

1544 778

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет им. Н. Э. Баумана

На правах рукописи

ДРЕВАЛЬ АЛЕКСЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИНСТРУМЕНТОВ НА
ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ИХ
НАДЕЖНОСТИ

Специальность 05.03.01. - Процессы механической и
физико-технической обработки,
станки и инструменты

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 1994

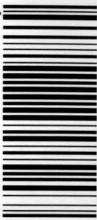
[Handwritten signature]

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена
Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени
государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана

Официальные оппоненты: доктор технических наук
профессор Гречишников В. А.
доктор технических наук
профессор Нахапетян Е. Г.
доктор технических наук
профессор Ярославцев В. М.

Ведущее предприятие - Акционерное Московское общество АИ

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1544778

Дриваль А. Е. Повышение эфф

Защита диссертации состоится "22" мая 1994 г.
на заседании совета
ордена Октябрьск
Знамени государ
по адресу: 10700

Ваши отзывы в
равлять по указа

С диссертацие
им. Н. Э. Баум

Телефон для

Автореферат

УЧЕНЫЙ СЕКР
специализированн
Д 053.15.04

1544778

Потписано в печа
17. мая 1994г.

Актуальность проблемы. Техничко - экономические результаты работы машиностроительных предприятий в значительной мере зависят от эффективности работы технологического оборудования, надежности всех элементов технологической системы, одним из которых является режущий инструмент. Опыт эксплуатации технологических систем показывает, что режущий инструмент является наименее надежным элементом. Рассеивание стойкости инструмента, непредвиденные отказы приводят к снижению производительности труда, возникновению брака основного производства, повышенному расходу инструмента, являясь дестабилизирующим фактором механообрабатывающего процесса.

Осевые быстрорежущие инструменты - сверла, зенкеры, развертки, метчики - предназначены для изготовления отверстий, являются наиболее распространенными в общей массе инструментов и занимают особое место в технологическом процессе изготовления деталей машин, 60% которых имеет отверстия различных видов. Обработка этими инструментами - во многих случаях наиболее экономичный способ изготовления отверстий, а резьбонарезание метчиками - практически единственный способ изготовления цилиндрических резьбовых отверстий малых диаметров.

Отечественная научная школа внесла существенный вклад в разработку научных основ рациональной эксплуатации режущих инструментов, разработку стойкостных моделей, нормирование режимов резания и расхода режущего инструмента. Комиссия по резанию металлов, объединив ведущих ученых Е. П. Надеинскую, А. И. Каширина В. А. Кривоухова, И. М. Беспрозванного, С. Д. Тишина, Г. И. Грановского, М. Н. Ларина, А. М. Розенберга, Е. К. Зверева, С. С. Рудника, А. Н. Даниеляна, И. Н. Резникова, И. М. Клушина и других, заложила основы науки о работоспособности инструмента.

Продолжительное время работоспособность инструментов рассматривалась только с детерминированных позиций. Это затрудняет прогнозирование отказов инструмента и организацию системы его рациональной эксплуатации.

Подход к оценке работоспособности инструментов в последние годы начал изменяться, появились работы в области его надежности, в ряд нормативов режимов резания внесены поправки с учетом вероятностной природы стойкости. Однако теоретические основы, методология, информационная база статистических данных по надежности

ти осевых инструментов находятся в стадии начального формирования.

В связи с необходимостью сокращения простоев технологического оборудования, расхода режущего инструмента, брака основного производства, повышения оперативности при освоении новых образцов техники и, как следствие, улучшения экономических показателей машиностроительного производства особое значение приобретает обеспечение надежности режущего инструмента. Для этого необходимо существенно изменить традиционные подходы к оценке его работоспособности и развить новые на базе разработки физической теории резания металлов и разрушения инструментов с учетом случайной природы протекания этих процессов. Это относится к физическим основам наступления предельного состояния инструмента, взаимосвязям скорости изнашивания рабочих элементов инструментов с параметрами режима резания, к оценке и обоснованию законов распределения наработки (стойкости) и величин износа.

Таким образом, с учетом массовости применения, особенностей эксплуатации разработка теоретических основ надежности осевых инструментов, обоснование и разработка комплексных эксплуатационных, технологических и конструкторских мероприятий по повышению их надежности является крупной научной проблемой, имеющей большое народохозяйственное значение.

Цель работы заключается в разработке теоретических основ и методологии оценки и обеспечения надежности быстрорежущих осевых инструментов как средства повышения эффективности обработки деталей.

В соответствии с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать, что основой физических закономерностей резания металлов и изнашивания инструментов являются положения теории разрушения и деформации металлов, которые базируются на термофлуктуационной модели разрушения межатомных связей.

2. Разработать математические модели отказов осевых быстрорежущих инструментов с учетом случайного характера протекания процессов изнашивания. Установить основные взаимосвязи параметров моделей с режимами резания, технологическими требованиями на обработку и конструктивными особенностями инструментов.

4. Обосновать физические модели предельных состояний осевых инструментов. Разработать критериальные зависимости отказов.

5. Создать базу исходных математических зависимостей и данных для нормирования режимов резания, расхода и восстановления режущего инструмента с требуемой надежностью.

6. Разработать способы повышения надежности осевых инструментов на базе имеющихся технических средств и известных технологических приемов, включающие методы поверхностных покрытий и химико - термических обработок (ХТО), конструкторские методы, основанные на оптимизации геометрических параметров и нормировании точности элементов конструкции инструментов.

Методы исследования. В предлагаемой работе применены аналитические и физические методы исследований. Аналитические методы базируются на основных положениях теории вероятностей и математической статистики, планирования экспериментов и аппроксимации их результатов, теории резания металлов, теории подобия, математического анализа, на использовании современных средств вычислительной техники. Физические исследования включали изучение температуры резания методом естественной термопары, сил резания, рентгенографический, структурный и энергетический анализ поверхностей инструментов, измерение микротвердости, шероховатости, моделирование на специальных стендах с использованием современной контрольно-измерительной, динамометрической аппаратуры, дифрактометра ДРОН-3, экзозмиссионной установки, микроскопов УИМ-23, Дорнер, горизонтального оптиметра фирмы Цейсс, нутромера модели 105 и ряда специально изготовленных устройств и приборов.

В лабораторных и производственных условиях выполнено большое количество стойкостных исследований инструмента, основной особенностью которых было то, что испытания проводились до возникновения четко фиксируемого отказа (разрушение инструмента или параметрический отказ), а не превосхищали его. Статистические испытания партий инструментов выполнены в условиях массового производства.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Обосновано, что основные закономерности процесса резания изнашивания инструментов имеют термофлуктуационную природу. Особенностью процесса является то, что время разрушения атомных связей обрабатываемого материала, определяемое скоростью резания, устанавливает баланс между разрушающими напряжениями и температурой в зоне резания и определяет кинетику всех процессов, протекающих при обработке. Указанный подход позволяет на качественном

уровне установить характер основных функциональных зависимостей процесса резания и служит теоретической основой оценок влияния параметров процесса резания, физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов на зависимость износа от времени, скорости изнашивания и стойкости от скорости резания и др. и позволяет оценивать достоверность зависимостей, полученных эмпирическим путем.

2. Разработаны математические модели отказов осевых быстрорежущих инструментов при обработке конструкционных углеродистых сталей с учетом сложной структуры отказов. Обосновано, что отказы осевых инструментов, каждый из которых рассматривается как сложная система, состоящая из ряда конструктивных элементов, обусловлены в зависимости от параметров режима резания и технологических требований износом определенного конструктивного элемента.

3. Сформулированы и определены показатели информативности диагностических признаков состояния осевых быстрорежущих инструментов, в качестве которых выступают составляющие термо-ЭДС, осевой силы, крутящего момента и др. Установлена тесная корреляционная связь диагностических признаков с величиной износа инструмента и немонотонный характер изменения диагностических признаков в зависимости от величины износа, диаметра инструмента, скорости резания и подачи. Обосновано применение для оценки надежности осевых инструментов диагностических признаков.

4. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена переменность критерия оптимального износа при функциональных и параметрических отказах осевых инструментов в зависимости от параметров режима резания. Разработаны математические модели для расчета критерия оптимального износа сверл, разверток и метчиков с заданной вероятностью.

5. Теоретически и экспериментально обосновано, что дискретность контакта задней поверхности инструмента с обрабатываемой поверхностью, являющаяся следствием цикличности существования нароста, оказывает существенное влияние на работоспособность инструмента. Отношение времени отсутствия контакта ко времени его существования является экстремальной функцией скорости резания, что наряду с другими причинами предопределяет экстремальный характер зависимости стойкости и величины критерия оптимального износа от скорости резания. Миграция нароста по лезвию инструмента обусловлена увеличением износа, приводит к параметрическо-

му отказу по шероховатости и является причиной переменного характера оптимального износа.

Автор защищает.

Научные основы теоретической оценки закономерностей процесса резания, реализующих термофлуктуационные подходы для описания на качественном и количественном уровне процессов разрушения припуска и изнашивания режущего инструмента; расчетно-экспериментальные методы определения предельного состояния осевых инструментов, для которых характерны функциональные и параметрические отказы; результаты теоретических и экспериментальных исследований качественных закономерностей влияния наростообразования на показатели работоспособности инструментов и величину критерия отказа.

Модели отказов быстрорежущих осевых инструментов, основанные на схемах: постепенного накопления повреждений, совместного действия постепенных и внезапных повреждений, при одновременном изнашивании с различными скоростями конструктивных элементов рабочей части инструментов, один из которых является невосстанавливаемым формообразующим элементом.

Экспериментально установленное положение о различном вкладе конструктивных элементов рабочей части инструментов в их отказы, определяемом режимами эксплуатации и технологическими требованиями на обработку; схемы расходования ресурса с учетом разной скорости протекания изнашивания их конструктивных элементов.

Систему оценки информативности диагностических сигналов, в качестве которых выступают составляющие физических параметров режима резания (термо-ЭДС, силы, моменты, вибрации и др.); методы ускоренной оценки показателей надежности осевых инструментов, реализующие связь наиболее информативных физических параметров режима резания со скоростью изнашивания, являющейся функцией режимов и условий резания.

Метод ускоренной оценки эффективности упрочняющей технологии в конкретных условиях эксплуатации инструмента и рекомендации по точности геометрических параметров инструмента, обеспечивающие улучшение показателей надежности.

Результаты комплекса теоретических и экспериментальных исследований и разработанные на их основе новые подходы к нормированию режимов резания, расхода и восстановления инструмента с учетом вероятностного характера процесса резания и изнашивания инструмента.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций определяется большим объемом экспериментов, проведенных в лабораторных и производственных условиях, тщательностью организации экспериментов, а также использованием современных средств исследований, анализа и обработки экспериментальных данных; корректным применением математических методов; высокой сходимостью результатов расчетно-теоретических и экспериментальных данных; использованием ряда разработок в производственных условиях.

Практическая ценность работы.

1. Создана база исходных данных, разработаны алгоритмы и пакет прикладных программ для нормирования режимов резания, расхода и восстановления быстрорежущих осевых инструментов с принятой вероятностью, что является составной частью технологической подготовки производства и выбора экономически целесообразных условий эксплуатации инструмента.

2. Разработаны методы оценки надежности по физическим параметрам процесса резания на всех этапах функционирования осевых инструментов, позволяющие формировать партии инструментов однородного качества, прогнозировать показатели надежности, осуществлять диагностику состояния инструмента путем регистрации нескольких диагностических признаков.

3. Разработаны способы повышения надежности осевых инструментов, основанные на базе имеющихся технических средств и известных технологических решений, не требующие дополнительных затрат для их реализации, включающие методы химико-термической обработки и поверхностных покрытий; конструкторские методы оптимизации геометрических параметров и нормирования точности элементов конструкции инструментов. Разработаны методы ускоренного определения эффективности применения поверхностных покрытий в конкретных условиях эксплуатации осевых инструментов.

4. Разработана система бездефектного восстановления режущих свойств быстрорежущих осевых инструментов, учитывающая вероятностное проявление износа всех рабочих элементов, устанавливающая нормы стачивания, число и методы переточки.

5. Получены математические модели, позволяющие определить основные показатели надежности - вероятность безотказной работы, среднюю наработку до отказа и др. в зависимости от основных конструктивных и геометрических параметров осевых инструментов и параметров режима резания, являющиеся исходными данными для ор-

ганизации системы планово-предупредительной замены инструментов.

6. На основе исследований надежности реализован на ряде предприятий комплекс методов повышения эффективности механической обработки путем внедрения технологических процессов изготовления инструмента с улучшенной геометрией режущей части, нормативов режимов резания и норм расхода инструментов, разработки основ системы инструментообеспечения с учетом вероятностного характера расходования инструментов.

Апробация работы.

Основные результаты работы доложены и обсуждены на 15 всесоюзных, республиканских конференциях и семинарах. Полное содержание работы доложено на заседании кафедры МТ-2 ("Процессы и инструментальные системы механической и физико-химической обработки") МГТУ им. Н.Э.Баумана в июле 1993 года.

Публикации

По материалам работы опубликованы 53 статьи, учебных пособия и методических разработок, тезисов докладов конференций. Разработанные способы определения оптимальных скоростей резания, поверхностных покрытий, новые конструкции осевых инструментов защищены 7 авторскими свидетельствами на 2 заявки выданы положительные решения.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 238 наименований и приложения. Общий объем диссертации 435 страниц текста, из них 258 страниц основного текста, 159 иллюстраций и 47 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

Глава 1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И НАДЕЖНОСТЬ ОСЕВЫХ БЫСТРОРЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

Проанализировано состояние вопроса и определены цель и задачи исследования. Показано, что эффективность работы машиностроительных предприятий в большой степени определяется надежностью технологических систем и их элементов. Обеспечение надежности таких слабых элементов технологических систем, как режущий инструмент, является существенным резервом повышения эффективности. Дана оценка вклада отечественных и зарубежных ученых в

развитие теории резания, в частности в анализ вопросов надежности режущего инструмента. Показано, как развитие и совершенствование теории надежности машиностроения, применение вероятностных моделей приводило к трансформации понятийного аппарата и терминологии в области металлообработки резанием и режущего инструмента, что необходимо для решения задач рационального использования режущего инструмента.

С учетом особенностей конструкций и эксплуатации режущего инструмента, разнообразия свойств инструментальных материалов целесообразно говорить о надежности определенных групп инструментов. Обоснован выбор осевого инструмента, включающего сверла, зенкеры, развертки, метчики, как представительной группы среди всего многообразия режущих инструментов, одной из важнейших наиболее массовых групп, дан развернутый анализ общих свойств и особенностей этой группы инструментов. Анализ работ по надежности осевого инструмента показал, что исследований выполнено недостаточно и они не носят системного характера.

Работоспособность осевых инструментов в настоящее время оценивается по стойкостным моделям, которым присущ ряд существенных недостатков. Дана критическая оценка существующих моделей стойкости, показано, что общим недостатком стойкостных моделей является то, что в соответствии с ними стойкость представляется в детерминированной форме. Это противоречит реальной действительности и сковывало в течение длительного времени совершенствование технологических систем, препятствовало в ряде случаев автоматизации производства. Модели позволяют установить уровень стойкости, однако не учитывают ее экстремальный характер и не могут быть использованы для организации системы планово - предупредительной замены инструментов, что снижает эффективность показателей механической обработки. Это предопределяет необходимость новых методических подходов к оценке показателей надежности, в основе которых лежат схемы повреждений, принятые в теории надежности и учитывающие физические взаимосвязи между параметрами, входящими в эти схемы. Модели, построенные по такому принципу, позволяют учитывать влияние на показатели надежности конструктивных изменений инструмента, поверхностных покрытий и других изменений условий эксплуатации.

Предельное состояние осевого инструмента устанавливается критериями износа. В качестве критерия отказов осевых инструмен-

тов применяется критерий равного износа, который устанавливается как величина, не зависящая от параметров режима резания и условий эксплуатации инструмента. Применение критерия равного износа не позволяет полностью использовать ресурс инструмента и решать задачи оптимизации. Критерии оптимального износа, при которых полностью используется физическая способность инструментов выполнять работу резания или обеспечивать технологические требования на обработку (стойкость), в настоящее время не разработаны.

Анализ литературных источников показал, что не систематизированы отказы осевых инструментов, отсутствует обоснованное мнение относительно причин и физических явлений, приводящих к отказам инструментов, не разработана классификация отказов. Это привело к тому, что величины и вклад в отказы инструментов поврежденных отдельных рабочих элементов, выполняющих различные функции, не установлены. Это не позволяет правильно принять систему переточки инструмента и обосновать нормы стачивания.

Методы испытаний режущих инструментов с целью оценки их качества, влияния технологических процессов изготовления инструментов на их работоспособность, вопросы диагностирования их текущего состояния и прогнозирования стойкости получили развитие в последние годы. Существенен научный вклад отечественных исследователей в эти вопросы. Возникновение интереса к такого рода исследованиям связано в первую очередь с дальнейшей автоматизацией механической обработки, применением дорогостоящего станочного оборудования, развитием ГПС, т.е. таких технологических систем, когда требуется высокая надежность всех составляющих элементов.

Показано, что наиболее перспективными являются методы оценки надежности, основанные на статистико-вероятностных и физических испытаниях, в основу которых положены взаимосвязи между исходными факторами процесса обработки и физическими параметрами процесса резания. Это дает возможность определять показатели надежности и диагностировать состояние инструментов по параметрам физических явлений, сопровождающих процесс обработки.

Предлагаемые конструкторские и технологические решения по повышению работоспособности быстрорежущих осевых инструментов носят частный характер и не дают представления о показателях их надежности. Представляется целесообразным разработка наиболее общих подходов к оценке влияния конструкторских мероприятий на показатели надежности, в частности обоснования нормирования точнос

ти геометрических параметров инструментов, в том числе тех, которые в настоящее время не нормируются. С учетом большого количества противоречивых рекомендаций по применению химико - термической обработки и поверхностных покрытий рационально рассматривать их влияние на показатели надежности применительно к конкретным операциям обработки осевыми инструментами. С этой целью следует разработать общие методы ускоренной оценки эффективности их применения.

Выполненный анализ накопленных теоретических и экспериментальных исследований по вопросу повышения эффективности эксплуатации быстрорежущего осевого инструмента позволяет установить задачи работы:

1. Обосновать, что основой физических закономерностей резания металлов и изнашивания инструментов являются положения теории разрушения и деформации металлов, которые базируются на термофлуктуационной модели разрушения межатомных связей.

2. Разработать математические модели отказов осевых быстрорежущих инструментов с учетом случайного характера протекания процессов изнашивания. Установить основные взаимосвязи параметров моделей с режимами резания, технологическими требованиями на обработку и конструктивными особенностями инструментов.

3. Обосновать физические модели предельных состояний осевых инструментов. Разработать критериальные зависимости отказов.

4. Создать базу исходных математических зависимостей и данных для нормирования режимов резания, расхода и восстановления режущего инструмента с требуемой надежностью.

5. Разработать способы повышения надежности осевых инструментов на базе имеющихся технических средств и известных технологических приемов, включающие методы поверхностных покрытий и ХТО, конструкторские методы, основанные на оптимизации геометрических параметров и нормировании точности элементов конструкции инструментов.

Глава 2. МОДЕЛИ ОТКАЗОВ ОСЕВЫХ БЫСТРОРЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

В данном разделе представлен анализ результатов статистических испытаний осевых инструментов, проведенных в производственных условиях, выполненных на автоматических линиях и агрегатных станках на заготовках из углеродистых качественных ста-

лей; эксплуатация инструментов продолжалась до разрушения или до однозначно установленного физического проявления, показывающего, что разрушение должно произойти в пределах ближайших трех-пяти циклов работы или при возникновении недопустимых технологических показателей обработки. Такая схема испытаний позволяет оценить состояние инструмента при возникновении его функционального или параметрического отказа.

Режущие инструменты рассматривались как совокупность элементов, каждый из которых имеет определенное функциональное назначение. При отказах фиксировалось состояние всех конструктивных элементов. Это позволило предложить классификацию отказов указанных видов осевых инструментов, устанавливающую причинно-следственные связи между причинами отказов, формой проявления, видами отказов и последствиями отказов для изделия, технологического оборудования и инструмента. Рассмотрены особенности формирования функциональных отказов и параметрических отказов по точности и шероховатости обработанных отверстий.

Выполнен анализ реализаций износа каждого конструктивного элемента инструмента. Показано, что формированию функциональных отказов спиральных сверл и параметрических отказов машинных разверток размерами $d > 6$ мм при обработке углеродистых конструкционных сталей соответствуют модели постепенных отказов двух типов: без рассеивания (1) и с рассеиванием (2) начальных параметров (времени и величины приработочного износа):

$$P(t) = 0,5 + \Phi \left(\frac{h_{\kappa}^{отм.} - \bar{k}_{\kappa} \cdot t}{t \cdot \sigma_{k_{\kappa}}} \right), \quad (1)$$

$$P(t) = 0,5 + \Phi \left[\frac{h_3^{отм.} - \bar{k}_{30} - \bar{k}_3(t - \bar{t}_0)}{\sqrt{\sigma_{k_{30}}^2 + \sigma_{k_3}^2 (t - \bar{t}_0)^2}} \right], \quad (2)$$

где:

$h_{\kappa}^{отм.}, h_3^{отм.}$ - допустимые величины износа ленточек и задних поверхностей;

$\bar{k}_{\kappa}, \bar{k}_3$ - средние скорости изнашивания ленточек и главных задних поверхностей;

$\bar{h}_{03}, \bar{t}_0$ - средние значения приработочного износа и времени приработки;

$\sigma_{k_{30}}, \sigma_{k_{\kappa}}, \sigma_{k_3}$ - средние квадратические отклонения приработочного

износа и скоростей изнашивания ленточек и задних поверхностей соответственно;

$$0 \leq \Phi \leq 0.5; t > t_0.$$

Статистический анализ изнашивания рабочих элементов не позволяет выявить конструктивный элемент осевого инструмента, износ которого обуславливает функциональный отказ спиральных сверл и параметрический отказ машинных разверток.

Функциональные отказы машинно-ручных метчиков размерами от М8 до М42 при обработке углеродистых конструкционных сталей формируются в результате постепенного накопления износа задних поверхностей и внезапных повреждений, обусловленных возникновением "пиковых" нагрузок, вероятность появления которых постоянна в течение эксплуатации инструментов (3). Распределение внезапных отказов машинно-ручных метчиков согласуется с законом экспоненциального распределения. Значение параметра λ является функцией диаметра, шага резьбы и твердости обрабатываемого материала:

$$P(t) = \left[0,5 + \Phi \left(\frac{k_{30}^{opt} - \bar{k}_{30} - \bar{k}_3 (t - \bar{t}_0)}{\sqrt{\sigma_{k_{30}}^2 + \sigma_{\bar{k}_3}^2 (t - \bar{t}_0)^2}} \right) \right] \exp(\lambda t), \quad (3)$$

Процесс формирования функциональных (метчики) и параметрических (развертки) отказов в пределах стойкости сопровождается медленно протекающим с постоянной скоростью процессом изнашивания формообразующего конструктивного элемента инструментов - наружного диаметра. Это определяет полный ресурс разверток и метчиков и приводит к формированию постепенного отказа по точности из-за потери формообразующего размера:

$$P(t) = 0,5 + \Phi \left(\frac{d - k_{dk} \cdot t - d_{min}}{\sigma_d} \right), \quad (4)$$

где: λ - постоянная, параметр экспоненциального распределения;

σ_d - среднее квадратическое отклонение размера наружного диаметра развертки, мм;

k_{dk} - средняя скорость изнашивания наружного диаметра, мм/мин;

d_{min} - минимальное значение наружного диаметра, мм.

Глава 3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ ОСЕВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ.

На основании систематизации физических явлений, приводящих к

отказам, и раскрытия физических взаимосвязей между величинами, входящими в модели отказов, и параметрами режима резания дано физическое обоснование статистическим моделям отказов инструментов, представленным в главе 2.

Резание металлов рассматривается как процесс управляемого разрыва и восстановления металлических связей, в результате которого обрабатываемый металл подвергается разрушению и пластической деформации с отделением стружки и образованием новых поверхностей с одновременным разрушением инструмента. Макроскопические характеристики процесса (температура в зоне резания, силы резания, износ инструмента) являются результатом суммирования последствий множества элементарных актов разрушения и восстановления атомных связей обрабатываемого и инструментального материалов. При разработке физических моделей процессов, представляющих собой множество актов взаимодействия единичных объектов, каждый из которых имеет свою энергетическую характеристику, наиболее приемлемым является вероятностный подход.

Вероятность каждого единичного акта определяется высотой преодолеваемого при этом энергетического барьера, которая зависит от энергии, необходимой для полного разрушения кристаллических связей, и уменьшается в результате внешних энергетических воздействий. Процессы, характеристикой которых является время ожидания флуктуации энергии, достаточной для преодоления энергетического барьера, называются термофлуктуационными. Анализ существующих теорий разрушения показал, что два основных процесса, сопровождающих резание металлов - разрушение и пластическая деформация обрабатываемого материала и разрушение инструментального материала, проявляющееся в его износе - могут быть описаны следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} k_b \theta \ln(\tau / \tau_0) &= U_0 - \delta_u \sigma_u \\ k_b \theta \ln(\kappa_d / \nu) &= U_0 - \delta_m \sigma_m \end{aligned} \quad (5)$$

где: θ - температура в зоне резания;

σ_m, σ_u - величина разрушающего напряжения соответственно для обрабатываемого и инструментального материалов;

δ_m, δ_u - структурно-чувствительные параметры для обрабатываемого и инструментального материалов;

U_0 - начальная энергия активации процесса разрушения (деформации), близкая к энергии сублимации.

τ - время ожидания элементарного акта разрушения инструмен-

тального материала;

τ_0 - период колебаний атомной связи;

k_B - постоянная Больцмана.

С учетом того, что разрушающее напряжение для обрабатываемого материала σ_m определяет внешнюю нагрузку, а, следовательно, и разрушающее напряжение σ_u для инструмента, формулы (5) связывают между собой три независимых параметра: ϑ ; θ ; σ_m . При условии принятия ряда допущений, в частности о том, что при обработке резанием разрушается пластичный материал режущим клином произвольной формы из более прочного и твердого материала, резание рассматривается как пластическое течение, разрушение инструмента происходит в общем случае не на атомарном уровне, а блоками различной величины, рассматриваются только адгезионный механизм разрушения инструмента, и др., в результате проведения ряда теоретических выкладок было получено, что в случае применимости термофлуктуационной модели для описания процесса резания должны выполняться следующие соотношения:

$$\frac{1}{\theta} = k_B \frac{\ln k_A - \ln \vartheta}{U_0 - P/St}; \frac{\ln(T/\tau_0)}{\ln(k_A/\vartheta)} = \frac{U_0}{k_t} - \ln(k_A/\vartheta) \cdot \frac{\sigma_m^2}{Q_{адг} k_u^2 k_t^2} \quad (6)$$

откуда следует, что экспериментальные зависимости между $1/\theta$ и $\ln \vartheta$ а также между $\ln(T/\tau_0)/\ln(k_A/\vartheta)$ и $\ln(k_A/\vartheta)$ должны быть линейными, что было подтверждено анализом большого количества экспериментальных исследований, как по данным автора, так и по литературным данным. Стойкость инструмента T определялась как время достижения допустимого износа $Q_{адг}$. Параметры k_A и k_t , характеризующие, соответственно, пластические свойства обрабатываемого материала и термодинамические свойства системы, могут быть экспериментально определены при экстраполяции полученных линейных зависимостей. Коэффициент k_u , включающий структурно-чувствительный параметр δ_u и характеризующий прочностные и геометрические параметры инструмента, не поддается точной оценке, что затрудняет проведение количественных расчетов по формулам типа (6) и аналогичным.

Стойкость можно определить следующим образом:

$$T = \tau_0 \exp \left\{ \frac{U_0 \cdot \ln(k_A/\vartheta)}{k_t} - \frac{1}{Q_{адг}} \left[\frac{\sigma_m \cdot \ln(k_A/\vartheta)}{k_u k_t} \right]^2 \right\} \quad (7)$$

Общий вид зависимостей стойкости от скорости резания, построенных по формуле (7) при разных значениях k_u , k_t , σ_m имеет экс-

тремальный характер, что соответствует большинству экспериментальных результатов, причем если параметры K_A и K_T определены по зависимости (6), то экстремум стойкости на теоретических зависимостях расположен в диапазоне скоростей резания 0,1...0,5 м/с, что также соответствует экспериментальным результатам. Форма кривых несколько отличается от экспериментальных зависимостей, что естественно, т.к. при выводе формул не учитывалось множество факторов, самый основной из которых - явление наростообразования, с которым большинство исследователей связывают экстремальный характер стойкостных зависимостей.

Дана трактовка физического смысла структуро-чувствительного параметра $\delta_{\text{ст}}$ применительно к инструментальному материалу. Показано, что этот параметр характеризуется дисперсией прочностных свойств рабочих приповерхностных областей инструмента, например микротвердости. Проведенный теоретический анализ роли параметров модели стойкость-скорость резания показал, что незначительное изменение структурно-чувствительного параметра $\delta_{\text{ст}}$, характеризующего прочностные свойства инструментального материала, резко изменяет стойкость, не меняя положения экстремума, в то время как изменение параметра $\delta_{\text{пл}}$, характеризующего прочностные и пластические свойства обрабатываемого материала, не изменяет стойкость, а смещает точку экстремума; изменение термодинамических характеристик системы приводит к изменению как стойкости, так и положения экстремума.

Экспериментальным моделированием работы режущего лезвия установлено, что образующийся нарост обуславливает дискретный контакт и переменные значения времени контакта t_k изнашиваемой задней поверхности с поверхностью резания, которые зависят от параметров режима резания. С учетом этого и наряду с другими факторами, сопровождающими процесс резания, расчетно-экспериментальным путем показано, что существование нароста предопределяет экстремальный характер отношения t_k к времени отсутствия контакта t_n и стойкости при обработке пластичных материалов в соответствии с зависимостью (8):

$$T = \frac{h_A}{h} + \frac{h_A}{h} \cdot \frac{t_k}{t_n}, \quad (8)$$

где: h - скорость изнашивания;

h_A - допустимая величина износа.

Решением задачи о упруго-пластическом контактировании двух

поверхностей с учетом дискретного характера контакта, обусловленного существованием нароста, при принятии определенных допущений показано, что номинальная площадь износа задней поверхности инструмента и, следовательно, величина критерия оптимального износа при возникновении функциональных отказов будут принимать различные значения в зависимости от параметров режима резания.

По мере возрастания износа инструмента изменяются размеры и местоположение нароста на лезвиях инструмента. Нарост постепенно перемещается на калибрующие лезвия, изменяя формообразующий размер развертки. Причиной параметрических отказов по точности и шероховатости является достижение определенной высоты нароста. Доказано, что при различных значениях параметров режима резания допустимая высота нароста $H_{доп}$ возникает при различных величинах износа задних поверхностей и, следовательно, критерий оптимального износа является величиной, принимающей различные значения.

Установлено, что износ рабочих поверхностей осевых инструментов приводит к изменениям макро- и микрогеометрических параметров режущих лезвий, технологических показателей обработки и физических явлений, сопровождающих процесс резания. Эти проявления связаны с параметрами режима резания:

- звуковые явления при сверлении имеют различный характер, так, при скоростях резания $V < 0,3$ м/с функциональному отказу предшествует появление "щелчков", при $V > 0,3$ м/с функциональному отказу предшествует "скрип";

- особенностью разворачивания является значительная зависимость работоспособности инструмента от величины износа и ширины калибрующей лезвочки. При $k_s > f_s$ процесс разворачивания претерпевает качественные изменения. Значительно возрастает количество отверстий более низких качеств точности (менее Н7) и шероховатости ($R_a > 0,6$ мкм); нарост достигает максимальной высоты и изменяет свое местоположение, постепенно перемещается на калибрующую часть;

- режущие профили метчиков претерпевают существенные изменения в радиальном направлении, что приводит к изменению расчетных значений сечений стружки и к перераспределению срезаемого припуска между режущими профилями метчика. Одновременно с износом протекает и ряд других качественных и количественных изменений лезвий и рабочих поверхностей сверл, разверток и метчиков.

Статистические испытания, результаты которых изложены в гл. 2, не позволили однозначно выявить, какие конкретные рабочие элементы и физические явления, возникающие на них, привели к отказу инструмента. В связи с этим в данном разделе были поставлены задачи: исследовать физические явления, обуславливающие отказ, установить рабочий элемент, износ которого приводит к отказам в зависимости от параметров режима резания, и разработать методические основы получения обобщенных уравнений для определения критериев оптимального износа $\dot{h}^{opt}$. Одновременно ставилась задача установить интенсивность изнашивания рабочих элементов инструмента от тех же параметров процесса обработки, что вместе с определением $\dot{h}^{opt}$ необходимо для реализации моделей отказов, изложенных в гл. 2.

Рабочие элементы осевых инструментов при их эксплуатации выполняют различные функции и в силу этого испытывают различные силовые и температурные нагрузки, что наряду с особенностями геометрических и конструктивных параметров элементов определяет их различные скорости изнашивания и вклад в отказ инструмента.

Вклад износа рабочих элементов в отказ инструмента зависит от параметров режима резания и технологических требований на обработку. Обосновано, что в диапазоне скоростей сверления $v \leq 0,3$ м/с отказ сверл обусловлен износом ленточек, при $v > 0,3$ м/с отказ инструмента обусловлен износом задних поверхностей. Параметрический отказ при развертывании по точности обусловлен износом главных задних поверхностей, по шероховатости – износом калибрующих ленточек. Отказ машинно – ручных метчиков обусловлен износом задних поверхностей последних режущих профилей.

Увеличение износа рабочих элементов осевых инструментов приводит к качественному изменению динамических процессов обработки. Монотонный характер увеличения момента резания с ростом износа при определенной его величине прерывается "всплесками" момента, которые обусловлены кратковременными адгезионными схватываниями изношенных поверхностей инструмента и обрабатываемой поверхности. Превышение "всплеском" момента разрушения инструмента M_p обуславливает его функциональный отказ. Должно выдержи-

ваться соотношение:

$$M_p \leq M_{доп} = M_{рез} / K \quad (9)$$

где K - коэффициент, характеризующий соотношение между M_p и $M_{доп}$ на данном режиме обработки, при котором с учетом износа режущих элементов инструмента $h_{опт}$ возникают качественные изменения зависимости $M_{рез} = f(h)$.

Величина износа, предшествующая появлению "всплесков" момента, ограничивает работоспособность инструмента и является величиной оптимального износа $h_{опт}$ инструментов, для которых характерны функциональные отказы. Установлено, что величина $h_{опт}$ является функцией параметров режима резания, зависит от конструктивных размеров и прочностных характеристик стали инструмента ($m=k'/d$ - отношение диаметра сердцевинки k' к диаметру d , $n'=B/d$ - отношение ширины зуба B к диаметру d , q - диаметр спинки - для сверл; P - шаг резьбы, $r_{вн}$ - внутренний радиус резьбы - для метчиков; τ_{max} и σ_s - предел хрупкой прочности и предел прочности при кручении соответственно, k_k - коэффициент концентрации напряжений) и имеет экстремальный характер. Разработаны модели для расчета значений $h_{опт}$ при обработке углеродистых конструкционных сталей:

при сверлении:

$$h_{св}^{опт} \leq \frac{1}{0,0675} \lg \left[\frac{1,03 \cdot 10^{1,4m+0,2n'} \cdot \tau_{max} \cdot q^3}{K \cdot S^{0,9584} \cdot d^{1,7833} \cdot HB^{0,7}} \right] \text{ мм, при } v \leq 0,3 \text{ м/с} \quad (10)$$

$$h_{з}^{опт} \leq \frac{1}{0,7887} \lg \left[\frac{1,314 \cdot 10^{1,4m+0,2n'} \cdot \tau_{max} \cdot q^3}{K \cdot S^{0,9584} \cdot d^{1,7833} \cdot HB^{0,7}} \right] \text{ мм, при } v \geq 0,3 \text{ м/с}$$

при резьбонарезании метчиками:

$$h_{з}^{опт} \leq \frac{1}{0,8832} \lg \left[\frac{\sigma_s \cdot r_{вн}^3 \cdot \varphi^{-0,3163}}{K \cdot k_k \cdot 1,113 \cdot 10^{-2} \cdot d^{2,293} \cdot P^{0,4567} \cdot Z^{0,2}} \right] \text{ мм.} \quad (11)$$

Параметрический отказ разверток обусловлен соотношением между величиной износа задней поверхности и шириной калибрующей ленточки, которое выступает как наиболее общее ограничение работоспособности инструмента. Статистическими методами установлена критериальная зависимость износа задней поверхности в долях ширины ленточки $h_{3д} = (1,5 \dots 1,65) f_d$, позволяющая с вероятностью 0,95 независимо от параметров режима резания обеспечить точность отверстия не менее 9-го квалитета и шероховатость $R_a \leq 2,5$ мкм.

Разработаны математические модели для расчета оптимальных величин износа задних поверхностей и ленточек разверток, обеспечивающие выполнение требования по точности (не менее Н9) и шероховатости ($R_a \leq 1,25$ мкм и $R_a \leq 2,5$ мкм) обработанных отверстий:

по точности (Н9): $R_z^{opt} = 3,1285 \cdot v^{-0,3325} \cdot s^{-0,2117} \cdot t^{0,2745} \cdot d^{0,4741v - 0,4611s + 0,1526d}$, мм, (12)

по шероховатости:

$R_a \leq 2,5$ мкм: $R_z^{opt} = 0,2529v^{-0,2399} \cdot s^{-2,203} \cdot t^{-0,4506} \cdot d^{0,44969} \cdot e^{-0,374v + 2,275s + 0,0786d}$, мм, (13)

$R_a \leq 1,25$ мкм: $R_z^{opt} = 0,2708 \cdot v^{4,614} \cdot s^{-0,203} \cdot d^{-0,4969} \cdot e^{-0,397v + 2,275s + 0,0786d}$, мм, (13)

Установлены диапазоны скорости резания и подачи, в которых в качестве ограничения работоспособности разверток выступает точность или шероховатость.

Использование критерия оптимального износа является одним из эффективных способов обеспечения надежности осевых инструментов, не требующим дополнительных затрат на его реализацию и позволяющим снизить вероятность отказа инструментов и максимально использовать их режущие свойства, т.е. повысить их полный ресурс.

Разработана и исследована система уравнений для расчета интенсивности (скорости) изнашивания конструктивных элементов осевых инструментов в зависимости от основных параметров режимов резания и установлены основные характеристики их распределения.

Разработана система бездефектного восстановления режущих свойств осевых инструментов, которая в отличие от существующей в нормативах учитывает величину износа всех рабочих элементов инструмента и устанавливает количество переточек с учетом медленно протекающего процесса изнашивания формообразующих элементов. Разработаны также алгоритмы и пакет прикладных программ для расчета основных технико-экономических показателей при обработке осевыми инструментами, учитывающие вероятностное проявление стойкости и износа инструментов.

Глава 5. РАЗРАБОТКА УСКОРЕННЫХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ОСЕВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

Необходимость оценки надежности режущего инструмента применительно к конкретным условиям его эксплуатации обуславливается тем, что результаты, устанавливающие методические подходы к опре-

делению показателей надежности и дающие исходные данные для полученных моделей при обработке углеродистых конструкционных сталей, требуют проведения тщательных лабораторных и производственных исследований. Сбор статистических данных о работе инструментов также является трудоемким способом получения данных о надежности из-за большой номенклатуры инструмента и разнообразия условий его эксплуатации.

Все это не позволяет прогнозировать показатели надежности инструментов, диагностировать их текущее состояние и оперативно решать ряд других вопросов, связанных с эксплуатацией инструмента. В связи с этим разработка ускоренных методов оценки показателей надежности инструментов является актуальной задачей.

Рассмотрена структурная схема факторов, взаимодействующих в процессе обработки осевыми инструментами, для которых характерными являются модели постепенных отказов в результате накопления износа.

Элементами схемы являются составляющие технологической системы обработки: оборудование, приспособление, обрабатываемая заготовка и инструмент, каждый из которых характеризуется набором факторов, имеющих начальное рассеивание и изменяющихся случайным образом в процессе обработки. Это приводит к рассеиванию выходных параметров обработки, определяющих конкретные значения показателей надежности инструмента.

Скорость изнашивания инструмента и показатели его надежности определяются факторами (их показателями), действующими в процессе обработки. Связь между ними может быть представлена в виде "факторного" корреляционного графа. Вершинами графа являются показатели надежности инструмента и факторы, их определяющие. На ребрах графа указываются значения коэффициентов парной корреляции между показателями надежности и факторами (их показателями), отражающими состояние оборудования, инструмента, заготовки, характеристики и условия резания.

Оценка эксплуатационных свойств и показателей надежности инструментов по факторным связям обладает рядом недостатков: необходимостью устанавливать функциональные связи между факторами и состоянием инструмента, которые либо неизвестны, либо их установление является сложной научно-технической задачей; трудоемкость процедур оценки, отсутствие оперативности; необходимость использования специальной аппаратуры.

Поэтому представляется более целесообразным оценивать состояние инструмента и показатели его надежности по физическим параметрам процесса резания, относительно легко поддающимся измерениям. Эти физические параметры (силы резания, температура, вибрации и т. д.) при работе острозаточенным инструментом отражают влияние факторов на процесс обработки. При дальнейшей эксплуатации инструмента на физические параметры начинает дополнительно влиять износ инструмента.

Физические параметры процесса резания и величины износа инструмента состоят в корреляционной связи по отношению к факторам процесса обработки, следовательно, находятся в корреляционной связи между собой. Это позволяет применять физические параметры процесса резания в качестве диагностических признаков состояния инструмента, представив факторное пространство в компактной форме в виде графа связей диагностических признаков с величиной износа (стойкостью) инструментов.

Разработана система оценки информативности диагностических признаков, в качестве которых выступают соответствующие физические параметры процесса резания, позволяющая выявить признаки, наилучшим образом отражающие состояние инструментов. Система включает требования чувствительности, однозначности, тесноты корреляционной связи диагностического признака с износом. Наиболее информативному диагностическому признаку соответствует вершина-лидер корреляционного графа, определяемая с помощью решения задачи о лидере.

Проведено исследование информативности диагностических признаков, в качестве которых рассматривались постоянные и переменные составляющие сигналов момента, осевой силы, термо-ЭДС резания, кривизна переходного процесса этих сигналов при врезании инструмента, тока экзoeлектронной эмиссии (ЭЭЭ). Экспериментально исследованы зависимости средних и среднеквадратических значений диагностических признаков. Анализ изменения диагностических признаков в функции от величины износа, скорости резания, подачи и диаметра инструмента позволил выявить типовые виды частных зависимостей и установить наиболее точные модели для их аппроксимации.

Обосновано, что для удовлетворения требованиям информативности система контроля состояния инструментов должна фиксировать несколько диагностических признаков.

Установлено, что изменение энергетического состояния пове

ностных слоев в процессе изнашивания инструмента имеет сложный характер, совпадающий с характером изменения скорости изнашивания k . Установлено, что между k и током ЭЗЗ имеется тесная корреляционная связь, сохраняемая во всем исследованном диапазоне скоростей резания, причем минимум скорости изнашивания и тока ЭЗЗ наблюдается при одной и той же скорости резания. Установлена тесная корреляционная связь этих величин с переменной составляющей термо-ЭДС.

Разработаны две группы ускоренных методов оценки показателей надежности инструментов. Первая группа методов основана на установленных линейных корреляционных связях скорости изнашивания и диагностических признаков. Вторая группа методов основана на использовании математических моделей связи диагностических признаков с основными параметрами режима резания, особенностью которых является то, что износ инструмента выступает в качестве аргумента диагностического признака. Указанные методы прошли экспериментальную проверку, которая показала хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений показателей надежности.

Глава 6. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ОСЕВЫХ ИНСТРУМЕНТОВ.

В пределах настоящей работы рассматриваются способы повышения и обеспечения надежности осевых инструментов, не требующие дополнительных затрат для их реализации, т.е. основывающиеся на базе имеющихся технических средств и известных технологических приемов: посредством установления требований на точность изготовления конструктивных и геометрических параметров инструмента, применения поверхностных покрытий и химико-термической обработки (ХТО). С целью разработки общинженерных рекомендаций и с учетом специфики осевых инструментов приводятся результаты, которые иллюстрируют рекомендации по повышению надежности или предлагают последовательность (методику) действий для достижения требуемых показателей надежности.

Рассмотрено влияние на работоспособность осевых инструментов правильности назначения и точности исполнения их геометрических параметров. Экспериментально показано, что установлением оптимальных значений геометрических параметров режущей части инструментов и уменьшением рассеивания их значений можно улучшить показатели надежности: уменьшить дисперсию стойкости и изно-

22

са в 2...2,5 раз, коэффициента вариации стойкости до 1,7 раза.

Показана необходимость нормирования точности ряда геометрических параметров разверток и метчиков. Отсутствие нормирования угла режущей части и углового шага между зубьями в пределах одного инструмента приводит к возникновению суммарных геометрических погрешностей $\Delta\varphi$ и $\Delta\xi$ и, как следствие, к возникновению неравновешенной радиальной силы, вызывающей разбивание отверстий. Величина разбивки и ее дисперсия могут быть определены по зависимостям:

$$\Delta_p = C \cdot \Delta\varphi^{c_1} \cdot \Delta\xi^{c_2}, \quad (14)$$

$$\sigma_p^2 = (C_1 \cdot \Delta\varphi^{c_1-1} \cdot \Delta\xi^{c_2}) \cdot \sigma_{\Delta\varphi}^2 + (C_2 \Delta\varphi^{c_1} \cdot \Delta\xi^{c_2-1}) \cdot \sigma_{\Delta\xi}^2, \quad (15)$$

где C , C_1 и C_2 - постоянные коэффициенты.

Выполненный анализ показывает, что суммарная геометрическая погрешность угла режущей части φ и углового шага ξ разверток находится в интервале от 5' до 1' и при обработке со скоростью резания до 0,16 м/с ее влияние на разбивку не превышает 5 мкм. При повышении скорости резания необходимо нормировать точность угла режущей части и углового шага зубьев.

Наличие погрешности углового шага метчиков вносит поправку в расчетную толщину срезаемого слоя, которая может быть определена по зависимости:

$$\Delta z = \frac{P}{Z} \cdot \sin \varphi + \frac{\Delta\xi \cdot \cos \varphi}{2 \tan \varphi} (KZ - P \tan \varphi).$$

В общем случае $\Delta\xi$ является суммой погрешностей:

$$\Delta\xi = \Delta\xi_1 + \Delta\xi_2 + \Delta\xi_3,$$

где $\Delta\xi_1$ - угловое смещение зуба из-за неточностей изготовления метчика;

$\Delta\xi_2$ - угловое смещение лезвия из-за наличия переднего угла δ ;

$\Delta\xi_3$ - угловое смещение лезвия метчика из-за наличия угла λ .

Анализ показывает, что погрешность $\Delta\xi$ на соседних по направлению резьбовой нитки лезвиях может достигать 6°. Такая погрешность приводит к изменению расчетной толщины срезаемого слоя до 0,15 мм, что оказывает существенное влияние на условия работы режущих профилей, особенно при работе с малыми углами режущего конуса φ . Погрешность углового шага метчиков должна быть нормирована таким образом, чтобы поправка к расчетной толщине срезаемого слоя, обусловленная погрешностью, не превышала 0,03 мм. Это обеспечит разбивку приведенного среднего диаметра в пределах поля

допуска на его размер.

Экспериментальным и расчетным путем показано, что существующие технологические процессы изготовления метчиков обеспечивают изготовление инструмента с последним режущим профилем двух различных форм, появление каждой из которых носит неопределенный характер. Доказано, что одна из форм является предпочтительной с точки зрения стабильности процесса резьбонарезания и более высокой стойкости метчиков. Разработан метод и дополнения в технологический процесс изготовления инструментов, обеспечивающие получение метчиков с предпочтительной формой профиля. Это обеспечивает повышение средней стойкости в 2...2,5 раза и стабильности процесса резьбонарезания, коэффициент вариации стойкости не превышает 0,2.

Проведено исследование влияния нескольких видов химико-термической обработки и поверхностных покрытий на показатели надежности осевых инструментов. Сравнительный анализ микрофотографий изношенных участков показал, что для быстрорежущих инструментов с различными видами покрытий и упрочнений характерен абразивно-адгезионный износ. Вид преобладающего износа при одинаковых условиях эксплуатации зависит от метода упрочнения, в пределах одного упрочнения вид превалирующего износа зависит от параметров режима резания.

Упрочнения оказывают существенное и неоднозначное влияние на изменения моментов, сил и термо- ЭДС резания. Несущественное в большинстве случаев расхождение дисперсий физических параметров до и после упрочнения свидетельствует о качественном постоянстве контактных процессов в зоне резания. Существенное изменение средних значений физических показателей отражает количественные изменения на контактных поверхностях и в частности изменения скорости изнашивания без изменения механизма изнашивания. На этой основе разработана методика ускоренных испытаний, позволяющая выбрать вид упрочнения для конкретных условий эксплуатации инструмента, реализующий положение: наиболее эффективным в данных условиях эксплуатации является тот метод упрочнения, который приводит к наибольшему снижению средних значений физических параметров процесса резания, при одновременном снижении или, по крайней мере, отсутствии увеличения их среднеквадратических отклонений.

Показано, что для упрочненных быстрорежущих инструментов сох-

раняются модели формирования отказов, характерные для неупрочненного инструмента. Изменения претерпевают входящие в них параметры. Так, к статистически значимому снижению скорости изнашивания при обработке углеродистых конструкционных сталей на режимах резания автомитизированного производства приводит ионное азотирование, лазерная закалка, цианирование, обработка паром, электроискровое легирование T15K6, в некоторых случаях карбонитрация. Покрытие TiN не оказывает существенного влияния на скорость изнашивания. Указанные упрочнения снижают коэффициент вариации наработки и износа в сравнении с неупрочненным инструментом за исключением покрытия TiN и электроискрового легирования T15K6.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ:

В диссертационной работе осуществлено теоретическое обобщение и решение крупной научно-технической проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение: разработаны методы оценки и обеспечения показателей надежности массовых быстрорежущих осевых инструментов, сформирована методология нормирования режимов резания, расхода и восстановления инструментов с учетом вероятностной природы их изнашивания и стойкости как средства повышения технико-экономической эффективности машиностроительного производства.

1. На основе положений теории разрушения и резания металлов обосновано, что закономерности процесса резания и изнашивания инструментов имеют термофлуктуационную природу:

- экстремальный вид зависимости стойкости от скорости резания при адгезионном механизме изнашивания является следствием переменного характера интенсивности изнашивания, который определяется размерами микроблоков разрушающегося инструментального материала и временем ожидания их разрушения. Увеличение или уменьшение размеров микроблоков, определяемое температурными и силовыми нагрузками на поверхностях инструментов, не приводит к соответствующему однозначному изменению интенсивности изнашивания, т.к. одновременно изменяется время ожидания разрушения микроблоков;

- теоретический анализ роли параметров модели стойкость-скорость резания показал, что незначительное изменение прочностных свойств инструментального материала резко изменяет стойкость. не

меняя положение экстремума, в то время как изменения прочностных и пластических свойств обрабатываемого материала не изменяют значения стойкости, а смещают точку экстремума, изменение термодинамических характеристик системы приводит к изменениям как величины стойкости, так и положения экстремума;

- расчетно-экспериментальным путем показано, что при обработке пластичных материалов образующийся нарост обуславливает дискретный контакт и переменные значения времени контакта изнашиваемой задней поверхности с поверхностью резания в зависимости от параметров режима резания. Это наряду с другими факторами вносит определенный вклад в экстремальный характер зависимости стойкость-скорость резания и обуславливает различные значения величины номинальной площади износа инструмента при функциональных отказах и, следовательно, критерия оптимального износа;

- причиной параметрических отказов по точности и шероховатости является достижение определенной высоты нароста H_A . Доказано, что при различных значениях параметров режима резания допустимая высота нароста H_A возникает при различных значениях износа задней поверхности и, следовательно, критерия оптимального износа.

2. На основе статистического анализа установлены математические модели отказов быстрорежущих осевых инструментов:

- функциональные отказы спиральных сверл и параметрические отказы машинных разверток размерами $d > 6$ мм при обработке углеродистых конструкционных сталей возникают в результате постепенного накопления повреждений в виде износа рабочих поверхностей. Обосновано, что в зависимости от параметров режима резания им соответствуют модели без рассеивания и с рассеиванием начальных параметров (времени и величины приработочного износа);

- функциональные отказы машинно-ручных метчиков размерами от М8 до М42 при обработке углеродистых конструкционных сталей формируются в результате постепенного накопления износа задних поверхностей и внезапных разрушений, обусловленных "пиковыми" нагрузками, вероятность появления которых постоянна в течение эксплуатации инструмента;

- формирование функциональных (метчики) и параметрических (развертки) отказов в пределах стойкости (наработки) сопровождается медленно протекающим с постоянной скоростью процессом изнашивания формообразующих конструктивных элементов инструментов. Это определяет полный ресурс разверток и метчиков и приводит

к формированию постепенного отказа из-за потери формообразующих размеров инструментов. Разработаны схемы расходования полного ресурса, позволяющие установить систему переточки, оценить количество переточек и технико-экономические показатели обработки.

3. Рассмотрение инструмента как системы, состоящей из ряда конструктивных элементов, позволило установить, что рабочие элементы осевых инструментов в зависимости от параметров режима резания вносят различный вклад в их отказы. Обосновано, что в диапазоне скоростей сверления ниже 0,3 м/с отказ сверл обусловлен износом ленточек, при скоростях более 0,3 м/с отказ инструмента обусловлен износом главных задних поверхностей. Параметрический отказ по точности при разворачивании обусловлен износом главных задних поверхностей, по шероховатости - износом калибрующих ленточек. Отказ машинно-ручных метчиков обусловлен износом задних поверхностей последних режущих профилей.

4. Монотонное возрастание динамических показателей обработки с ростом износа инструмента претерпевает качественные изменения: при определенной его величине возникают "всплески" динамических показателей из-за адгезионных схватываний изношенных поверхностей инструмента и обрабатываемой поверхности. Превышение "всплеском" момента разрушения инструмента обуславливает его функциональный отказ. Величина износа инструментов, предшествующая появлению "всплесков", ограничивает работоспособность и является величиной оптимального износа K^{opt} инструментов, для которых характерны функциональные отказы. Разработана система критериальных уравнений, позволяющая установить оптимальные значения износа рабочих элементов в зависимости от параметров режима резания и осуществить нормирование стойкости и основных показателей надежности инструментов.

5. Использование критериев оптимального износа является одним из эффективных способов обеспечения надежности осевых инструментов, не требующим дополнительных затрат на его реализацию, позволяющим снизить вероятность отказа инструментов и максимально использовать их режущие свойства. Разработана система бездефектного восстановления режущих свойств осевых инструментов, которая в отличие от существующей в нормативах учитывает величину износа всех рабочих элементов инструментов.

6. Разработаны алгоритмы и пакет прикладных программ для расчета основных технико-экономических показателей при обраб

углеродистых конструкционных сталей осевыми инструментами, учитывая вероятностное проявление стойкости и износа инструментов.

7. Анализ графов связи износа (стойкости) инструментов и физических параметров процесса резания с факторами процесса обработки показал, что физические параметры процесса и величины износа инструментов состоят в корреляционной связи по отношению к факторам обработки, следовательно, находятся в корреляционной связи между собой. Это позволяет применять физические параметры процесса резания в качестве диагностических признаков состояния инструментов, представив факторное пространство в компактной форме в виде графа связей диагностических признаков с величиной износа (со стойкостью) инструментов. Разработана система оценки информативности диагностических признаков, позволяющая выявить признаки, наилучшим образом отражающие состояние инструмента; обосновано, что для удовлетворения требованиям информативности система контроля состояния инструментов должна фиксировать несколько диагностических признаков. Установлен характер изменения диагностических признаков в процессе изнашивания инструментов.

8. Разработаны две группы ускоренных методов оценки показателей надежности инструментов. Первая группа методов основана на выявленных линейных корреляционных связях скорости изнашивания и диагностических признаков. Вторая группа методов основана на использовании математических моделей связи диагностических признаков с основными параметрами режима резания, особенностью которых является то, что износ инструмента выступает в качестве аргумента диагностического признака. Предложенные методы прошли апробацию и позволяют оценивать основные показатели надежности осевых инструментов применительно к большинству ситуаций "жизненного цикла" инструментов.

9. Разработаны новые методы повышения надежности, проведена оценка влияния на надежность быстрорежущих осевых инструментов известных конструктивных и технологических приемов их улучшения, особенностью которых является то, что для их реализации не требуются существенных затрат:

- доказано, что отсутствие нормирования угла режущего конуса φ и углового шага между зубьями ξ в пределах многозубого инструмента приводит к параметрическим отказам по точности обработки. Сформированы подходы и разработаны рекомендации по нормированию указанных углов;

- обоснованы и разработаны метод и дополнения к технологическим процессам изготовления метчиков, обеспечивающие получение инструментов с предпочтительной формой последнего режущего профиля. Это обеспечивает повышение средней стойкости в 2...2,5 раза, при коэффициенте вариации не более 0,2.

10. Сравнительным анализом показано, что для быстрорежущих инструментов, прошедших карбонитрацию, цианирование, ионное азотирование, лазерное упрочнение, ионное плакирование TiN, электроискровое легирование твердым сплавом T15K6, обработку паром и ряд других обработок, характерен абразивно-адгезионный износ. Для упрочненных быстрорежущих инструментов сохраняются модели формирования отказов, характерные для неупрочненного инструмента. Изменения претерпевают входящие в них параметры.

11. Выполненные комплексные исследования количественных и качественных закономерностей влияния упрочнений на изменения скорости изнашивания, моментов, сил и термо-ЭДС резания позволили разработать методику ускоренных испытаний, позволяющую выбрать вид упрочнения для конкретных условий эксплуатации инструментов, реализующую следующее положение: наиболее эффективным в данных условиях эксплуатации является тот метод упрочнения, который приводит к наибольшему снижению средних значений физических параметров процесса резания при одновременном снижении или, по крайней мере, отсутствии увеличения их среднеквадратических отклонений.

Результаты работы были использованы для нормирования режимов резания, при разработке новых и совершенствовании существующих технологических процессов изготовления режущего инструмента, организации систем инструментообеспечения на предприятиях электронной, авиационной, металлургической, автомобильной, оборонной промышленности с общим экономическим эффектом более 620 тыс. рублей в ценах до 1992 года.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах автора:

1. Древаль А.Е. Усилия резания при резьбонарезании метчиками // Изв. вузов. Машиностроение. - 1970. - №9. - С.160-166.
2. Древаль А.Е. Влияние геометрии режущей части и точности угла между зубьями метчика на параметры срезаемого слоя // Изв. вузов. Машиностроение. - 1973. - №6. - С.147-152.
3. Древаль А.Е. Влияние погрешностей взаимной установки мет

- и детали на положение оси резьбового отверстия // НИИИнформ. Тяж.Маш., 1976. - №12 - 76-18. - С. 47.
4. Древаль А.Е. Влияние внешней осевой силы на точность профиля резьбы при резбонарезании метчиком // Высокопроизводительные конструкции режущего инструмента. - М.: МДНТП, 1976. - С. 159-162.
 5. Древаль А.Е. Оптимальная сила ведения метчика при резбонарезании // НИИИнформ. Тяж.Маш., 1977. - №12 - 77-17. - С. 15.
 6. Древаль А.Е. Влияние точности кинематики инструмента на точность нарезаемой резьбы // Труды МВТУ. - 1981. - №364. - С. 84-94.
 7. Методики экспериментальных исследований по определению исходных данных для разработки общемашиностроительных нормативов режимов резания по основным видам обработки / под ред. Г.И. Грановского. - М.: ВНИИ, 1982. - 160 с.
 8. Общемашиностроительные нормативы режимов резания, норм износа и расхода машинных метчиков из быстрорежущей стали (временные). - М.: НИИМаш, 1982. - 32 с.
 9. Древаль А.Е., Татаринцов А.С., Новотоцких О.А. Взаимосвязь точности угла режущей части развертки с работоспособностью инструмента // Изв. вузов. Машиностроение. - 1985. - №3. - С. 121-124.
 10. Древаль А.Е., Рагрин Н.А. Восстановление работоспособности спиральных сверл // Информ. лист. КиргизНИИНТИ (Фрунзе). - 1985. - №34(3691). - 4 с.
 11. Древаль А.Е., Татаринцов А.С. Определение допустимой величины износа машинных разверток // Вестник машиностроения. - 1987. - №2. - С. 49-50.
 12. Прокошкин Д.А., Древаль А.Е., Рафиков Р.Ч. Влияние химико-термических обработок на показатели надежности быстрорежущих сверл // Изв. вузов. Машиностроение. - 1987. - №6. - С. 132-135.
 13. Древаль А.Е., Татаринцов А.С. Формирование отказов машинных разверток при обработке конструкционных углеродистых сталей // Труды МВТУ. - 1987. - №476. - С. 46-56.
 14. Рагрин Н.А., Древаль А.Е. Обеспечение надежности быстрорежущих спиральных сверл в автоматизированном производстве. - Фрунзе: Киргиз НИИНТИ, 1988. - 45 с.
 15. Древаль А.Е., Зеленцова Н.Ф., Шачнев С.Ю. Восстановление работоспособности машинных разверток // Изв. вузов. Машиностроение. - 1988. - №6. - С. 131-134.

16. Древаль А.Е. Модели отказов инструментов осевого типа // Всесоюзная научно-техническая конференция "Разработка и реализация новых механических и физико-химических методов обработки": Тезисы докладов. М.: Изд-во МВТУ 1988. Часть 1. С. 165.
17. Древаль А.Е., Ардисламов В.К. Обеспечение надежности осевого инструмента посредством диагностирования по физическим параметрам процесса резания // Изв. вузов. Машиностроение. - 1989. - №1. - С. 136-139.
18. Рафиков Р.Ч., Древаль А.Е. Влияние химико-термических обработок и поверхностных покрытий на физические показатели процесса резания // Изв. вузов. Машиностроение. - 1989. - №3. - С. 37-40.
19. Литвиненко А.В., Древаль А.Е., Белоз А.В. Показатели надежности карбонитрированных машинно-ручных метчиков // Станки и инструмент. - 1990. - №3. - С. 47.
20. Древаль А.Е., Татаринов А.С. Выбор режимов резания и определение показателей надежности при разворачивании // Чистовая обработка материалов резанием. - М.: МДНТП, 1990. - С. 127-132.
21. Древаль А.Е., Литвиненко А.В., Рагрин Н.А. Надежность быстрорежущего инструмента для обработки отверстий // Новая технология, оборудование, оснастка и инструмент для механической обработки и сборки. - М.: МДНТП, 1990. - С. 140-146.
22. Древаль А.Е., Андрушко С.В., Федотов Н.И. Устройства диагностирования состояния режущего инструмента по динамическим показателям // Диагностика технологических процессов в машиностроении. - М.: МДНТП, 1990. - С. 137-142.
23. Древаль А.Е., Карпович С.С., Литвиненко А.В. Диагностика состояния инструмента осевого типа // Диагностика технологических процессов в машиностроении. - М.: МДНТП, 1990. - С. 143-146.
24. Древаль А.Е., Ардисламов В.К. Диагностирование состояния осевого режущего инструмента // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 1991. - №2. - С. 111-116.
25. Древаль А.Е., Литвиненко А.В. Способы повышения надежности машинно-ручных метчиков // Станки и инструмент. - 1991. - №10. - С. 26-29.
26. Гаринов Н.К., Древаль А.Е., Зеленцова Н.Ф. Методика определения потребности производства в инструменте // Известия вузов. Машиностроение. - 1991. - №4-6. - С. 126-130.
27. Древаль А.Е., Ткаченко И.В. Критерии износа осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали // Информационный сборник

МАШМИР. - 1991. - Вып. 12. - С. 1-7.

28. Древаль А. Е., Ардисламов В. К., Егоров В. М. Ускоренные испытания осевого режущего инструмента на надежность // Вестник машиностроения. - 1992. - №3. - С. 56-58.
29. Древаль А. Е., Ткаченко И. В., Рагрин Н. А. Модели отказов спиральных сверл // Проблемы эксплуатации инструмента в металлообрабатывающей промышленности. М.: ЦРДЗ, 1992. - С. 55-62.
30. Литвиненко А. В., Древаль А. Е. Повышение эксплуатационных свойств машинно-ручных метчиков // Проблемы эксплуатации инструмента в металлообрабатывающей промышленности. М.: ЦРДЗ, 1992. - С. 50-55.
31. Древаль А. Е., Ткаченко И. В. Техничко - экономические показатели обработки при использовании различных критериев износа // Информационный сборник МАШМИР. - 1992. - Вып. 1. - С. 6 - 11.
32. Древаль А. Е., Литвиненко А. В., Ткаченко И. В. Модель отказов машинно - ручных метчиков // Вестник МГТУ. - 1992. - Вып. 3. - С. 16-24.
33. Древаль А. Е., Литвиненко А. В., Ткаченко И. В. Предельное состояние быстрорежущих машинно-ручных метчиков // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1992. - № 1-3.
34. А. с. 1194582 СССР, МКИЗ В23В1/00. Способ определения оптимальной скорости резания / В. Н. Подураев, А. Е. Древаль, Н. А. Рагрин // Б. И. - 1985. - №44.
35. А. с. 1278117 СССР, МКИЗ В23В51/02. Сверло / Б. Д. Даниленко, А. Е. Древаль, Н. А. Рагрин // Б. И. - 1986. - №47.
36. А. с. 1345049 СССР, МКИЗ G01В/00. Устройство для получения слепка внутренней резьбы детали / А. Е. Древаль, А. В. Литвиненко // Б. И. - 1987. - №38.
37. А. с. 1437160 СССР, МКИЗ В23В51/02. Сверло / А. Е. Древаль, Н. А. Рагрин, Р. Ч. Рафиков // Б. И. - 1988. - №42.
38. А. с. 1559764 СССР, МКИЗ С23С14/00. Способ обработки режущего инструмента / В. Н. Подураев, А. Э. Сенченко и др. - 1989. - д. с. п.
39. А. с. 15499682 СССР, МКИЗ В23С5/06. Метчик / А. Е. Древаль, А. В. Литвиненко, С. Н. Актов и др. // Б. И. - 1990. - №10.
40. А. с. 1758400 СССР, МКИЗ G01В3/40. Устройство для контроля метчика / А. Е. Древаль, А. В. Литвиненко // Б. И. - 1992. - №32.