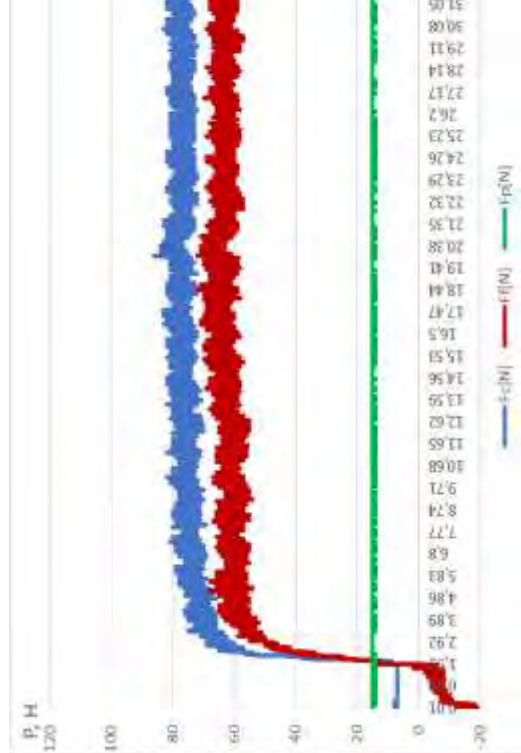
а



б

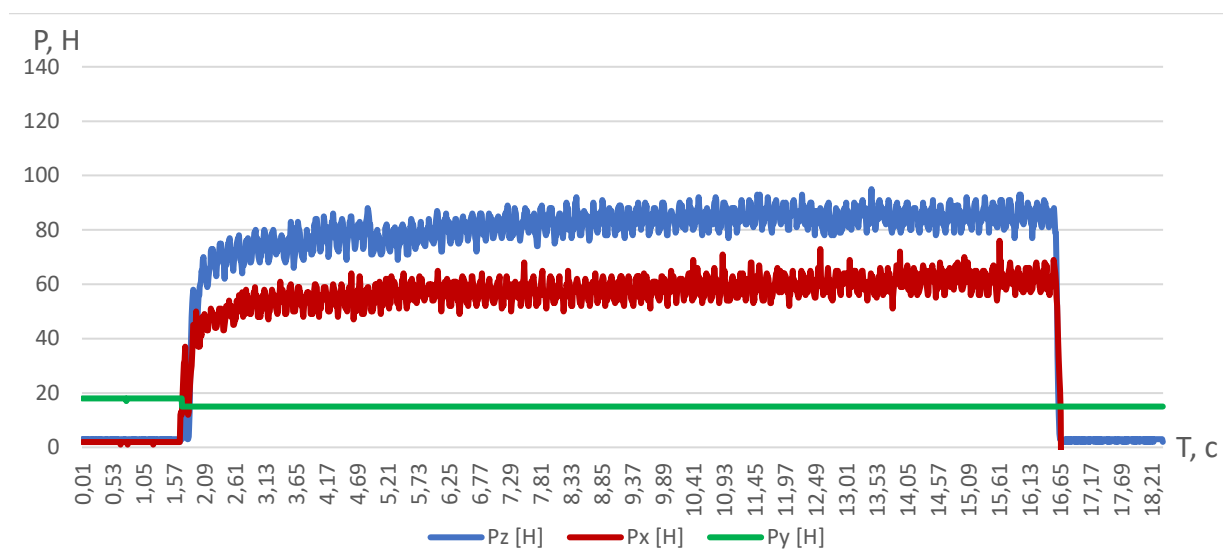


в

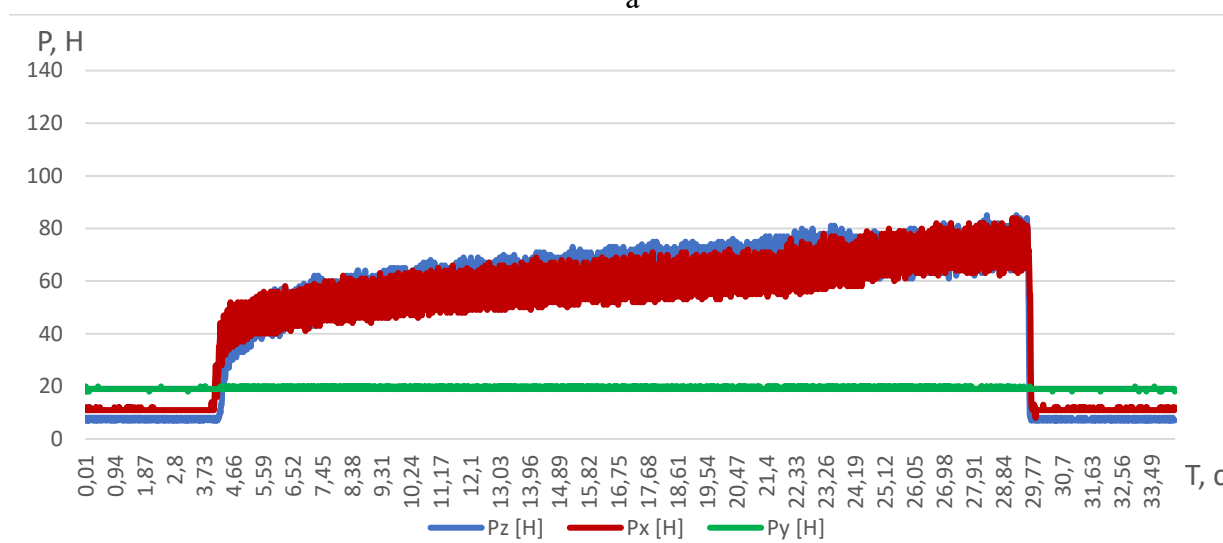


г

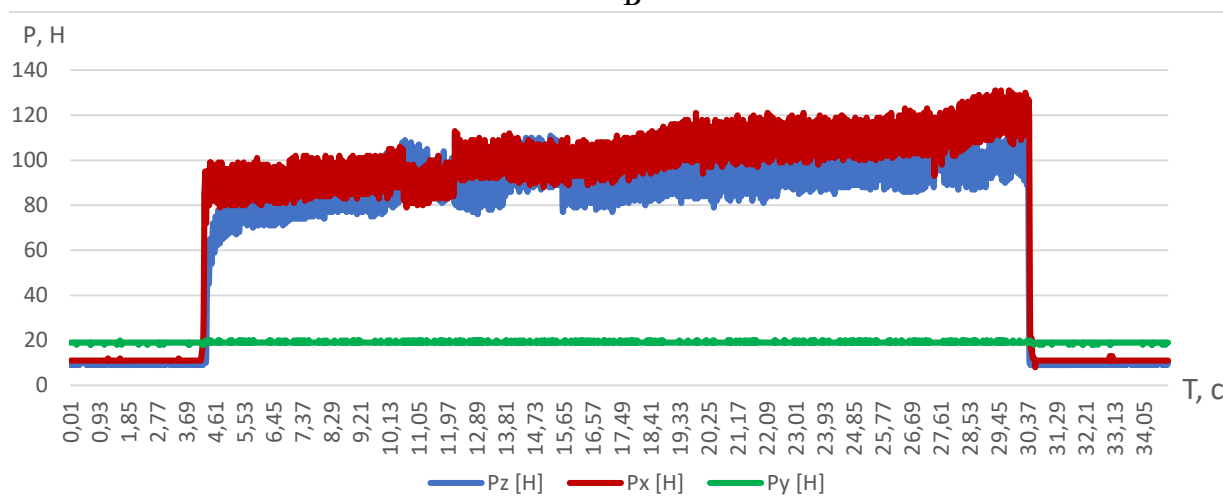
а) $h_{\text{упр}}=0$ Korloy NC5330; б) $h_{\text{упр}}=0,75$ мм Korloy NC5330; в) $h_{\text{упр}}=0$ Korloy PC8115; г) $h_{\text{упр}}=0,75$ мм Korloy PC8115
Рисунок 3.23 – Динамика изменения составляющих силы резания при точении стали 14X17H2
(Режимы резания: $t=0,5$ мм, $V=90$ м/мин, $S=0,05$ мм/об)



а



б



в

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

Рисунок 3.24 – Динамика изменения составляющих силы резания при точении стали 12X18H10T (Korloy NC5330; Режимы резания: $t=0,5$ мм, $S=0,05$ мм/об)

Локализация зоны опережающей пластической деформации за счет упрочнения поверхностного слоя ведет к снижению температурно-силовой напряженности процесса резания [25], что особенно ярко проявляется при обработке нержавеющей и жаропрочных сталей. В результате наблюдается не только снижение величины силы резания, но и уровня неустойчивости процесса (таблицы 3.7, 3.8, рис. 3.22, 3.23).

Изменение интенсивности тепловыделения за счет роста скорости также отражается на динамике процесса резания. Рост скорости резания, а значит и уровня температур в зоне контакта приводит не только к изменению величины составляющих сил резания, но и угла наклона осциллограмм (рисунок 3.24). При этом наблюдается стабилизация колебания силы резания в некотором диапазоне скоростей и дальнейший рост неустойчивости, что связано с высокоскоростной пластической деформацией с образованием дискретных локальных макрообъемов материала срезаемого припуска [56]. В условиях интенсивного тепловыделения и его концентрации в зоне резания из-за невысокой теплопроводности нержавеющей сталей происходит деформация определённого объема срезаемого припуска.

Упругая технологическая система накапливает энергию до определённого критического уровня и далее происходит скачкообразный сдвиг в области условной «плоскости» сдвига, и система разгружается [38]. Периодичность рассматриваемых процессов выражается в формировании характерной для данного вида контактного взаимодействия «зубчатой» циклической стружки.

Неустойчивость контактного взаимодействия, определяемая резкими колебаниями сил резания и температур на контактных поверхностях инструмента, интенсифицирует износ, что подтверждается существенным количеством исследований [206, 278, 101]. И в данном случае канал тензометрической диагностики процесса резания позволяет не только отследить неустойчивость процесса, но и влияние отдельных технологических факторов таких как свойства обрабатываемого, инструментального материалов и поверхностного слоя заготовки.

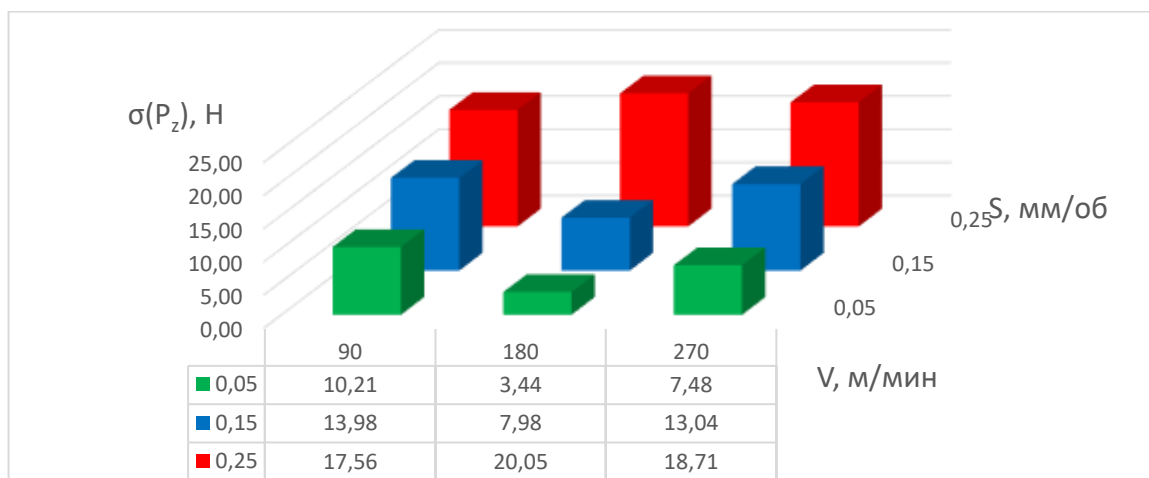
Таблица 3.7 – Величина и колебания составляющих сил резания при чистовом точении стали 12Х18Н10Т инструментом со СМНП Korloy NC5330 и PC8115

Скорость резания V, м/мин	Силовая характери- стика, Н	Глубина упрочненного слоя								
		h=0			h=t			h=2t		
		Подача S, мм/об								
		0,05	0,15	0,25	0,05	0,15	0,25	0,05	0,15	0,25
Korloy NC5330										
90	Pz	66,96	146,80	280,14	50,12	140,66	267,42	51,65	138,54	253,38
	Px	96,03	98,50	101,77	84,26	96,14	106,19	83,96	97,18	110,60
	Py	4,01	4,60	5,01	3,00	4,22	4,91	3,37	3,97	4,88
	σPz	10,21	13,58	17,56	4,44	6,32	8,01	5,50	5,89	6,46
	σPx	10,83	8,76	7,05	5,07	5,16	5,32	4,09	4,10	4,02
	σPy	0,12	0,13	0,12	0,13	0,15	0,21	0,48	0,36	0,32
180	Pz	127,25	160,08	247,19	96,03	156,95	237,86	102,83	135,57	371,67
	Px	137,21	105,23	10,17	104,03	101,47	13,74	107,05	98,48	93,78
	Py	4,01	1,94	10,94	19,50	15,62	13,74	19,44	1,38	12,46
	σPz	6,43	7,98	20,05	1,47	3,99	10,22	2,07	10,33	6,90
	σPx	7,20	5,01	4,50	3,35	3,08	0,69	3,12	3,96	7,00
	σPy	0,12	0,23	0,24	7,59	2,11	0,69	63,30	0,49	0,23
270	Pz	167,54	324,47	433,39	175,12	308,41	421,69	185,75	296,04	408,32
	Px	151,65	133,53	135,41	174,29	149,88	153,95	211,13	208,91	214,67
	Py	15,24	15,02	15,95	15,37	15,14	15,99	15,55	15,88	16,39
	σPz	55,91	38,53	18,71	7,21	7,56	7,95	7,13	5,79	4,72
	σPx	25,79	17,63	7,68	33,19	18,98	4,84	18,87	14,25	7,78
	σPy	0,43	0,31	0,22	0,48	0,32	0,11	0,50	0,48	0,49
Korloy PC8115										
90	Pz	81,57	241,65	351,43	67,44	212,65	330,05	70,19	174,88	318,50
	Px	57,93	52,33	48,69	47,19	57,45	64,70	59,10	58,96	58,70
	Py	15,00	8,64	3,00	1,99	2,73	2,98	2,05	2,58	3,00
	σPz	5,84	8,94	13,13	6,49	11,28	15,93	4,10	6,56	8,29
	σPx	4,78	6,26	7,25	8,04	7,45	7,04	3,90	5,99	7,66
	σPy	0,00	0,04	0,10	0,12	0,17	0,16	0,21	0,11	0,07
180	Pz	63,83	155,36	272,19	71,82	142,87	250,30	72,04	137,52	250,46
	Px	60,89	24,50	20,06	68,42	25,93	9,38	81,20	34,85	24,42
	Py	19,31	1,98	1,97	19,04	1,94	1,90	19,04	2,05	1,97
	σPz	8,85	7,60	9,25	8,38	6,97	10,62	7,91	8,84	6,43
	σPx	8,87	2,75	2,33	4,61	4,04	4,93	6,63	3,31	2,99
	σPy	0,46	0,13	0,19	0,21	0,25	0,30	0,21	0,22	0,18
270	Pz	91,56	214,01	310,52	115,42	217,34	299,26	110,73	204,55	274,64
	Px	102,49	95,38	78,26	118,80	105,61	94,43	144,13	132,35	126,77
	Py	19,11	18,78	20,01	19,18	19,89	20,40	19,90	20,12	20,89
	σPz	9,09	13,06	15,53	14,71	10,65	7,82	12,03	7,78	4,80
	σPx	10,94	7,97	5,11	5,67	6,12	6,85	4,64	5,17	5,67
	σPy	0,32	0,28	0,11	0,38	0,41	0,49	0,30	0,28	0,32

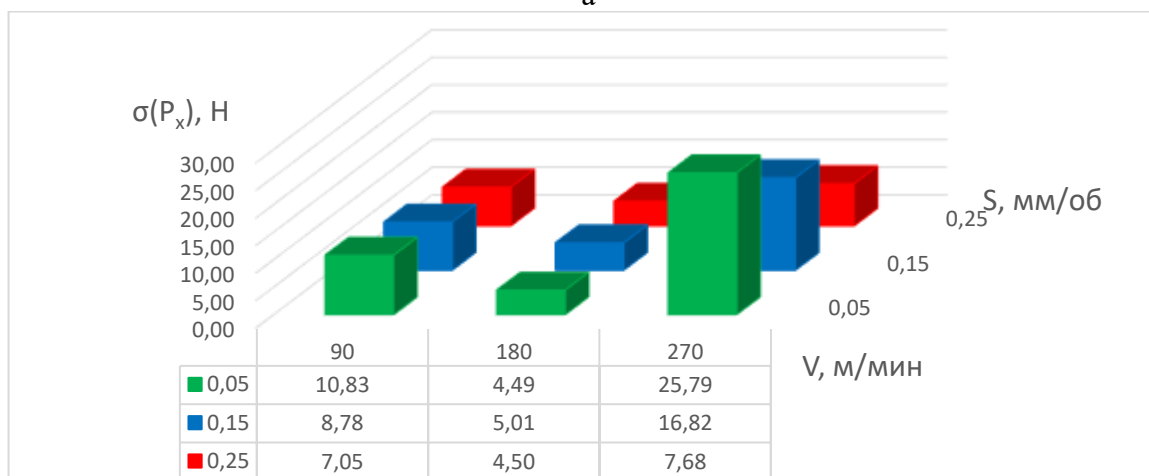
Таблица 3.8 – Величина и колебания составляющих сил резания при чистовом точении стали 14X17H2 инструментом со СМНП Korloy NC5330 и PC8115

Скорость резания V, м/мин	Силовая характери- стика, Н	Глубина упрочненного слоя								
		h=0			h=t			h=2t		
		Подача S, мм/об								
		0,05	0,15	0,25	0,05	0,15	0,25	0,05	0,15	0,25
Korloy NC5330										
90	Pz	85,08	172,55	259,22	88,32	168,72	258,09	78,41	165,13	256,40
	Px	122,23	104,86	95,61	93,72	102,85	94,04	92,79	100,71	92,67
	Py	11,94	2,00	2,97	11,96	2,02	2,91	12,07	1,98	2,83
	σPz	5,57	4,07	13,41	6,72	5,03	13,58	5,42	5,86	13,84
	σPx	5,05	2,45	6,47	9,36	3,13	5,95	7,60	3,18	5,72
	σPy	0,24	0,00	0,19	0,21	0,11	0,24	0,26	0,13	0,38
180	Pz	80,26	158,47	235,44	79,99	167,81	240,99	79,31	161,19	257,78
	Px	118,23	97,76	89,48	114,45	101,08	91,07	108,50	97,59	90,89
	Py	12,98	2,02	3,99	13,64	3,03	4,12	14,63	3,22	4,08
	σPz	5,40	5,23	11,22	7,69	5,33	8,89	6,34	4,97	7,64
	σPx	6,57	2,79	5,99	9,33	3,23	5,22	7,06	2,99	4,92
	σPy	0,16	0,08	0,09	0,48	0,19	0,11	0,48	0,18	0,09
270	Pz	86,48	165,13	253,16	86,55	167,08	261,48	83,37	166,02	254,75
	Px	122,94	100,71	97,48	120,31	103,15	98,32	116,06	99,64	90,61
	Py	16,72	1,98	4,99	17,97	2,32	4,95	18,56	2,41	4,98
	σPz	6,79	5,86	10,49	7,67	5,19	8,91	6,53	4,12	7,46
	σPx	7,84	3,18	4,26	8,81	3,21	3,71	6,60	2,97	3,14
	σPy	0,45	0,13	0,14	0,18	0,11	0,21	0,50	0,30	0,36
Korloy PC8115										
90	Pz	75,59	114,85	172,28	79,90	122,73	177,36	76,31	117,94	169,05
	Px	79,44	41,75	37,31	68,04	39,15	33,67	62,67	37,52	30,76
	Py	14,24	2,98	3,11	14,94	3,20	3,34	14,93	3,01	2,99
	σPz	4,28	7,12	15,42	6,15	8,08	14,78	3,05	6,15	12,58
	σPx	4,91	3,26	15,78	6,23	7,78	14,92	3,25	5,45	12,82
	σPy	0,43	0,39	0,24	0,24	0,20	0,31	0,26	0,18	0,27
180	Pz	70,94	106,66	160,54	75,21	99,76	151,64	52,75	99,69	149,52
	Px	72,12	38,84	36,52	77,53	51,91	49,81	48,77	41,40	39,36
	Py	14,96	3,04	4,13	15,00	3,63	4,57	2,89	2,06	2,97
	σPz	3,90	6,39	13,06	5,42	6,14	11,30	2,42	7,76	9,59
	σPx	3,75	2,41	3,48	5,37	2,08	2,52	1,35	3,02	2,42
	σPy	0,20	0,19	0,14	0,12	0,49	0,34	0,31	0,23	0,24
270	Pz	62,45	127,42	190,13	55,00	119,64	187,55	54,76	117,56	184,99
	Px	62,11	46,98	42,77	53,48	45,58	41,11	54,33	42,11	39,58
	Py	2,79	1,78	2,02	2,87	1,68	2,18	2,77	1,54	1,99
	σPz	3,82	7,03	18,33	2,23	5,69	17,24	2,54	5,02	15,12
	σPx	2,92	3,12	4,12	1,46	2,86	3,06	1,39	2,57	2,77
	σPy	0,41	0,37	0,45	0,33	0,25	0,28	0,42	0,31	0,33

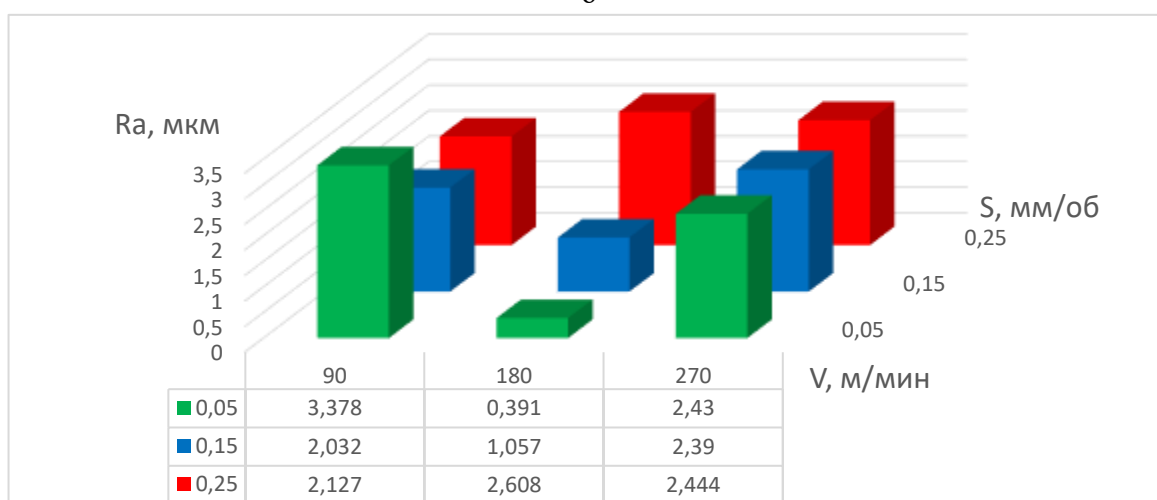
Сопоставление динамики изменения сил резания при точении выявило взаимосвязь параметров шероховатости обработанной поверхности и колебаний составляющих сил резания.



а

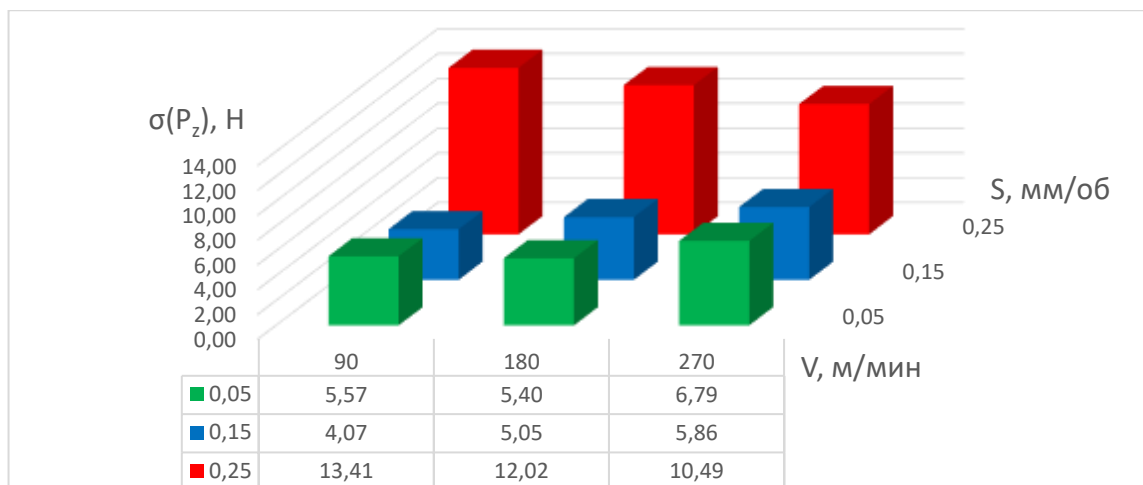


б

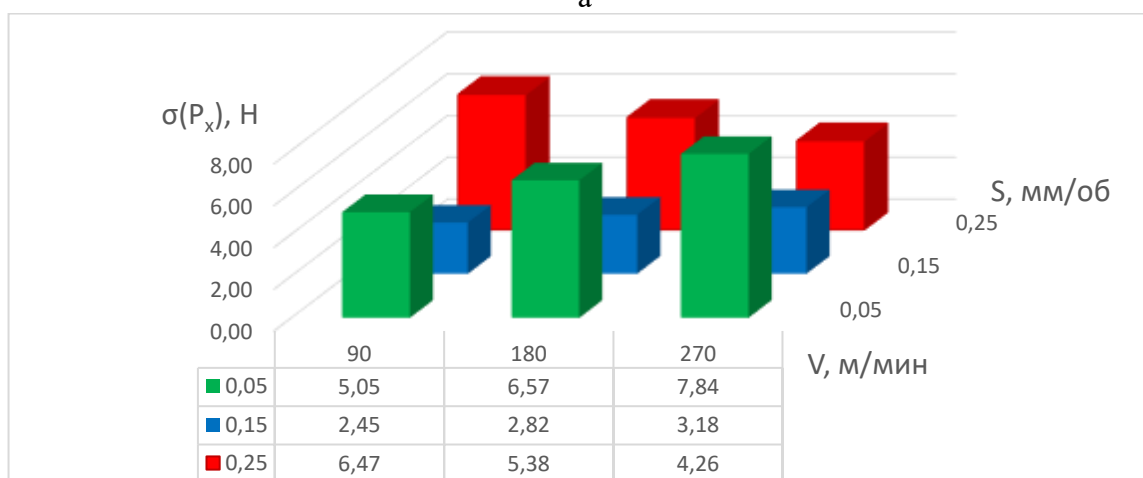


в

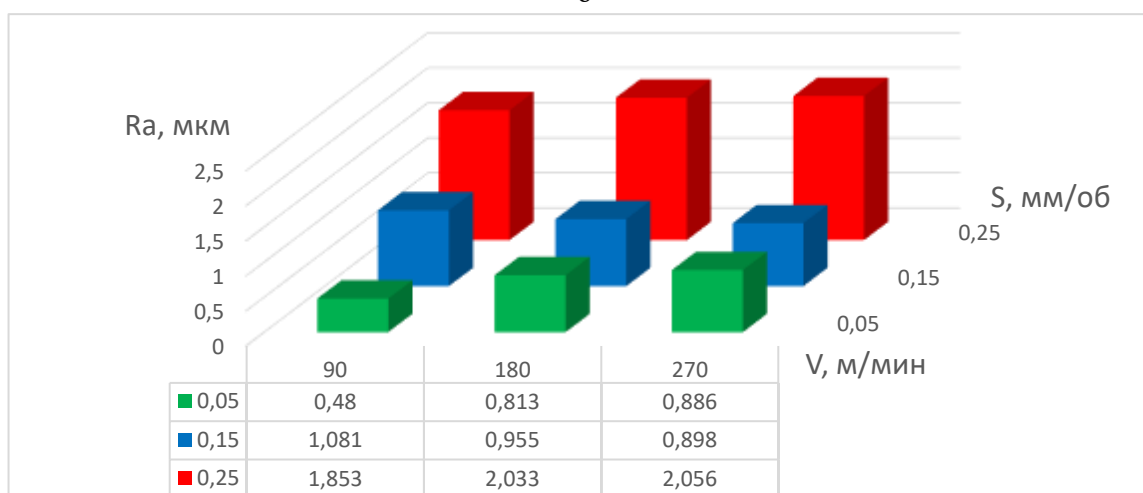
Рисунок 3.25 – Изменение величины стандартного отклонения составляющих силы резания P_z (а), P_x (б) и среднеарифметического отклонения профиля Ra (в) при точении стали 12Х18Н10Т твердосплавной пластиной Korloy NC5330 (глубина резания $t=0,5$ мм)



а



б



в

Рисунок 3.26 – Изменение величины стандартного отклонения составляющих силы резания P_z (а), P_x (б) и среднеарифметического отклонения профиля R_a (в) при точении стали 14X17H2 твердосплавной пластиной Korloy NC5330 (глубина резания $t=0,5$ мм)

При этом в установленном диапазоне режимов резания величина составляющей P_y в большинстве случаев не превышала 25 Н и не оказала существенного влияния на результаты обработки. Зафиксирована взаимосвязь интенсивности колебания составляющих силы резания P_z и P_y и величины среднего арифметического отклонения профиля обработанной поверхности R_a (рисунки 3.25, 3.26).

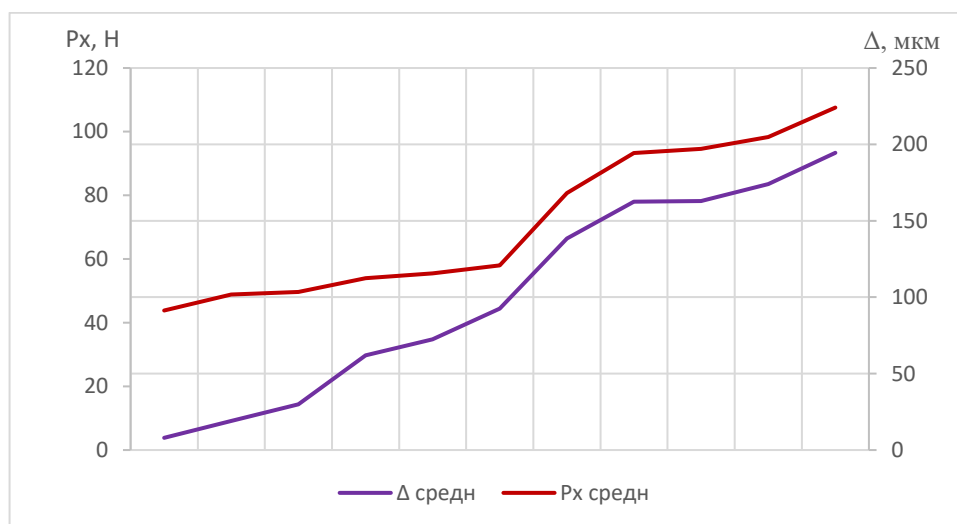


Рисунок 3.27 – Взаимосвязь отклонения размера Δ (мкм) и величины составляющей силы резания P_x (Н)
(Сталь 12X18H10T, глубина резания $t=0,5$ мм, $V=90$ м/мин $S=0,05..0,25$ мм/об)

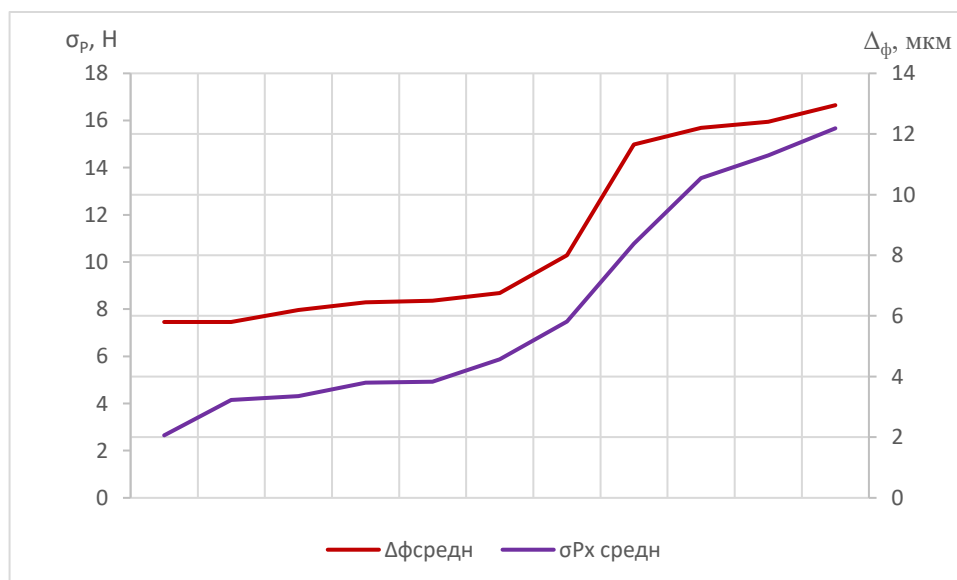


Рисунок 3.28 – Взаимосвязь отклонения круглости Δ_ϕ (мкм) и стандартного отклонения силы резания σ_{P_x} (Н)
(Сталь 12X18H10T, глубина резания $t=0,5$ мм, $V=90$ м/мин $S=0,05..0,25$ мм/об)

Однако, анализ результатов экспериментальных исследований, с одной стороны, подтверждает тезис о взаимосвязи величины и колебаний силы резания с геометрической точностью обработанной поверхности на макро- (рисунки 3.27 и 3.28) и микроуровне (рисунки 3.25 и 3.26), с другой, выявляет объективные ограничения в возможностях динамометрической диагностики процесса резания.

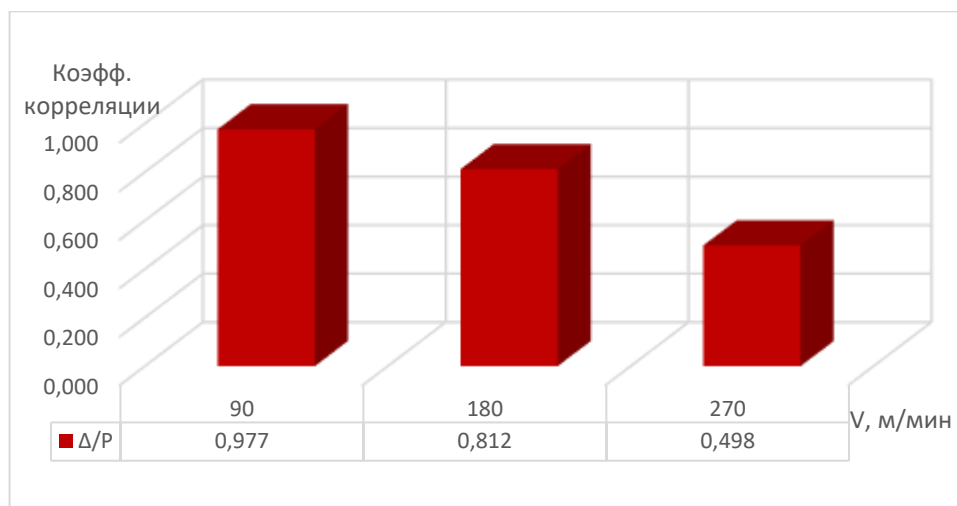


Рисунок 3.29 – Изменение коэффициента корреляции отклонения размера Δ и величины силы резания P_x с ростом скорости резания

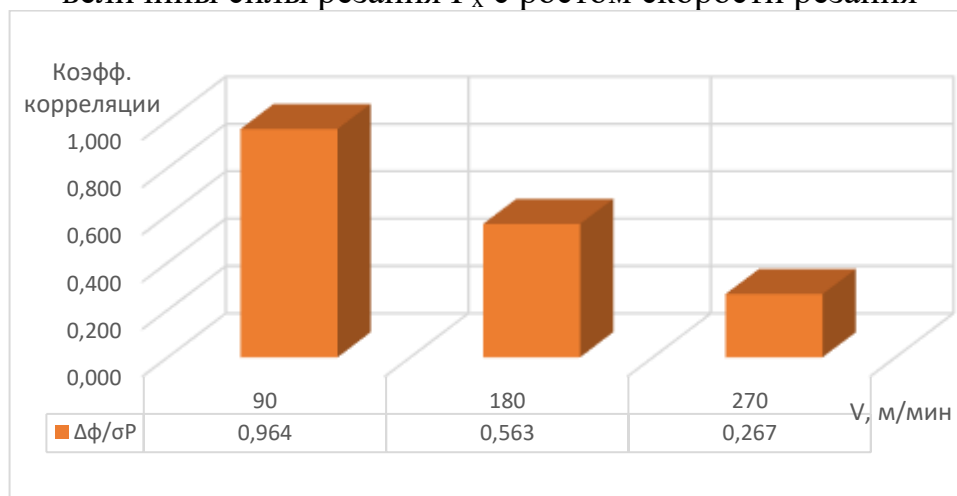


Рисунок 3.30 – Изменение коэффициента корреляции отклонения круглости Δ_ϕ и стандартного отклонения силы резания σ_{P_x} с ростом скорости резания

При достаточно высокой корреляции силы резания и отклонения размера (рисунок 3.29), а также отклонения от круглости и стандартного отклонения силы резания (рисунок 3.30) на невысоких скоростях, с их ростом наблюдается существенное снижение информационной нагруженности сигнала. Причем во втором случае коэффициент корреляции с ростом скорости снижается существенно

интенсивнее. Это говорит о необходимости существенного увеличения частотного разрешения динамометрических измерений, но на практике означает применение более дорогостоящих аппаратных средств и не всегда экономически целесообразно.

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. Все это делает данный информационный канал необходимой и неотъемлемой составляющей интеллектуальной технологической систем механической обработки.

Выявленные технические ограничения определяют перспективные направления совершенствования и развития динамометрических систем для производственного применения. В то же время, повышение надежности управления технологическим операциями определяет необходимость применения иных диагностических инструментов и построение систем на основе многоканальной диагностики.

В рамках управления любым процессом не представляется возможным абсолютное исключение отклонений от эталона. Однако эффективность управления определяется надежностью поддержания динамических характеристик в границах, обеспечивающих требуемые результаты обработки. Неустойчивость технологической системы «станок—приспособление—инструмент—деталь» (СПИД) в ходе операции возникает по различного рода причинам. Вибрационный мониторинг позволяет отслеживать неустойчивость процесса и определять его критический уровень. Вибрация несет в себе информацию не только о зарождающихся и развивающихся дефектах оборудования, но и состоянии режущего инструмента, стабильности контактного взаимодействия и др. Немаловажным является более широкий частотный диапазон среди доступных измерительных средств в сравнении с динамометрическими системами, что также выступает аргументом в пользу применения вибрационной диагностики.

При анализе вибрационного сигнала в данной работе осуществлялась регистрация величины виброускорения, что связано с особенностью работы виброметра. Оценка амплитуды колебаний в данном случае не является достаточно информативной, поскольку ограничивается областью низких частот. Виброускорение же характеризует силовое динамическое взаимодействие и позволяет учитывать частотные компоненты, соответствующие циклам стружкообразования, микротрещинам, сколам и тд.

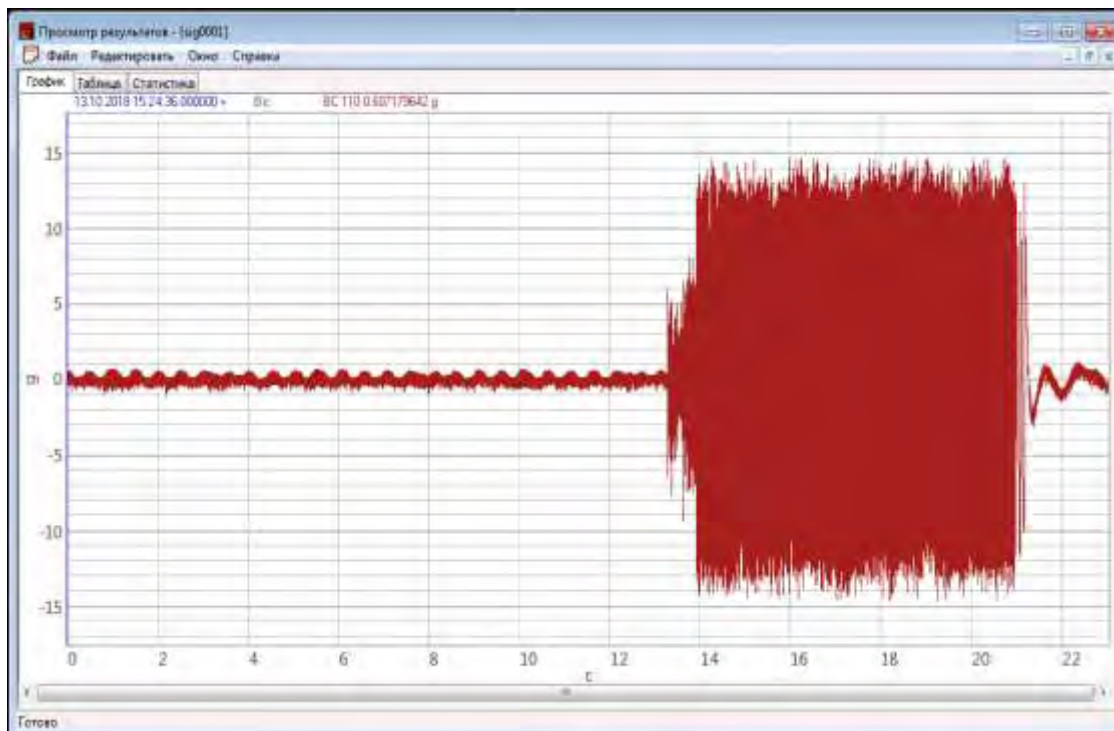


Рисунок 3.31 – Пример записи вибрационного сигнала

Оценка вибрации сводится к спектральному анализу исходной записи (рисунок 3.31), когда исходный сигнал посредством преобразований Фурье раскладывается на частотные составляющие (гармоники различных частот) со своими амплитудами. Графически результат гармонического анализа представляет спектрограмму вибраций, которая показывает зависимость амплитуды колебаний от частоты и изменение энергии сигнала во времени.

Анализ спектрограммы на наличие пиков на определенных частотах и их гармониках позволяет делать выводы об интенсивности отдельных явлений и прогнозировать результаты обработки. Так изменение спектрограммы

вибрационного сигнала в процессе обработки соответствует изменению геометрических параметров обработанной поверхности (рисунок 3.32).

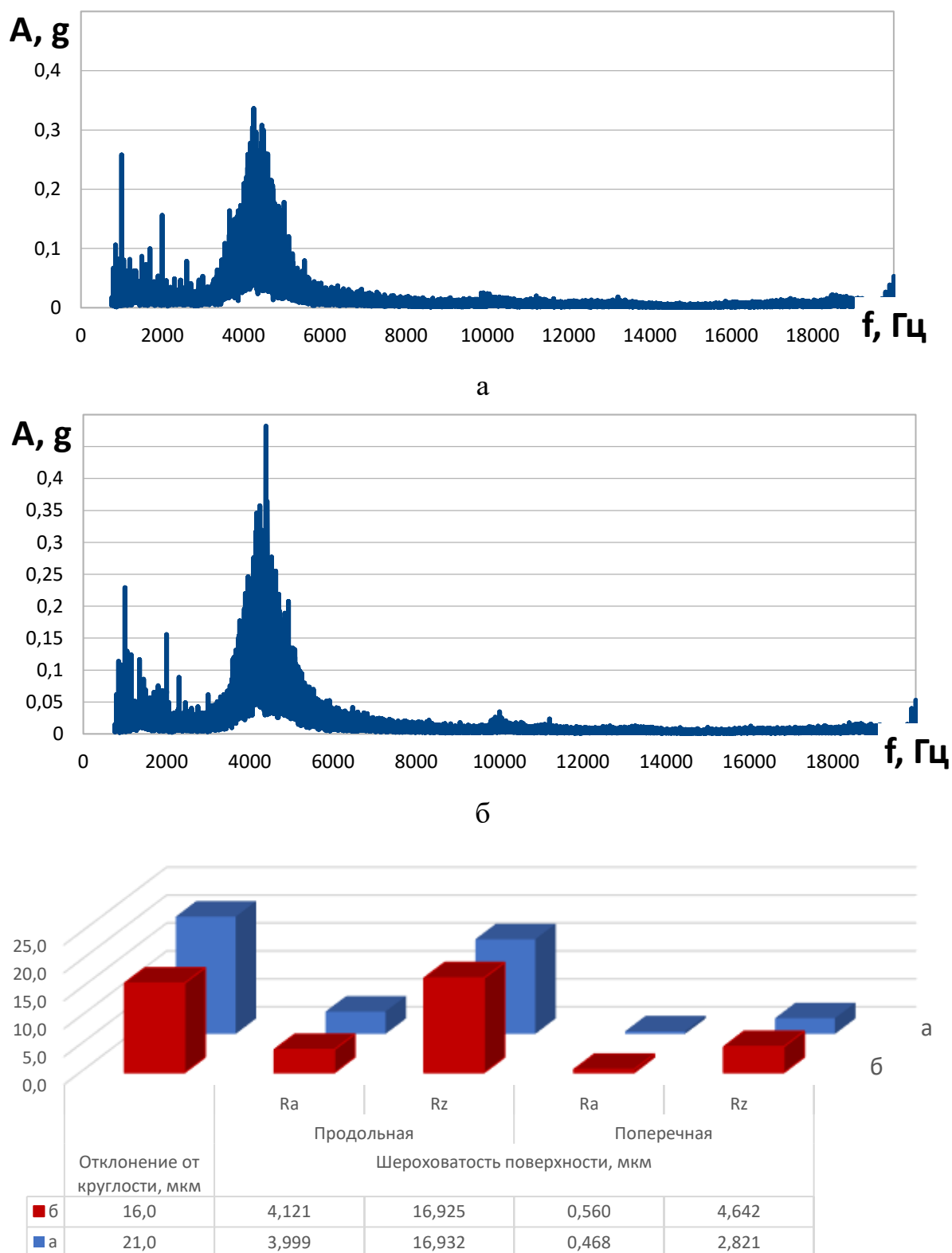


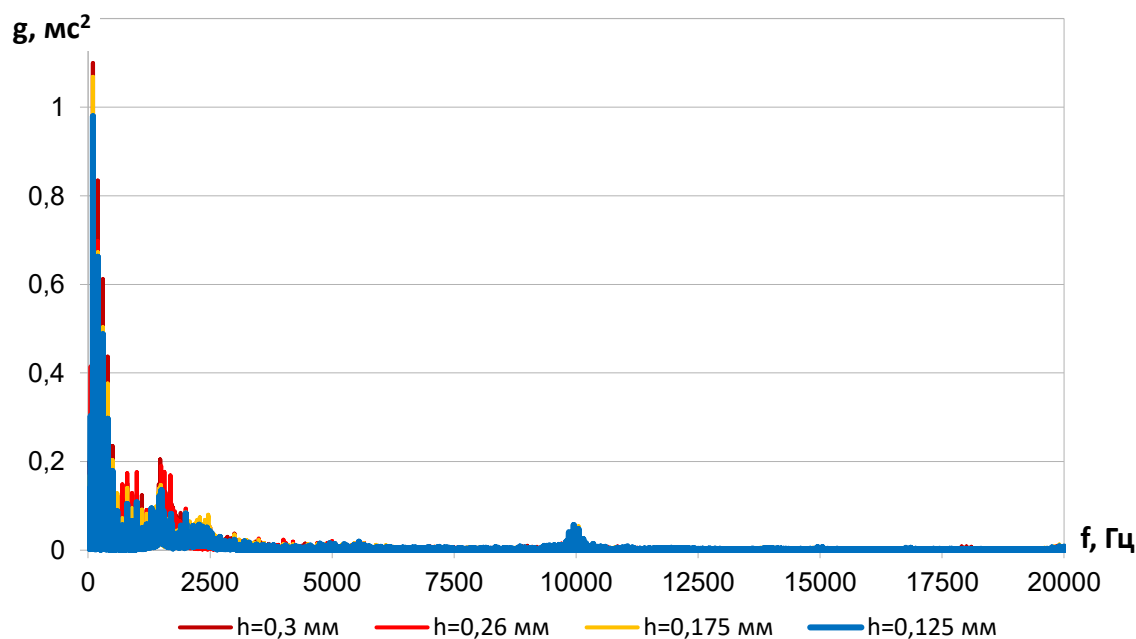
Рисунок 3.32 – Взаимосвязь динамики изменения спектрограммы и геометрических параметров обработанной поверхности

Более высокие пики и площадь спектрограммы (а) в полосе низких частот соответствует большим значениям отклонений круглости, в то время как более высокий пик спектрограммы (б) на частотах свыше 4000 Гц соответствует повышенным значениям микропрофиля обработанной поверхности.

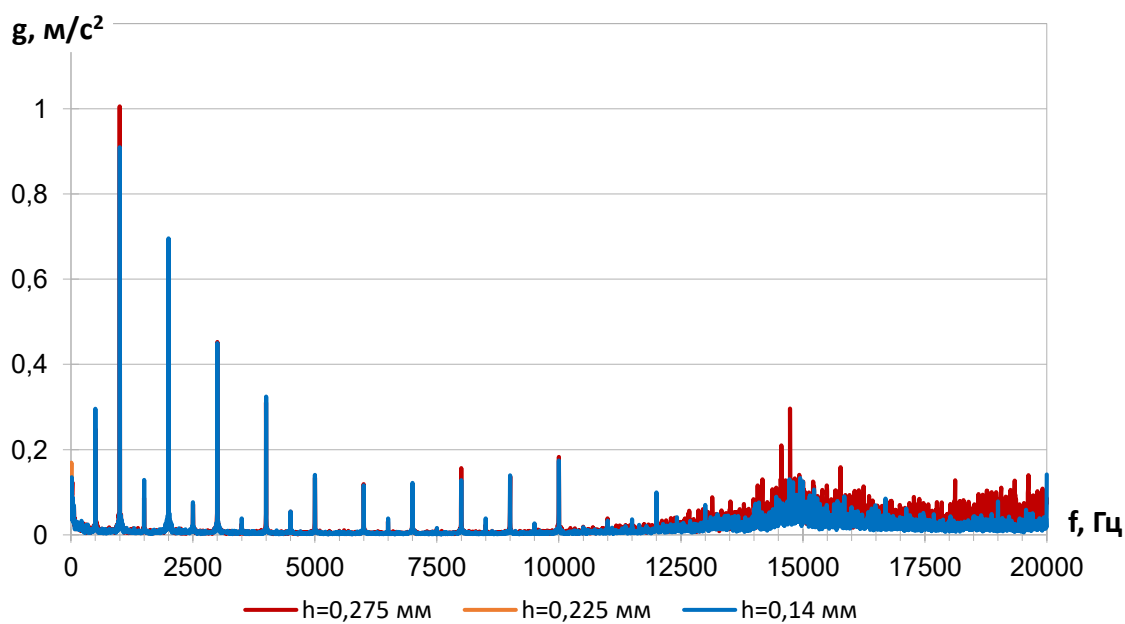
Однако на практике интерпретировать результаты анализа вибрационной спектрограммы процесса резания и создать математический инструмента прогнозирования геометрических параметров обработанной поверхности по вибрационному сигналу является достаточно сложно в связи с неоднозначностью информации, наличием значительного числа составляющих на различных частотах, а также в следствие влияния фонового шума и помех. Кроме того, это требует значительных объемов экспериментальных данных, а динамика процесса резания ведет к смещению одних гармоник при неизменности других.

В рассматриваемых условиях более информативным параметром, характеризующим уровень вибраций и энергии неустойчивости процесса резания, является интегральная виброэнергия, определяемая как площадь спектрограммы. Данный параметр отражает суммарную энергетическую активность колебаний, и, как показывает практика, растёт с увеличением износа. Подход 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.

Поскольку состояние кромки СМНП определяет устойчивость контактного взаимодействия, то эволюция износа режущей кромки отражается на росте величины интегральной виброэнергии и площади спектрограммы. В отдельных случаях при неизменности режимов резания вид спектрограмм может существенно отличаться (рисунок 3.33) динамика изменения спектрограмм при обработке двумя одноименными СМНП), что свидетельствует о различии в характере контактного взаимодействия.



а

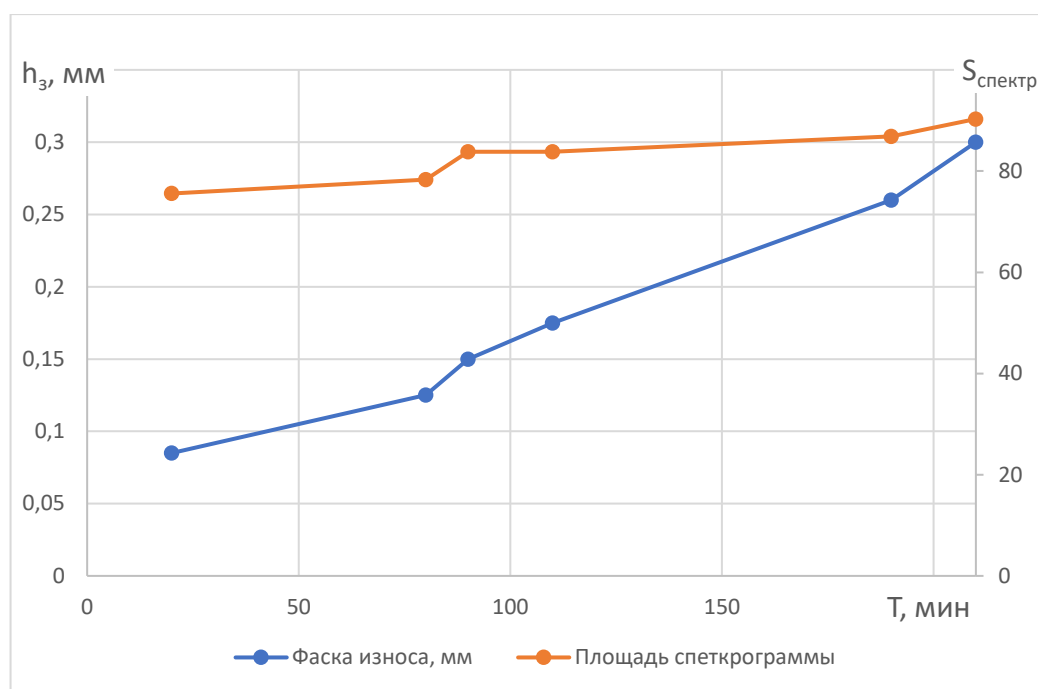


б

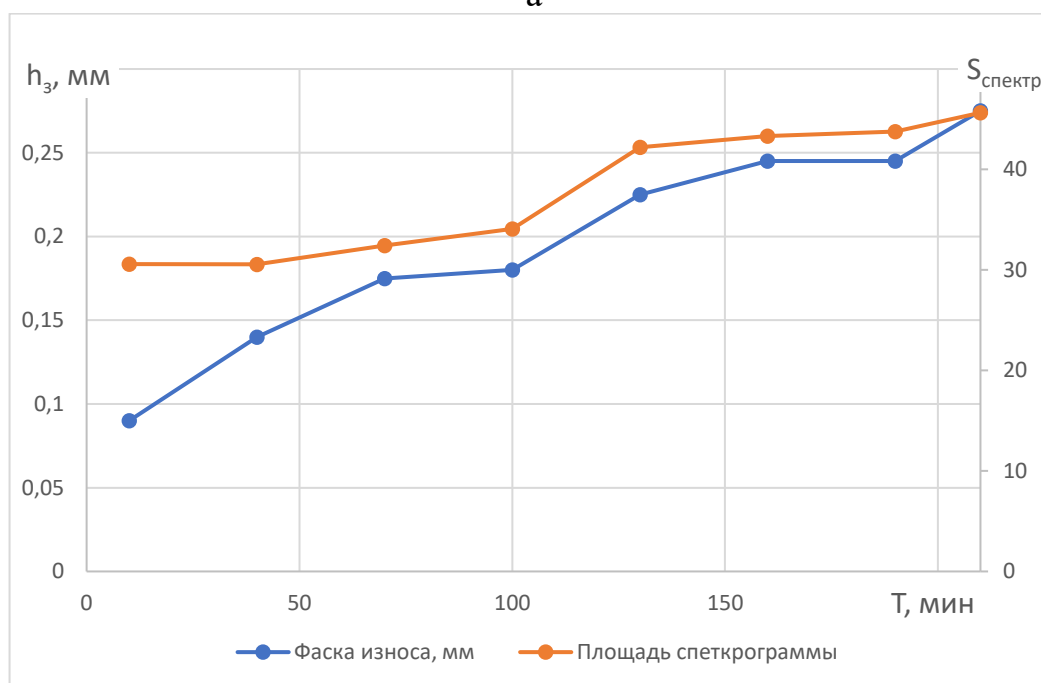
Рисунок 3.33 – Изменение характера спектрограммы вибрационного сигнала с ростом фаски износа по задней грани СМНП
(Сталь 40X – СМП Sandvik WNMG 432-PM 4425 Режимы резания: $t=0,5$ мм, $V=120$ м/мин, $S=0,1$ мм/об)

При стабильном изнашивании режущего инструмента, например в отсутствии наростообразования на режущей кромки, кривые роста фаски износа по задней грани и площади спектрограммы вибрационного сигнала (рисунок 3.34)

имеют достаточно схожий характер изменения и высокий коэффициент корреляции.

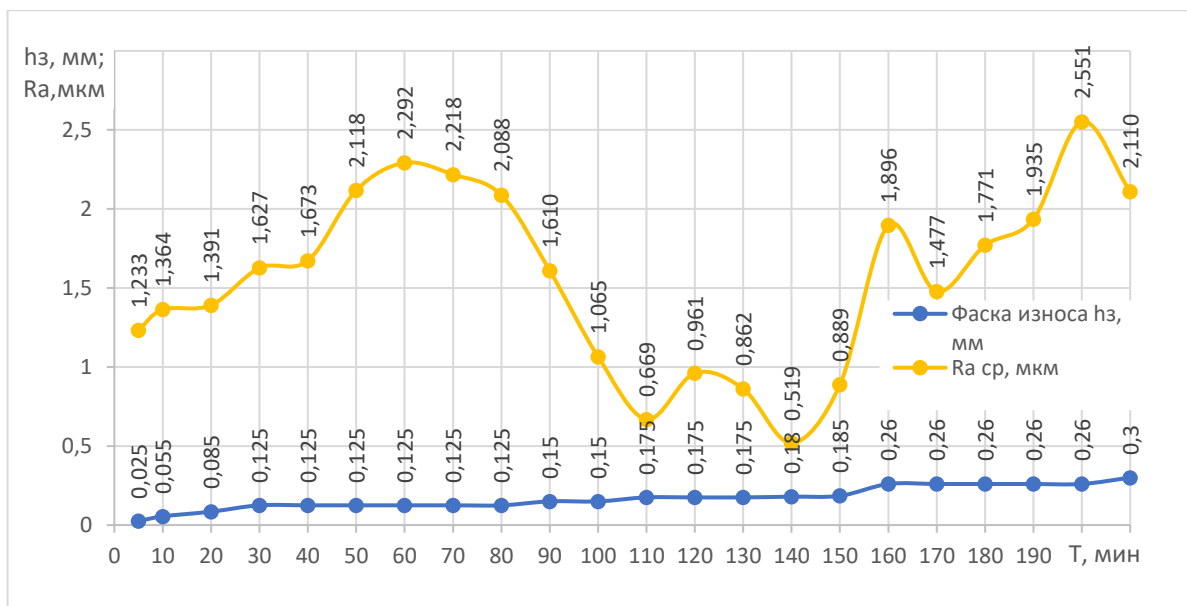


а

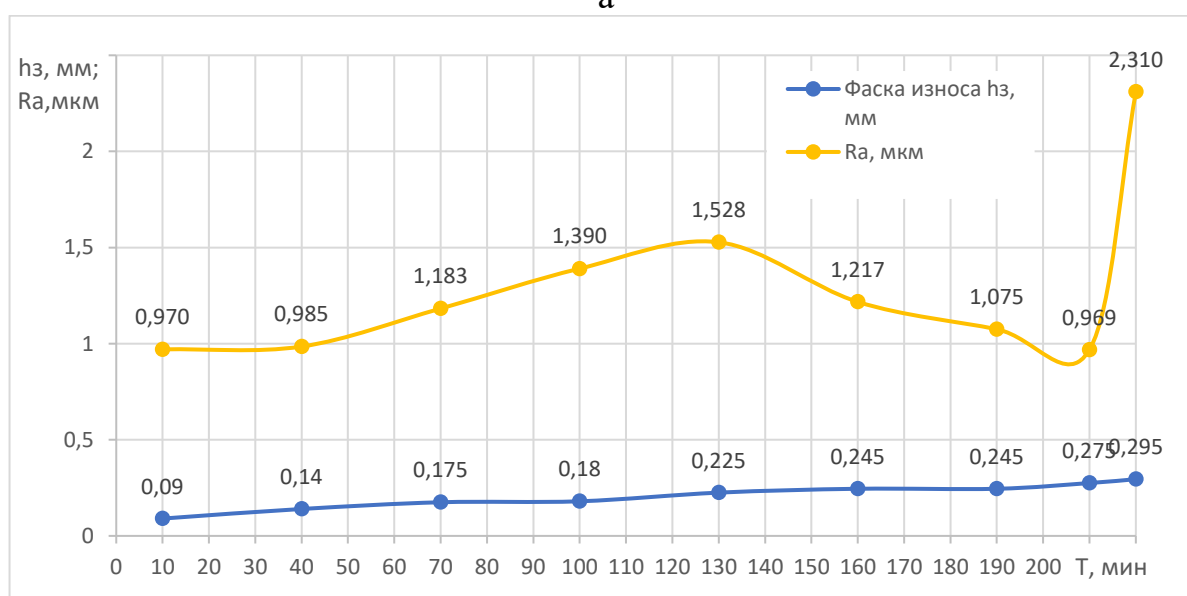


б

Рисунок 3.34 – Кривые динамики изменения фаски износа по задней грани СМНП и площади спектрограммы вибрационного сигнала (Сталь 40Х – СМП Sandvik WNMG 432-PM 4425 Режимы резания: $t=0,5$ мм, $V=120$ м/мин, $S=0,1$ мм/об)



а



б

Рисунок 3.35 – Кривые динамики изменения среднего арифметического отклонения профиля Ra и фаски износа по задней грани СМНП и площади спектрограммы вибрационного сигнала
(Сталь 40X – СМП Sandvik WNMG 432-PM 4425 Режимы резания: $t=0,5$ мм, $V=120$ м/мин, $S=0,1$ мм/об)

Вместе с тем, величина интегральной виброэнергии, оцениваемая по площади спектрограммы, не обладает достаточной информативностью для надежного прогнозирования величины шероховатости обработанной поверхности (рисунок 3.35). Приведенные на рисунках 3.33 – 3.35 варианты (а) и (б) представляют две идентичных серии экспериментов, результаты которых выявили

соответствующую вариативность динамики процесса, а также необходимость более детального исследования закономерностей формирования параметров микропрофиля обработанной поверхности и его прогнозирования в производственных условиях.

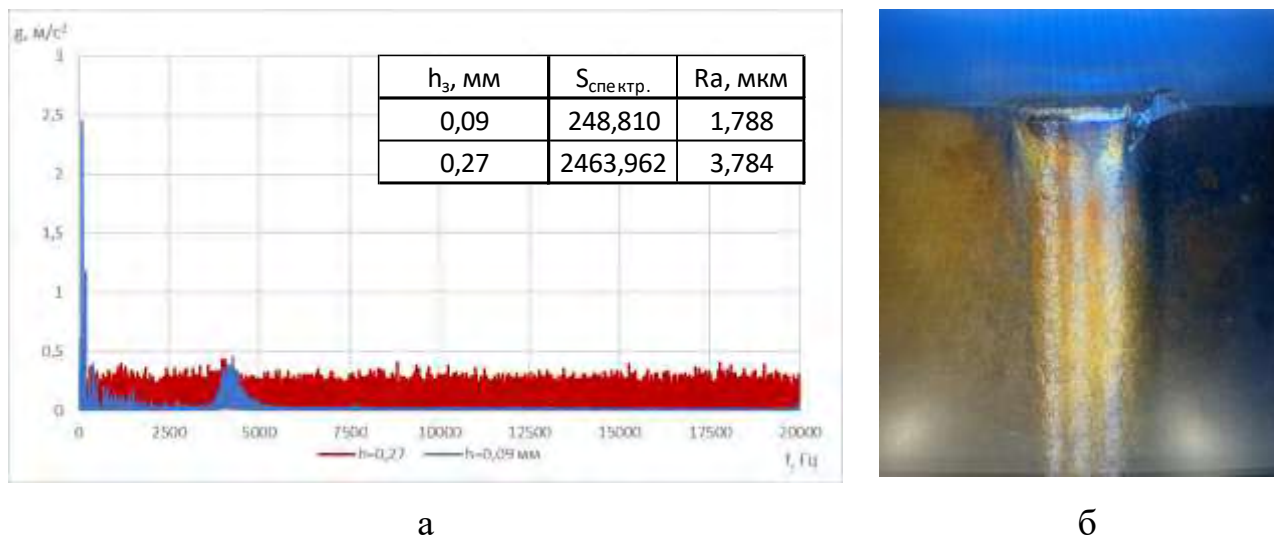
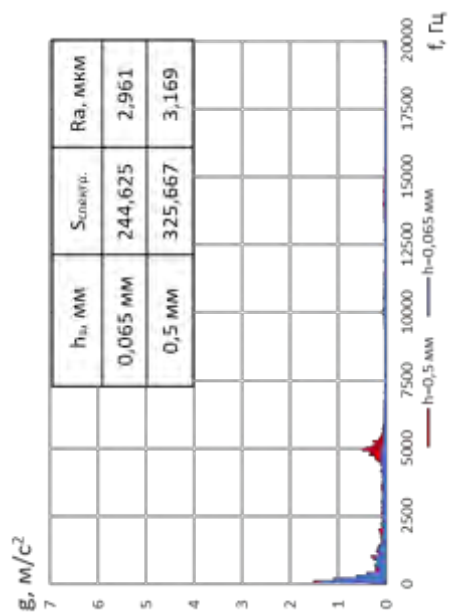


Рисунок 3.36 – Взаимосвязь вибрационного сигнала, интенсивности износа инструмента и шероховатости поверхности
(Сталь 40X13 Режимы резания: $t=0,5$ мм, $V=90$ м/мин, $S=0,2$ мм/об)

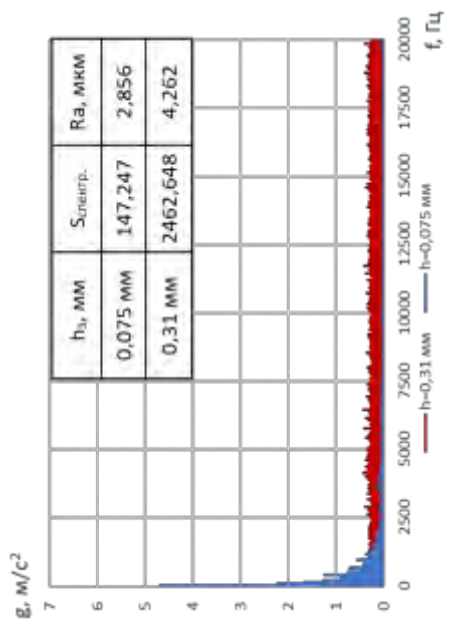
В результате проведенных исследований было установлено, что наростообразование на режущей кромке характерное обработке нержавеющей сталей и проявляющееся как в зоне низких (рисунок 3.36), так и высоких скоростей резания (рисунок 3.37), приводит к существенному росту площади спектрограммы вибрационного сигнала. Стабильное развитие фаски износа по задней грани СМНП с величины 0,065 мм до 0,5 мм ведет к монотонному увеличению площади спектрограммы и в данном примере не превышает 50 % (рисунок 3.36, а, г). В то время как развитие износа инструмента до значительно меньших величин, но при образовании нароста на режущей кромке сопровождается резким кратным (более чем в 10 раз) ростом площади спектрограммы (рисунок 3.36 б и д, в и е). Это отражает рост неустойчивости процесса резания, а также его управляемости и надежности прогнозирования.



а



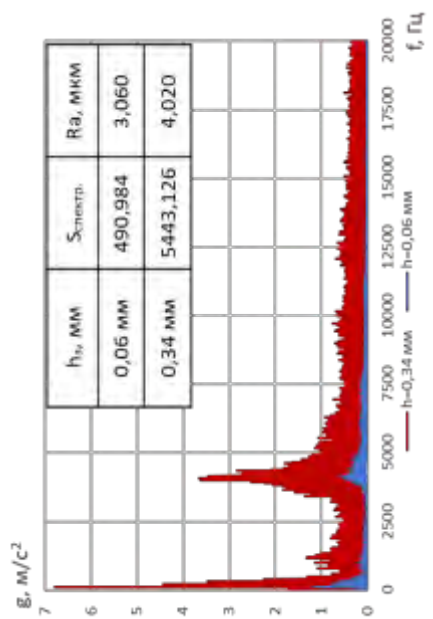
Г



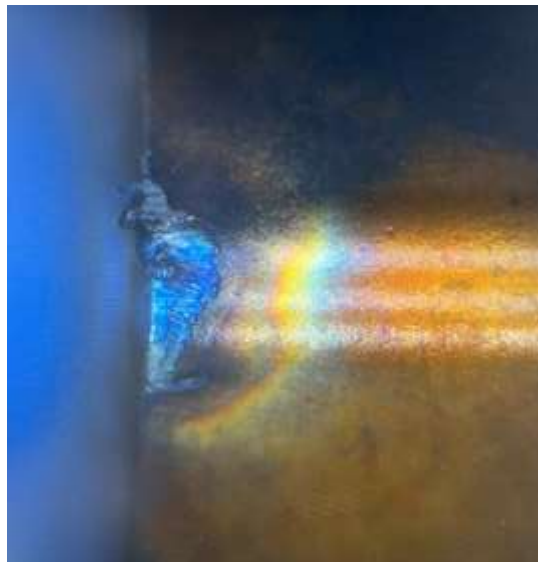
б



Д

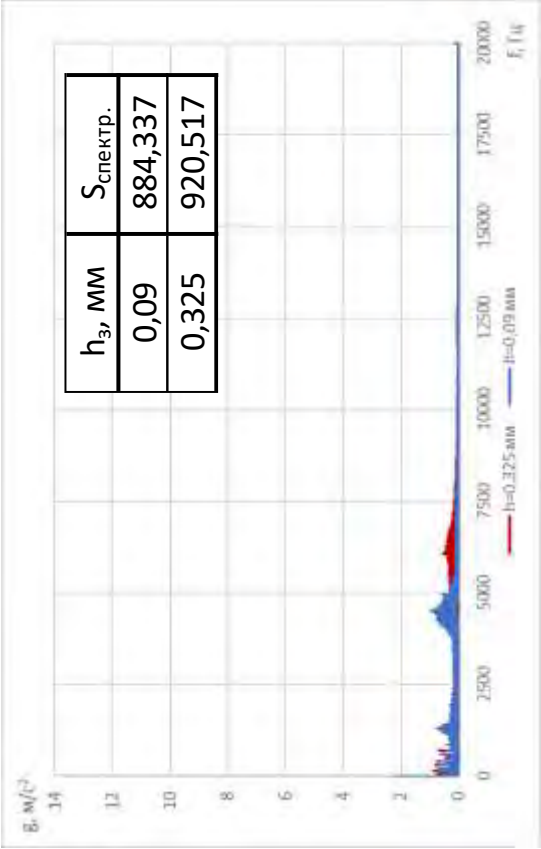


в

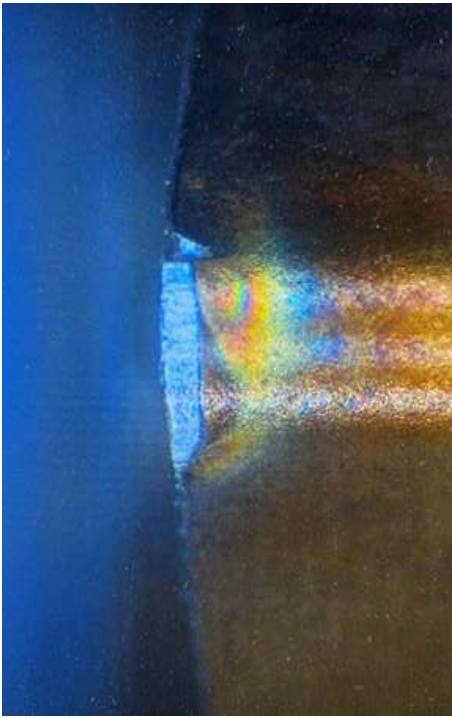


е

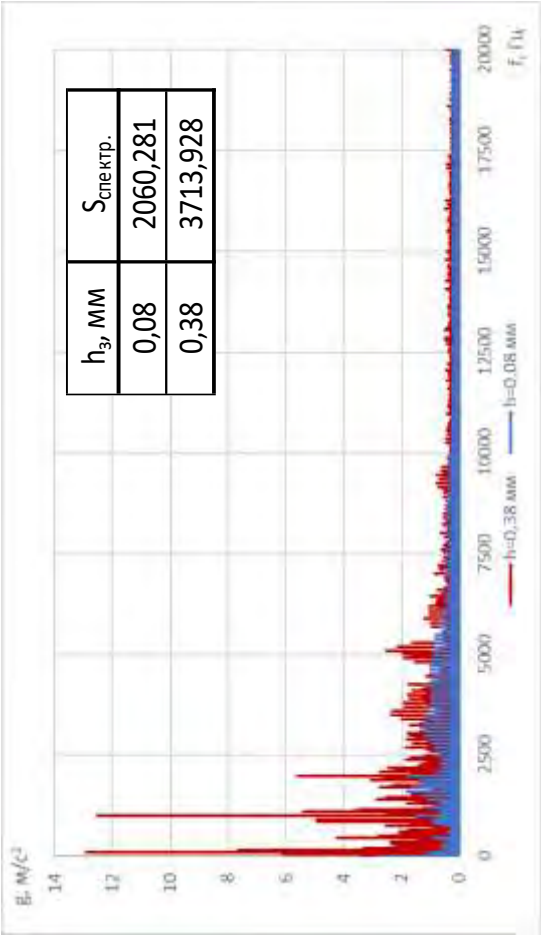
Рисунок 3.36 – Взаимосвязь вибрационного сигнала, износа инструмента и шероховатости поверхности
(Сталь 40X13 Режимы резания: $t=0,5$ мм, $V=280$ м/мин, $S=0,3$ мм/об)



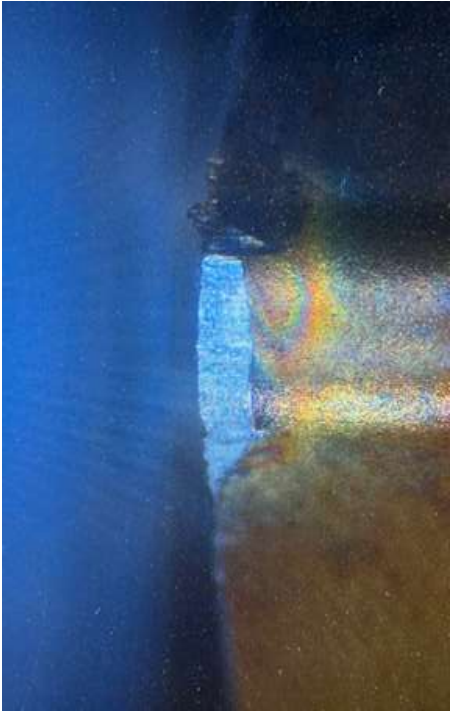
а



в



б



г

Рисунок 3.37 – Взаимосвязь вибрационного сигнала, износа инструмента и шероховатости поверхности (Сталь 8Х21Н6М2Г Режимы резания: $t=0,5 \text{ мм}$, $V=80 \text{ м/мин}$, $S=0,3 \text{ мм/об}$)

Отличительной особенностью износа СМНП при обработке жаропрочной стали 8Х21Н6М2Т в рамках области рекомендуемых режимов резания явилось образование проточин по краю схода стружки, что объясняется интенсификацией абразивного износа за счет твердых включений в объеме обрабатываемого материала, а также обосновывает общее повышение уровня вибраций по сравнению с нержавеющей сталью (рисунок 3.37 а, в). Интенсивность образования проточин варьируется в зависимости от назначенных режимов обработки. Здесь, как и в случае с нержавеющей сталью образование нароста на режущей кромке СМНП отражается на кратном росте площади спектрограммы вибрационного сигнала (рисунок 3.37 б, г).

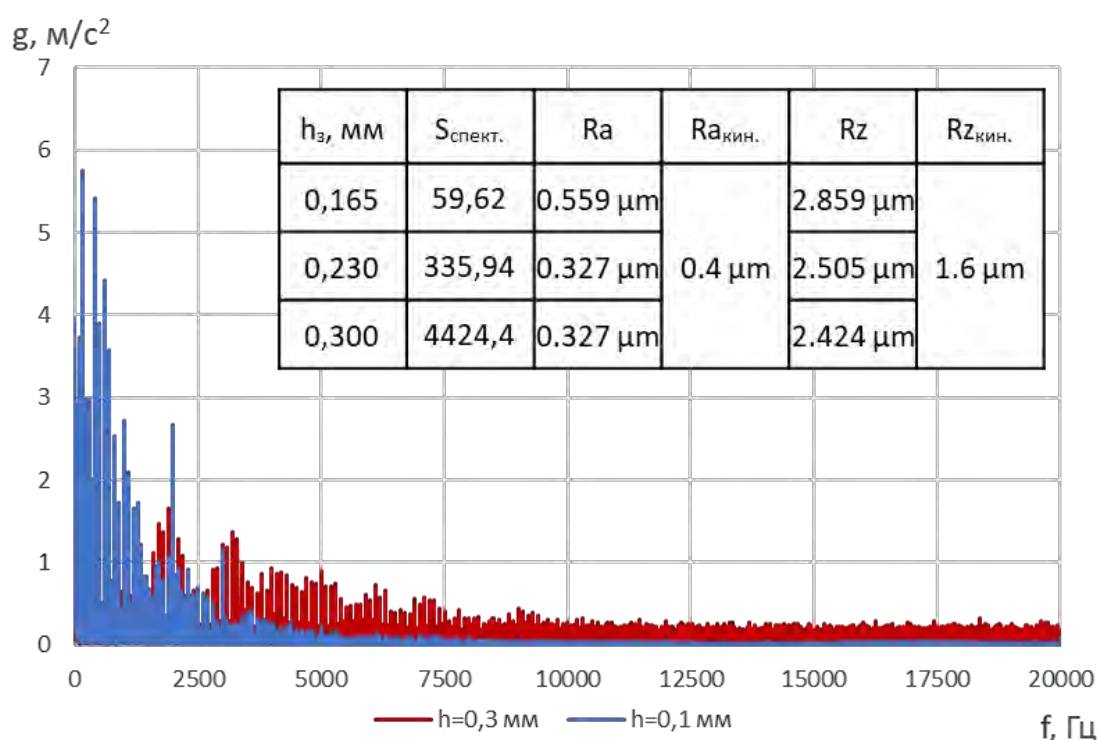
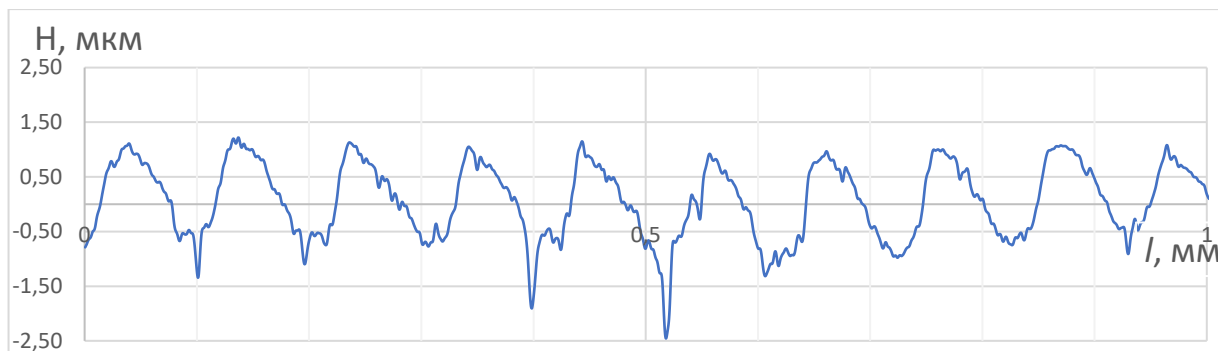


Рисунок 3.38 – Взаимосвязь вибрационного сигнала, износа инструмента и шероховатости поверхности
(Сталь 8Х21Н6М2Т Режимы резания: $t=0,5$ мм, $V=100$ м/мин, $S=0,1$ мм/об)

С увеличением скорости резания и снижением подачи наблюдалось общее снижение площади спектрограммы (рисунок 3.38), что обосновывается ростом теплового уровня и благоприятным влиянием на контактное взаимодействие. Кроме того, при обработке жаропрочных сталей фиксировался более выраженный характер развития величины интегральной виброэнергии с ростом фаски износа

даже в условиях его стабильного протекания. В данном случае отсутствовали признаки наростообразования или сколов на режущей кромки.



а



б



в

Рисунок 3.39 – 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 8Х21Н6М2Т Режимы резания: $t=0,5$ мм, $V=100$ м/мин, $S=0,1$ мм/об)

Анализ профилограмм обработанной поверхности (рисунок 3.39), не смотря на некоторое снижение высотных характеристик (рисунок 3.38), выявили тенденцию вырождения постоянства профиля до более вероятного уровня. То есть в данном случае следует говорить о снижении степени влияния кинематического

фактора на микропрофиль обработанной поверхности и росте интенсивности деформационной составляющей, колебаний и износа инструмента.

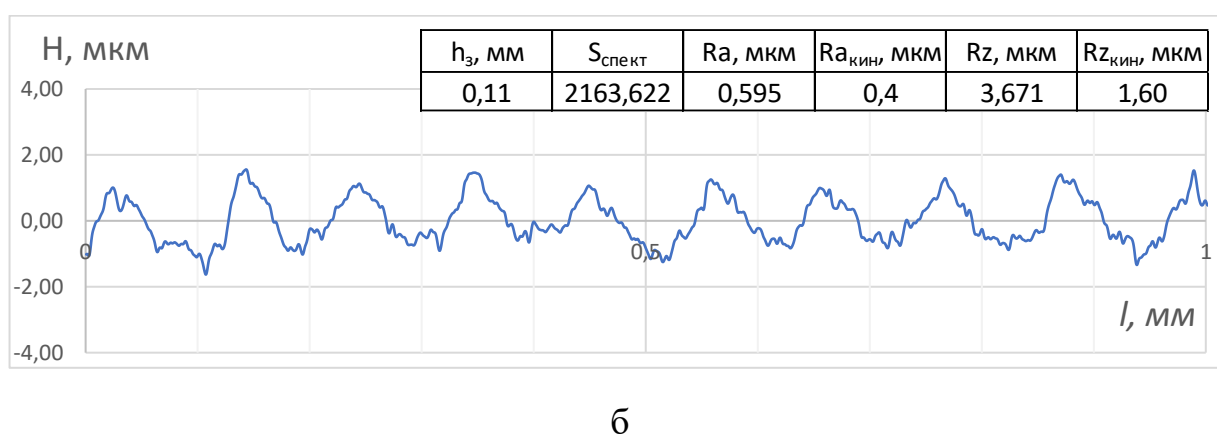
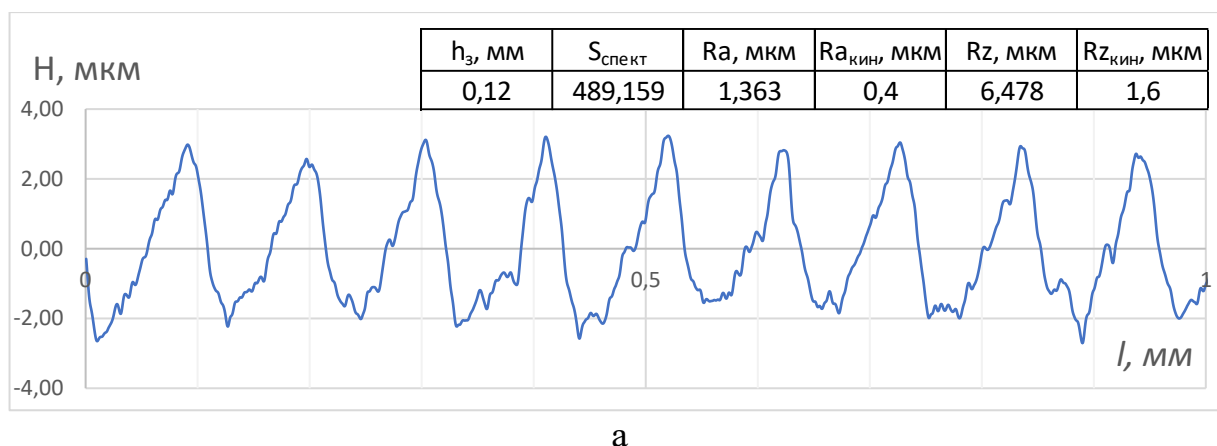


Рисунок 3.40 – Профилограммы обработанной поверхности при различном состоянии режущей кромки СМНП

а) $h_z = 0,12$ мм нарост отсутствует; б) $h_z = 0,11$ мм нарост
(Сталь 8Х21Н6М2Т Режимы резания: $t=0,5$ мм, $V=80$ м/мин, $S=0,1$ мм/об)

Образование нароста на режущей кромке также оказывает дестабилизирующий эффект на регулярности формируемого профиля обработанной поверхности (рисунок 3.40). Так при соразмерной величине фаски износа по задней грани СМНП, не достигшей критического значения, наблюдается существенное увеличение площади спектрограммы вибрационного сигнала, а также уменьшение высотных характеристик шероховатости. Следует отметить, что в первом случае (рисунок 3.40, а) параметра Ra кратно превышает расчетное кинематическое значение параметра. Во втором случае (рисунок 3.40, б) превышение расчетного кинематического значения Ra существенно меньше. Вместе с тем, наблюдается потеря регулярности характера микропрофиля, а значит

и возможность достоверного прогнозирования параметров шероховатости обработанной поверхности и эффективности управления процессом резания.

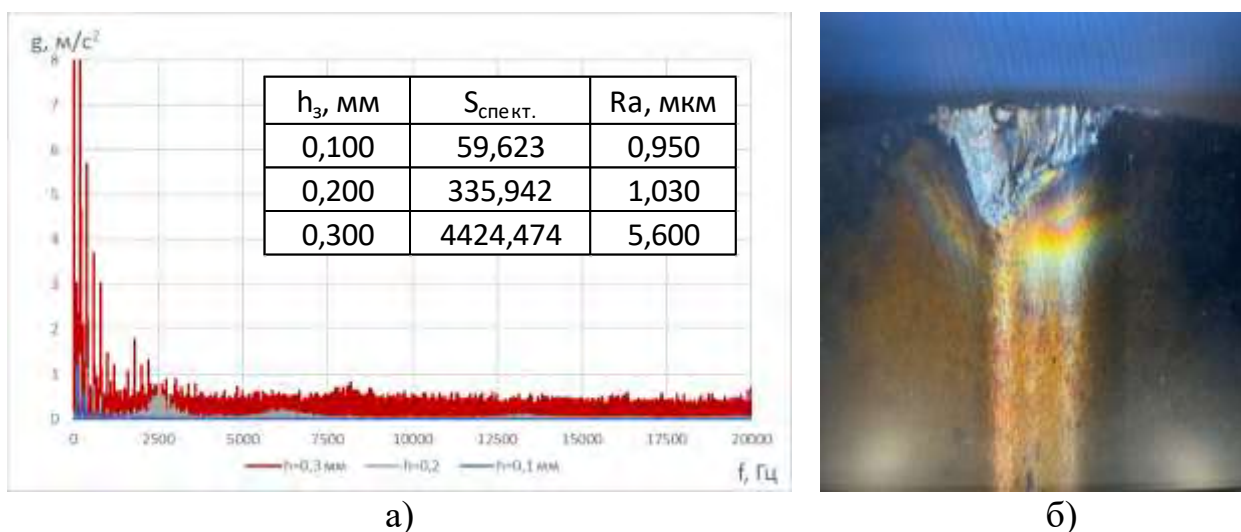


Рисунок 3.41 – Взаимосвязь вибрационного сигнала, интенсивности износа инструмента и шероховатости поверхности

а) спектрограмма вибрационного сигнала; б) износ СМНП
(Сталь 8Х21Н6М2Т Режимы резания: $t=0,5$ мм, $V=260$ м/мин, $S=0,3$ мм/об)



Рисунок 3.42 – Характер обработанной поверхности при обработке СМНП со значительным уровнем износа

(Сталь 8Х21Н6М2Т Режимы резания: $t=0,5$ мм, $V=260$ м/мин, $S=0,3$ мм/об)

Увеличение скорости резания, сопровождающееся интенсификацией теплового фактора и его неблагоприятного влияния на стойкость режущего инструмента, выражается ростом величины интегральной виброэнергии (рисунок 3.41) и дестабилизацией параметров микропрофиля обработанной поверхности (рисунок 3.42) по причине различного рода дефектов режущей кромки.

Систематизация экспериментальных данных в рамках допустимой области режимов резания и характеристик контактной пары позволило выявить закономерности изменения площади спектрограммы вибрационного сигнала (рисунок 3.43), что в условиях стабилизации 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. 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. Полученные данные позволяют создать регрессионные модели, применимые для повышения эффективности управления процессом обработки.

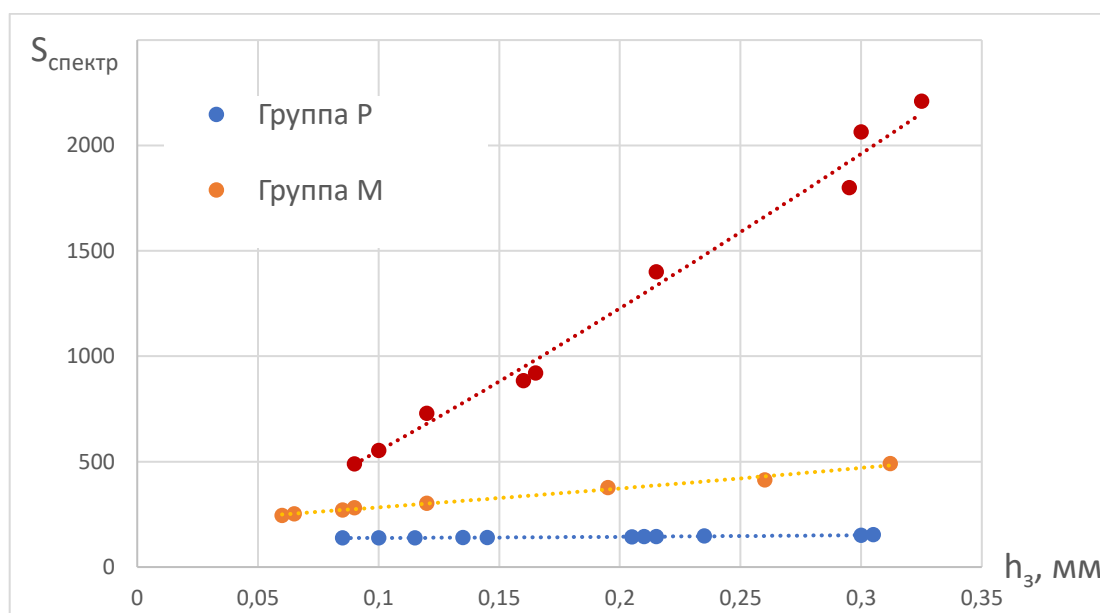


Рисунок 3.43 – Зависимость изменения величины интегральной виброэнергии (площади спектрограммы вибрационного сигнала) от величины фаски износа по задней грани СМНП

3.4 Выводы

Разработка методологии управления процессами механической обработки и построения функционально-ориентированных технологических систем, интегрированных в единую информационную среду предприятия, возможна только на основе понимания физических принципов контактного взаимодействия инструмента с заготовкой, механизмов изнашивания режущего клина и системы взаимосвязей условий осуществления обработки с параметрами микропрофиля обработанной поверхности [72, 175].

Систематизация и анализ результатов исследований закономерностей формирования качества обработанной поверхности и изнашивания режущего инструмента позволяют сформулировать концепцию интеллектуального мониторинга процесса обработки и обосновать технические принципы и критерии диагностики, методы расчета и оптимизации с целью повышения стабильности обеспечения заданных результатов обработки и эффективности управления.

Оценка функциональных свойств и прогноз стойкости режущего инструмента требует учета сложного комплекса физико-механических характеристик, имеющих существенную вариативность, определяемую технологией производства режущего инструмента, в частности, сменных твердосплавных пластин с износостойкими покрытиями. 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. 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 получить устойчивый параметр для численного сравнения без привлечения сложного математического аппарата и алгоритмов анализа, 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 надежного обеспечения установленных требований к результату механической обработки.

Глава 4. Интеграция интеллектуальной технологической системы в процессы технологической подготовки в цифровом производстве (теоретическая концепция)

Технологическая подготовка производства (ТПП) является системообразующей составляющей в структуре промышленного производства и представляет собой комплекс взаимосвязанных мероприятий, обеспечивающих переход от этапа конструкторской разработки изделия к его устойчивому серийному или массовому воспроизводству с заданными показателями качества, себестоимости и сроков изготовления. Эффективность функционирования системы ТПП в значительной степени определяет общую конкурентоспособность производственного предприятия, уровень его технологической зрелости и способность к адаптации в условиях динамично меняющейся внешней среды.

В современных условиях цифровой трансформации промышленности система технологической подготовки производства сталкивается с рядом принципиальных проблем. К числу наиболее существенных относятся: фрагментарность процессов цифровизации, недостаточная интеграция автоматизированных систем проектирования и управления производством (CAD, CAM, PDM, PLM, MES и др.), дефицит квалифицированных кадров, а также высокая временная и трудовая емкость разработки и внедрения новых технологических процессов. Усиливающееся давление со стороны рынка на сокращение сроков вывода продукции на рынок и повышение уровня индивидуализации изделий требует перехода от традиционных статичных моделей ТПП к более гибким, адаптивным и цифровоориентированным подходам.

В связи с этим особую актуальность приобретают исследования, направленные на формализацию, оптимизацию и цифровизацию процессов ТПП, включая разработку сквозных информационных моделей, интеграцию технологий цифровых двойников, а также внедрение интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

4.1 Формализация, оптимизация и цифровизация процессов технологической подготовки производства в условиях Индустрии 4.0

Формализация, оптимизация и цифровизация процессов технологической подготовки производства (ТПП) являются неотъемлемыми компонентами трансформации современных промышленных систем в соответствии с концепцией Индустрии 4.0. Эти процессы направлены на обеспечение сквозной управляемости, воспроизводимости и интеллектуализации технологических решений, что, в свою очередь, способствует резкому повышению эффективности производственных систем, гибкости и адаптивности к изменениям внешней среды.

Для реализации указанных направлений предлагается комплексный системный подход, основанный на выделении и реализации пяти ключевых аспектов, каждый из которых формирует базис современной цифровой модели ТПП.

В обобщённом виде архитектура цифровой модели ТПП представлена на рисунке 4.1 и включает следующие компоненты:

1. CAD-системы – проектирование изделия.
2. PLM-системы – управление структурой изделия, маршрутами и НСИ.
3. CAM-средства – автоматическая генерация технологических операций и управляющих программ.
4. MES-системы и цифровые двойники – производственное планирование, мониторинг и моделирование.
5. Модули искусственного интеллекта – автоматическая оптимизация и самообучение на производственных данных.
6. Механизмы обратной связи – постоянное обновление цифровых моделей на основе реальных параметров производства.



Рисунок 4.1 – Архитектура цифровой модели технологической подготовки производства (ТПП)

Такой системный подход к модернизации процессов ТПП позволяет создавать гибкие, интеллектуальные и высокоадаптивные производственные структуры, соответствующие современным требованиям цифровой экономики и Индустрии 4.0. Структурная схема цифровой модели технологической подготовки производства (ТПП) представлена на рисунке 4.2.



Рисунок 4.2 – Структурная схема цифровой модели технологической подготовки производства (ТПП)

Формализация процессов технологической подготовки предполагает перевод разрозненных производственных знаний, инженерных решений и проектных процедур в строго структурированные и однозначно интерпретируемые

информационные модели, пригодные для последующей автоматизации, анализа и цифровой трансляции.

В рамках формализации целесообразно реализовать следующие меры:

- разработку формализованных моделей технологических процессов с использованием стандартных нотаций (BPMN, IDEF0, SysML и др.), обеспечивающих машиночитаемость технологических сценариев;
- создание нормативно-справочной информации (НСИ) в виде цифровых справочников материалов, операций, режимов, оборудования и инструмента;
- описание маршрутных и технологических деревьев, представляющих собой цифровые объекты в составе PLM/ERP-систем;
- моделирование требований к ресурсному обеспечению производственного процесса, включая параметры оборудования, оснастки, осей координат и т.д.

Оптимизация процессов ТПП направлена на повышение эффективности функционирования производственной системы за счет рационализации маршрутных решений, сокращения сроков и затрат на подготовку производства.

К числу реализуемых решений относятся:

- использование методов математической оптимизации (линейное и стохастическое программирование) для подбора оптимальных маршрутов обработки;
- применение средств имитационного моделирования (AnyLogic, FlexSim и др.) для оценки производственных сценариев и анализа узких мест;
- интеграция инструментов технико-экономического анализа в процесс ТПП, с возможностью расчета себестоимости, загрузки мощностей, оценки окупаемости решений;
- унификация и типизация технологических решений, обеспечивающих сокращение времени на проектирование и снижение вероятности ошибок при внедрении.

Цифровизация процессов ТПП охватывает внедрение современных информационных систем, направленных на комплексное сопровождение технологической подготовки во всем её жизненном цикле.

К числу ключевых мероприятий относятся:

- внедрение PLM-систем (Siemens Teamcenter, Dassault ENOVIA, Windchill и др.) для централизованного управления структурой изделия и технологической информацией;
- интеграция систем CAD/CAM/PDM/MES/ERP в единую цифровую производственную платформу с двусторонним обменом данными;
- генерация цифровых технологических карт, 3D-моделей оснастки и оборудования;
- обеспечение сквозной цифровой прослеживаемости от конструкторской документации до конкретной производственной операции.

Сквозные информационные модели (digital thread) обеспечивают непрерывность и консистентность инженерных, технологических и производственных данных на всех этапах жизненного цикла изделия.

В данном контексте предусматривается:

- создание цифрового двойника изделия, включающего его геометрию, поведение в условиях производства и эксплуатации;
- моделирование цифрового двойника технологического процесса, отражающего параметры операций, допуски, контрольные точки и возможные отклонения;
- интеграция цифровых двойников с реальными производственными системами (MES, SCADA) для оперативного мониторинга и корректировки;
- реализация единой среды обмена инженерными и производственными данными с применением технологий IoT, OPC UA, облачных платформ.

Одним из приоритетных направлений интеллектуализации процессов технологической подготовки производства является создание интеллектуальных систем поддержки принятия решений (ИСППР), способных формировать обоснованные технологические рекомендации на основе анализа больших

массивов производственных данных, инженерных моделей и эксплуатационных характеристик оборудования и инструмента.

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 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. Использование таких паспортов в контуре планирования 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.

4.2 Методология оценки работоспособности и ресурса режущего инструмента. Создание ЭПИ

Очередной виток развития производственных технологий, инициированный цифровизацией, создает новые перспективы и открывает широкие возможности для машиностроительных предприятий. Вместе с тем это вызывает необходимость совершенствования технологического оборудования. Фактически это означает (предполагает) переход от станков с ЧПУ и систем адаптивного управления к цифровым производственным системам, обладающим иным уровнем автономности, способности к адаптации и саморегуляции в процессе выполнения

операций согласно полученной производственной задаче в условиях некоторого уровня неопределенности технологической информации. Контроль и управление технологическими процессами в режиме реального времени повышает эффективность производства.

В основу развития производственного оборудования при его разработке в рамках концепции цифровизации закладывается принцип киберфизической системы, интегрирующей вычислительные и физические процессы. Такая система включает физические компоненты оборудования, информационные компоненты (вычислительные устройства, датчики, исполнительные механизмы), коммуникационную среду, обеспечивающую обмен информацией внутри системы и с окружающей средой, передачу управляющих команд.

Для реализации функции автономного управления цифровая производственная система должна обладать достаточным уровнем технологического интеллекта для оптимизации и автоматизации технологических операций на основе анализа данных и прогнозирования. Такой инструментарий позволит освободить оператора от таких рутинных задач, как отладка, выбор и оптимизация (адаптация) режимов резания, поддержание стабильности процесса, нивелирование отклонений. В настоящее время достаточно интенсивно ведутся работы, направленные на развитие нейросетей, что в перспективе может обеспечить достижение необходимого уровня автономности. Но имея в своей основе статистическую базу данных данная технология не лишена определенных ограничений и недостатков, например, малый объем данных, необходимость больших вычислительных ресурсов, чувствительность к выбросам и т.д. Кроме того, обучение такой системы является достаточно длительным и трудоемким процессом, существенное влияние на который оказывают фильтрация исходной информации и корректный выбор её источников. Некорректность анализа и интерпретации информации, предвзятость данных, а также закрытость внутренних механизмов принятия решений (режим «черного ящика») формирует технические барьеры, ограничивающие применение технологий искусственного интеллекта на базе нейросетей в производственных секторах.

Эмпирические базы данных без качественного понимания сути производственных процессов, теоретических основ сложных взаимодействий и явлений не могут обеспечить высокой надежности результирующих моделей предиктивной аналитики, а следовательно, и эффективности управления производственными процессами. С другой стороны, сложные производственные объекты часто трудно описать количественно, а технологическая информация является в высокой степени неопределенной.

Характеристики отдельных составляющих технологической системы могут быть определены лабораторными методами, которые являются достаточно трудоемкими и требуют особых условий проведения. Кроме того, ряд методов исследования, в частности физико-механических параметров инструментальных и обрабатываемых материалов относятся к разрушающим, что исключает сплошной контроль. Большинство же диагностических инструментов, применимых в производственных условиях, основаны на косвенной оценке динамики процессов, не являются универсальными и не обладают достаточной достоверностью при одноканальном варианте реализации.

Сочетание различных методов диагностики позволяет обеспечить комплексный подход к устранению неопределённости технологической информации и повышает надежность производства. Так, лабораторные и разрушающие методы исследования, например обрабатываемых заготовок и режущего инструмента, целесообразно применять для выборочных испытаний отдельных образцов в случае отсутствия информации о физико-механических и эксплуатационных характеристиках, необходимых для назначения режимов обработки на этапе технологической подготовки.

Многоканальная диагностика процесса резания позволяет повысить эффективность управления в условиях неопределённости технологической информации и оптимизировать режимы обработки, учитывая, что изменение каждого из управляемых факторов отражается на изменении практически всех выходных параметров процесса. При этом информационные диагностические каналы должны учитывать не только фактор производственной применимости и

возможности интеграции в конструкцию технологического оборудования без его существенной модернизации, но и отражать качественную и количественную динамику контактного взаимодействия и формирования параметров качества обработанной поверхности.

Таким образом, повышение эффективности подготовки и управления механическими операциями в условиях неопределённости технологической информации требует реализации комплекса мероприятий, представленных на рисунке 4.3.

На основании анализа структурной схемы (рисунок 4.3) установлено, что методология оценки работоспособности и ресурса режущего инструмента с реализацией концепции электронного паспорта инструмента (ЭПИ) реализуется в виде трех функциональных этапов, каждый из которых включает совокупность последовательно выполняемых подэтапов.

На первом этапе осуществляется подготовка исходной технологической информации, включающей параметры обрабатываемого материала, тип инструмента, режимы резания и геометрию режущей кромки.

Второй этап соответствует непосредственному проведению технологической обработки, в рамках которого реализуется многоканальный мониторинг состояния инструмента (по силовым, вибрационным, температурным и акустическим характеристикам), а также регистрация текущих значений параметров процесса.

Третий этап включает статистическую обработку и интерпретацию полученных экспериментальных данных, а также формирование и актуализацию базы данных.

Электронный паспорт инструмента формируется параллельно на всех этапах, динамически дополняясь и уточняясь по мере накопления диагностической информации, что обеспечивает замкнутый контур адаптивного управления инструментом в рамках концепции цифрового производства.

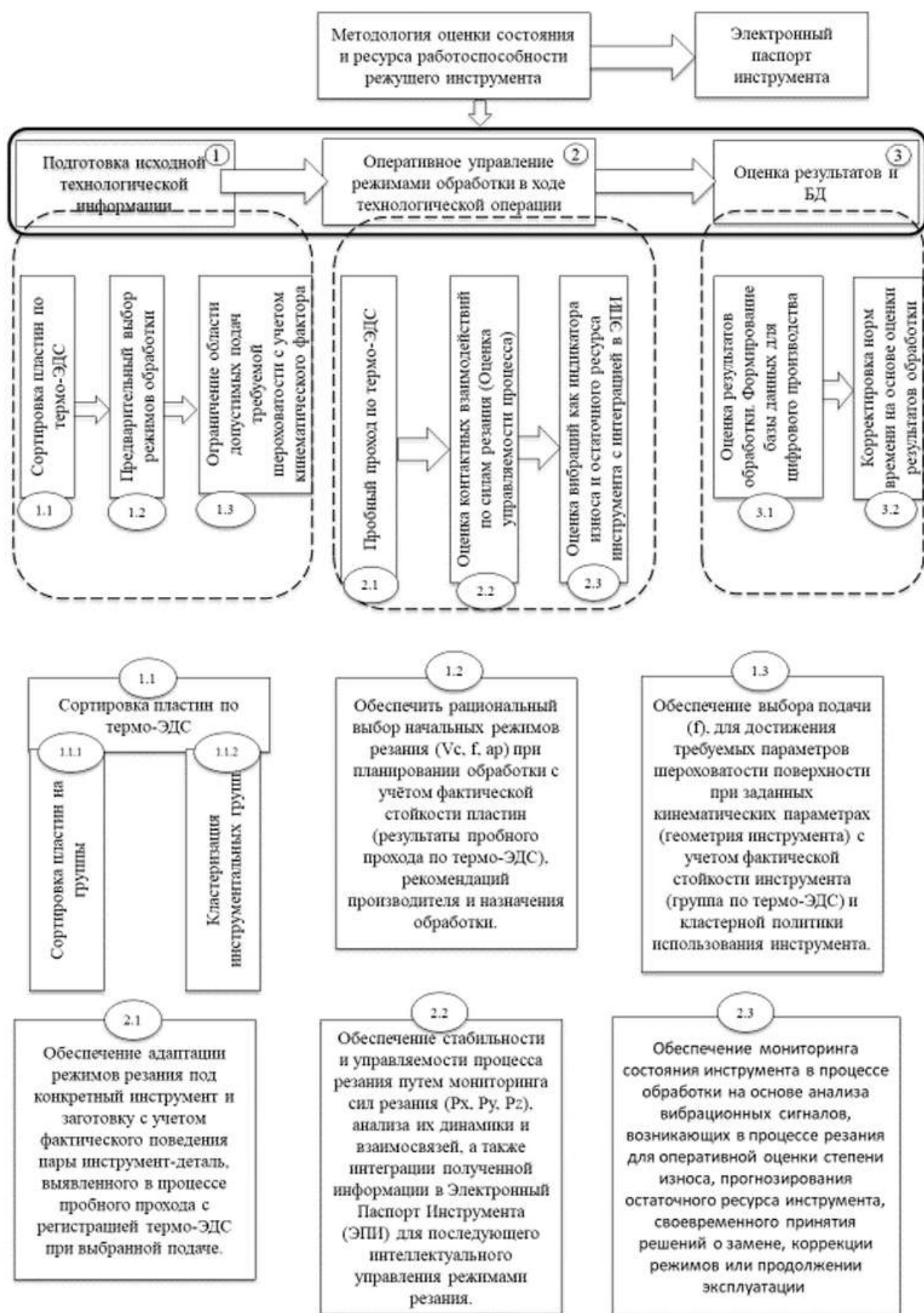


Рисунок 4.3 – Методология оценки работоспособности и ресурса режущего инструмента. Формирование электронного паспорта инструмента (ЭПИ)

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) 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.

Указанные операции обеспечивают формирование обоснованной и адаптированной исходной информационной базы для дальнейшей реализации процессов многоканальной диагностики и интеллектуального управления обработкой.

Этап 1.1. Сортировка СМНП по величине термо-ЭДС и их кластеризация.

Сортировка и кластеризация СМНП основывается на таком проявлении процесса контактного взаимодействия режущего инструмента и обрабатываемого материала как термо-ЭДС (термоэлектродвижущая сила), величина которой отражает тепловые процессы в зоне резания и может быть использована для косвенной оценки режущей способности и прогнозирования периода стойкости инструмента.

Метод позволяет косвенно оценить различия в химическом составе, зернистости твердосплавной матрицы, качество спекания, а также функциональность износостойкого многослойного покрытия пластин. В отличие от электромагнитных методов диагностики свойств СМНП, которые ориентированы на измерение отдельных параметров, метод термо-ЭДС пробного

прохода позволяет оценивать не только физико-механические, но и геометрические характеристики и микрогеометрию СМНП, поскольку они напрямую оказывают влияние на величину участков контактного взаимодействия режущего инструмента и обрабатываемого материала, а значит и на интенсивность тепловыделения в зоне резания. Работа выхода электронов из металлов коррелирует с их физико-механическими свойствами, что позволяет использовать термо-ЭДС как интегральный параметр.

Цель процедуры сортировки - обеспечение рационального использования СМНП в соответствии с их фактическими режущими свойствами, определёнными методом пробного прохода по термо-ЭДС [139, 140], с последующей привязкой к кластерам инструментальных групп для автоматизированного управления технологическим процессом.

Таблица 4.1 – Процедура сортировки пластин на группы

Группа по термо-ЭДС	Диапазон значений термо-ЭДС, мВ	Интерпретация стойкости, мин
Группа С	$\geq X_{\text{high}}$	Пластины с наихудшими свойствами (низкая стойкость)
Группа В	$X_{\text{low}} \leq \text{ЭДС} < X_{\text{high}}$	Пластины со стандартной стойкостью
Группа А	$< X_{\text{low}}$	Пластины с высокой потенциальной стойкостью

Примечание: значения X_{high} и X_{low} определяются экспериментально и могут быть уточнены на основе накопления статистики по конкретной технологической системе.

Процедура сортировки пластин на группы

Для каждой новой партии пластин проводится пробный проход. В процессе пробного прохода производится регистрация термо-ЭДС для каждой режущей кромки (интегральное значение за время прохода или средняя величина). По величине термо-ЭДС пластины сортируются в одну из групп (таблица 4.1). Каждой пластине присваивается соответствующая категория (А/В/С), которая фиксируется:

- в маркировке (QR-код или другая физическая маркировка на инструменте);

– в электронной базе данных (в системе мониторинга / MES / Электронном паспорте инструмента).

Таблица 4.2 – Кластеризация инструментальных групп

Категория пластины (по термо-ЭДС)	Назначение в производственном процессе	Кластер инструментальных групп
Группа А	Прецизионная обработка, финишные проходы, ответственные детали	Кластер 1
Группа В	Стандартные технологические операции	Кластер 2
Группа С	Черновая обработка, предварительные проходы, вторичные операции	Кластер 3

Далее производится кластеризация инструментальных групп в соответствии с их предполагаемым функциональным назначением в структуре технологического процесса, с учётом вида обработки, уровня требований к точности, шероховатости и ресурсу (см. таблицу 4.2). Признаком кластеризации СМНП является существенное отличие средних, которое проверяется по критерию Стьюдента с доверительной вероятностью не менее 95 % (см. п. 2.4).

Фиксация информации в электронном паспорте инструмента (ЭПИ)

Электронный паспорт инструмента (ЭПИ) представляет собой цифровую модель, содержащую всю релевантную информацию о режущем инструменте, его текущем состоянии, истории эксплуатации и прогнозируемом ресурсе. ЭПИ формируется и динамически обновляется на основе данных многоканальной диагностики, получаемых в процессе резания.

Преимущества внедрения ЭПИ: исключение применения «слабых» пластин на операциях прецизионной обработки; повышение воспроизводимости результатов (качества) обработки; снижение затрат на инструмент за счёт оптимального использования ресурса; интеграция информации о стойкости инструмента в систему интеллектуального мониторинга и управления производством.

ЭПИ каждого инструмента на этапе подготовки исходной технологической информации включает поля:

- Категория стойкости по результатам пробного прохода (A/B/C), кластеризация.
- Дата проведения пробного прохода.
- Пороговые значения термо-ЭДС, актуальные на момент сортировки.
- История использования (в каких кластерах применялась данная пластина).

При планировании производственного задания система по ЭПИ автоматически подбирает инструмент с требуемой категорией стойкости.

Этап 1.2. Предварительный выбор режимов обработки на основе данных ЭПИ и установленных задач технологической операции.

На следующем этапе на основе данных ЭПИ и установленных задач технологической операции осуществляется предварительный выбор режимов обработки. Заданная производителем СМНП область допустимых режимов резания уточняется в соответствии с кластерами инструментальных групп. Это позволяет персонализировать параметры обработки, повысить эффективность использования инструмента и увеличить точность прогнозирования его ресурса.

Цель: повышение эффективности технологической подготовки и обеспечение рационального использования режущего инструмента за счет уточнения области допустимых режимов резания.

Производители режущего инструмента для каждого вида СМНП формируют области допустимых режимов резания (V_c - скорость резания, м/мин; f_n - подача, мм/об; a_p - глубина резания, мм), принимая в расчёт значительное количество факторов, в том числе особенности процесса резания целевых материалов согласно группе обрабатываемости; материал инструмента, его геометрия, тип покрытия; виды обработки и другие ограничения. Однако, эти рекомендации имеют приближенный характер и не учитывают реальные условия обработки и факторы, влияющие на процесс резания. Уточнение области допустимых режимов на

основании предварительной информации позволяет существенно повысить надежность технологической подготовки.

Присвоение стратегии обработки кластерным группам СМНП

Сформированным кластерным группам СМНП присваивается целевая стратегия применения в соответствии с категорией стойкости (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Присвоение стратегии обработки кластерным группам СМНП

Кластер СМП	Категория стойкости	Целевая стратегия	Функциональные ограничения
Кластер 1 (группа А)	Высокая стойкость	Максимальная производительность	Прецизионная обработка
Кластер 2 (группа В)	Стандартная стойкость	Сбалансированная стойкость/производительность	Средняя область диапазона режимов резания (скорость резания, подача)
Кластер 3 (группа С)	Низкая стойкость	Минимизация выхода инструмента из строя	Ограничение скорости резания

Исходные данные:

Область допустимых режимов резания (рекомендации производителя инструмента):

- скорости резания ($V_{\min} < V_c < V_{\max}$), м/мин;
- подачи ($f_{\min} < f_n < f_{\max}$), мм/об;
- глубины резания ($a_{\min} < a_p < a_{\max}$), мм.

Кластеры инструментальных групп по термо-ЭДС:

- группа С — пластины с пониженной стойкостью;
- группа В — средняя стойкость;
- группа А — высокая стойкость.

Уточнение области допустимых режимов резания в соответствии с целевой стратегией кластера СМНП

В соответствии с принятой стратегией обработки для каждого инструментального кластера производится уточнение области допустимых режимов обработки с учетом интенсивности износа инструмента, в том числе под влиянием тепловыделения и температурной напряжённости процесса резания.

Наибольшее влияние на интенсивность тепловыделения при резании оказывает скорость резания. С ростом скорости резания увеличивается работа деформации срезаемого слоя, которая почти полностью превращается в теплоту. В результате растёт мощность тепловых источников и температура в зоне резания. С ростом подачи температура резания повышается менее интенсивно, в то время как изменение глубины резания оказывает незначительное влияние на тепловую напряжённость процесса резания. Вместе с тем, с увеличением глубины резания и подачи увеличивается сечение реза и площадь контакта, что напрямую влияет на интенсивность стока тепла и снижение температуры в зоне резания благодаря изменению условий теплоотвода.

Таким образом, для 3-го кластера СМНП (черновая обработка) область допустимых значений скорости резания ограничивается нижним диапазоном, в то время как для глубины резания и подачи принимаются верхний диапазоны. Указанные ограничения нацелены на увеличение удельной доли резания, уменьшения доли трения в энергетическом балансе контактного взаимодействия режущего инструмента и заготовки, а также тепловой напряженности процесса резания. Увеличение площади сечения срезаемого слоя приводит к росту тангенциальной составляющей силы резания P_z , увеличению нагрузки на подшипники шпиндельной группы, механизма подач и как следствие, эволюции погрешности обработки, что определяет область применения инструментального кластера – грубая черновая и малоответственная обработка.

Кластер 1 объединяет СМНП с повышенными режущими свойствами и прогнозируемым ресурсом, позволяющим работать в условиях более высокой напряженности контактного взаимодействия. Условия прецизионной обработки определяют необходимость ограничения глубины резания и величины подачи с целью обеспечения требуемой точности и шероховатости обработанной поверхности. В этих условиях повышение производительности обработки может быть достигнуто за счет увеличения скорости резания в рамках допустимой области (согласно рекомендациям производителя). Установленные режимы обработки способствуют относительному снижению сил резания, нагрузке на

режущий инструмент, заготовку и подшипниковые узлы технологического оборудования, что обеспечивает повышение точности обработки. В таблицах 4.4-4.5 приведен пример предварительной настройки режимов обработки.

Таблица 4.4 – Предварительная настройка режимов (пример):

Кластер СМНП	Скорость резания V_c , м/мин	Подача f_n , мм/об	Глубина резания a_p , мм
3 (низкая стойкость)	Нижний диапазон	Верхний диапазон	Верхний диапазон
2 (средняя стойкость)	Средний диапазон	Средний диапазон	Средний диапазон
1 (высокая стойкость)	Верхний диапазон	Нижний диапазон	Нижний диапазон

Для наглядности рассмотрим пластину CNMG, для которой производитель рекомендует следующий диапазон режимом обработки: V_c : 150–220 м/мин; f_n : 0.2–0.4 мм/об; a_p : 1–3 мм

Таблица 4.5 – Пример предварительного выбора режимов для конкретной пластины

Группа	Выбор режимов
Кластер 3 (группа С)	$V_c = 150\text{--}170$ м/мин, $f_n = 0.35\text{--}0.4$ мм/об, $a_p = 2.0\text{--}3.0$ мм
Кластер 2 (группа В)	$V_c = 180\text{--}200$ м/мин, $f_n = 0.25\text{--}0.35$ мм/об, $a_p = 1.5\text{--}2.0$ мм
Кластер 1 (группа А)	$V_c = 200\text{--}220$ м/мин, $f_n = 0.2\text{--}0.25$ мм/об, $a_p = 1.0\text{--}1.5$ мм

Фиксация информации в электронном паспорте инструмента (ЭПИ)

В таблице 4.6 представлен пример блока данных в ЭПИ. При вводе инструмента или новой партии пластин проводится пробный проход; результат термо-ЭДС фиксируется в ЭПИ. Категория (А/В/С) по результатам пробного прохода автоматически определяет кластер (1/2/3). Вносятся диапазоны рекомендованных режимов производителя (по справочным данным). Производится уточнение области допустимых режимов резания по кластерным

группам СМНП. Результаты сохраняются в ЭПИ и доступны для автоматизированного использования в САМ и MES системах.

Таблица 4.6 – Пример блока данных в ЭПИ для конкретной пластины

Параметр	Значение
Производственная маркировка СМП	CNMG
Персональный код (идентификатор) СМП	Пластина XYZ123
Категория по термо-ЭДС	Группа В
Кластер инструментальной группы	2
Дата пробного прохода	10.06.2025
Диапазон V_c (м/мин)	180–250
Диапазон f_n (мм/об)	0.15–0.30
Диапазон a_p (мм)	0.5–2.0
Оптимальный V_c (м/мин)	200–230
Оптимальный f_n (мм/об)	0.20–0.25
Оптимальный a_p (мм)	1.0–1.5

Таким образом этап предварительного выбора режимов резания позволяет более точно адаптировать режимы к качеству инструмента, предотвратить преждевременный износ или разрушение за счет нерационального назначения режимов обработки, а также осуществляет подготовку к следующему этапу – реальной адаптации режимов в процессе резания на основе многоканального мониторинга.

Этап 1.3. Ограничение области допустимых подач требуемой шероховатости с учетом кинематического фактора.

Назначение подачи согласно требуемому параметру шероховатости с учетом кинематического фактора служит для точной настройки подачи с целью соблюдения параметров шероховатости, что особенно важно в чистовой обработке и при заданных технических требованиях к качеству поверхности. Сочетание геометрии инструмента (радиуса скругления) и величины подачи формирует остаточные следы на поверхности заготовки, высота гребешков которых определяет микропрофиль поверхности, в частности высотные показатели шероховатости обработанной поверхности.

Цель этапа: обеспечить соответствие получаемой шероховатости поверхности заданным требованиям (например, R_a , R_z и др.) за счёт правильного

выбора подачи f_n в сочетании с радиусом скругления вершины r_ε режущего инструмента.

Процедура назначения подачи:

1. Установить требуемый параметр шероховатости (например, $Ra \leq 1.6$ мкм);
2. Выбрать инструмент с известным r_ε (например, 0.4 мм, 0.8 мм и т.д.);
3. Рассчитать максимально допустимую подачу (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Значения подачи по шероховатости

Ra (мкм)	r_ε (мм)	f (мм/об)
3,2	0,8	≤ 0.16
1,6	0,8	≤ 0.10
0,8	0,4	≤ 0.05
0,4	0,4	≤ 0.035

Дополнительные факторы, влияющие на результат обработки: износ режущего инструмента приводит к увеличению параметров шероховатости обработанной поверхности; данный эффект может быть компенсирован за счёт динамической коррекции подачи в процессе резания; низкая жёсткость технологической системы и вибрационные колебания также оказывают негативное влияние на устойчивость процесса; их влияние подлежит компенсации на последующих этапах за счёт внедрения систем мониторинга и адаптивного управления.

Результатом этапа, направленного на ограничение области допустимых подач с учётом кинематического фактора и требований к параметрам шероховатости, является обеспечение заданного уровня качества поверхности (по параметру шероховатости) без необходимости избыточного снижения скорости резания и подачи; достижение оптимального соотношения между производительностью и качеством механической обработки; формирование базы для последующего внедрения систем мониторинга состояния процесса и разработки алгоритмов адаптивного управления технологическими параметрами.

Результаты предварительной технологической подготовки (Этапы 1.1–1.3)

На этапах предварительной технологической подготовки в рамках интегрированной цифровой среды достигается функциональная взаимосвязь между САМ-, MES- и пользовательскими подсистемами за счёт использования расширенного параметрического описания инструмента (ЭПИ) и термо-электродинамических характеристик (термо-ЭДС). В частности: САМ-система, при генерации управляющей программы, автоматически извлекает из базы ЭПИ оптимальные режимы резания, соответствующие параметрам конкретной группы термо-ЭДС инструмента; MES-система реализует контроль соответствия назначенной инструментальной группы технологическим требованиям конкретной операции, предотвращая ошибки подбора и отклонения от утверждённых параметров; оператор получает автоматически сформированную рекомендацию по оптимальным режимам обработки при наладке или подготовке к выполнению технологической операции.

Реализация этапов 1.1-1.3 позволяет:

- обеспечить индивидуализированный (персонализированный) выбор режимов резания для каждой партии инструмента на основе его функциональных характеристик;
- повысить стабильность стойкости режущего инструмента за счёт привязки режимов к фактическим параметрам пластины;
- исключить субъективный фактор при назначении технологических режимов оператором;
- создать условия для накопления и анализа статистических данных по эффективности различных режимов обработки;
- интегрировать механизмы интеллектуального мониторинга ресурса инструмента и сформировать основу для реализации замкнутого цифрового контура управления износом и качеством обработки.

Этап 2 Оперативное управление режимами обработки в ходе технологической операции

Этап 2.1. Метод пробного прохода термо-ЭДС для конкретной пары инструмент-деталь для уточнения режимов резания с учетом выбранной подачи и интеграция в ЭПИ.

Цель: обеспечить адаптацию 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). Для каждой конкретной пары инструмент-деталь проводится пробный проход согласно установленной методике [169]. В процессе пробного прохода регистрируется сигнал термо-ЭДС на режущей кромке. Оценивается поведение системы: соответствие сигнала термо-ЭДС ожидаемым значениям для выбранной группы стойкости.

Интерпретация результатов пробного прохода

На основе результатов пробного прохода принимаются следующие решения (таблица 4.8)

Таблица 4.8 – Интерпретация результатов пробного прохода

Результат пробного прохода	Интерпретация	Действие
Сигнал термо-ЭДС в пределах нормы для данной группы	Режимы резания подтверждаются	Режимы сохраняются
Сигнал термо-ЭДС повышен	Потенциальный риск ускоренного износа	Скорректировать V_c (уменьшить)
Сигнал термо-ЭДС понижен	Риск недоиспользования ресурса инструмента вследствие завышенного запаса безопасности в выборе режимов резания	Скорректировать V_c (увеличить)

Далее осуществляется интеграция результатов в ЭПИ путем создания дополнительной таблицы, отражающей технологическую историю работы СМП с привязкой к персональному идентификатору СМНП (см. этап 1.2). ЭПИ дополняется полем «Результаты пробного прохода инструмент-деталь», включающим дату и время проведения пробного прохода; параметры прохода: f , V_c , a_p ; интерпретацию (статус): «Режим подтвержден», «Режим требует коррекции», «Режим неприемлем»; рекомендованные режимы после корректировки (V_{c_corr} , f_{corr} , a_{p_corr}); индикатор пригодности инструмента для данной детали (Да / Нет). Пример блока данных технологической истории работы СМП в привязке к ЭПИ представлен в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Пример блока данных технологической истории работы СМП в привязке к ЭПИ

Параметр	Значение
Персональный код (идентификатор) СМП	Пластина XYZ123
Обрабатываемая заготовка/материал	
Параметры прохода: V_c , a_p , f_n	
Величина сигнала термо-ЭДС пробного прохода	
Статус	Режим подтвержден/Режим требует коррекции/Режим неприемлем
Дата пробного прохода	
Назначенная (оптимальная) V_c (м/мин)	
Назначенная (оптимальная) f (мм/об)	
Назначенная (оптимальная) a_p (мм)	
Прогнозный ресурс СМНП	

Пробный проход проводится при установке новой СМП в режиме запуска подпрограммы, встраиваемой в текст управляющей программы. Результаты пробного прохода автоматически записываются в дополнительное поле ЭПИ (см. выше) и доступны САМ / MES системе. При последующих обработках данной детали система учитывает результаты пробного прохода для автоматической корректировки управляющей программы. Информация о стабильности поведения инструмента по данной паре инструмент-деталь накапливается и используется для обучения моделей прогноза ресурса.

Результатом выполнения этапа 2.1 является высокая персонализация режимов резания под фактическое поведение конкретной пары инструмент-деталь, снижение вероятности преждевременного износа инструмента, повышение стабильности качества обработки, постоянное обогащение ЭПИ актуальными данными.

Этап 2.2. Оценка контактных взаимодействий по силам резания и управляемости процессом резания с интеграцией в ЭПИ.

Диагностика режущей способности СМНП по термо-ЭДС позволяет учитывать состояние инструмента, интенсивность тепловых процессов и получать прогнозные оценки стойкости, но имеет ряд ограничений и не даёт полной картины о процессах, происходящих в зоне резания. Поэтому повышение надежности прогнозных оценок и эффективности управления процессом вызывает необходимость применения дополнительных каналов отслеживания динамики процесса резания. Одним из наиболее информативных каналов мониторинга являются динамометрические измерения составляющих силы резания, которые позволяют получить информацию о процессах, происходящих при обработке материалов и оптимизировать технологические операции. Преимущества данного метода связаны с возможностью анализа отдельных составляющих силы резания, которые зависят от геометрических параметров инструмента и динамически изменяющихся условий резания. Кроме того, в отличие от метода измерения термо-ЭДС, данный метод позволяет осуществлять диагностику процесса резания в режиме реального времени, в том числе и в условиях применения СОТС.

Целью этапа является обеспечение стабильности и управляемости процесса резания путем мониторинга составляющих силы резания (P_x , P_y , P_z), анализа их динамики и взаимосвязей, а также интеграции полученной информации в ЭПИ для последующего интеллектуального управления режимами резания.

Силы резания являются важнейшим диагностическим индикатором состояния инструмент-деталь и динамики процесса резания: абсолютные уровни сил (P_x , P_y , P_z) зависят от условий обработки, состояния инструмента, материала заготовки; динамика сил (флуктуации, изменение тренда) отражает переходные

процессы: рост износа, появление вибраций, нестабильность; соотношение между компонентами сил позволяет оценить характер взаимодействия и правильность настройки режима.

Основными критериями оценки силы резания являются:

- Уровень каждой компоненты сил резания: P_z - основная составляющая должна быть доминирующей; P_y при чистовом точении должна стремиться к нулю; P_x при оптимальных условиях меньше P_z (рост P_x сигнализирует о появлении нароста или нестабильности).
- Соотношение компонент сил: при низких режимах (слишком малая скорость / подача) часто наблюдается нарост $\rightarrow$ тогда $P_x \approx P_z$ – нежелательный режим. При оптимальных режимах: $P_z > P_x > P_y$ (и P_y минимальна).
- Колебания сил (по спектру или стандартному отклонению): высокие колебания свидетельствуют о динамической нестабильности и сигнализируют о необходимости корректировки режима.

Таким образом в процессе обработки детали в реальном времени (или с заданной периодичностью) фиксируются уровень составляющих сил резания (усреднённые значения) P_x , P_y , P_z ; спектр колебаний каждой компоненты (дисперсия, стандартное отклонение); коэффициенты отношений (P_x/P_z , P_y/P_z); динамика изменения (тренд) составляющих P_x , P_y , P_z . При последующей обработке эти параметры отслеживаются. Система фиксирует отклонения от «эталонного» профиля, записанного в ЭПИ. ЭПИ дополняется полем «Профиль контактных взаимодействий по силам резания». Допустимые диапазоны отклонений: ΔP_x , ΔP_y , $\Delta P_z \rightarrow$ допустимые изменения (например, $\pm 10\%$).

Эталонный профиль сил:

- P_{x_ref} , P_{y_ref} , P_{z_ref} (усредненные значения);
- Коэффициенты отношений: P_x/P_{z_ref} , P_y/P_{z_ref} .

История измерений по конкретной паре инструмент-деталь: последние зафиксированные значения сил и их динамика.

В случае зафиксированных отклонений производится необходимая корректировка режимов обработки ($V_c/f_n/a_p$) в соответствии с математической моделью. Пример блока в ЭПИ представлен в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Пример блока данных оценки контактных взаимодействий по силам резания в привязке к ЭПИ

Параметр	Значение
Пара инструмент-деталь	XYZ123 - Сталь 45
Подача f_n	0.045 мм/об
Скорость резания V_c	220 м/мин
Глубина резания a_p	1.0 мм
P_x ref	150 Н
P_y ref	30 Н
P_z ref	250 Н
P_x/P_z ref	0.6
P_y/P_z ref	0.12
ΔP_x допуск	$\pm 15\%$
ΔP_y допуск	$\pm 10\%$
ΔP_z допуск	$\pm 10\%$
Последние измерения $P_x/P_y/P_z$	155 Н / 28 Н / 245 Н
Статус	В пределах нормы (режим подтвержден)

Принцип функционирования в условиях цифрового производства, следующий: CAM/MES система при планировании режимов учитывает профиль сил из ЭПИ и подбирает режимы, соответствующие устойчивому профилю. В процессе обработки осуществляется мониторинг сил резания и при отклонениях система подает сигнал либо о необходимости корректировки режимов, либо о необходимости смены инструмента. Новые стабильные профили обновляются в ЭПИ для последующего использования.

Результатом выполнения этапа 2.2 является 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.

Этап 2.3. Оценка вибраций как индикатора износа и остаточного ресурса инструмента с интеграцией в ЭПИ.

Закономерности процесса резания определяются большим количеством влияющих факторов, сложностью контактного взаимодействия и синергичностью явлений, что подтверждается наличием корреляционных зависимостей между отдельными оценочными характеристиками процесса резания, установленными в результате проведенных исследований. В этих условиях применение многоканальной диагностики повышает достоверность и точность полученных результатов.

Анализ вибрационного сигнала даёт информацию о состоянии режущего инструмента, режиме резания и других параметрах процесса. Кроме того, данный метод позволяет фиксировать изменение тренда и выявлять зарождающиеся дефекты заблаговременно до их критического развития, что дает возможность исключить брак, оперативно реагировать на аварийные ситуации и предотвращать серьезные дефекты.

Цель этапа: мониторинг состояния инструмента, оценка его остаточного ресурса и управляемости процесса резания. На данном этапе оценивается степень износа инструмента; прогнозируется остаточный ресурс; принимаются решения о коррекции режимов или замене инструмента; расширяется цифровой профиль инструмента в структуре ЭПИ.

В процессе резания инструмент генерирует вибрации, отражающие контактные процессы в зоне резания. С ростом износа изменяются как амплитуды, так и частотный состав колебаний. Одним из устойчивых интегральных признаков износа является рост площади под спектром вибрационного сигнала.

Алгоритм оценки осуществляется следующим образом. Сначала производится анализ и преобразование сигнала вибрации (FFT или wavelet) в частотный спектр. Затем производится расчет площади спектрограммы, как оценочной характеристики неустойчивости/нестабильности процесса резания (интеграл от амплитудного спектра). Далее идет сравнение оценочной характеристики с эталонным (математической моделью).

Критерии оценки:

< 10% прироста площади - состояние инструмента в норме.

10–25% прироста - начальная стадия износа.

25–40% прироста - предельный износ, рекомендуется замена.

> 40% прироста- критическое состояние.

В ЭПИ вносится блок «Вибродиагностика» с параметрами:

- эталонная площадь под спектром: S_{ref} ;
- последнее измеренное значение: $S_{current}$;
- прирост: $\Delta S = (S_{current} - S_{ref}) / S_{ref} \times 100\%$;
- класс состояния: Норма / Износ / Предельный износ / Критическое;
- прогноз ресурса: % или кол-во деталей;
- решение: Продолжить / Корректировать / Заменить.

Пример записи блока «Вибродиагностика» в ЭПИ приведен в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Пример записи блока «Вибродиагностика» в ЭПИ

Параметр	Значение
Персональный код (идентификатор) СМП	Пластина XYZ123
Дата измерения	16.06.2025
Эталонная площадь S_{ref}	1250
Текущее значение S	2210
Прирост ΔS	+30%
Состояние	Предельный износ
Прогноз ресурса	12 деталей
Рекомендация	Замена через 10 шт

Результатом выполнения этапа 2.3 является повышение достоверности оценки степени износа инструмента за счёт использования интегральных вибрационных признаков; возможность прогнозирования остаточного ресурса инструмента на основе трендового анализа; формирование обоснованных управляющих решений по коррекции режимов резания или замене инструмента; расширение функциональности ЭПИ за счёт включения структурированного блока «Вибродиагностика».

Этап 3. Оценка результатов и БД

Эффективное функционирование любой производственной системы требует наличия обратной связи для оценки результатов работы, контроля обеспечения установленных целей и необходимости коррекционных изменений, а также выявления проблем и резервов. Инертность и отсутствие реакций на изменение производственных условий с высокой вероятностью ведет к деградации системы и повышению издержек.

Одним из обязательных условий развития является наличие механизма самообучения, существование которого невозможно без ведения статистической базы данных, аккумулирующей накопленный производственный опыт и учитывающей как кратко- так и долгосрочные изменения. Кроме того, накопление информационной базы данных позволяет совершенствовать математические модели, заложенные в основу алгоритмов управления производственной системы.

Поэтому производственная методология оценки работоспособности и ресурса режущего инструмента должны охватывать этапы оценки результатов обработки и формирование базы для цифрового производства с интеграцией в ЭПИ, а также корректировку норм времени на основе оценки результатов обработки и базы данных ЭПИ с целью повышения эффективности производственного планирования.

Этап 3.1. Оценка результатов обработки и формирование базы для цифрового производства с интеграцией в ЭПИ.

Целью этапа является реализация системной оценки 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 достижения указанной цели необходима регистрация результатов 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

гране, выкрашивания и прочие дефекты), фактическая стойкость режущего инструмента (количество обработанных деталей), время цикла и стабильность процесса.

Кроме того, необходима фиксация не только диагностических критериев, но и коррекционных действий (таблица 4.12).

Таблица 4.12 – Пример фиксации диагностических критериев и коррекционных действий

Показатель	Диагностический вывод	Коррекция
Все параметры в допуске	Режим подтверждён	Сохранить в базе
Превышен Ra или износ	Режим допустим, но не оптимален	Оптимизация подачи / скорости
Выходжение за размеры / сбой	Режим аварийный	Запись как негативный пример

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 (Ra, точность, износ); заключение: стабильно / нестабильно / критично; рекомендации: продолжить / заменить / скорректировать; метка: включить в обучающую выборку для цифрового моделирования.

В таблице 4.13 представлен пример блока записи в ЭПИ.

Таблица 4.13 – Пример блока записи в ЭПИ

Параметр	Значение
Персональный код (идентификатор) СМП	Пластина XYZ123
Заготовка / материал	Сталь 40X
$V_c / f_n / a_p$	220 м/мин / 0.08 / 1.2
Ресурс стойкости/деталей	80 мин /120 деталей
Средний Ra	0.95 мкм
Геометрия	В допуске
Износ по задней грани h	0.28 мм
Вывод	Стабильный режим
Действие	Сохранить в базе

Посредством накопления результатов формируется централизованная (или распределённая) база данных, в которой создаётся база режимов для каждого типа инструмента и заготовки, формируется выборка для цифровых двойников и обучающих моделей, осуществляется интеллектуальный отбор оптимальных режимов (ML/AI).

Интеграция текущего этапа в единую систему технологической подготовки создает такие преимущества, как сокращение времени на настройку режимов, повышение точности и повторяемости, построение цифровой модели поведения инструмента, создание основ для предиктивного управления производством. Таким образом, этап оценки результатов обработки не только замыкает цикл управления качеством, но и создает основу формирования устойчивой цифровой среды для интеллектуальной адаптации производства.

Этап 3.2. Корректировка норм времени на основе оценки результатов обработки и базы данных ЭПИ.

Планирование является ключевым элементом эффективности производства, позволяя решить задачи оптимизации ресурсов, посредством минимизации потерь и издержек на 21-35%; управления рисками (прогноз развития ситуации, оценка потенциальных угроз и разработка превентивных мероприятий); координации работы отдельных подразделений и служб; расстановки приоритетности целей и задач.

Однако успешность планирования во многом определяется полноценностью, достоверностью и релевантностью информации о производственных процессах и имеющихся ресурсах. В отсутствии этих данных затруднительно произвести расчет потребности в ресурсах, определить оптимальную загрузку оборудования и персонала и сформировать производственный график. Таким образом, достоверность норм времени технологических операций определяет обоснованность управленческих решений, а также эффективность управления производством.

Поэтому целью данного раздела является формализация подхода к корректировке норм времени обработки деталей на основе фактически

достигнутых параметров производительности, качества и износа инструмента. Использование базы данных, а также ЭПИ позволяет не только повысить точность нормирования, но и адаптировать нормативы под реальные условия производства и поведения конкретного инструмента в типовых операциях.

Основными задачи текущего этапа являются:

- учёт индивидуальной стойкости инструмента в различных кластерах;
- фиксация фактической производительности при заданном качестве;
- статистическая обработка серийных и массовых данных по партиям;
- автоматическая генерация корректирующих коэффициентов к нормам времени.

Методика расчёта

Нормативное время обработки t_n рассчитывается по исходным паспортным данным (в том числе данным производителя инструмента), исходя из стандартных условий. Однако фактическое время обработки t_f может отличаться как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения за счёт индивидуальных характеристик инструмента, качества заготовки и стабильности процесса.

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.

Исходя из описанной логики корректирующие коэффициенты необходимо учитывать в базе норм времени для САМ/ERP систем; техпроцессах и маршрутных картах; системе планирования сменных заданий.

Для реализации подхода из ЭПИ целесообразно извлекать следующие поля/информацию: режимы резания (V_c , f_n , a_p); фактическое время цикла; фактическая стойкость СМНП/количество деталей до износа; шероховатость и геометрическая точность; группа стойкости (А/В/С); заключение по качеству.

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

$$t_{\text{кор}} = t_{\text{н}} \times K_{\text{врем.средн}}$$

Алгоритм практической реализации этапа сводится к следующей последовательности действий:

1. После завершения обработки партии заполняется ЭПИ с фактическими параметрами.
2. Система автоматически рассчитывает отклонение $t_{\text{ф}}$ от $t_{\text{н}}$.
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.

Далее рассмотрим пример расчета.

Пусть исходная норма времени: 2,80 мин/деталь.

По данным ЭПИ:

- Среднее фактическое время: 2,53 мин.
- Средняя шероховатость: 0,98 мкм.
- Износ VB: 0,25 мм.
- Количество годных деталей: 98 шт.

Тогда $K_{\text{врем}} = 2,53 / 2,80 = 0,9036$

Вывод: норма времени может быть скорректирована до 2,53 мин/деталь при сохранении качества.

Результатом выполнения этапа является формирование методологической основы для интеграции данных мониторинга состояния инструмента и технологической системы в процессы нормирования и планирования, что обеспечивает: адаптацию нормативов времени выполнения операций с учётом фактической производительности и текущего состояния оборудования; повышение точности расчёта загрузки оборудования и оперативного планирования в производственной среде; создание предпосылок для внедрения механизма

динамического нормирования в рамках MES/ERP-систем; комплексный учёт влияния износа инструмента, стойкости и качества продукции при формировании нормативно-плановых показателей; реализацию принципов непрерывного улучшения технологических процессов на основе накопленных диагностических и производственных данных.

4.3 Выводы

Таким образом, на основе анализа физических принципов контактного взаимодействия инструмента с заготовкой, механизмов изнашивания режущего клина и системы взаимосвязей условий осуществления обработки с параметрами микропрофиля обработанной поверхности предложена методология перманентного мониторинга состояния технологической системы на основе многоканальной диагностики (вибрации, силы резания, термо-ЭДС), включая алгоритмы спектрального анализа и пороговую классификацию состояний.

Разработан прототип информационной структуры «Электронного паспорта инструмента» (ЭПИ) как сквозного цифрового объекта, включающая идентификаторы, группу стойкости, рекомендованные и уточнённые режимы, историю использования, результаты диагностики и прогноз остаточного ресурса.

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).

Предложена концепция адаптивной корректировки режимов резания, интеграции ЭПИ с CAM/MES/ERP в целях повышения эффективности технологической подготовки и управления производственным процессом.

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 на основе реальных цифровых следов эксплуатации инструмента.

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.

Глава 5. Математическое и информационное обеспечение интеллектуальной технологической системы

Эффективное управление технологической операцией, как и любым процессом требует разработки надежных алгоритмов управления, которые не могут быть построены без математических моделей, имеющих требуемый уровень достоверности. Количественное описание действующих закономерностей необходимо для анализа динамики, прогнозирования результатов и оптимизации режимов обработки. Одним из наиболее точных и подробных инструментов математического моделирования применимых для решения указанных задач является регрессионный анализ. Преимущество данного метода перед аналитическим и имитационным моделированием заключается не только в возможности исследовать характеристики процесса функционирования системы, подверженной случайным воздействиям, но и в инструментарии структурирования процесса и управлении неопределенностью. Регрессионный анализ позволяет прогнозировать значение целевой функции, оценивать степень влияния каждого фактора, задавать требуемый уровень достоверности и минимизировать ошибки результата, что обосновывает выбор метода разработки математических моделей взаимосвязи параметров процесса резания.

Построение и оценка достоверности регрессионных моделей проведены в соответствии с описанной в главе 2 методикой. Количество повторений опытов в каждом эксперименте определено с доверительной вероятности не менее 95 %. В столбцах таблиц «Исходные данные», соответствующих функции отклика, приведены средние значения, рассчитанные на основе не менее трех опытов.

5.1 Информативность теплофизического канала диагностики процесса резания

Неоднородность физико-механических, в том числе теплофизических, свойств материалов, формирующих контактную пару «инструмент–заготовка»,

оказывает существенное влияние на механизмы и интенсивность износа режущего инструмента. В процессе резания установлено, что сигнал термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС), формируемый естественной термопарой, горячий спай которой образуется непосредственно в зоне контакта рабочих поверхностей инструмента и обрабатываемой заготовки, может служить информативным диагностическим признаком. Он позволяет оперативно оценивать теплофизические свойства контактируемых материалов и, как следствие, осуществлять прогноз состояния режущей кромки инструмента (см. главу 3).

Глубина резания и геометрические параметры режущего клина в рамках настоящего исследования являются параметрами постоянными, т. е., контролируемыми и, следовательно, не могут быть отнесены к множеству независимых переменных при построении математических моделей.

К числу определяющих технологических факторов, влияющих на интенсивность и характер изнашивания, относятся, прежде всего, скорость резания V (V_c) и подача S (f_n), поскольку они формируют как тепловую, так и механическую нагрузку на инструмент в зоне резания.

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

- 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 основного диагностического критерия работоспособного состояния режущего инструмента в настоящем исследовании принята величина износа по задней поверхности (высота фаски износа). В соответствии с практическими рекомендациями, предельно допустимое значение высоты фаски

износа принято равным $h_z = 0,3$ мм. Контроль работоспособности инструмента осуществляется путём регистрации длительности процесса резания до момента достижения указанного порогового значения.

В качестве анализируемых функций отклика в настоящем исследовании рассматриваются следующие показатели:

– период стойкости (T , мин), характеризующий долговечность режущего инструмента до достижения предельно допустимого уровня износа по задней поверхности;

– среднее арифметическое отклонение профиля поверхности (R_a , мкм), измеренное на установленной базовой длине, являющееся количественной характеристикой качества обработанной поверхности по параметрам микрогеометрии.

Предварительная оценка корреляционной связи управляемых технологических факторов с функциями отклика

В таблице 5.1 представлены результаты определения коэффициентов парной корреляции «технологический фактор – функция отклика» для рассматриваемых условий обработки.

Таблица 5.1 – Корреляционная связь технологических факторов с функциями отклика

Обрабатываемый материал	Наноструктурированная поверхность инструмента	Технологический фактор	Функция отклика	
			R_a	T
12X13	да	E	0,2923	-0,3523
		S	0,5062	-0,3928
		V	-0,6265	-0,8094
12X13	нет	E		-0,3718
		S		-0,3888
		V		-0,7990
40X	да	E	-0,0102	-0,0059
		S	0,0040	-0,2992
		V	-0,7341	-0,8956
40X	нет	E		-0,0688
		S		-0,2596
		V		-0,8897

Наиболее «мощным» по отношению к долговечности инструмента и качеству обработанной поверхности, с точки зрения существования линейной зависимости, следует считать технологический фактор «Скорость резания». Наноструктурирование рабочих поверхностей режущего инструмента приводит к незначительному увеличению степени проявления линейной зависимости между варьируемыми технологическими параметрами и функцией отклика по сравнению с инструментом, не подвергшимся модификации. Однако полученные значения коэффициента парной корреляции остаются низкими, что не позволяет с достаточной статистической достоверностью отвергнуть нулевую гипотезу об отсутствии влияния соответствующего технологического фактора на анализируемую функцию отклика. Таким образом, в данном случае можно говорить лишь о наличии слабой линейной зависимости между параметрами.

Оценка взаимной независимости технологических факторов, рассматриваемых при статистическом моделировании

Корректная реализация регрессионного анализа и построение адекватных многофакторных математических моделей возможны лишь при выполнении условия попарной независимости варьируемых технологических факторов. Данное условие является необходимым для обеспечения статистической устойчивости оценок коэффициентов регрессии и достоверности интерпретации результатов. Формальная проверка взаимной независимости факторов осуществляется посредством анализа коэффициентов парной корреляции между соответствующими случайными величинами. При этом величины коэффициентов не должны превышать допустимого уровня, указывающего на отсутствие существенной взаимосвязи между рассматриваемыми параметрами.

В таблицах 5.2 ... 5.7 представлены количественные оценки взаимной независимости технологических факторов. Поскольку рассчитанные коэффициенты парной корреляции (таблицы 5.2–5.7) принимают значения, близкие к нулю, можно сделать обоснованный вывод о наличии статистической независимости между рассматриваемыми технологическими факторами, что в свою очередь подтверждает допустимость включения указанных факторов в состав

переменных при построении многофакторных регрессионных моделей и обеспечивает корректность математического описания исследуемых процессов.

Таблица 5.2 – Оценка взаимной независимости технологических факторов (функция отклика Ra, сталь 12X13, наноструктурированный инструмент)

Коэффициент корреляции		Технологические факторы
Подача (S)	Скорость резания (V)	
0,0000	0,0000	термоЭДС (E)
	0,0000	Подача (S)

Таблица 5.3 – Оценка взаимной независимости технологических факторов (функция отклика T, сталь 12X13, наноструктурированный инструмент)

Коэффициент корреляции		Технологические факторы
Подача (S)	Скорость резания (V)	
0,0000	0,0000	термоЭДС (E)
	0,0000	Подача (S)

Таблица 5.4 – Оценка взаимной независимости технологических факторов (функция отклика T, сталь 12X13, традиционный инструмент)

Коэффициент корреляции		Технологические факторы
Подача (S)	Скорость резания (V)	
0,0000	0,0000	термоЭДС (E)
	0,0000	Подача (S)

Таблица 5.5 – Оценка взаимной независимости технологических факторов (функция отклика Ra, сталь 40X, наноструктурированный инструмент)

Коэффициент корреляции		Технологические факторы
Подача (S)	Скорость резания (V)	
0,0000	0,0000	термоЭДС (E)
	0,0000	Подача (S)

Таблица 5.6 – Оценка взаимной независимости технологических факторов (функция отклика T, сталь 40X, наноструктурированный инструмент)

Коэффициент корреляции		Технологические факторы
Подача (S)	Скорость резания (V)	
0,0000	0,0000	термоЭДС (E)
	0,0000	Подача (S)

Таблица 5.7 – Оценка взаимной независимости технологических факторов (функция отклика Т, сталь 40Х, традиционный инструмент)

Коэффициент корреляции		Технологические факторы
Подача (S)	Скорость резания (V)	
0,0000	0,0000	термоЭДС (Е)
	0,0000	Подача (S)

В результате предварительного статистического анализа установлено, что для всех исследуемых в настоящем разделе технологических случаев, охватывающих различные сочетания обрабатываемых материалов, состояния режущего инструмента и функций отклика, наилучшие результаты аппроксимации экспериментальных данных, как с точки зрения статистической достоверности (значения коэффициента детерминации), так и по показателям относительной погрешности аппроксимации, продемонстрировали мультипликативные степенные модели вида.

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 конструкционной стали 40Х инструментом WNMG 08 04 08-PM 4225 с наноструктурированным поверхностным слоем; функция отклика – качество поверхности, оцениваемое по параметру шероховатости Ra;
- обработка коррозионностойкой стали 12Х13 инструментом WNMG 08 04 08-MM 2220 без модификации рабочей поверхности; функция отклика – долговечность (период стойкости);
- обработка стали 12Х13 инструмент WNMG 08 04 08-MM 2220 с наномодифицированным поверхностным слоем рабочей части; функция отклика – долговечность (период стойкости);

– обработка стали 12X13 инструмент WNMG 08 04 08-ММ 2220 с наномодифицированным поверхностным слоем рабочей части; функция отклика – параметр шероховатости Ra.

В таблице 5.8 представлены исходные данные для модели стойкости инструмента при обработке конструкционной стали 40Х серийно выпускаемым инструментом в соответствии с планом эксперимента 3³.

Таблица 5.8 – Исходные данные в соответствии с планом эксперимента 3³

№	Термо ЭДС E, мВ	Подача на оборот S, мм/об	Скорость резания V, м/мин	Стойкость T, мин
1	4,90	0,10	120,00	213,00
2	4,90	0,10	200,00	166,00
3	4,90	0,10	280,00	138,00
4	4,90	0,20	120,00	204,00
5	4,90	0,20	200,00	155,00
6	4,90	0,20	280,00	145,00
7	4,90	0,30	120,00	184,00
8	4,90	0,30	200,00	147,00
9	4,90	0,30	280,00	118,00
10	5,30	0,10	120,00	184,00
11	5,30	0,10	200,00	148,00
12	5,30	0,10	280,00	136,00
13	5,30	0,20	120,00	183,00
14	5,30	0,20	200,00	155,00
15	5,30	0,20	280,00	144,00
16	5,30	0,30	120,00	184,00
17	5,30	0,30	200,00	139,00
18	5,30	0,30	280,00	126,00
19	5,60	0,10	120,00	213,00
20	5,60	0,10	200,00	166,00
21	5,60	0,10	280,00	118,00
22	5,60	0,20	120,00	204,00
23	5,60	0,20	200,00	171,00
24	5,60	0,20	280,00	137,00
25	5,60	0,30	120,00	175,00
26	5,60	0,30	200,00	131,00
27	5,60	0,30	280,00	116,00

Таблица 5.9 – Правила нормирования переменных модели

параметр	Факторы нормированные			Функция отклика Y	Факторы реальные (19)			T, мин
	X1	X2	X3		E, мВ	S, мм/об	V, м/мин	
миним	-1	-1	-1	-1	4,41	0,09	108,00	104,40
максим	1	1	1	1	6,16	0,33	308,00	234,30
средн	0,08	0,30	0,25	0,20	5,29	0,21	208,00	169,35

Таблица 5.10 – План эксперимента 3³

№	X0	X1	X2	X3	Y	E, мВ	S, мм/об	V, м/мин	T, мин
1	1	-0,3695	-0,8378	-0,7989	0,7642	4,90	0,10	120,00	213,00
2	1	-0,3695	-0,8378	0,1760	0,1474	4,90	0,10	200,00	166,00
3	1	-0,3695	-0,8378	0,8181	-0,3097	4,90	0,10	280,00	138,00
4	1	-0,3695	0,1902	-0,7989	0,6574	4,90	0,20	120,00	204,00
5	1	-0,3695	0,1902	0,1760	-0,0222	4,90	0,20	200,00	155,00
6	1	-0,3695	0,1902	0,8181	-0,1872	4,90	0,20	280,00	145,00
7	1	-0,3695	0,8533	-0,7989	0,4021	4,90	0,30	120,00	184,00
8	1	-0,3695	0,8533	0,1760	-0,1534	4,90	0,30	200,00	147,00
9	1	-0,3695	0,8533	0,8181	-0,6970	4,90	0,30	280,00	118,00
10	1	0,1001	-0,8378	-0,7989	0,4021	5,30	0,10	120,00	184,00
11	1	0,1001	-0,8378	0,1760	-0,1366	5,30	0,10	200,00	148,00
12	1	0,1001	-0,8378	0,8181	-0,3458	5,30	0,10	280,00	136,00
13	1	0,1001	0,1902	-0,7989	0,3886	5,30	0,20	120,00	183,00
14	1	0,1001	0,1902	0,1760	-0,0222	5,30	0,20	200,00	155,00
15	1	0,1001	0,1902	0,8181	-0,2044	5,30	0,20	280,00	144,00
16	1	0,1001	0,8533	-0,7989	0,4021	5,30	0,30	120,00	184,00
17	1	0,1001	0,8533	0,1760	-0,2918	5,30	0,30	200,00	139,00
18	1	0,1001	0,8533	0,8181	-0,5347	5,30	0,30	280,00	126,00
19	1	0,4296	-0,8378	-0,7989	0,7642	5,60	0,10	120,00	213,00
20	1	0,4296	-0,8378	0,1760	0,1474	5,60	0,10	200,00	166,00
21	1	0,4296	-0,8378	0,8181	-0,6970	5,60	0,10	280,00	118,00
22	1	0,4296	0,1902	-0,7989	0,6574	5,60	0,20	120,00	204,00
23	1	0,4296	0,1902	0,1760	0,2208	5,60	0,20	200,00	171,00
24	1	0,4296	0,1902	0,8181	-0,3277	5,60	0,20	280,00	137,00
25	1	0,4296	0,8533	-0,7989	0,2780	5,60	0,30	120,00	175,00
26	1	0,4296	0,8533	0,1760	-0,4385	5,60	0,30	200,00	131,00
27	1	0,4296	0,8533	0,8181	-0,7393	5,60	0,30	280,00	116,00

Таблица 5.11 – Расчет коэффициентов регрессии и проверка значимости

	$a_0 (A_0)$	$a_1 (A_1), E$	$a_2 (A_2), S$	$a_3 (A_3), V$
Коэффициенты регрессии без проверки значимости	0,0046	-0,11	-0,14	-0,60
Стандартное значение критерия Стьюдента для доверительной вероятности 99,1 %	0,011			
критерий Стьюдента для оценки значимости коэффициента регрессии	0,01	0,24	0,32	1,34
Значимые коэффициенты регрессии	(0)	(-0,11)	(-0,14)	(-0,60)

В результате проведенного анализа можно утверждать, что все рассматриваемые технологические факторы (таблицы 5.8-5.11) статистически значимы (рисунок 5.1) при доверительной вероятности не менее 99 %. Влиянием случайных погрешностей и неучтенных факторов можно пренебречь.

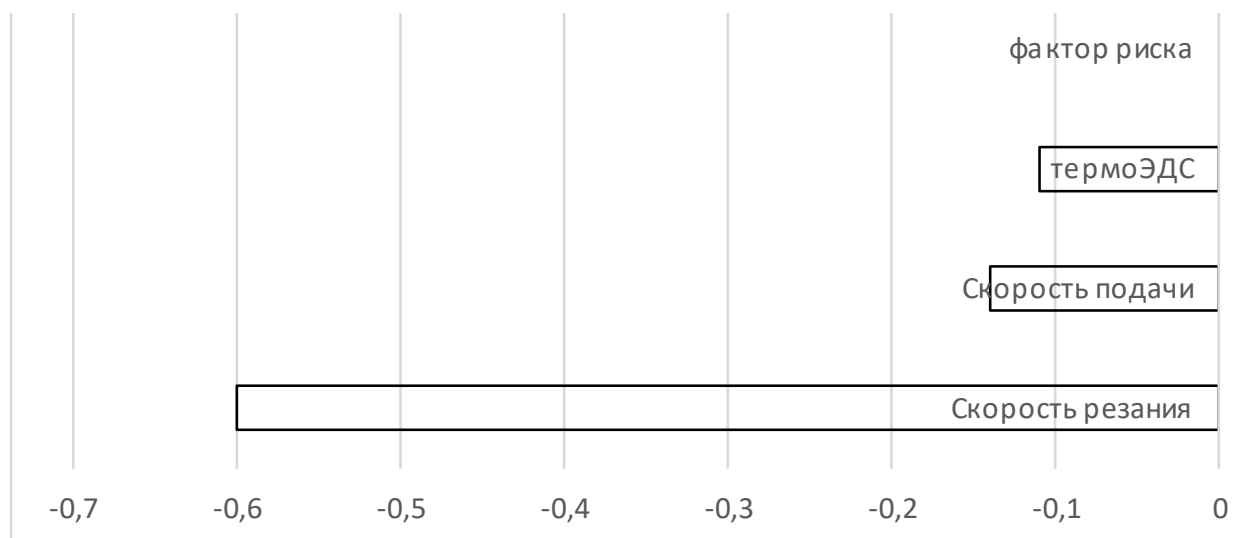


Рисунок 5.1 – Оценка значимости технологических факторов

Установлено, что наиболее «мощным» технологическим фактором является скорость резания. Влияние подачи и термо-ЭДС «слабее». Поскольку коэффициент регрессии «фактора риска» $A_0 = 0$, можно сделать заключение о высокой стабильности процесса.

Нормированная модель имеет вид (5.1).

$$y = -0,11x_1 - 0,14x_2 - 0,6x_3. \quad (5.1)$$

Оценка относительной погрешности, стандартной ошибки и достоверности модели представлена в таблице 5.12.

Таблица 5.12 – Параметры регрессионной модели

Параметр модели	Количественная оценка
Относительная погрешность модели.	средняя 2,6 %
	наибольшая 15 %
	наименьшая 0,2 %
Стандартная ошибка модели	11,01
Критерий Фишера	2,635
Оценка достоверности / стабильности	99,1 %

В таблице 5.13 представлены исходные данные для модели стойкости инструмента с наноструктурированной рабочей поверхностью при обработке конструкционной стали 40X серийно выпускаемым инструментом в соответствии с планом эксперимента 33.

Таблица 5.13 – Исходные данные в соответствии с планом эксперимента 3³

№	Термо ЭДС E, мВ	Подача на оборот S, мм/об	Скорость резания V, м/мин	Стойкость T, мин
1	4,90	0,10	120,00	220,00
2	4,90	0,10	200,00	180,00
3	4,90	0,10	280,00	150,00
4	4,90	0,20	120,00	220,00
5	4,90	0,20	200,00	200,00
6	4,90	0,20	280,00	150,00
7	4,90	0,30	120,00	200,00
8	4,90	0,30	200,00	160,00
9	4,90	0,30	280,00	120,00
10	5,00	0,10	120,00	208,00
11	5,10	0,10	200,00	180,00
12	5,40	0,10	280,00	140,00
13	5,20	0,20	120,00	210,00
14	5,10	0,20	200,00	178,00
15	5,00	0,20	280,00	153,00
16	5,10	0,30	120,00	190,00
17	5,20	0,30	200,00	160,00
18	5,00	0,30	280,00	130,00
19	5,60	0,10	120,00	220,00
20	5,30	0,10	200,00	180,00
21	5,20	0,10	280,00	130,00
22	5,20	0,20	120,00	210,00
23	5,60	0,20	200,00	175,00
24	5,20	0,20	280,00	158,00
25	5,30	0,30	120,00	180,00
26	5,20	0,30	200,00	150,00
27	5,30	0,30	280,00	120,00

Таблица 5.14 – Правила нормирования переменных модели

параметр	Факторы нормированные			Функция отклика Y	Факторы реальные (19)			T, мин
	X1	X2	X3		E, мВ	S, мм/об	V, м/мин	
миним	-1	-1	-1	-1	4,41	0,09	108,00	108,00
максим	1	1	1	1	6,16	0,33	308,00	242,00
средн	0,08	0,30	0,25	0,20	5,29	0,21	208,00	175,00

Таблица 5.15 – План эксперимента 3³

№	X0	X1	X2	X3	Y	E, мВ	S, мм/об	V, м/мин	T, мин
1	1	-0,3695	-0,8378	-0,7989	0,7642	4,90	0,10	120,00	213,00
2	1	-0,3695	-0,8378	0,1760	0,1474	4,90	0,10	200,00	166,00
3	1	-0,3695	-0,8378	0,8181	-0,3097	4,90	0,10	280,00	138,00
4	1	-0,3695	0,1902	-0,7989	0,6574	4,90	0,20	120,00	204,00
5	1	-0,3695	0,1902	0,1760	-0,0222	4,90	0,20	200,00	155,00
6	1	-0,3695	0,1902	0,8181	-0,1872	4,90	0,20	280,00	145,00
7	1	-0,3695	0,8533	-0,7989	0,4021	4,90	0,30	120,00	184,00

Продолжение таблицы 5.15

8	1	-0,3695	0,8533	0,1760	-0,1534	4,90	0,30	200,00	147,00
9	1	-0,3695	0,8533	0,8181	-0,6970	4,90	0,30	280,00	118,00
10	1	0,1001	-0,8378	-0,7989	0,4021	5,30	0,10	120,00	184,00
11	1	0,1001	-0,8378	0,1760	-0,1366	5,30	0,10	200,00	148,00
12	1	0,1001	-0,8378	0,8181	-0,3458	5,30	0,10	280,00	136,00
13	1	0,1001	0,1902	-0,7989	0,3886	5,30	0,20	120,00	183,00
14	1	0,1001	0,1902	0,1760	-0,0222	5,30	0,20	200,00	155,00
15	1	0,1001	0,1902	0,8181	-0,2044	5,30	0,20	280,00	144,00
16	1	0,1001	0,8533	-0,7989	0,4021	5,30	0,30	120,00	184,00
17	1	0,1001	0,8533	0,1760	-0,2918	5,30	0,30	200,00	139,00
18	1	0,1001	0,8533	0,8181	-0,5347	5,30	0,30	280,00	126,00
19	1	0,4296	-0,8378	-0,7989	0,7642	5,60	0,10	120,00	213,00
20	1	0,4296	-0,8378	0,1760	0,1474	5,60	0,10	200,00	166,00
21	1	0,4296	-0,8378	0,8181	-0,6970	5,60	0,10	280,00	118,00
22	1	0,4296	0,1902	-0,7989	0,6574	5,60	0,20	120,00	204,00
23	1	0,4296	0,1902	0,1760	0,2208	5,60	0,20	200,00	171,00
24	1	0,4296	0,1902	0,8181	-0,3277	5,60	0,20	280,00	137,00
25	1	0,4296	0,8533	-0,7989	0,2780	5,60	0,30	120,00	175,00
26	1	0,4296	0,8533	0,1760	-0,4385	5,60	0,30	200,00	131,00
27	1	0,4296	0,8533	0,8181	-0,7393	5,60	0,30	280,00	116,00

Таблица 5.16 – Расчет коэффициентов регрессии и проверка значимости

	$a_0 (A_0)$	$a_1 (A_1), E$	$a_2 (A_2), S$	$a_3 (A_3), V$
Коэффициенты регрессии без проверки значимости	0,13	-0,22	-0,15	-0,57
Стандартное значение критерия Стьюдента для доверительной вероятности 99,1 %	0,014			
критерий Стьюдента для оценки значимости коэффициента регрессии	0,28	0,49	0,33	1,26
Значимые коэффициенты регрессии	(0,13)	(-0,22)	(-0,15)	(-0,57)

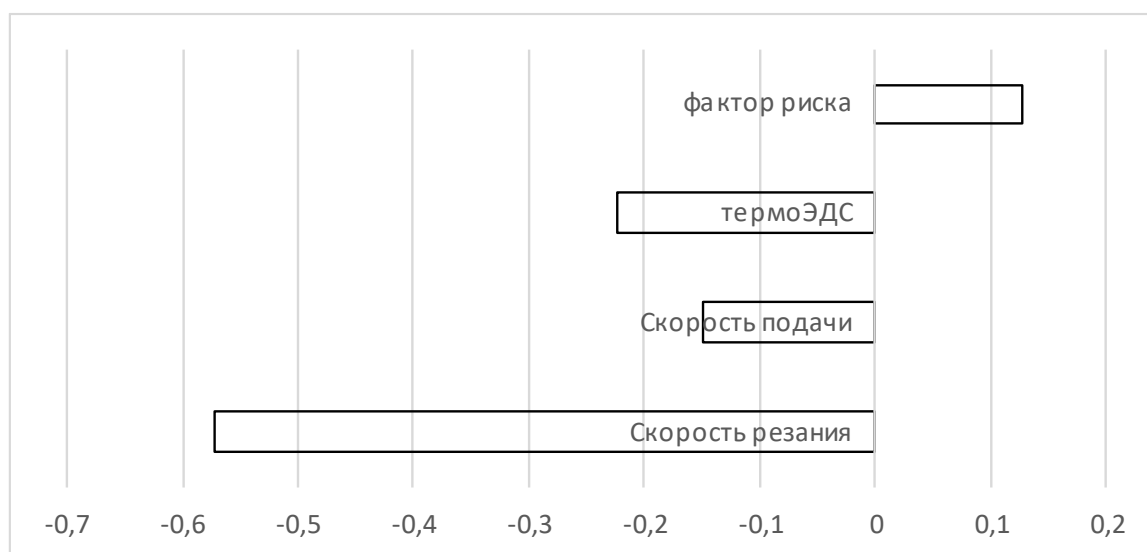


Рисунок 5.2 – Оценка значимости технологических факторов

Таким образом, все рассматриваемые технологические факторы статистически значимы (рисунок 5.2) при доверительной вероятности не менее 98,9 %. Влиянием случайных погрешностей и неучтенных факторов можно пренебречь.

Наиболее «мощный» технологический фактор – скорость резания. Второй по значимости технологический фактор – термо-ЭДС. Влияние скорости продольной подачи сравнимо со случайными воздействиями на результат процесса.

Поскольку коэффициент регрессии «фактора риска» A_0 в 1,5...5 раз меньше коэффициентов регрессии технологических факторов, можно сделать заключение о стабильности процесса.

Нормированная модель имеет вид (5.2)

$$y = 0.13 - 0.22x_1 - 0.15x_2 - 0.57x_3. \quad (5.2)$$

Оценка относительной погрешности, стандартной ошибки и достоверности модели представлена в таблице 5.17.

Таблица 5.17 – Параметры регрессионной модели

Параметр модели	Количественная оценка
Относительная погрешность модели.	средняя 6,0 %
	наибольшая 24,1 %
	наименьшая 0,34 %
Стандартная ошибка модели	12,22
Критерий Фишера	2,516
Оценка достоверности / стабильности	98,9 %

В таблице 5.18 представлены исходные данные для шероховатости поверхности при обработке конструкционной стали 40Х инструментом с наноструктурированной рабочей поверхностью.

Таблица 5.18 – Исходные данные в соответствии с планом эксперимента 3³

№	Термо ЭДС E, мВ	Подача на оборот S, мм/об	Скорость резания V, м/мин	Шероховатость Ra, мкм
1	4,9	0,10	120	2,11
2	4,9	0,10	200	1,08
3	4,9	0,10	280	1,03
4	4,9	0,20	120	2,61

Продолжение таблицы 5.18

5	4,9	0,20	200	1,23
6	4,9	0,20	280	1,13
7	4,9	0,30	120	1,53
8	4,9	0,30	200	1,10
9	4,9	0,30	280	0,93
10	5,0	0,10	120	2,55
11	5,1	0,10	200	1,40
12	5,4	0,10	280	0,67
13	5,2	0,20	120	1,42
14	5,1	0,20	200	1,37
15	5,0	0,20	280	1,28
16	5,1	0,30	120	2,12
17	5,2	0,30	200	1,77
18	5,0	0,30	280	1,94
19	5,6	0,10	120	2,31
20	5,3	0,10	200	1,18
21	5,2	0,10	280	1,03
22	5,2	0,20	120	2,04
23	5,6	0,20	200	1,32
24	5,2	0,20	280	1,27
25	5,3	0,30	120	1,90
26	5,2	0,30	200	1,14
27	5,3	0,30	280	1,00

Таблица 5.89 – Правила нормирования переменных модели

параметр	Факторы нормированные			Функция отклика Y	Факторы реальные			Ra, мкм
	X1	X2	X3		E, мВ	S, мм/об	V, м/мин	
миним	-1	-1	-1	-1	4,41	0,09	108,00	0,61
максим	1	1	1	1	6,16	0,33	308,00	2,87
средн	0,08	0,30	0,25	0,36	5,29	0,21	208,00	1,74

Таблица 5.20 – План эксперимента 3³

№	X0	X1	X2	X3	Y	E, мВ	S, мм/об	V, м/мин	T, мин
1	1	-0,3695	-0,8378	-0,7989	0,6034	4,90	0,10	120,00	2,11
2	1	-0,3695	-0,8378	0,1760	-0,2561	4,90	0,10	200,00	1,08
3	1	-0,3695	-0,8378	0,8181	-0,3186	4,90	0,10	280,00	1,03
4	1	-0,3695	0,1902	-0,7989	0,8775	4,90	0,20	120,00	2,61
5	1	-0,3695	0,1902	0,1760	-0,0905	4,90	0,20	200,00	1,23
6	1	-0,3695	0,1902	0,8181	-0,1976	4,90	0,20	280,00	1,13
7	1	-0,3695	0,8533	-0,7989	0,1882	4,90	0,30	120,00	1,53
8	1	-0,3695	0,8533	0,1760	-0,2322	4,90	0,30	200,00	1,10
9	1	-0,3695	0,8533	0,8181	-0,4546	4,90	0,30	280,00	0,93
10	1	-0,2486	-0,8378	-0,7989	0,8476	5,00	0,10	120,00	2,55
11	1	-0,1301	-0,8378	0,1760	0,0760	5,10	0,10	200,00	1,40
12	1	0,2120	-0,8378	0,8181	-0,8645	5,40	0,10	280,00	0,67
13	1	-0,0139	0,1902	-0,7989	0,0903	5,20	0,20	120,00	1,42

Продолжение таблицы 5.20

14	1	-0,1301	0,1902	0,1760	0,0469	5,10	0,20	200,00	1,37
15	1	-0,2486	0,1902	0,8181	-0,0393	5,00	0,20	280,00	1,28
16	1	-0,1301	0,8533	-0,7989	0,6095	5,10	0,30	120,00	2,12
17	1	-0,0139	0,8533	0,1760	0,3780	5,20	0,30	200,00	1,77
18	1	-0,2486	0,8533	0,8181	0,4923	5,00	0,30	280,00	1,94
19	1	0,4296	-0,8378	-0,7989	0,7198	5,60	0,10	120,00	2,31
20	1	0,1001	-0,8378	0,1760	-0,1438	5,30	0,10	200,00	1,18
21	1	-0,0139	-0,8378	0,8181	-0,3186	5,20	0,10	280,00	1,03
22	1	-0,0139	0,1902	-0,7989	0,5568	5,20	0,20	120,00	2,04
23	1	0,4296	0,1902	0,1760	-0,0029	5,60	0,20	200,00	1,32
24	1	-0,0139	0,1902	0,8181	-0,0544	5,20	0,20	280,00	1,27
25	1	0,1001	0,8533	-0,7989	0,4661	5,30	0,30	120,00	1,90
26	1	-0,0139	0,8533	0,1760	-0,1874	5,20	0,30	200,00	1,14
27	1	0,1001	0,8533	0,8181	-0,3549	5,30	0,30	280,00	1,00

Таблица 5.21 – Расчет коэффициентов регрессии и проверка значимости

	a0 (A0)	a1 (A1), E	a2 (A2), S	a3 (A3), V
Коэффициенты регрессии без проверки значимости	0,09	-0,18	0,05	-0,48
Стандартное значение критерия Стьюдента для доверительной вероятности 86,6 %				0,17
критерий Стьюдента для оценки значимости коэффициента регрессии	0,21	0,42	0,12	1,11
Значимые коэффициенты регрессии	(0,09)	(-0,18)	(0,05)	(-0,48)

Все рассматриваемые технологические факторы статистически значимы (рисунок 5.3) при доверительной вероятности не менее 98,9 %. Влиянием случайных погрешностей и неучтенных факторов можно пренебречь.

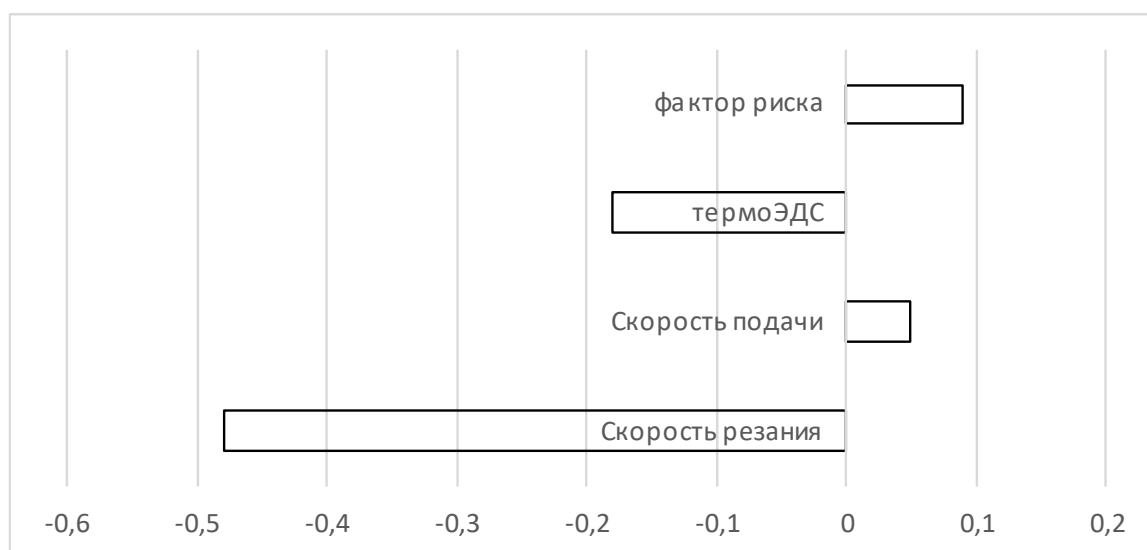


Рисунок 5.3 – Оценка значимости технологических факторов

Наиболее «мощный» технологический фактор – скорость резания. Второй по значимости технологический фактор – термо-ЭДС. Влияние скорости продольной подачи сравнимо со случайными воздействиями на результат процесса.

Нормированная модель имеет вид (5.3)

$$y = 0.09 - 0,18x_1 + 0,05x_2 - 0.48x_3. \quad (5.3)$$

Оценка относительной погрешности, стандартной ошибки и достоверности модели представлена в таблице 5.22.

Таблица 5.22 – Параметры регрессионной модели

Параметр модели	Количественная оценка
Относительная погрешность модели.	средняя
	16,55 %
	наибольшая
	50,4 %
	наименьшая
	0,93 %
Стандартная ошибка модели	0,34
Критерий Фишера	1,55
Оценка достоверности / стабильности	86,6 %

В таблице 5.23 представлены исходные данные для модели стойкости инструмента при обработке коррозионностойкой стали 12Х13 серийно выпускаемым инструментом.

Таблица 5.23 – Исходные данные в соответствии с планом эксперимента 33

№	Термо ЭДС E, мВ	Подача на оборот S, мм/об	Скорость резания V, м/мин	Стойкость T, мин
1	10,9	0,10	90	197
2	10,9	0,10	150	168
3	10,9	0,10	210	128
4	10,9	0,20	90	197
5	10,9	0,20	150	134
6	10,9	0,20	210	113
7	10,9	0,30	90	168
8	10,9	0,30	150	125
9	10,9	0,30	210	103
10	11,4	0,10	90	188
11	11,4	0,10	150	143
12	11,4	0,10	210	108
13	11,4	0,20	90	177
14	11,4	0,20	150	138
15	11,4	0,20	210	103

Продолжение таблицы 5.23

16	11,4	0,30	90	141
17	11,4	0,30	150	122
18	11,4	0,30	210	94
19	12,3	0,10	90	197
20	12,3	0,10	150	125
21	12,3	0,10	210	89
22	12,3	0,20	90	150
23	12,3	0,20	150	116
24	12,3	0,20	210	81
25	12,3	0,30	90	116
26	12,3	0,30	150	89
27	12,3	0,30	210	75

Таблица 5.24 – Правила нормирования переменных модели

параметр	Факторы нормированные			Функция отклика Y	Факторы реальные (19)			T, мин
	X1	X2	X3		E, мВ	S, мм/об	V, м/мин	
миним	-1	-1	-1	-1	9,81	0,09	81,00	67,50
максим	1	1	1	1	13,53	0,33	231,00	216,70
средн	0,08	0,30	0,25	0,28	11,67	0,21	156,00	142,10

Таблица 5.25 – План эксперимента 3³

№	X0	X1	X2	X3	Y	E, мВ	S, мм/об	V, м/мин	T, мин
1	1	-0,3446	-0,8378	-0,7989	0,8366	10,90	0,10	90,00	197,00
2	1	-0,3446	-0,8378	0,1760	0,5635	10,90	0,10	150,00	168,00
3	1	-0,3446	-0,8378	0,8181	0,0972	10,90	0,10	210,00	128,00
4	1	-0,3446	0,2292	-0,7989	0,8366	10,90	0,20	90,00	197,00
5	1	-0,3446	0,2292	0,1760	0,1758	10,90	0,20	150,00	134,00
6	1	-0,3446	0,2292	0,8181	-0,1165	10,90	0,20	210,00	113,00
7	1	-0,3446	0,8533	-0,7989	0,5635	10,90	0,30	90,00	168,00
8	1	-0,3446	0,8533	0,1760	0,0566	10,90	0,30	150,00	125,00
9	1	-0,3446	0,8533	0,8181	-0,2754	10,90	0,30	210,00	103,00
10	1	-0,0656	-0,8378	-0,7989	0,7564	11,40	0,10	90,00	188,00
11	1	-0,0656	-0,8378	0,1760	0,2873	11,40	0,10	150,00	143,00
12	1	-0,0656	-0,8378	0,8181	-0,1941	11,40	0,10	210,00	108,00
13	1	-0,0656	0,2292	-0,7989	0,6530	11,40	0,20	90,00	177,00
14	1	-0,0656	0,2292	0,1760	0,2262	11,40	0,20	150,00	138,00
15	1	-0,0656	0,2292	0,8181	-0,2754	11,40	0,20	210,00	103,00
16	1	-0,0656	0,8533	-0,7989	0,2631	11,40	0,30	90,00	141,00
17	1	-0,0656	0,8533	0,1760	0,0149	11,40	0,30	150,00	122,00
18	1	-0,0656	0,8533	0,8181	-0,4321	11,40	0,30	210,00	94,00
19	1	0,4071	-0,8378	-0,7989	0,8366	12,30	0,10	90,00	197,00
20	1	0,4071	-0,8378	0,1760	0,0566	12,30	0,10	150,00	125,00
21	1	0,4071	-0,8378	0,8181	-0,5259	12,30	0,10	210,00	89,00
22	1	0,4071	0,2292	-0,7989	0,3692	12,30	0,20	90,00	150,00
23	1	0,4071	0,2292	0,1760	-0,0716	12,30	0,20	150,00	116,00

Продолжение таблицы 5.25

24	1	0,4071	0,2292	0,8181	-0,6874	12,30	0,20	210,00	81,00
25	1	0,4071	0,8533	-0,7989	-0,0716	12,30	0,30	90,00	116,00
26	1	0,4071	0,8533	0,1760	-0,5259	12,30	0,30	150,00	89,00
27	1	0,4071	0,8533	0,8181	-0,8193	12,30	0,30	210,00	75,00

Таблица 5.26 – Расчет коэффициентов регрессии и проверка значимости

	a0 (A0)	a1 (A1), E	a2 (A2), S	a3 (A3), V
Коэффициенты регрессии без проверки значимости	0,1	-0,62	-0,23	-0,54
Стандартное значение критерия Стьюдента для доверительной вероятности 99,7 %	0,004			
критерий Стьюдента для оценки значимости коэффициента регрессии	0,20	1,32	0,49	1,15
Значимые коэффициенты регрессии	(0,1)	(-0,62)	(-0,23)	(-0,54)

Все рассматриваемые технологические факторы статистически значимы (рисунок 5.4) при доверительной вероятности не менее 99 %. Влиянием случайных погрешностей и неучтенных факторов можно пренебречь.

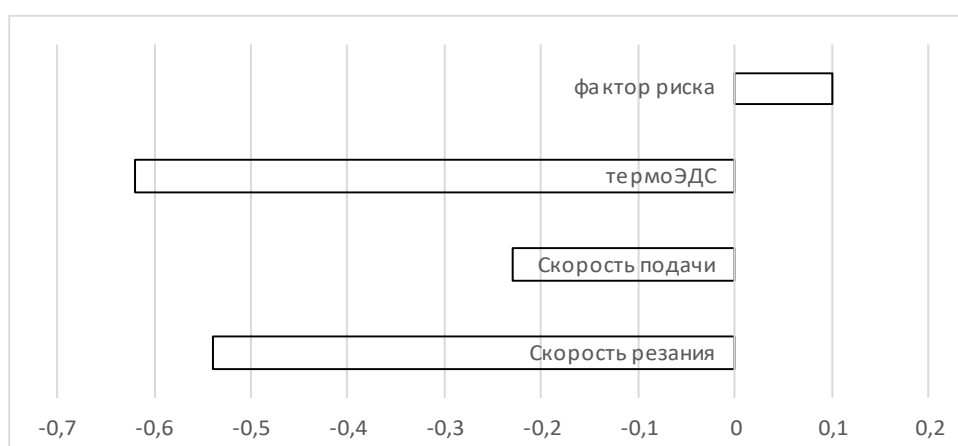


Рисунок 5.4 – Оценка значимости технологических факторов

Наиболее «мощный» технологический фактор – термо-ЭДС ($A_1 = -0,62$). Немного ниже влияние скорости резания ($A_3 = -0,54$). Поскольку коэффициент регрессии «фактора риска» $A_0 = 0,1$ по абсолютному значению в 2...6 раз меньше коэффициентов регрессии технологических факторов, можно сделать заключение о высокой стабильности процесса.

Нормированная модель имеет вид (5.4)

$$y = 0,1 - 0,62x_1 - 0,23x_2 - 0,54x_3. \quad (5.4)$$

Оценка относительной погрешности, стандартной ошибки и достоверности модели представлена в таблице 5.27.

Таблица 5.27 – Параметры регрессионной модели

Параметр модели	Количественная оценка
Относительная погрешность модели.	средняя 5,95 %
	наибольшая 19,3 %
	наименьшая 0,4 %
Стандартная ошибка модели	11,41
Критерий Фишера	3,169
Оценка достоверности / стабильности	99,7 %

В таблице 5.28 представлены исходные данные для стойкости инструмента при обработке коррозионностойкой стали 12Х13 инструментом с наноструктурированной рабочей поверхностью.

Таблица 5.28 – Исходные данные в соответствии с планом эксперимента 3³

№	Термо ЭДС E, мВ	Подача на оборот S, мм/об	Скорость резания V, м/мин	Стойкость T, мин
1	11,7	0,10	90	220
2	11,7	0,10	150	170
3	11,7	0,10	210	130
4	11,7	0,20	90	200
5	11,7	0,20	150	150
6	11,7	0,20	210	120
7	11,7	0,30	90	170
8	11,7	0,30	150	140
9	11,7	0,30	210	110
10	12,6	0,10	90	210
11	12,6	0,10	150	150
12	12,6	0,10	210	115
13	12,6	0,20	90	180
14	12,6	0,20	150	140
15	12,6	0,20	210	110
16	12,6	0,30	90	150
17	12,6	0,30	150	130
18	12,6	0,30	210	100
19	13,7	0,10	90	210
20	13,7	0,10	150	140
21	13,7	0,10	210	95
22	13,7	0,20	90	160
23	13,7	0,20	150	110
24	13,7	0,20	210	90

Продолжение таблицы 5.28

25	13,7	0,30	90	130
26	13,7	0,30	150	100
27	13,7	0,30	210	80

Таблица 5.29 – Правила нормирования (17) переменных модели

параметр	Факторы нормированные			Функция отклика Y	Факторы реальные (19)			Т, мин
	X1	X2	X3		Е, мВ	S, мм/об	V, м/мин	
миним	-1	-1	-1	-1	10,53	0,09	81	72
максим	1	1	1	1	15,07	0,33	231	242
средн	0,09	0,30	0,25	0,29	12,80	0,21	156	157

Таблица 5.30 – План эксперимента 33

№	X0	X1	X2	X3	Y	Е, мВ	S, мм/об	V, м/мин	Т, мин
1	1	-0,4122	-0,8378	-0,7989	0,8428	11,70	0,10	90,00	220,00
2	1	-0,4122	-0,8378	0,1760	0,4174	11,70	0,10	150,00	170,00
3	1	-0,4122	-0,8378	0,8181	-0,0252	11,70	0,10	210,00	130,00
4	1	-0,4122	0,2292	-0,7989	0,6855	11,70	0,20	90,00	200,00
5	1	-0,4122	0,2292	0,1760	0,2109	11,70	0,20	150,00	150,00
6	1	-0,4122	0,2292	0,8181	-0,1572	11,70	0,20	210,00	120,00
7	1	-0,4122	0,8533	-0,7989	0,4174	11,70	0,30	90,00	170,00
8	1	-0,4122	0,8533	0,1760	0,0971	11,70	0,30	150,00	140,00
9	1	-0,4122	0,8533	0,8181	-0,3008	11,70	0,30	210,00	110,00
10	1	0,0013	-0,8378	-0,7989	0,7660	12,60	0,10	90,00	210,00
11	1	0,0013	-0,8378	0,1760	0,2109	12,60	0,10	150,00	150,00
12	1	0,0013	-0,8378	0,8181	-0,2275	12,60	0,10	210,00	115,00
13	1	0,0013	0,2292	-0,7989	0,5117	12,60	0,20	90,00	180,00
14	1	0,0013	0,2292	0,1760	0,0971	12,60	0,20	150,00	140,00
15	1	0,0013	0,2292	0,8181	-0,3008	12,60	0,20	210,00	110,00
16	1	0,0013	0,8533	-0,7989	0,2109	12,60	0,30	90,00	150,00
17	1	0,0013	0,8533	0,1760	-0,0252	12,60	0,30	150,00	130,00
18	1	0,0013	0,8533	0,8181	-0,4580	12,60	0,30	210,00	100,00
19	1	0,4683	-0,8378	-0,7989	0,7660	13,70	0,10	90,00	210,00
20	1	0,4683	-0,8378	0,1760	0,0971	13,70	0,10	150,00	140,00
21	1	0,4683	-0,8378	0,8181	-0,5427	13,70	0,10	210,00	95,00
22	1	0,4683	0,2292	-0,7989	0,3174	13,70	0,20	90,00	160,00
23	1	0,4683	0,2292	0,1760	-0,3008	13,70	0,20	150,00	110,00
24	1	0,4683	0,2292	0,8181	-0,6319	13,70	0,20	210,00	90,00
25	1	0,4683	0,8533	-0,7989	-0,0252	13,70	0,30	90,00	130,00
26	1	0,4683	0,8533	0,1760	-0,4580	13,70	0,30	150,00	100,00
27	1	0,4683	0,8533	0,8181	-0,8262	13,70	0,30	210,00	80,00

Все рассматриваемые технологические факторы статистически значимы (рисунок 5.5) при доверительной вероятности не менее 99,8 %. Влиянием случайных погрешностей и неучтенных факторов можно пренебречь.

Таблица 5.31 – Расчет коэффициентов регрессии и проверка значимости

	a0 (A0)	a1 (A1), E	a2 (A2), S	a3 (A3), V
Коэффициенты регрессии без проверки значимости	0,05	-0,47	-0,22	-0,53
Стандартное значение критерия Стьюдента для доверительной вероятности 99,1 %				
критерий Стьюдента для оценки значимости коэффициента регрессии	0,11	1,06	0,51	1,19
Значимые коэффициенты регрессии	(0,05)	(-0,47)	(-0,22)	(-0,53)

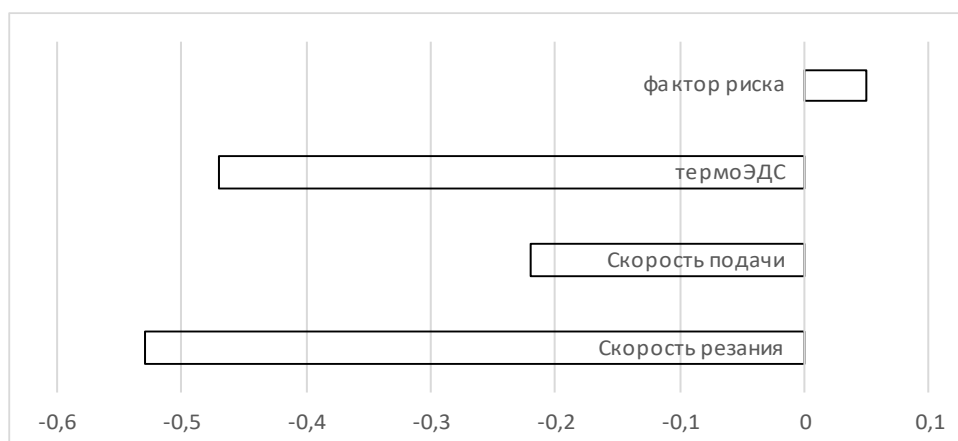


Рисунок 5.5 – Оценка значимости технологических факторов

Наиболее «мощный» технологический фактор – скорость резания. Второй по значимости технологический фактор – термо-ЭДС. Поскольку коэффициент регрессии «фактора риска» $A_0 = 0.05$ в 4...10 раз меньше коэффициентов регрессии технологических факторов, можно сделать заключение о высокой стабильности процесса.

Нормированная модель имеет вид (5.5):

$$y = 0,05 - 0,47x_1 - 0,22x_2 - 0,53x_3. \quad (5.5)$$

Оценка относительной погрешности, стандартной ошибки и достоверности модели представлена в таблице 5.33.

Таблица 5.33 – Параметры регрессионной модели

Параметр модели	Количественная оценка
Относительная погрешность модели.	средняя
	5,56 %
	наибольшая
	17,9 %
	наименьшая
	0,19 %
Стандартная ошибка модели	10,9
Критерий Фишера	3,487
Оценка достоверности / стабильности	99,8 %

Аналогичным образом были получены модели шероховатости поверхности при обработке коррозионнотойкой стали 12Х13 инструментом с наноструктурированной рабочей поверхностью.

Все рассматриваемые технологические факторы статистически значимы (рис. 5.6) при доверительной вероятности не менее 98,9 %. Влиянием случайных погрешностей и неучтенных факторов можно пренебречь.

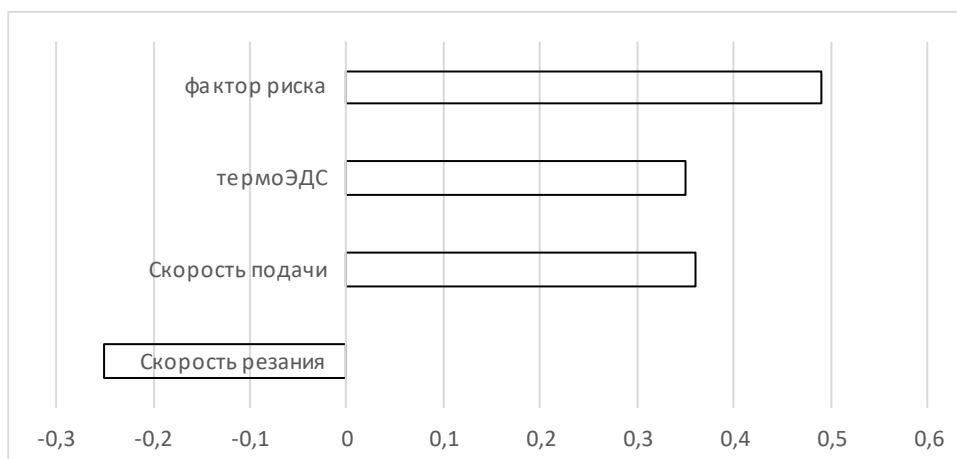


Рис. 5.6 – Оценка значимости технологических факторов

Наиболее «мощные» технологические факторы – подача ($A_2 = 0,36$). и термо-ЭДС ($A_1 = 0,35$). Отмечено существенное влияние случайных погрешностей ($A_0 = 0,49$). Следует сделать заключение о нестабильности процесса.

Нормированная модель имеет вид (5.6)

$$y = 0,49 + 0,35x_1 + 0,36x_2 - 0,25x_3. \quad (5.6)$$

Оценка относительной погрешности, стандартной ошибки и достоверности модели представлена в таблице 5.34.

Таблица 5.34 – Параметры регрессионной модели

Параметр модели	Количественная оценка
Относительная погрешность модели.	средняя
	11,09 %
	наибольшая
	46,33 %
	наименьшая
	0,30 %
Стандартная ошибка модели	0,27
Критерий Фишера	1,29
Оценка достоверности / стабильности	83,3 %

Оценка стабильности процессов лезвийной обработки представлена в таблице 5.35.

Таблица 5.35 – Количественные оценки стабильности

Обрабатываемый материал	Критерий оценки стабильности	Оценка стабильности для инструмента			
		серийно выпускаемый		с наноструктурированной поверхностью рабочей части	
		коэфф. A0	%	коэфф. A0	%
40X	стойкость	0,00	99,1	0,13	98,9
	шероховатость			0,09	86,6
12X13	стойкость	0,10	99,7	0,05	99,8
	шероховатость			0,49	83,3

Оценки стабильности (таблица 5.39) приведены в соответствии с описанными в главе 2 методиками – даны оценки по величине коэффициента регрессии «фактора риска» и по величине вероятности снижения влияния случайных воздействий. Практически во всех исследованных процессах отмечается высокая стабильность и достаточная корреляционная связь между укрупненными оценками стабильности по величине коэффициента регрессии «фактора риска» и вероятностными оценками статистической значимости модели.

Величина средней погрешности моделей стойкости режущего инструмента для групп обрабатываемости Р и М как для серийно выпускаемых, так и наномодифицированных СМНП не превышают 6%, при доверительной вероятности не менее 99 %. Величина максимальной погрешности не превысила значения 25 %. Локальный характер подобных отклонений объясняется влиянием случайных возмущающих факторов в процессе резания. Результаты же оценки полученных регрессионных моделей подтверждают практическую применимость и надежность методики предварительной оценки режущих свойств СМНП по величине термо-ЭДС пробного прохода.

Следует отметить, что регрессионные модели для прогнозирования величины среднего арифметического отклонения профиля поверхности (R_a) имеют существенно меньшую точность и достоверность. Так среднее значение относительной погрешности моделей превышает 10%, а максимальное значение

погрешности – свыше 40 % при доверительной вероятности 86,6 % для группы обрабатываемости Р и 83,3 % – для группы М. Полученная оценка согласуется с теоретическим описанием многофакторного механизма формирования профиля обработанной поверхности в процессе резания [175], а также обосновывает необходимость применения дополнительных средств оперативной диагностики. Кроме того, высокие значения коэффициента $A_0 = 0,49$ модели высоты микронеровностей при обработке коррозионностойкой стали (5.6) свидетельствует о низкой стабильности процесса и существовании неучтенных в модели закономерных влияний.

Проведенный статистический анализ подтверждает работоспособность метода измерения термо-ЭДС пробного прохода как комплексного канала оценки свойств СМНП, который позволяет с высоким уровнем достоверности прогнозировать стойкость режущего инструмента в зависимости от режимов резания. Вместе с тем, ограниченность информативной способности сигнала термо-ЭДС областью предварительной диагностики ведет к необходимости расширения средств диагностики процесса в производственных условиях.

5.2 Информативность силового канала мониторинга

Интенсивность изнашивания инструмента и формирование параметров качества обработанной поверхности определяется взаимным влиянием деформационного и теплового фактора, а также видом контактного взаимодействия. Мониторинг составляющих силы резания позволяет оценивать температурно-силовую напряженность и стабильность процесса, а также прогнозировать результаты обработки в ходе технологической операции в производственных условиях. При этом требование информативности и достоверности при динамическом характере процесса ведет к необходимости контроля не только уровня, но и колебаний отдельных составляющих силы резания.

При составлении плана эксперимента варьирование параметров определялось областью допустимых режимов резания, установленных производителем СМНП. Установленные диапазоны варьирования режимов резания применительно к группе обрабатываемости М: скорости резания $V_c = 90 - 180 - 270$ м/мин; подачи $S = 0,05 - 0,15 - 0,25$ мм/об. Вариация характеристик обрабатываемой поверхности определялась глубиной упрочнения поверхностного слоя по отношению к глубине резания: $h = 0$; $h = t$; $h = 2t$. Глубина резания была принята постоянной величиной, соответствующей чистовой обработке ($t = 0,5$ мм). В качестве независимых факторов определяющих результат в рамках настоящего исследования к рассмотрению были выбраны: величины тангенциальной (P_z), осевой (P_x), радиальной (P_y) составляющих силы, а также их стандартные отклонения (σ_{P_z} , σ_{P_x} , σ_{P_y}). В качестве функции отклика принята величина среднего арифметического отклонения профиля (R_a). Фрагмент исходных данных для регрессионного анализа представлен в таблице 5.36.

Таблица 5.36 – Фрагмент исходных данных по результатам проведённого эксперимента

№	Определяющие факторы						Функция отклика
	P_z , Н	P_x , Н	P_y , Н	σ_{P_z} , Н	σ_{P_x} , Н	σ_{P_y} , Н	R_a , мкм
1	66,96	96,03	4,012	10,21	10,83	0,123	2,378
2	50,12	84,26	2,998	4,44	5,07	0,126	1,919
3	51,65	83,96	3,369	5,50	4,09	0,483	2,267
4	81,57	57,93	5,838	5,84	4,78	0,001	0,398
5	67,44	47,19	1,99	6,49	8,04	0,12	1,151
6	71,21	59,10	3,03	3,03	3,90	0,21	1,157
7	94,05	47,21	4,01	3,44	4,49	0,12	0,391
8	96,03	104,03	19,50	1,47	3,35	7,59	0,511
9	102,83	107,05	19,44	2,07	3,12	3,30	0,497
10	63,83	60,89	19,31	8,85	8,87	0,46	0,263
11	71,82	68,42	19,04	8,38	4,61	0,21	0,552
12	72,04	81,20	19,04	7,91	6,63	0,21	0,598
13	167,54	151,65	15,24	55,91	25,79	0,43	2,38
14	175,12	174,29	15,37	7,21	33,19	0,48	2,421
15	185,75	211,13	15,55	7,13	18,87	0,50	2,566
16	91,56	102,49	19,11	9,09	10,94	0,32	0,984
17	115,42	118,80	19,18	14,71	5,67	0,38	1,374

Аналогично приведенной выше методике была получена модель прогнозирования величины среднего арифметического отклонения профиля обработанной поверхности Ra. Оценка достоверности, адекватности и относительной погрешности полученной регрессионной модели процесса лезвийной обработки представлена в таблице 5.37. Оценка значимости определяющих факторов приведена в таблице 5.38.

Таблица 5.37 – 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 5.38 – Оценка значимости факторов

Вид модели	Значимость факторов						
	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6
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 [175]. Однако значимость оцениваемых факторов подтверждает существенное влияние силовой

нагруженности процесса резания на параметры шероховатости обработанной поверхности (таблица 5.38). 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.

Дополнительно был проведен регрессионный анализ с целью оценки взаимного влияния вариации режимов резания и силовой нагруженности процесса. Фрагмент исходных данных приведен в таблице 5.39.

Таблица 5.39 – Фрагмент исходных данных по результатам проведённого эксперимента

№	Определяющие факторы						Функция отклика
	V, м/мин	S, мм/об	P_z , Н	P_x , Н	σ_{Pz} , Н	σ_{Px} , Н	R_a , мкм
1	90,00	0,05	66,96	96,03	10,21	10,83	2,378
2	90,00	0,05	50,12	84,26	4,44	5,07	1,919
3	90,00	0,05	51,65	83,96	5,50	4,09	2,267
4	90,00	0,05	81,57	57,93	5,84	4,78	0,398
5	90,00	0,05	67,44	47,19	6,49	8,04	1,151
6	90,00	0,05	71,21	59,10	3,03	3,90	1,257
7	180,00	0,05	94,05	47,21	3,44	4,49	0,391
8	180,00	0,05	96,03	104,03	1,47	3,35	0,511
9	180,00	0,05	102,83	107,05	2,07	3,12	0,617
10	180,00	0,05	63,83	60,89	8,85	8,87	0,263
11	180,00	0,05	71,82	68,42	8,38	4,61	0,552
12	180,00	0,05	72,04	81,20	7,91	6,63	0,598
13	270,00	0,05	167,54	151,65	55,91	25,79	2,38
14	270,00	0,05	175,12	174,29	7,21	33,19	2,421
15	270,00	0,05	185,75	211,13	7,13	18,87	2,566
16	270,00	0,05	91,56	102,49	9,09	10,94	0,984
17	270,00	0,05	115,42	118,80	14,71	5,67	1,374
18	270,00	0,05	110,73	144,13	12,03	4,64	1,373
19	90,00	0,15	146,80	98,50	13,58	8,76	1,813
20	90,00	0,15	140,66	96,14	6,32	5,16	1,489
21	90,00	0,15	138,54	97,18	5,89	4,10	1,415

Оценка достоверности, адекватности и относительной погрешности полученной регрессионной модели процесса лезвийной обработки представлена в таблице 5.40. Оценка значимости определяющих факторов приведена в таблице 5.41.

Таблица 5.40 – Параметры регрессионной модели

Вид модели	Достоверность, %	Относительная погрешность, %	Адекватность
Линейная, все факторы	99,90	194,58	адекватна
Линейная, значимые факторы		194,58	адекватна
Степенная, все факторы	99,90	63,35	адекватна
Степенная, значимые факторы		63,35	адекватна
Показательная, все факторы	99,80	101,24	адекватна
Показательная, значимые факторы		101,24	адекватна

Таблица 5.41 – Оценка значимости факторов

Вид модели	Значимость факторов						
	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Линейная, все факторы	-0,283	0,135	0,451	0,682	0,443	0,425	0,422
Линейная, значимые факторы	-0,283	0,135	0,451	0,682	0,443	0,425	0,422
Степенная, все факторы	0,235	0,080	0,436	0,645	0,259	0,496	0,338
Степенная, значимые факторы	0,235	0,080	0,436	0,645	0,259	0,496	0,338
Показательная, все факторы	0,235	0,023	0,378	0,061	-0,295	-0,218	-0,245
Показательная, значимые факторы	0,235	0,023	0,378	0,061	-0,295	-0,218	-0,245

Как и в предыдущем случае отмечается высокий уровень доверительной вероятности всех анализируемых моделей при значительной относительно погрешности. Наиболее адекватные результаты по-прежнему дает степенная модель при некотором увеличении относительной погрешности. При этом отмечается соизмеримое влияние случайного влияния неучтенных факторов ($A_0 = 0,235$), а также величины и колебаний тангенциальной (P_z) и осевой (P_x) составляющих силы резания. Соизмеримое влияние оказывает и величина подачи при достаточно малом весе скорости резания.

Таким образом, 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. Относительная погрешность полученных моделей обосновывает целесообразность применения дополнительных диагностических каналов для повышения точности и надежности прогнозных оценок и эффективности управления процессом.

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 этом развитие неустойчивости процесса резания сопровождается изменением уровня и ростом колебаний составляющих сил резания. Потому повышение надежности прогнозной оценки требует дополнительного мониторинга стабильности процесса обработки.

5.3 Информативность вибрационного канала мониторинга

Стабильность процесса резания, а также текущее состояние и ресурс работоспособности режущего инструмента в ходе технологической операции могут быть диагностированы посредством контроля уровня вибраций. Устойчивым параметром численной оценки текущего состояния и прогноза остаточного ресурса режущего инструмента является величина интегральной виброэнергии. 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.

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 5.42 и на рисунке 5.7.

Таблица 5.42 – 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

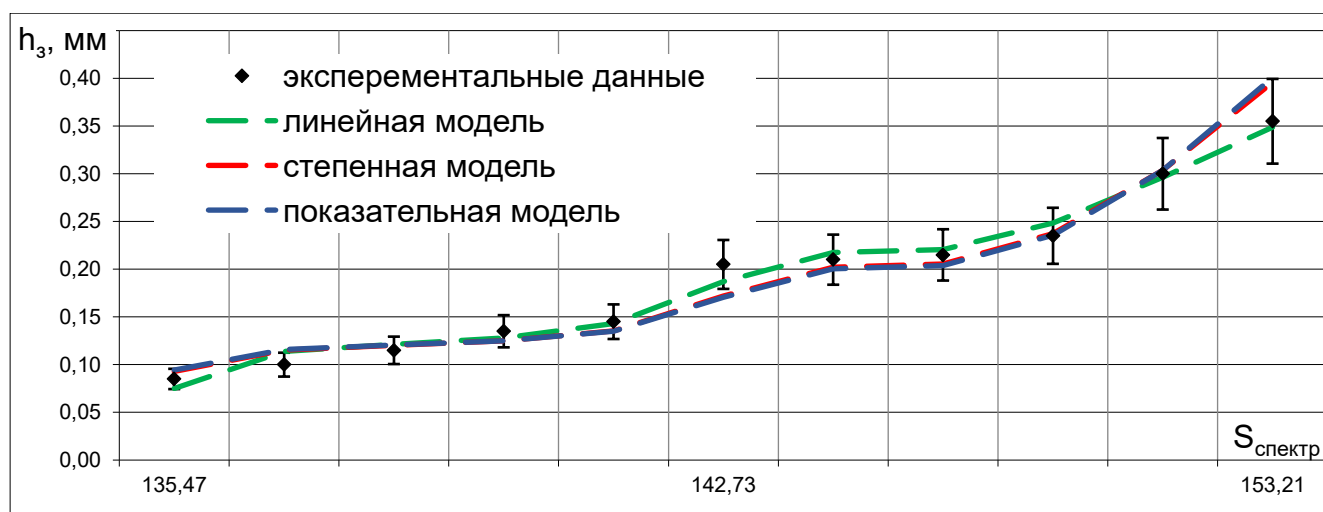


Рисунок 5.7 – Регрессионные модели взаимосвязи фаски износа по задней грани СМНП (h_3) от площади спектрограммы вибрационного сигнала ($S_{\text{спектр}}$) (сталь 40Х, СМНП Sandvik WNMG 08 04 08-PM 4225, $t = 0,5$ мм, $V = 120$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об)

Достоверность всех приведенных моделей (рисунок 5.7) 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 5.43 и на рисунке 5.8.

Таблица 5.43 – 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	4,484	отличие случайное
Степенная модель	0,0001	2,544	1,81	10,20	21,49	28,930	8,849	отличие неслучайное
Показательная модель	12,8831	1,007	4,39	15,14	27,91	41,405	4,320	отличие случайное

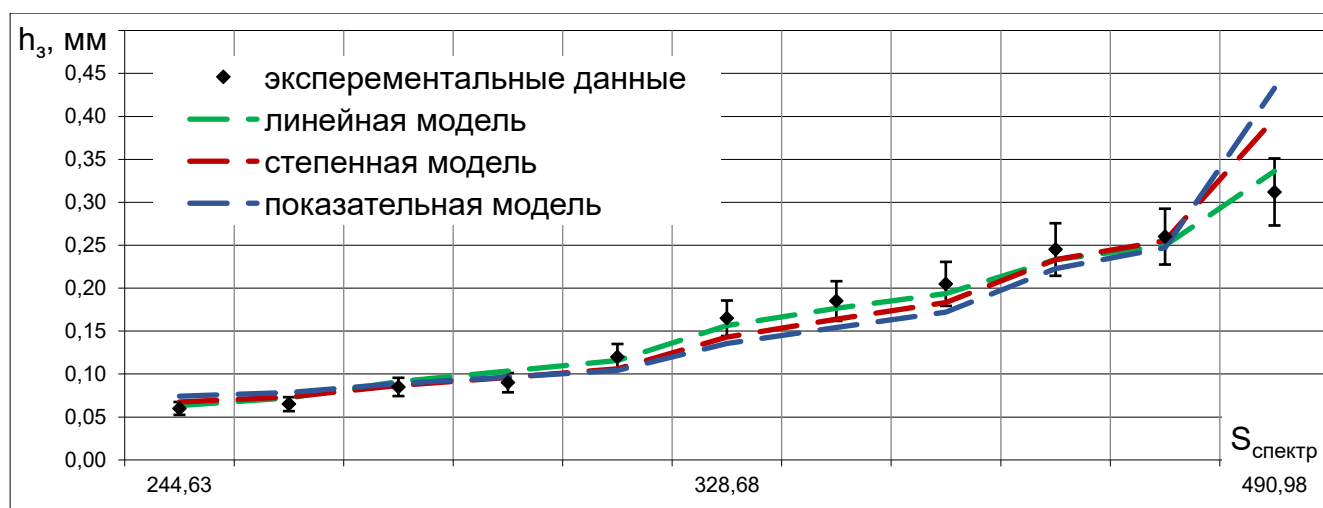


Рисунок 5.8 – Регрессионные модели взаимосвязи фаски износа по задней грани СМНП (h_3) от площади спектрограммы вибрационного сигнала ($S_{\text{спектр}}$) (сталь 40X13, СМНП Sandvik WNMG 08 04 08-MM 2220, $t = 0,5$ мм, $V = 155$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об)

Для стали 40X13 (группа обрабатываемости М) проверка по критерию Фишера подтвердила наличие установленной закономерности только для степенной модели. Достоверность модели (рисунок 5.8) соответствует доверительной вероятности 99 %, средняя относительная погрешность составила 10,2 %, при максимальной величине погрешности 21,49 %.

Результаты регрессионного анализа для жаропрочной стали 08X21H6M2T представлены в таблице 5.44 и на рисунке 5.9.

Таблица 5.44 – 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	7,098	отличие неслучайное
Степенная модель	0,4584	0,860	0,90	4,36	8,06	12,65	43,69	отличие неслучайное
Показательная модель	78,0675	1,001	3,45	11,73	16,73	29,01	8,30	отличие неслучайное

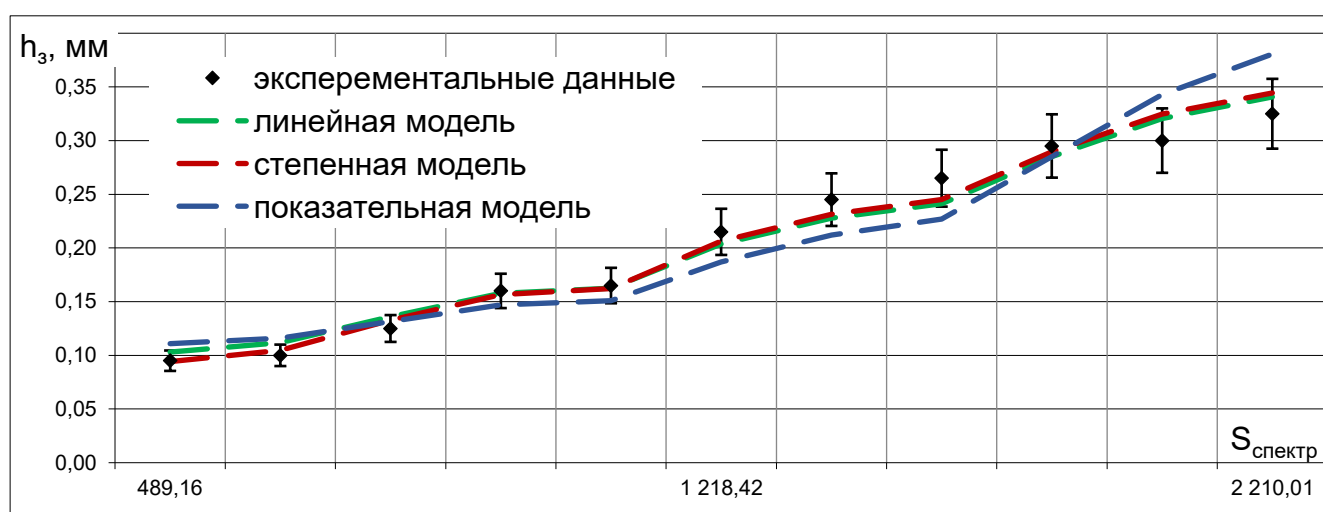


Рисунок 5.9 – Регрессионные модели взаимосвязи фаски износа по задней грани СМНП (h_3) от площади спектрограммы вибрационного сигнала ($S_{\text{спектр}}$) (сталь 08X21H6M2T, СМНП Korloy WNMG080408-VP2 UNC805, $t = 0,5$ мм, $V = 80$ м/мин, $S = 0,2$ мм/об)

Достоверность всех приведенных моделей (рисунок 5.9) 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.

Таким образом, 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.

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

Предложена методология и математический аппарат для технологической подготовки производства и адаптивного управления стабильностью процесса резания и качеством токарной обработки на автоматизированном оборудовании с ЧПУ, которые позволяют разработать функциональную архитектуру и алгоритм функционирования интеллектуальной системы адаптивного управления формированием комплекса эксплуатационных свойств изделия, интегрированной в цифровую среду технологической подготовки производства.

5.4 Алгоритм методики оценки работоспособности и ресурса режущего инструмента с формированием электронного паспорта инструмента (ЭПИ)

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 (рисунок 5.10).

На первом этапе функционирования системы решается задача подготовки исходной технологической информации для чего осуществляется сортировка и кластеризация режущих пластин по величине термо-ЭДС. Каждому инструментальному кластеру присваивается стратегия обработки и уточняется область рекомендуемых режимов обработки.

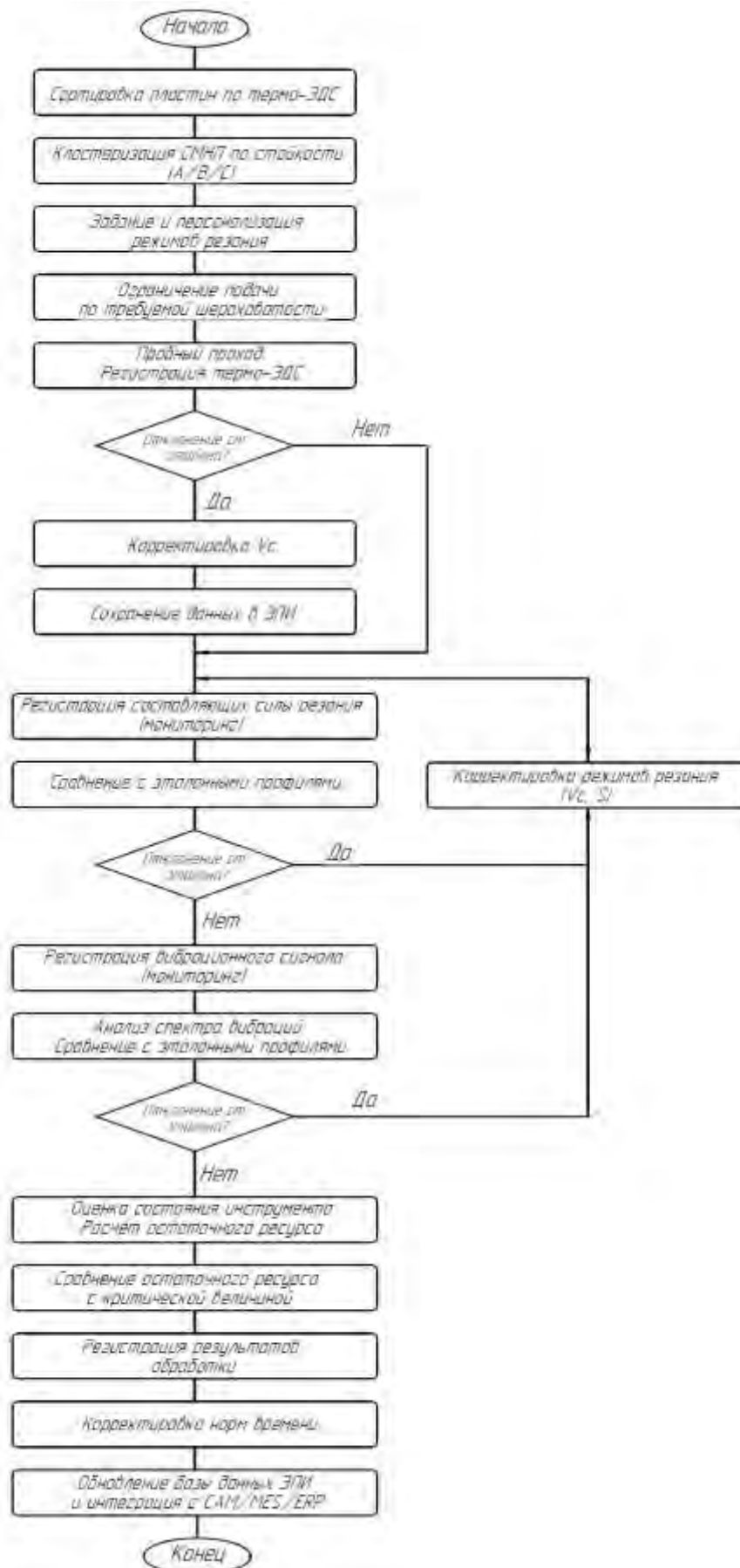


Рисунок 5.10 – Функциональная схема алгоритма работы интеллектуальной системы

Далее в соответствии с технологической задачей конкретизируются режимы обработки. На этом этапе устанавливаются требуемые параметры шероховатости, выбирается геометрия режущего инструмента, рассчитывается и задается максимально допустимая подача. Необходимая технологическая информация передается на производство.

На следующем этапе осуществляется оперативное управление режимами обработки в ходе реализации технологической операции. Выполняется оценка текущей контактной пары, фиксируется величина термо-ЭДС пробного прохода и при необходимости осуществляется коррекция скорости резания. Результаты оценки и корректировки (режим подтверждён/корректировать/неприемлем) сохраняются в ЭПИ и передаются в САМ/MES-систему.

Далее непосредственно при выполнении технологической операции (перехода) осуществляется мониторинг процесса в режиме реального времени. Для этого производится оценка контактного взаимодействия по величине и колебаниям составляющих сил резания и их сравнение с эталонным значением из профиля ЭПИ. При выходе значений за установленные границы осуществляется корректировка режимов обработки (V_c , f_n). Текущие изменения отражаются в профиле ЭПИ.

Оценка стабильности процесса резания осуществляется на основе анализа вибрационного сигнала из зоны резания. Производится анализ вибрационного сигнала (FFT, wavelet). Оценивается величина и динамика изменения (прирост) интегральной виброэнергии (площади спектрограммы) для классификации и фиксации перманентного состояния режущей кромки (норма / износ / предельный износ / критическое состояние). Прогнозируется остаточный ресурс инструмента и при необходимости вносятся соответствующие коррекции. Информация о истории эксплуатации режущей пластины вносится в ЭПИ.

После выполнения операции осуществляется обработка результатов и дополнение базы данных. Фиксируются результаты обработки, фактический износ СМНП, остаточный ресурс и время цикла. Информация о ходе и результате

технологической операции интегрируется в централизованную базу данных для формирования обучающих выборок.

С целью актуализации технологической информации осуществляется сравнение фактического времени цикла с нормативным. При необходимости определяется корректирующий коэффициент и пересчитываются нормы времени.

Изменения отражаются в базе норм времени, CAM/ERP-системах и технологических картах для последующего производственного планирования.

Для обеспечения замкнутого цифрового контура и повышения эффективности производства на всех этапах необходимо формировать, дополнять и актуализировать электронный паспорт инструмента (ЭПИ). Обеспечение автоматизированного принятия решений по выбору режимов обработки, замене инструмента и адаптации нормативов времени на основе накопленных данных полного функционала требует интеграции ЭПИ с CAM/MES/ERP-системами предприятия.

5.5 Выводы

1. Количественно описана и математически обоснована система взаимосвязей между технологическими условиями обработки, мгновенным (фактическим) состоянием режущего инструмента и параметрами качества обработанной поверхностей, с учетом вариативности свойств материалов контактной пары «инструмент–заготовка».

2. Подтверждена функциональность и эффективность оценки ресурса режущего инструмента на основе измерения сигнала термо-ЭДС пробного прохода. Количественная оценка точности разработанных математических моделей показала высокую достоверность прогнозирования стойкости инструмента. Величина средней относительной погрешности прогнозирования не более 6% при доверительной вероятности не менее 99% подтверждает высокую надежность практического применения диагностического канала в условиях современного машиностроительного производства.

3. Выявлена существенная корреляционная зависимость между параметрами качества обработанной поверхности и силовой нагруженностью процесса резания обосновывающая необходимость комплексного учета абсолютных значений и колебаний составляющих силы резания. Максимальное значение погрешности моделей наблюдается в зонах дестабилизации, обусловленных процессами наростобразования и циклического стружкообразования.

4. Подтверждена функциональность и эффективность вибрационного мониторинга состояния и ресурса режущего инструмента в процессе обработки. Полученные математические модели позволяют со средней относительной погрешностью не выше 12 % и доверительной вероятностью 99 % оценивать величину фаски износа СМНП, а также стабильность процесса резания.

5. На основе количественной оценки информативности диагностических каналов обоснована необходимость многоканального мониторинга, отслеживающего температурно-силовую нагруженность и состояние режущего инструмента, а также уровень неустойчивости процесса резания.

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

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

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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Распоряжение Правительства Российской Федерации** от 7 ноября 2023 г. № 3113-р (ред. от 21 октября 2024 г.) «Об утверждении стратегического направления в области цифровой трансформации обрабатывающих отраслей промышленности».
2. **ГОСТ Р 113.00.04-2020.** Наилучшие доступные технологии. Формат описания технологий. – Введ. 2021-01-01. – М.: Стандартинформ, 2020. – 11 с.
3. **ГОСТ Р 50779.42–99.** Статистические методы. Контрольные карты Шухарта. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2001.
4. **Аваков, А. А.** Развитие науки о резании металлов / А. А. Аваков. – М. : Машиностроение, 1986. – 208 с.
5. **Адаптивный контроль** // *CEPR*. – URL: <http://cepr.ru/catalog/montronix/adaptivnyy-kontrol> (дата обращения: 09.08.2025).
6. **Адашкин, А. М.** Необходимые и достаточные свойства твердосплавного субстрата с многослойным покрытием для режущего инструмента / А. М. Адашкин, А. А. Верещака, А. С. Верещака // *Вестник МГТУ «Станкин»*. – 2018. – № 1(44). – С. 8–12. – EDN YSIZXC.
7. **Алгоритм работы модуля оптимизации структуры автоматизированной производственной системы** / В. А. Полетаев, А. И. Цигельников, В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. – 2011. – № 6(88). – С. 79–81. – EDN OJMNDD.
8. **Алёшин, С. В.** Асинхронный трехфазный двигатель привода главного движения станка как датчик контроля состояния инструмента / С. В. Алёшин, А. С. Григорьев, Ю. А. Бабкин, Д. А. Селиванов // *Вестник МГТУ «Станкин»*. – 2010. – № 3. – С. 110–119.
9. **Анализ существующих методов технической подготовки мелкосерийного производства** // *Совершенствование производства*. – URL: <http://pereosnastka.ru/> (дата обращения: 06.02.2024).

10. **Анцев, А. В.** Повышение эффективности эксплуатации лезвийного инструмента при неопределённости условий обработки : специальность 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» : дис. ... д-ра техн. наук / Александр Витальевич Анцев. – 2020. – 370 с. – EDN LLFKUQ

11. **Артамонов, Е. В.** Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов / Е. В. Артамонов ; М-во образования Рос. Федерации, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Тюм. гос. нефтегазовый ун-т». – Тюмень : Вектор Бук, 2003. – 190 с. – ISBN 5-88465-416-2. – EDN QNASUR.

12. **Артамонов, Е. В.** Сборных режущих инструментов на основе исследования напряжённо-деформированного состояния и прочности сменных твердосплавных пластин : специальность 05.03.01 : дис. ... д-ра техн. наук / Евгений Владимирович Артамонов. – Томск, 2003. – 363 с. – EDN NMLSVT.

13. **Архипова, М. Ю.** Роль малых предприятий обрабатывающей промышленности в инновационном развитии реального сектора экономики: экономико-статистическое исследование / М. Ю. Архипова, А. А. Червякова // *Вопросы статистики*. – 2022. – Т. 29, № 3. – С. 26–45. – DOI 10.34023/2313-6383-2022-29-3-26-45. – EDN DYJFXK.

14. **Астахов, В. П.** Принцип наименьшей энергии пластической деформации при разрушении как основа понимания и оптимизации обработки металлов резанием / В. П. Астахов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2016. – № 8-1. – С. 141–153. – EDN WLXUAD.

15. **Аунг Чжо Мо.** Композиционная керамика на основе электроплавленного корунда с эвтектическими добавками в системах $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2\text{-MnO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-MnO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-SiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}$: дис. ... канд. техн. наук : 05.17.11 / Аунг Чжо Мо. – Москва, 2020.

16. **Базров, Б. М.** Базис технологической подготовки машиностроительного производства / Б. М. Базров. — М. : ИМАШ РАН, 2023. — 322 с. — URL: <https://e.lanbook.com/book/720>.

17. **Базров, Б. М.** Исследование влияния несовпадения технологических и конструкторских баз на точность координирующих размерных цепей / Б. М. Базров, Г. Ш. Умаров // Вестник машиностроения. — 2016. — № 9. — С. 3–8.
18. **Базров, Б. М.** Метод оценки конструкции изделия / Б. М. Базров // Научно-технические технологии в машиностроении. — 2015. — № 7. — С. 25–29. — URL: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/29004/view>.
19. **Базров, Б. М.** Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. — М. : Машиностроение, 2001. — 368 с.
20. **Базров, Б. М.** Модульная технология и её внедрение в механосборочное производство / Б. М. Базров // Научно-технические технологии в машиностроении. — 2014. — № 7. — С. 24–30.
21. **Базров, Б. М.** Технологический подход к описанию конструкции / Б. М. Базров // Научно-технические технологии в машиностроении. — 2015. — № 5. — С. 24–28.
22. **Безъязычный, В. Ф.** Развитие исследований тепловых процессов в технологии машиностроения / В. Ф. Безъязычный, М. Счерек // *Записки Горного института*. — 2018. — Т. 232. — С. 395–400. — DOI 10.31897/PMI.2018.4.395. — EDN YTDTZZ.
23. **Беккер, М. С.** Механизм образования лунки износа на твердосплавном режущем инструменте / М. С. Беккер // *Трение и износ*. — 1989. — Т. 2, № 2. — С. 308–312.
24. **Бетехтин, В. И.** Пористость и механические свойства твердых тел / В. И. Бетехтин // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. — 1998. — Т. 3, № 3. — С. 209–210. — EDN NUVZTL.
25. **Бондарев, А. А.** Снижение температурно-силовой напряженности процесса резания при использовании опережающего пластического деформирования / А. А. Бондарев, Я. Н. Отений, Ю. Н. Полянчиков, Д. В. Крайнев // Научно-технические технологии в машиностроении. — 2016. — № 3(57). — С. 40–44. — EDN VSVOUZ.

26. **Бурмистров, Е. В.** Фазовая характеристика силы резания и её роль в возникновении и развитии автоколебаний при точении нежестких деталей двигателей летательных аппаратов / Е. В. Бурмистров, М. Н. Басыров, Р. Р. Гиниятуллин // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва*. – 2008. – № 3(16). – С. 36–43. – EDN KWWVBD.

27. **Васильев, В. И.** Оптимальное управление сложными динамическими системами / В. И. Васильев, Е. В. Васильев // *Восточно-Европейский научный журнал*. – 2019. – № 5-1(45). – С. 32–44. – EDN FGWWPD.

28. **Васильков, Д. В.** Динамические особенности формирования условий контактного взаимодействия в зоне резания на основе кусочно-линейной аппроксимации / Д. В. Васильков, Т. Б. Кочина // *Металлообработка*. – 2013. – № 5-6(77-78). – С. 2–9. – EDN SBOEZH.

29. **Васильков, Д. В.** Моделирование динамики контактных взаимодействий в технологической системе механической обработки с учетом реологии в зоне резания / Д. В. Васильков, А. С. Александров, В. В. Голикова // *Аэрокосмическая техника и технологии*. – 2023. – Т. 1, № 1. – С. 173–183. – EDN EVINSV.

30. **Вероятностная природа образования контактных пар при металлообработке и её влияние на надёжность процесса** / А. Л. Плотников, А. С. Сергеев, Ж. С. Тихонова, Т. В. Уварова // *Вестник машиностроения*. – 2018. – № 4. – С. 48–54.

31. **Вертикаль. Система автоматизированного проектирования технологических процессов**. – 2023. – URL: <https://ascon.ru/products/vertikal/> (дата обращения: 06.02.2024).

32. **Висторопская, Ф. А.** К вопросу о коэффициенте распределения теплового потока в зоне деформации при резании / Ф. А. Висторопская, А. А. Рыжкин, С. А. Мойсеенко // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2012. – Т. 12, № 6(67). – С. 41–46. – EDN PWZGQP.

33. **Влияние вылета резца и глубины резания при токарной обработке на качество поверхностного слоя деталей машин** / Д. Г. Алленов, К. Б. Дейнова, С. В. Соломатин, О. И. Лазаренко // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. – 2020. – Т. 21, № 2. – С. 105–112. – DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-2-105-112. – EDN BYZELR.

34. **Влияние режимов резания на температуру при фрезеровании заготовок из труднообрабатываемых материалов** / В. Н. Трусов, Д. Л. Скуратов, О. И. Законов, В. В. Шикин // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва (национального исследовательского университета)*. – 2011. – № 3-1(27). – С. 57–62. – EDN OWXVSV.

35. **Влияние технологического воздействия на энергетическое состояние поверхностного слоя деталей** / М. В. Мусохранов, В. В. Калмыков, Е. Н. Малышев, Ф. И. Антонюк // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 1-1. – С. 59. – EDN VIDTUX.

36. **Водомеров, Н. К.** Техническая оснащённость труда – главный фактор эффективности региональной экономики / Н. К. Водомеров // *Теоретическая экономика*. – 2021. – № 9(81). – С. 11–26. – DOI 10.52957/22213260_2021_9_11. – EDN NKUUYH.

37. **Возможность оценки режущих свойств твердосплавного инструмента с покрытием по теплофизическим свойствам** / Д. В. Крайнев, Ж. С. Тихонова, А. В. Рогачев [и др.] // *Современные наукоёмкие технологии*. – 2024. – № 5-1. – С. 64–70. – DOI 10.17513/snt.40006. – EDN FLZKSS.

38. **Волков, Д. И.** Разработка модели процесса резания с учётом цикличности формирования стружки / Д. И. Волков, С. Л. Проскуряков // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. – 2011. – Т. 15, № 3(43). – С. 72–78. – EDN PWTNTV.

39. **Волчкевич, И. Л.** Минимизация времен отладок станков с ЧПУ в условиях многономенклатурного производства / И. Л. Волчкевич // *Известия*

Тулеского государственного университета. Технические науки. – 2011. – № 5-3. – С. 16–21. – EDN PXDNAP.

40. **Волчкевич, И. Л.** Рациональное использование станков с ЧПУ в условиях многономенклатурного производства / И. Л. Волчкевич // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана*. – 2012. – № 2. – С. 1. – EDN OWGREB.

41. **Воробьев, А. М.** Концепция создания единой среды проектирования, как первый этап обеспечения жизненного цикла изделий. Опыт ОАО «КБСМ» / А. М. Воробьев, Д. К. Щеглов, Л. Г. Данилова [и др.] // *CADmaster*. – 2008. – № 2(42). – С. 16–20.

42. **Вороненко, В. П.** От адаптивного управления станочным оборудованием до адаптивного цифрового управления механообрабатывающим участком / В. П. Вороненко, А. Д. Шашин // *Вестник РГТА имени П. А. Соловьева*. – 2018. – № 2(45). – С. 66–73. – EDN URVKIV.

43. **Вороненко, В. П.** Проблемы проведения технологической подготовки производства в многономенклатурном производстве / В. П. Вороненко, М. И. Седых, А. Д. Шашин // *Инновационные технологии в металлообработке: Всерос. науч.-практ. заоч. конф. с междунар. участием: сб. науч. тр. (посвящается 90-летию Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д-ра техн. наук, проф. Л. В. Худобина)*, Ульяновск, 25 ноября 2018 г. / отв. ред. Н. И. Веткасов. – Ульяновск: УлГТУ, 2019. – С. 326–330. – EDN BBCRNJ.

44. **Воронцов, А. Л.** Разработка новой теории резания. 1. Введение / А. Л. Воронцов [и др.] // *Вестник машиностроения*. – 2008. – № 1. – С. 57–67.

45. **Воронцов, А. Л.** Разработка новой теории резания. 5. Определение кинематического, напряженного и деформированного состояний обрабатываемой заготовки / А. Л. Воронцов [и др.] // *Вестник машиностроения*. – 2008. – № 5. – С. 61–69.

46. **Воронцов, А. Л.** Разработка новой теории резания. 9. Практические расчеты параметров резания / А. Л. Воронцов [и др.] // *Вестник машиностроения*. – 2008. – № 9. – С. 67–76.

47. **Воронцов, А. Л.** Разработка новой теории тепловых процессов резания / А. Л. Воронцов [и др.] // *Вестник машиностроения*. – 2011. – № 1–9.
48. **Галимов, М. Р.** Постановка задачи применения показателя конструктивно-технологической сложности для управления затратами незавершенного производства / М. Р. Галимов, Б. А. Якимович // *Вестник Ижевского государственного технического университета*. – 2006. – № 3(31). – С. 107–108. – EDN KAUNMT.
49. **Гибридные автоматизированные системы в машиностроении** / Г. Б. Бурдо, Н. В. Испирян, С. Р. Испирян, С. В. Мединцев // *Автоматизированное проектирование в машиностроении*. – 2022. – № 13. – С. 168–173. – DOI 10.26160/2309-8864-2022-13-168-173. – EDN IMNZKC.
50. **Григорьев, А. С.** Диагностирование резцов и прогнозирование их остаточной стойкости в реальном времени обработки на основе создания инструментария системы ЧПУ : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / А. С. Григорьев. – Москва, 2012. – 108 с.
51. **Григорьев, А. С.** Инструментарий системы ЧПУ для диагностики и прогнозирования износа режущего инструмента в реальном времени при токарной обработке / А. С. Григорьев // *Вестник МГТУ «Станкин»*. – 2012. – № 1. – С. 74–79.
52. **Григорьев, С. Н.** Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента / С. Н. Григорьев, В. П. Табаков, М. А. Волосова. – Старый Оскол : ТНТ, 2011. – 380 с.
53. **Грубый, С. В.** Методика расчёта выходных показателей точения / С. В. Грубый // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2019. – № 9(714). – С. 26–34. – DOI 10.18698/0536-1044-2019-9-26-34. – EDN LTMUBQ.
54. **Грубый, С. В.** Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами / С. В. Грубый. – Москва : Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2014. – 152 с. – ISBN 978-5-7038-3935-5. – EDN ZCKYSP.

55. **Гуревич, Я. Л.** Режимы резания труднообрабатываемых материалов : справочник / Я. Л. Гуревич, М. В. Горохов, В. И. Захаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – 240 с.
56. **Гусев, А. В.** Процесс стружкообразования и характеристики износа инструмента при точении конструкционных сталей / А. В. Гусев, В. В. Закураев // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. – 2016. – № 4. – С. 16–26. – DOI 10.22281/2413-9920-2016-02-04-16-26. – EDN XDZOQX.
57. **Датчик оптической передачи** // *Fagor CNC*. – URL: <https://www.fagor-cnc.com/> (дата обращения: 09.04.2025).
58. **Динамометрическая система для измерения силы резания при точении** / В. Ф. Безъязычный [и др.] // *СТИН*. – 2014. – № 7. – С. 29–32.
59. **Динамометрический расточной резец** / В. М. Свинин, В. А. Ушаков, А. Г. Тихонов [и др.] // *iPolytech Journal*. – 2023. – Т. 27, № 2. – С. 263–283. – DOI 10.21285/1814-3520-2023-2-263-283. – EDN QGFKDB.
60. **Добровинский, И. Р.** К вопросу контроля состояния режущей кромки резца виброакустическим методом / И. Р. Добровинский, Ю. Т. Медведик, М. Ю. Медведик // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. – 2014. – № 3(31). – С. 102–116.
61. **Долгов, В. А.** Повышение эффективности многономенклатурного машиностроительного производства путем адаптации работ технологического процесса к текущему состоянию технологической системы / В. А. Долгов // *Вестник МГТУ «Станкин»*. – 2011. – № 3(15). – С. 83–87. – EDN NWDWHR.
62. **Жилин, В. А.** Субатомный механизм износа режущего инструмента / В. А. Жилин. – Ростов : Изд-во Ростовского университета, 1973. – 165 с.
63. **Жиравок, А. Н.** Планирование эксперимента для построения математических моделей / А. Н. Жиравок // *Соросовский образовательный журнал*. – 2001. – № 9. – С. 121–127.
64. **Загидуллин, Р. Р.** Влияние подналадки на точность планирования в системах классов APS, MES / Р. Р. Загидуллин // *Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста : материалы Всероссийской научно-*

технической конференции, Уфа, 26–28 февраля 2019 года. – Уфа : ГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», 2019. – С. 133–139. – EDN SJVJHU.

65. **Залого, В. А.** Определение стойкости инструмента по уровню звука, сопровождающего процесс резания / В. А. Залого, В. В. Нагорный // *Металлообработка*. – 2013. – № 2(74). – С. 14–22.

66. **Зелинский, В. В.** Причинно-следственный аспект изнашивания режущих инструментов / В. В. Зелинский, А. В. Карпов // *Вестник Пермского государственного технического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2011. – Т. 13, № 3. – С. 46–50. – EDN OJCXGZ.

67. **Зубков, Н. Н.** Инструментальные материалы для изготовления лезвийных инструментов / Н. Н. Зубков // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. — 2013. — № 5. — С. 75–100. — EDN QZHKUV.

68. **Иващенко, А. П.** Методы и средства контроля состояния режущего инструмента / А. П. Иващенко // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2015. – № 12-3. – С. 393–396. – URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=7940> (дата обращения: 28.02.2024).

69. **Износу нет** // *Криогенная техника*. – URL: <http://cryotech.ru/Iznosunet.pdf> (дата обращения: 09.08.2025).

70. **Ингеманссон, А. Р.** Определение теплопроводности твердосплавного режущего инструмента с многослойными износостойкими покрытиями / А. Р. Ингеманссон, А. А. Бондарев // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 97–105. – DOI 10.17212/1994-6309-2019-21.3-97-105. – EDN RUBUSX.

71. **Ингеманссон, А. Р.** Основные положения методологии технологической подготовки производства и адаптивного управления в цифровых производственных системах для механической обработки / А. Р. Ингеманссон // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. – 2021. – № 1(248). – С. 15–18. – DOI 10.35211/1990-5297-2021-1-248-15-18.

72. **Инженерия поверхности деталей** / Колл. авт. ; под ред. А. Г. Сулова. — Москва : Машиностроение, 2008. — 320 с.
73. **Иноземцев, А. Н.** Автоматизированное управление режимами резания на основе применения самообучающихся систем / А. Н. Иноземцев, Н. И. Пасько, А. В. Анцев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. — 2012. — № 2-6(292). — С. 35–42. — EDN PUKQWL.
74. **Институт статистических исследований и экономики знаний НИУ ВШЭ.** — URL: <https://issek.hse.ru/news/950207637.html> (дата обращения: 09.06.2025).
75. **Исаев, И. Н.** Контроль износа инструмента по изменениям сил резания при токарной обработке / И. Н. Исаев, А. Ю. Парахин // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. — 2018. — Т. 24, № 4. — С. 801–806.
76. **Исмайлова, Е. Ю.** Влияние процессов износа на точность изготовления деталей / Е. Ю. Исмайлова, Ф. И. Демин // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. — 2011. — Т. 13, № 4-3. — С. 1062–1065. — EDN WMVEVT.
77. **Исследование показателей, определяющих режущие свойства инструментальных твёрдых сплавов при обработке труднообрабатываемых материалов** / В. В. Постнов, С. Х. Хадиуллин, Е. Н. Малахов, С. В. Старовойтов // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета*. — 2012. — Т. 16, № 8(53). — С. 118–125. — EDN PXALAF.
78. **Кабалдин, Ю. Г.** Влияние типа кристаллической решётки на процесс стружкообразования при резании / Ю. Г. Кабалдин, А. М. Кузьмишина // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. — 2017. — № 7(688). — С. 72–80. — DOI 10.18698/0536-1044-2017-7-72-80. — EDN YUQBSF.
79. **Как научить систему ЧПУ решать технологическую задачу по выбору надежных значений параметров процесса металлообработки** / А. Л. Плотников, Ю. Л. Чигиринский, Ж. С. Тихонова, Е. М. Фролов, Д. В. Крайнев // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. — 2022. — № 3(129). — С. 32–39. — DOI 10.30987/2223-4608-2022-3-32-39.

80. **Как повысить производительность металлообрабатывающего производства** [Электронный ресурс] // IN-VENT : официальный сайт. — Электрон. дан. — URL: https://www.in-vent.ru/notes/How_to_increase_productivity_metalworking_production/ (дата обращения: 14.04.2025).

81. **Кане, М. М.** Совершенствование станков с ЧПУ и методов их настройки / М. М. Кане // *Актуальные вопросы машиноведения*. — 2023. — Т. 12. — С. 55–61. — EDN IKCXJO.

82. **Капустин, Н. М.** Автоматизация производственных процессов в машиностроении / Н. М. Капустин, П. М. Кузнецов, А. Г. Схиртладзе. — М. : Высшая школа, 2004. — 414 с.

83. **Капустин, Н. М.** Диалоговое проектирование технологических процессов / Н. М. Капустин, В. В. Павлов, Л. А. Козлов. — Москва : Машиностроение, 1983. — 253 с.

84. **Капустин, Н. М.** Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ / Н. М. Капустин. — М. : Машиностроение, 1976. — 287 с.

85. **Капустин, Н. М.** Ускорение технологической подготовки механосборочного производства / Н. М. Капустин. — Москва : Машиностроение, 1972. — 254 с.

86. **Ким, В. А.** Исследование деформационных свойств обработанной поверхности / В. А. Ким, Т. А. Отряскина, Е. Б. Щелкунов // *Металлообработка*. — 2010. — № 6(60). — С. 35–39. — EDN TACMID.

87. **Клименко, И. С.** Оптимизация управленческих решений и соотношение неопределенности информация – время / И. С. Клименко, Л. В. Шарапова // *Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление*. — 2021. — № 1. — С. 37–43. — DOI 10.25586/RNU.V9187.21.01.P.037. — EDN AOEYQN.

88. **Козочкин, М. П.** Вибродиагностика состояния инструментов при точении металлов / М. П. Козочкин // *Машиностроитель*. — 2013. — № 1. — С. 9–19.

89. **Коновалова, Г. И.** Концепция формирования конкурентоспособности машиностроительного предприятия в условиях жесткой рыночной конкуренции / Г. И. Коновалова // *Организатор производства*. – 2019. – Т. 27, № 3. – С. 92–101. – DOI 10.25987/VSTU.2019.42.50.008. – EDN NYWRLZ.

90. **Кордюков, А. В.** Адаптация алгоритма работы системы автоматизированного проектирования технологического процесса для выполнения технологической подготовки в условиях мелкосерийного и единичного производства / А. В. Кордюков, М. И. Савченков, А. А. Чернова // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 26–32. – DOI 10.22213/2413-1172-2023-3-26-32. – EDN DLWROF.

91. **Корсаков, В. С.** Автоматизация проектирования технологических процессов в машиностроении / В. С. Корсаков, Н. М. Капустин, К.-Х. Темпельгоф, Х. Лихтенберг. — Берлин : Техник, 1985. — 304 с.

92. **Костина, А. А.** Моделирование процесса накопления и диссипации энергии при пластическом деформировании металлов / А. А. Костина, Ю. В. Баяндин, О. А. Плехов // *Физическая мезомеханика*. – 2014. – Т. 17, № 1. – С. 43–49. – EDN RZUCJV.

93. **Кривякин, К. С.** Особенности производства наукоемкой продукции / К. С. Кривякин // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. – 2012. – Т. 8, № 8. – С. 74–76. – EDN PANQAP.

94. **Кузнецов, О. М.** Вероятностные характеристики прочности авиационных материалов и размеров сортамента : справ. / О. М. Кузнецов ; под ред. С. О. Охупкина. – М., 1970.

95. **Кузнецов, С. В.** Промышленность макрорегиона «Северо-Запад»: адаптация к новым реалиям / С. В. Кузнецов, Е. А. Горин // *Экономика Северо-Запада: проблемы и перспективы развития*. – 2023. – № 3(74). – С. 17–23. – DOI 10.52897/2411-4588-2023-3-17-23. – EDN QAIQLS.

96. **Ласуков, А. А.** Влияние основных факторов процесса резания на стружкообразование при точении жаропрочных сплавов / А. А. Ласуков // *Горный*

информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. – № S3. – С. 356–369. – EDN NCUKKJ.

97. **Ласуков, А. А.** Выбор режимов обработки на основании температурных зависимостей процесса стружкообразования / А. А. Ласуков // *Вестник машиностроения*. – 2015. – № 6. – С. 74–77. – EDN VDLJEB.

98. **Ленчук, Е. Б.** Научно-технологическое развитие как стратегический национальный приоритет России / Е. Б. Ленчук // *Экономическое возрождение России*. – 2022. – № 1(71). – С. 58–65. – DOI 10.37930/1990-9780-2022-1-71-58-65. – EDN JSHPNL.

99. **Ленчук, Е. Б.** Технологическая модернизация как основа антисанкционной политики / Е. Б. Ленчук // *Проблемы прогнозирования*. – 2023. – № 4(199). – С. 54–66. – DOI 10.47711/0868-6351-199-54-66. – EDN HDROZI.

100. **Липатов А. А.** Особенности изнашивания твердосплавного инструмента при точении аустенитной стали // *Главный механик*. — 2015. — № 2. — С. 51–55.

101. **Липатов, А. А.** «Влияние неустойчивости стружкообразования и особенностей контактного взаимодействия на площадке износа задней поверхности твердосплавного инструмента на его изнашивание при точении аустенитной стали» / А. А. Липатов // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. — 2012. — № 13(100). — С. 30–34. — EDN PTVNCT.

102. **Липатов, А. А.** Влияние размера карбидных зёрен на режущие свойства вольфрамокобальтовых твёрдых сплавов при точении стали 12X18H10T / А. А. Липатов, С. И. Агапов // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. — 2004. — № 9. — С. 18–19. — ISSN 1990-5297.

103. **Липатов, А. А.** Исследование адгезионных сколов твердосплавного инструмента при точении аустенитной стали / А. А. Липатов // *Вестник машиностроения*. — 2016. — № 7. — С. 69–73. — Библиогр.: с. 73 (7 назв.). — ISSN 0042-4633.

104. **Логинов, Ю. Н.** Поведение пор в металле на начальном этапе прессования / Ю. Н. Логинов, К. В. Еремеева // *Современные металлические*

материалы и технологии (СММТ 2009) : труды Междунар. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 24–26 июня 2009 года. – Санкт-Петербург : Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», 2009. – С. 80–86. – EDN WYGQID.

105. **Локтев, Д.** Основные виды износостойких покрытий / Д. Локтев, Е. Ямашкин // *Наноиндустрия*. – 2007. – № 5. – С. 24–31. – EDN NXPGVV. – URL: http://nanoindustry.su/article_2729_179.pdf (дата обращения: 09.04.2025).

106. **Лоладзе, Т. Н.** Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М. : Машиностроение, 1982. – 320 с.

107. **Макаров, А. Д.** Износ и стойкость режущих инструментов / А. Д. Макаров. – М. : Машиностроение, 1978. – 264 с.

108. **Марголит, Р. Б.** Технология машиностроения: учебник для вузов / Р. Б. Марголит. – М.: Изд-во Юрайт, 2023. – 413 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-04273-3.

109. **Маркс, К.** Капитал. Критика политической экономии. Т. 1, кн. 1. Процесс производства капитала / К. Маркс; под ред. В. Я. Чеховского. – М.: РОССПЭН, 2015. – 991 с.

110. **Мartiнов, Г. М.** Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование их остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки / Г. М. Мартинов, А. С. Григорьев // *СТИН*. – 2012. – № 12. – С. 23–27. – EDN PSEUQV.

111. **Маслов, А. Р.** Диагностирование и контроль процесса резания по предельному состоянию качества обработанной поверхности / А. Р. Маслов // *Контроль. Диагностика*. – 2011. – № 9. – С. 49–51.

112. **Миронов, А. Ю.** Квантовый транспорт в тонких плёнках нитрида титана : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07 / А. Ю. Миронов. – Новосибирск, 2010.

113. **Митин, С. Г.** Автоматизация оценки производственной технологичности изделий в многономенклатурных системах / С. Г. Митин, П. Ю.

Бочкарёв, Л. Г. Бокова // Научноёмкие технологии в машиностроении. — 2014. — № 9. — С. 44–48.

114. **Митин, С. Г.** Определение рациональных уровней отсева проектных решений в системе автоматизированного планирования процессов / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарёв, А. В. Назарьев // Вектор науки. — 2021. — № 2. — URL: <https://www.kti.ru/publications.aspx?aid=799&empl=108&id=1513>.

115. **Митин, С. Г.** Разработка моделей и методик автоматизации проектных процедур для технологических операций со сложной структурой / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарёв, Л. Г. Бокова // Автоматизация в промышленности. — 2018. — № 2. — С. 45–51.

116. **Митин, С. Г.** Совершенствование принципов автоматизированного планирования многономенклатурных технологических процессов механообработки / С. Г. Митин, П. Ю. Бочкарёв // Научноёмкие технологии в машиностроении. — 2024. — № 1. — С. 16–22. — DOI: 10.30987/2223-4608-2024-16-22. — URL: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/73594/view>.

117. **Модель системы напряжений и параметров деформирования срезаемого слоя в зоне резания** / Р. Ю. Некрасов, У. С. Путилова, Е. В. Корешкова, Д. А. Харитонов // *Системы. Методы. Технологии*. — 2013. — № 4(20). — С. 83–87. — EDN ROYKNL.

118. **Мойсейчик, Е. А.** Исследование теплообразования и зарождения разрушения в стальной растянутой пластине с конструктивно-технологическим дефектом / Е. А. Мойсейчик // *Прикладная механика и техническая физика*. — 2013. — Т. 54, № 1(317). — С. 134–142. — EDN UHSXND.

119. **Мокрицкий, Б. Я.** Использование покрытий инструментального материала для диагностики технологической системы токарной обработки нержавеющей сталей по составляющим силы резания / Б. Я. Мокрицкий // *Упрочняющие технологии и покрытия*. — 2021. — Т. 17, № 3(195). — С. 110–113. — EDN SOWXLG.

120. **Моргунов, Ю. А.** Научноёмкость машиностроительного производства и его элементов / Ю. А. Моргунов, Б. П. Саушкин, Б. В. Шандров // *Научноёмкие*

технологии в машиностроении. – 2019. – № 6(96). – С. 37–44. – DOI 10.30987/article_5ce675a22352c1.74868398. – EDN VTRYTZ.

121. **Назарьев, А. В.** Формализация стратегии выявления критичных требований к сборке при технологической подготовке многономенклатурных производств / А. В. Назарьев, П. Ю. Бочкарёв, С. Г. Митин // *Научноёмкие технологии в машиностроении.* — 2022. — № 10. — С. 42–48. — DOI: 10.30987/2223-4608-2022-10-42-48. — URL: <https://www.kti.ru/publications.aspx?aid=799&empl=108&id=1513>.

122. **Некрасов, Ю. И.** Разработка методологии управления обработкой при точении жаропрочных сталей и сплавов на станках с ЧПУ : специальность 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» : дис. ... д-ра техн. наук / Юрий Иннокентьевич Некрасов. – Тюмень, 2010. – 295 с. – EDN QFOMVB.

123. **Новиков, А. Е.** Надежность технических систем. Структурная надежность: краткий курс лекций и задания для выполнения СРС / А. Е. Новиков, Н. В. Шибитова. – Волгоград: ВолгГТУ, 2016. – 64 с. – ISBN 978-5-9948-2341-5. – EDN XQSNOP.

124. **Обоснование математического обеспечения и разработка алгоритма оценки результатов плазменной модификации рабочих поверхностей металлорежущего инструмента** / Б. М. Бржозовский, В. В. Мартынов, Е. П. Зинина, В. О. Стариннова // *Научноёмкие технологии в машиностроении.* – 2013. – № 5(23). – С. 41–48. – EDN QBXTSR.

125. **Обработка резанием жаропрочных высокопрочных и титановых сплавов** / Н. И. Резников [и др.] ; под ред. Н. И. Резникова. – М. : Машиностроение, 1972. – 198 с.

126. **Овсеенко, А. Н.** Технологические проблемы обеспечения качества поверхностного слоя деталей машин / А. Н. Овсеенко // *Справочник. Инженерный журнал.* – 2002. – № 9. – С. 10–12.

127. **Определение рациональных условий эксплуатации твердосплавного инструмента с наноструктурированным поверхностным**

слоем рабочей части по критерию повышения долговечности при точении конструкционных материалов различных групп : заключительный отчёт о НИР № 101-01/2021 (26/365-21) / ВолгГТУ, ИМАШ РАН. – 2021.

128. **Отряскина, Т. А.** Прогнозирование микротвёрдости поверхности при обработке резанием / Т. А. Отряскина, М. Ю. Сариллов // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2015. – Т. 17, № 6-2. – С. 461–465. – EDN WDCVEN.

129. **Оценивание качества поверхностного слоя рабочей части режущего инструмента по параметру микротвёрдости / Б. М. Бржозовский, Е. П. Зинина, В. В. Мартынов, Е. С. Плешакова // Металлообработка.** – 2015. – № 2(86). – С. 15–21. – EDN UAVUNZ.

130. **Оценка влияния дисперсности структуры стали на магнитные и механические свойства / Р. А. Соколов, В. Ф. Новиков, К. Р. Муратов, А. Н. Венедиктов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты).** – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 93–110. – DOI 10.17212/1994-6309-2021-23.4-93-110. – EDN DRWVUU.

131. **Павлова, А. Н.** Математическое моделирование и оптимизация технологических процессов / А. Н. Павлова, О. В. Кузнецова // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение.* – 2021. – № 1(65). – С. 78–87. – DOI 10.6060/snt.20216501.0010. – EDN СКPIUI.

132. **Папшева, Н. Д.** Тепловые явления при поверхностном пластическом деформировании / Н. Д. Папшева, М. К. Александров, О. М. Акушская // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2010. – Т. 12, № 4-3. – С. 682–685. – EDN NXJVIF.

133. **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. – EDN PQMJAA.

134. **Петрешин, Д. И.** Разработка и создание самообучающейся технологической системы с адаптивным управлением параметрами качества поверхностного слоя деталей машин: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08, 05.13.06 / Д. И. Петрешин. – Брянск, 2010. – 281 с.

135. **Плесков, В. Г.** Автоматизация и твердосплавный инструмент / В. Г. Плесков // *РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация.* – 2013. – № 3(81). – С. 52–54. – EDN XRLHUL.

136. **Плесков, В. Г.** Разброс стойкости твердосплавного инструмента / В. Г. Плесков // *Ритм: Машиностроение.* – 2018. – № 4. – С. 86–90.

137. **Плесков, В. Г.** Разброс стойкости твердосплавного инструмента / В. Г. Плесков // *Ритм: Машиностроение.* – 2018. – № 4. – С. 86–90.

138. **Плесков, В. Г.** Стружколомение вместо стружкодробления / В. Г. Плесков // *РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация.* – 2012. – № 7(75). – С. 66–69. – EDN XXMNWL.

139. **Плотников, А. Л.** Автоматизированные способы определения значений параметров процесса токарной и фрезерной обработки на станках с ЧПУ / А. Л. Плотников, А. С. Сергеев, Т. В. Уварова. — Старый Оскол : ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2017. — 212 с. — ISBN 978-5-94178-513-1. — EDN YSJSOL.

140. **Плотников, А. Л.** Управление режимами резания на токарных станках с ЧПУ : монография / А. Л. Плотников, А. О. Таубе ; ВолгГТУ. – Волгоград : Политехник, 2003. – 184 с.

141. **Повышение эффективности точения деформируемых сталей и сплавов с опережающим пластическим деформированием** : монография / Д. В. Крайнев, Ю. Н. Полянчиков, А. А. Бондарев ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – 160 с.

142. **Подураев, В. Н.** Резание труднообрабатываемых материалов : учеб. пособие для машиностр. и приборостр. специальностей вузов / В. Н. Подураев. – М. : Высшая школа, 1974. – 590 с.

143. **Покрытие твердосплавных пластин и его виды** // *Wolfstar.* – URL: <https://wolfstar.ru/> (дата обращения: 09.04.2025).

144. **Полетика, М. Ф.** Влияние свойств обрабатываемого материала на процесс стружкообразования / М. Ф. Полетика // *Вестник машиностроения*. – 2001. – № 7. – С. 45–48.

145. **Пономарев, Б. Б.** Выбор динамометра для измерения силы резания при концевом фрезеровании / Б. Б. Пономарев, Ш. Х. Нгуен // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2019. – № 5(78). – С. 15–24. – DOI 10.30987/article_5cda64cc611ed4.66880449. – EDN JTBFBFL.

146. **Попов, Н. А.** Обзор методов теоретического определения силы резания зарубежных научных школ / Н. А. Попов // *Политехнический молодежный журнал*. – 2019. – № 1(30). – С. 5. – DOI 10.18698/2541-8009-2019-1-432. – EDN POVDAV.

147. **Попова, О. Б.** Процесс оптимизации в сложных технических системах и управлении ими / О. Б. Попова, Б. К. Попов, В. И. Ключко // *Современные проблемы науки и образования*. – 2013. – № 2. – С. 125. – EDN RXUNYH.

148. **Праведников, И. С.** Влияние марки обрабатываемых и инструментальных сплавов на термо-ЭДС / И. С. Праведников // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. – 2006. – № 1. – С. 47. – EDN TWWNZN.

149. **Прайор, Т. Р.** Контроль износа токарного резца с использованием оптического датчика засветки / Т. R. Pryor // *Wear*. – 1971. – Т. 17, № 5. – С. 399–409. – DOI 10.1016/0043-1648(71)90063-6.

150. **Прогнозирование критического состояния материала на основе скорости накопления энергии** / А. И. Ведерникова, А. Н. Вшивков, А. А. Костина, О. А. Плехов // *Математическое моделирование в естественных науках*. – 2018. – Т. 1. – С. 43–46. – EDN SIDKDF.

151. **Программа «Цифровая экономика Российской Федерации»**, утвержденная Правительством РФ от 28 июля 2017 г. № 1632-р. — URL: <http://www.government.ru/docs/28653/> (дата обращения: 03.02.2024).

152. **Проектирование технологической подготовки производства** / В. Д. Костюков, В. Н. Сычев, А. И. Селиверстов, А. В. Цырков // *Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2010)*:

труды Междунар. конф., Москва, 19–21 октября 2010 г. – М.: ООО «Аналитик», 2010. – С. 293–297. – EDN TCSTBT.

153. **Проников, А. С.** Надежность машин / А. С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.

154. **Пронин, А. И.** Теория автоматического управления / А. И. Пронин, Е. Б. Щелкунов. – 2-е изд., доп. – Комсомольск-на-Амуре : Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2015. – 108 с. – ISBN 978-5-7765-1132-5. – EDN HKBDAK.

155. **Р 50-601-20-91.** Рекомендации по оценке точности и стабильности технологических процессов (оборудования). – М. : ВНИИС, 1991.

156. **Рабинович, В. А.** Кремния карбид / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин // *Краткий химический справочник*. – Л. : Химия, 1978. – 392 с.

157. **Развитие науки о резании металлов** / пред. ред. коллегии д-р техн. наук Н. Н. Зорев. — Москва : Машиностроение, 1967. — 416 с.

158. **Разработка динамометрической системы для измерения силы резания при точении** / В. Ф. Безъязычный, А. В. Кордюков, М. В. Тимофеев, Р. Н. Фоменко // *Известия МГТУ МАМИ*. – 2014. – Т. 2, № 1(19). – С. 171–176. – EDN SMMVKV.

159. **Разработка системы управления технологическим процессом многономенклатурного машиностроительного производства в условиях применения станков с ЧПУ** / В. А. Ошурков, Л. С. Цуприк, Е. С. Майорова [и др.] // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2015. – Т. 3, № 3. – С. 53–55. – EDN UBIMPN.

160. **Ржевский, Г. А.** Как управлять сложными системами / Г. А. Ржевский, П. О. Скобелев. — Калуга : ЗАО «Калужский завод телеграфной аппаратуры», 2015. — 288 с.

161. **Рыжкин, А. А.** Об эффективности управления электрическими процессами в условиях резания / А. А. Рыжкин, В. Э. Бурлакова // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2012. – Т. 12, № 2-2(63). – С. 80–86. – EDN PFOZYB.

162. **Рынок металлорежущего инструмента** // *Global Market Insights*. – URL: <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/metal-cutting-tools-market> (дата обращения: 09.08.2025).
163. **Самсонов, Г. В.** Нитриды / Г. В. Самсонов. – Киев : Наукова думка, 1969. – 380 с.
164. **Семейко, С. А.** Рациональное использование станков с ЧПУ в условиях многономенклатурного производства / С. А. Семейко // *Актуальные исследования*. – 2023. – № 43(173). – С. 7–10. – EDN JZUCLR.
165. **Синопальников, В. А.** Надежность и диагностика технологических систем: учебник / В. А. Синопальников, С. Н. Григорьев. – М.: Высшая школа, 2005. – 343 с.
166. **Система контроля инструмента и процесса обработки** // *Simatic Market*. – URL: <http://simatic-market.ru/catalog/Siemens-CA01/10042297/info/> (дата обращения: 09.08.2025).
167. **Системы измерения и контроля инструмента** // *AQAD*. – URL: <http://www.aqad.ru/index.php?tree=1000000&tree2=9990284&tree3=10007955&tree4=7500380&tree5=7500306&tree6=7500290> (дата обращения: 09.04.2025).
168. **Соколов, А. Ю.** Совершенствование организации и планирования единичного и мелкосерийного производства в условиях применения станков с ЧПУ: дис. ... канд. экон. наук: 08.00.05 / А. Ю. Соколов. – М., 1984. – 189 с.
169. **Способ измерения величины термоэдс естественной термопары инструмент – деталь** : пат. 2117557 РФ, МПК 7 B23B 25/06 / А. Л. Плотников ; ВолгГТУ. – 1999.
170. **Способ определения режущих свойств твердосплавных инструментов** : а. с. № 1009609 СССР, МПК B23B 1/00 / А. Л. Плотников, Е. В. Дудкин, М. Е. Дудкин ; Волгоградский политехнический институт. – 1983. – Бюл. № 13.
171. **Справочник по электроизмерительным приборам** / под ред. К. К. Илюнина. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 784 с.

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

173. **Старков, В. К.** Физика и оптимизация режимов резания материалов / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.

174. Статьи научно-исследовательского института глобальных процессов
Электронный ресурс // Научно-исследовательский институт глобальных процессов : официальный сайт. — URL: <https://www.niiglob.ru/en/publications/articles/828.html> (дата обращения 14.08.2025)

175. **Суслов, А. Г.** Технология машиностроения / А. Г. Суслов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Машиностроение, 2007. — 429 с. — (Для вузов). — ISBN 978-5-217-03371-3. — EDN OWEAPB.

176. **Табаков, В. П.** Функциональные параметры процесса резания режущим инструментом с износостойкими покрытиями / В. П. Табаков, А. С. Верещака, С. Н. Григорьев. – Ульяновск : Ульяновский государственный технический университет, 2012. – 172 с. – ISBN 978-5-9795-1013-2. – EDN TNBGBJ

177. **Талантов, Н. В.** Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М. : Машиностроение, 1992. – 240 с.

178. **Тарасова, М. С.** Разработка физических основ электроимпульсного спекания электропроводных нитридных керамик : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.07 / М. С. Тарасова. – Москва, 2019.

179. **Тенденции развития и модернизация промышленности регионов России. Итоги 2022 года** // Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова. — URL: <https://www.рэу.рф/~file/44385/Тенденции+развития+и+модернизации+промышленности+регионов+России+выпуск+4.pdf> (дата обращения: 04.02.2024).

180. **Теребова, С. В.** Развитие малого инновационного бизнеса в промышленном и научно-образовательном секторе России / С. В. Теребова, В. Н. Борисов // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз.* — 2019. – Т. 12, № 3. – С. 55–76. – DOI 10.15838/esc.2019.3.63.4. – EDN BCPNYF.

181. **Терехов, В. А.** Управление в динамических системах: современные задачи и подходы / В. А. Терехов // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 6(119). – С. 20–29. – EDN NWHFJN.
182. **Тимофеев, В. Ю.** Модель устройства диагностики металлорежущего инструмента по сигналу термо-эдс / В. Ю. Тимофеев, А. А. Зайцев, А. В. Крутов // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. — 2009. — Т. 5, № 5. — С. 42–45.
183. **Трент, Э. М.** Резание металлов / Э. М. Трент ; пер. с англ. под ред. А. А. Колесникова. – М. : Машиностроение, 1980. – 351 с.
184. **Труханов, В. М.** Надёжность в технике = Reliability in technique: монография / В. М. Труханов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., 2017. – 656 с.
185. **Устройство бесконтактного контроля углов заточки и координат вершины инструмента на станках с числовым программным управлением (ЧПУ):** пат. 2399461 РФ, МПК В23 В25/06, В23 Q17/24 / С. Р. Абульханов, А. Ю. Дмитриев, Н. Л. Казанский, В. А. Сойфер, С. И. Харитонов; Учреждение Российской академии наук «Институт систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН)». – 2010.
186. **Устройство для измерения температуры резца естественной термопарой :** пат. 2650827 Российская Федерация, МПК G01K 13/00, G01K 7/02 / А. Л. Плотников, М. Г. Кристаль, А. С. Сергеев, Ж. С. Тихонова, Т. В. Уварова ; ВолгГТУ. – 2018.
187. **Федеральная служба государственной статистики.** – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/57783> (дата обращения: 09.08.2025).
188. **Функциональные параметры процесса резания режущим инструментом с износостойкими покрытиями :** учеб. пособие / В. П. Табаков, А. С. Верещака, С. Н. Григорьев, А. А. Верещака. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ульяновск : УлГТУ, 2023. – 186 с. : ил.
189. **Хамдохов, А. З.** Структурно-фазовая однородность субмикронных плёнок нитрида титана и способы её повышения : дис. ... канд. техн. наук : 01.04.15 / А. З. Хамдохов. – Нальчик, 2017.

190. **Черепанов, Н. В.** Проблемы и задачи развития искусственного интеллекта на машиностроительном предприятии / Н. В. Черепанов, С. П. Буслаев // *Инновации и инвестиции*. – 2021. – № 7. – С. 175–179. – EDN GDPPMK.

191. **Чигиринская, Н. В.** Моделирование неперiodических стохастических процессов : учеб. пособие / Н. В. Чигиринская, Ю. Л. Чигиринский, А. С. Горобцов ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – 107 с.

192. **Чигиринский, Ю. Л.** Информационная структура маршрутного технологического проектирования / Ю. Л. Чигиринский // *Научноёмкие технологии в машиностроении*. — 2019. — № 8(98). — С. 41–48. — URL: <https://journals.rcsi.science/2223-4608/article/view/284089>.

193. **Чигиринский, Ю. Л.** Количественная оценка стабильности процессов механической обработки / Ю. Л. Чигиринский, А. В. Евтюнин, В. О. Харламов // *Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении*. – Волгоград, 2021. – № 1(248). – С. 41–44.

194. **Чигиринский, Ю. Л.** Оценка стабильности процессов механической обработки с использованием многомерных регрессионных моделей / Ю. Л. Чигиринский, Н. В. Чигиринская, А. В. Евтюнин // *Инновации в машиностроении (ИнМаш–2021) = Innovations in Mechanical Engineering (ISPCIME – 2021) : сб. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф.* (г. Новосибирск, 7–9 октября 2021 г.) / под ред. С. И. Василевской, Ю. С. Кудрявцевой ; Новосибирский государственный технический университет [и др.]. – Новосибирск, 2021. – С. 51–58.

195. **Чигиринский, Ю. Л.** 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. — EDN PQMJAA.

196. **Чигиринский, Ю. Л.** Современное состояние и тенденции развития технологической подготовки машиностроительного производства / Ю. Л. Чигиринский // *Научноёмкие технологии в машиностроении*. — 2020. — № 8. — С.

29–35. — DOI: 10.30987/2223-4608-2020-8-29-35. — URL: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/38807/view>.

197. **Чигиринский, Ю. Л.** Технологические аспекты подготовки цифрового машиностроительного производства / Ю. Л. Чигиринский, А. Р. Ингеманссон // *Научноёмкие технологии в машиностроении*. — 2023. — № 9. — С. 39–48. — DOI: 10.30987/2223-4608-2023-39-48. — URL: <https://naukaru.ru/ru/nauka/article/52503/view>.

198. **Чигиринский, Ю. Л.** Трансформация взглядов на теорию резания при переходе к «цифре» / Ю. Л. Чигиринский, Д. В. Крайнев, Е. М. Фролов // *Научноёмкие технологии в машиностроении*. — 2024. — № 6(156). — С. 3–12. — DOI 10.30987/2223-4608-2024-6-3-12. — EDN QITJND.

199. **Чигиринский, Ю. Л.** Трансформация информационной структуры как инструмент повышения эффективности многономенклатурного производства / Ю. Л. Чигиринский, Д. В. Крайнев, Ж. С. Тихонова // *Научноёмкие технологии в машиностроении*. — 2024. — № 4(154). — С. 29–40. — DOI 10.30987/2223-4608-2024-4-29-40. — EDN EIXHSQ.

200. **Чигиринский, Ю. Л.** Цифровизация машиностроительного производства: технологическая подготовка, производство, прослеживание / Ю. Л. Чигиринский, Д. В. Крайнев, Е. М. Фролов // *Научноёмкие технологии в машиностроении*. — 2022. — № 8(134). — С. 39–48. — DOI 10.30987/2223-4608-2022-8-39-48. — EDN PFVKOK.

201. **Шатагин, Д. А.** Повышение динамической устойчивости процесса резания на основе подходов нелинейной динамики и искусственного интеллекта : дис. ... д-ра техн. наук. — Нижний Новгород, 2018.

202. **Шиплюк, В. С.** Развитие обрабатывающих производств: особенности и закономерности / В. С. Шиплюк // *Стратегии бизнеса*. — 2022. — Т. 10, № 12. — С. 322–331. — DOI 10.17747/2311-7184-2022-12-322-331. — EDN RLERNС.

203. **Шифрин, А. Ш.** Обработка резанием коррозионностойких, жаропрочных и титановых сталей и сплавов / А. Ш. Шифрин, Л. М. Резницкий ;

под ред. Л. М. Резницкого. – М. ; Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1964. – 447 с.

204. **Abouelatta, O. B.** Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations / O. B. Abouelatta, J. Madl // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2001. – Vol. 118, № 1–3. – P. 269–277.

205. **Adaskin, A. M.** Fracture of ledeburite and hypereutectoid high-speed steels / A. M. Adaskin, L. S. Kremnev, I. Y. Sapronov // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2011. – Vol. 53, No. 5–6. – P. 280–284. – DOI 10.1007/s11041-011-9383-1. – EDN PEFYFV.

206. **Adaskin, A. M.** Study of wear mechanism of hard-alloy tools during machining of refractory alloys / A. M. Adaskin, A. A. Vereshchaka, A. S. Vereshchaka // *Journal of Friction and Wear*. – 2013. – Vol. 34, No. 3. – P. 208–213. – DOI 10.3103/S1068366613030021. – EDN RFGTQB.

207. **Altintas, Y.** Analytical prediction of stability lobes in milling / Y. Altintas // *CIRP Annals*. – 2000. – Vol. 49, № 1. – P. 35–40.

208. **Altintas, Y.** Virtual machining / Y. Altintas [et al.] // *CIRP Annals*. – 2005. – Vol. 54, № 2. – P. 115–138.

209. **Ambadekar, R.** CNN-based tool monitoring system to predict life of cutting tool / R. Ambadekar, C. Choudhari // *SN Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 2. – Article ID 1525. – DOI: 10.1007/s42452-020-2598-2.

210. **Artis — контроль инструмента и процесса обработки** // *Uselogic*. – URL: <https://uselogic.ru/catalogs/siemens-ca01/artis---kontrol-instrumenta-i-protsessa-obrabotki-43302/description/> (дата обращения: 09.08.2025).

211. **Astakhov, V. P.** A methodology for practical cutting force evaluation based on the energy spent in the cutting system / V. P. Astakhov, X. Xiao // *Machining Science and Technology*. – 2008. – Vol. 12. – P. 325–347.

212. **Astakhov, V. P.** Importance of temperature in metal cutting and its proper measurement/modeling / V. P. Astakhov, J. Outeiro // *Measurement in Machining and Tribology* / ed. P. Davim. – Springer, 2019. – Ch. 1. – P. 1–47.

213. **Automatic monitoring of tool status:** пат. 6202002 US, B1 / B. Fainstein, E. Tabachnik, M. Zuckerman, I. Rubashkin; Omat Ltd. – 2001.
214. **Bilgili, E.** Tool flank wear prediction using high-frequency machine data from industrial edge device / E. Bilgili, A. Riza, T. Ozkan // *Procedia CIRP*. – 2022. – Vol. 108. – P. 324–329. – DOI: 10.1016/j.procir.2022.03.050.
215. **Broniszewski, K.** Al₂O₃-Mo cutting tools for machining hardened stainless steel / K. Broniszewski, J. Wozniak, K. Czechowski [et al.] // *Ceramics International*. – 2015. – Vol. 41, No. 10. – P. 14190–14196.
216. **Budak, E.** Chatter stability in milling / E. Budak, Y. Altintas // *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. – 1998. – Vol. 120, № 1. – P. 22–36.
217. **Chigirinskii, Yu. L.** Method for assessing the thermophysical properties of the contact pair tool – steel workpiece / Yu. L. Chigirinskii, Zh. S. Tikhonova, D. V. Krainev // *Journal of Physics: Conference Series : Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021 (IITMM 2021)*, Gelendzhik, 31 мая – 6 июня 2021 года. – Gelendzhik : IOP Publishing, 2021. – Vol. 2131. – P. 052012. – DOI 10.1088/1742-6596/2131/5/052012. – EDN HHKTKI.
218. **Chigirinsky, Ju. L.** Structural optimization of technological route using simulation modeling / Ju. L. Chigirinsky, N. V. Chigirinskaya, I. V. Firsov // *Proceedings of 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.2015.7414925.
219. **Cutting tool wear monitoring with the use of impedance layers** = Nadzor trošenja reznog alata upotrebom otpornih slojeva / M. Sadílek, J. Kratochvíl, J. Petrů, R. Čep, T. Zlámal, D. Stančková // *Tehnički Vjesnik*. – 2014. – Vol. 21, No. 3. – P. 639–644.
220. **Dahmoune, A.** Development of an adaptive tool condition monitoring system: integration of CBR with CNN / A. Dahmoune, A. Djelloul, M. Belkadi, A. Toumi // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2025. – (в печати). – DOI: 10.1007/s10845-025-01927-0.

221. **Denkena, B.** Online monitoring of cutting tool wear using force signals / B. Denkena, M. Grove, D. Kästner // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – Amsterdam: Elsevier, 2012. – Vol. 5, № 1. – P. 52–57. – DOI 10.1016/j.cirpj.2011.08.002.
222. **Detection process approach of tool wear in high speed milling** / M. Kious, M. A. Yallese, B. Fnides, R. Khattabi, M. Elbah // *Measurement*. – 2010. – Vol. 43, № 10. – P. 1439–1446. – DOI 10.1016/j.measurement.2010.07.011.
223. **Digital Central Asia: State of the Art** [Электронный ресурс] // Eurasian Research. — URL: <https://www.eurasian-research.org/publication/digital-central-asia-state-of-the-art/?lang=ru> (дата обращения: 14.05.2025)
224. **Digital Programme** [Электронный ресурс] // European Commission Digital Strategy. — URL: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/activities/digital-programme> (дата обращения: 14.05.2025).
225. **Elminir, H. K.** Efficient deep learning model for predicting cutter life in high-speed CNC milling / H. K. Elminir, M. A. El-Brawany, H. F. Hassan // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – Cham: Springer, 2023. – Vol. 127, № 9–10. – P. 3475–3490. – DOI 10.1007/s00170-023-11177-4.
226. **Fang, Y.** Метод контроля износа режущего инструмента при токарной обработке по форме стружки / Y. Fang, M. A. Elbestawi // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1995. – Т. 35, № 12. – С. 1511–1526. – DOI 10.1016/0890-6955(94)P2585-T.
227. **Fisher, R. A.** Statistical methods for research workers / R. A. Fisher. – 12th ed. – Edinburgh : Oliver and Boyd, 1954. – ISBN 978-0-05-002170-5.
228. **Garcia-Ordas, M. T.** Tool wear monitoring using an online, automatic and low cost system based on local texture / M. T. Garcia-Ordas, E. Alegre Gutiérrez, R. Alaiz Rodríguez, V. González-Castro // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2018. – Vol. 112. – P. 98–112.
229. **H10F** [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.topincity.ru/frezy/H10F.pdf?ysclid=ltm5lz9v2e465895496> (дата обращения: 09.06.2025).

230. **Hassan, M.** Intelligent machining: real-time tool condition monitoring and intelligent adaptive control systems / M. Hassan, A. Sadek, H. Attia, F. Ismail // *Journal of Machine Engineering*. – 2018. – Vol. 18, № 1. – P. 5–18.

231. **Hesser, D. F.** Tool wear monitoring of a retrofitted CNC milling machine using artificial neural networks / D. F. Hesser, B. Markert // *Manufacturing Letters*. – 2019. – Vol. 19. – P. 1–4.

232. **Influence of the thickness of multilayer composite nano-structured coating Ti-TiN-(Ti,Al,Si)N on the tool life of metal-cutting tools and the nature of wear** / A. Vereschaka, S. Grigoriev, A. Aksenenko [et al.] // *Coatings*. – 2019. – Vol. 9, No. 11. – P. 730. – DOI 10.3390/coatings9110730. – EDN QIAWJU.

233. **Jaen-Cuellar, A. Y.** System for tool-wear condition monitoring in CNC machines under variations of cutting parameters based on sensor fusion of spindle-motor current and stray flux signals / A. Y. Jaen-Cuellar, R. Osornio-Rios, M. Trejo-Hernandez [et al.] // *Sensors*. – Basel: MDPI, 2021. – Vol. 21, № 4. – Art. 1325. – 21 p. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1325> (дата обращения: 27.03.2025).

234. **Jamshidi, M.** Tool condition monitoring using machine tool spindle current and LSTM neural network model / M. Jamshidi [et al.] // *Preprints*. – 2024. – 15 p. – URL: <https://www.preprints.org/manuscript/202407.1021/v1> (дата обращения: 27.05.2025).

235. **Jamshidi, M.** Tool condition monitoring using machine tool spindle electric current and multiscale analysis while milling steel alloy / M. Jamshidi, J.-F. Chatelain, X. Rimpault, M. Balazinski // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – Basel: MDPI, 2022. – Vol. 6, № 5. – Art. 115. – 17 p. – DOI 10.3390/jmmp6050115.

236. **Jerold, B. D.** Machining of AISI 316 stainless steel under carbon dioxide cooling / B. D. Jerold, M. P. Kumar // *Materials & Manufacturing Processes*. – 2012. – Vol. 27, No. 10. – P. 1059–1065.

237. **Jozwik, J.** Laser interferometer diagnostics of CNC machine tools / J. Jozwik, I. Kuric, L. Semotiuk // *Komunikacie*. — 2014. — Vol. 16, № 3A. — P. 169–175.

238. **Karpuschewski, B.** Tool condition monitoring in turning based on cutting forces and neural networks / B. Karpuschewski, N. Wolff, C. Blum // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – Amsterdam: Elsevier, 2011. – Vol. 51, № 4. – P. 287–296. – DOI 10.1016/j.ijmachtools.2010.12.001.
239. **Kato, H.** A study on the high-efficiency cutting of austenitic stainless steel using an HfN-type coated tool / H. Kato, K. Shintani, M. Nakamura [et al.] // *Journal of Advanced Mechanical Design Systems & Manufacturing*. – 2012. – Vol. 6, No. 6. – P. 829–840.
240. **Kim, T. Y.** Adaptive cutting force control for a machining center by using indirect cutting force measurements / T. Y. Kim, J. Kim // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1996. – Vol. 36. – P. 925–937.
241. **Klocke, F.** Manufacturing Processes 1. Cutting / F. Klocke. – 2011.
242. **Klocke, F.** Modeling and Planning of Manufacturing Processes: Numerical Methods on Forming Processes / F. Klocke. – (VDI-Buch). – Berlin: Springer, 2005. – ISBN 978-3-540-23494-4.
243. **Krehel, R.** Diagnostic analysis of cutting tools using a temperature sensor / R. Krehel, D. Krchová, M. Kočiško // *Key Engineering Materials*. — 2016. — Vol. 669. — P. 382–390.
244. **Kundřík, J.** Use of Neural Networks in Tool Wear Prediction / J. Kundřík, M. Kočiško, M. Pollák, M. Telišková, A. Bašistová, Z. Fiala // *MATEC Web of Conferences*. – 2019. – EDP Sciences. – 04003.
245. **Lamraoui, M.** Cyclostationarity approach for monitoring chatter and tool wear in high speed milling / M. Lamraoui, M. Thomas, M. El Badaoui // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2014. – Vol. 44, № 1–2. – P. 177–198.
246. **LFA 467 HyperFlash – Light Flash Apparatus** // *NETZSCH Analyzing & Testing*. — URL: <https://analyzing-testing.netzsch.com/ru/pribory-resheniya/temperaturoprovodnost-i-teploprovodnost/lfa-467-hyper-flash-light-flash-apparatus> (дата обращения: 05.05.2025).

247. **Li, L.** Tool condition monitoring for high-performance machining systems: a review / L. Li, Y. Zhang, H. Liu, G. Zhang // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, № 6. – Article ID 2206. – DOI: 10.3390/s22062206.
248. **Liang, Q.** Design and analysis of a sensor system for cutting force measurement in machining processes / Q. Liang, D. Zhang, G. Coppola, J. Mao, W. Sun, Y. Wang, Y. Ge // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16, № 1. – Art. 70. – DOI 10.3390/s16010070. – URL: <https://doi.org/10.3390/S16010070>.
249. **Liang, S. Y.** Machining process monitoring and control: The state-of-the-art / S. Y. Liang, R. L. Hecker, G. Robert Landers // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2004. – Vol. 126. – P. 297–310.
250. **Liu, G. J.** Wear mechanism of cemented carbide tool in high speed milling of stainless steel / G. J. Liu, Z. C. Zhou, X. Qian [et al.] // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 31, Art. 98. – DOI 10.1186/s10033-018-0298-2
251. **Liu, G. L.** Tool damage and its effect on the machined surface roughness in high-speed face milling the 17-4PH stainless steel / G. L. Liu, B. Zou, C. Z. Huang [et al.] // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 83, No. 1–4. – P. 1–8.
252. **Liu, Q.** Research on online monitoring of chatter based on continuous wavelet transform and CNN–ViT / Q. Liu, Y. Feng, X. Wang, Y. He // *Mechanical Sciences*. – 2025. – Vol. 16, № 2. – P. 167–178. – DOI: 10.5194/ms-16-167-2025.
253. **M’saoubi, R.** Innovative methods for the investigation of tool-chip adhesion and layer formation during machining / R. M’saoubi, H. Chandrasekaran // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 2005. – Vol. 54, No. 1. – P. 59–62.
254. **Machining: Fundamentals and Recent Advances** / ed. J. Paulo Davim. – London: Springer, 2008. – 366 p. – ISBN 978-1-84800-212-8.
255. **Mahesh, K.** Machinability of Inconel 718: A critical review on the impact of cutting temperatures / K. Mahesh, J. T. Philip, S. Joshi, B. Kuriachen // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 36. – P. 753–791.

256. **Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design** / Y. Altintas. – 2nd ed. – Cambridge: Cambridge University Press, 2012. – 366 p. – ISBN 978-1-107-01574-5.

257. **Metal Cutting Tools Market** Электронный ресурс // GM Insights. — Электрон. дан. — URL: <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/metal-cutting-tools-market> (дата обращения: 24.06.2025).

258. **Method for indicating end mill wear**: пат. 4802095 US / J. Jeppsson; The Boeing Company. – 1989.

259. **Mijwil, M.** Artificial Neural Networks Advantages and Disadvantages / M. Mijwil // *Mesopotamian Journal of Big Data*. – 2021. – P. 29–31. – DOI: 10.58496/MJBD/2021/006.

260. **Nalbant, M.** Effect of cryogenic cooling in milling process of AISI 304 stainless steel / M. Nalbant // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2011. – Vol. 21, No. 1. – P. 72–79.

261. **Process monitoring to assist the workpiece surface quality in machining** / D. A. Axinte [et al.] // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2004. – Vol. 44, № 10. – P. 1091–1108.

262. **Santochi, M.** A sensor-integrated tool for cutting force monitoring / M. Santochi, G. Dini, G. Tantussi, M. Beghini // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. – 1997. – Vol. 46. – P. 49–52. – DOI 10.1016/S0007-8506(07)60773-2.

263. **Saruulbold, S.** Research work of resource for using strain gage to do cutting force measuring tool / S. Saruulbold, G. Oyunbat // *International Scientific and Practical Conference World Science*. – 2022. – № 6(78). – DOI 10.31435/rsglobal_ws/30122022/7901. – EDN ENFZSF.

264. **Sensor fusion for real-time condition monitoring of tool wear in surfacing with fly cutters** / R. F. Hamade, A. H. Ammouri // *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*. – 2010. – Vol. 3 (Parts A and B). – P. 977–981.

265. **Shewhart, W. A.** Statistical methods from the viewpoint of quality control / W. A. Shewhart. – Lancaster, PA : Lancaster Press, 1939. – 501 p. – URL:

<https://deming.pro/assets/statistical-method-from-the-viewpoint-of-quality-control-shewhart-walter.pdf>.

266. **Singh, Gaur** [et al.]. Hard materials. – 2014.

267. **Soori, M.** Cutting tool wear prediction in machining operations, a review / M. Soori, B. Arezoo // *Journal of New Technology and Materials*. – 2022. – ffhah-03888252.

268. **Sun, Y.** Исследование направления полета стружки как индикатора износа инструмента / Y. Sun, Y. Guo // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2009. – Т. 49, № 7–8. – С. 559–565. – DOI 10.1016/j.ijmachtools.2009.03.010.

269. **Tangjitsitcharoen, S.** Leveraging Intelligent Machines for Sustainable and Intelligent Manufacturing Systems / S. Tangjitsitcharoen, N. Suksomcheewin, A. Faccia // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. — 2025. — Vol. 9, № 5. — Article 153. — DOI: 10.3390/jmmp9050153.

270. **The Endless Frontier Act (Bill S.1260)**. – URL: <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/senate-bill/1260/text> (дата обращения: 15.05.2021).

271. **Tikhonova, Z.** Thermo-EMF as method for testing properties of replaceable contact pairs / Z. Tikhonova, D. Kraynev, E. Frolov // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)* : Conference proceedings, Sochi, Russia, 25–29 марта 2019 года / Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "South Ural State University" (national research university), Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education «Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI)». – Sochi, Russia : Springer International Publishing, Switzerland AG, 2020. – P. 1097–1105. – DOI 10.1007/978-3-030-22063-1_117. – EDN YEAGZO.

272. **Tool wear monitoring and selection of optimum cutting conditions with progressive tool wear effect and input uncertainties** / S. Heyns, [и др.] // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2011. – Vol. 22, No. 4. – P. 491–504.

273. **ToolsOI** // *Toolsol.ru*. – URL: <https://toolsol.ru/> (дата обращения: 09.08.2025).
274. **Trent, E. M.** Metal Cutting / E. M. Trent, P. K. Wright. – 4th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. – 446 p..
275. **Trent, E. M.** Metal cutting and the tribology of seizure: III. Temperatures in metal cutting / E. M. Trent // *Wear*. – 1988. – Vol. 128. – P. 65–81.
276. **Tribological aspects of cutting tool wear during the turning of stainless steels.** – URL: https://www.researchgate.net/publication/338194769_Tribological_Aspects_of_Cutting_Tool_Wear_during_the_Turning_of_Stainless_Steels (дата обращения: 09.05.2025).
277. **Two-component end mills with multilayer composite nano-structured coatings as a viable alternative to monolithic carbide end mills** / A. Vereschaka, B. Mokritskii, E. Mokritskaya [et al.] // *Mechanics & Industry*. – 2017. – Vol. 18, Art. 705.
278. **Vereschaka, A. S.** Working capacity of the cutting tool with wear resistant coatings / A. S. Vereschaka. – Moscow : Mashinostroenie, 1993.
279. **Wang, J.** Physics guided neural network for machining tool wear prediction / J. Wang, Y. Li, R. Zhao, R. X. Gao // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2020. – Vol. 57. – P. 298–310.
280. **Wang, P.** Stochastic tool wear prediction for sustainable manufacturing / P. Wang, R. X. Gao // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 48. – P. 236–241.
281. **Wiciak-Pikula, M.** Artificial Neural Network models for tool wear prediction during Aluminium Matrix Composite milling / M. Wiciak-Pikula, A. Felusiak, P. Twardowski // *2020 IEEE 7th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*. – 2020. – P. 255–259.
282. **Wu, X.** Modeling and analysis of tool wear prediction based on SVD and BiLSTM / X. Wu, J. Li, Y. Jin, S. Zheng // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – Vol. 106. – P. 4391–4399.
283. **Xing, Q.** Milling tool wear monitoring via the multichannel cutting force coefficients / Q. Xing, X. Zhang, S. Wang, X. Yu, Q. Liu, T. Liu // *Machines*. – Basel: MDPI, 2024. – Vol. 12, № 4. – Art. 249. – 12 p. – DOI 10.3390/machines12040249.

284. **Yesilyurt, I.** Tool condition monitoring in milling using vibration analysis / I. Yesilyurt, H. Ozturk // *International Journal of Production Research*. – 2007. – Vol. 45, № 4. – P. 1013–1028.
285. **You, Z.** Application of a strain gauge cutting force sensor in machining process monitoring / Z. You, Z. Yulong, G. Taobo // *2019 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, Changsha, China, 2019. – P. 891–897. – DOI 10.1109/ICEMI46757.2019.9101849.
286. **Zhang, T.** A vision-based fusion method for defect detection of milling cutter spiral cutting edge / T. Zhang, C. Zhang, Yanjie Wang, X. Zou, T. Hu // *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. – 2021. – Vol. 177. – P. 109248.
287. **Zhu, K.** A generic tool wear model and its application to force modeling and wear monitoring in high speed milling / K. Zhu, Y. Zhang // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – Vol. 115. – P. 147–161.

Приложение 1

Таблица 1 Результаты стойкостных испытаний сменных твердосплавных пластин с износостойким покрытием при обработке стали 40Х

Номер опыта	Термо ЭДС E исх., мВ	Подача на оборот s, мм/об	Скорость резания V, м/мин	Стойкость Т, мин	Глубина точения t, мм
1	4,9	0,1	120	213	0,5
2	4,9	0,1	200	166	0,5
3	4,9	0,1	280	138	0,5
4	4,9	0,195	120	204	0,5
5	4,9	0,195	200	155	0,5
6	4,9	0,195	280	145	0,5
7	4,9	0,3	120	184	0,5
8	4,9	0,3	200	147	0,5
9	4,9	0,3	280	118	0,5
10	5,3	0,1	120	184	0,5
11	5,3	0,1	200	148	0,5
12	5,3	0,1	280	136	0,5
13	5,3	0,195	120	183	0,5
14	5,3	0,195	200	155	0,5
15	5,3	0,195	280	144	0,5
16	5,3	0,3	120	184	0,5
17	5,3	0,3	200	139	0,5
18	5,3	0,3	280	126	0,5
19	5,6	0,1	120	213	0,5
20	5,6	0,1	200	166	0,5
21	5,6	0,1	280	118	0,5
22	5,6	0,195	120	204	0,5
23	5,6	0,195	200	171	0,5
24	5,6	0,195	280	137	0,5
25	5,6	0,3	120	175	0,5
26	5,6	0,3	200	131	0,5
27	5,6	0,3	280	116	0,5

Таблица 2 Результаты стойкостных испытаний сменных твердосплавных пластин с износостойким покрытием наноструктурированным поверхностным слоем рабочей части при обработке стали 40Х

Номер опыта	Термо ЭДС E исх., мВ	Подача на оборот s, мм/об	Скорость резания V, м/мин	Стойкость T, мин	Глубина точения t, мм
1	4,9	0,10	120	220	0,5
2	4,9	0,10	200	180	0,5
3	4,9	0,10	280	150	0,5
4	4,9	0,20	120	220	0,5
5	4,9	0,20	200	200	0,5
6	4,9	0,20	280	150	0,5
7	4,9	0,30	120	200	0,5
8	4,9	0,30	200	160	0,5
9	4,9	0,30	280	120	0,5
10	5,0	0,10	120	208	0,5
11	5,1	0,10	200	180	0,5
12	5,4	0,10	280	140	0,5
13	5,2	0,20	120	210	0,5
14	5,1	0,20	200	178	0,5
15	5,0	0,20	280	153	0,5
16	5,1	0,30	120	190	0,5
17	5,2	0,30	200	160	0,5
18	5,0	0,30	280	130	0,5
19	5,6	0,10	120	220	0,5
20	5,3	0,10	200	180	0,5
21	5,2	0,10	280	130	0,5
22	5,2	0,20	120	210	0,5
23	5,6	0,20	200	175	0,5
24	5,2	0,20	280	158	0,5
25	5,3	0,30	120	180	0,5
26	5,2	0,30	200	150	0,5
27	5,3	0,30	280	120	0,5

Таблица 3 Результаты стойкостных испытаний сменных твердосплавных пластин с износостойким покрытием при обработке стали 12Х13

Номер опыта	Термо ЭДС E исх., мВ	Подача на оборот s, мм/об	Скорость резания V, м/мин	Стойкость T, мин	Глубина точения t, мм
1	10,9	0,10	90	197	0,5
2	10,9	0,10	150	168	0,5
3	10,9	0,10	210	128	0,5
4	10,9	0,20	90	197	0,5
5	10,9	0,20	150	134	0,5
6	10,9	0,20	210	113	0,5
7	10,9	0,30	90	168	0,5
8	10,9	0,30	150	125	0,5
9	10,9	0,30	210	103	0,5
10	11,4	0,10	90	188	0,5
11	11,4	0,10	150	143	0,5
12	11,4	0,10	210	108	0,5
13	11,4	0,20	90	177	0,5
14	11,4	0,20	150	138	0,5
15	11,4	0,20	210	103	0,5
16	11,4	0,30	90	141	0,5
17	11,4	0,30	150	122	0,5
18	11,4	0,30	210	94	0,5
19	12,3	0,10	90	197	0,5
20	12,3	0,10	150	125	0,5
21	12,3	0,10	210	89	0,5
22	12,3	0,20	90	150	0,5
23	12,3	0,20	150	116	0,5
24	12,3	0,20	210	81	0,5
25	12,3	0,30	90	116	0,5
26	12,3	0,30	150	89	0,5
27	12,3	0,30	210	75	0,5

Таблица 4 Результаты стойкостных испытаний сменных твердосплавных пластин с износостойким покрытием наноструктурированным поверхностным слоем рабочей части при обработке стали 12Х13

Номер опыта	Термо ЭДС E, мВ	Подача на оборот s, мм/об	Скорость резания V, м/мин	Стойкость T, мин	Глубина точения t, мм
1	11,7	0,10	90	220	0,5
2		0,10	150	170	0,5
3		0,10	210	130	0,5
4		0,20	90	200	0,5
5		0,20	150	150	0,5
6		0,20	210	120	0,5
7		0,30	90	170	0,5
8		0,30	150	140	0,5
9		0,30	210	110	0,5
10	12,6	0,10	90	210	0,5
11		0,10	150	150	0,5
12		0,10	210	115	0,5
13		0,20	90	180	0,5
14		0,20	150	140	0,5
15		0,20	210	110	0,5
16		0,30	90	150	0,5
17		0,30	150	130	0,5
18		0,30	210	100	0,5
19	13,7	0,10	90	210	0,5
20		0,10	150	140	0,5
21		0,10	210	95	0,5
22		0,20	90	160	0,5
23		0,20	150	110	0,5
24		0,20	210	90	0,5
25		0,30	90	130	0,5
26		0,30	150	100	0,5
27		0,30	210	80	0,5

Таблица 5 Результаты измерения параметра шероховатости Ra при обработке стали 40Х

Номер опыта	Термо ЭДС E, мВ	Подача на оборот s, мм/об	Скорость резания V, м/мин	Шероховатость Ra ср, мкм
1	4,9	0,10	120	2,11
2	4,9	0,10	200	1,08
3	4,9	0,10	280	1,03
4	4,9	0,20	120	2,61
5	4,9	0,20	200	1,23
6	4,9	0,20	280	1,13
7	4,9	0,30	120	1,53
8	4,9	0,30	200	1,10
9	4,9	0,30	280	0,93
10	5,0	0,10	120	2,55
11	5,1	0,10	200	1,40
12	5,4	0,10	280	0,67
13	5,2	0,20	120	1,42
14	5,1	0,20	200	1,37
15	5,0	0,20	280	1,28
16	5,1	0,30	120	2,12
17	5,2	0,30	200	1,77
18	5,0	0,30	280	1,94
19	5,6	0,10	120	2,31
20	5,3	0,10	200	1,18
21	5,2	0,10	280	1,03
22	5,2	0,20	120	2,04
23	5,6	0,20	200	1,32
24	5,2	0,20	280	1,27
25	5,3	0,30	120	1,90
26	5,2	0,30	200	1,14
27	5,3	0,30	280	1,00

Таблица 6 Результаты измерения параметра шероховатости Ra при обработке стали 12X13

Номер опыта	Термо ЭДС E, мВ	Подача на оборот s, мм/об	Скорость резания V, м/мин	Шероховатость Ra, мкм
1	11,7	0,10	90	2,33
2	11,7	0,10	150	1,99
3	11,7	0,10	210	1,05
4	11,7	0,20	90	2,40
5	11,7	0,20	150	2,23
6	11,7	0,20	210	2,00
7	11,7	0,30	90	2,50
8	11,7	0,30	150	2,39
9	11,7	0,30	210	2,21
10	12,6	0,10	90	2,48
11	12,6	0,10	150	2,22
12	12,6	0,10	210	1,30
13	12,6	0,20	90	2,50
14	12,6	0,20	150	2,37
15	12,6	0,20	210	2,22
16	12,6	0,30	90	2,62
17	12,6	0,30	150	2,51
18	12,6	0,30	210	2,31
19	13,7	0,10	90	2,64
20	13,7	0,10	150	2,36
21	13,7	0,10	210	1,43
22	13,7	0,20	90	2,68
23	13,7	0,20	150	2,48
24	13,7	0,20	210	2,35
25	13,7	0,30	90	2,71
26	13,7	0,30	150	2,64
27	13,7	0,30	210	2,41

Применение результатов диссертационного исследования в технологической деятельности промышленных предприятий

АО «Корпорация «Московский институт теплотехники»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР «ТИТАН – БАРРИКАДЫ»
 (АО «ФНПЦ «ТИТАН – БАРРИКАДЫ»)
 400071, г. Волгоград, пр. Ленина, 6/к
 Тел. 74-93-26
 Факс: (8442) 27-57-36, 27-40-20
 E-mail: cdb@cdobtan.ru

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель
 генерального директора –
 технический директор –
 АО «Федеральный научно-
 производственный центр
 «Титан-Баррикады»,
 доктор технических наук

ПРОТОКОЛ

научно-технического заседания отделения главного технолога

Дата: « 19 » августа 2025 г.

Место проведения: Учебно-производственный центр

Протокол № 1

Докладчик: к.т.н., доцент Крайнев Дмитрий Вадимович

Присутствовали:

Председатель: начальник отдела новых технологий и производственных мощностей Пилипенко П.А.

Присутствующие:

- начальник отдела механической обработки Евсеев Ю.Г.;
- начальник конструкторского отдела режущего и измерительного инструмента Рыгин И.Н.;
- к.т.н., ведущий инженер-технолог отдела разработки УП для станков с ЧПУ и ОЦ Фирсов И.В.;
- ведущий инженер-технолог отдела механической обработки Казаков А.В.;
- к.т.н., инженер-технолог 3 категории отдела механической обработки Федоренко Н.Г.;
- инженер-технолог 3 категории отдела механической обработки Голубев В.К.

Слушали: доклад по диссертационной работе, выполненный в соответствии с генеральным соглашением по вопросам научно-технического сотрудничества и подготовки кадров, заключенным между АО «Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады» и ФГБОУ ВО «ВолГТУ» на тему: «Методология построения функционально-ориентированных технологических систем механической обработки».

Актуальность диссертационной работы определяется научно-производственной проблемой обеспечения надежности и стабильности результатов машиностроительного производства в условиях ограничения технических возможностей технологического оборудования и механизмов.

Установлено, что современные цифровые 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.

Научная новизна полученных результатов

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.

Основное содержание предлагаемого научно-технологического решения

Формирование электронного паспорта инструмента (ЭПИ) как сквозного цифрового объекта, сопровождающего инструмент на всех стадиях ЖЦ (включая идентификатор, группу стойкости по термо-ЭДС, рекомендованные и уточнённые режимы резания, историю применения и диагностики).

Управления предполагает три этапа: (Этап 1) подготовка исходной технологической информации — сортировка СМНП по режущим свойствам, предварительный выбор режимов, ограничение подач по шероховатости с учётом кинематического фактора; (Этап 2) оперативное управление процессом обработки — мониторинг состояния элементов технологической системы для оценки износа и остаточного ресурса режущего инструмента; (Этап 3) оценка результатов и наполнение БД — фиксация качества (точность, шероховатость), фактической стойкости, параметров цикла с последующей корректировкой нормативов.

Интеграция ЭПИ с CAM/MES: автоматическое извлечение режимов при генерации УП, контроль соответствия инструментальной группы требованиям операции, рекомендации оператору; замыкание контура обратной связи на основе диагностических данных.

Методика коррекции норм времени, основанная на базе фактических режимов, времени цикла, стойкости и качества обработки, накопленных в ЭПИ.

Практическая значимость

Результаты исследования обладают практической значимостью для задач повышения эффективности и надёжности технологических процессов механической обработки:

- Снижение риска преждевременного выхода инструмента из строя и затрат на инструментальное обеспечение за счёт персонализированного выбора режимов по группе стойкости.

- Повышение стабильности качества и воспроизводимости результатов обработки за счёт мониторинга сил, вибраций и термо-ЭДС.
- Ускорение технологической подготовки и снижение времени наладки благодаря автоматическому использованию данных ЭПИ в CAM/MES.
- Переход от статичных нормативов к динамическому нормированию в MES/ERP на базе реальных производственных данных.
- Формирование обучающих выборок для ИИ-моделей прогноза ресурса и оптимизации режимов резания.

Замечания и предложения по дальнейшему совершенствованию разработки

1. Провести многофакторную апробацию методики на номенклатуре материалов (стали, сплавы, ЧМ) и типах инструментов (PCBN, керамика, твёрдый сплав).
2. Расширить перечень диагностических каналов (акустическая эмиссия, температура зоны резания) и оценить их вклад в точность прогноза ресурса.
3. Проработать средства интеграции ЭПИ с корпоративными PLM/MES/ERP через стандартные интерфейсы (OPC UA/REST API) и обеспечить единый справочник НСИ.
4. Проработать экономическую модель эффекта (ТСО инструмента, ОЕЕ, удельная себестоимость операции) и предложить KPI внедрения.
5. Проработать алгоритмы прогнозирования остаточного ресурса с учётом индивидуальных профилей инструмента и условий обработки.

Заключение заседания

По итогам рассмотрения представленных материалов заседание постановило:

1. Признать результаты исследования актуальными, соответствующими заявленной теме и требованиям специальностей 2.5.6 – Технология машиностроения (технические науки) и 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки).
2. Рекомендовать пилотное внедрение методики и ЭПИ на производственных площадках основного и вспомогательного производств, оснащенных станками с ЧПУ и обрабатывающими центрами.
3. Утвердить перечень доработок согласно разделу «Замечания и предложения» настоящего протокола.

Председатель:


(подпись)

П.А. Пилипенко
(Ф.И.О.)



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ВОЛГОГРАДНЕФТЕГАЗ»

Электроресовская ул., 45, Волгоград, 400011, Россия

тел. (8442) 41-02-20, факс (8442) 416-416

e-mail: office@vnm.ru

https://www.vnm.ru/

ОКПО 00217610 ОГРН 1023404238384 ИНН/КПП 3446003396/344601001

№

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора

по коммерции

ОАО «Волгограднефтегаз»



Карахтинцев Е.А.

АКТ

об использовании результатов
докторской диссертационной работы
Крайнева Дмитрия Вадимовича

Комиссия в составе:

Председатель комиссии: Н.В. Перинков
С.Ю. Копытин, главный технолог /и.о. главного технолога/

(должность, ФИО)

Члены комиссии: зам. гл. технолога Терехов Д.А.

(должность, ФИО)

зам. главного технолога Кимбор В.П.

(должность, ФИО)

и.о. нач. бюро зап. работ Яковлева Т.С.

(должность, ФИО)

(должность, ФИО)

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы
Методология построения функционально-ориентированных
технологических систем механической обработки

(тема диссертации)

представленной на соискание ученой степени доктора технических наук,
использованы в технологической деятельности _____

ОАО «Волгограднефтегаз», г. Волгоград

(название организации)

при разработке технологий механической обработки деталей в виде:

1. Методология перманентного мониторинга состояния
технологической системы на основе многоканальной диагностики (вибрации,

силы резания, термо-ЭДС), включая алгоритмы спектрального анализа и пороговую классификацию состояний.

2. Прототип информационной структуры «Электронного паспорта инструмента» (ЭПИ) как сквозного цифрового объекта, включающая идентификаторы, группу стойкости, рекомендованные и уточнённые режимы, историю использования, результаты диагностики и прогноз остаточного ресурса.

3. Методические рекомендации по ограничению области допустимых подач для обеспечения требуемой шероховатости с учётом кинематических факторов и стабильности процесса.

4. Регламенты интеграции ЭПИ и диагностических данных с CAM/MES/ERP (автоматическое извлечение режимов при генерации УП, контроль соответствия в MES, рекомендации оператору).

5. Концепция адаптивной корректировки режимов резания, интеграции ЭПИ с CAM/MES/ERP в целях повышения эффективности технологической подготовки и управления производственным процессом.

Использование указанных результатов 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.

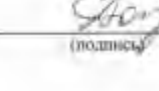
Председатель комиссии:

Члены комиссии:


(подпись)

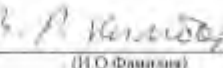

(подпись)

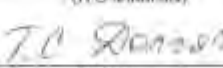

(подпись)


(подпись)


Н.В. Панков
(И.О. Фамилия)


С.Ю. Копытин
(И.О. Фамилия)


А.А. Кузнецов
(И.О. Фамилия)


Т.О. Далгачева
(И.О. Фамилия)

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ»
(ООО АМС)

б/1, ул. Строителей, ст-ца Голубинская, Калачевский район, Волгоградская область, 404532
телефон: +7-961-682-33-71 e-mail: a.rogachev@ameslle.ru

КПП 345501001 ОГРН 1243400009049 ИНН 3455057856 БИК 046015207

№ _____
от № _____

АКТ
использования результатов
диссертационного исследования
КРАЙНЕВА Дмитрия Вадимовича

Результаты диссертационной работы **«Методология построения функционально-ориентированных технологических систем механической обработки»**, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы в деятельности ООО «Автоматизированные машиностроительные системы» при разработке конструкций специальной технологической оснастки для мониторинга процессов обработки на токарно-револьверных станках с ЧПУ, в частности:

- практические рекомендации по обеспечению многоканального мониторинга состояния элементов технологической системы в режиме реального времени: перманентный циклический контроль и анализ изменения уровня сил и вибрационного фона в процессе обработки;
- базовые положения концепции адаптивного управления процессом обработки, включающие возможность автоматической корректировки режимов резания по результатам многоканального мониторинга состояния элементов технологической системы.

Указанные результаты применены при разработке конструкции инструментальной оправки форм-фактора VDI, оснащенной комплексом датчиков для измерения сил и термо-ЭДС в процессе токарной обработки. Оправка предназначена для построения интеллектуальных технологических систем с активной обратной связью на базе оборудования с ЧПУ.

Генеральный директор

А. В. Рогачев

