Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.»

На правах рукописи

Плешакова Екатерина Сергеевна

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ПАРАМЕТРАМ ДЕФЕКТОВ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.т.н., профессор В.В. Мартынов

Саратов – 2018

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ ……. 5

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ……. 11

1.1. Основные направления повышения надежности процессов механической обработки материалов резанием ……... 11

1.1.1. Повышение надежности оборудования ……..... 12

1.1.2. Повышение надежности режущего инструмента ……. 15

1.2. Износ и стойкость режущего инструмента 17

1.2.1. Износ режущего инструмента ……. 17

1.2.2. Критерии износа и затупления режущего инструмента 19

1.2.3. Стойкость режущего инструмента ……. 20

1.3. Взаимосвязь износа инструмента с физическими характеристиками процесса резания ……. 22

1.4. Постановка задач исследования ……. 27

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА …….. 32

2.1. Методика и результаты исследования …….. 32

2.2. Анализ результатов …… 35

2.2.1. Дефекты модифицированного инструмента …….. 35

2.2.2. Классификация дефектов ……..... 43

2.2.3. Определение параметров дефектов ……..... 49

2.3. Разработка способа оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента ……. 57

2.3.1. Постановка задачи …… 57

2.3.2. Модель процесса формирования состояния модифицированного инструмента …….. 61

2.3.3. Технология моделирования ……. 64

2.3.4. Расчетная схема самоорганизации модифицированного слоя ……. 76

2.3.5. Схема формирования траектории изменения состояния инструмента в процессе моделирования 85
2.4. Выводы 88

3. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ МОДИФИЦИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА 93
3.1. Общая структура 93
3.2. Язык программирования 94
3.3. Формирование и ведение базы данных 97
3.4. Работа с базой данных 106
3.4.1. Анализ диаграмм 106
3.4.2. Идентификация закона распределения данных 109
3.4.3. Вычисление вероятностных характеристик 111
3.5. Анализ и принятие решений по результатам оценивания 114
3.6. Система имитационного моделирования 116
3.7. Выводы 121

4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОЦЕНИВАНИЯ 123
4.1. Компьютерная система оценивания 123
4.2. Объекты оценивания 128
4.3. Результаты оценивания 129
4.3.1. Физико-механические свойства материалов 129
4.3.2. Время стойкости инструмента 138
4.4. Результаты моделирования 140
4.4.1. Результаты моделирования данных экспериментальных исследований 141
4.4.2. Результаты моделирования данных опытно-промышленной эксплуатации модифицированного инструмента 145
4.4.3. Условия повышения эксплуатационной надежности модифицированного инструмента 148

4.4.4. Алгоритм оптимизации процесса эксплуатации
модифицированного инструмента ……. 157
4.5. База знаний системы ……... 161

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ……..... 163

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ …….. 166

ПРИЛОЖЕНИЯ …….. 185
Приложение А. Матрицы попарных сравнений объектов и признаков ……. 186
Приложение Б. Матрицы влияния факторов на вероятности переходов
при моделировании …… 195
Приложение В. Основные экранные формы компьютерной системы
оценивания качества процесса эксплуатации
модифицированного металлорежущего инструмента ……. 203
Приложение Г. Материалы практической реализации результатов работы … 214

ВВЕДЕНИЕ

Для современного производства характерно широкое применение легированных сталей и сплавов, а также других материалов с высокими прочностными характеристиками. При контакте с инструментом данные материалы вызывают значительные знакопеременные нагрузки на его режущих кромках и высокую температурную напряженность в зоне резания. Это провоцирует интенсивное изнашивание инструмента и значительно сокращает период его стойкости. С целью увеличения стойкости обработка ведется на пониженных режимах, что повышает трудоемкость изготовления деталей. В то же время сложившаяся на сегодняшний день общемировая тенденция интенсификации технологических процессов изготовления деталей машин различного назначения обуславливает необходимость нового уровня повышения конкурентоспособности лезвийной обработки по сравнению с другими методами формообразования, что связано с развитием мехатронных станочных систем, оснащенных интеллектуальным компьютерным управлением, в том числе процессом резания, поэтому требует применения высокостойких инструментов, поскольку преждевременный выход инструмента из строя приводит к остановке программы изготовления деталей и значительным временным затратам на восстановление его работоспособности, что снижает эффективность использования оборудования. Для решения этой проблемы существуют различные подходы, например, применение сборного инструмента (рисунок В.1), что значительно сокращает время восстановления работоспособности, а также упрочнение его рабочей части различными способами, в частности, воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда (рисунок В.2), повышающее износостойкость за счет формирования в поверхностном слое композитной структуры, способной рассеивать энергию, идущую на развитие и поддержку процесса изнашивания. В связи с изложенным являются актуальными обоснование и разработка математического, алгоритмического, информационного и программного обеспечения компьютерных систем автоматизированного оценивания процесса эксплуатации данного инструмента для его последующей оптимизации.

Рисунок В.1 – Сборный металлорежущий инструмент

Рисунок В.2. Режущий инструмент, модифицированный воздействием низкотемпературной плазмы

Цель работы: повышение надежности металлорежущего инструмента с модифицированной рабочей частью на основе автоматизированного оценивания качества процесса его эксплуатации.

***Объект исследования*:** рабочая часть металлорежущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда.

Предмет исследования: состояние рабочей части, сформированное в процессе эксплуатации инструмента, и алгоритмизация его оценивания по параметрам дефектов.

Методы и средства исследования. Работа представляет собой комплекс исследований, направленных на обоснование возможности использования дефектов для проведения достоверной оценки результатов процесса эксплуатации модифицированного металлорежущего инструмента, выполненных с привлечением соответствующих разделов теорий резания, прочности и изнашивания, вероятностей и математической статистики, моделирования, методов экспертной оценки, положений технологии машиностроения и материаловедения. Экспериментальные исследования проведены методом математического моделирования на ЭВМ по результатам производственной эксплуатации инструмента различного целевого назначения и данным о его дефектах, полученным с помощью стандартной измерительной аппаратуры.

Научная новизна работы заключается в установлении взаимосвязи между условиями эксплуатации и параметрами дефектов рабочей части металлорежущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы, обосновании способа и разработке математического и алгоритмического обеспечения для оценивания этой взаимосвязи с использованием вероятностного моделирования.

Практическая ценность работы состоит в создании программного комплекса для автоматизированного оценивания и анализа результатов модификации и эксплуатации модифицированного металлорежущего инструмента, позволяющего осуществлять целенаправленный поиск условий для их оптимизации.

Реализация работы была осуществлена по результатам стойкостных испытаний модифицированных сменных многогранных твердосплавных пластин в лаборатории кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», ОАО «Саратовский подшипниковый завод», ОАО «Саратовский агрегатный завод» и вагоноремонтном депо ВЧД-5 (ж/д ст. Сортировочная-Фарфоровская Октябрьской железной дороги) при изготовлении деталей (в том числе военной техники) из сталей 45, 45ГСФ, ШХ-15, 40Х, 12Х2Н4А, 30ХГСА и 35ХГСЛ на универсальном и специальном колесотокарном станках, а также токарном, токарно-фрезерном и многоцелевом станках с ЧПУ и позволила не только подтвердить достоверность основных научных положений и выводов, но и разработать рекомендации по повышению эффективности использования модифицированного инструмента.

Представленные результаты являются завершением исследований, начатых в магистерской диссертации автора на тему: «Автоматизированное оценивание качества процесса эксплуатации модифицированного режущего инструмента», а также составной частью фундаментальных научных исследований, выполнявшихся автором в научном коллективе кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (СГТУ имени Гагарина Ю.А.) по проектам в рамках государственного задания на оказание услуг (выполнение работ) в 2012-2013 гг., Программы стратегического развития СГТУ имени Гагарина Ю.А. на 2012-2016 гг., гранта РФФИ №14-08-00396-а на 2014-2016 гг. и гранта У.М.Н.И.К. №004514 на 2014-2015 гг.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на научно-практической Интернет-конференции с международным участием «Bringing Science to Life – Наука и жизнь» (Саратов, 2013 г.), международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2013» (Казань, 2013 г.), международной научно-практической конференции «Наука и образование в XXI веке» (Тамбов, 2013 г.), международной научно-технической конференции «Наукоемкие комбинированные и

виброволновые технологии обработки материалов» (Дивноморское, 2013 г.), IX Mezinárodní vědecko-praktická konference «Vědecký průmysl evropského kontinentu-2013» (Praha, Čeh. Resp., 2013 г.), IX Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji «Wykształcenie i nauka bez granic – 2013» (Przemyśl, Pol. Resp., 2013 г.), I международной заочной научно-технической конференции «Технологическое обеспечение машиностроительных производств» (Челябинск, 2013 г.), 9-а международна научна практична конференция «Бъдещето въпроси от света на науката – 2013» (София, Респ. България, 2013 г.), международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, 2014 г.), XXVII международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-27» (Саратов, 2014 г.), международной научно-практической конференции «Инновации в профессиональном образовании и научных исследованиях вуза» (Брянск, 2014 г.), международной научно-технической конференции «Производительность и надежность технологических систем в машиностроении» (Москва, 2015 г.), Third International Symposium on Optics and Biophotonics and Seventh Finnish-Russian Photonics and Laser Symposium (PALS) (Saratov, Russian Federation, 2015 г.), 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS) (Tomsk, Russia, 2015 г.), IV Международном технологическом форуме «Инновации. Технологии. Производство» (Рыбинск, 2017 г.), заседаниях кафедр «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении», «Проектирование технических и технологических комплексов», «Информационная безопасность автоматизированных систем» и «Технология машиностроения» СГТУ имени Гагарина Ю.А. в 2013-2018 гг.

В 2014 г. проект, включавший материалы работы, участвовал в экспозиции Министерства образования и науки Российской Федерации на Salon L’Etudiant (Paris, France).

Публикации. Материалы работы опубликованы в 36 печатных трудах, в том числе 3 монографиях, 13 статьях в изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ, 4 статьях в изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS, и зарегистрированы в 2 свидетельствах на программы для ЭВМ и 1 свидетельстве на базу данных.

Материалы работы используются в учебном процессе кафедры «Технология машиностроения» СГТУ имени Гагарина Ю.А. при чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплинам «Компьютерное моделирование в технике» и «Надежность и диагностика технологических систем».

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 164 страницах, списка литературы из 190 наименований, 80 рисунков, 20 таблиц и 4 приложений. Общий объем работы составляет 227 страниц.

На защиту выносятся следующие научные положения работы, соответствующие пунктам 2, 3, 4 паспорта специальности 05.02.07 и определяющие новизну решенных в ней задач:

1. Результаты экспериментального исследования процесса изменения состояния рабочей части модифицированного инструмента на примере сменных многогранных твердосплавных пластин.

2. Результаты классификации дефектов модифицированного режущего инструмента.

3. Способ (модель и технология ее использования) оценивания состояния рабочей части модифицированного инструмента по параметрам дефектов.

4. Программно-математическое обеспечение для оценивания состояния рабочей части модифицированного инструмента по параметрам дефектов.

5. Результаты практической реализации оценивания процессов модификации и эксплуатации модифицированного сборного инструмента различного целевого назначения и поиска условий повышения их надежности.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В распоряжении специалистов, связанных с проектированием, изготовлением и эксплуатацией технологического оборудования и режущего инструмента, всегда имеется широкий ассортимент методов и средств для обеспечения и повышения их надежности. Однако для сокращения затрат целесообразно, во-первых, стремиться к гарантированному обеспечению требуемого уровня надежности (а не вообще к его повышению) и, во-вторых, проводить целенаправленные мероприятия по обеспечению или улучшению тех характеристик, которые в наибольшей степени определяют надежность.

1.1. Основные направления повышения надежности процессов механической обработки материалов резанием

Решение вопросов повышения надежности и эффективности технологических процессов механической обработки, традиционно осуществляется по двум основным направлениям:

– повышение надежности технологического оборудования;

– повышение надежности режущего инструмента.

Каждое направление имеет свою специфику, но вместе с тем существуют общие принципы, определяющие эффективность их практической реализации. Так при проектировании необходимо стремиться к обеспечению наибольшей достоверности расчета и прогнозирования уровня надежности. При наличии опытного образца эти возможности расширяются, но получить информацию о надежности за короткий период времени можно только на основе специальных испытаний. Чем больше период эксплуатации, тем больший объем информации о фактическом уровне надежности можно получить, используя статистические методы анализа возникающих отказов и содержания ремонтных работ [1].

Однако по мере накопления информации ее ценность уменьшается, так как она устаревает, и важнее оценить уровень надежности вновь создаваемого образ-

ца. Поэтому процесс выполнения новых разработок должен сопровождаться расчетами и прогнозированием надежности, которые дают возможность не только обосновать наиболее рациональные пути и методы ее повышения, но и оценить их технико-экономическую эффективность.

1.1.1. Основные направления повышения надежности оборудования

Сложившаяся к концу 90-х годов XX в. картина развития мирового станкостроения показывает, что проблема повышения надежности оборудования решается в рамках трех основных направлений (рисунок 1.1) [2].

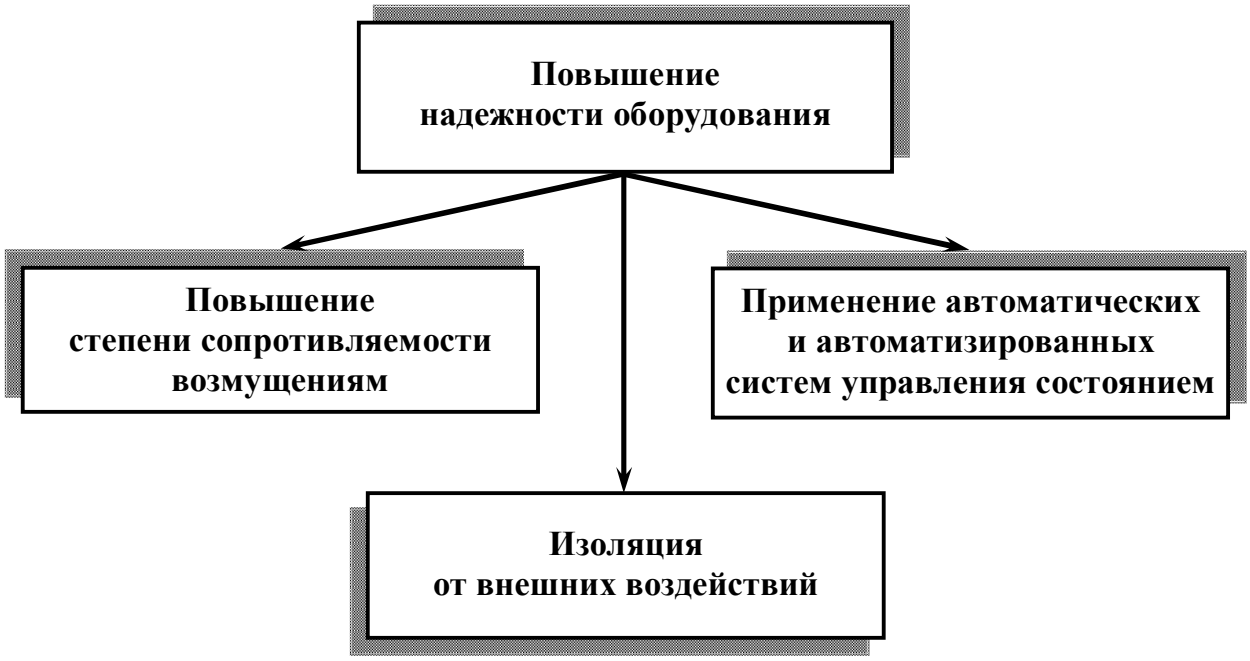


Рисунок 1.1 – Основные направления повышения надежности технологического оборудования

1. Повышение сопротивляемости внешним воздействиям. К этому направлению относятся методы создания узлов, обладающих за счет оптимизации их конструкции повышенной износостойкостью, улучшенными прочностными и жесткостными характеристиками, применение высокопрочных, износостойких, антикоррозионных, теплостойких и др. материалов (керамики, углепластика, композиционных

и антифрикционных), различных смазочных материалов для трущихся поверхностей (магнитных жидкостей, твердых смазочных материалов, воды, газовых смазочных материалов), а также упрочняющей обработки поверхностей [3-8 и др.].

Это направление объединяет все новейшие достижения в области конструирования и технологии, которые позволяют увеличивать стойкость узлов и механизмов по отношению к воздействиям, характерным оборудования данного типа. Вместе с тем, возможности сопротивления внешним воздействиям не безграничны, так как зависят от уровня развития соответствующей области техники.

2. Изоляция от внешних воздействий. Для этого направления характерно применение таких методов, как установка оборудования на виброизолирующий фундамент, защита поверхностей от запыления и загрязнения, применение коррозионностойких покрытий, создание для работающих станков специальных условий по влажности и температуре и т.д. Различного рода виброизолирующие и амортизационные устройства предотвращают воздействие пиковых нагрузок, не пропускают вредные для изделия частоты [9-11 и др.].

Различные защитные устройства и экраны, охраняющие изделия от пыли, влаги, различных излучений и агрессивных сред [12], механизмы, удаляющие отходы производства (стружку), фильтры, очищающие масло и воздух, и многие другие устройства создают более благоприятные условия для работы оборудования, повышают его надежность. Однако возможности по изоляции от внешних воздействий также ограничены, так как не устраняют основных причин, снижающих надежность. Кроме этого, постоянно присутствуют внутренние источники возмущений: вибрационных, тепловых и т.п.).

Результативность методов в рамках этих направлений оценивается эффективностью выполнения оборудованием своего служебного назначения и основных требований к нему. Позиции, по которым производится оценка, включают [13]:

– неизменность конструктивных решений (основной идеи) в течение длительного времени;

– оптимальное обеспечение основных параметров и невозможность серьезного улучшения конструкции в рамках принятой схемы.

3. Применение автоматики для управления состоянием. Автоматика – мощное средство для обеспечения надежности, которое привело к созданию самоподнастраивающихся и саморегулируемых систем, обладающих функциями самоприспособления к изменяющимся условиям функционирования, самодиагностирования текущего состояния и восстановления утраченной работоспособности. Применяют следующие методы управления состоянием [14-16 и др.]: управление температурой и силой резания в зоне обработки, стабилизация или создание направленных тепловых полей; управление деформациями корпусных деталей, зазорами в ответственных механизмах, толщиной масляной пленки или положением элементов; коррекция движения формообразующих органов; управление профилактическими операциями; осуществление диагностических процедур для выработки решений по регулированию параметров или режимов работы. Специфика автоматизированных систем для поддержания работоспособности заключается в том, что они:

– связаны не только с выходными параметрами оборудования в целом, но и с определяющими их характеристиками его отдельных элементов;

– учитывают скорость процессов, изменяющих состояние оборудования, и поэтому действие систем для поддержания и восстановления его работоспособности может быть периодическим.

Поскольку изменение технического состояния оборудования при его эксплуатации связано с динамическими процессами, и оно взаимодействует с ними как система автоматического регулирования, управление этим состоянием путем воздействия на процессы, параметры оборудования и на внешние возмущения – перспективный путь решения многих задач надежности там, где тривиальные методы исчерпаны.

Внедрение систем управления состоянием позволяет на 15-40% увеличить производительность обработки, повысить стойкость и практически исключить поломки инструмента, повысить точность изготовления и эксплуатационный ресурс деталей, быстрее адаптировать оборудование к постоянно изменяющимся режимам функционирования и номенклатуре изготовляемых деталей.

1.1.2. Основные направления повышения надежности режущего инструмента

Детальное исследование вопросов, связанных с надежностью режущего инструмента показывает, что в настоящий момент существуют многочисленные методы ее повышения: технологические, термические, химические и химико-термические, электрофизические, механические и термомеханические, но все они направлены на создание условий для того, чтобы инструмент в процессе резания, с одной стороны, мог выдерживать высокие нагрузки (силовые, тепловые, вибрационные), с другой – способствовал их уменьшению [17-21 и др.].

При выборе метода целесообразно учитывать его рентабельность, эффективность, экологическую чистоту. Подобным требованиям в наибольшей степени отвечают следующие методы [22]: применение прогрессивных СОЖ; механическое упрочнение, в частности поверхностное пластическое деформирование (статистическое и динамическое); криогенная обработка традиционного инструмента в жидком азоте; использование перспективных инструментальных материалов (рисунок 1.2), в частности минералокерамики (а), керметов (б), кубического нитрида бора (в), синтетического (г) и поликристаллического (д) алмаза.

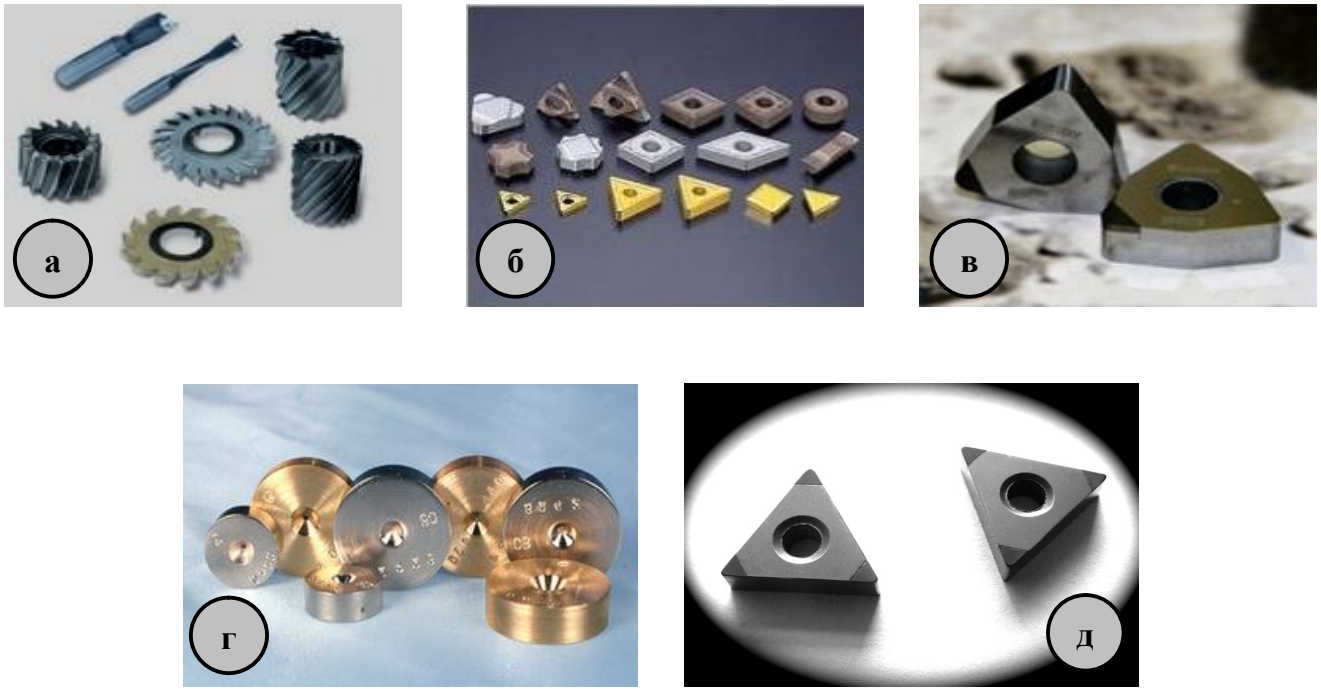


Рисунок 1.2 – Перспективные инструментальные материалы

Однако с учетом того, что к настоящему времени возникли новые отрасли техники, развитие которых связано с применением разнообразных материалов, в том числе новых и труднообрабатываемых, наиболее перспективными являются методы, в основе которых лежит либо нанесение износостойких покрытий (одно- и многокомпонентных) на рабочую часть инструмента [23-28], либо ее упрочнение различными методами: электроискровым легированием [29-32], лазерным упрочнением [33-35], химико-термической обработкой [36-44], плазменным термоупрочнением [45-52], ионно-плазменным диффузионным внедрением [53, 54], ионно-лучевой упрочняющей обработкой [55-59] (рисунок 1.3).

Рисунок 1.3 – Основные направления повышения надежности режущего инструмента

Сравнение представленных методов позволяет заметить, что для оборудования они, являясь более масштабными и разнообразными в содержательном аспекте, позволяют решать проблемы обеспечения и повышения его надежности с большей вероятностью получения положительных (с точки зрения эффективности процессов механической обработки) результатов. С учетом же того, что процессы изменения состояния оборудования являются медленными [1], можно считать надежность режущего инструмента фактором, лимитирующим потенциальные возможности методов повышения надежности оборудования, а потому проблему повышения надежности инструмента – по-прежнему актуальной. В связи с этим рассмотрим кратко основные аспекты, с позиций которых обычно ищется ее решение: износ и стойкость режущего инструмента.

1.2. Износ и стойкость режущего инструмента

Износ режущего инструмента оказывает непосредственное влияние на параметры точности и качества изготовленных деталей, производительность и себестоимость обработки, т.е. в конечном итоге на технико-экономические показатели производства в целом.

1.2.1. Износ режущего инструмента

Как результат сложного физического процесса, сопровождающего взаимодействие инструмента с обрабатываемой заготовкой при резании, износ проявляется в постепенном удалении с рабочих поверхностей инструмента частиц его материала.

В фундаментальных работах [60-64] констатируется, что при работе инструмента износ развивается немонотонно. Вначале на этапе приработки его интенсивность растет, на этапе нормальной эксплуатации она стабилизируется, и износ является минимальным, на третьем этапе интенсивность вновь возрастает и износ приобретает катастрофический характер.

Величинами, которые характеризуют износ количественно (или его элементами), являются ширина фаски по задней поверхности, размеры лунки на передней поверхности, уменьшение длины инструмента (размерный износ), потеря массы и др.

Масса изношенной части пропорциональна работе сил трения $F_{тр}$. Износостойкость инструмента (B) определяется условиями резания, и количественно может быть выражена работой сил трения A, затрачиваемой на превращение массы некоторой части лезвия m в продукт износа (мелкодисперсные частицы инструментального материала) в конкретных условиях взаимодействия с обрабатываемым материалом [65]:

$$B = A / m \, . \qquad (1.1)$$

Интенсивность процесса изнашивания j_u отображает скорость нарастания массы m продуктов износа на пути резания L, и может быть выражена следующим соотношением:

$$j_u = dm/\,dL\,. \tag{1.2}$$

Величина интенсивности (1.2) тем больше, чем выше истирающее свойство одного материала и ниже износостойкость другого материала, которые образуют пару трения.

Характеристиками степени изнашивания могут быть линейный и массовый износы. Мерой линейного износа является ширина площадки износа на задней поверхности или глубина лунки износа на передней поверхности. Мерой массового износа M является масса изношенной части инструмента:

$$M = V\rho_{\text{и}}\,, \tag{1.3}$$

где V и $\rho_{\text{и}}$ – соответственно объем изношенного инструментального материала и его плотность.

При исследованиях влияния различных факторов на интенсивность изнашивания вводится понятие относительного износа Δ, т.е. износа, отнесенного к пути, пройденному инструментом при резании L:

$$\Delta = M/L\,. \tag{1.4}$$

В работе [61] относительный износ характеризуется интенсивностью радиального износа и определяется как:

$$h_{\text{о.л.}} = \frac{\left(h_{\gamma} - h_{н}\right)\times 1000}{l - l_{н}}\,, \tag{1.5}$$

где $h_{\text{о.л.}}$ – линейный относительный износ, мкм/км; $h_{\text{г}}$ и $h_{\text{н}}$ – соответственно текущий и начальный радиальный (размерный) износ, мкм; l и $l_{н}$ – конечная (или текущая) длина пути резания и длина начального участка пути резания, м.

В этой же работе автором дано определение удельного износа как отношения ширины фаски износа по задней поверхности (в мкм) к времени работы инструмента (в минутах). При этом отмечено, что как относительный, так и удельный износ могут определяться лишь на участке, характеризующем установившийся износ.

1.2.2. Критерии износа и затупления режущего инструмента

По характерным признакам эксплуатации режущий инструмент можно объединить в четыре группы:

– инструмент общего назначения, эксплуатирующийся в условиях значительной неопределенности параметров рабочего процесса (например, черновая обработка на универсальном оборудовании и т.д.);

– инструмент, эксплуатируемый в условиях, имеющих определенные ограничения (автоматизированное производство и т.д.);

– инструмент, используемый для выполнения операций чистовой обработки;

– инструмент, используемый для реализации процессов прецизионной обработки, и инструмент, выход которого из строя недопустим.

По характеру нагружения инструмент можно объединить в две группы:

– инструмент, эксплуатируемый в широком диапазоне нагрузок;

– инструмент общего назначения, эксплуатируемый в узком диапазоне нагрузок.

Принимая во внимание то, что инструмент эксплуатируется в различных условиях, целесообразно ввести критерий, который был бы не только характеристикой его предельно допустимого износа, но и зависел от вида отказа.

Под критерием понимается параметр, характеризующий невозможность дальнейшего продолжения процесса обработки резанием. Обычно в качестве критериев принимают [66, 67]:

– достижение режущей кромкой предельного затупления, приводящего к значительному увеличению сил резания, тепловыделения, вибраций и т.д.;

– достижение предельного затупления, при котором дальнейшая эксплуатация инструмента возможна, но невыгодна экономически вследствие повышения вероятности его инструмента, необходимости удаления значительного объема инструментального материала при переточке или повышения вероятности брака;

– технологические критерии, соответствующие определенным технологическим ограничениям, таким как ухудшение шероховатости обработанной поверхности или потеря размерной точности, превышение которых определяет причину потери инструментом работоспособности.

Достижение критерия может быть следствием как постепенно накопленных (износ), так и внезапных (скол, поломка) изменений и иметь различную физическую природу.

За критерий могут приниматься также:

– выкрашивание или образование трещины на режущем лезвии;

– размер площадки износа на задней поверхности;

– параметры лунки износа на передней поверхности: глубина, ширина или другие;

– закругление режущей кромки;

– объем или масса изношенного инструментального материала;

– полное разрушение инструмента;

– комбинация критериев.

Для принятого критерия определяется или устанавливается предельно допустимое значение. Решение о прекращении работы инструмента принимается при достижении этого значения и, таким образом, определяет время его стойкости.

1.2.3. Стойкость режущего инструмента

Режущие свойства определяются способностью инструмента обрабатывать материал. Основной показатель режущих свойств – эксплуатационный ресурс за период стойкости инструмента до его полного использования с учетом всех переточек. Эксплуатационный ресурс оценивается:

– числом обработанных однотипных заготовок;

– длиной относительного рабочего пути;

– суммарной длиной всех обработанных заготовок;

– площадью обработанной поверхности;

– объемом металла, срезаемого с заготовки;

– периодом стойкости инструмента и числом его переточек.

Эксплуатационный ресурс представляет собой функцию комплекса факторов, связанных с конструкцией инструмента, режимами резания, свойствами инструментального материала (химическим составом, структурой, твердостью, пределами прочности на растяжение, изгиб и сжатие, тепло- или красностойкостью, износостойкостью), состоянием станка.

Важным показателем является также размерная стойкость инструмента, характеризуемая количеством обработанных деталей или временем работы до подналадки или замены. Размерная стойкость определяет точность изготовления деталей. За критерий затупления при оценке размерной стойкости чаще всего принимается радиальный износ [61].

Термин «стойкость» можно рассматривать в двух аспектах: период стойкости и суммарная стойкость.

Период стойкости определяется средним временем работы инструмента до отказа, под которым понимается достижение одним из критериев (см. п.1.2.2), предельного значения. Если отказ устраняется переточкой или заменой режущей части, то время работы инструмента определяется как период стойкости между переточками.

Суммарная стойкость определяется временем работы режущего инструмента до достижения предельного состояния, когда дальнейшая его работа становится невозможной. Под суммарной стойкостью понимается также время работы инструмента до полного использования комплекта сменных режущих элементов.

В общем случае стойкость характеризует способность инструмента выполнять определенные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение определенного промежутка времени или определенной наработки. Из этого следует, что стойкость является одной из характеристик надежности инструмента.

Сопоставление представленных трактовок стойкости с терминами ГОСТ 27.002-89 [68] позволяет сделать заключение, что периоду стойкости соответствует термин «наработка на отказ» или «средняя наработка до отказа», а суммарной стойкости – термин «ресурс работоспособности» (или просто «ресурс»).

В основе подхода к количественному оцениванию стойкости лежит ее описание как некоторой случайной величины [66, 69, 70], имеющей размерность времени. Наиболее полное описание любой случайной величины дает закон ее распределения:

$$F(t) = \int_0^T f(t)dt, \qquad (1.6)$$

где $f(t)$ – плотность вероятности распределения времени стойкости T.

При оценке времени стойкости T, наряду со средним (наиболее вероятным) значением, важную роль играют также показатели абсолютного и относительного разброса, характеризующие его стабильность: стандартное отклонение и коэффициент вариации.

1.3. Взаимосвязь износа с физическими характеристиками процесса резания

В процессе обработки материалов резанием имеет место взаимодействие (кинематическое и динамическое) двух твердых тел – обрабатываемой заготовки и режущего инструмента. Поверхностный слой, срезаемый с обрабатываемой заготовки, подвергается интенсивному пластическому деформированию. В результате он отделяется от обрабатываемой заготовки в частично или полностью разрушенном состоянии и приобретает форму стружки.

Рассматривая резание как комплекс взаимосвязанных и взаимообусловленных (включая и износ) явлений, авторы работ [60-64, 71-73] подчеркивают влияние на них таких факторов как:

– физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов: структура, твердость, пластичность, тепло-, электропроводность и др.;

– геометрия и состояние рабочих поверхностей;

– параметры технологического режима (подача и скорость резания);

– контактные взаимодействия;

– жесткость технологической системы.

При изменении параметров технологического режима и геометрии инструмента изменяются [61, 62, 64, 65, 72-76]:

– характер деформации обрабатываемого материала и количество выделяющегося при этом тепла;

– количество тепла, выделяющегося при трении стружки и обрабатываемой заготовки о рабочие поверхности инструмента;

– температура резания (температура на поверхностях контакта инструмента с заготовкой и стружкой);

– характеристики наблюдаемых при резании термоэлектрических, термомагнитных и гальваномагнитных эффектов;

– силы резания и т.п.

Изучению физической природы износа и его связи с характеристиками процесса резания посвящены работы [60-62, 74, 75, 77-79].

Абразивный износ возникает при внедрении твердых включений обрабатываемого материала в рабочую часть инструмента, что приводит к съему металла с ее рабочих поверхностей за счет микроцарапания.

Адгезионный износ происходит в результате одновременного накапливания частиц на одних и срыва накопившихся частиц с других микроучастков контактных площадок. В результате по всей контактной поверхности образуются микроочаги относительно кратковременного действия локальных сил адгезии (сцепления поверхностных слоев разнородных тел) между поверхностными слоями материалов инструмента и заготовки, чередующиеся с разрушением и уносом оторванных частиц стружкой или вновь образуемыми участками поверхности резания.

Диффузионный износ развивается вследствие взаимного растворения компонентов инструментального и обрабатываемого материалов; разрушения поверхностных слоев инструмента в результате структурных превращений и их разупрочнения. Диффузия является одним из химических процессов, сопровождающих резание.

Диффузионный износ подробно рассмотрен в работах [61, 62, 64, 78-81], где отмечается, что помимо непосредственного влияния на интенсивность изнашивания, диффузионные явления оказывают на износ и косвенное влияние. Так, повышение коэффициента диффузии вследствие повышения температуры контакта инструмент-заготовка, в ряде случаев приводит к росту коэффициента трения между трущимися поверхностями и увеличению их шероховатости в результате непрерывного взаимного проникновения атомов через их отдельные наиболее выступающие участки. Совместное повышение шероховатости и коэффициента трения между контактирующими поверхностями приводит к повышению интенсивности износа инструмента. Из этого следует, что снижение коэффициента диффузии обеспечивает замедление скорости диффузионного износа инструмента.

В работе [72] износ рассматривается как электродиффузионный процесс, в ходе которого происходит перераспределение компонентов инструментального и обрабатываемого материалов при прохождении тока через микроплощадки контакта между ними. Кроме этого показано, что при высоких температурах в зоне резания становится возможным перенос вещества в результате более свободного перемещения и обмена местами атомов пространственной решетки. Обоснованы методы и реализованы практически устройства, обеспечивающие разрыв цепи результирующего термотока, возникающего в контуре станок-инструмент-заготовка-станок. Производственные испытания показали, что стойкость инструмента в этом случае увеличивается от 2 до 3,6 раз.

В работе [82] износ рассматривается с позиций теории разрушения, поскольку абразивные, адгезионные и диффузионные процессы являются следствием предшествующих причин, основой которых являются дефекты кристаллического строения материалов.

Существуют теории, в основе которых лежат вакансионный [83] и дислокационный [84] механизмы разрушения.

Разрушение инструментальных материалов вследствие проявления дефектности структуры рассмотрено в работах [85, 86]. Снижение интенсивности изнашивания в фазе нормального износа быстрорежущего инструмента в работах

[79, 87, 87] связываются с протеканием в поверхностных слоях динамических процессов упрочнения и разупрочнения как результата эволюции дислокационной структуры при внешнем трении.

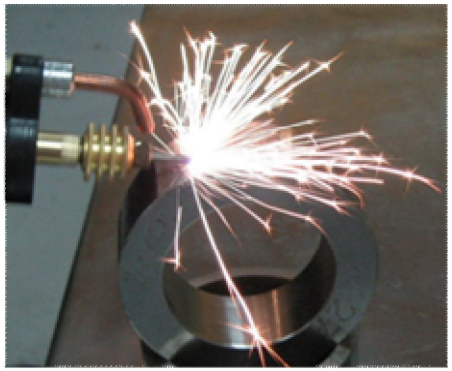
Учитывая специфические особенности инструментальных материалов, для объяснения процесса их разрушения при трении целесообразно анализировать несовершенства структуры на уровне как линейных, так и точечных дефектов. В связи с этим в работе [62] рассмотрены изменения свойств поверхностей и приповерхностных областей материалов, находящихся во фрикционном контакте, как следствие развития и изменения их дефектной структуры.

Точечным дефектам принадлежит особая роль, поскольку они первичны и их наличие определяет возникновение и поведение других дефектов – вторичных. Точечные дефекты обладают рядом важных с точки зрения процесса разрушения свойств: мигрируют; создают объемный эффект, ведущий к искажению кристаллической решетки; упорядочиваются в поле напряжений; увлекаются электронами в условиях электронно-решеточного взаимодействия. Наиболее предпочтительно из точечных дефектов выглядят вакансии, поскольку они являются термодинамически равновесными. Энергия их образования мала, поэтому они всегда существуют в кристаллах твердых тел.

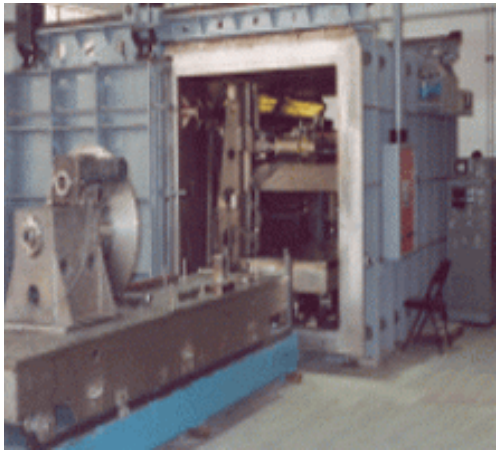
Анализируя основные направления обеспечения и повышения надежности инструмента (рисунок 1.3) с позиций рассмотренных аспектов, можно сказать, что применение покрытий, особенно высокопрочных, повышает износостойкость только при обработке конструкционных материалов [88]. При обработке же специальных материалов, таких как титановые сплавы, стали со специфическими свойствами, высокопрочные чугуны, или при сложных условиях нагружения (знакопеременные нагрузки и прерывистое резание) стандартные покрытия не обеспечивают необходимого уровня защиты инструмента, прежде всего твердосплавного, поскольку кинетика его изнашивания в этих условиях неодинакова [89]. Поэтому необходима разработка новых подходов к изготовлению самого инструментального материала с целью обеспечения условий для реализации различных механизмов упрочнения. В связи с этим заслуживают внимания методы, используемые в рамках второго направления (рисунок 1.4), прежде всего, плазменное

а

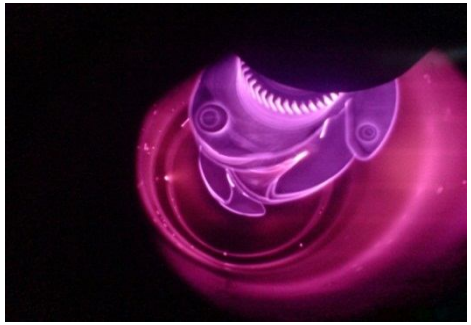
б



в



г



д

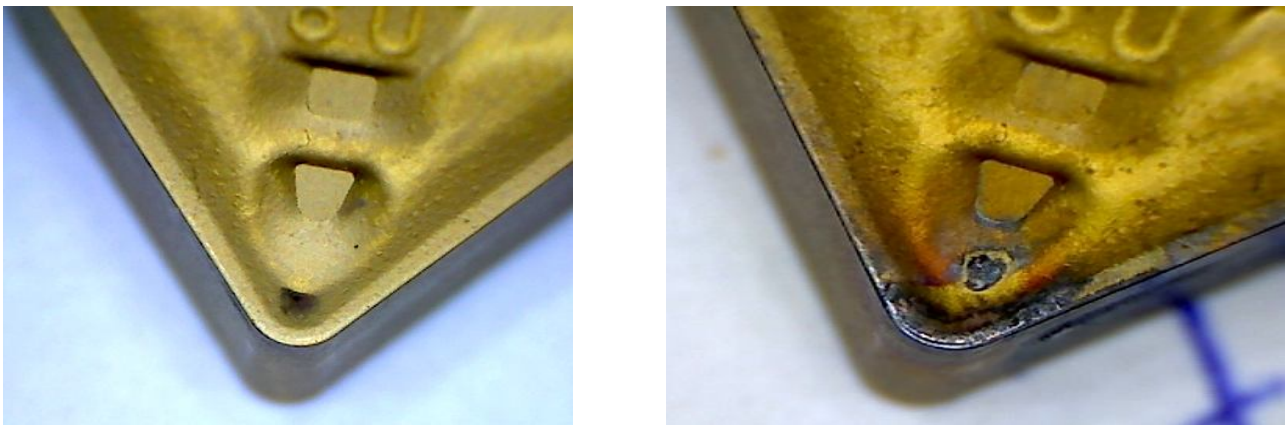
Рисунок 1.4 – Способы упрочнения рабочей части режущего инструмента: а – лазерное упрочнение, б – химико-термическая обработка, в – электроискровое легирование, г – лучевая обработка, д – плазменное термоупрочнение

упрочнение рабочей части инструмента, в частности, метод упрочнения воздействием на нее низкотемпературной плазмой комбинированного разряда [90, 91]. Основной технологической особенностью метода является первоначальный плавный нагрев и последующее резкое охлаждение инструмента, при этом плазма формируется непосредственно у обрабатываемой поверхности. Такой способ формирования разряда не только существенно отличает его от других известных способов, но и значительно упрощает конструкцию технологического оборудования, поскольку в нем отсутствуют источники плазмы, ионов или электронов, без которых невозможна реализация обработки, например, мощными пучками электронов или ионов. Подобная конструкция делает оборудование недорогим, более простым и экономичным в эксплуатации, поскольку потребляемая им мощность составляет менее 2 кВт, а время обработки в зависимости от вида, размера и материала обрабатываемого инструмента не превышает 20 минут [92].

1.4. Постановка задач исследования

Комплексные исследования свойств рабочих поверхностей инструмента различного целевого назначения из инструментальных сталей и твердого сплава, упрочненных воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда, а также стойкостные испытания, в том числе в условиях реального производства [90, 91] позволили зафиксировать существенное изменение параметров, характеризующих его эксплуатационную надежность, что определяет отличное от традиционного протекание процессов, связанных с изнашиванием.

Обычно (см. п.1.2) в процессе резания имеет место размерный износ в радиальном направлении (истирание вершины), который сопровождается образованием фаски на задней и лунки на передней поверхности (рисунок 1.5). В результате надежность инструмента постепенно снижается, т.к. он перестает обеспечивать размерную точность изготовленных деталей вследствие того, что назначенный



а **б**

Рисунок 1.5 – Твердосплавная пластина с покрытием TiN в начальном (а) и конечном (б) состояниях

под обработку припуск удаляется с поверхности заготовки не полностью. В этой ситуации надежность инструмента достигается реализацией либо управления его изнашиванием [93-96] с помощью различных автоматических систем (рисунок 1.6) на основе стабилизации связанных с износом физических параметров процесса резания, либо управления размерной точностью на основе дополнительного перемещения инструмента на величину его текущего износа, определяемого по результатам ручного или автоматического измерения размеров изготовленных деталей [97-99]. Эффективность управления точностью характеризуется степенью снижения разброса размеров изготовленных деталей (рисунок 1.7) [100].

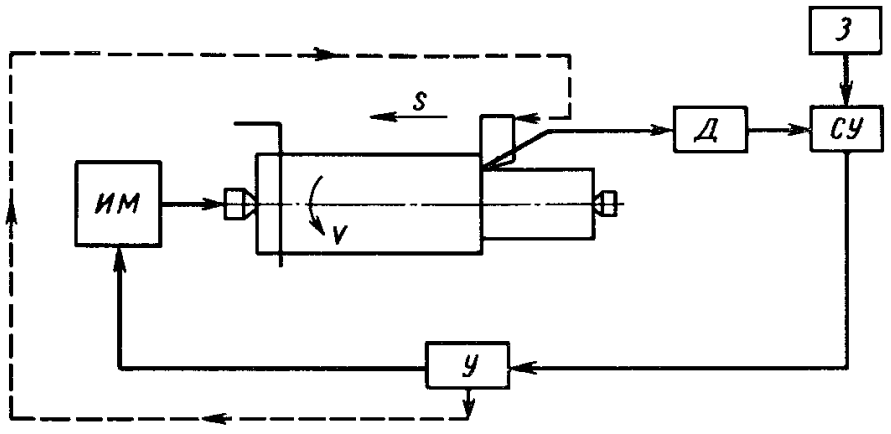


Рисунок 1.6 – Блок-схема системы управления изнашиванием режущего инструмента на основе стабилизации термоЭДС резания: Д – датчик, У – усилитель, СУ – сравнивающее устройство, З – задатчик, ИМ – исполнительный механизм, *v*, *S* – скорость резания и подача

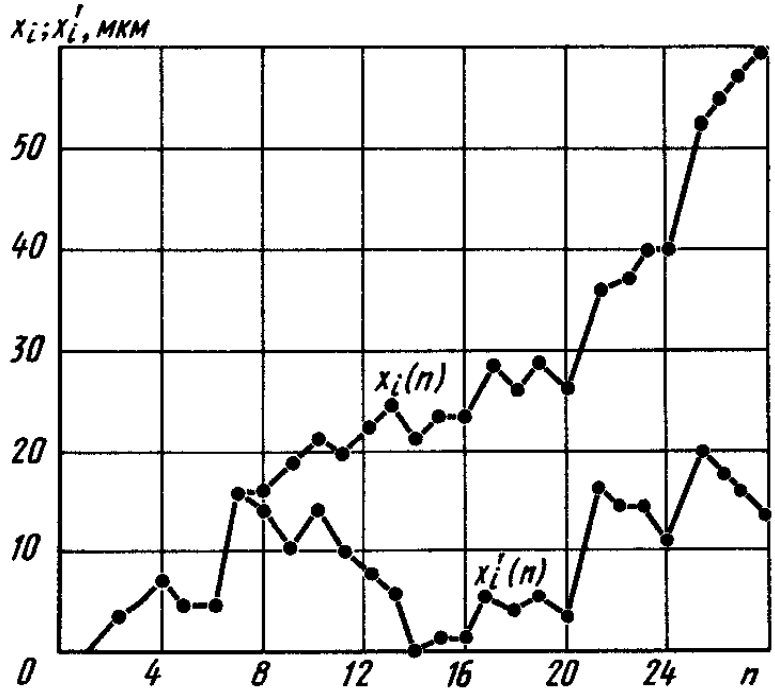
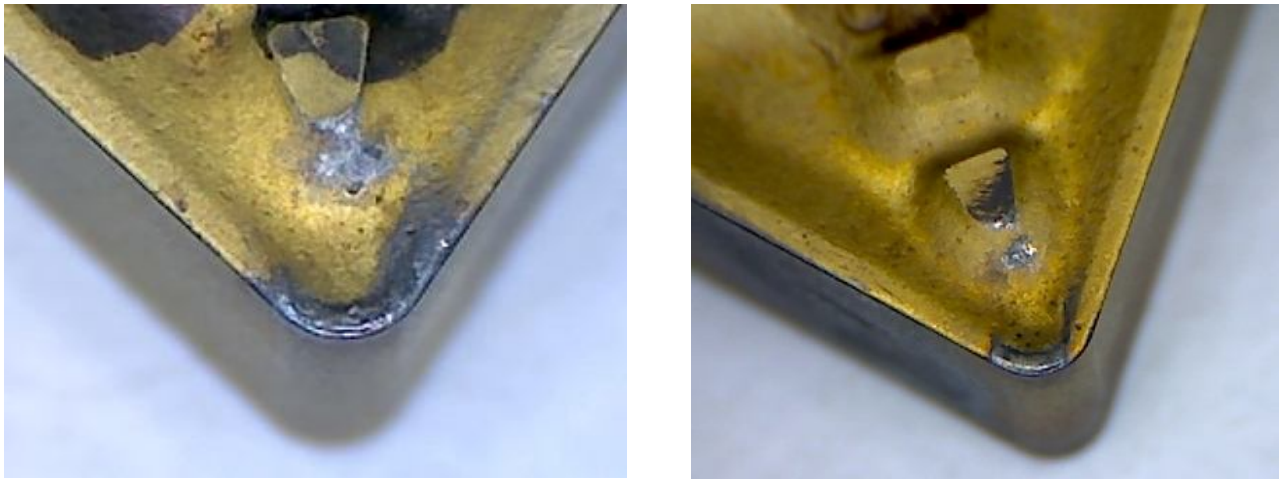


Рисунок 1.7 – Точностные диаграммы размеров x_i и x'_i деталей, обработанных без управления и с управлением точностью

При резании же модифицированным инструментом картина принципиально меняется (рисунок 1.8): размерный износ у него практически отсутствует, особенно в ситуации, когда обработка ведется на сочетании параметров технологического режима близком к оптимальному (рисунок 1.8, б); прямым следствием этого становится стабилизация размерной точности (рисунок 1.9).



а **б**

Рисунок 1.8 – Конечное состояние рабочих частей модифицированных твердосплавных пластин с покрытием TiN при обработке на замедленной (а) и ускоренной (б) подачах

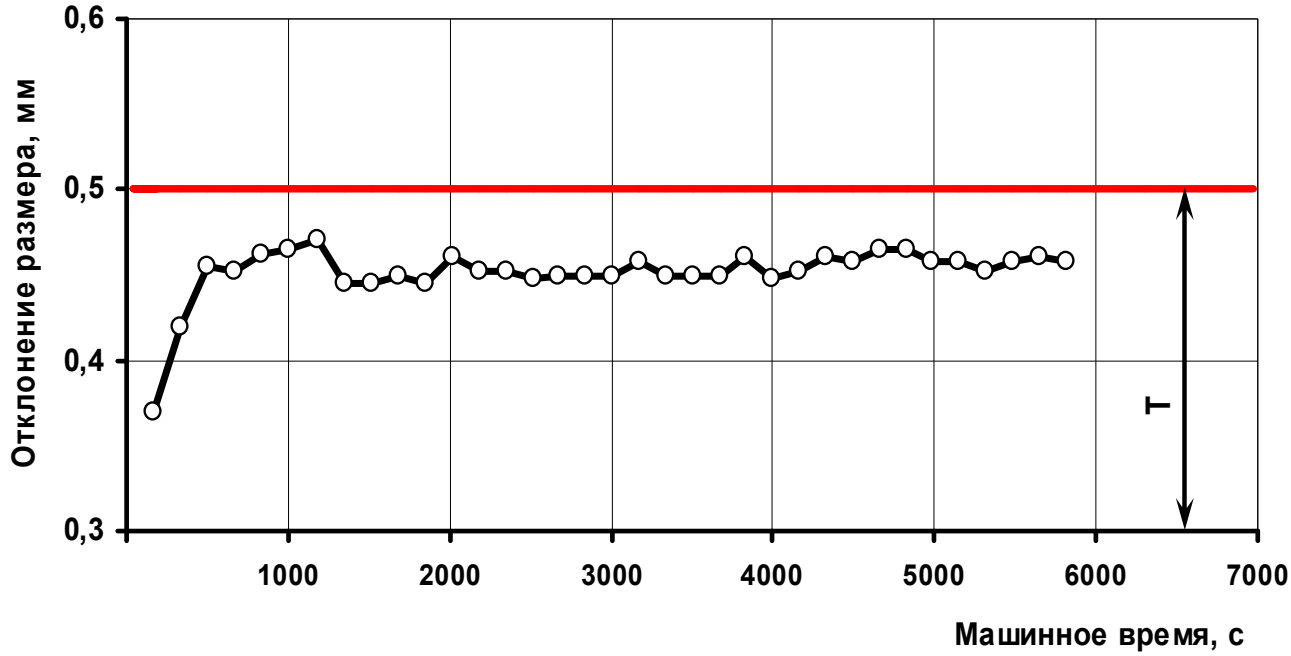


Рисунок 1.9 – Точностная диаграмма отклонений размеров деталей из стали ШХ-15, обработанных модифицированной пластиной из сплава Т15К6 на оптимальном сочетании параметров технологического режима: Т – допуск на размер

В связи с этим необходимо сказать, что наиболее характерным проявлениями изменений состояния рабочей части модифицированного инструмента является постепенное образование дефектов, снижающих микротвердость модифицированного слоя и увеличивающих степень ее неоднородности. Результатом становятся локальные разрушения режущей кромки, приводящие не только к ухудшению параметров качества поверхности изготовленных деталей (при выкрашивании), но и потере инструментом работоспособности (при сколах) [101, 102]. В связи с этим представляются актуальными исследования, направленные на автоматизацию процесса оценивания состояния рабочей части режущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы, с целью повышения его эксплуатационной надежности. Для достижения этой цели в работе поставлены и решаются следующие основные задачи:

1. Экспериментально-аналитическое исследование процесса изменения состояния рабочей части модифицированного инструмента на примере сменных многогранных твердосплавных пластин.

2. Разработка способа оценивания состояния рабочей части модифицированного инструмента по результатам эксплуатации.

3. Разработка программно-математического обеспечения для оценивания состояния рабочей части модифицированного инструмента.

4. Практическая реализация оценивания состояния рабочей части модифицированного инструмента.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ МОДИФИЦИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА

Исследование модифицированного инструмента проводилось по материалам его стойкостных испытаний в условиях реального производства [103], которые позволили зафиксировать отличное от традиционного протекание процессов, связанных с изменением состояния. Прямым следствием стало существенное улучшение показателей, характеризующих эксплуатационную надежность: повышение в 1,5-2,5 раза времени стойкости и стабилизация размерной точности обработки.

2.1. Методика и результаты исследования

Исследование по изучению закономерностей изменения состояния выполнялось по микрофотографиям, полученным на цифровом микроскопе Carton SPZT 50 с цифровой видеонасадкой Levinhuk C-Servies с увеличением 100^x, оптической системе микротвердомера ПМТ-3 с увеличением 500^x и электронном микроскопе MIRA\\ TESCAN LMU с увеличением до $200\,000^x$.

Объектами исследования стали сменные многогранные твердосплавные пластины из вольфрамо- и титано-вольфрамокобальтовых сплавов без покрытия и с покрытиями TiN и Al_2O_3+TiN. В связи с этим необходимо отметить, что для подобного инструмента износ главной режущей кромки не является определяющим, поскольку при продольном точении износ передней и задней поверхностей главной режущей кромки отвечает за линейные, а вспомогательной режущей кромки за диаметральные размеры. В результате отделения припуска вспомогательная режущая кромка контактирует с деталью, оставляя след рабочего движения в поверхностном слое металла, что ведет к образованию неровностей на изготовленной детали, т.е. состояние вспомогательной режущей кромки определяет и шероховатость. При этом чем меньше вспомогательный

угол в плане, тем больше вспомогательная режущая кромка приближена к обрабатываемой поверхности и тем больше вероятность ее контакта с гребешками образовавшихся неровностей.

Таким образом, устойчивость вспомогательной режущей кромки, определяя время работы режущего инструмента, позволит оценить эффективность процесса модификации.

Материалы исследования позволили установить, что вид и состояние поверхности отработанного модифицированного инструмента в значительной степени отличны от традиционных, что связано с изменением характера его контактных взаимодействий с заготовкой при резании. При этом формируется следующая картина [104, 105].

1. Перемещение большого количества продуктов износа по передней поверхности приводит к их скоплению в модифицированном слое. Поток отделяемого материала при набеге на эти скопления замедляет свое движение, происходит искривление его фронта, уплотнение отделяемого материала, в результате чего возникает локальное деформирование поверхности твердосплавной основы. Изменение направления движения потока ведет к локальному усилению износа и выносу его продуктов в боковом направлении.

2. Контактные взаимодействия провоцируют отрыв части модифицированного слоя у вспомогательной режущей кромки, а его смещение на самой кромке и оголение материала основы на передней поверхности приводят к образованию плоских дефектов на кромке. Отслоение на передней поверхности происходит в зоне налипания отделяемого материала как на основной, так и на вспомогательной задних поверхностях.

3. Исчезновение модифицированного слоя наблюдается на контактной площадке по задней поверхности, на вспомогательной режущей кромке, радиусе округления и в зоне схода стружки, а образующиеся дефекты носят плоский характер и распространяются по задней поверхности.

4. Застойной зоны и/или нароста на передней поверхности в зоне врезания пластины на радиусе округления не возникает. Однако налипание металла на пе-

редней поверхности в ряде случаев имеет место. Область налипания исходит из зоны разделения материала заготовки на стружку и обработанную поверхность и проходит диагонально по ленточке пластин по ходу движения стружки.

5. Состояние передней поверхности вспомогательной режущей кромки определяется в совокупности характером движения отделяемого материала, продуктов износа по ней и наличием дефектов (вогнутых или выпуклых).

6. По всей ширине центральной части контактной площадки наблюдаются следы тончайшей пленки металла. Это позволят предположить, что первопричиной его налипания и образования дефектов на передней поверхности являются скопления частичек износа, увеличивающих шероховатость поверхности, а так же следы металла, повышающие адгезию или сродство поверхности к обрабатываемому материалу. При этом контактная площадка и примыкающая к ней вспомогательная режущая кромка сохраняются притертыми, что свидетельствует о низком трении отделяемого материала на модифицированном слое.

7. В зоне схода стружки на передней поверхности вблизи кромки скапливается большое количество продуктов износа, и поверхность теряет притертый вид. Увеличение продуктов износа на поверхности обусловлено изменением характера взаимодействия вспомогательной режущей кромки с контактируемой поверхностью, поскольку происходит смена поверхностей: контакт с отделяемым материалом замещается на контакт с обработанной заготовкой, имеющей на своей поверхности гребешки микронеровностей, что усиливает вынос частиц износа. Более того, подрезание гребешков вспомогательной режущей кромкой приводит к появлению дополнительного источника продуктов износа.

8. На радиусе округления в зоне врезания наблюдается нависание модифицированного слоя над режущей кромкой, что усиливает его защитные функции. Кроме того, в результате приработки в прикромочных зонах создается обтекаемая форма края. При этом по границам открытых участков, где модифицированный слой отсутствует, сохраняется его устойчивая адгезионная связь с твердосплавной основой. Такие процессы наблюдаются по всей длине режущей кромки.

2.2. Анализ результатов

Результаты исследования позволили установить, что наиболее характерным следствием модификации является повышение устойчивости инструмента к образованию дефектов на его рабочих поверхностях. В соответствии с [68] под дефектом будем понимать любое несоответствие свойств рабочей части инструмента ее заданным требуемым или ожидаемым свойствам, и на принципиальном уровне рассматривать дефекты как традиционные и новые, имеющие непосредственное отношение к процессу модификации [106, 107].

2.2.1. Дефекты модифицированного инструмента

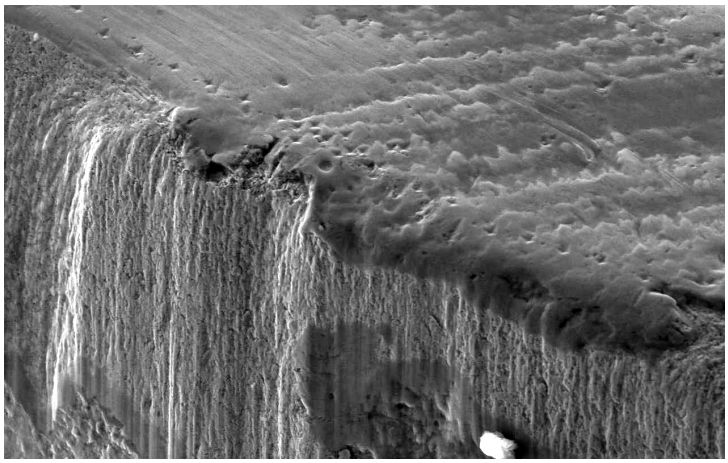
Традиционные дефекты отличаются по внешнему виду от аналогичных дефектов обычного инструмента (рисунки 2.1-2.4). Отличие связано с видом изнашивания, которое у модифицированного инструмента имеет характер механического истирания без обнажения исходной матрицы и образования сетки трещин. Поверхности являются притертыми, края поверхностей не имеют острых кромок и выступов (рисунок 2.4). В результате формирование постэксплуатационного состояния модифицированного инструмента имеет следующие наиболее характерные особенности:

– истирание покрытия возникает в результате локального переноса его материала, приводящего к краевому утонению (рисунок 2.1, а). Сетка трещин не образуется;

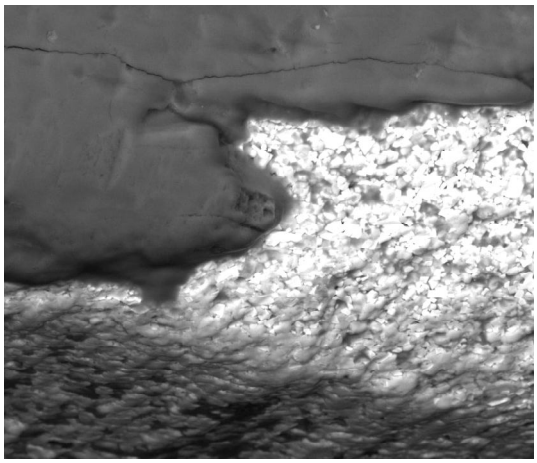
– образовавшиеся трещины носят единичный микролокальный характер и являются результатом проседания режущей кромки и механического трения по передней поверхности (рисунок 2.1, б);

– вырыв зерен матрицы носит усталостный характер, но не приводит к катастрофическому разрушению (рисунок 2.1, д);

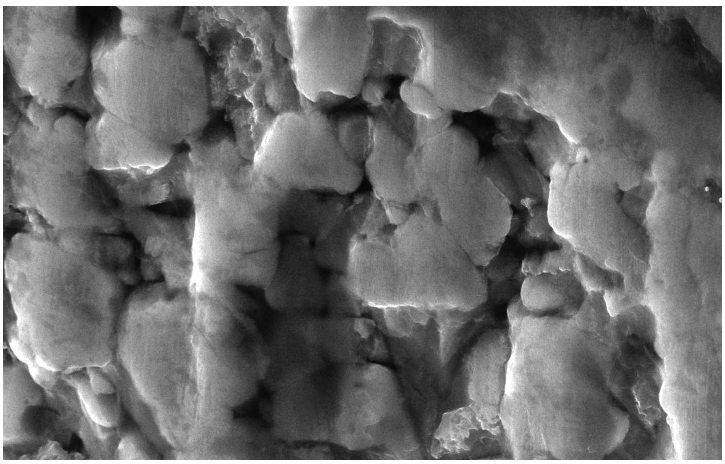
– лунка износа возникает только на инструменте, не имеющем защитного покрытия, но в незначительной степени (рисунок 2.2, г);



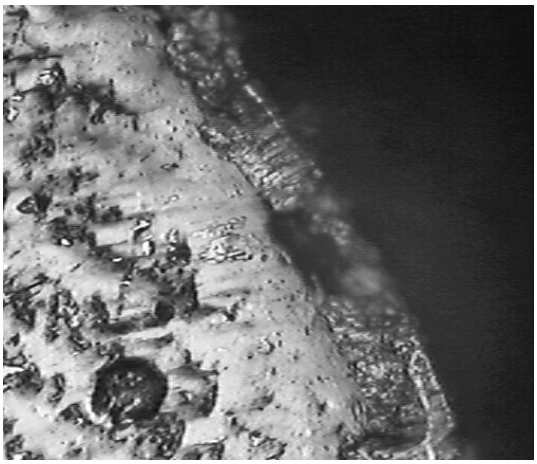
а



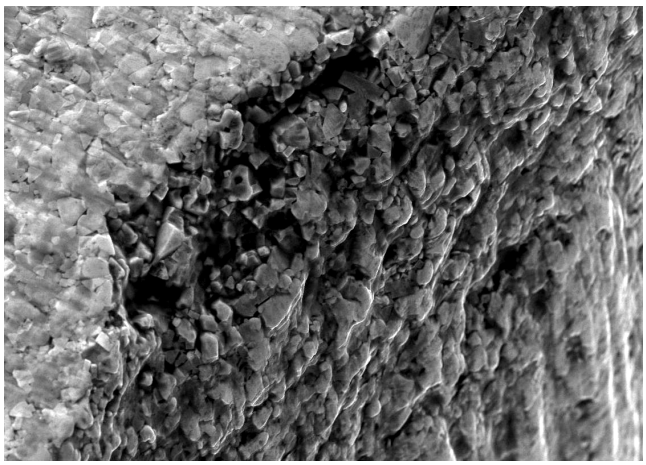
б



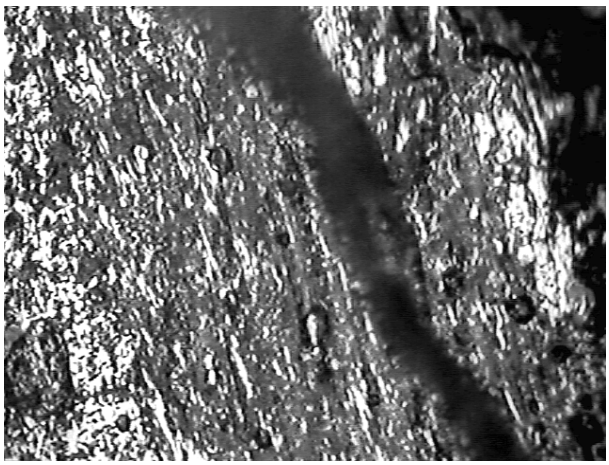
в



г

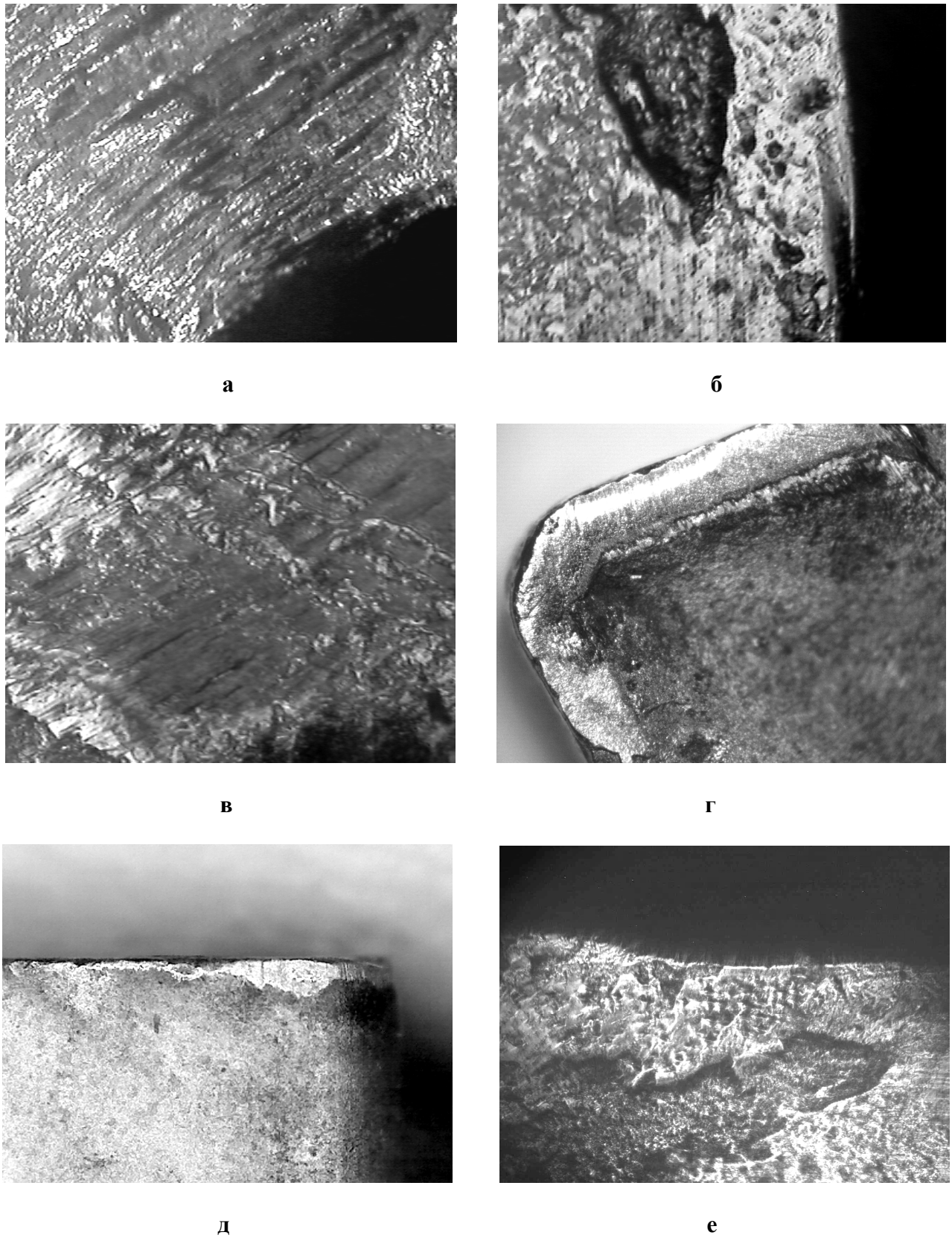


д



е

Рисунок 2.1 – Традиционные дефекты модифицированного инструмента: истирание покрытия (а), микротрещина (б), истирание зерен матрицы (в), вкрапление продуктов износа в поверхность (г), вырыв зерен матрицы (д), трещина (е) (увеличение 500^{x})

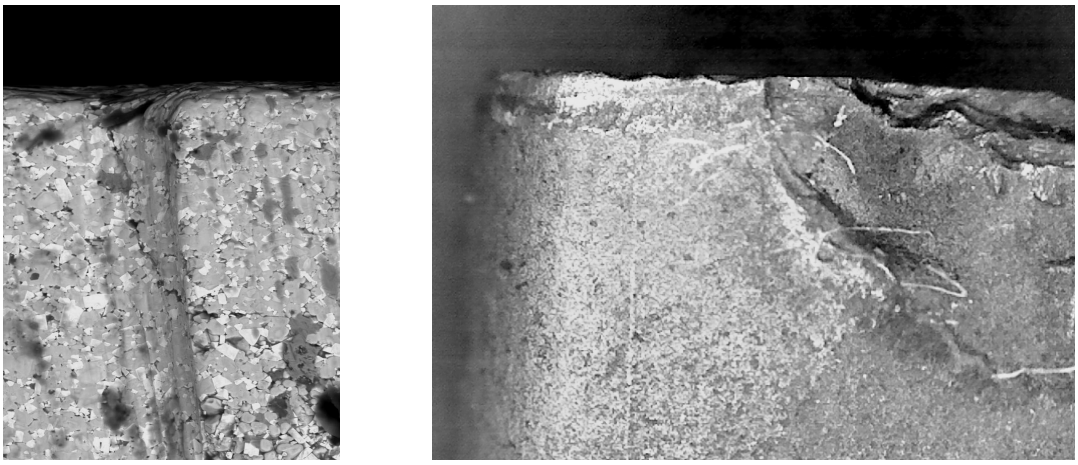


а **б**

в **г**

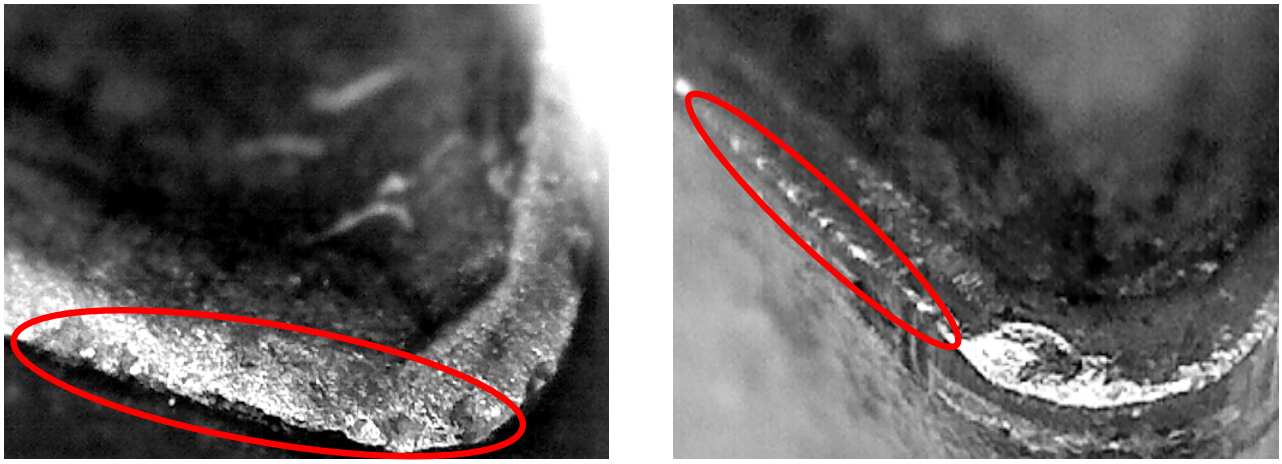
д **е**

Рисунок 2.2 – Традиционные дефекты модифицированного инструмента: пропахивание (микропроточины) (а), несплошности (б), налипание обрабатываемого материала на продукты износа (в), лунка износа (г), фаска износа (д), отслаивание покрытия (е) (увеличение 100^{x} – г, д и 500^{x} – а-в, е)



а б

Рисунок 2.3 – Традиционные дефекты модифицированного инструмента (увеличение 100^{x}): проточина (а), локальное разрушение (скол) (б)



а б

Рисунок 2.4 – Выкрашивания ( ) на передней поверхности обычного (а) и модифицированного (б) инструмента (увеличение 100^{x})

– нижняя граница площадки износа на задней поверхности имеет, как правило, искривленную форму (рисунок 2.2, д);

– отслаивание покрытия имеет локальный характер (рисунок 2.2, е);

– на вспомогательной задней поверхности формируются проточины (рисунок 2.3, а), образуя на радиусе округления контактную площадку. Распространение проточин идет в направлении вращения заготовки. Наиболее крупные проточины берут свое начало в зоне разделения материала заготовки на стружку и обработанную поверхность.

Образование новых дефектов связано с отличным от традиционного поведением модифицированного слоя при воздействии температурно-силовых нагрузок, и проявляется в перемещении в различных направлениях его микрообъемов в зоне контактного взаимодействия с отделяемым материалом. В результате:

– на передней поверхности формируются наплывы и розетки, представляющие собой множественные точечные образования, имеющие высокую адгезию с материалом основы и рассредоточенные по передней поверхности (рисунок 2.5);

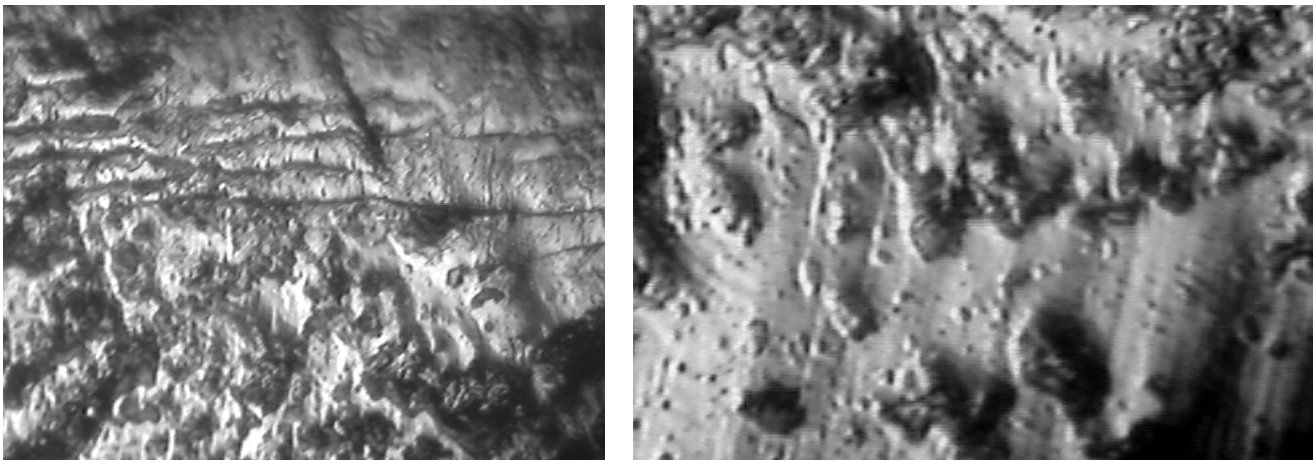


Рисунок 2.5 – Наплывы (а) и розетки (б) (увеличение 500^{x})

– на кромках вблизи проточин и зон с повышенной силовой нагрузкой локально деформируется (проседает) матрица (рисунок 2.6);

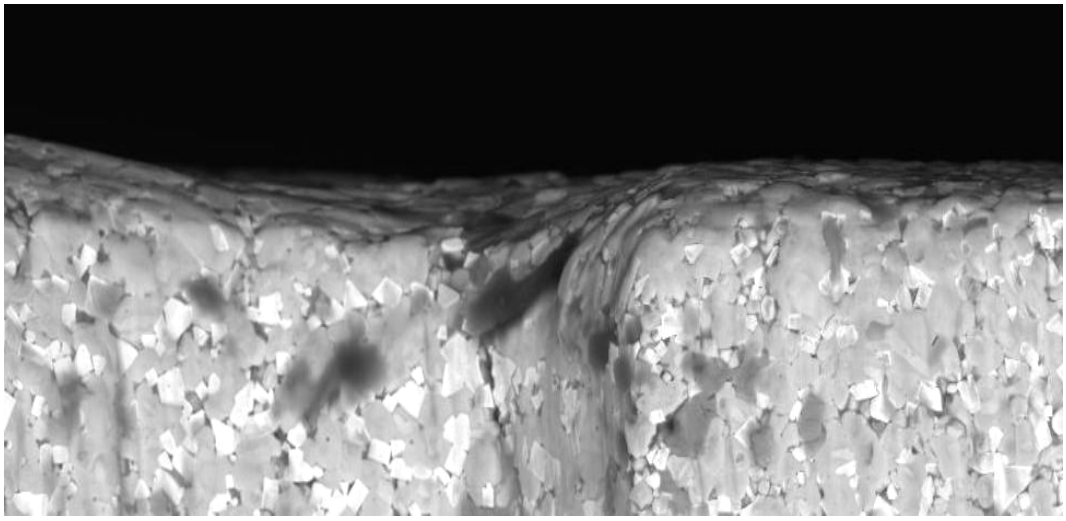


Рисунок 2.6 – Локальная деформация матрицы (увеличение 100^{x})

– над режущей кромкой формируются козырьки в зоне взаимодействия подслоя с отделяемым материалом (рисунок 2.7). От их состояния зависит и состояние режущей кромки. Нарушение целостности материала в козырьке ведет к деструкции прилегающих областей, что в свою очередь ведет к перестройке кромки и

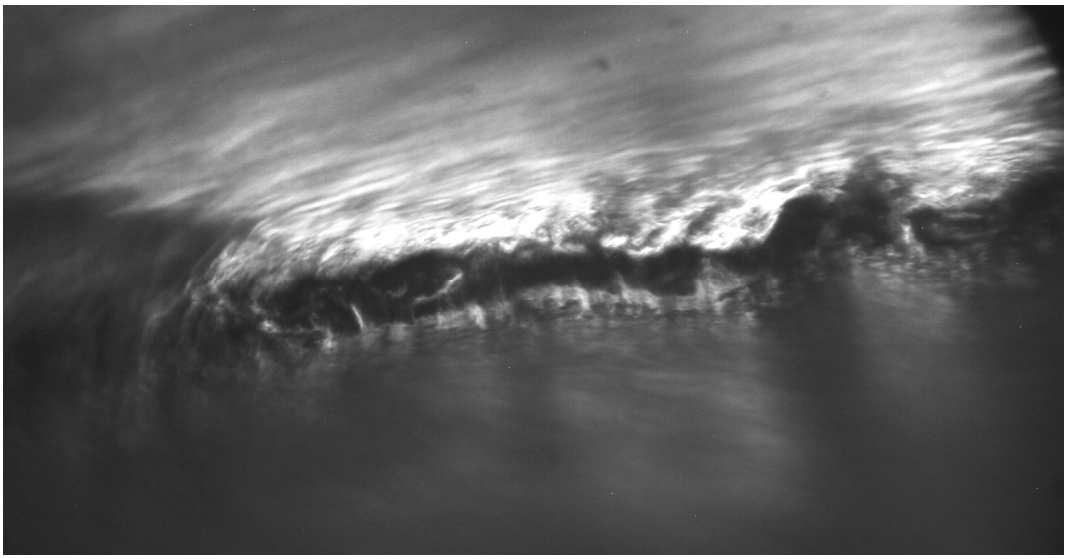


Рисунок 2.7 – Козырек (увеличение 500^{x})

образованию новых проточин по задней поверхности. Козырек обтекается отделяемым материалом с обеих сторон, а его форма зависит от направления движения отделяемого материала. Нарушение устойчивости и целостности твердосплавной основы козырька ведет к локальному пластическому деформированию областей режущей кромки под ним, сползанию его участков по задней поверхности или локальному вытеснению покрытия по передней поверхности. Такие процессы ведут к частичной перестройке режущей кромки и примыкающих областей. Процессы пластического деформирования предшествуют образованию крупных проточин.

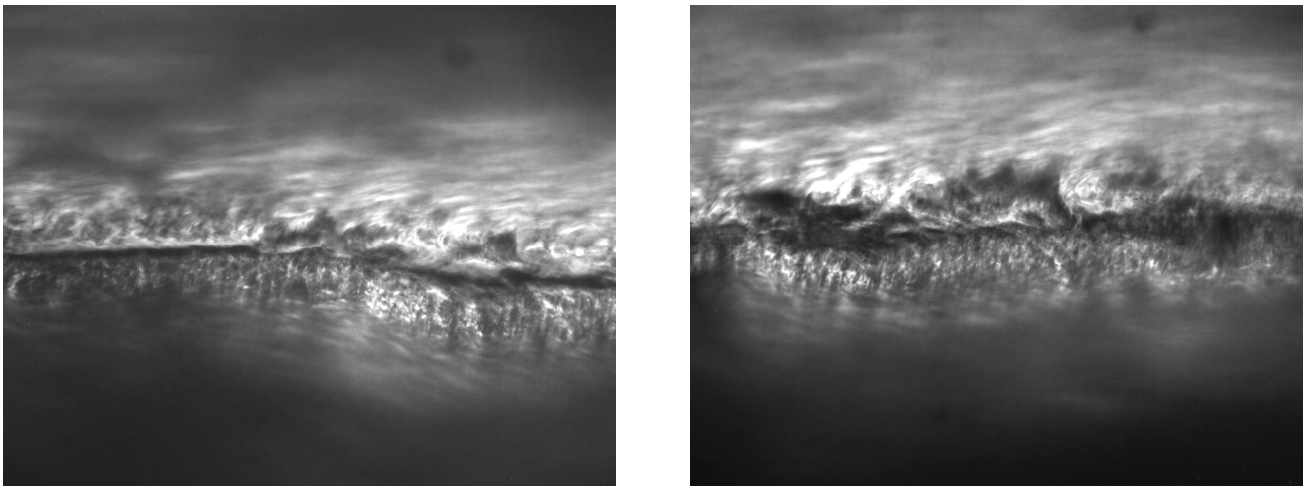
В целом материалы выполненного анализа, а также результаты измерений микротвердости рабочей части пластин после завершения процесса эксплуатации инструмента и сопоставление ее распределений в характерных точках передней поверхности, расположенных в зонах стружкообразования и схода стружки, а также вблизи образовавшихся дефектов, позволяют констатировать следующее.

1. Низкотемпературная плазменная модификация инструмента приводит к сложным ответным реакциям модифицированного слоя на воздействие отделяемого материала и стружки в процессе резания, связанные как с его локальным растяжением, так и с локальным сжатием, причем процессы растяжения могут иметь различные локальные направления. Чередование растягивающих и сжимающих воздействий приводит к локальным изменениям геометрии режущей кромки.

2. Наиболее растянутые области режущей кромки находятся вблизи дефектов. При удалении от дефектов приповерхностные слои сжимаются, микротвердость их повышается.

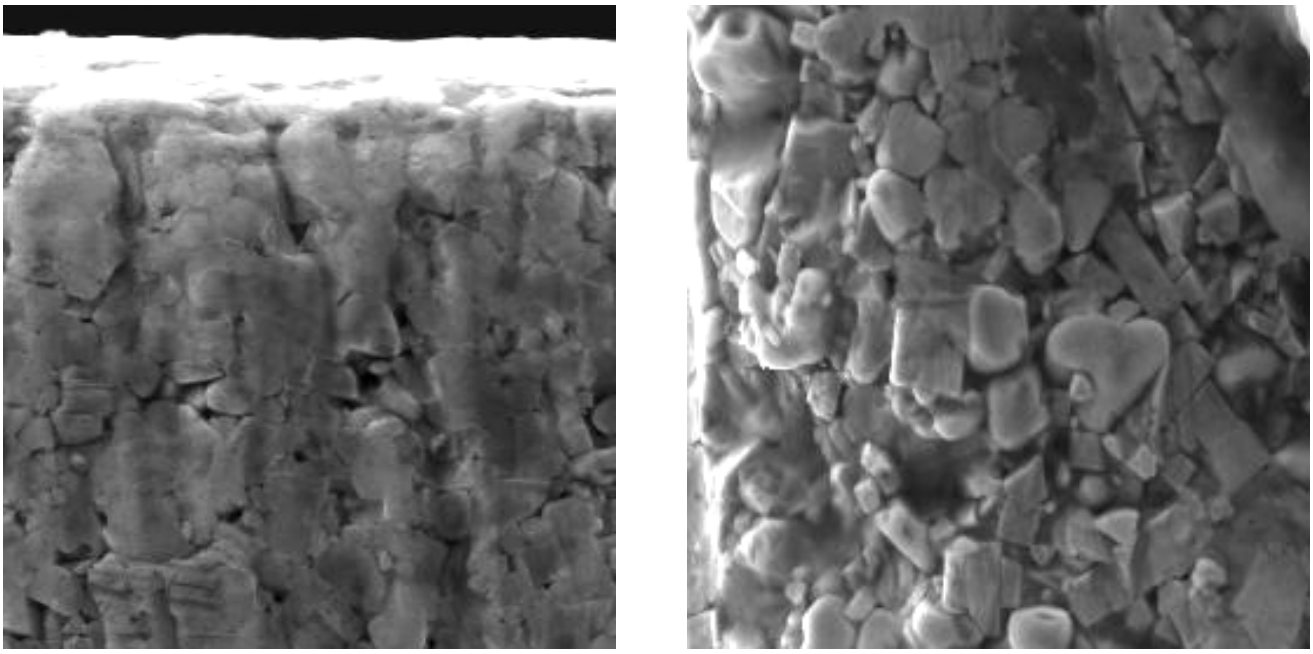
3. Эффективность плазменной модификации определяется повышением способности модифицированной части поверхностного слоя к структурной перестройке без образования разрушающих дефектов. Устойчивость модифицированного слоя определяется устойчивостью к растягивающим нагрузкам, связанным с образованием и воздействием дефектов на рабочие поверхности и режущие кромки инструмента.

Изложенное означает, что часть передней (от радиуса округления до зоны налипшего металла) и задней (по радиусу округления до проточин) поверхности находятся под воздействием всесторонних сжимающих нагрузок, создаваемых отделяемым материалом. Процессы пластической деформации вызывают изменение формы режущей кромки, поэтому отделяемый материал обтекает ее не только со стороны передней поверхности, но и под ней, образуя незначительные углубления. Продукты износа выносятся потоком обрабатываемого материала как на переднюю, так и на заднюю поверхность. Другими словами, наиболее интенсивно контактные взаимодействия протекают на режущих кромках модифицированного инструмента, вызывая постепенное ухудшение их состояния, приводящее к обнажению инструментальной матрицы (рисунок 2.8). Основным следствием становится смена вида износа с механического модифицированного слоя (рисунок 2.9, а) на абразивный, диффузионный и адгезионный инструментальной матрицы, приводящих к тому, что образующиеся дефекты приобретают традиционный вид (рисунок 2.9, б).



а **б**

Рисунок 2.8 – Состояние вспомогательной режущей кромки перед началом (а) и в конце (б) эксплуатации (увеличение – 500^{x})



а **б**

Рисунок 2.9 – Изношенные поверхности модифицированного слоя (а) и обнаженной матрицы (б) (увеличение 100^{x})

Таким образом, специфика свойств модифицированной поверхности приводит к необходимости классификации дефектов и последующего использования ее результатов для исследования процесса эволюции состояния инструмента к своему конечному виду. Результаты исследования могут быть положены в основу разработки способа оценивания качества процесса эксплуатации инструмента с целью

поиска условий, в которых эти свойства будут проявляться наиболее полно в направлении формирования устойчивой обтекаемой формы, прежде всего режущей кромки, обеспечивающей снижение действия сил трения и, как следствие, тепловыделения при резании. Тогда даже при образовании дефектов структура модифицированного поверхностного слоя будет оставаться устойчивой, препятствуя обнажению матрицы и способствуя повышению не только износостойкости, но и отказоустойчивости (предотвращению сколов и поломок) инструмента.

2.2.2. Классификация дефектов

По своей сути, задача классификация заключается в определении взаимных связей между дефектами с последующим их разделением на группы по уровню сходства (различия) для получения оптимальной в некотором смысле структуры. Наилучшим образом для решения подобных задач подходит аппарат иерархического кластерного анализа [108], поскольку не требует непосредственного участия человека в переборе множества кластеров-претендентов, т.е. является объективным.

Основой для проведения кластерного анализа является матрица сходства (различия), которая определяет уровень сходства между парами дефектов и вычисляется автоматически по таблице, содержащей необходимые исходные данные. Они представляют собой классификационные признаки дефектов, отображающие их наиболее значимые характеристики: вид и размер. При этом, поскольку и диапазоны значений характеристик, и сами значения варьируются в широких пределах (от единиц до сотен мкм), т.е. различаются между собой на порядок и более, задачу классификации целесообразно решать на принципиальном (качественном) уровне. В этом случае исходная таблица будет состоять из единиц и нулей (таблица 2.1) [109].

Для проведения процедуры классификации использовался пакет программ прикладного статистического анализа STATISTICA 6.0, который содержит наиболее часто встречающиеся в научной литературе методы пересчета матрицы сходства (различия) после объединения (или разделения) двух очередных объектов в кластер [110].

Таблица 2.1

Исходные данные для решения задачи классификации

№ п/п	Объект (дефект)	Классификационные признаки				
		Размер	Вид			
		1 – видимый полностью, 0 – видимый частично (невидимый)	1 – объемный, 0 – плоский	1 – линейный, 0 – точечный	Объемный	Линейный
					1 – над и на поверхности, 0 – в и под поверхностью	1 – сплошной, 0 – дискретный
1	Вкрапление продуктов износа в поверхность	0	0	1	0	0
2	Выкрашивание	1	1	1	0	0
3	Вырыв зерен	0	0	1	0	0
4	Деформирование матрицы	0	0	1	0	0
5	Истирание зерен матрицы	0	0	1	0	0
6	Истирание покрытия	0	0	1	0	0
7	Козырек	0	1	1	1	1
8	Локальное разрушение (скол)	1	1	1	0	1
9	Лунка износа	1	1	1	0	1
10	Микротрещина	0	0	1	0	0
11	Налипание обрабатываемого материала	0	1	1	1	1
12	Наплыв	0	1	1	1	1
13	Несплошности	0	1	1	1	1
14	Отслаивание покрытия	1	1	1	0	1
15	Пропахивание (микротпроточины)	0	1	1	1	1
16	Проточина	1	1	1	0	1
17	Точечные (розетки)	1	1	1	0	0
18	Трещина (сетка трещин)	0	1	1	1	1
19	Фаска износа	1	1	1	0	1

Результаты классификации показали (рисунок 2.10), что с точки зрения чувствительности к структуре исходных данных наилучшие результаты дает центроидный метод, использующий для пересчета матрицы расстояний [111], в качестве которых берутся расстояния между центрами тяжести двух кластеров.

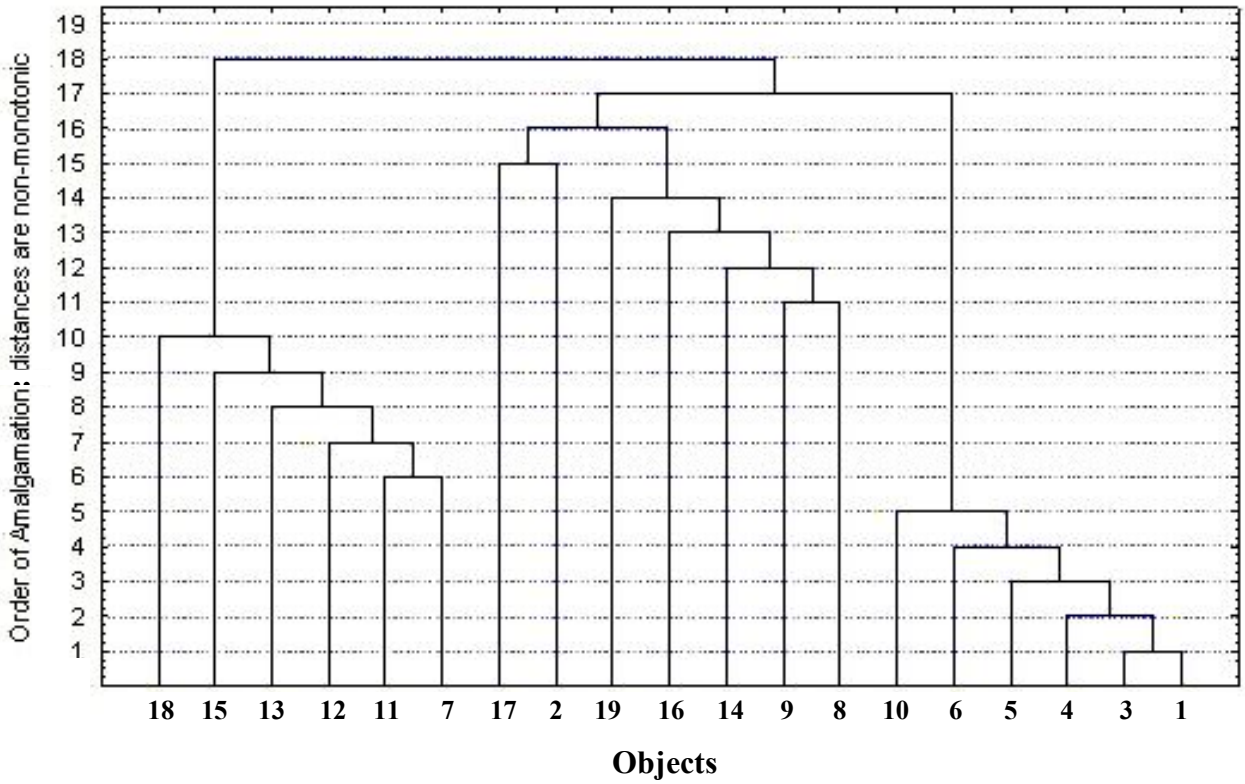


Рисунок 2.10 – Дендрограмма (дерево) сходства дефектов модифицированного инструмента

Конечным результатом решения задачи классификации является определение числа классификационных групп на построенной дендрограмме, удовлетворяющих некоторому критерию оптимальности, который необходимо отыскать. Если рассматривать кластеризацию как процесс самоорганизации данных с целью снятия исходной неопределенности с них, то в соответствии с принципом самоорганизации [112] критерий по мере формирования групп вначале уменьшается, достигая минимума, а затем начинает возрастать. Это происходит потому, что по мере формирования групп неопределенность в данных постепенно снижается, и при каком-то их числе становится равной нулю, т.е. снимается полностью. Соответственно дальнейшее группирование просто теряет смысл, поскольку не позволяет ничего

доопределить. В связи с этим минимуму критерия и будет соответствовать сформированное на каком-то из уровней число классификационных групп.

Выполнить процедуру оптимизации можно различными методами, однако с учетом того, что классификация выполнялась на качественных данных, целесообразно, воспользоваться методом, основанным на представлении данных в виде таблиц сопряженности признаков (ТСП) [113]. Тогда процедура сведется к оцениванию степени уменьшения связи (или росту степени различия) между признаками по результатам вычисления одной из известных мер связи, которая и будет количественно отображать степень снятия исходной неопределенности с данных.

В ТСП данные представляются в виде двух признаков (т.е. категоризируются) – A и B, каждый из которых имеет несколько уровней определения, отображаемых некоторым числом n_{ij}. В качестве признака A примем общее число дефектов, оставшихся на тех уровнях, где в процессе кластеризации классификационные группы формировались в наиболее явном виде (рисунок 2.10); число дефектов в каждой группе будем считать одним обобщенным дефектом. В качестве признака B примем общее число дефектов на уровне A, попавших в сформированные группы (таблица 2.2).

Сравнивать между собой будем соседние уровни таблицы 2.2, что даст возможность проследить динамику изменения критерия оптимизации. Таким образом, на каждом этапе сравнения исходная ТСП будет трансформироваться в ТСП, имеющую размерность 2×2 (таблица 2.3).

Таблица 2.2

Исходная таблица сопряженности признаков

Уровень	Общее число оставшихся дефектов (признак *A*)	Общее число дефектов в сформированных группах (признак *B*)
5	**14**	**6**
10	**9**	**12**
14	**5**	**17**
15	**4**	**19**
16	**3**	**19**
17	**2**	**19**
18	**1**	**19**

Таблица 2.3

Таблица сопряженности признаков 2×2

Признак *A*	**Признак *B***		**Всего по строкам**
	1	**2**	
1	n_{11}	n_{12}	$n_{11} + n_{12}$
2	n_{21}	n_{22}	$n_{21} + n_{22}$
Всего по столбцам	$n_{11} + n_{21}$	$n_{12} + n_{22}$	Σn_{ij}

В литературе по анализу ТСП имеется большое число мер связи, которые используются как самостоятельно, так и в различных моделях конструирования признаков. Отличие заключается лишь в схеме их вычисления, дающей различную чувствительность, т.е. степень, с которой та или иная мера будет реагировать на изменение связи. Поэтому по аналогии с процедурой кластерного анализа были вычислены различные меры, такие как коэффициенты Чупрова и коллигации Юла, коэффициент сопряженности Пирсона, коэффициенты связи Юла и Крамера [113].

В качестве примера, отображающего полученные результаты наиболее явно, на рисунке 2.11 представлены вариации коэффициента коллигации Юла, которые показывают, что оптимальной является кластеризация дефектов до уровня 16, дающая три классификационные группы. Сопоставление дефектов внутри этих групп (рисунки 2.1-2.9) показало, что с учетом использованных для классификации признаков, а также комплекса дополнительных параметров, уточняющих вид, расположение и количество дефектов, группам можно присвоить названия микролокальные, микроповерхностные и макродефекты (таблица 2.4) [109].

Вместе с тем, классификация дефектов является необходимым, но не достаточным условием для исследования процесса эволюции модифицированного инструмента. Необходима также некоторая вычислительная основа, в качестве которой целесообразно принять параметры, могущие использоваться не только для количественной характеристики дефектов, но и оценивания направлений и степени их воздействия на траекторию движения инструмента к своему конечному состоянию. Рассмотрим вопрос о том, как эти параметры можно определить.

Рисунок 2.11 – Межуровневые вариации коэффициента коллигации Юла *Y* и кривая его тренда

Таблица 2.4

Классификация дефектов модифицированного режущего инструмента

№	Микролокальные	№	Микроповерхностные	№	Макро
1	Истирание покрытия*	7	Козырек*	13	Проточина
2	Микротрещина	8	Наплыв*	14	Лунка износа
3	Истирание зерен матрицы	9	Несплошности	15	Фаска износа
4	Вырыв зерен	10	Трещины	16	Точечные (розетка)*
5	Деформирование матрицы	11	Пропахивание (микропроточины)	17	Выкрашивание
6	Вкрапление продуктов износа в поверхность	12	Налипание обрабатываемого материала на продукты износа	18	Отслаивание покрытия
				19	Локальные разрушения

* – непосредственный результат движения микрообъемов

2.2.3. Определение параметров дефектов

Определение параметров дефектов, характеризующих, по сути, закономерности протекания процесса резания, представляет собой довольно сложную задачу. Использование традиционных подходов теории резания, когда в качестве параметров принимаются физические характеристики, такие как размеры, площадь, масса или объем, позволяет количественно охарактеризовать сами дефекты. Оценка же их влияния на эволюцию состояния инструмента в большинстве случаев выполняется аналитически, в основном с использованием параметров макродефектов: фаски и лунки износа.

С другой стороны в последнее время для оценивания состояния инструмента начинает применяться имитационное моделирование процесса резания. Основная цель при этом заключается в воспроизведении поведения изучаемой модели (как натурной, так и математической) на основе анализа наиболее существенных взаимосвязей входящих в нее переменных [114]. По существу имитационное моделирование представляет собой вычислительный эксперимент, результаты которого дают возможность оценить влияние фактора неопределенности в значениях входных переменных на выходные переменные или их функции.

Имитационное моделирование позволяет по-новому подойти к понятию «параметр дефекта», поскольку реализация такого моделирования связана с имитацией движения объекта в пространстве возможных состояний посредством их случайного «розыгрыша» с использованием параметров модели, которые определяются либо расчетным путем, либо экспериментально [115]. Обычно параметрами моделей исследования качества и/или надежности являются вероятности или интенсивности переходов между состояниями, которые содержат информацию об основных закономерностях реакции объекта на действие возмущающих факторов, а также о структуре объекта, т.е. о том, как соотносятся между собой его основные элементы и выходные характеристики [116]. В данном случае объектом является постэксплуатационное состояние рабочей части модифицированного инструмента, а его элементами – дефекты как результат контактных взаимодействий с заготовкой при резании (в данном случае механических, абразивных, адгезионных и диффузионных процессов), вносящих различный вклад в формирование состояния (рисунок 2.12) [107, 117, 118]. Тогда

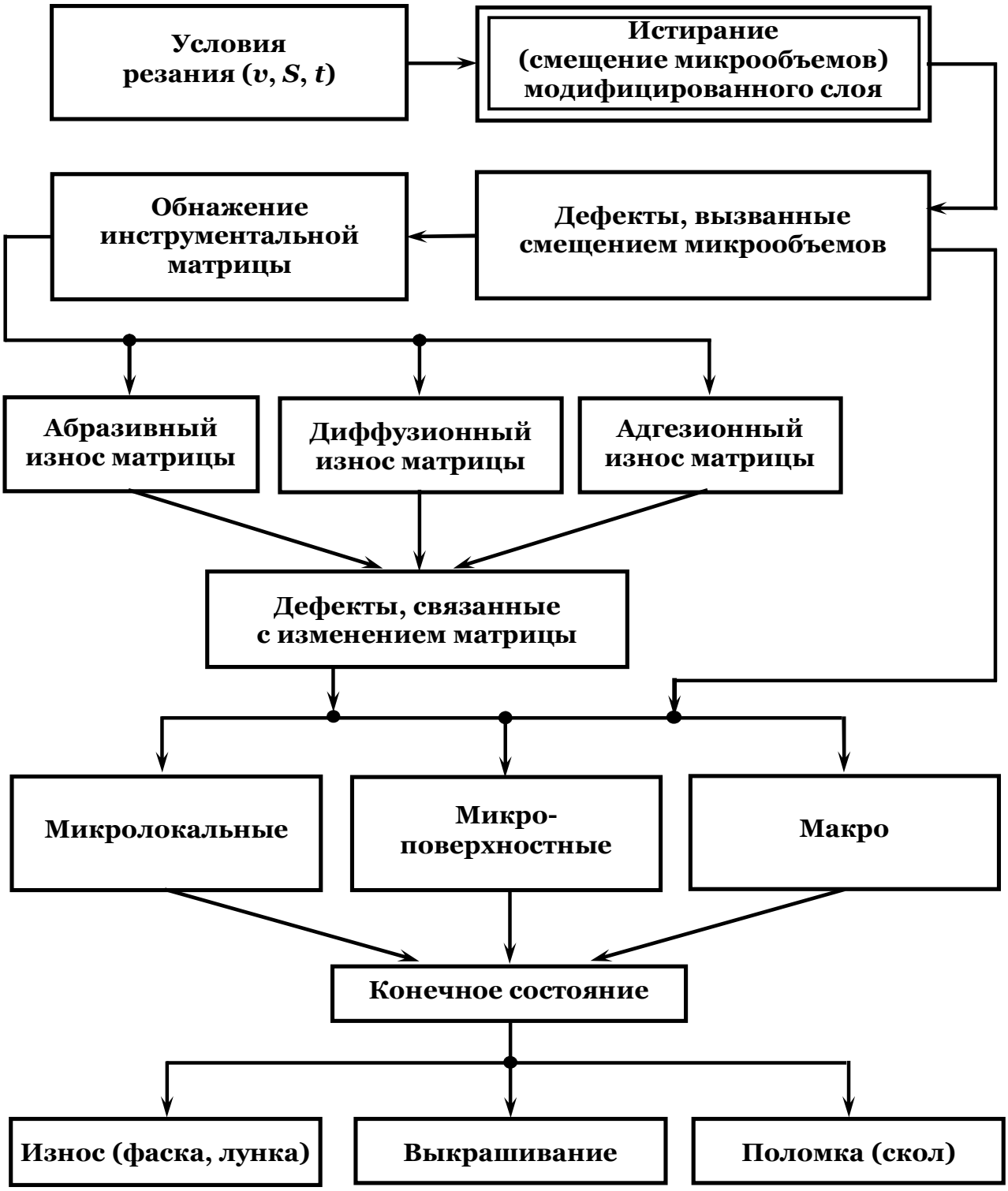


Рисунок 2.12 – Схема формирования состояния модифицированного режущего инструмента

в качестве параметров примем степени относительной значимости дефектов, определить которые можно по результатам их попарного сравнения между собой по некоторой совокупности признаков, в том числе и по физическим характеристикам. С этой целью воспользуемся методом расстановки приоритетов, основанным

на коллективной экспертной оценке; последовательность выполняемых при этом процедур выглядит следующим образом [119].

Пусть имеется n объектов X (в данном случае – дефектов) и m признаков Y (в данном случае – факторов, под влиянием которых происходит их образование и развитие), по которым эти объекты будут сравниваться попарно. Превосходство одного объекта над другим оценивается с помощью матрицы попарных сравнений, в которой оно выражается по каждому признаку в числовых значениях. В дальнейшем путем математических преобразований каждой из исходных матриц производится «свертка» промежуточной информации и получаются количественные величины, являющиеся взвешенными значениями приоритетов объектов по каждому из признаков.

Введем некоторые обозначения. Пусть коэффициент b_{ij} является аналогом представления о превосходстве i-го объекта над j-м по признаку Y_k. Задание численных значений b_{ij} может быть произвольным, но для простоты расчетов и удобства представления результатов целесообразно оперировать положительными числами. В общем виде выбор коэффициентов b_{ij} представляется как:

$$b = \begin{cases} 1+k, \text{ если } X_i > X_j \\ 1, \text{ если } X_i = X_j \\ 1-k, \text{ если } X_i < X_j \end{cases}, \qquad (2.1)$$

где k – любое действительное число из интервала [0; 1).

Знаки отношений выражают предпочтение одного объекта перед другим по конкретному признаку.

По результатам сравнения формируется матрица

$$B_l = |\, b_{ij} \,| = \begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1i} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2i} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{i1} & b_{i2} & \dots & b_{ii} & \dots & b_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{ni} & \dots & b_{nn} \end{vmatrix} \qquad (2.2)$$

Здесь b_{ii} = 1, …, n – число объектов. Далее производится расчет значений приоритетов объектов по конкретному l признаку суммированием строк матрицы B:

$$Z_i(1) = \sum_{j=1}^{n} b_{ij}, \quad i = 1, 2, ..., n. \tag{2.3}$$

Величина относительной значимости (или приоритета по l-му признаку) каждого объекта в общей сумме определятся методом итерации первого уровня [119]:

$$K_i^{отн.}(1) = \frac{Z_i(1)}{\sum_{j=1}^{n} Z_j(1)}. \tag{2.4}$$

Содержательно каждый такой элемент означает относительное число приоритетов данного объекта.

Для уточнения полученных результатов можно провести итерацию второго уровня:

$$Z_i(2) = \sum_{j=1}^{n} b_{ij} \cdot Z_i(1) \tag{2.5}$$

Тогда уточненное значение оценки приоритета объекта будет равно:

$$K_i^{отн.}(2) = \frac{Z_i(2)}{\sum_{i=1}^{n} Z_i(2)} \tag{2.6}$$

Найденные приоритеты (2.4) или (2.6) и будут параметрами дефектов. Необходимые для их вычисления исходные данные (основные факторы, влияющие на образование дефектов) были отобраны с позиций фундаментальных положений теории резания металлов (см. п.1.3), а также по результатам анализа материалов опытно-промышленной эксплуатации модифицированных сменных многогранных твердосплавных пластин на предприятиях различных отраслей (таблица 2.5) [90, 91, 103]:

– скорость резания (1);

– подача (2);

– глубина резания (3);

– радиус округления пластины (4);

– толщина пластины (5);

– твердость инструментальной матрицы (6);

– толщина модифицированного слоя (7);

– химический состав инструментального материала (8);

– зернистость инструментального материала (9);

– твердость обрабатываемого материала (10);

– химический состав обрабатываемого материала (11);

– схема обработки (12);

– размеры дефектов по параметру суммарной площади (или объему), занимаемой на рабочей части (13).

Таблица 2.5

Информационная основа для решения задачи определения параметров дефектов модифицированного режущего инструмента

№ п/п	Материал пластин	Место эксплуатации
1	Сплав СТ35м	ОАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны
2	Сплав Т15К6	ОАО «Саратовский подшипниковый завод», г. Саратов
3	Сплав Т15К6 с покрытием TiN	ОАО «Саратовский подшипниковый завод», г. Саратов
4	Сплав LNMX 301940 CB (VH55)	Вагоноремонтное депо ВЧД-5 (станция «Сортировочная-Фарфоровская» Октябрьской ж/д)
5	Сплав RX-10 IC30N	ОАО «Саратовский агрегатный завод», г. Саратов
6	Сплав RX-10 IC9074	ОАО «Саратовский агрегатный завод», г. Саратов
7	Сплав RX-10 IC807	ОАО «Саратовский агрегатный завод», г. Саратов
8	Сплав RX-10 T490	ОАО «Саратовский агрегатный завод», г. Саратов
9	Сплав RX-10	ОАО «Саратовский агрегатный завод», г. Саратов

В качестве комментариев к результатам отбора отметим следующее.

1. Геометрические параметры пластин: передний угол, угол наклона кромки, задний угол, главный угол в плане, угол при вершине исключены из рассмотрения, поскольку для сменных многогранных пластин они являются величинами постоянными.

2. Ползучесть модифицированного слоя, а также конструктивные параметры пластины – длина и ширина – учитываются радиусом ее округления [120].

3. Влияние основных процессов, сопровождающих резание (стружкообразование, движение и усадка стружки, относительное сближение контактных по-

верхностей и др.), учитывается через параметры технологического режима и толщину модифицированного слоя, а также твердость и химический состав инструментальной матрицы. Влияние изменений характеристик этих процессов учитывается рассмотрением двух вариантов значений режимных параметров и толщины слоя: неоптимальных и оптимальных [103]. Оптимизация значений параметров технологического режима изменяет количество тепла, выделяющегося при трении обрабатываемой заготовки и стружки о рабочие поверхности пластины и, как следствие, изменяют характер деформации срезаемого припуска, угол схода стружки [121, 122], что изменяет температуру резания вплоть до установления ее оптимального значения [61, 96, 123]. Оптимизация толщины модифицированного слоя вызывает рост степени однородности и более глубокое проникновение его структурных элементов в матрицу, усиливающее взаимосвязь между ними и, как следствие, повышение устойчивости матрицы.

Таблица 2.6

Матрица взаимосвязи дефектов

Дефекты	**Дефекты**																		
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**
	1 – *k* зависит от *k* + *i*; -1 – *k* + *i* зависит от *k*; 0 – независимые																		
1	**1**																		
2	-1	**1**																	
3	-1	0	**1**																
4	0	-1	-1	**1**															
5	-1	-1	-1	0	**1**														
6	-1	1	0	0	0	**1**													
7	-1	1	0	0	-1	0	**1**												
8	-1	0	0	0	0	0	1	**1**											
9	-1	0	-1	0	0	0	0	0	**1**										
10	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	**1**									
11	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	**1**								
12	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	**1**							
13	0	1	-1	-1	0	0	0	0	-1	0	1	0	**1**						
14	0	1	-1	-1	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	**1**					
15	0	1	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	**1**				
16	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**1**			
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	-1	-1	0	0	**1**		
18	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	-1	0	0	0	0	0	**1**	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	-1	0	0	0	-1	-1	**1**

4. Влияние теплопроводности, упругости, пластичности и электропроводности пластин учитывается через их толщину и химический состав материала.

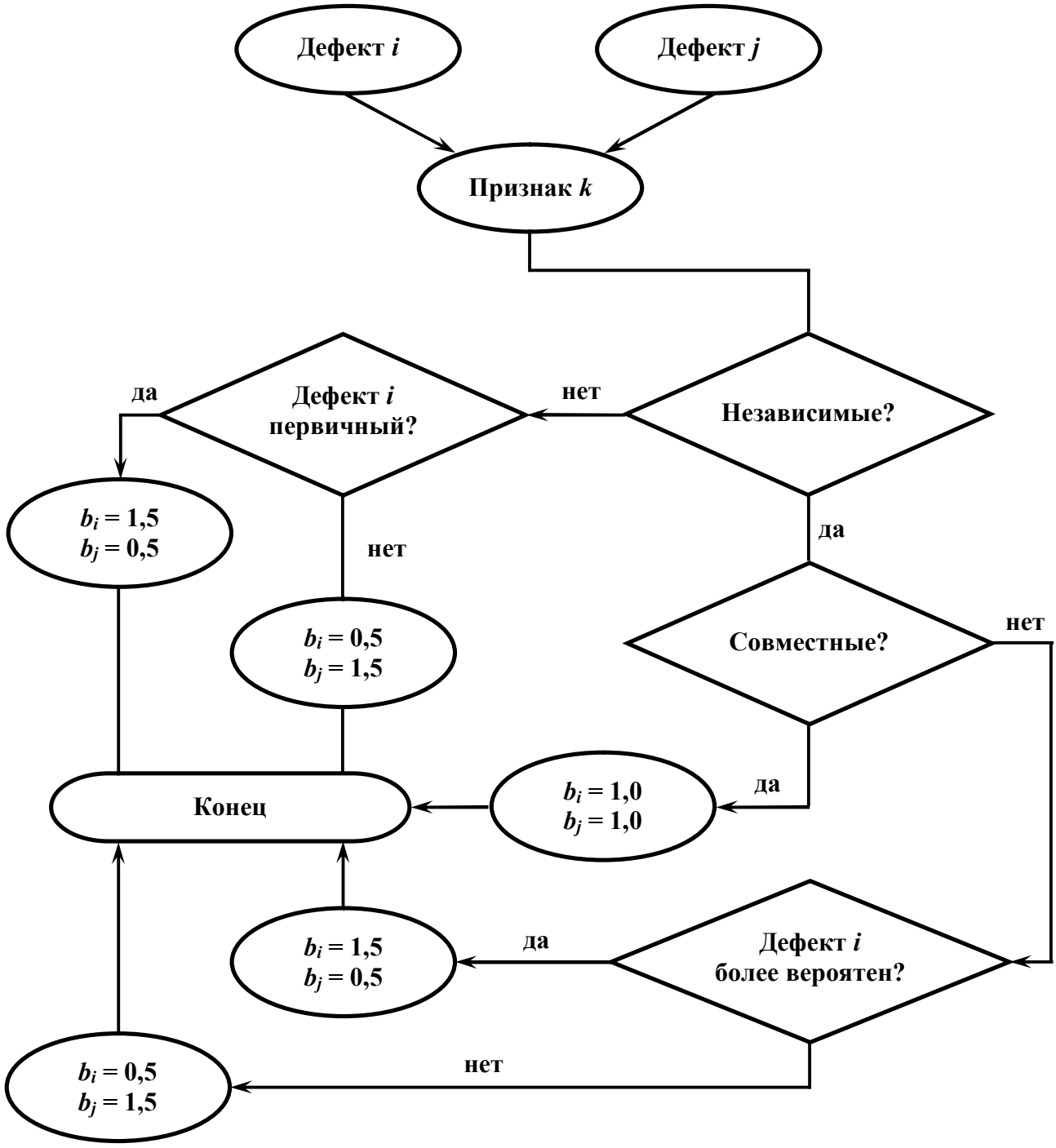


Рисунок 2.13 – Стратегия принятия решения при сравнении дефектов

При выполнении процедуры сравнения дефектов было принято во внимание, что, во-первых, один из них может зависеть от другого (т.е. возникать только при

условии возникновения первого), во-вторых, будучи независимыми, они могут возникать как одновременно, так и в разные моменты времени, в-третьих, они не обязательно должны возникнуть оба (таблица 2.6). Это легло в основу разработки стратегии принятия решений при сравнении дефектов, показанной на рисунке 2.13.

Таблица 2.7

Результаты определения параметров относительной значимости дефектов

Дефекты	Факторы												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
	Параметр $K_{i,j}^{отн.}$ (i = 1, …, 19, j = 1, …, 13)												
1	0,064	0,068	0,057	0,066	0,066	0,062	0,068	0,039	0,039	0,034	0,064	0,043	0,069
2	0,055	0,053	0,093	0,062	0,051	0,054	0,059	0,040	0,040	0,047	0,060	0,067	0,030
3	0,046	0,055	0,044	0,048	0,050	0,048	0,054	0,065	0,065	0,050	0,072	0,050	0,061
4	0,050	0,050	0,044	0,043	0,047	0,047	0,056	0,068	0,068	0,061	0,064	0,060	0,046
5	0,055	0,058	0,051	0,059	0,058	0,061	0,062	0,069	0,069	0,052	0,037	0,058	0,044
6	0,068	0,061	0,061	0,055	0,062	0,059	0,060	0,039	0,039	0,043	0,066	0,056	0,062
7	0,064	0,058	0,061	0,057	0,061	0,064	0,065	0,039	0,039	0,030	0,039	0,050	0,037
8	0,062	0,057	0,059	0,061	0,060	0,061	0,061	0,039	0,039	0,033	0,036	0,051	0,062
9	0,054	0,057	0,057	0,064	0,055	0,061	0,057	0,040	0,040	0,061	0,064	0,062	0,058
10	0,042	0,047	0,047	0,057	0,057	0,055	0,040	0,063	0,063	0,059	0,037	0,055	0,033
11	0,039	0,042	0,036	0,034	0,037	0,037	0,033	0,057	0,057	0,066	0,043	0,043	0,062
12	0,060	0,054	0,056	0,051	0,053	0,053	0,060	0,039	0,039	0,050	0,068	0,062	0,062
13	0,047	0,055	0,049	0,052	0,053	0,051	0,060	0,066	0,066	0,061	0,053	0,047	0,040
14	0,044	0,047	0,049	0,044	0,045	0,048	0,036	0,066	0,066	0,057	0,054	0,043	0,062
15	0,052	0,051	0,052	0,052	0,051	0,051	0,058	0,066	0,066	0,059	0,054	0,051	0,063
16	0,064	0,058	0,059	0,054	0,058	0,058	0,060	0,039	0,039	0,043	0,040	0,048	0,035
17	0,037	0,042	0,043	0,045	0,042	0,043	0,031	0,062	0,062	0,064	0,047	0,058	0,043
18	0,055	0,053	0,051	0,066	0,057	0,057	0,050	0,039	0,039	0,066	0,062	0,054	0,062
19	0,042	0,034	0,031	0,030	0,037	0,030	0,030	0,065	0,065	0,064	0,040	0,042	0,069

Примечание:
Дефекты: 1 – истирание покрытия, **2** – микротрещина, **3** – истирание зерен матрицы, **4** – вырыв зерен, **5** – деформирование матрицы, **6** – вкрапление продуктов износа в поверхность, **7** – козырек, **8** – наплыв, **9** – несплошности, **10** – трещины, **11** – пропахивание (микропроточины), **12** – налипание обрабатываемого материала на продукты износа, **13** – проточина, **14** – лунка износа, **15** – фаска износа, **16** – розетка, **17** – выкрашивание, **18** – отслаивание покрытия, **19** – локальные разрушения.

Матрицы, полученные по результатам сравнения дефектов в соответствии с разработанной стратегией, представлены в приложении А, а значения $K^{отн}$ – в таблице 2.7 [124].

2.3. Разработка способа оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента

Материалы выполненных исследований легли в основу решения главной задачи данной главы, связанной с разработкой способа оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента. В формальной постановке эту задачу можно изложить следующим образом [125].

2.3.1. Постановка задачи

Пусть $S = [s_1, \ldots, s_p]$ – вектор конечного состояния инструмента, компоненты которого характеризуют количественные и/или качественные параметры дефектов; $X = [x_1, \ldots, x_q]$ – вектор внешних воздействий на инструмент; F: $S \times X \to S$, где $F[s(t), x(t)] = s(t+1)$ – функция, определяющая траекторию движения инструмента к состоянию S. Информация о состоянии представляется векторами $\widetilde{S} = [\widetilde{s}_1, ..., \widetilde{s}_i]$ и $\widetilde{X} = [\widetilde{x}_1, ..., \widetilde{x}_i]$, где $1 \le i \le p$, $1 \le j \le q$, поскольку отдельные компоненты векторов могут отсутствовать. Необходимо восстановить пары последовательностей $s(t)$ и $x(t)$, $t \in T$, для которых выполняются условия:

1. Для $\forall t$, $s(t)$ согласуется с $\widetilde{S}$ на уровне значимости α;

2. Для $\forall t$, $x(t)$ согласуется с $\widetilde{X}$ на уровне значимости α.

По данному описанию определяется траектория изменения состояния, $s(t+1) = F[s(t), x(t)]$, заданная компонентами его вектора, а также вектора внешних воздействий при $\forall t \in T$. Рисунок 2.14 иллюстрирует изложенное графически. В совокупности траектория и конечное состояние отображают качество процесса эксплуатации модифицированного инструмента.

При дальнейшем анализе следует обратить внимание на многосвязность вектора внешних воздействий с формируемым состоянием инструмента. Для всего спектра технологий она не имеет строгого аналитического выражения, но может быть определена статистически, поскольку параметры и характеристики процессов, влияющих на перечисленные в п.2.2.3 факторы (шероховатость изнашиваемых

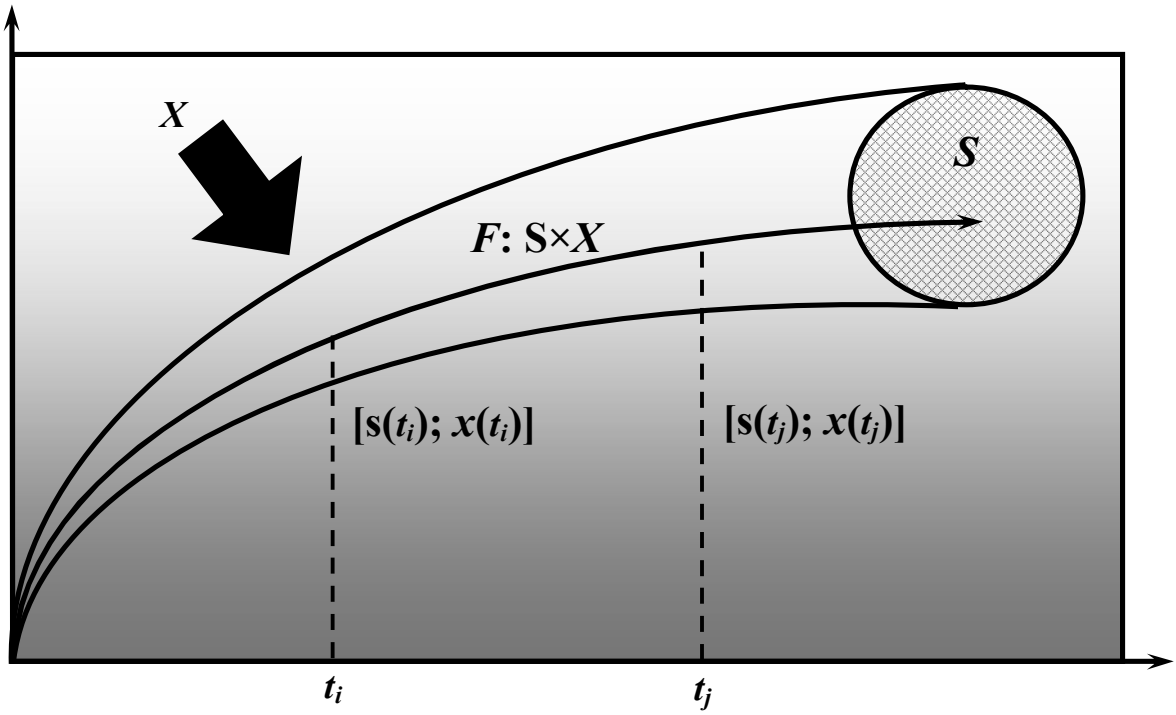


Рисунок 2.14 – Графическая интерпретация задачи оценивания

рабочих поверхностей, упругость и теплопроводность обрабатываемого материала, сечение срезаемого слоя и пятно контакта стружки с передней поверхностью, углы трения, сдвига и действия, силы на передней и задней поверхностях, коэффициенты трения, нормальное и касательное давление на контактных поверхностях инструмента, интенсивность тепловых потоков, температура деформации и резания, средний размер пятен контакта и др.), непрерывно изменяются случайным образом, но в определенных границах, не имея тенденции к монотонному возрастанию или убыванию, непрерывно изменяя, тем самым, геометрию и динамику резания. В этой ситуации и образование дефектов является случайным процессом, зависящим от соотношения мгновенных значений факторов (рисунок 2.14), которое в реальных условиях, как правило, неизвестно. Тогда единственно возможным подходом для определения этой зависимости становится использование метода статистических испытаний на ЭВМ модели этого процесса, адекватность которой подтверждена, а основным результатом испытаний является ответ на вопрос, как условия эксплуатации влияют на формирование дефектов (а, значит, и состояние инструмента), по крайней мере, в среднем. Если это станет известно, взаимосвязь между условиями эксплуатации и параметрами дефектов модифицированного инструмента можно считать установленной, и использовать ее для оценивания качества процесса его эксплуатации.

Принимая во внимание изложенное, при разработке модели воспользуемся следующими исходными предпосылками и допущениями [126].

1. Эксплуатацию инструмента будем рассматривать с позиций выполнения им полного цикла обработки некоторого количества заготовок с постепенным образованием дефектов на рабочих поверхностях, поэтому оценивать и анализировать информацию о состоянии будем после завершения эксплуатации, вызванного невозможностью обеспечения какого-либо из параметров точности (при износе) либо всех параметров (при сколе или поломке). Модель, таким образом, будет носить апостериорный с точки зрения получаемых результатов характер.

2. Основным контактным процессом между модифицированным слоем и обрабатываемым материалом (стружкой и поверхностью резания) примем перемещение микрообъемов материала модифицированного слоя, прилегающего к режущим кромкам (см. п.2.2), которое является результатом его пластической деформации под действием тепла, генерируемого в зоне резания силами стружкообразования при выполнении ими работы по пластической деформации и разрушению обрабатываемого материала [118, 127-129]. В результате процессы образования новых дефектов (см. таблицу 2.4) при истирании модифицированного слоя (см. рисунок 2.12) замедляют обнажение инструментальной матрицы, ее изнашивание и, тем самым, образование традиционных дефектов, в том числе и тех, которые определяют время стойкости инструмента: фаска, лунка, выкрашивание, скол.

В ходе перемещения микрообъемов протекают процессы релаксации (снятия) напряжений; при этом существуют температуры, начиная с которых интенсивность релаксации резко возрастает, сравниваясь с интенсивностью их роста. Согласно [130], такой процесс относится к категории ползучести.

3. Контактные взаимодействия будем рассматривать в двух аспектах: при отсутствии и наличии исходных дефектов на рабочей части инструмента, обусловленных неоднородностью состава массы инструмента, нарушением технологии его производства (процесса прессования перед операцией спекания) и дополнительной обработки (механической или абразивной), связанной с формировани-

ем требуемой геометрии [131]. Во втором случае процессы обнажения и износа матрицы с последующим возникновением и развитием не только микро-, но и, прежде всего, макродефектов могут протекать более интенсивно, что делает результаты формирования состояния инструмента более неопределенными.

4. Основным итогом пластической деформации примем ее локализацию в некоторой области рабочей части [62, 71, 118, 132, 133], которая вызывает ослабление связей между элементами структуры модифицированного слоя и, как следствие, рост вероятности неполного превращения тепловой энергии в механическую энергию перемещения микрообъемов. В результате состояние инструмента отклоняется от равновесного, что в большинстве случаев приводит к зарождению вначале микролокальных, а затем микроповерхностных и макродефектов.

5. Развитие дефектов будем рассматривать как процесс перестройки модифицированного слоя, т.е. его самоорганизации [103, 134]. Механизм самоорганизации в данном случае связан с локальной трансформацией поверхностных микрообъемов модифицированного материала. Результатом может стать формирование неустойчивых (диссипативных) структур, вызывающих либо «залечивание» слоя (т.е. восстановление устойчивости), либо его частичное разрушение (параметрический отказ), т.е. ускорение или замедление процессов перехода дефектов с микро- на макроуровень.

6. Развитие макродефектов приводит к функциональному отказу инструмента (износ, скол, поломка), состояние возникновения которого реализуем в модели как поглощающее, поскольку оно характеризует ситуацию, в которой дальнейшая эксплуатация инструмента становится невозможной в принципе [135].

7. Поскольку информация о процессе эксплуатации инструмента носит случайный характер (случайный поток событий, возникающих в случайные моменты времени как следствие процессов, имеющих случайную длительность), результаты применения модели также будут случайными, поэтому анализировать их можно только на вероятностном уровне. Тогда для увеличения степени достоверности этого анализа воспользуемся методом статистического моделирования на ЭВМ, и

будем считать каждый цикл моделирования единичной реализацией процесса эксплуатации инструмента за период, связанный с получением требуемых параметров точности изготовленных деталей, т.е. за наработку до отказа, а не за выработанный ресурс (п.1.2.3). При этом:

– в начальный момент времени инструмент всегда будет находиться в работоспособном состоянии;

– возникновение событий происходит мгновенно, т.е. в пределах текущего шага модельного времени;

– процессы, приводящие к возникновению событий, протекают за конечное число шагов модельного времени.

2.3.2. Модель процесса формирования состояния модифицированного инструмента

Разработанная в соответствии с положениями п.2.3.1 модель процесса формирования состояния модифицированного инструмента показана на рисунке 2.15 и представляет собой вероятностный автомат, в котором состояние инструмента под действием входных сигналов в случайные моменты времени (такты) изменяется с вероятностями $P_{i,j}$. Выглядит это следующим образом. В начальный (нулевой) момент времени инструмент находится в работоспособном состоянии S_1, из которого в этот же момент, в зависимости от наличия или отсутствия у него исходных дефектов, с вероятностью $P_{1,2} = 1$ или $P_{1,3} = 1$ совершает безусловный переход в состояние S_2 или S_3, где начинает осуществлять последовательную обработку заготовок из партии, сопровождающуюся температурно-силовыми процессами, которые отображаются в первом случае переходом с вероятностью $P_{2,4} = 1$ в состояние S_4, отображающее деформирование модифицированного слоя. Во втором случае ситуация является неоднозначной, поскольку исходные дефекты могут:

– приработаться; этот процесс отображается циклом переходов между состояниями S_3 и S_5 с вероятностями $P_{3,5} = 1 – P_{3,9}$ и $P_{5,3} = 1 – (P_{5,4} + P_{5,9} + P_{5,9})$;

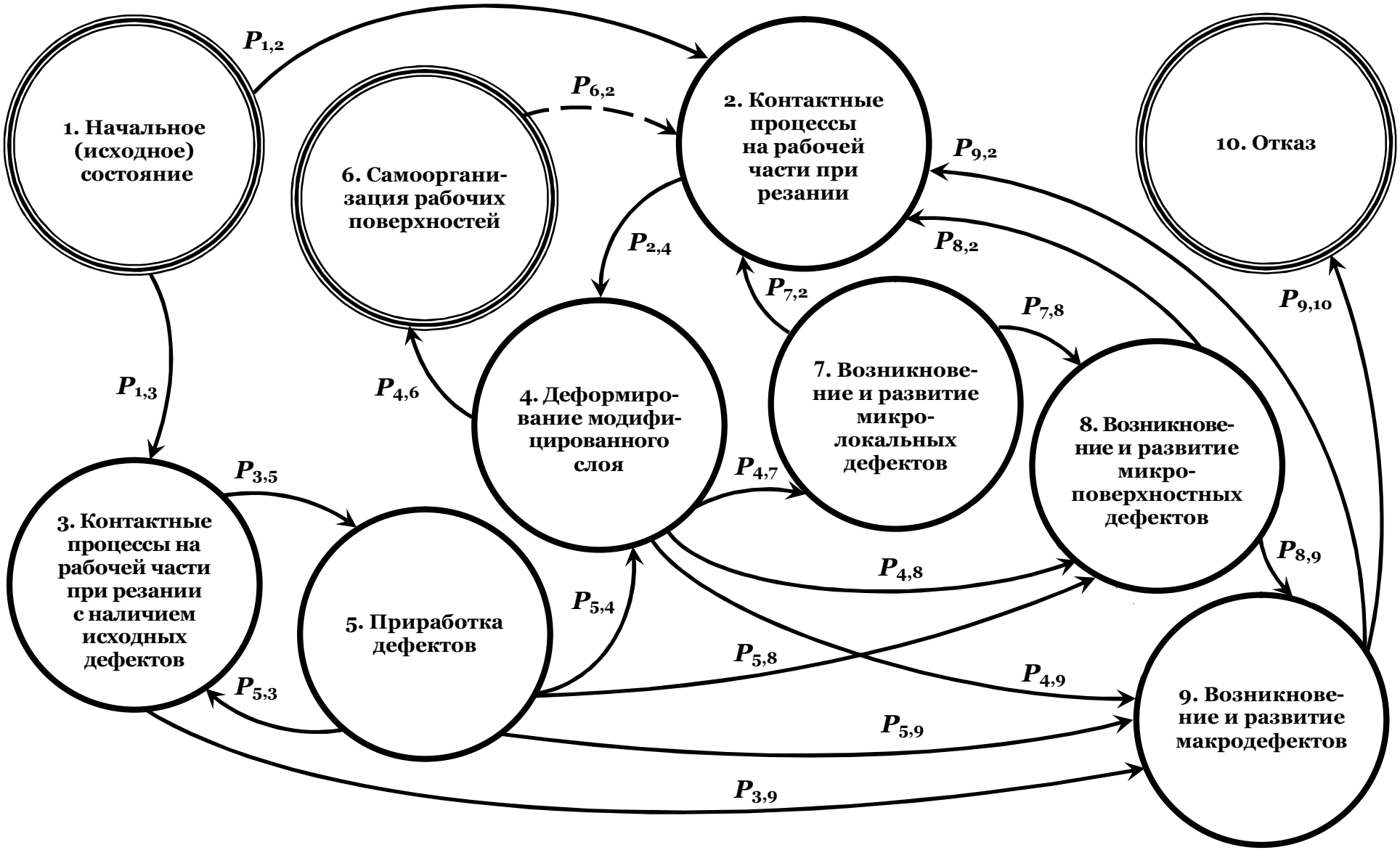


Рисунок 2.15 – Модель процесса формирования состояния модифицированного инструмента

– спровоцировать образование макродефектов, носящих характер выкрашиваний или сколов; данная ситуация отображается переходом в состояние S_9 с вероятностью $P_{3,9} = 1 - P_{3,5}$.

Приработка также может завершиться появлением дефектов (причем не только макро-, но микроповерхностных) с вероятностями $P_{5,8} = 1 - (P_{5,3} + P_{5,4} + P_{5,9})$ и $P_{5,9} = 1 - (P_{5,3} + P_{5,4} + P_{5,8})$ вследствие неопределенности реакции исходных дефектов на температурно-силовые процессы. Если же по результатам приработки исходные дефекты «залечиваются», то с вероятностью $P_{5,4} = 1 - (P_{5,3} + P_{5,8} + P_{5,9})$ (так же как и в случае отсутствия дефектов) происходит переход инструмента в состояние S_4 пластического деформирования модифицированного слоя.

Состояние S_4 является в модели основным, поскольку в нем появляются принципиальные альтернативы с точки зрения дальнейшего хода процесса формирования состояния инструмента:

– если самоорганизации модифицированного слоя (локального смещения и трансформации его микрообъемов) в состоянии S_6 не приводит к возникновению дефектов, то работа инструмента продолжается в нормальном режиме и с вероятностями $P_{4,6} = 1 - (P_{4,7} + P_{4,8} + P_{4,9})$ и $P_{6,2} = 1$ он возвращается в состояние S_2;

– если дефекты возникают, то в зависимости от их вида (микролокальные, микроповерхностные или макро) с вероятностями $P_{4,7}$, $P_{4,8}$ или $P_{4,9}$ происходит переход в состояния S_7, S_8 или S_9.

Принципиально возникновение дефектов может привести к отказу инструмента его попаданием за конечное число шагов с вероятностями $P_{7,8} - P_{8,9} - P_{9,10}$, $P_{8,9} - P_{9,10}$ или $P_{9,10}$ в состояние S_{10}, которое является поглощающим (вероятность выхода из него равна нулю) или запустить процесс их развития с переходом с вероятностями $P_{7,2}$, $P_{8,2}$, $P_{9,2}$ в состояние S_2, в котором работа инструмента продолжается с дальнейшей самоорганизацией модифицированного слоя вплоть до момента его полного истирания. После этого вероятность $P_{6,2}$ обращается в ноль (на рисунке 2.15 для этого использовано пунктирное изображение дуги перехода) и состояние S_6 также становится поглощающим.

Таким образом, основным результатом использования модели, характеризующим закономерности изменения состояния модифицированного инструмента (см. рисунок 2.12) количественно, становится время достижения поглощающих состояний, т.е. наработка до отказа T или время стойкости под действием входных сигналов в виде совокупностей:

– дефектов;

– параметров, характеризующих условия контактных взаимодействий;

– параметров, характеризующих обрабатываемый материал и модифицированный слой.

Варьирование составом этих совокупностей в процессе моделирования определит статистику времен T_i, что позволит идентифицировать закон распределения времени стойкости модифицированного инструмента (см. п.1.2.3).

Для практической реализации процедуры моделирования необходимым является решение двух задач:

1) поиск наиболее эффективных и экономичных приемов, позволяющих осуществлять «движение» инструмента в структуре модели, т.е. разработка технологии моделирования;

2) математическое описание процесса самоорганизации модифицированного слоя, т.е. разработка расчетной схемы для вычисления времени его истирания.

2.3.3. Технология моделирования

В методическом аспекте реализация «движений» в имитационных моделях связана с определением направлений переходов, которые в общем случае зависят от сигнала, поступающего на вход модели в текущий момент (такт) модельного времени, и от состояния, в котором она в этот момент находится [115]. В нашем случае сигналы поступают на вход только в начальный момент времени в виде исходных данных, поэтому направление очередного перехода определяется с помощью встроенных в ЭВМ программных датчиков случайных чисел, воспроизводящих их статистические аналоги (псевдослучайные числа), поскольку, начиная с какого-то, пусть и очень большого, порядкового номера, числа повторяются. При

однократном обращении эти датчики возвращают псевдослучайное число из ряда равномерно распределенных чисел [136]. При необходимости повторных обращений реализуется процедура случайного выбора первого значения (так называемой «затравки») датчика, что позволяет избежать повторения результатов.

Еще один аспект, связанный с «движением», заключается в различном (на принципиальном уровне) содержательном наполнении состояний разработанной модели (см. п.2.3.1): события и приводящие к их возникновению процессы. Первые происходят мгновенно, вторые – по истечении некоторого случайного времени. Это означает, что в процессе моделирования задача «движения» инструмента должна решаться по двум направлениям:

– определение момента времени перехода (в состояниях S_4, S_5);

– определение направления перехода (в состояниях S_3, S_4, S_5, S_7-S_9).

Реализация первого направления включает определение момента перехода (аналог синхронизирующего входного сигнала в синхронных автоматах) и его привязку к оси времени с целью фиксации длительности процесса изменения состояния модифицированного инструмента.

Момент перехода может быть определен с помощью подхода, основанного на последовательной генерации равномерно распределенных случайных чисел до тех пор, пока одно из них не попадет в интервал [0; $P_{i,j}$). Порядковый номер этого числа и определит момент перехода в данной реализации процесса моделирования (рисунок 2.16). Например, если в интервал [0; $P_{i,j}$) попало 47 по счету случайное число, то это равносильно тому, что переход произойдет на 47 шаге.

Необходимо, однако, отметить, что эффективность данного подхода напрямую зависит от вероятности $P_{i,j}$: чем меньше будет ее значение, тем меньше будет и вероятность попадения в интервал [0; $P_{i,j}$), что приведет к неограниченному росту времени моделирования вплоть до «зависания» ЭВМ в состоянии, из которого должен произойти переход. В связи с этим воспользуемся другим подходом [136], суть которого сводится к тому, что ось случайных чисел делится на l интервалов, длина каждого из которых равна вероятности $P_{i,j}$. Каждый i-й интервал используется для генерации перехода на i-м шаге и содержит подынтервал

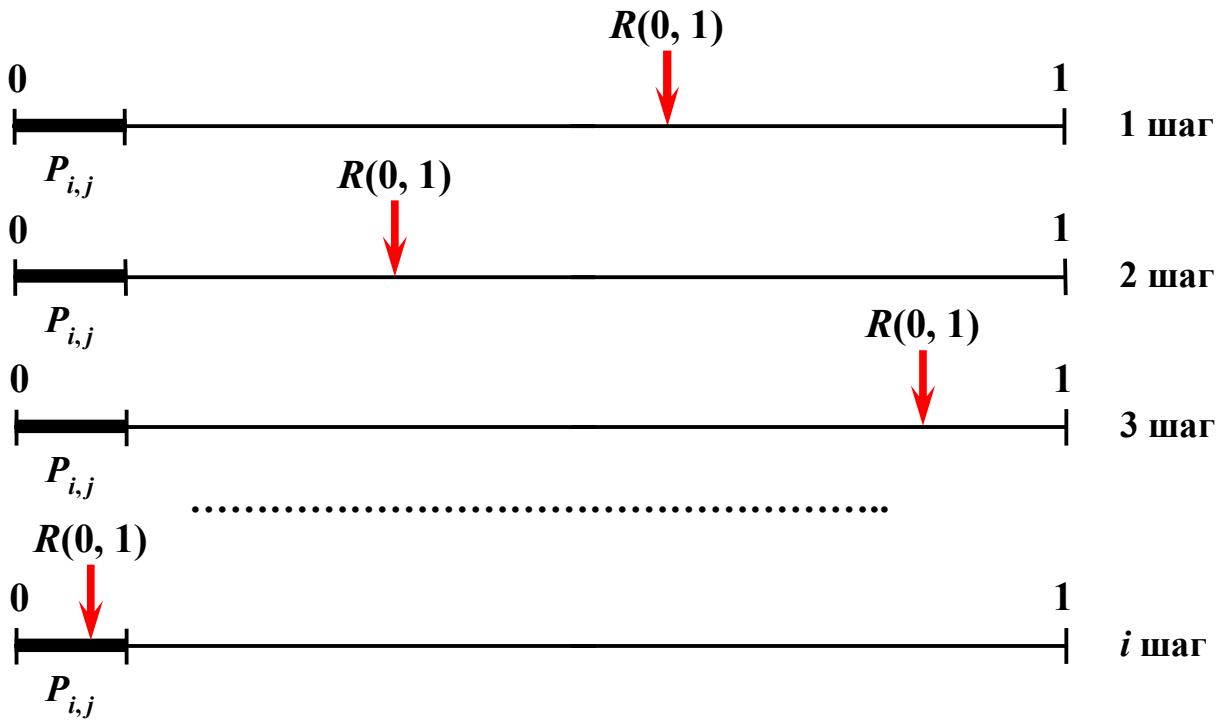


Рисунок 2.16 – Определение момента перехода инструмента в процессе моделирования методом последовательной генерации

$[(i\text{-}1)\times P_{i,j};\ i\times P_{i,j})]$. В процессе моделирования для этих интервалов генерируется одно случайное число из равномерного распределения. Предположим, что оно попадает в подынтервал i-го интервала. Тогда принимается, что переход произойдет на i-м шаге и не произойдет на предыдущих i-1 шагах (рисунок 2.17). Например, если $P_{i,j} = 0{,}01$ и генерируется число 0,8712, то это означает, что переход произойдет на 88 шаге моделирования и не произойдет на первых 87 шагах. Очевидно, что на любом шаге переход реализуются с вероятностью $P_{i,j}$. Таким образом, одно случайное число «пронизывает» i осей случайных чисел, поэтому такая генерация интерпретирована как кинжальная. Далее номер шага, в котором произошло исходное событие, переносится на ось времени моделирования, и вычисляется длительность процесса, под воздействием которого находился инструмент.

Привязка к оси времени требует определения его элементарного отрезка Δt, характеризующего длительность процессов, протекающих в системе «модифицированный инструмент – заготовка» и являющегося количественным эквивалентом шага моделирования. Определение целесообразно вести с позиций следующих предпосылок [137]:

– шаг не должен быть слишком малым, поскольку в противном случае локальные результаты моделирования будут незначительными, что может привести к нарушению устойчивости результатов моделирования в целом;

– шаг не должен слишком большим, поскольку в противном случае будет незначительным влияние на результаты моделирования самого исследуемого процесса.

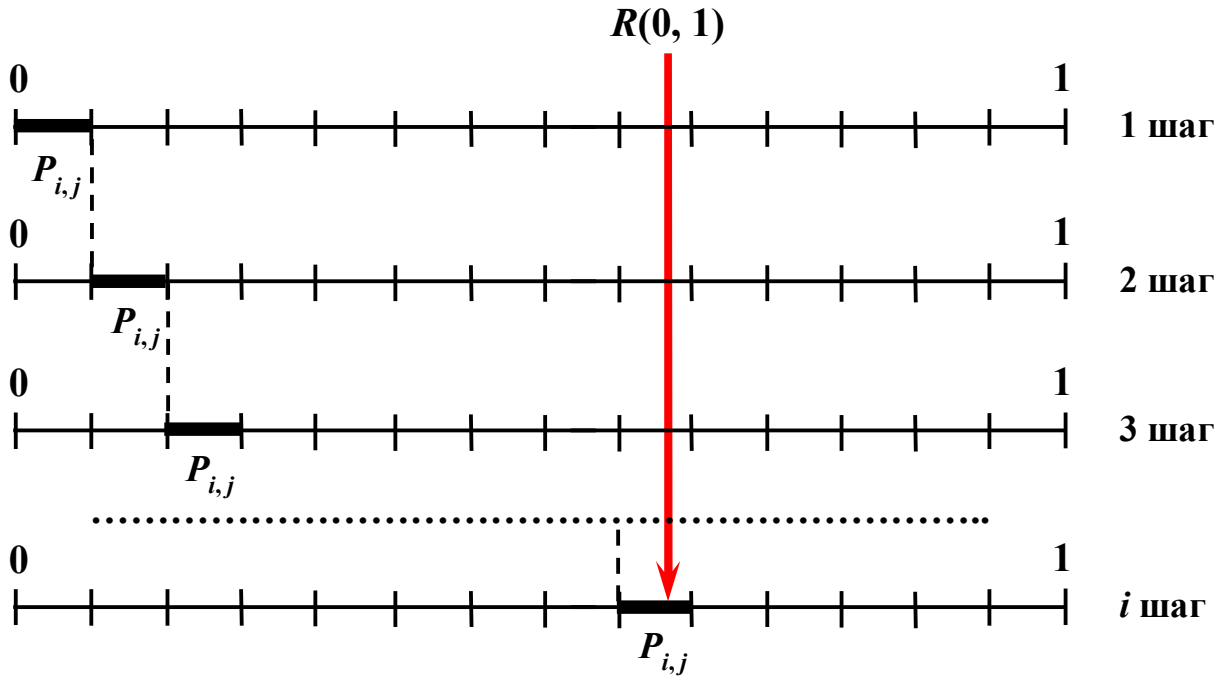


Рисунок 2.17 – Определение момента перехода инструмента в процессе моделирования методом кинжальной генерации

В связи с этим рассмотрим данный вопрос с позиций представления самоорганизации модифицированного слоя (в состоянии S_6) как процесса, состоящего из двух стадий:

– сжатие, вытеснение и смещение элементарных микрообъемов модифицированного слоя при его пластическом деформировании (в состоянии S_4) в результате контактных взаимодействий на рабочей части (в состояниях S_2 или S_3);

– релаксация сжатого модифицированного слоя за счет упругих свойств, т.е. его трансформация.

Основным результатом становится, с одной стороны, частичное восстановление нарушенных при смещении микрообъемов физико-механических свойств модифицированного слоя и, как следствие, повышение времени его стойкости, с

другой – частичная потеря свойств за счет возникновения элементарного плоского дефекта, с которого начинается развитие всех дефектов модифицированного инструмента. Очевидно, что результат зависит длительностей протекания каждой из стадий во времени: $\Delta t_{\text{с}}$ на стадии сжатия, вытеснения и смещения; $\Delta t_{\text{т}}$ на стадии релаксации (трансформации), а также от их соотношения.

С целью определения значений $\Delta t_{\text{с}}$ и $\Delta t_{\text{т}}$ используем подход, основанный на количественном оценивании соотношения между составляющей P_z силы резания (влияющей на стойкость инструмента в наибольшей степени [118, 128]), силой сопротивления смещению модифицированного слоя $F_{\text{с}}$ и силой упругости, определяющей трансформацию модифицированного слоя. Оценивать соотношение между P_z и $F_{\text{с}}$ будем в рамках элементарного акта стружкообразования, количественным выражением длительности которого является постоянная времени $T_{\text{р}}$, называемая также динамической характеристикой процесса резания [138]. В качестве базовой при оценивании используем предпосылку о том, что нарастание силы резания в фазах упругой и пластической деформации обрабатываемого материала при контактных взаимодействиях с инструментом, сопровождающихся образованием элементной стружки, может приводить к превышению ею значения силы сопротивления инструментального материала. В результате в течение отрезка времени $\Delta t_{\text{с}}$ до достижения силой резания максимального значения будет происходить смещение элементарного микрообъема модифицированного слоя (рисунок 2.18) при его контактных взаимодействиях с образующимся элементом стружки. Затем сила резания достигает максимального значения, в результате чего происходят скол и отделение элемента стружки; сила резания падает и инструмент до окончания акта стружкообразования совершает холостой пробег $\Delta t_{\text{т}}$ [139], за время которого под действием силы упругости происходит обратное движение сжатой части модифицированного слоя (трансформация). При этом, поскольку на формирование сил влияют различные физические процессы, они будут непрерывно изменяться в пределах некоторых диапазонов, определяя непрерывное изменение соотношений между ними.

Это означает, что и длительности и периодичности обеих стадий являются случайными величинами, поэтому решать задачу определения шага моделирования необходимо в направлении нахождения значений всех этих величин. С этой целью

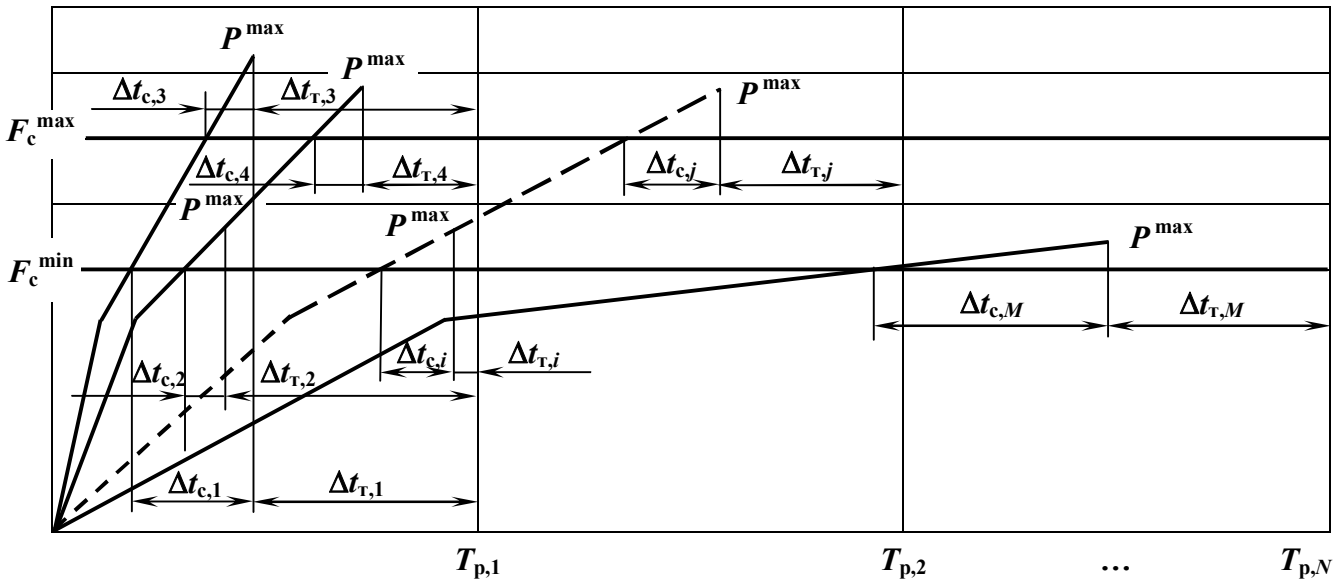


Рисунок 2.18 – Графическая интерпретация определения времен $\Delta t_{\text{с}}$ и $\Delta t_{\text{т}}$

воспользуемся традиционной схемой: будем последовательно изменять значения силы $F_{\text{с}}$ в пределах диапазона ее возможных значений с постоянным шагом и далее, с постоянным шагом изменяя в пределах диапазона возможных значений составляющую P_z (скорости ее нарастания в каждой из фаз контактного взаимодействия инструмента с заготовкой), находить вначале точку пересечения графиков сил, затем фиксировать достижение силой максимального значения, а после этого, опуская перпендикуляры на ось времени, определять соответствующие этим событиям моменты $t_{\text{п}}$ и $t_{\max}$ и далее массивы значений $\Delta t_{\text{с}}$ и $\Delta t_{\text{т}}$:

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{с}} &= t_{\max} - t_{\text{п}} , \\ \Delta t_{\text{т}} &= T_{\text{р}} - t_{\max} . \end{aligned} \qquad (2.7)$$

Периодичность процессов $T_{\text{д}}$ с учетом того, что они следуют друг за другом, найдем по результатам построения гистограммы распределения времени $t_{\max}$ с последующим округлением до ближайшего целого числа актов стружкообразования N, т.е.

$$T_{\text{д}} = N \times T_{\text{р}} . \qquad (2.8)$$

Самостоятельное значение имеет выбор показателя, который будет отображать искомые параметры процесса образования плоского дефекта количественно. Наиболее широко на практике для этого используется среднее значение. Однако

поскольку в данном случае распределения $\Delta t_с$, $\Delta t_т$ и $T_д$ с позиций схемы их получения будут иметь правостороннюю асимметрию, среднее значение, как характеристика центра распределения, в значительной степени утрачивает смысл, поскольку чувствительно к крайним значениям, имеющим малую вероятность появления [113]. В связи с этим в качестве показателя примем медиану распределений, которая на крайние значения не реагирует.

Диапазоны изменения сил были определены расчетным путем с использованием литературных данных [140-142 и др.], данных измерений микротвердости инструмента после модификации и после эксплуатации, а также данных о формировании состояния инструмента по микрофотографиям его рабочих поверхностей при обработке конструкционных и хромокремнемарганцовых сталей [143] и представлены в таблице 2.8. Значения постоянной времени стружкообразования, зависящей от коэффициента поперечной усадки стружки, для различных условий резания находятся в диапазоне 0,25÷1,8 мс (в среднем 1,02 мс) для обычных и термообработанных конструкционных сталей, 0,5÷2,5 мс (в среднем 1,5 мс) – для труднообрабатываемых материалов (жаростойких сталей и титановых сплавов) и 3÷5 мс (в среднем 4 мс) при возникновении автоколебаний [18, 138, 139, 144, 145 и др.]. Без учета

Таблица 2.8

Исходные данные для определения временных характеристик процесса моделирования

№ п/п	Параметр	Значение	Источник
Конструкционные стали			
1	Составляющая P_z	1723,45÷1948,0 кг	[141] и расчеты по [140]
2	Сила сопротивления $F_с$	937,17÷1810,55 кг	Результаты измерения микротвердости и расчеты по [140]
Хромокремнемарганцовые стали			
3	Составляющая P_z	1058,2 кг	[141] и расчеты по [140]
4	Сила сопротивления $F_с$	295,27÷570,45 кг	Результаты измерения микротвердости и расчеты по [140]

автоколебательного режима, а также принимая во внимание уменьшение этой величины для модифицированного инструмента в результате улучшения шероховатости его рабочих поверхностей, в среднем, в 1,4 раза [90] и снижения, как следствие, коэффициента трения и усадки стружки [146], значение $T_р$ примем равным 0,73 мс для конструкционных сталей и 1,07 мс – для хромокремнемарганцовых сталей.

Результаты применения изложенной процедуры позволили установить, что искомые значения составили:

– при обработке конструкционных сталей:

длительность стадии сжатия, вытеснения и смещения $\Delta t_с = 0{,}358$ мс;

длительность стадии трансформации $\Delta t_т = 0{,}129$ мс;

периодичность процессов $T_д = 1{,}5$ мс (2 цикла стружкообразования).

– при обработке хромокремнемарганцовых сталей:

длительность стадии сжатия, вытеснения и смещения $\Delta t_с = 0{,}745$ мс;

длительность стадии трансформации $\Delta t_т = 0{,}232$ мс;

периодичность процессов $T_д = 1{,}07$ мс (1 цикл стружкообразования).

Реализация второго направления может быть осуществлена с помощью подхода, аналогичного представленному на рисунке 2.16, но основанного на последовательной генерации для каждого альтернативного перехода $i – j$, $i – k$ и т.д. по N равномерно распределенных случайных чисел с фиксацией при этом попаданий в интервалы [0; $P_{i, j}$), [0; $P_{i, k}$) и т.д. Тогда наиболее вероятным будет переход, для которого число попаданий в соответствующий интервал окажется наибольшим.

Однако при таком подходе очевидным является тот факт, что наиболее вероятным это будет тот переход, у которого величина $P_{i, j}$ имеет наибольшее значение, поскольку наибольшей при этом будет и длина соответствующего ей интервала [0; $P_{i, j}$) на оси случайных чисел. Кроме того, данный подход может оказаться неправомерным также и потому, что создает предпосылки для невозможности достижения поглощающего состояния S_{10}, которое в модели является эргодическим и которого инструмент должен, поэтому достигать за конечное число шагов. С позиций теории вероятностей это объясняется тем, что с увеличением времени моделирования, независимо от начальных условий, вероятность попадения в по-

глощающее состояние приближается к единице, а вероятность попадания в остальные состояния – к нулю [135]. С учетом этого для определения направления очередного перехода из состояния S_i воспользуемся другим подходом, суть которого сводится к тому, что выбор производится чисто случайным образом с помощью одного равномерно распределенного псевдослучайного числа; при этом вероятности $P_{i,\,j}$ располагаются последовательно на одной оси [136]. Тогда если по результатам случайного выбора число $R(0,\,1)$ попадет в интервал между значениями $[P_{i,\,1} + \ldots + P_{i,\,l\text{-}1}]$ и $[P_{i,\,1} + \ldots + P_{i,\,l}]$, то это будет означать (рисунок 2.19), что с вероятностью $P_{i,\,l}$ реализуется переход в состояние S_l. При последующих попаданиях в каждое из состояний S_l процедура выбора направления дальнейшего движения повторяется с использованием новых псевдослучайных чисел. Это позволяет, как и в методе Монте-Карло, получить значения частот пребываний инструмента в каждом из этих состояний и при последующей статистической обработке обеспечить требуемую достоверность результатов моделирования.

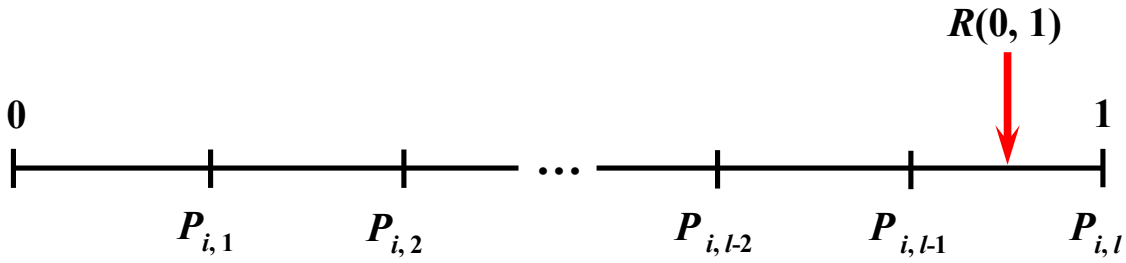


Рисунок 2.19 – Генерация направления перехода инструмента в процессе моделирования

Завершающим этапом разработки технологии моделирования является определение вероятностей переходов $P_{i,\,j}$, которые выступают в качестве параметров разработанной модели. С этой целью примем во внимание следующее.

1. Представленные в таблице (2.6) параметры учитывают значимость дефектов лишь при их сравнении между собой. Однако совершенно очевидным является то, что факторы-признаки Y, по которым проводилось сравнение, также не являются равнозначными. Это означает, что имеется возможность эффективного уточнения значений параметров дефектов на основе определения относительных значимостей факторов-признаков при их попарном сравнении между собой. Ре-

зультатом сравнения будет матрица E_m, аналогичная матрице B_l (2.2); тогда расчет относительных величин значимости каждого признака ρ_i в их общей сумме может быть выполнен по тем же выражениям (2.3) – (2.6) с использованием той же шкалы оценок (2.1). После этого производится «свертывание» полученной информации путем перемножения соответствующих столбцов матриц B_l и E_m, т.е. приоритетов объектов и приоритетов признаков [119]:

$$K_i^{\text{компл.}} = \sum_{l=1}^{m} K_{i,l}^{\text{отн.}}(1) \cdot \rho_l. \qquad (2.9)$$

Найденные значения $K_i^{\text{компл.}}$ и будут уточненными параметрами дефектов, поскольку представляют собой взвешенные комплексные оценки их приоритетов.

Матрица, полученная при сравнении признаков, представлена в приложении А, а значения ρ_i – в таблице 2.9.

Таблица 2.9

Результаты определения параметров относительной значимости факторов-признаков

Значение ρ												
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
0,096	0,071	0,077	0,053	0,077	0,084	0,062	0,077	0,096	0,093	0,077	0,090	0,047

2. Влияние факторов имеет место не на всех стадиях формирования и развития дефектов, определяемых переходными вероятностями $P_{i,j}$ модели. Там же, где оно есть, может быть различной его степень. Учесть эту ситуацию можно по аналогии с использованным в п.2.2.3 способом задания коэффициентов b_{ij} (условие (2.1)) заданием для каждого фактора признака его влияния: ситуации влияния будет соответствовать значение признака равное 1; ситуации слабого влияния будет соответствовать значение признака 0,5; в случае же отсутствия влияния значение признака будет равно 0, т.е.

$$\delta = \begin{cases} 1, \text{ если влияние есть,} \\ 0{,}5, \text{ если влияние слабое;} \\ 0, \text{ если влияния нет.} \end{cases} \qquad (2.10)$$

С учетом этого выражение (2.9) в окончательном виде запишется как

$$K_i^{\text{компл.}} = \sum_{l=1}^{m} K_{i,l}^{\text{отн.}}(1) \cdot \rho_l \cdot \delta_l. \qquad (2.11)$$

Таблица 2.10

Взаимосвязь переходных вероятностей и дефектов

Вероятность перехода в модели	**Дефекты (обозначения по таблице 2.4)**
$P_{4,6}$ (в фазе отсутствия дефектов)	–
$P_{4,6}$ (в фазе возникновения микролокальных дефектов)	1, 2, 3, 4, 5, 6
$P_{4,6}$ (в фазе возникновения микроповерхностных дефектов)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
$P_{4,6}$ (в фазе возникновения макродефектов)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18
$P_{4,7}$	1, 2, 3, 4, 5, 6
$P_{4,8}$	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
$P_{4,9}$	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19
$P_{7,2}$	1, 2, 3, 4, 5, 6
$P_{7,8}$	1, 2, 3, 4, 5, 6
$P_{8,2}$	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
$P_{8,9}$	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12
$P_{9,2}$	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18
$P_{9,10}$	14, 15, 17, 19

Необходимо, однако, отметить, что последовательное возникновение вначале микролокальных, затем микроповерхностных и макродефектов приводит к ситуации, в которой развитие дефектов, возникших ранее, может пойти по другим физическим схемам. Для учета этого факта необходимо пересмотреть значения признаков факторов для дефектов каждой предыдущей группы при возникновении дефектов каждой следующей группы, рассматривая дефекты в группах как совместные события, пересчитывая значение вероятности $P_{4,6}$ (таблица 2.10) и по-разному моделируя направления переходов в состоянии S_4:

– при возникновении микролокальных дефектов используя для моделирования вероятности $P_{4,6}$, $P_{4,7}$, $P_{7,2}$ и $P_{7,8}$;

– при возникновении микроповерхностных дефектов используя для моделирования вероятности $P_{4,6}$, $P_{4,7}$, $P_{4,8}$, $P_{7,2}$, $P_{8,2}$ и $P_{8,9}$;

– при возникновении макродефектов используя для моделирования вероятности $P_{4,6}$, $P_{4,7}$, $P_{4,8}$, $P_{4,9}$, $P_{7,2}$, $P_{8,2}$, $P_{9,2}$ и $P_{9,10}$.

Матрицы влияния факторов, определенные для каждого из переходов модели по каждому из дефектов на основе материалов исследования процесса изменения состояния рабочей части модифицированного инструмента, представленных в п.2.1 и 2.2.1, приведены в приложении Б.

3. Дефектов может образоваться несколько (в общем случае M), поэтому они будут влиять на вероятность каждого перехода модели из состояния s в состояние p совместно: влияние это отобразим сложением параметров дефектов $K_i^{\text{компл.}}$, позволяющим получить параметры переходов $K_{s,p}{}^{\text{компл.}}$ как

$$K_{s,p}^{\text{компл.}} = \sum_{i=1}^{M} K_i^{\text{компл.}}. \tag{2.12}$$

4. Найденные приоритеты $K_{s,p}{}^{\text{компл.}}$ не являются искомыми вероятностями $P_{s,p}$, а лишь их относительными значениями, поскольку получены в другой порядковой шкале. Для того чтобы перейти к абсолютным величинам воспользуемся условием

$$\sum_{j=1}^{N} P_{s,p}^{j} = 1 \tag{2.13}$$

несовместности событий, которые N вероятностей количественно характеризуют в каждом из состояний модели. Тогда значения $P_{s,p}$ могут быть найдены с помощью следующих преобразований:

$$\begin{gathered} P_{s,p} = K_{s,p}^{\text{компл.}} \times (N-1) / (\sum_{j=1}^{N} K_{s,p}^{\text{компл.},j} \times N), \text{ если } N > 2 \\ P_{s,p} = K_{s,p}^{\text{компл.}} / \sum_{j=1}^{N} K_{s,p}^{\text{компл.},j}, \text{ если } N = 2. \end{gathered} \tag{2.14}$$

5. Процесс самоорганизации рабочих поверхностей инструмента требует учета ее текущих результатов в ходе процесса моделирования. Очевидно, что учет связан с необходимостью корректировки значений вероятностей $P_{4,6}$ и $P_{5,3}$. При отсутствии дефектов (в начальный момент), т.е. когда вероятности их возникновения равны нулю, вероятности $P_{4,6}$ и $P_{5,3}$ являются безусловными и равными единице. В ходе моделирования, когда вероятности возникновения де-

фектов становятся отличными от нуля, вероятности $P_{4,6}$ и $P_{5,3}$ становятся условными, т.е. самоорганизация будет иметь место только при условии, что она выбрана как направление перехода $P_{s,p}$. Тогда в соответствии с формулой полной вероятности [116, 135]:

$$P(B) = P(A)P(B \mid A), \tag{2.15}$$

где $P(B \mid A)$ – вероятность появления события B при условии появления события A, имеем

$$P_{s,p} = P_{s,p}\, P'_{s,p}, \tag{2.16}$$

где $P'_{s,p}$ – вероятность того, что при наличии дефектов самоорганизация рабочих поверхностей будет идти в течение фиксированного промежутка времени.

2.3.4. Расчетная схема самоорганизации модифицированного слоя

По сути, самоорганизация модифицированного слоя представляет собой процесс его постепенного разрушения, которое носит характер истирания (рисунок 2.12) в ходе контактных взаимодействий с заготовкой при резании. Тогда математическое описание этого процесса будем разрабатывать с позиций следующих предпосылок [147, 148].

1. Неоптимальный модифицированный слой имеет толщину Hm = 3 мкм, ширину (на режущей кромке) s = 1000 мкм и состоит из нанокластеров, связанных между собой аморфными структурами [143]. Нанокластеры представляют собой жесткие шары диаметром ~70-90 нм, которые при внешнем силовом воздействии не деформируются. Аморфные структуры, размеры которых на порядок меньше размеров нанокластеров, образуют прослойку, способную перестраиваться в направлении действующей силы. На модифицированной поверхности отсутствуют выступы и в начальный момент времени ее микротвердость и плотность максимальные.

Соотношение объемов, занимаемых аморфной связкой и кластерами представлено в таблице

№ п/п	Диаметр кластера, нм	Объем кластера, нм^3	Диаметр кластера (в нм) с учетом аморфной прослойки толщиной 10 нм	Объем кластера (в мкм^3) с учетом аморфной прослойки толщиной 10 нм	Количество кластеров в вытесненном объеме (2,2253 мкм^3), шт.	Объем V_1, занимаемый кластерами, мкм^3	Объем V_2, занимаемый аморфной связкой, мкм^3 (2,2253-V_1)	Соотношение V_2/V_1
1	50	65450	70	0,000179594	12390	0,811	1,4143	1,744
2	70	179594,4	90	0,000381703	5830	1,047	1,1783	1,125
3	90	381703,5	110	0,000696910	3193	1,2188	1,0065	0,826

из которой следует, что для объемов, занимаемых аморфной связкой и кластерами диаметрами 70-90 нм, соотношение близко к 1:1.

2. Оптимальный модифицированный слой имеет толщину Hm = 5 мкм за счет того, что в результате модификации формируется переходный слой, толщина которого определяется высотой выступов зерен матрицы, внедренных в модифицированный слой, т.е. граница между модифицированным слоем и матрицей представляет собой градиентный переход (подслой). Зерна матрицы имеют форму квадратной пирамиды со стороной основания и высотой 2 мкм. Верхняя граница переходного слоя полностью состоит из модифицированного слоя, нижняя – из зерен матрицы.

3. Наиболее интенсивно процесс самоорганизации модифицированного слоя происходит на режущих кромках без образования продуктов износа и сетки трещин.

4. Контактная поверхность стружки в зоне врезания инструмента в момент отделения ее от заготовки представляет собой поверхность разлома, проходящего по границам зерен обрабатываемого материала – стали, относящейся к группе конструкционных и легированных. Микроструктура материала – зернистый перлит; рельеф поверхности стружки формируют выступающие части зерен цементита со средним размером 1,5…3 мкм [149-153].

5. Расположение выступающих частей зерен на обрабатываемой поверхности носит случайный характер (рисунок 2.20).

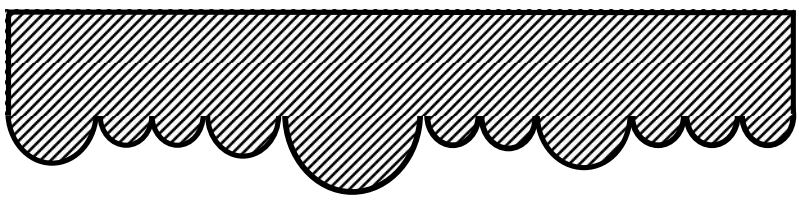


Рисунок 2.20 – Микропрофиль контактной поверхности стружки

6. Исходными данными для проведения расчетов являются:

– значения параметров технологического режима: частота вращения n, $с^{-1}$; оборотная подача $S_{об.}$, мкм/об, глубина резания t, мкм;

– ширина ленточки на передней поверхности инструмента s, мкм.

– длительности стадий самоорганизации модифицированного слоя $\Delta t_с$, $\Delta t_т$ и их периодичность $T_д$;

– постоянная времени процесса стружкообразования $T_р$.

– величина смещения инструмента $L = S_{лин.} \times T_р$ мкм за время $T_р$ со скоростью $S_{лин.} = n \times S_{об.}$, мкм/с.

7. Смещение инструмента и изменение внешнего температурно-силового воздействия приведут к внедрению в модифицированный слой зерна, имеющего максимальный выступ на площади, занимаемой N зернами (рисунок 2.21); глубина внедрения h зависит от соотношения диаметров выступающего и не выступающих зерен. При касании модифицированной поверхности не выступающими зернами происходит только их скольжение, поскольку внешняя нагрузка на одно зерно снижается в $1/(N-1)$ раз в результате ее перераспределения на $(N-1)$ зернах.

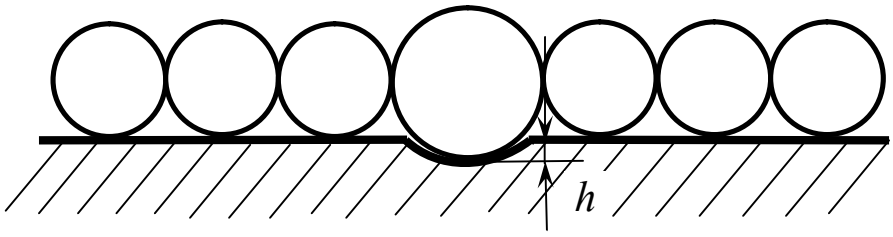


Рисунок 2.21 – Топография контактных взаимодействий

Кроме этого существует зерно, диаметр которого $D_{пр}$ является предельным с точки зрения возможности внедрения в модифицированный слой.

8. Количество зерен Zn, участвующих в разрушении модифицированного слоя, определяется от общего числа зерен, одновременно присутствующих на площади $s \times t$ по условию $D \geq D_{пр}$, т.е. одно выступающее зерно придется на площадь $S_{эл} = s \times t/Zn$. Тогда за элементарную площадку модифицированного слоя примем квадрат $\sqrt{S_{эл}} \times \sqrt{S_{эл}}$ $мкм^2$; удаляемый с него объем слоя составит $V_{эл} = S_{эл} \times h$ $мкм^3$.

9. Внедрение зерна приводит к возникновению объемного напряженного состояния в модифицированном поверхностном слое. Если напряжения превышают предел упругости аморфной связки, произойдет ее пластическая деформация, выражающаяся в смещении микрообъемов модифицированного слоя путем их растяжения и вытеснения. Результатом становится образование отпечатка (следа) за и валика перед фронтом движения зерна при минимальном уплотнении (рисунок 2.22) по аналогии с образованием волны при движении твердого тела в жидкости или пластичном материале. При этом валик не создает дополнительных препятствий для соседних зерен, т.е. трение является постоянным. Напряжения и деформации вокруг отпечатка изменяются от нуля до очень больших значений, но никаких предельных состояний (например, разрушений) при этом не достигается. Профиль отпечатка обратно пропорционален траектории изменения сил стружкообразования. Смещение микрообъемов ведет к локальному изменению плотности и свободного объема аморфной связки. Если же возникающие напряжения не превышают предела упругости аморфной прослойки, взаимодействие контактирующих поверхностей будет носить упругий характер без смещения микрообъемов.

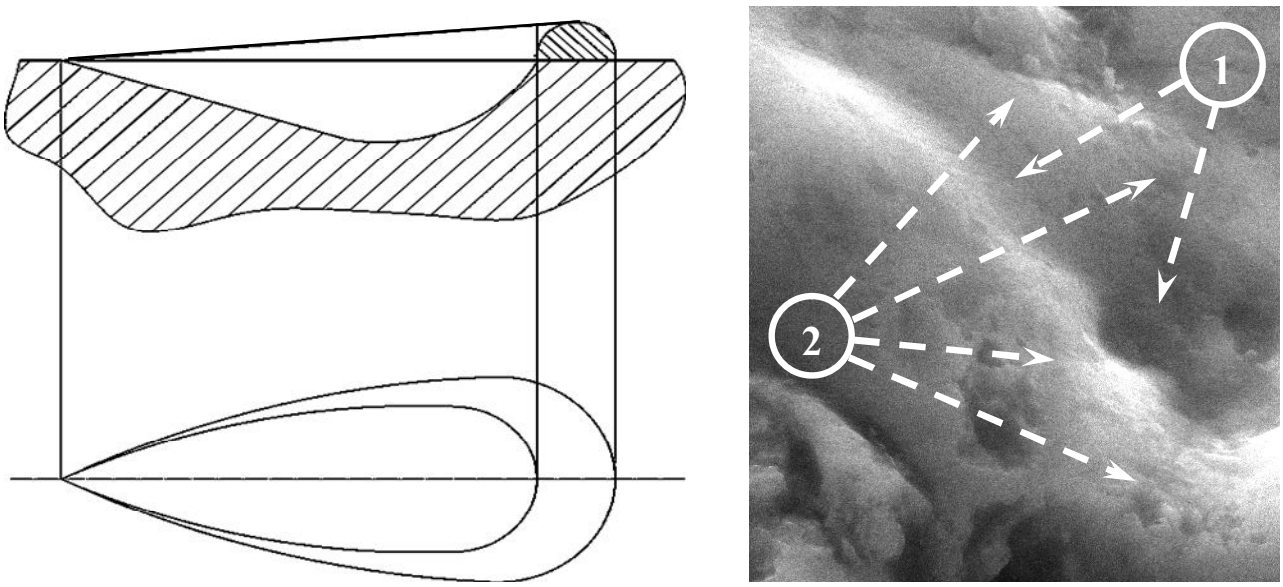


Рисунок 2.22 – Результат контактных взаимодействий зерна стружки с модифицированной поверхностью: 1 – отпечаток (след) от внедрения элемента стружки; 2 – валик (вытесненный микрообъем)

10. Вытесненный из следа микрообъем примем равным полусумме объемов эллиптического конуса и шарового сегмента:

$$V = \frac{1}{2}\left(V_{\text{эк}} + V_{\text{шс}}\right) = \frac{\pi h}{2}\left[\frac{1}{3}(R')^2 H_{\text{эк}} + h\left((R - S_{\text{т}}\Delta t_{\text{т}}) - \frac{1}{3}h\right)\right], \qquad (2.17)$$

где $H_{\text{эк}} = \text{S}_{\text{лин.}} \times \Delta t_{\text{с}}$, $R' = \sqrt{R^2 - (R-h)^2}$, h, R, $S_{\text{т}}$, соответственно, высота конуса и радиус основания конуса, высота сегмента, радиус внедряющегося зерна, скорость процесса трансформации модифицированного слоя.

Определим максимальный объем валика, который может образовать вытесненный материал вокруг выступающей части зерна.

Представим валик в виде рассеченного тора, заполняющего пустое пространство между соседними зернами меньшего диаметра. Расстояние центра сечения от центра кольца тора равно сумме радиуса R' и радиуса кругового сечения тора (высоты валика) $r_{\max}$, который определим по итеративной схеме с использованием формулы для объема валика V, составляющего половину объема тора:

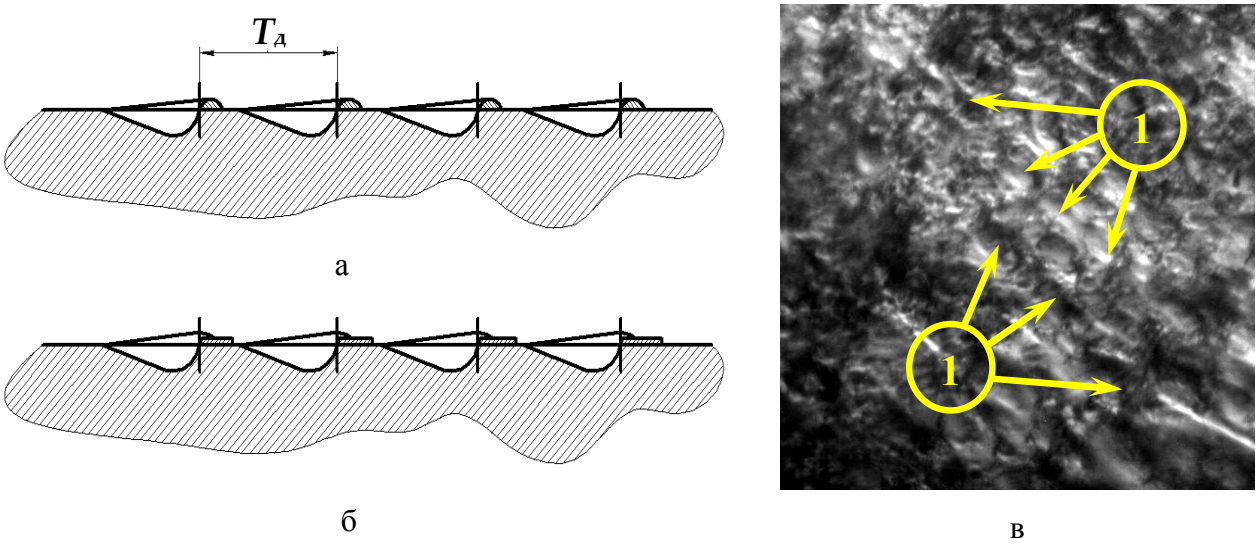
$$V_{\max} = 2\pi^2(R' + r_{\max})r^2_{\max}/2. \qquad (2.18)$$

Половина вытесненного микрообъема V смещается на величину, равную сумме радиуса основания шарового сегмента R' и ширине валика $2r_{\max}$. Оставшаяся часть формирует боковые объемы валика образованного отпечатка, которые при движении зерна не перемещаются.

Поскольку выступающих зерен значительно меньше, чем остальных (см. предпосылку 8), за выступающим зерном на элементарную площадку с бóльшей вероятностью попадет зерно диаметром $D < D_{\text{пр}}$ и произойдет контактирование его края с валиком. Это приведет к частичному разрушению валика путем его деформирования, смятия и распределения по поверхности модифицированного слоя. Величину деформированного объема определим с использованием формул для площади сегмента круга, его высоты и хорды. Исходя из того, что высота сегмента равна высоте валика, объем $V_{\text{д}}$, вытесненный из валика, примем равным объему параллелепипеда со сторонами a (хорда), b (площадь сегмента / a), c ($1{,}6r_{\max}$). При этом исходный уровень модифициро-

ванной поверхности увеличится на ~0,15 мкм (кластер диаметром 100 нм, окруженный аморфной связкой толщиной 0,022 нм).

Таким образом, после прохождения не внедряющегося зерна по следу, оставленному внедрившимся зерном, на поверхности элементарной площадки сформируется рельеф, образованный следами от локального вытеснения и перемещения микрообъемов модифицированного слоя.



а

б

в

**Рисунок 2.23 – Стадии самоорганизации модифицированного слоя:
а – вытеснение микрообъемов; б – смещение микрообъемов; в – результат:
1 – цепочки следов**

Общим результатом прохождения пары «внедряющееся зерно – не внедряющееся зерно» через элементарную площадку станет цепочка следов в количестве $n = \sqrt{S_{эл}} / L$, образующих волнообразный рельеф на поверхности с периодом равным $T_д$ (рисунок 2.23) и определяющих время удаления модифицированного слоя с площадки, т.е. его разрушение. При этом для перемещения каждого следующего вытесненного слоя потребуется переместить и предыдущий смещенный слой, что означает появление дополнительно перемещаемого микрообъема, и, как следствие, дополнительного потребного для этого времени.

Изложенное позволяет сформировать пошаговую схему расчета времени разрушения модифицированного слоя, включающую вычисление:

– фактически перемещенного объема $V_ф = V/2 – V_д$;

– объема, вытесненного при прохождении элементарной площадки, $V_в = n \times V_ф$;

– количества циклов, необходимых для перемещения объема модифицированного слоя, $N_{ц} = V_{эл} / V_{в}$;

– дополнительно перемещаемого объема $V_{доп} = V_{д} \times n \times N_{ц}$;

– общего перемещаемого объема $V_{общ} = V_{эл} + V_{доп}$;

– общего количества циклов перемещения $N_{общ} = V_{общ} / V_{в}$;

– суммарного количества циклов $N_{с} = N_{общ} \times n$;

– полного числа циклов, необходимого для перемещения модифицированного слоя $N_{полн} = \sum_{i=1}^{Hm} N_{c,i}$.

Тогда время разрушения модифицированного слоя

$$T = N_{полн} \times 2 \times n \times T_{д} / 60, \text{ мин;} \qquad (2.19)$$

при этом дополнительный вклад в найденное время (в направлении его увеличения) будут вносить относительные колебания инструмента и заготовки, искажающие линейную траекторию движения микрообъемов модифицированного слоя.

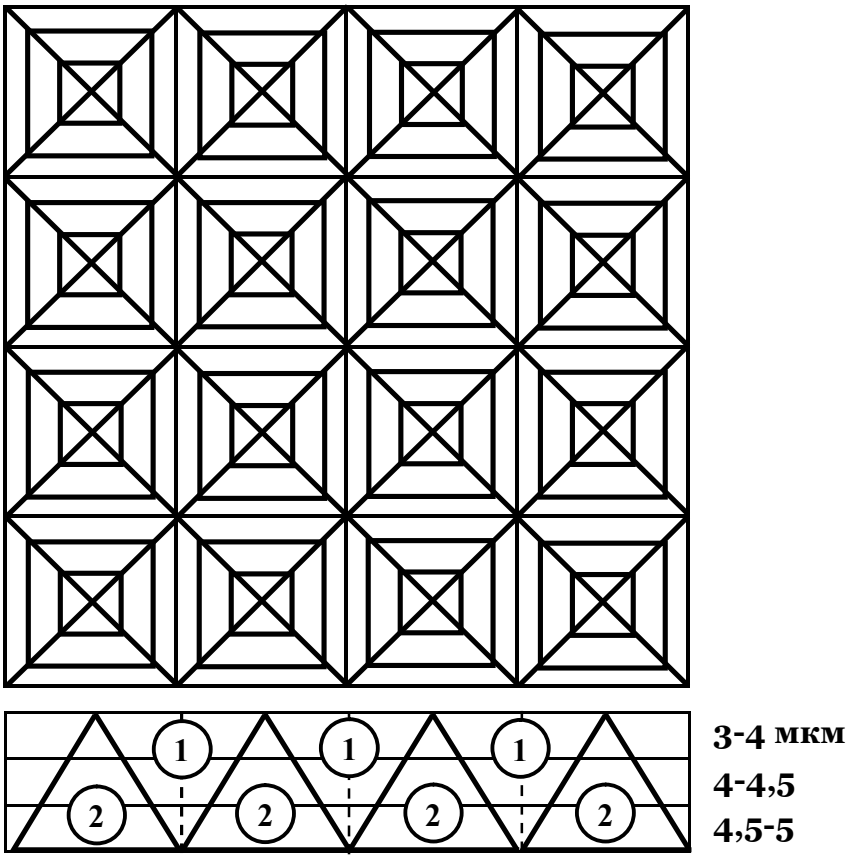


Рисунок 2.24 – Топография модифицированного слоя на глубине от 3 мкм: 1 – модифицированный слой, 2 – зерна матрицы

Необходимо, однако, отметить, что представленная схема распространяется только на ту часть модифицированного слоя, которая состоит из нанокластеров и аморфных структур (связки). Ее глубина составляет ~3 мкм. Ниже (см. предпосылку 3) начинается градиентный переход к матрице, в котором смещение модифицированного слоя приводит к постепенному обнажению вершин ее зерен-пирамид (рисунок 2.24). На контактной площадке этот процесс ведет к изменению соотношения между площадями, занимаемыми составляющими переходного слоя.

Рассчитаем объем, занимаемый зернами матрицы, в элементарном слое, лежащем на глубине от 3 до 4 мкм (рисунок 2.25).

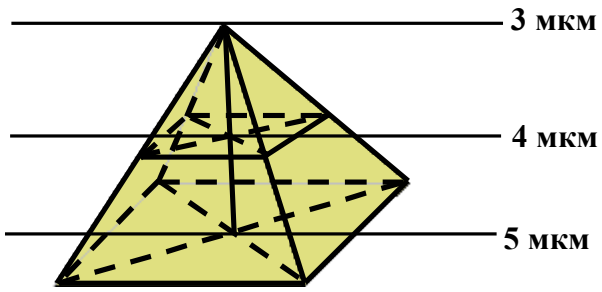


Рисунок 2.25 – К расчету объемных характеристик матричного слоя

Поскольку высота элементарной пирамиды равна 2 мкм (см. предпосылку 3), что совпадает с толщиной переходного слоя, ее высота будет равна половине общей высоты, также как и сторона основания пирамиды равна половине от общего размера (по теории подобия), т.е. $h' = 1/2h$, $a' = 1/2a$. Исходя из этого, объем, занимаемый элементарным зерном $V'_{3\text{-}4}$ в слое на глубине от 3 до 4 мкм, будет равен

$$V'_{3\text{-}4} = 1/3h'(a')^2 = 1/24ha^2. \quad (2.20)$$

Оставшаяся часть зерна будет располагаться в слое от 4 до 5 мкм, представляя собой усеченную пирамиду, объем которой $V'_{4\text{-}5}$

$$V'_{4\text{-}5} = 1/3h'(S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 S_2}), \quad (2.21)$$

где $S_1 = (a')^2 = 1/4a^2$, $S_2 = a^2$, $\sqrt{S_1 S_2} = 1/2a^2$.

Объем, занимаемый элементарным зерном в этом слое, будет равен

$$V'_{4\text{-}5} = 7/24\ ha^2. \quad (2.22)$$

Поскольку на площадке $S_{эл}$ зерен может расположиться $K = S_{эл}/a^2$, в элементарном объеме $V_{эл} = S_{эл}\times(1/2h)$ модифицированный слой на глубине от 3 до 4 мкм будет занимать объем

$$V_{эл3\text{-}4} = V_{эл} - K\times V'_{3\text{-}4} = V_{эл} - K\times 1/24ha^2 = 11/12S_{эл}, \qquad (2.23)$$

а на глубине от 4 до 5 мкм

$$V_{эл4\text{-}5} = V_{эл} - K\times V'_{4\text{-}5} = V_{эл} - K\times 7/24ha^2 = 5/12S_{эл}. \qquad (2.24)$$

Из этого следует, что в слое от 3 до 4 мкм присутствие зерен незначительно, поэтому не вызывает существенных изменений механизма смещения модифицированного слоя, однако в результате набегания на зерна внедряющихся зерен обрабатываемого материала усиливает трение, что отразится на увеличении постоянной времени стружкообразования (рис.2.26) и, как следствие, $\Delta t_с$, $\Delta t_т$ и $T_д$.

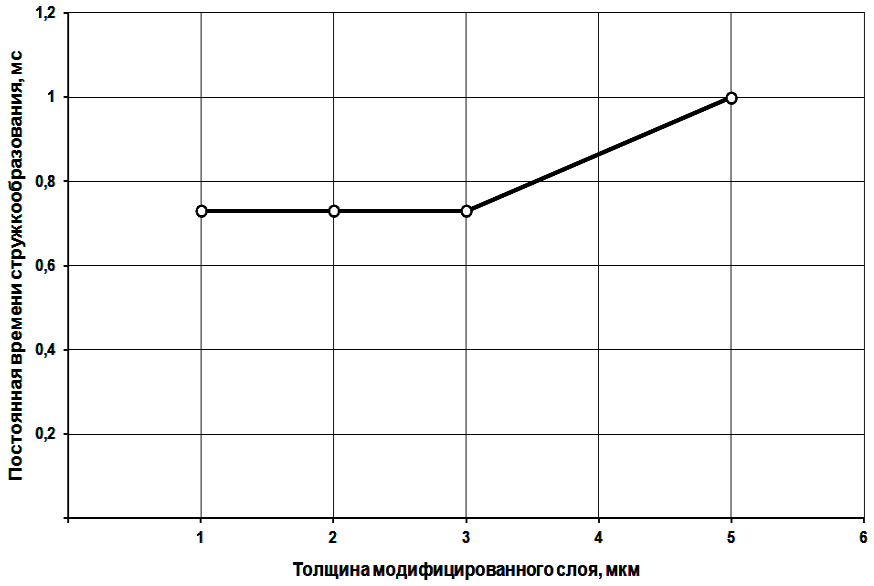


Рисунок 2.26 – Зависимость постояной времени стружкообразования от глубины модифицироавнного слоя

В слое от 4 до 5 мкм зерна матрицы занимают все больший объем, что проявится в изменении механизма смещения микрообъемов: на глубине от 4 до 4,5 мкм при перемещении 5/18 объема он не изменится, в то время как на глубине от 4,5 до 5 мкм внедряющееся зерно обрабатываемого материала наскакивает на обнаженные зерна матрицы, что приводит к постепенному откалыванию от них частиц (чешуек) износа размером 10^{-2} мкм^3 [154-156], которые также участвуют в смещении оставшихся 5/36 объема модифицированного слоя

(рисунок 2.27). В результате это приводит к дальнейшему увеличению трения и, соответственно, постоянной времени стружкообразования и, как следствие, $\Delta t_{\text{с}}$, $\Delta t_{\text{т}}$ и $T_{\text{д}}$ (рисунок 2.26).

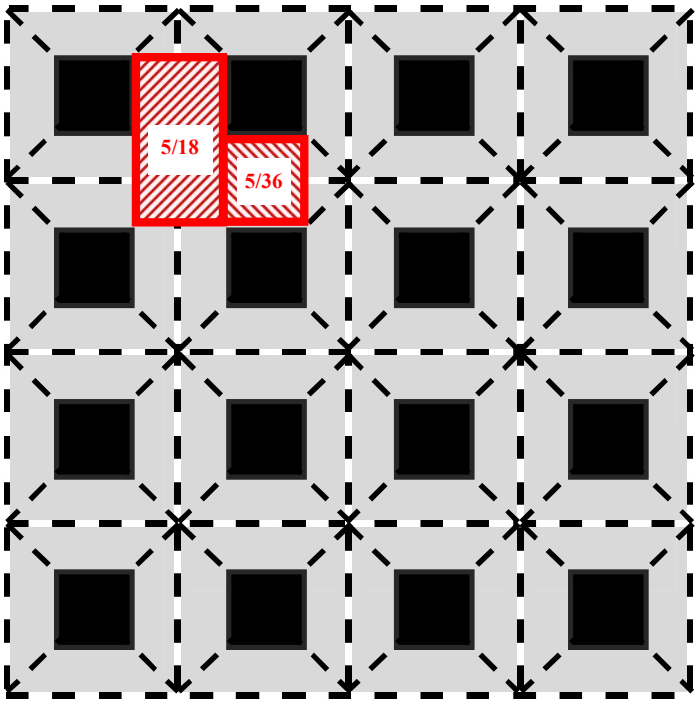


Рисунок 2.27 – Топография модифицированного слоя на глубине от 4 мкм

Рассмотрение полученных результатов в целом позволяет сделать вывод о том, что выполненное с помощью математических соотношений и логических условий описание процесса самоорганизации модифицированного слоя есть не что иное, как его расчетная схема (рисунок 2.28).

2.3.5. Схема формирования траектории изменения состояния модифицированного инструмента в процессе моделирования

Разработанные модель и технология ее использования позволяют решить вопрос формирования в процессе моделирования траектории изменения состояния модифицированного инструмента. С этой целью воспользуемся предпосылками 4-6 из п.2.3.1 и реализуем процедуру, суть которой состоит в следующем.

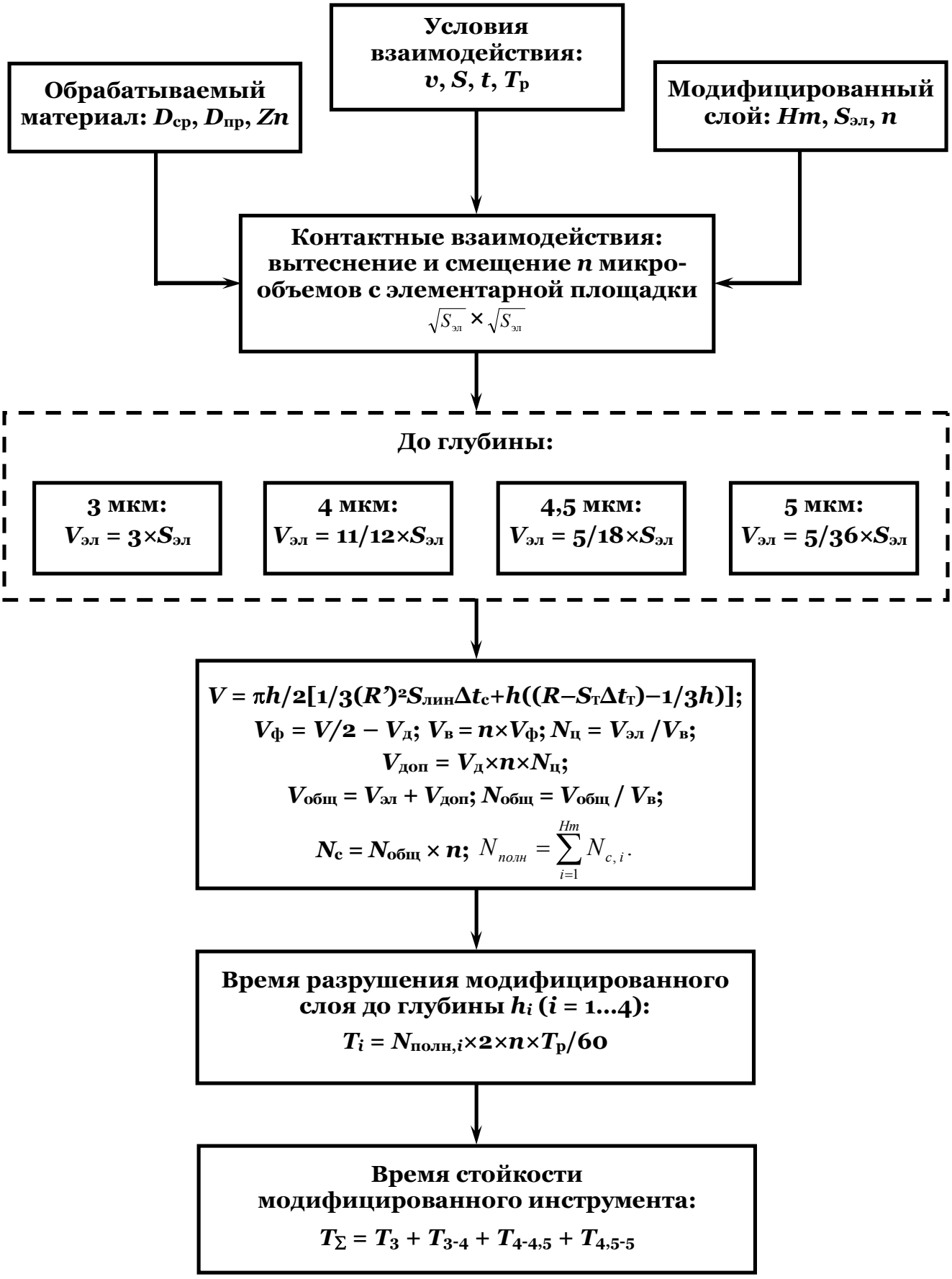


Рисунок 2.28 – Расчетная схема процесса самоорганизации модифицированного слоя

Процесс формирования траектории будем рассматривать как пошаговый многоуровневый, исходящий из начала координат, и отображаемый количественно после завершения каждого цикла самоорганизации и анализа событий в модели прибавлением к текущему уровню значения соответствующего идентификатора:

– при нахождении в работоспособном состоянии (1 уровень) –1;

– при возникновении микролокальных дефектов (2 уровень) – 2;

– при развитии микролокальных дефектов (3 уровень) – 3;

– при возникновении микроповерхностных дефектов (4 уровень) – 5;

– при развитии микроповерхностных дефектов (5 уровень) – 6;

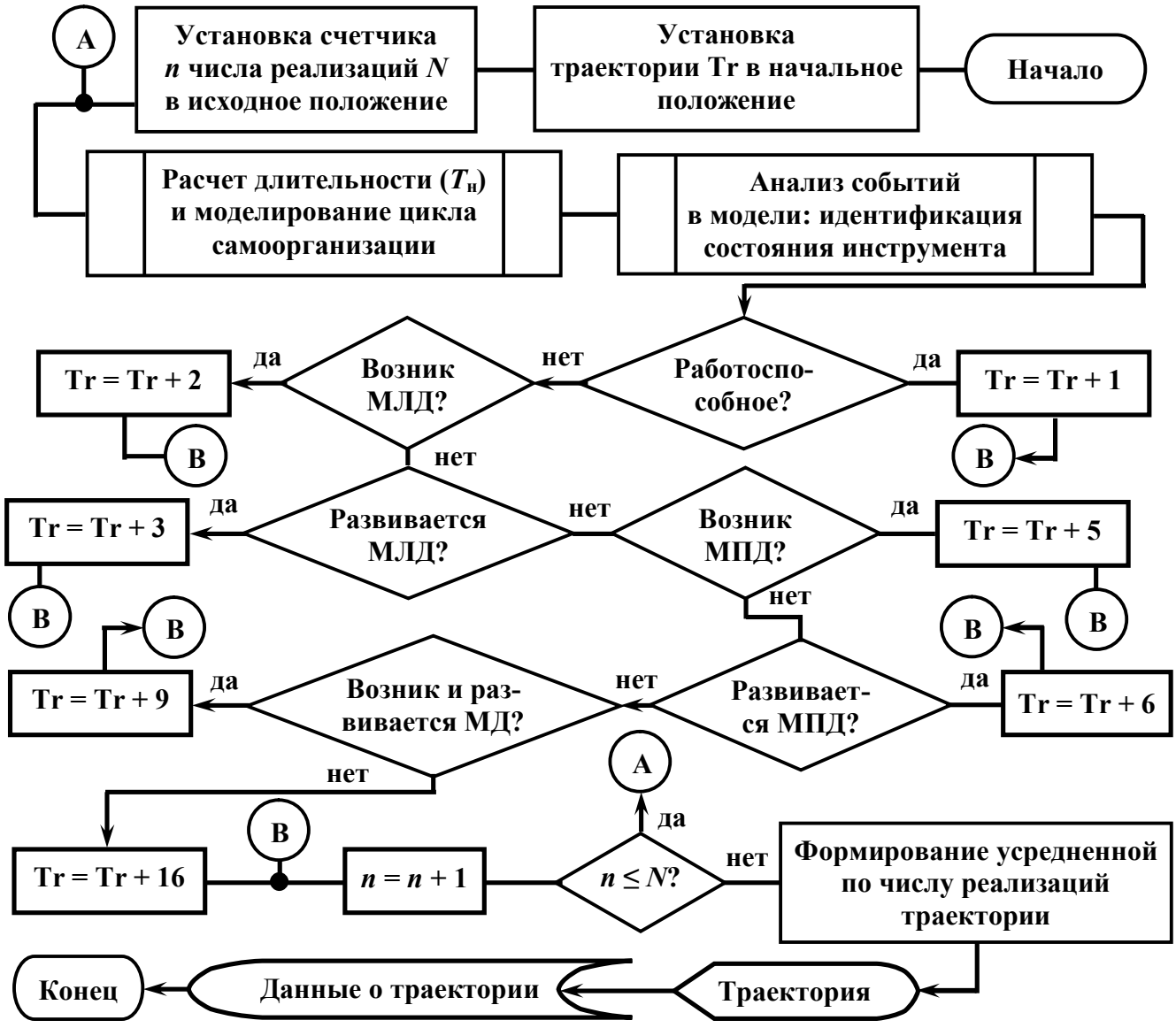


Рисунок 2.29 – Алгоритм формирования траектории изменения состояния модифицированного инструмента

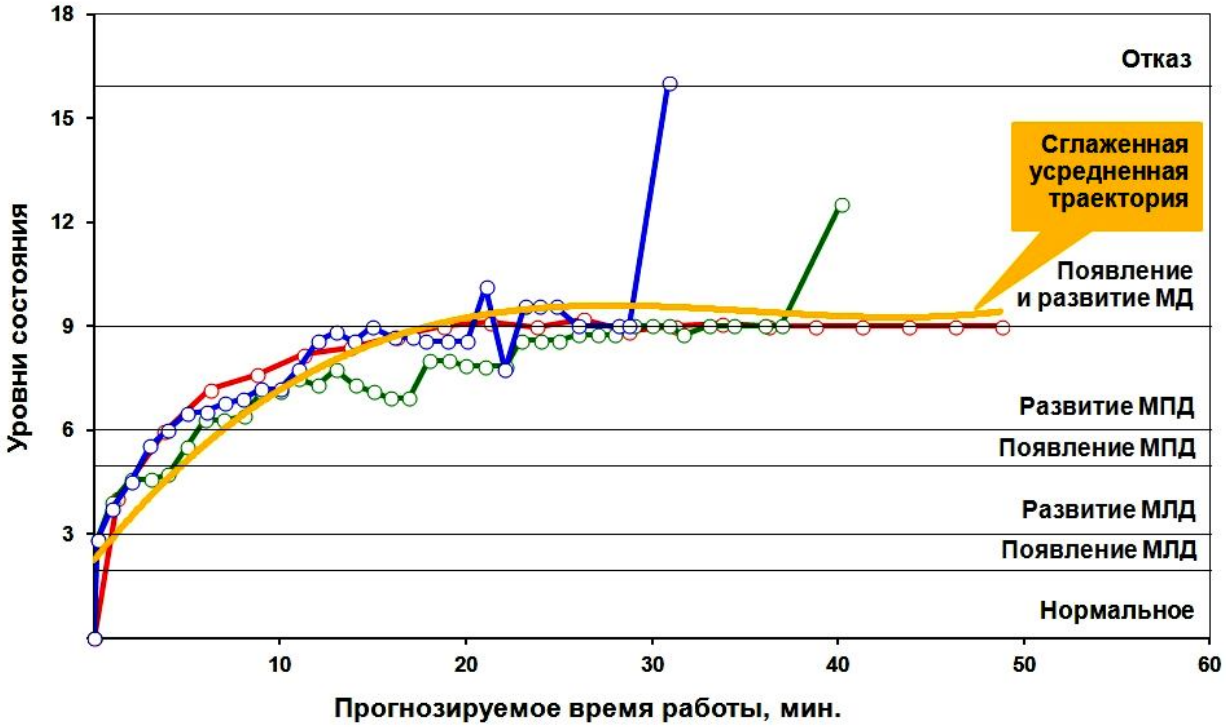


Рисунок 2.30 – Примеры траекторий изменения состояния модифицированного инструмента: МЛД, МПД, МД – соответственно, микролокальные, микроповерхностные и макродефекты

– при возникновении и развитие макродефектов (6 уровень) – 9;

– при возникновении отказа (7 уровень) – 16.

Значения идентификаторов принимались с учетом более явного отображения тенденции изменения состояния. После завершения моделирования производится усреднение сформированного массива по числу его реализаций, что дает возможность представить траекторию в координатах «Уровни состояния» – «Время работы инструмента».

На рисунке 2.29 изображен реализующий процедуру алгоритм, а на рисунке 2.30 – примеры его практического использования.

2.4. Выводы

Анализ материалов выполненного экспериментально-аналитического исследования показывает, что его дальнейшее продолжение определяет целесообразность создания компьютерной системы, позволяющей выполнять все действия

по оцениванию состояния рабочей части модифицированного инструмента автоматизированно. Для этого необходимо решение следующих принципиальных задач (рисунок 2.31) [106, 157]:

– разработка способа получения информации о состоянии рабочей части;

– разработка программно-математического обеспечения для анализа полученной информации.

Решение первой задачи, по сути, связано с созданием подсистемы распознавания образов, которыми являются дефекты, с целью формирования базы данных для изучения процессов, приводящих к их образованию. Для этого необходимо:

– обосновать методику регистрации рабочей части модифицированного инструмента с использованием техники цифровой микрофотографии ее поверхности, в том числе со сверхвысоким разрешением;

– разработать процедуру анализа микрофотографий;

– обосновать методики структурного, морфологического и химического анализов модифицированного поверхностного слоя.

Основным результатом работы подсистемы являются данные о виде и характере дефектов, их местоположении и размерах, морфологическом и химическом составе поверхности, а также условиях формирования дефектов (полной совокупности эксплуатационных параметров). Полученные данные подвергаются статистической обработке, основная цель которой заключается в получении информации о закономерностях и причинах изменения состояния модифицированной рабочей части инструмента. Эта информация становится исходной для создания базы знаний, на основе которой разрабатываются алгоритмы анализа и продукционные правила, т.е. решается вторая задача, связанная с созданием подсистемы оценивания состояния модифицированного инструмента, вплоть до восстановления траектории его изменения в процессе эксплуатации, отображающей механизм изнашивания. Результаты оценивания используются для поиска эффективных направлений обеспечения эксплуатационной надежности модифицированного инструмента, как на этапе подготовки, так и в процессе эксплуатации, в частности, за счет оптимизации сочетаний

Рисунок 2.31 – Общий подход к автоматизированному оцениванию качества процесса эксплуатации модифицированного металлорежущего инструмента по параметрам дефектов рабочей части

режимных параметров процессов модификации и резания. Это позволит, целенаправленно изменяя характер и степень воздействия дефектов на модифицированный слой, стабилизировать его состояние и на этой основе обеспечить повышение не только износостойкости, но и отказоустойчивости инструмента [158, 159].

Изложенное означает, что ядром системы является не комплекс привлекаемых для ее создания технических средств (практически все они являются стандартными), а программно-математическое обеспечение, созданию которого посвящена следующая глава работы. По результатам же исследований, выполненных по обоснованию способа автоматизированного оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента по параметрам дефектов можно сделать следующие основные выводы.

1. Вид и состояние поверхности отработанного модифицированного инструмента в значительной степени отличны от традиционных, что связано с изменением характера его контактных взаимодействий с заготовкой при резании. Основным результатом этого становится повышение устойчивости инструмента к образованию дефектов на его рабочих поверхностях. В связи с этим дефекты могут быть положены в основу разработки способа оценивания качества процесса эксплуатации инструмента с целью поиска условий, обеспечивающих повышение его эксплуатационной надежности.

2. Классификация дефектов, выполненная с помощью последовательного применения процедур кластерного анализа, обработки категоризированных данных и метода расстановки приоритетов с использованием разработанной стратегии принятия решений при сравнении дефектов, позволила:

– объединить дефекты в три группы и с учетом использованных для классификации признаков, а также комплекса дополнительных параметров, уточняющих вид, расположение и количество дефектов присвоить им названия микролокальные, микроповерхностные и макродефекты;

– определить параметры дефектов для оценивания направлений и степени их воздействия на состояние модифицированного инструмента в процессе его эксплуатации.

3. Разработан способ оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента с использованием его имитационной модели. Модель отображает процессы, связанные с изменением состояния модифицированного инструмента, через параметры дефектов и расчетную схему самоорганизации модифицированного слоя. Технология использования модели обладает элементами адаптации как к входной информации, так и к информации, получаемой в ходе моделирования. Это позволяет воспроизводить процессы самоорганизации модифицированного слоя, возникновения и развития дефектов и на этой основе определять время работы инструмента, вероятности возникновения отказов и формировать траекторию изменения его состояния, т.е. получать информацию об основных закономерностях и причинах изменения состояния модифицированной рабочей части инструмента.

3. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ МОДИФИЦИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА

Разработка программно-математического обеспечения (ПМО) базировалась на результатах 2 главы, а также на использовании как традиционных, так и специальных методов математической статистики, в частности, разведочного анализа и непараметрических методов с целью получения информации для создания базы знаний по вопросам оптимизации процессов модификации и эксплуатации модифицированного инструмента.

3.1. Общая структура

Структурно ПМО представляет собой единый комплекс программ, предназначенных для последовательного анализа содержащейся в данных о результатах эксплуатации модифицированного инструмента информации.

Принципиально работа с данными реализована в двух режимах:

– оценивание результатов процесса эксплуатации модифицированного инструмента;

– получение знаний об основных закономерностях обработки различных материалов модифицированным инструментом.

Оценивание выполняется на основе построения и анализа диаграмм и гистограмм для последующей идентификации законов распределения и вычисления вероятностных характеристик данных по дефектам, технологических данных и данных по физико-механическим параметрам и химическому составу, а также апостериорного моделирования процесса формирования состояния модифицированного инструмента.

Знания формируются по результатам обобщения материалов оценивания с использованием для этого моделирования, а также методов одно- и многомерного анализов: корреляционного, дисперсионного и регрессионного.

3.2. Язык программирования

В настоящее время наиболее популярной операционной системой является Windows. На базе Windows созданы приложения, которые широко используются в различных областях практической деятельности, для решения различных задач. Приложения отличаются своей функциональностью, простотой в эксплуатации и наглядностью. В связи с этим ПМО разрабатывалось как приложение для операционной системы Windows.

Выбор языка программирования были произведен по результатам сравнения языков, чаще других использующихся при разработке Windows-приложений.

Язык C++. В этом языке переменные экземпляров объектов должны быть явно инициализированы в конструкторе. Язык поддерживает множественное наследование классов. Это приводит к определенному усложнению кода. Код программы компилируется в формат машинного языка, который будет выполняться на определенном процессоре и в определенной операционной системе. Язык хорош тем, что поддерживает процедурное программирование, объектно-ориентированное программирование, обобщенное программирование, обеспечивает модульность, раздельную компиляцию, обработку исключений, абстракцию данных, объявление типов (классов) объектов, виртуальные функции, но имеет ряд недостатков. Отчасти они унаследованы от языка-предка Си, и вызваны изначально заданным требованием возможно большей совместимости с ним. Это такие недостатки, как синтаксис, провоцирующий ошибки; сложность и избыточность, из-за которых язык C++ трудно изучать, а построение компилятора сопряжено с большим количеством проблем; поддержка множественного наследования реализации в подсистеме языка вызывает целый ряд логических проблем, а также создает дополнительные трудности в реализации компилятора.

Язык Java является чисто объектно-ориентированным, тогда как C++ сохраняет возможности чисто процедурного программирования (свободные функции и переменные). Java – это базовая технология, на которой основываются многие современные программы. Приложения Java обычно компилируются в специ-

альный байт-код, поэтому могут работать на любой виртуальной Java-машине (JVM) вне зависимости от компьютерной архитектуры.

Основной проблемой, с которой приходится сталкиваться – это меньшая производительность по сравнению с компилируемыми языками, преобразуемыми в машинный код. Трансляция в байт-код и JIT-компиляция не решают этой проблемы полностью. Дополнительный слой интерпретатора или виртуальной машины замедляет выполнение программы и может требовать больше ресурсов.

Язык C# представляет собой простой, современный, строго типизированный объектно-ориентированный язык программирования, обеспечивающий, в то же время, поддержку и компонентно-ориентированного программирования. Разработка современных приложений все в большей степени базируется на применении программных компонентов в форме автономных и самодокументируемых функциональных модулей. Основной особенностью таких компонентов является реализация модели программирования с использованием свойств, методов, событий и атрибутов, представляющих декларативное описание компонентов, а также включение в них собственной документации. В C# представлены языковые конструкции, непосредственно поддерживающие эти понятия, что делает его близким к естественному языку для создания и применения программных компонентов.

С точки зрения разработчика языки Java и C# очень похожи. Они являются строго типизированными, объектно-ориентированными, оба вобрали в себя многое из синтаксиса C++, но в отличие от C++ проще в освоении. Но есть в них и свои особенности и различия, сильные и слабые стороны. C# учел многие недостатки Java, и исправил их в своей реализации.

В настоящее время язык программирования C# набирает большой темп, и нет более простого и многофункционального языка, чем он. Практически он вобрал в себя все достоинства разных языков и имеет 300 000 библиотек различных функций, которые работают с максимальным быстродействием.

В языке C# представлены функциональные возможности, позволяющие создавать надежные и устойчивые приложения. Среди них: функция сборки мусора для автоматического освобождения памяти, занимаемой неиспользуемыми объ-

ектами; функция обработки исключительных ситуаций, обеспечивающая структурированный и расширяемый подход к обнаружению и устранению ошибок; а также строго типизированная структура языка, не допускающая считывания неинициализированных переменных, выхода индекса массива за пределы допустимого диапазона или выполнения непроверенных приведений типов.

В языке C# применяется унифицированная система типов. Все типы C#, включая простые (например, int и double), наследуются от единственного корневого типа object. Таким образом, все типы используют набор общих операций, что обеспечивает согласованные хранение, передачу и обработку значений любого типа. Кроме того, в C# поддерживаются пользовательские ссылочные типы и типы значений, что обеспечивает динамическое размещение объектов в памяти и встроенное хранение упрощенных структур [160].

В большинстве языков программирования недостаточное внимание уделяется обеспечению совместимости и возможности дальнейшего развития программ и библиотек, в результате чего в создаваемых на таких языках программах чаще обычного возникают проблемы при переходе на новые версии зависимых библиотек. В C# реализованы следующие возможности по управлению версиями: разделение модификаторов virtual и override, применение правил разрешения перегрузки метода и поддержка явного объявления членов интерфейса.

Язык имеет статическую типизацию, поддерживает полиморфизм, перегрузку операторов (в том числе операторов явного и неявного приведения типа), делегаты, атрибуты, события, свойства, обобщенные типы и методы, итераторы, анонимные функции с поддержкой замыканий, LINQ, исключения, комментарии в формате XML. C# не поддерживает множественное наследование классов (между тем допускается множественное наследование интерфейсов). C# разрабатывался как язык программирования прикладного уровня для Common Language Runtime (CLR) и, как таковой, зависит от возможностей самой CLR. Это касается, прежде всего, системы типов C#, которая отражает Base Class Library (BCL) [161]. Присутствие или отсутствие тех или иных выразительных особенностей языка диктуется тем, может ли конкретная языковая особенность быть транслирована в соответствующие конст-

рукции CLR. Так, с развитием CLR от версии 1.1 к 2.0 значительно обогатился и сам C#; подобного взаимодействия следует ожидать и в дальнейшем. Однако эта закономерность была нарушена с выходом C# 3.0, представляющего собой расширения языка, не опирающиеся на расширения платформы .NET. CLR предоставляет C#, как и всем другим .NET-ориентированным языкам, многие возможности, которых лишены «классические» языки программирования. Например, сборка мусора не реализована в самом C#, а производится CLR для программ, написанных на C# точно так же, как это делается для программ на VB.NET, J# и др.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что задачу разработки ПМО для автоматизированного оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента по параметрам дефектов целесообразно решать на языке программирования C#, как языке разработки приложений для платформы Microsoft.NET Framework.

3.3. Формирование и ведение базы данных

Поскольку и образование, и проявление дефектов зависит от различных факторов, в большинстве своем имеющих стохастический характер, информацию о них целесообразно хранить в специальных базах данных (БД). Поскольку БД состоит только из клиентской части и необходимо обеспечить хранение всех данных в файлах, для ее создания было использовано приложение Microsoft Access.

Структурно (рисунок 3.1, таблица 3.1) БД представляет собой три связанных между собой таблицы (двумерных матрицы), количество строк которых равно числу прошедших стойкостные испытания инструментов [162, 163].

Количество столбцов (полей) первой таблицы – дефектов – определяется их видами, а содержимое ячеек – параметрами (таблица 3.2). Формироваться таблица может по результатам анализа микрофотографий рабочих поверхностей инструмента двумя способами: ручным и автоматизированным. В ручном режиме для этого используется современная цифровая техника с различным увеличением, в автоматизированном режиме – разрабатываемый в настоящее время программный

продукт Image Engineer Tools. Его интерфейс аналогичен интерфейсу Adobe Photoshop, но не содержит инструментов для добавления эффектов фотографии, а позволяет добавлять инструменты для выполнения инженерных расчетов, связанных с автоматической классификацией и количественным оцениванием выявленных дефектов, и совершенствовать эти инструменты в направлении расширения их функциональных возможностей.

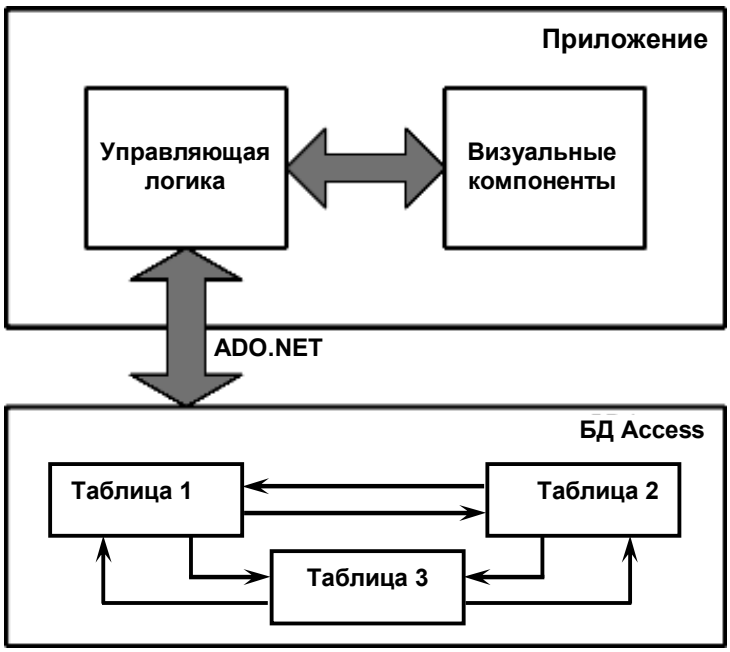


Рисунок 3.1 – Структура БД

Таблица 3.1

Описание полей таблиц

Поле	Тип	Описание
№ строки	**Счетчик**	**Порядковый номер строки таблицы: ключевой элемент для доступа к нужной строке.**
Параметр (или фактор) 1	**Числовой**	**Значение (или код) параметра (или фактора)**
Параметр (или фактор) 2	**Числовой**	**Значение (или код) параметра (или фактора)**
…	**…**	**…**
Параметр (или фактор) *n*	**Числовой**	**Значение (или код) параметра (или фактора)**

Столбцы (поля) второй таблицы – факторов, под действием которых формируются и развиваются дефекты, – содержат информацию о параметрах инструмента, режима модификации, режима резания, а также марке станка, обрабатываемого материала, виде обработки и периоде стойкости инструмента в принятых единицах: времени или количестве изготовленных деталей (таблица 3.3).

Таблица 3.2

Матрица дефектов

Классификатор	Микролокальные												Микроповерхностные												Макро											
	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18		19	
	а	в	а	в	а	в	а	в	а	в	а	в	б	в	б	в	б	в	б	в	б	в	б	в	б	в	б	в	б	в	б	в	б	в	б	в	б	в
I																																				
I																																				
…																																				
II																																				
II																																				
…																																				
III																																				
III																																				
…																																				

Примечание:

I. Классификатор обозначает предприятие, с которого поступила пластина: I – СПЗ, II – Агрегатный завод, III – РЖД, IV – КАМАЗ и т.д.

II. Арабские цифры соответствуют названиям дефектов: 1 – вкрапление продуктов износа в поверхность, 2 – вырыв зерен, 3 – деформирование матрицы, 4 – истирание зерен матрицы, 5 – истирание покрытия, 6 – микротрещина, 7 – козырек, 8 – налипание обрабатываемого материала на продукты износа, 9 – наплыв, 10 – несплошности, 11 – пропахивание (микропроточины), 12 – трещина (сетка трещин), 13 – выкрашивание, 14 – локальное разрушение (скол), 15 – лунка, 16 – отслаивание защитного покрытия, 17 – проточина, 18 – точечные (розетки), 19 – фаска износа.

III. Буквы русского алфавита обозначают параметры дефектов: площадь (а) или объем (б) и степень значимости в вероятностном выражении (в).

Таблица 3.3

Матрица технологических данных

Классификатор	Номер инструмента	Марка инструмента	Геометрические параметры инструмента				Вес инструмента, г	Наличие покрытия	Параметры режима модификации											Обраб. матер.	Станок	Вид обработки	Параметры технологического режима				Период стойкости
			Длина	Ширина	Толщина	Диаметр			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11				*v*	*S*	*t*	*B*	
I																										
I																										
…																										
II																										
II																										
…																										
III																										
III																										
…																										

Примечание:

I. Классификатор обозначает предприятие, с которого поступил инструмент: I – СПЗ, II – Агрегатный завод, III – РЖД, IV – КАМАЗ и т.д.

II. Арабские цифры соответствуют режимам модификации: 1 – потенциал смещения, В; 2 – подводимая СВЧ мощность, Вт; 3-5 – координаты положения инструмента в камере (ширина, высота, длина), мм; 6 – время обработки, мин; 7 – начальная температура, °С; 8 – температура отключения, °С; 9 – максимальная температура, °С; 10 – начальный ток смещения, мА; 11 – конечный ток смещения, мА.

Таблица 3.4

Обобщенная матрица механических и химических параметров

Класс-сифи-катор	Номер инст-ру-мента	Химический состав															Зернистость																		
																	матрицы (до)							матрицы (после)							модифицирован-ного слоя				
		W	Co	C	Al	N	O	Ti	Ta	F	V	Cr	Mn	Si	Mo	Fe	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	11	12	13	14	15
I																																		
I																																		
…																																		
II																																		
II																																		
…																																		

Примечание:

I. Классификатор обозначает предприятие, с которого поступила пластина: I – СПЗ, II – Агрегатный завод, III – Кострома, IV – КАМАЗ и т.д.

II. Арабские цифры соответствуют диапазонам зернистости:

– матрицы: 1 – ультрамелкозернистая (0,3-0,5 мкм), 2 – особомелкозернистая (0,5-0,9 мкм), 3 – мелкозернистая (1-1,3 мкм), 4 – средняя (1,4-2,0 мкм), 5 – среднекрупная (2,1-3,4 мкм), 6 – крупная (3,5-5,0 мкм), 7 – особокрупная (5,0-7,9 мкм);

– модифицированного слоя: 11 – 20-40 нм, 12 – 40-60 нм, 13 – 60-80 нм, 14 – 80-100 на, 15 – 100-120 нм.

В ячейки 1-15 заносятся частоты попаданий измеренных значений зернистости в соответствующие диапазоны.

Таблица 3.5

Матрица физико-механических параметров до и после модификации

Классификатор	Номер инструм.	Микротвердость до модификации при нагрузке, г									Плотность до модификации при нагрузке, г								
		20	40	60	80	100	120	150	200	Средняя	20	40	60	80	100	120	150	200	Средняя
I	1																		
I	1																		
I	2																		
I	2																		
…	…																		
II	1																		
II	1																		
II	2																		
II	2																		
…	…																		

Микротвердость после модификации при нагрузке, г									Плотность после модификации при нагрузке, г									Приращение плотности при нагрузке, г								$\Delta\rho_\Sigma$
20	40	60	80	100	120	150	200	Средняя	20	40	60	80	100	120	150	200	Средняя	20	40	60	80	100	120	150	200	

Таблица 3.6

Матрица физико-механических параметров после эксплуатации

Классификатор	Номер инструмента	Микротвердость в точке на режущей кромке				
		1	2	3	4	5
I	1					
I	1					
I	2					
I	2					
…	…					
II	1					
II	1					

I. Размер матрицы отличается от размеров матрицы дефектов, поскольку у каждой пластины микротвердость в точках на режущих кромках измеряется при двух нагрузках: 20 г и 100 г. Поэтому во второй столбец матрицы номер инструмента заносится 2 раза.

II. Арабские цифры соответствуют точкам: 1 – зона стружкообразования; 2, 3 – зона движения стружки; 4 – зона схода стружки; 5 – вне контактной зоны.

Третья таблица содержит данные о весовом химическом составе и размерах зеренной структуры инструментальной матрицы до и после модификации, а также модифицированного слоя (таблица 3.4). Элементы химического состава выбраны с учетом наличия у твердосплавных пластин наиболее распространенных защитных покрытий: TiN и Al_2O_3; названия и размеры диапазонов зернистости матрицы приняты в соответствии с [164].

Самостоятельное значение имеет часть третьей таблицы, содержащая информацию о параметрах микротвердости; число ее строк отличается от числа строк остальных таблиц. В первом случае (таблица 3.5) это связано с тем, что каждая пластина имеет несколько вершин (в общем случае – m), поэтому во второй столбец этой матрицы номер пластины заносится столько раз, сколько вершин она имеет. Во втором случае (таблица 3.6) число строк для каждой пластины равно 2 по числу ее измерений в каждой из контрольных точек, расположенных вдоль вспомогательной режущей кромки [165].

Взаимодействие приложения с БД осуществляется при помощи программного интерфейса ADO.NET, разработанного компанией Microsoft. Данный интерфейс является универсальным и позволяет взаимодействовать с различными СУБД. Необходимым условием его функционирования является наличие подходящего для данной СУБД драйвера поставщика данных. Для БД Access используется поставщик данных «Microsoft Jet OLEDB 4.0».

Для взаимодействия с БД создана совокупность командных файлов (приложение) с помощью класса db1DataSet. Класс создан автоматически средой разработки из описания БД и содержит все необходимые методы для входа в БД и обращения к ее информации; манипулирования содержимым; при необходимости модифицирования и удаления данных; вывода имеющегося данных (целиком или частично) на монитор, а также отображения данных в виде твердых копий. Приложение полностью отражает функциональное назначение БД, причем предполагается (допускается) его дальнейшее развитие с помощью инструментальных средств. Интерфейс приложения обеспечивает связь с оператором (через экран дисплея) и располагает необходимыми системными средствами для обработки специальных сообщений, а также для поддержки многопроцессорного режима.

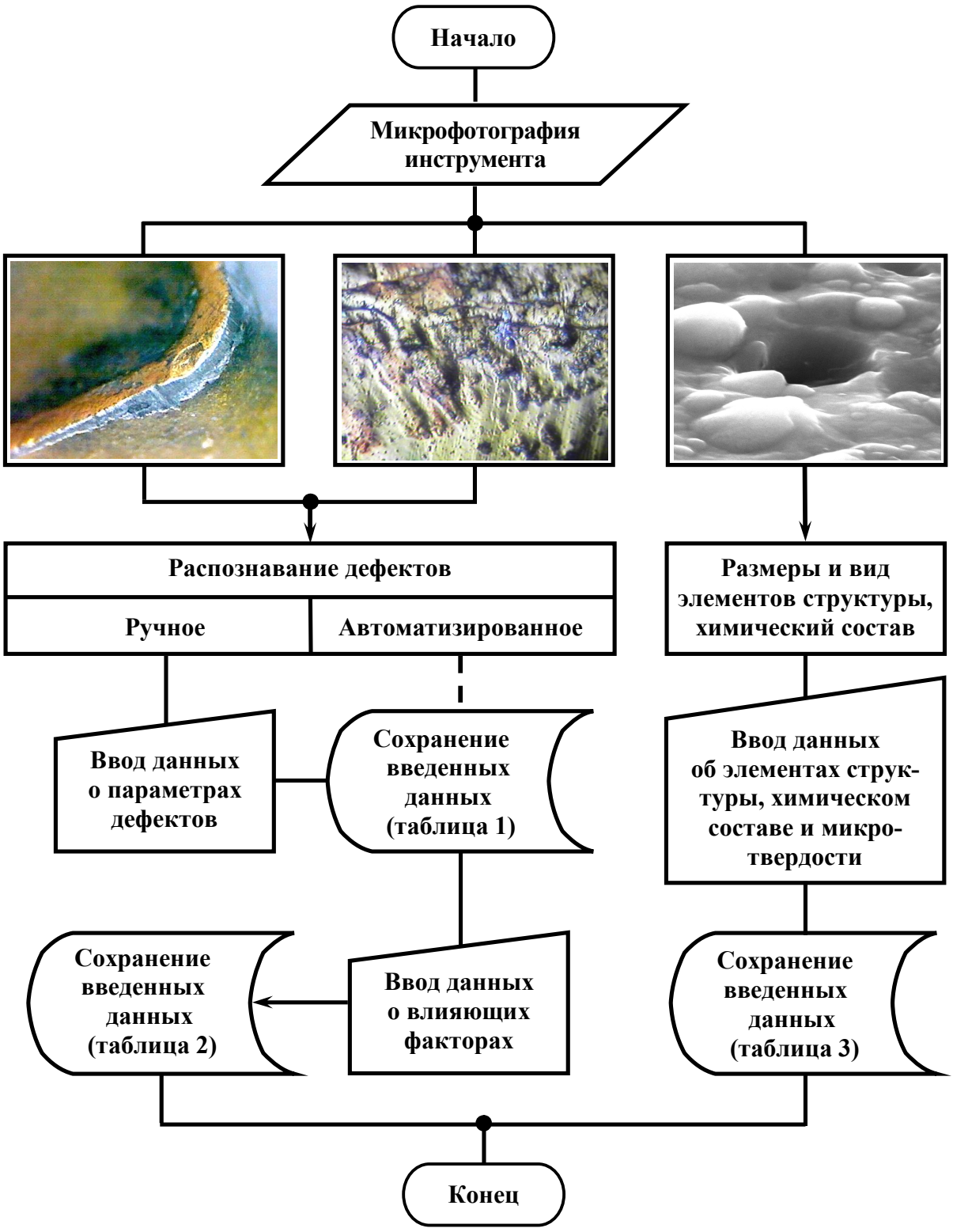


Рисунок 3.2 – Схема формирования базы данных

Для управления программами приложения БД использованы самые распространенные процедуры: с помощью меню и простого выбора. Каждая программа оказывает определенные услуги на основе функциональных запросов со стороны

других программ. Выполнение услуг осуществляется в рамках следующих состояний: пассивная, программа, работающая программа, приостановленная программа, вмешательство оператора.

Независимо от способа анализа микрофотографий рабочих поверхностей каждого следующего прошедшего испытания инструмента, формируется очередная строка таблицы дефектов, увеличивая число ее строк на 1. После этого реализуется переход к ручному формированию строк таблиц баз технологических данных и данных по физико-механическим параметрам и химическому составу инструмента. В случае отсутствия каких-либо данных соответствующие ячейки таблиц заполняются нулями. Общая схема формирования БД показана на рисунке 3.2.

Рассмотренная структура БД наиболее полно отражает требования, предъявляемые содержанием решаемых при автоматизированном оценивании качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента задач, и удобна для статистической обработки, поскольку любой ее столбец представляет собой выборку из генеральной совокупности значений определенного параметра или фактора.

Разработанная БД позволяет реализовать вероятностный подход к оцениванию качества процесса эксплуатации модифицированного режущего инструмента с учетом всего спектра его условий.

3.4. Работа с базой данных

Работа с базой данных построена таким образом, чтобы раскрыть физические механизмы, связанные с повышением эксплуатационной надежности модифицированного инструмента, и установить основные закономерности этого повышения.

3.4.1. Анализ диаграмм

Анализ диаграмм выполняется с целью оценки однородности данных, поскольку и параметры дефектов, и физико-механические свойства модифицированного инструмента, и технологические факторы, варьируясь в определенных

пределах, имеют отличия не только на количественном, но в ряде случаев и на качественном уровне. Существуют различные методы оценки однородности, однако с учетом простоты и лучшей интерпретируемости получаемых результатов, а также возможности графического отображения полученных результатов в качестве инструмента анализа был принят метод, который в разведочном анализе данных называется «ящик с усами» [113].

Определяются медиана, нижняя и верхняя квартили, а также межквартильный размах упорядоченных по возрастанию значений анализируемых данных. Нижняя квартиль (C_1) – это медиана от первого значения до медианы всего ряда включительно, верхняя квартиль (C_2) – это медиана от медианы всего ряда до максимального значения включительно. Расстояние от нижней квартили до верхней равно межквартильному размаху (ΔC).

Далее определяются следующие величины:

1. Межквартильный размах $\Delta C = C_2 - C_1$.

2. Шаг $\Delta C^* = 1{,}5\Delta C$.

3. Внутренние барьеры: $\delta_1 = C_1 - \Delta C^*$; $\delta_2 = C_2 + \Delta C^*$.

4. Наружные барьеры: $Б_1 = C_1 - 2\Delta C^*$; $Б_2 = C_2 + 2\Delta C^*$.

Если значения данных выходят за границы наружных барьеров, то они называются неправдоподобными или отскакивающими. Значения между внутренними и внешними барьерами называются внешними. Значения, находящиеся внутри ближе других к внутренним барьерам, называются примыкающими. С учетом изложенного ранее эти значения и будут определять инструмент, свойства или параметры которого значимо отличают его от остальных.

Графически результаты расчетов представляются в виде диаграммы, которая и называется «ящик с усами». Для ее построения вычерчивается прямоугольник («ящик»), торцы которого соответствуют нижней (левый) и верхней (правый) квартилям. Внутри ящика параллельно торцам проводится поперечная линия, положение которой соответствует медиане. Затем рисуются «усы» – прямые линии от каждого торца до крайних значений, которые равны минимальному и максимальному значениям микротвердости, если они находятся внутри внутренних

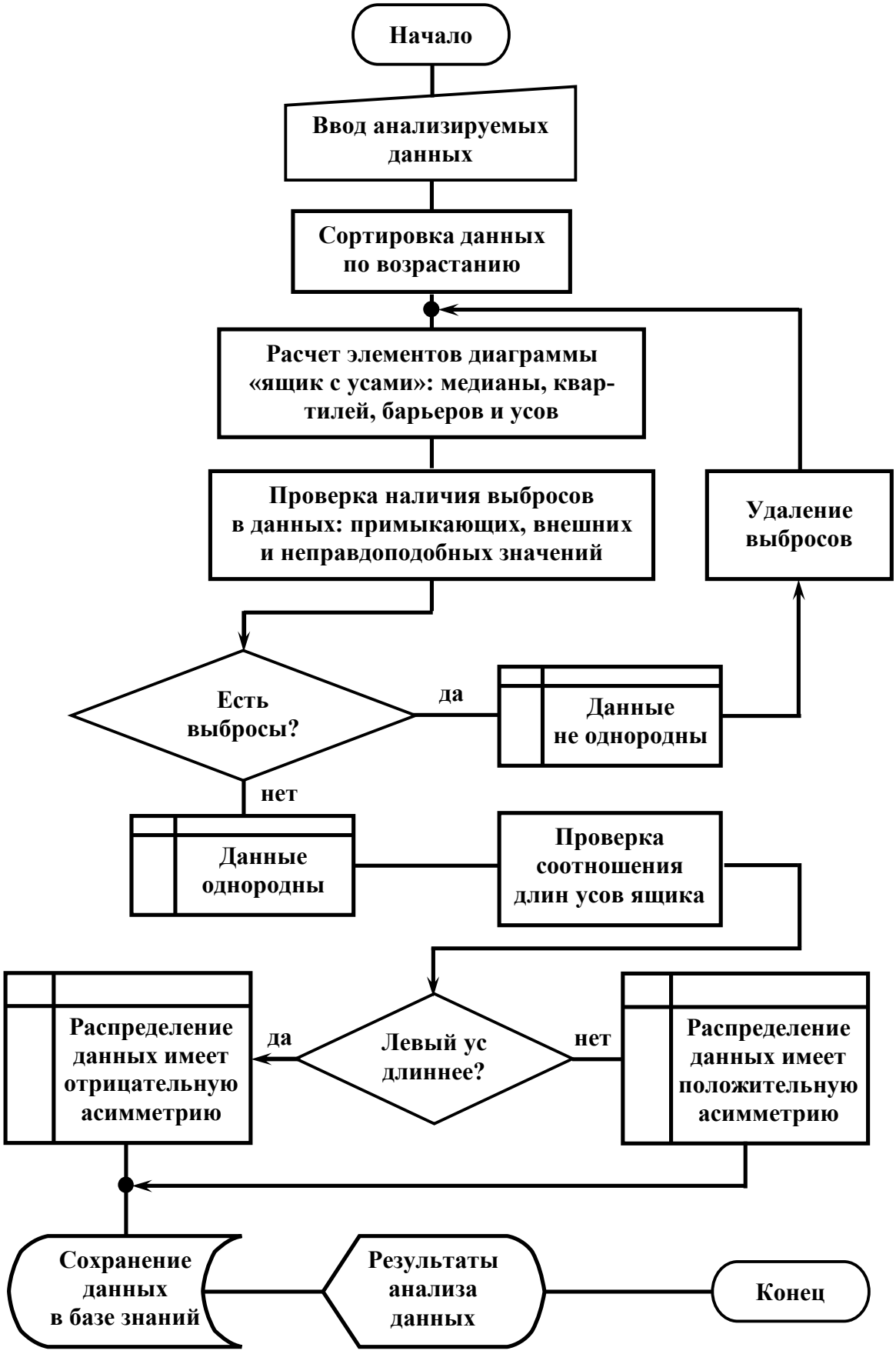


Рисунок 3.3 – Алгоритм анализа диаграммы

барьеров. Примыкающие, внешние и неправдоподобные значения изображаются отдельными точками. В результате построения этой диаграммы можно получить ясную картину числовой сводки данных.

Представленные материалы определили структуру алгоритма анализа диаграмм на основе метода «ящик с усами» (рисунок 3.3), с помощью которого может быть проанализирована не только однородность данных, но и получена информация о некоторых качественных характеристиках их распределения, в частности, о направлении и степени его асимметрии.

3.4.2. Идентификация закона распределения данных

Для идентификации распределения по статистическим данным об анализируемом свойстве модифицированного инструмента x строится эмпирическая кривая его распределения в виде гистограммы. Для этого [166]:

– определяется размах варьирования или широта распределения D как разность между наибольшим x_{max} и наименьшим x_{min} значениями x;

– значения x_i разбиваются на k интервалов, и определяется цена одного интервала c;

– производится подсчет частот a_j попадания значений случайной величины x в каждый интервал.

После этого последовательно определяются оценки параметров альтернативных теоретических распределений (нормального, логарифмически нормального, бета, гамма, Вейбулла, максимальных значений типа I, минимальных значений типа I), наиболее часто используемых для решения разнообразных практических задач, и по значениям плотностей их вероятностей $f_j(x_{c,i})$ производится вычисление частот $a_j(x_{c,i})$ для середин x_c каждого из k интервалов, т.е.

$$a_j(x_{c,\,i}) = f_i(x_{c,\,i}) \times c \times n,\ \ i = 1,\ \ldots,\ k\ . \qquad (3.1)$$

Для бета-распределения значения x_{ci} и c предварительно преобразуются по выражению $x'_{ci} = \dfrac{(x_{ci} - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})}$ и $x'_{ci} = \dfrac{(c - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})}$.

После вычисления частот выполняется собственно процедура идентификации распределения. С этой целью для каждого распределения, включая эмпирическое, вычисляется значение количества информации I_t, характеризующее степень снятия неопределенности с массива данных x_i [167]:

$$I_t(x) = -n\sum_{i=1}^{k} p(x_i) \times \log\ p(x_i)\ , \qquad (3.2)$$

где $p(x_i)$ – вероятности появления любого из k интервалов при снятии любого из n отсчетов при условии, что одни и те же уровни могут появляться неоднократно, т.е. $a(x_i)$ раз:

$$p(x_i) \approx \frac{a(x_i)}{n},\ i = 1, ..., k\ . \qquad (3.3)$$

Поскольку все $p(x_i) \neq 0$, функция I_t всегда определена. В тех же случаях, когда необходимо включить в рассмотрение значения $p(x_i) = 0$, принимается, что соответствующее произведение $p(x_i)\times\log p(x_i) = 0$.

Затем для каждого распределения вычисляется показатель, называемый коэффициентом избыточности

$$k_{t,\,j} = \frac{I_t(x) - I_{t,\,j}(x)}{I_t(x)}\ , \qquad (3.4)$$

где $I_t(x)$ – количество информации эмпирического распределения являющееся максимальным в силу того, максимальным количеством информации обладает сама выборка x, $I_{t,\,j}(x)$ – количество информации заданного теоретического распределения. Затем в сформированном массиве $k_{t,j}$ ищется минимальное значение $k_{\min}$, которое будет идентифицировать распределение, имеющее наибольшую “плотность информации”, т.е. количество информации, приходящееся на один отсчет и потому снимающее неопределенность о содержащихся в выборке данных в наибольшей степени. При этом возможны следующие ситуации:

1. Коэффициент $k_{\min} < 0$. Это означает, что найденное распределение не может рассматриваться в качестве модели анализируемых данных x, поскольку обладает большим количеством информации, чем сама выборка; связано это с тем, что анализируемые данные не являются однородными.

2. Коэффициент $k_{\min} > 0{,}05$. Это означает, что среди имеющихся распределений также нет того, которое может рассматриваться в качестве модели выборки, поскольку найденное распределение не снимает неопределенности с данных x с принятой достоверностью (95%).

3. Коэффициент $k_{\min} \le 0{,}05$. Это означает, что найденное распределение и есть модель анализируемой выборки, поскольку снимает неопределенность с данных x с принятой достоверностью 95%.

Алгоритм идентификации представлен на рисунке 3.4 [168].

3.4.3. Вычисление вероятностных характеристик

Если распределение данных идентифицировано, то оно используется для вычисления вероятностных характеристик анализируемых свойств модифицированного инструмента. Алгоритм вычисления представлен на рисунке 3.5 [169].

Средние значения $x_{ср}$ вычисляются по известным формулам через оценки параметров распределения [116]:

– для нормального $x_{ср} = \mu$;

– для логарифмически нормального $x_{ср} = \exp(\mu + \sigma^2/2)$;

– для гамма $x_{ср} = \eta/\lambda$;

– для бета $x_{ср} = \gamma/(\eta + \gamma)$;

– для Вейбулла $x_{ср} = \sigma \times \Gamma(1/\eta + 1)$, где Γ – гамма-функция;

– для максимальных значений типа I $x_{ср} = \mu + 0{,}577\sigma$;

– для минимальных значений типа I $x_{ср} = \mu - 0{,}577\sigma$.

Медиана, мода и квантили определяются в процессе численного интегрирования функции плотности, поскольку интегральная функция у многих распределений аналитически не вычисляется. С этой целью по соответствующей формуле плотности с шагом Δx, начиная с $x_{\min}$, $\ln(x_{\min})$ для логарифмически-нормального или $x_i' = \dfrac{(x_{\min} - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min})}$ для бета, вычисляются $f(x_i)$, и для определения медианы и квантилей производится их суммирование, т.е.

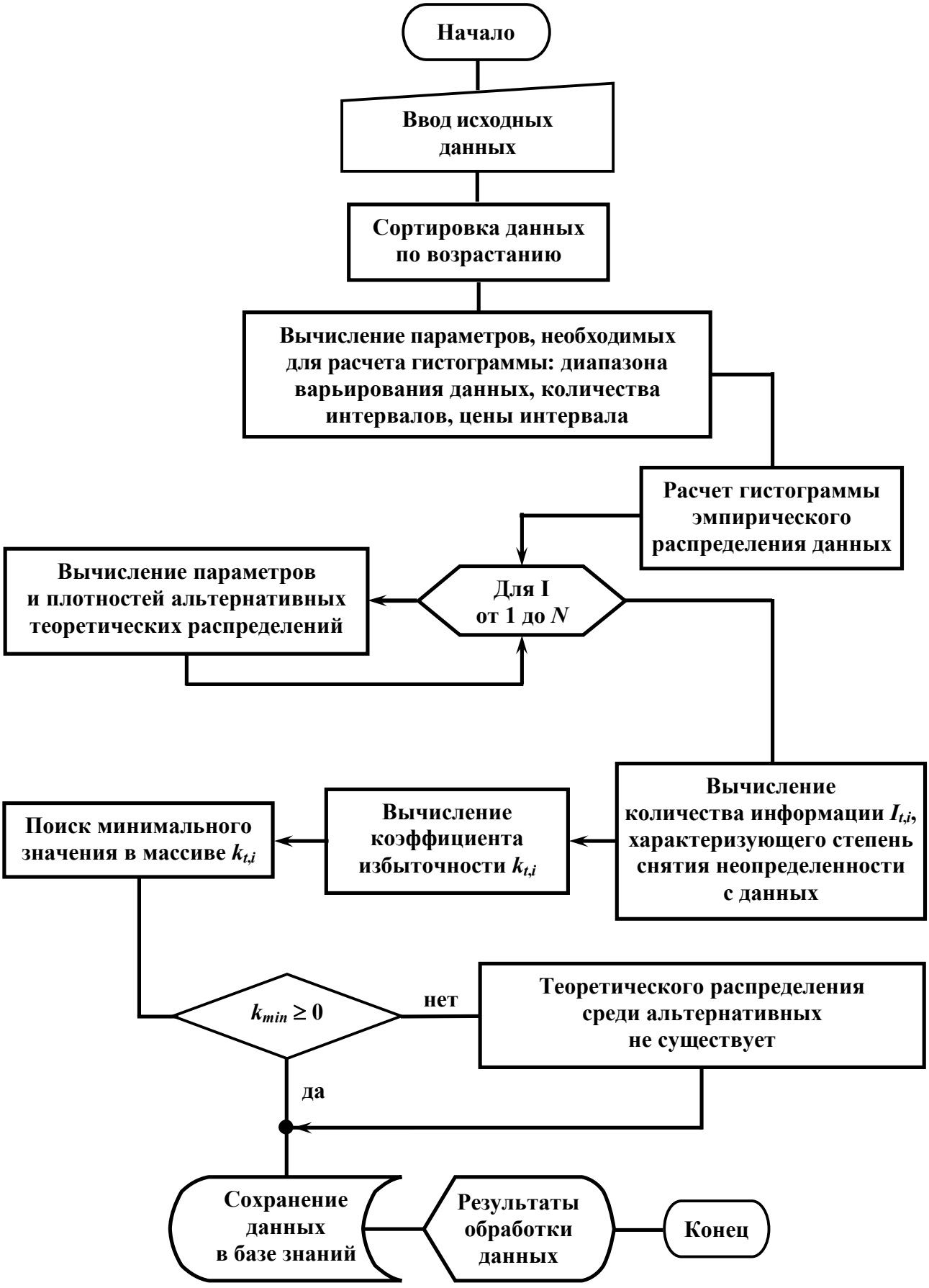


Рисунок 3.4 – Алгоритм идентификации закона распределения

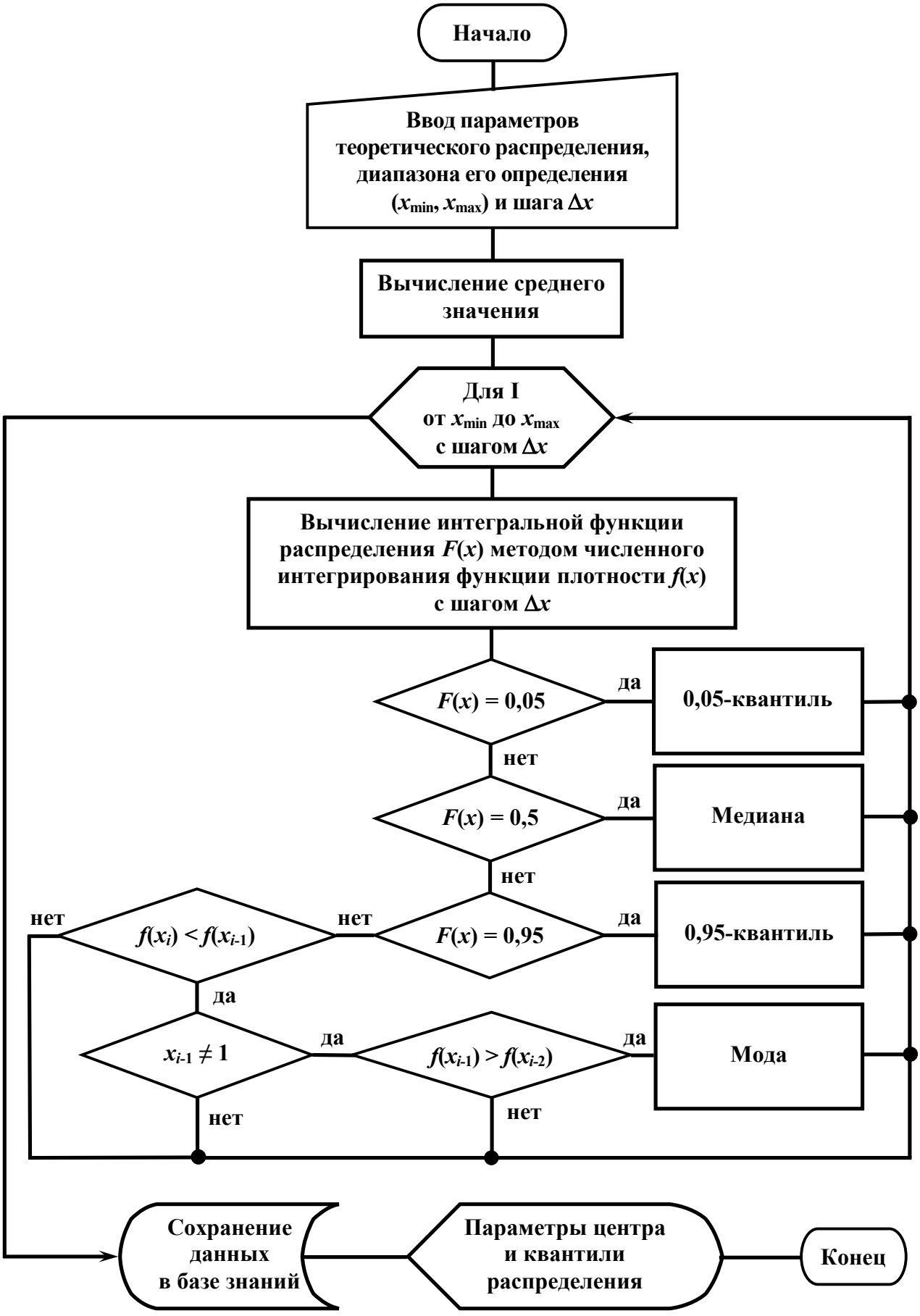


Рисунок 3.5 – Алгоритм вычисления вероятностных характеристик

$$F(x) = \Sigma f(x_i)\Delta x \tag{3.5}$$

до тех пор, пока текущая сумма не станет равной вначале 0,05 (соответствующее значение x будет 0,05-м квантилем), затем 0,5 (соответствующее значение x будет медианой) и, наконец, 0,95 (соответствующее значение x будет 0,95-м квантилем).

В процессе численного интегрирования производится также сравнение трех последних значений $f(x_i)$ до тех пор, пока не выполнятся условия:

$$\begin{cases} f(x_i) < f(x_{i-1}); \\ x_{i-1} \neq 1; \\ f(x_{i-2}) < f(x_{i-1}). \end{cases} \tag{3.6}$$

Это связано с тем, что некоторые распределения (бета, гамма, Вейбулла, логарифмически нормального) при определенных условиях не имеют максимально вероятного значения. Значение $x_{i\text{-}1}$, соответствующее условиям (3.6), будет модой.

Для бета-распределения все найденные x преобразуются к абсолютным значениям как $x = x_{\min} + x \times (x_{\max} - x_{\min})$, для логарифмически-нормального распределения как $\exp(x)$.

Шаг интегрирования Δx принимается равным 0,001.

3.5. Анализ и принятие решений по результатам оценивания

В алгоритмическом аспекте процедура принятия решений по результатам оценивания состоит из двух этапов:

– определение целесообразности (или возможности) и направлений дальнейшего продолжения собственно оценивания;

– определение степени значимости полученного результата оценивания.

Выполнение первого этапа связано со следующими обстоятельствами.

1. По результатам анализа диаграммы зафиксировано наличие неоднородности в данных.

2. По результатам идентификации не найдено распределение, аппроксимирующее анализируемые данные.

3. Требуется сравнительный анализ данных и необходимо выбрать метод его проведения.

В первом случае принятие решения сводится к оценке целесообразности:

– перехода от средних к абсолютным значениям,

– исключения значений, нарушающих однородность данных,

и повторению процедуры построения и анализа диаграммы. Это необходимо, если построение диаграмм позволит не только сравнить данные на уровне качественных характеристик их распределений, но и объяснить (или подтвердить) суть процессов, приводящих к получению тех или иных результатов эксплуатации модифицированного инструмента.

Во втором случае принятие решения сводится к пересчету гистограммы эмпирического распределения последовательным уменьшением числа интервалов группирования данных до тех пор, пока либо не будет выполнено условие 3 из п.3.4.2, либо число интервалов не станет меньше их минимального предельно допустимого числа, равного в данном случае 3. Кроме этого в некоторых ситуациях является целесообразным повторение процедуры идентификации с предварительным исключением найденного распределения, если не выполняются некоторые дополнительные, указывающие на него условия. Это касается распределений, обладающих конкретными статистическими свойствами (экспоненциальное и нормальное), которые отображаются значением коэффициента вариации: у экспоненциального распределения он равен 1, у нормального распределения не должен превышать 0,33. Кроме этого, неограниченность слева нормального распределения и распределений экстремальных значений может привести к ситуации попадания значений описываемых ими случайных величин в отрицательную область, что не имеет физического смысла, т.к. все содержащиеся в базе данные являются величинами строго положительными.

Наиболее важным является третий случай, поскольку здесь принимаемое решение связано, по сути, с возможностью получения исходных данных для ответа на вопрос о причинах, лежащих в основе получения того или иного резуль-

тата. Так, если необходимо сравнить между собой несколько частных совокупностей одной и той же физической величины с целью ответа на вопрос об их принадлежности к одному и тому же непрерывному распределению с центром в одной точке, то можно воспользоваться процедурой однофакторного дисперсионного анализа, основанного на вычислении статистики Крускала-Уоллиса. Результат сравнения позволит оценить воспроизводимость процессов модификации или эксплуатации модифицированного инструмента, т.е., по сути, стабильность условий, в которых они осуществлялись. Если далее необходимо оценить влияние на стабильность тех или иных известных факторов, то можно воспользоваться процедурой двухфакторного дисперсионного анализа Фридмана. Наконец, для определения влияющих факторов целесообразно воспользоваться процедурой рангового корреляционного анализа.

Анализ представленного материала показывает, что все три случая в той или иной степени взаимосвязаны, поэтому принимаемые в каждом из них решения могут быть объединены в единую процедуру. Реализующий ее алгоритм представлен на рисунке 3.6.

Основной целью выполнения второго этапа является ответ на вопрос о целесообразности включения полученного результата в базу знаний системы. Значимость результата оценивается не только на количественном, но и на качественном уровне. Это связано с тем, что в ряде случаев, например при идентификации распределения, большее значение имеет его вид, поскольку за ним стоит определенное содержательное наполнение, отображающее физический механизм, который формирует анализируемые данные.

3.6. Система имитационного моделирования

Система имитационного моделирования завершает разработку программно-математического обеспечения для оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента. Система организована как модульная и обеспечивает не только получение информации о формировании состояния модифицированного инструмента, но и ее анализ (рисунок 3.7). С этой целью в ней реализован

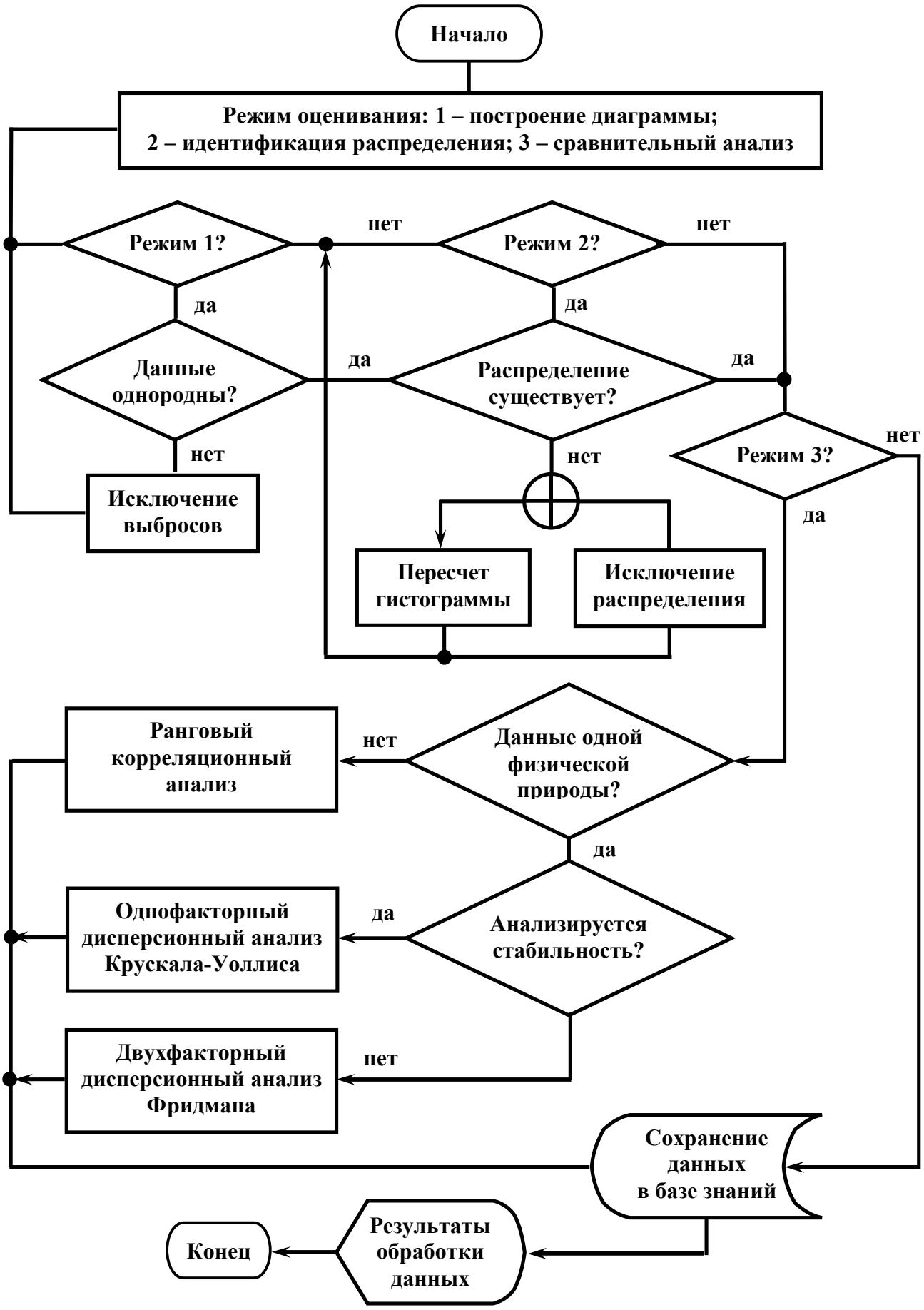


Рисунок 3.6 – Алгоритм принятия решений по результатам оценивания

Рисунок 3.7 – Состав системы имитационного моделирования

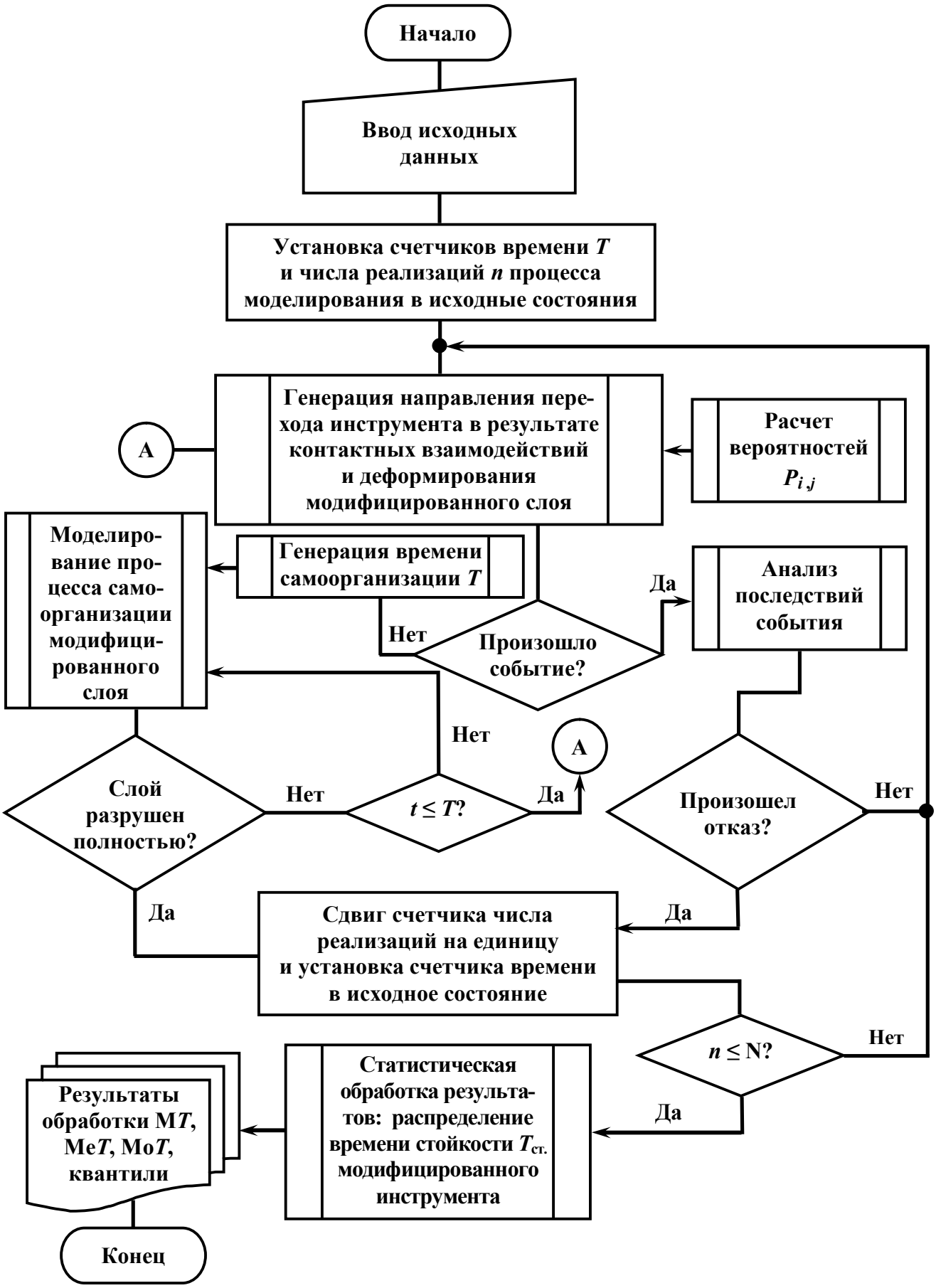


Рисунок 3.8 – Укрупненный алгоритм моделирования процесса эксплуатации модифицированного режущего инструмента

не только разработанный в главе 2 способ оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента (модель, обслуживающие ее модули, базы и генератор псевдослучайных чисел) [169], но и представленные в п.3.4-3.6 алгоритмы обработки полученной по результатам моделирования статистической информации.

Укрупненный алгоритм функционирования системы, основанный на моделировании процессов и событий, представлен на рисунке 3.8. Необходимые для работы входные (исходные) данные либо задаются пользователем (параметры технологического режима, вид и зеренная структура обрабатываемого материала, дефекты и время работы инструмента, количество реализаций процедуры моделирования), либо считываются из базы данных модели (параметры дефектов и факторов, параметры степени влияния факторов), размещенной на внешнем носителе.

Выходные данные (результаты моделирования) о траектории изменения состояния инструмента и времени его стойкости оформляются в виде файлов и записываются на внешний носитель с целью последующей статистической обработки.

Основным блоком системы является блок анализа событий, связанных с возникновением новых или развитием уже возникших дефектов. Для проведения анализа осуществляется запуск соответствующих подпрограмм и по результатам анализа событий с использованием базы данных модели производится пересчет ее параметров.

После выполнения подпрограмм обработки событий осуществляется продвижение модельного времени: определяется продолжительность очередного цикла самоорганизации модифицированного слоя.

Процесс имитации продолжается до наступления событий, связанных с попадением инструмента в поглощающие состояния модели, что означает возникновение либо параметрического (при полном сходе модифицированного слоя), либо функционального (при появлении и/или развитии соответствующих макродефектов) отказа.

3.7. Выводы

Материалы, полученные при разработке программно-математического обеспечения для оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного режущего инструмента, позволяют сделать следующие выводы.

1. Программно-математическое обеспечение для оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента целесообразно представлять единым комплексом программ, предназначенных для последовательного анализа информации, содержащейся в данных о результатах этого процесса.

2. Разработку программно-математического обеспечения целесообразно осуществлять с использованием языка программирования C#, поскольку он, являясь объектно-ориентированным языком программирования, обеспечивает поддержку компонентно-ориентированного программирования, а также совместимость и возможности дальнейшего развития программ и библиотек.

3. Формировать базу для хранения данных о результатах модификации и эксплуатации модифицированного инструмента необходимо таким образом, чтобы она обеспечивала реализацию вероятностного подхода к оцениванию, учитывающего весь спектр условий, в которых происходит формирование данных.

4. Основными условиями обеспечения результативности оценивания являются:

– использование в качестве инструментов оценивания как традиционных, так и специальных методов математической статистики, в частности, методов разведочного анализа и непараметрических методов;

– принятие эффективных решений в процессе и по результатам его проведения.

Выполнение этих условий позволит:

– раскрыть физические механизмы, лежащие в основе формирования информации о процессах модификации и эксплуатации модифицированного инструмента;

– обеспечить достоверность (на уровне как конкретных, так и обобщенных сведений) и релевантность (в аспекте степени практической применимости) полученной информации, т.е. вывести ее на уровень знаний.

5. Структуру системы имитационного моделирования целесообразно организовывать таким образом, чтобы она позволяла не только получать информацию, но и выполнять ее анализ, поскольку это даст возможность производить знания о модифицированном металлорежущем инструменте и сделать систему максимально эффективной, а ее создание – оправданным со всех точек зрения.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ОЦЕНИВАНИЯ

Экспериментальные исследования и практическая реализация работы были связаны с оцениванием качества процесса эксплуатации инструмента различного целевого назначения. Материалы оценивания, включая моделирование информации о состоянии рабочей части позволили не только подтвердить достоверность основных положений 2 главы, но и получить данные, необходимые для создания базы знаний, на основе которой была решена задача поиска условий повышения надежности процесса эксплуатации модифицированного инструмента. Далее представлены все полученные при этом результаты.

4.1. Компьютерная система оценивания

Система оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента была создана на основе выводов 2 (см. п.2.4 и рисунок 2.23) и результатов 3 главы работы.

Аппаратное обеспечение системы (рисунок 4.1) включает приборы для получения изображений рабочей части: цифровые микроскопы с увеличением 700^x и 100^x, микротвердомер ПМТ-3, оптическая система которого имеет увеличение 500^x, видеонасадка для оцифровки изображения и компьютер для хранения и обработки полученной информации. При необходимости аппаратную часть можно представить одним микроскопом, имеющим несколько диапазонов увеличения.

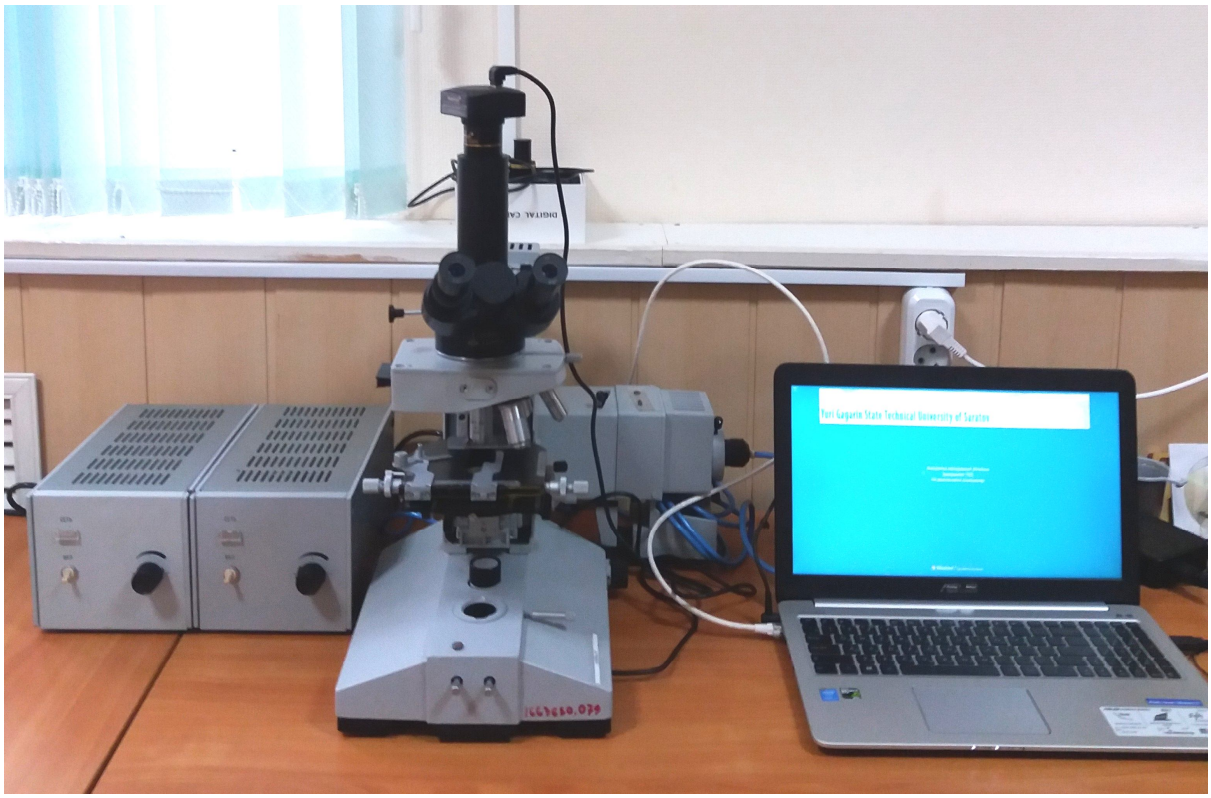
Программное обеспечение системы реализует следующие основные требования к ее содержательной части [170]:

– визуализация данных (в виде графиков и/или таблиц);

– возможность корректировки данных;

– обеспечение условий для обновления программного обеспечения поддержки и обработки данных;

– обработка данных.



а

б **в**

Рис. 4.1. Аппаратная часть системы: а – микроскоп Биолам – И; б – микроскоп Carton SPZT 50; в – микротвердомер ПМТ-3

Структура программного обеспечения представляет собой разметку области исходного кода с целью четкого определения основных блоков программ и их структуры [171]. Исходный код, написанный на языке C#, компилируется в промежуточный язык (IL) в соответствии со спецификацией CLI. Код IL и ресурсы хранятся на диске в исполняемом файле с расширением EXE или DLL. Используются обширная библиотека, разнообразные функции для действий, включающие ввод и вывод файлов для управления строками, разбивки XML, и элементы управления Windows Forms. В программе на языке C# библиотека классов .NET Framework интенсивно используется для «устройства» кода. Программа состоит из нескольких файлов. Каждый файл содержит несколько пространственных имен. Пространство имен включает такие элементы, как классы, структуры и интерфейсы. Классы являются основными конструкциями системы общих типов CTS в платформе .NET Framework. Каждый класс является структурой данных, инкапсулирующей набор данных и поведение.

Интерфейс системы разрабатывался на основе использования самых распространенных методов: меню и простого выбора [172]. Это облегчает процесс освоения и работы с системой. Реализация интерфейса (рисунок 4.2) представляет собой простую четырехуровневую иерархическую сеть (дерево) [171, 171]. Каждый узел дерева (меню) соединяется только с одним меню верхнего уровня и с несколькими меню нижнего уровня.

Каждая программа меню воспроизводит на мониторе системы кадр экранного диалога, содержащий список вариантов того или иного выбора (включая выход из программы), и процедуры ввода данных, с помощью которых пользователь может выбрать один из этих вариантов. После выбора варианта на экране отобразится следующее меню (т.е. создается возможность очередного выбора) или начнется выполнение определенных операций с последующим возвращением управления к программному меню, осуществляющему выбор.

При такой структуре каждый кадр экранного диалога предоставляет соответствующие возможности выбора различных режимов. Главное меню (ГМ) позволяет открывать меню 1 уровня: соответствующие разделы руководства пользователя (1, 2), а также запускать режимы получения (3) и анализа (4) изображе-

ний различных поверхностей модифицированной рабочей части инструмента, формирования баз данных (5) и знаний (6), анализа качества процесса эксплуатации инструмента (7).

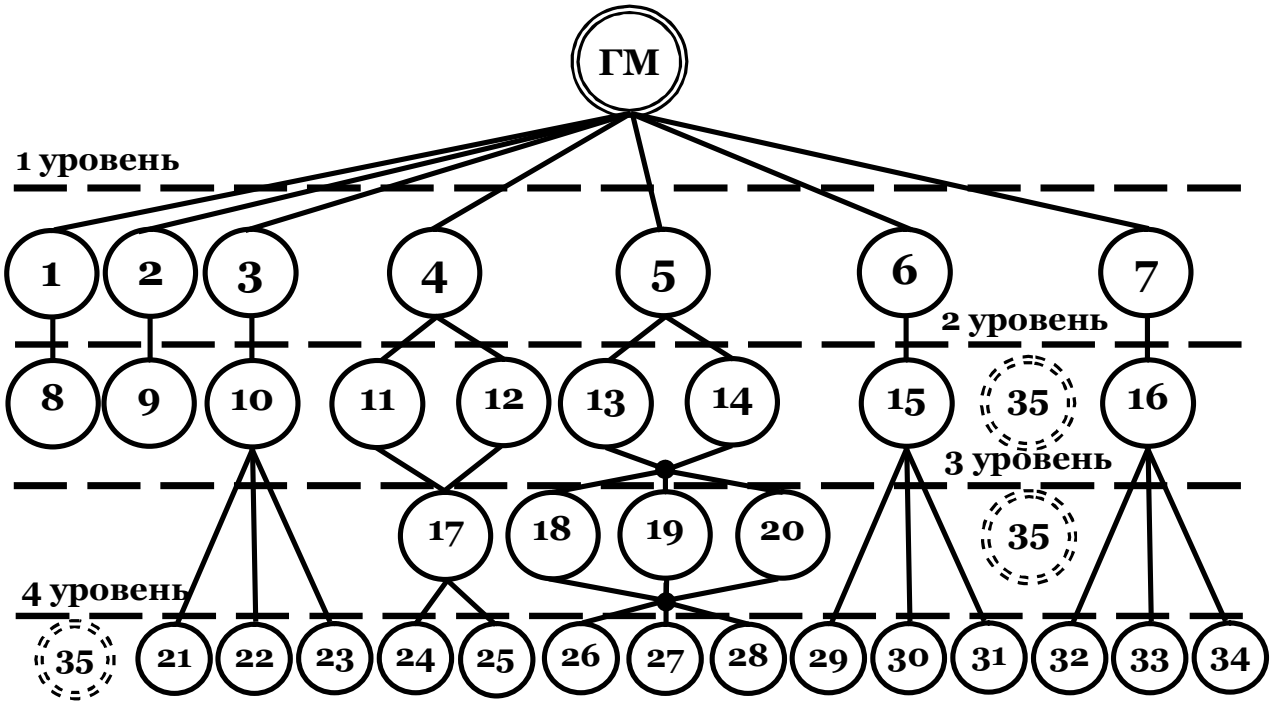


Рисунок 4.2 – Структура интерфейса системы

На 2 и 3 уровнях реализуются информационные и операционные возможности системы, связанные с обращением к руководству пользователя (8, 9), передачей изображения рабочей части инструмента с микроскопа или ручным вводом (10), его автоматизированным (11) или ручным (12) анализом, а также редактированием (13) и обработкой полученных по результатам анализа данных (14-16).

Получаемые изображения структурируются по видам инструмента и рабочих поверхностей и анализируются с целью распознавания и идентификации имеющихся на них дефектов в соответствии с полученной классификацией (см. таблицу 2.4). В ручном режиме для этого используются цифровой микроскоп, а также оптическая система микротвердомера ПМТ-3, в автоматизированном режиме – специально разрабатываемый программный продукт Image Engineer Tools. Его интерфейс аналогичен интерфейсу Adobe Photoshop, но не содержит инструментов для добавления эф-

фектов фотографии, а позволяет добавлять инструменты для выполнения инженерных расчетов, связанных с автоматической классификацией и количественным оцениванием выявленных дефектов, и совершенствовать эти инструменты в направлении расширения их функциональных возможностей.

По результатам анализа изображения формируется очередная строка базы данных по дефектам, которая пересылается в нее, увеличивая число ее строк на 1. После этого реализуется переход к ручному формированию строк для баз технологических данных и данных по физико-механическим параметрам и химическому составу отснятого инструмента.

Меню 4 уровня позволяют отобразить результаты работы системы на экране монитора (21, 24, 26, 29, 32), вывести на принтер (22, 27, 30, 33) или сохранить их в базе данных и знаний (23, 25, 28, 31, 34). В качестве примера на рисунке 4.3 показано отображение фотографии передней поверхности сменной многогранной твердосплавной пластины из сплава Т15К6 с покрытием TiN, использовавшейся при точении заготовок из стали ШХ-15 на автоматическом токарном станке с ЧПУ 16К20Ф3С5 в ОАО «Саратовский подшипниковый завод».

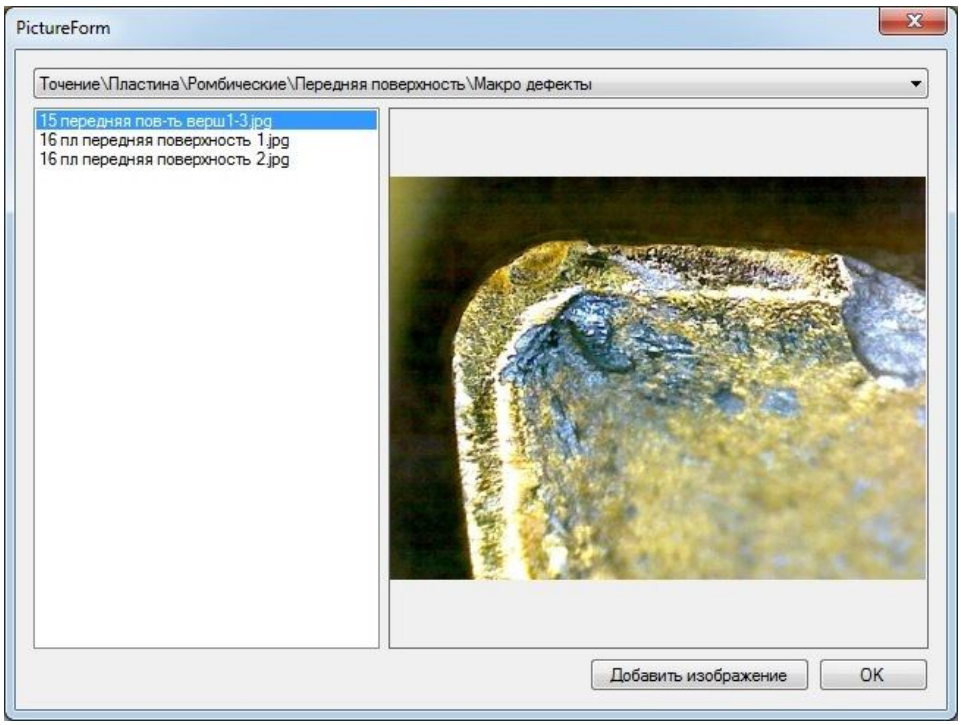
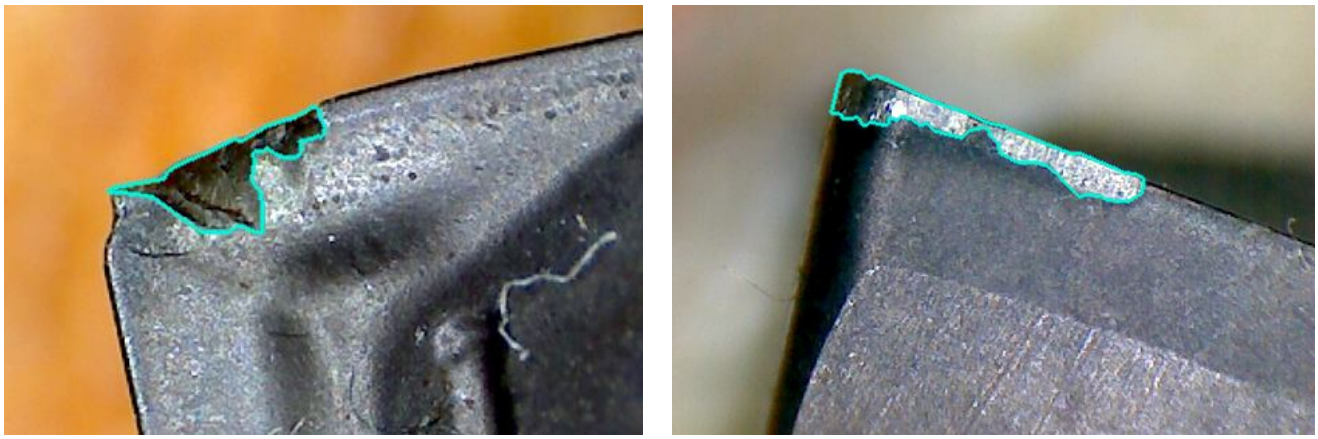


Рисунок 4.3 – Пример отображения системой рабочей части модифицированного инструмента

На рисунке 4.4 представлены примеры результатов автоматизированной обработки изображений рабочих поверхностей модифицированных сменных многогранных пластин, использовавшихся при контурном фрезеровании заготовок из стали 35ХГСЛ на многоцелевом станке DMU 80 в ОАО «Саратовский агрегатный завод».



а **б**

Рисунок 4.4 – Примеры результатов работы системы в режиме автоматизированного распознавания макродефектов рабочей части модифицированных сменных многогранных пластин из твердого сплава RX-10: а – выкрашивание на передней поверхности, б – фаска износа по задней поверхности

Поскольку управление системой содержит несколько связанных в одну сеть меню, каждое из них имеет одинаковый завершающий вариант для идентификации возврата управления из текущего меню в предыдущее. Имеются также возможности обращения к руководству пользователя в процессе выполнения операционных действий и передачи управления программе наивысшего уровня вызова (ГМ), минуя промежуточные (35).

Основные экранные формы системы, а также заявки на ее потенциальное использование представлены в приложении В.

4.2. Объекты оценивания

Объектами оценивания стали сменные многогранные пластины из вольфрамо-, титано- и титано-тантало-кобальтовых сплавов с защитными покрытиями TiN и AlTiN

и без него. Пластины прошли опытно-промышленную эксплуатацию на предприятиях различных городов России [173-176]. Результаты модификации и эксплуатации пластин были занесены в базу данных системы и легли в основу решения основной задачи диссертационного исследования.

4.3. Результаты оценивания

4.3.1. Физико-механические свойства материалов

Рассмотрим данные по исходным механическим свойствам материалов, представленные в табл. 4.1 усредненными по глубине поверхностного слоя значениями микротвердости по Виккерсу [177].

Таблица 4.1

Средние значения микротвердости материалов

№ п/п	Инструментальный материал	Средняя микротвердость, ГПа
1	Сплав СТ35м	12,3
2	Сплав Т15К6	22,82
3	Сплав Т15К6 с покрытием TiN	25,09
4	Сплав RX-10 IC30N с покрытием AlTiN	10,72
5	Сплав RX-10 IC9074 с покрытием AlTiN	13,42
6	Сплав RX-10 IC807 с покрытием AlTiN	16,59
7	Сплав RX-10 T490 с покрытием AlTiN	13,29
8	Сплав RX-10 с покрытием AlTiN	16,51
9	Сплав VH55	11,03

Диаграмма «ящик с усами», построенная по данным таблицы 4.1, представлена на рисунке 4.5, а [174]. Анализ диаграммы показывает, что, во-первых, данные содержат одно примыкающее (относящиеся к славу Т15К6) и одно внешнее (относящееся к сплаву Т15К6 с покрытием TiN) значения микротвердости, во-вторых, что на диаграмме отсутствует правый ус. Это означает, что данные являются неоднородными, а механические свойства материалов – различными. С це-

лью подтверждения достоверности этого вывода на рисунке 4.5, б представлена диаграмма «ящик с усами», построенная без учета значений микротвердости сплавов Т15К6, которая отображает однородность оставшихся данных, поскольку примыкающие и внешние значения на ней отсутствуют. Положение медианы и соотношение длин усов свидетельствуют о небольшой положительной асимметрии распределения микротвердости.

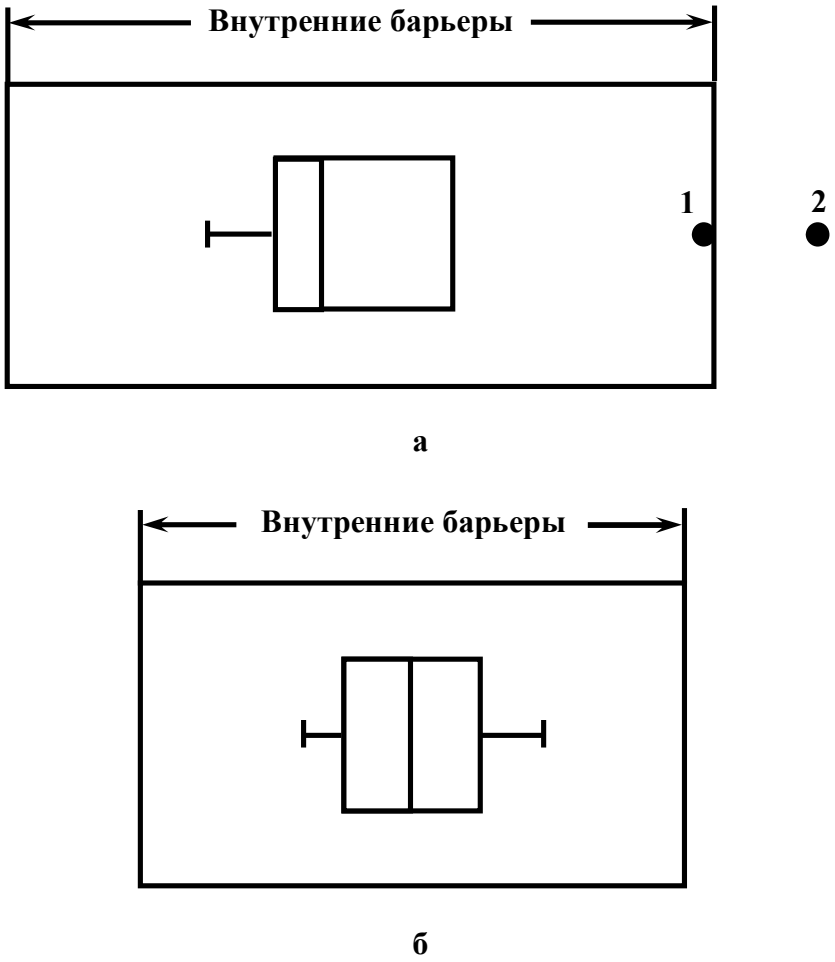


Рисунок 4.5 – Диаграммы «ящик с усами» для микротвердости материалов (а) и без учета значений микротвердости сплавов Т15К6 (б): 1, 2 – примыкающее и внешнее значения

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что различие в свойствах материалов должно по-разному влиять на показатели эксплуатационной надежности инструментов. В качестве подтверждения достоверности этого вывода на рисунке 4.6 представлены диаграммы среднего времени их стойкости, которые показывают, что, даже работая в условиях, определяемых соответствую-

щими сочетаниями параметров технологического режима как близких к оптимальным, механические свойства сплава RX-10 обеспечивают меньшую (в среднем в 1,68 раза) сопротивляемость нагрузкам при резании.

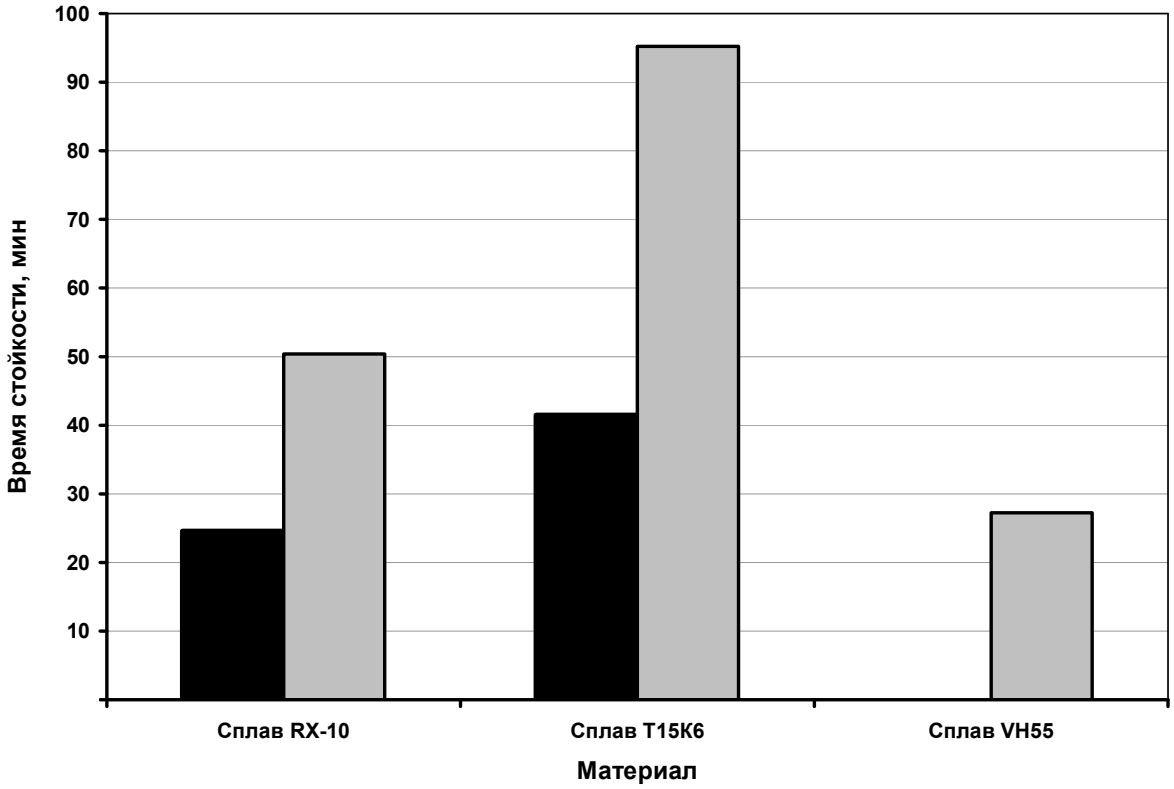


Рисунок 4.6 – Средние значения времени стойкости инструментов до (черные) и после (светлые) модификации

С целью выяснения причин, лежащих в основе получения данных результатов был выполнен анализ распределения микротвердости материалов по глубине поверхностного слоя. Результаты позволили зафиксировать принципиальное отличие, связанное с особенностями формирования поверхностного слоя в процессе изготовления инструмента. Так, у сплава RX-10 наименее твердой является та часть поверхностного слоя, которая расположена непосредственно под адсорбированной зоной и зоной окислов (рисунок 4.7). Это связано с тем, что в процессе изготовления инструмент подвергался как минимум операции абразивной обработки для формирования требуемой геометрии рабочей части изготовленного из него инструмента. В результате упругопластическое деформирование и нагрев вызвали необратимые структурные и фазовые изменения в поверхностном слое [174, 175].

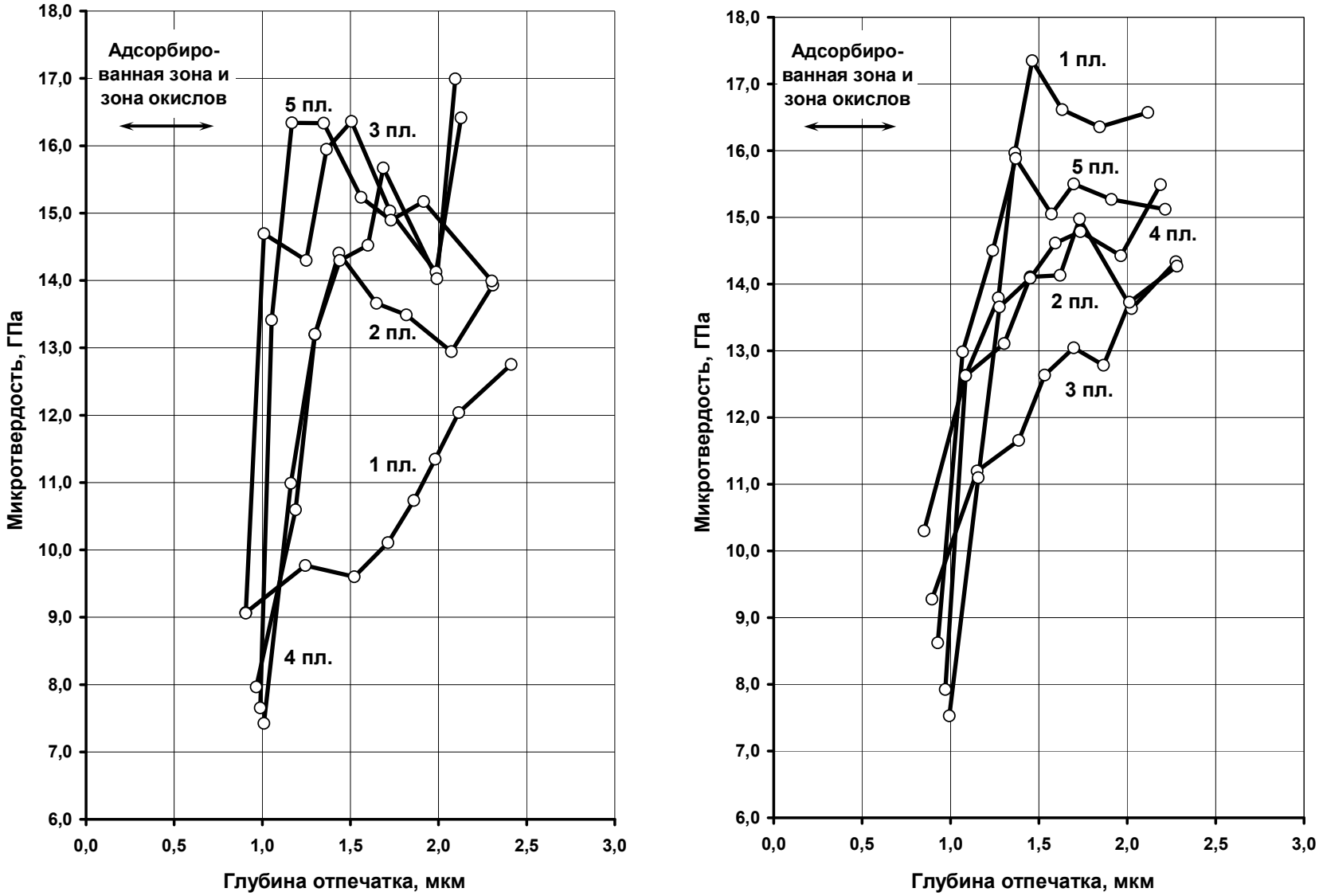


Рисунок 4.7 – Пример распределений микротвердости пластин из сплава RX-10 по глубине поверхностного слоя

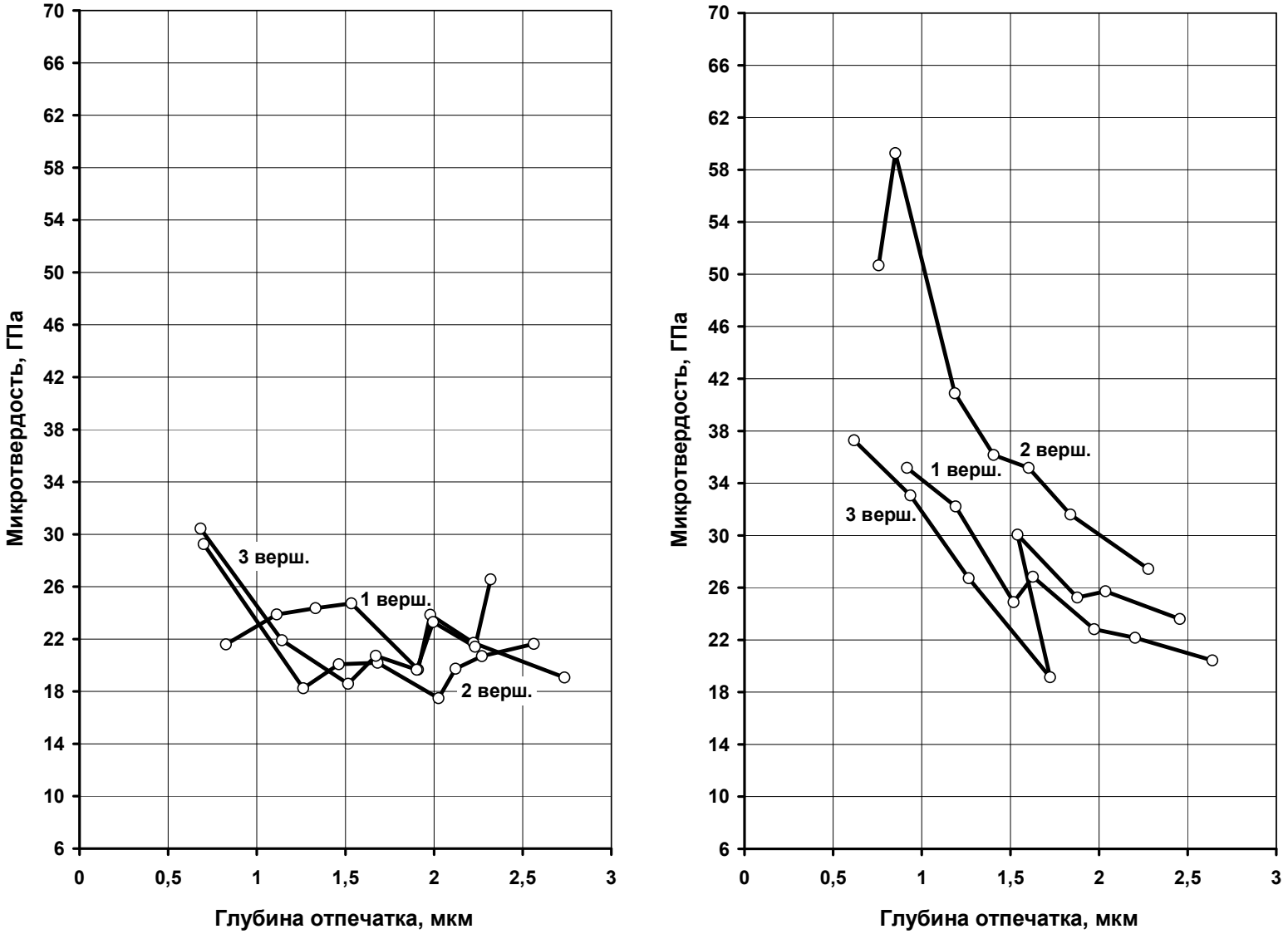


Рисунок 4.8 – Распределения микротвердости пластин из сплава Т15К6 без покрытия и с покрытием TiN по глубине поверхностного слоя

Инструмент из сплава Т15К6, изготовленный методом прессования и последующего спекания, механической и абразивной обработке не подвергался, поэтому его поверхностный слой структурных и фазовых изменений не претерпел (рисунок 4.8). В результате микротвердость данного сплава превышает микротвердость сплавов RX-10, в среднем, в 1,7 раза, а сплава VH55 – в 2,17 раза.

Изложенное означает, что различные исходные механические свойства материалов должны обусловливать и их различное изменение по результатам модификации. Однако диаграмма «ящик с усами» показала (рисунок 4.9), что изменения приводят к выравниванию свойств. Это связано с тем, что изменения проявились не только на количественном, но и на качественном уровнях вследствие различного по характеру уплотнения структуры материалов (рисунок 4.10). У сплава Т15К6 оно в максимальной степени произошло на глубине от 1,0 до 1,5 мкм, у сплавов RX-10 и VH55, в основном, на глубине до 1,0 мкм. Во втором случае это приводило к выравниванию (на уровне тенденции) распределения микротвердости (рисунок 4.7) относительно оси абсцисс (рисунок 4.11).

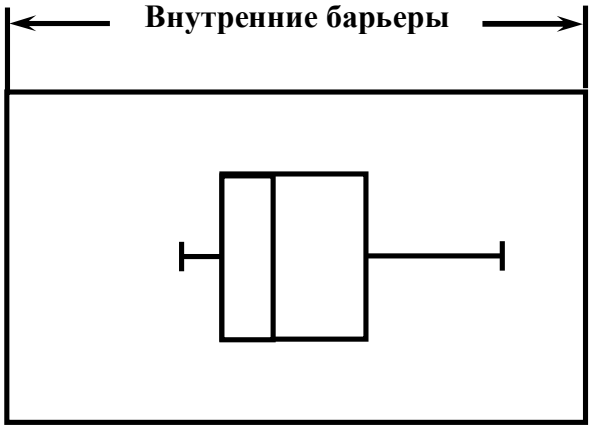


Рисунок 4.9 – Диаграммы «ящик с усами» микротвердости материалов после модификации

Идентификация распределений микротвердости и локальной плотности показала, что они во всех случаях являются логарифмически-нормальными (рисунок 4.12).

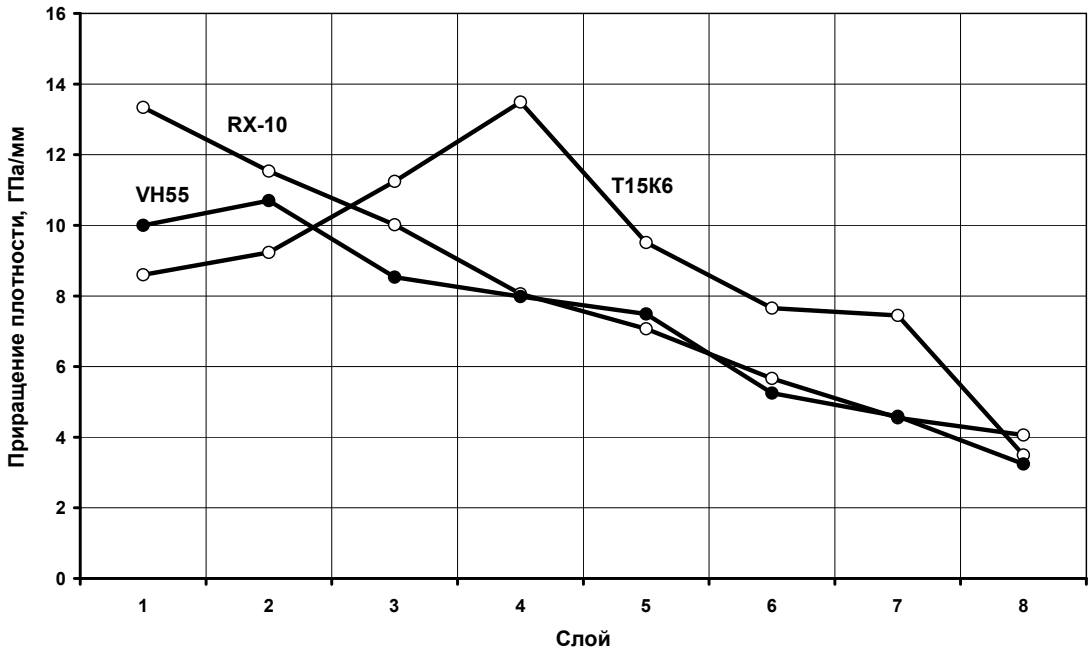


Рисунок 4.10 – Вариации приращений локальной плотности материалов

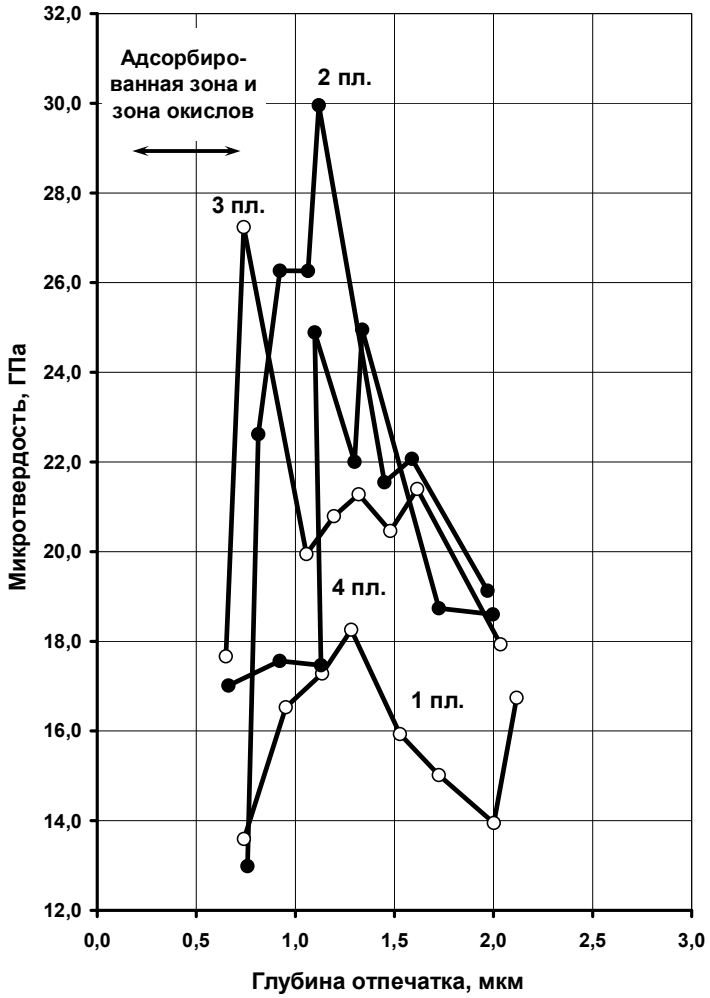
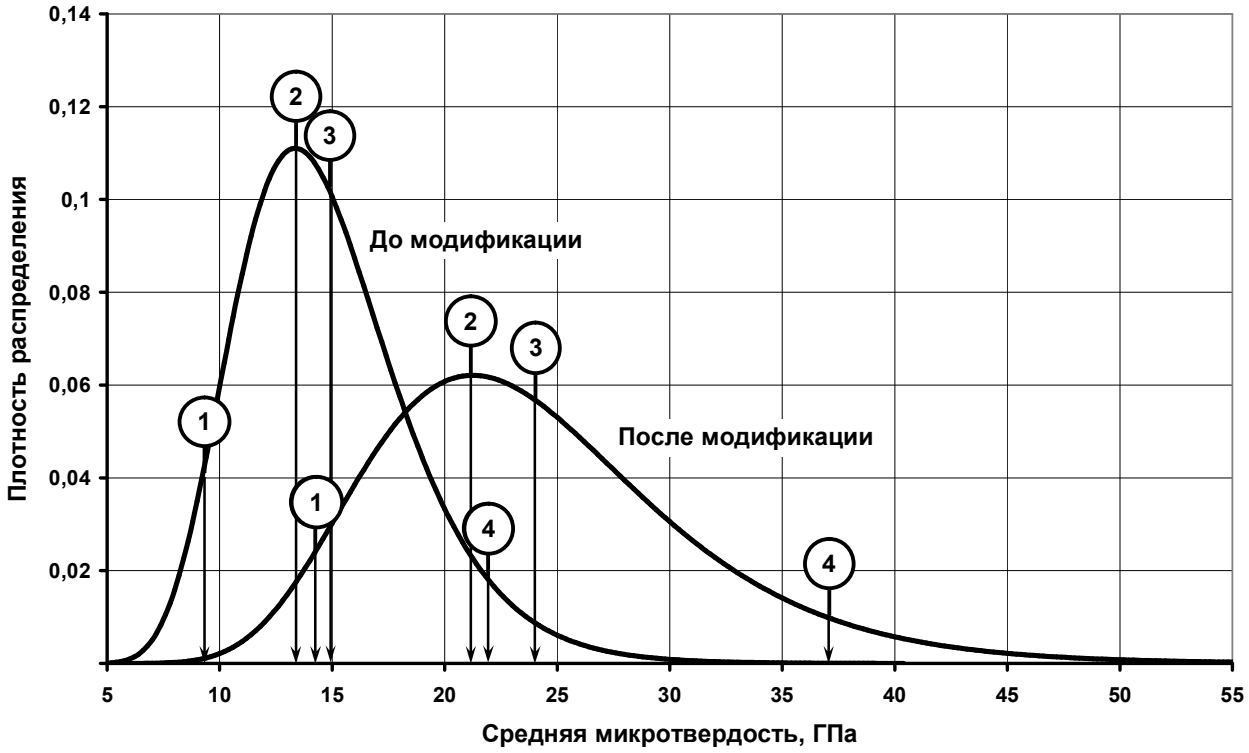
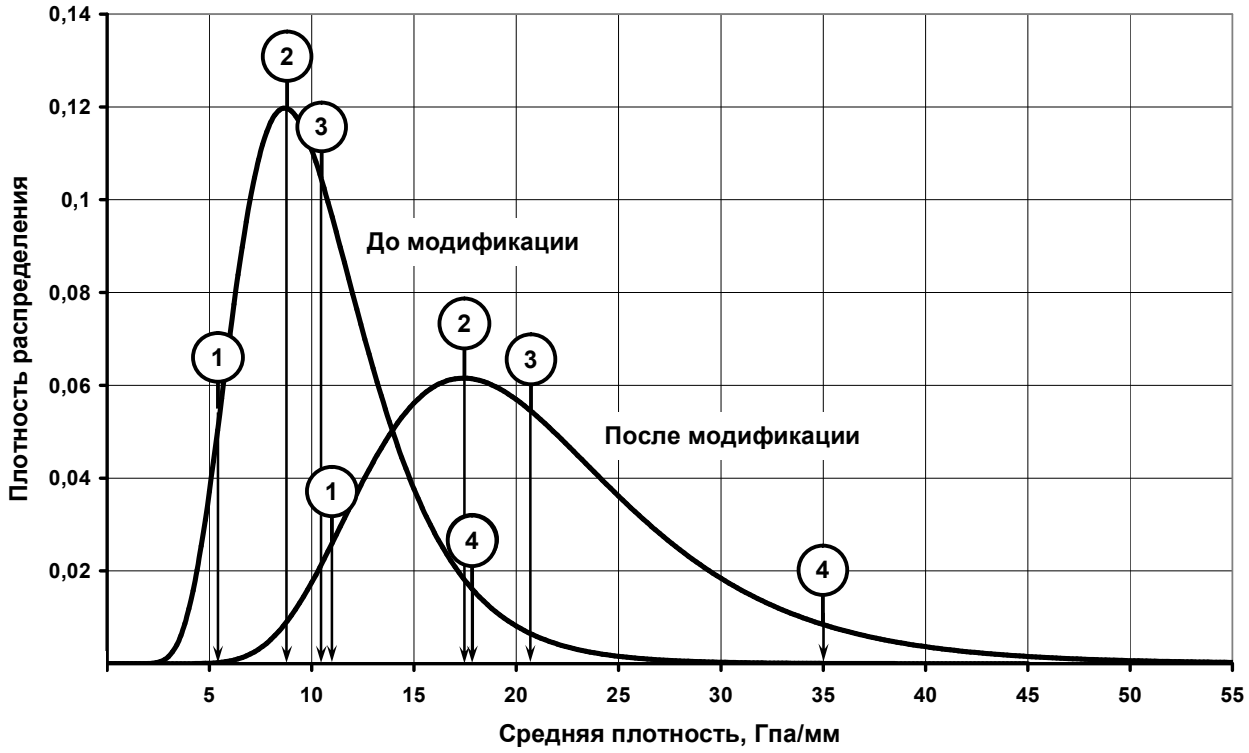


Рисунок 4.11 – Пример распределений микротвердости пластин из сплава VH55 по глубине поверхностного слоя после модификации



а



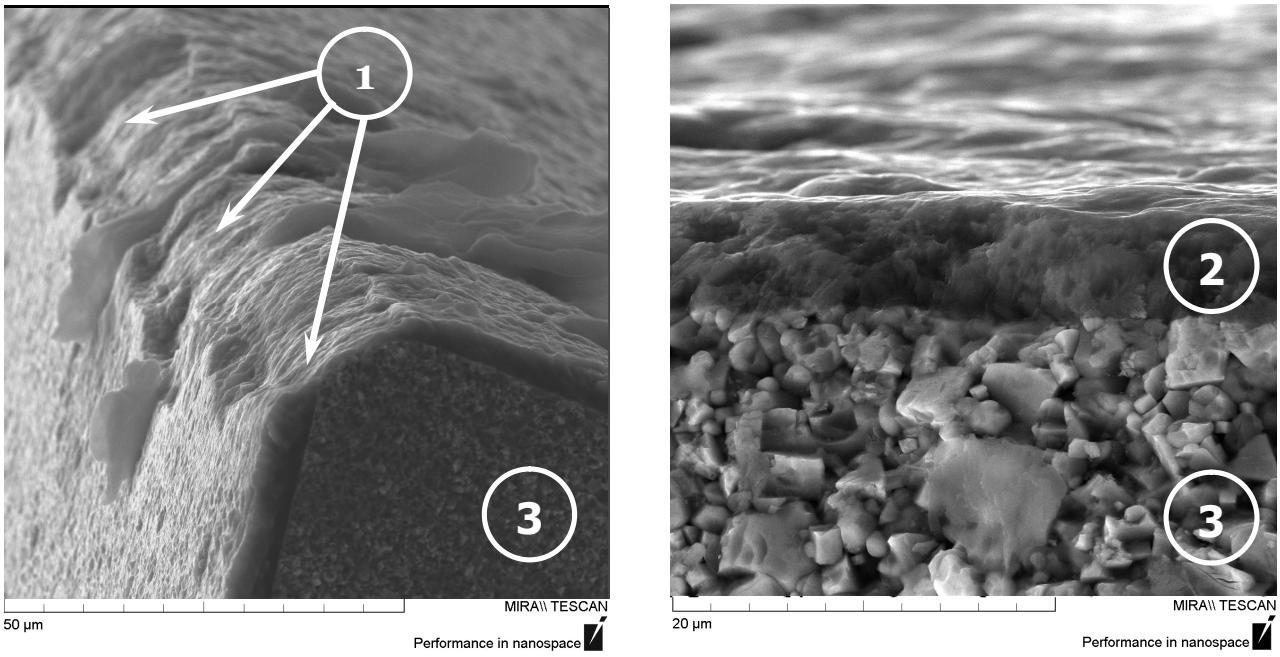
б

Рисунок 4.12 – Распределения микротвердости (а) и плотности (б) поверхностного слоя материалов до и после модификации: 1, 4 – соответственно 5% и 95% квантили, 2 – мода, 3 – среднее значение

Таблица 4.2

Вероятностные характеристики распределений физико-механических свойств материалов

Характеристика	Микротвердость, ГПа		Локальная плотность, ГПа/мм	
	До модификации	После модификации	До модификации	После модификации
5% квантиль	9,2	14,2	5,4	11
Мода	13,4	21,2	8,6	17,4
Медиана	14,2	23,1	9,8	19,6
Среднее значение	14,9	24	10,5	20,8
95% квантиль	21,9	37,1	17,8	35



а **б**

Рисунок 4.13 – Электронно-микроскопические изображения рабочих поверхностей инструмента из сплавов RX-10 (а) и Т15К6 (б) после эксплуатации: 1 – изношенный модифицированный слой, 2 – цельный модифицированный слой, 3 – инструментальная матрица с деформированной прикромочной частью

Анализ вероятностных характеристик распределений (таблица 4.2) показал, что после модификации они увеличиваются, в среднем, в 1,6 (микротвердость) и 2,0 (локальная плотность) раза. Это означает, что модификация, улучшая механические свойства материалов, сохраняет их специфические особенности, поскольку факторы, влияющие на формирование значений параметров, действуют не аддитивно, а мультипликативно, т.е. в соответствии со своими ве-

личинами [116, 178]. Как следствие, это приводит к различному повышению времени стойкости инструментов (серые прямоугольники на рисунке 4.6). В среднем, по данным опытно-промышленной эксплуатации оно составило: у сплавов RX-10 – 2 раза, у сплавов Т15К6 – 2,3 раза. Кроме того, у сплава RX-10 имела место деформация модифицированного слоя (рисунок 4.13, а), в то время как у сплава Т15К6 он сохранялся практически в неизменном состоянии (рисунок 4.13, б). Повышение степени сопротивляемости сплава Т15К6 нагрузкам при резании по сравнению со сплавами RX-10 и VH55 составило соответственно 1,89 и 3,49 раза.

Изложенное позволяет сделать вывод о том, что физико-механические свойства поверхностного слоя материалов в процессе изготовления и модификации режущего инструмента претерпевают изменения в соответствии с закономерностями технологического наследования.

4.3.2. Время стойкости инструмента

Время стойкости является основной статистической характеристикой эксплуатационной надежности модифицированного инструмента, отражающей закономерности возникновения дефектов. Результаты идентификации показали (рисунок 4.14), что распределение это – экспоненциальное, которое на практике встречается довольно редко в связи с его характерными статистическими особенностями. Основной из них является равенство единице коэффициента вариации (см. п.3.5). Однако выполненная проверка показала, что в данном случае это условие выполняется, поскольку коэффициент вариации оказался равен 1,0062, т.е. отличается от единицы всего на 0,62%, что является пренебрежимо малой величиной. Вероятностные характеристики распределения составили: 5% стойкость, т.е. время, меньше которого инструмент работал с вероятностью менее 0,05, – 1,5 мин, средняя стойкость – 36,5 мин, 95% стойкость, т.е. время, больше которого инструмент работал с вероятностью менее 0,05, – 104,5 мин.

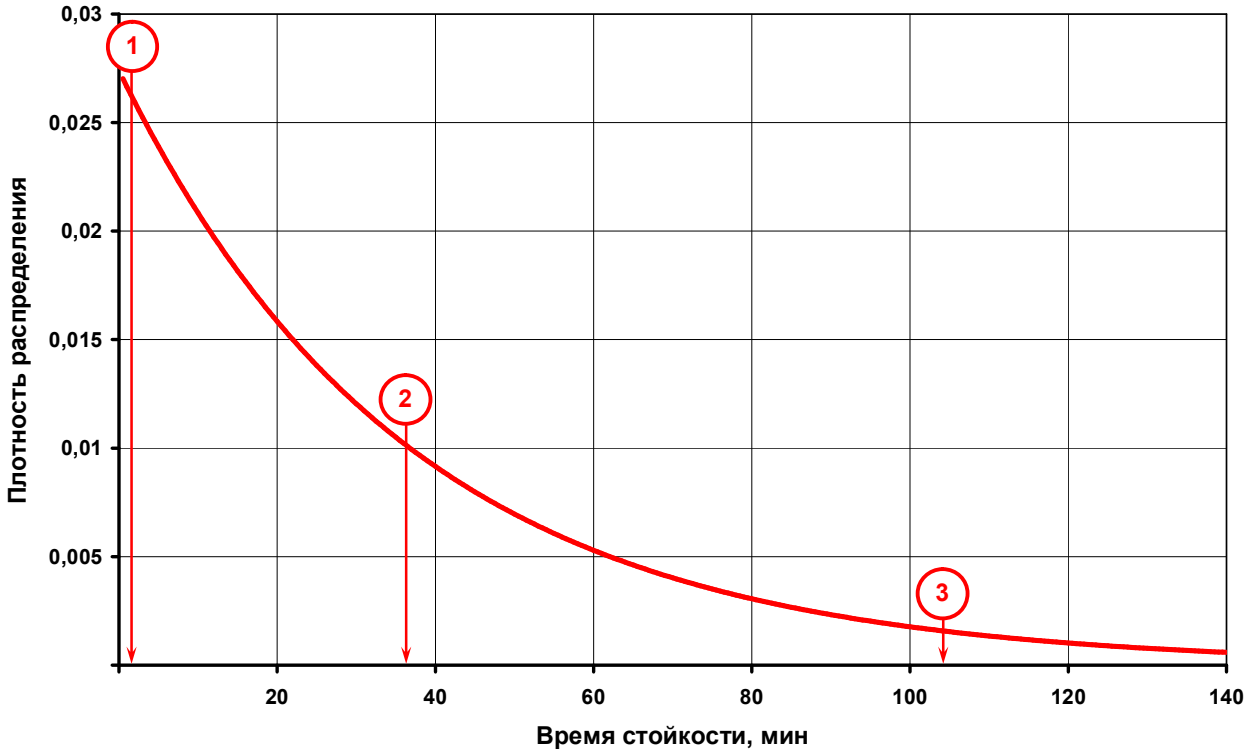


Рисунок 4.14 – Распределение времени стойкости модифицированного инструмента: 1, 3 – соответственно квартили 0,05 и 0,95, 2 – среднее значение

С позиций фундаментальных положений теории надежности и математической статистики полученный результат означает следующее [116, 178].

1. Механизмы нарушения режима работы модифицированного инструмента были различными, т.е. их было несколько.

2. Интенсивность отказов – величина постоянная, а сами отказы являются независимыми внезапными событиями, моменты возникновения которых распределены по закону Пуассона.

3. Каждый отказ:

– есть следствие случайного неблагоприятного сочетания внешних и внутренних факторов, и может не зависеть от состояния модифицированного слоя;

– может иметь распределение времени между появлениями, отличное от экспоненциального, и не оказывает значимого влияния на распределение времени между появлениями отказов в общей совокупности.

4. Физико-механические и химические свойства модифицированного слоя инструмента в процессе эксплуатации в целом остаются неизменными.

Сопоставление полученных результатов с результатами анализа физико-механических и эксплуатационных свойств инструментальных материалов позволяет сделать вывод о том, что экспоненциальное распределение, являясь статистической моделью распределения времени стойкости как инструмента, имеющего низкое качество изготовления (ОАО «Саратовский агрегатный завод, ВЧД-5), так и хорошего по качеству инструмента (ОАО «Саратовский подшипниковый завод»), фиксирует тот факт, что условия его эксплуатации с точки зрения температурно-силовых и/или динамических нагрузок были либо неблагоприятными, либо предельными. Но из этого следует, что отказы инструмента связаны не столько с процессами старения и износа, сколько с процессами образования и развития дефектов, которые приводят к возникновению внезапных отказов в данном случае проявлявшихся в виде сколов. С методологической точки зрения этот результат означает необходимость решения вопросов поиска условий повышения износостойкости модифицированного инструмента, т.е. оптимизации процесса его эксплуатации.

В целом полученные в данном параграфе результаты подтверждают положения 2 главы как об отличном от традиционного протекании процессов, формирующих состояние модифицированного режущего инструмента, так и о возможности использования дефектов для оценивания качества процесса его эксплуатации.

4.4. Результаты моделирования

Моделирование состояния модифицированного металлорежущего инструмента проводилось по данным его экспериментальных исследований и опытно-промышленной эксплуатации, выполненных:

– в лаборатории кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» Саратовского государственного технического университета;

– в ОАО «Саратовский подшипниковый завод» и ОАО «Саратовский агрегатный завод».

Моделирование проводилось с использованием метода Монте-Карло [116]. По результатам моделирования формировался массив наработок инструмента до отказа при заданной характеристике зёренной структуры обрабатываемого материала (см. предпосылку 4 из п.2.3.4), полученной на основе идентификации закона распределения зёрен [149], и траектории движения инструмента к конечному состоянию. Затем выполнялась процедура идентификации закона распределения времени стойкости инструмента, вычислялись его вероятностные характеристики: медиана, мода и квантили, формировалась усредненная по числу реализаций траектория и проводился анализ полученных данных.

4.4.1. Результаты моделирования данных экспериментальных исследований

Моделирование проводилось по результатам экспериментальных исследований:

– при торцевом точении заготовки из стали ШХ-15 ∅60 мм вершинами №1 3-х модифицированных пластин №2, 3 и 4 из сплава Т15К6 с покрытием TiN со следующими значениями параметров технологического режима: частота вращения – 1000 мин$^{-1}$, глубина резания – 0,3 мм, подача – 0,11 мм/об. В процессе точения регистрировалась составляющая P_z силы резания, и фиксировались дефекты пластин. За критерий окончания работы пластины было принято появление макродефектов, способных привести к ее отказу (фаска и лунка износа, выкрашивание, скол) [179];

– при продольном точении заготовок из стали Ст.45 ∅60×300 мм 2-х пластин (обычной и модифицированной) из твердого сплава фирмы «Mitsubishi» с двухслойным покрытием $TiN+Al_2O_3$ со следующими значениями параметров технологического режима: частоты вращения шпинделя – 630, 800, 1000, 1250 и 1600 мин$^{-1}$, глубина резания – 1 мм, подача – 0,34 мм/об. На каждой частоте выполнялось по три прохода; общее число проходов составило, таким образом, 15. В процессе точения с помощью индикаторной стойки контролировался с точностью 10 мкм размерный износ пластин [179-181].

Далее представлены основные результаты моделирования.

Пластины из сплава Т15К6. Процедура моделирования данных о работе пластин заключалась в последовательном изменении частоты вращения от начальной (1000 мин$^{-1}$) до минимальной (12,5 мин$^{-1}$) с целью учета переменности скорости резания при торцевом точении (всего было использовано 7 частот). Число реализаций моделирования на каждой частоте было принято равным 500. Обработка результатов моделирования заключалась в усреднении данных, полученных для каждой пластины, расчете траекторий изменения состояния и их сглаживании с целью выделения тенденций и определения времени устойчивой работы. Последнее определялось как расстояние от начала координат до точки, в которой скорость изменения состояния начинала возрастать (по аналогии с началом катастрофического износа у обычного инструмента). В данном случае это объясняется интенсификацией процесса развития макродефектов, поскольку условия работы пластин были такими, что привели к возникновению наиболее негативных из них: выкрашиваний и сколов. Рисунок 4.15 иллюстрирует изложенное графически.

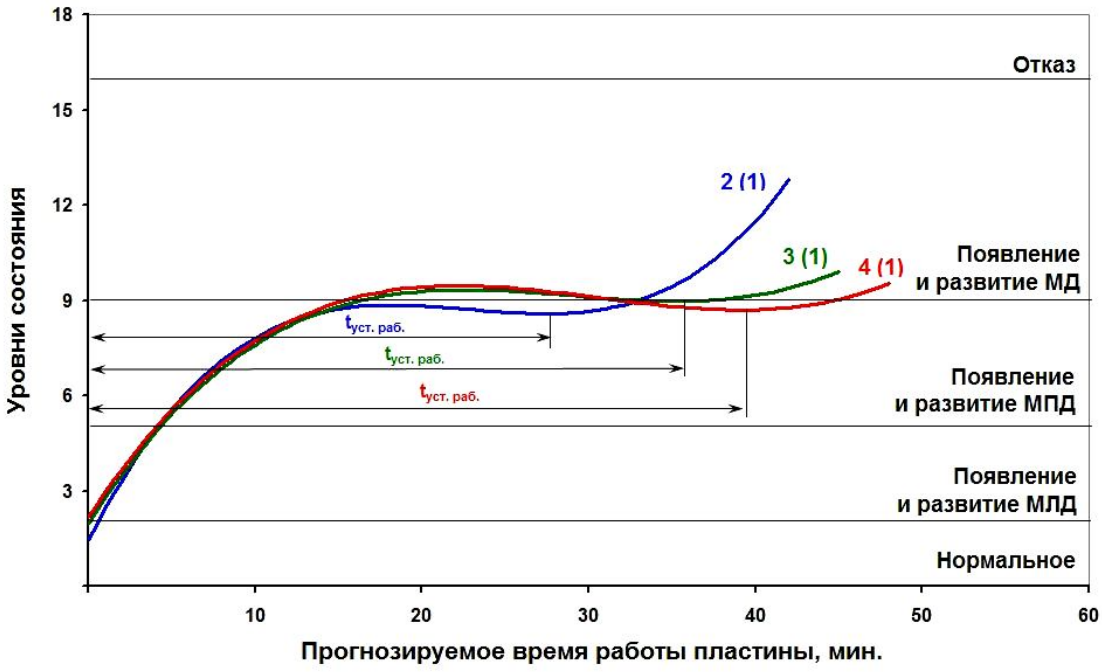


Рисунок 4.15 – Сглаженные траектории движения пластин к конечному состоянию: МЛД, МПД, МД, соответственно, микролокальные, микроповерхностные и макродефекты, $t_{уст. раб.}$ – прогнозируемое время устойчивой работы

Полученные результаты являются достоверными, поскольку реальное время работы пластин по результатам эксперимента распределилось аналогично: минимальное – у пластины №2 (6 проходов), максимальное – у пластины №4 (17 проходов). С целью установления механизма, лежащего в основе полученных результатов, были выполнены следующие действия:

– вычислен показатель, представляющий собой отношение плотности поверхностного слоя пластин, отражающей результаты их модификации, к составляющей P_z силы резания, характеризующей условия эксплуатации;

– проведено сравнение по коэффициенту ранговой корреляции Спирмена вычисленных показателей с основными характеристиками надежности пластин, определенных по результатам моделирования: медианой времени стойкости, вероятностью функционального отказа и временем устойчивой работы.

Результаты, представленные на рисунке 4.16, показывают, что характеристики надежности находятся с показателем в сильной прямой или обратной связи и означают, что надежность модифицированного инструмента необходимо повышать на основе оптимизации как процесса модификации, так и процесса эксплуатации, поскольку в этом случае повышение будет более значимым.

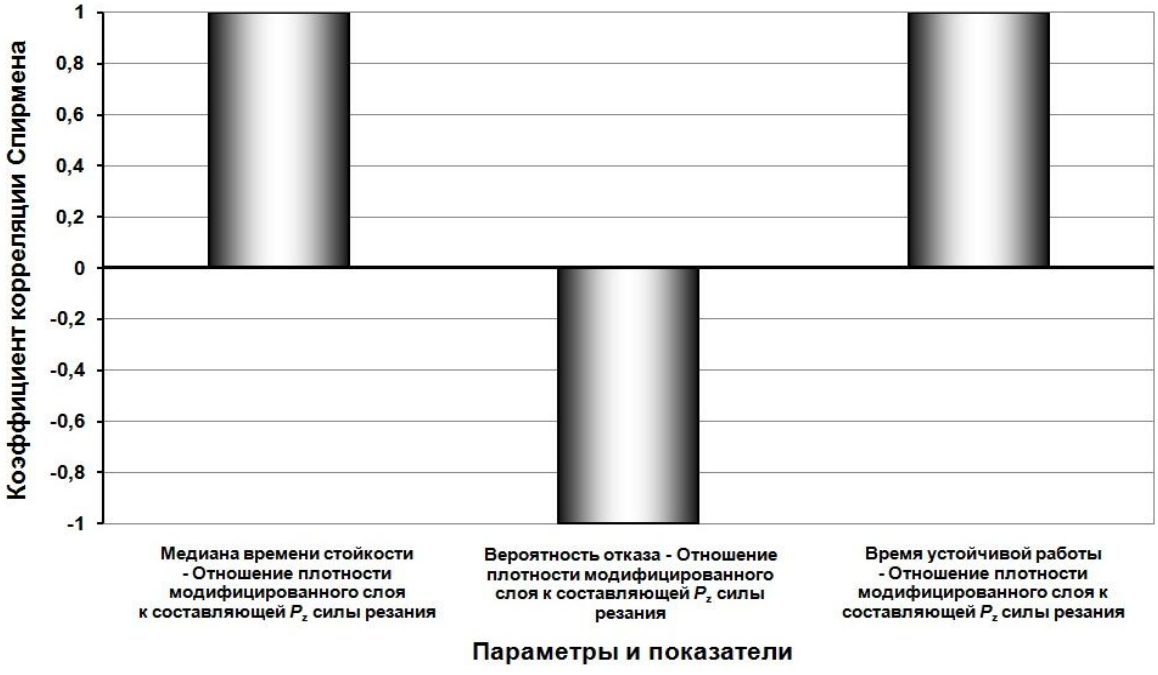


Рисунок 4.16 – Результаты рангового корреляционного анализа данных моделирования

Пластины «Mitsubishi». Результаты испытаний пластин представлены на рисунке 4.17 и показывают, что при работе в одинаковых условиях модификация обеспечивает значимое повышение стойкости. Результаты микроскопического исследования пластины показали, что образования макродефектов на ее рабочих поверхностях не произошло, следовательно, основным процессом изменения состояния пластины был процесс истирания модифицированного слоя, включая истирание зерен матрицы в подслое и, как следствие, ее постепенное деформирование. Финальный результат этого процесса отображен на рисунке 4.17 скачкообразным изменением траектории износа в пределах цены деления использовавшегося средства измерения.

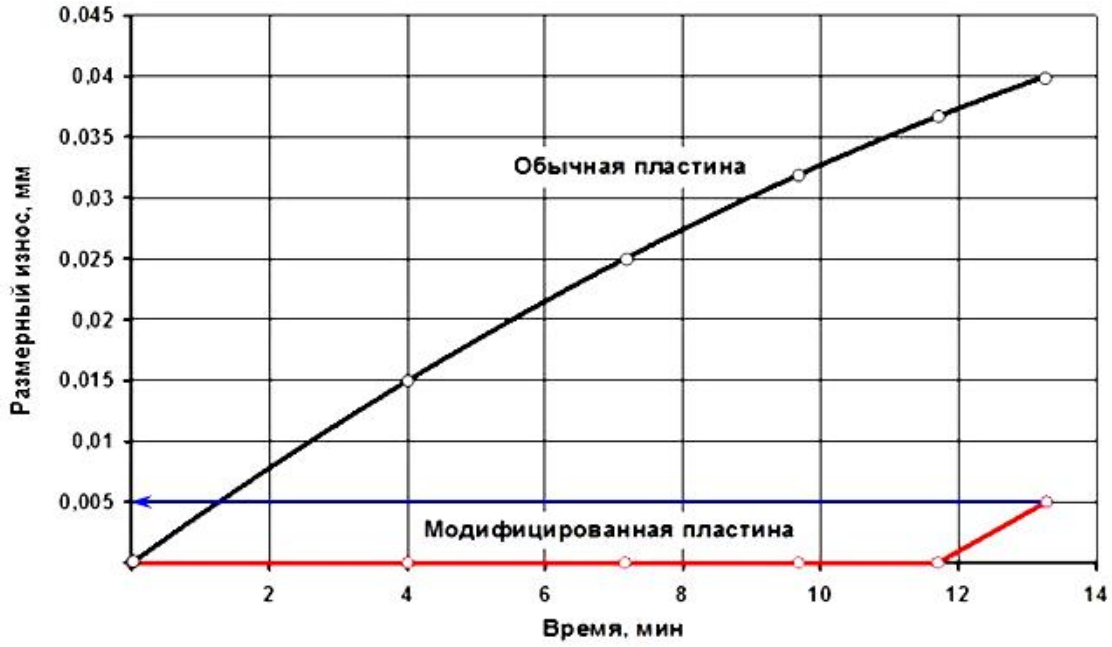


Рисунок 4.17 – Траектории развития размерного износа пластин: стрелка – толщина модифицированного слоя

Моделирование данных испытаний модифицированной пластины, выполненное по схеме проведения исследований (три раза на каждой частоте вращения с числом реализаций 500), позволило оценить влияние на процесс истирания модифицированного слоя скорости резания. Результаты, представленные на рисунке 4.18, показали, что увеличение скорости резания вызывает рост скорости истирания модифицированного слоя, причем после значений 125…130 м/мин. рост идет более интенсивно. Одновременно возрастает степень устойчивости системы

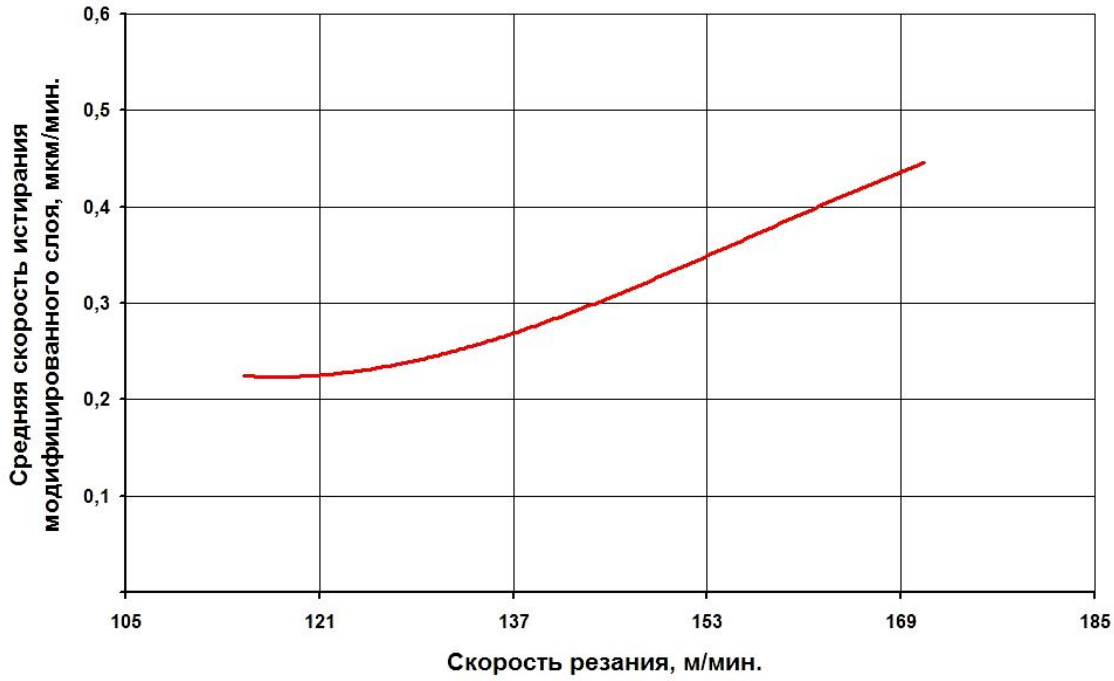


Рисунок 4.18 – Влияние скорости резания на скорость истирания модифицированного слоя (тенденция)

резания, оценка которой была проведена по результатам регистрации и анализа колебательных процессов [179, 180]. Но это означает, что при увеличении скорости резания модифицированный слой воспринимал на себя все большую часть энергии колебаний, затрачивая ее на совершение работы по самоорганизации [181, 182], и, тем самым, выполняя диссипативную функцию. Из этого следует, что повышение скорости резания не является направлением повышения надежности модифицированного инструмента и подтверждает результаты, полученные ранее научным коллективом, в котором работает автор [103].

4.4.2. Результаты моделирования данных опытно-промышленной эксплуатации модифицированного инструмента

Моделирование проводилось по результатам опытно-промышленной эксплуатации:

– 22 вершин 11 пластин из сплава Т15К6 с покрытием TiN, модифицированных при следующих значениях режимных параметров: анодный ток магнетрона – 35 мА,

время обработки – 15 мин., потенциал смещения – 80, 100, 110, 125, 150 В. Пластины использовались для изготовления деталей из стали ШХ-15 со следующими значениями параметров технологического режима: скорость резания – 58 м/мин., глубина резания – 2,0 мм; подачи – 0,26; 0,3; 0,32; 0,38 мм/об;

– 28 вершин 8 пластин из сплава RX-10 с покрытием $TiN+Al_2O_3$, модифицированных при следующих значениях режимных параметров: анодный ток магнетрона – 30 мА, время обработки – 13 мин., потенциал смещения – 180 В. Пластины использовались для изготовления деталей из сталей 30ХГСА и 35ХГСЛ со следующими значениями параметров технологического режима: скорости резания – 75,5; 181 и 197 м/мин., глубины резания – 0,2; 0,5 и 2,0 мм; подачи – 0,17; 0,24 и 0,52 мм/об.

За критерий окончания эксплуатации пластин была принята размерная точность изготовленных деталей. После завершения эксплуатации фиксировалось ее время, и регистрировались образовавшиеся на пластинах дефекты.

Основные результаты моделирования представлены в табл.4.3, 4.4.

Таблица 4.3

Результаты моделирования данных опытно-промышленной эксплуатации модифицированного инструмента в ОАО «Саратовский подшипниковый завод»

Подача, мм/об.	Толщина сошедшего модифицированного слоя, мкм	Вероятность отказа	Время устойчивой работы, мин.	Распределение времени стойкости	Параметры распределения, мин.		
					Мода	Медиана	Квантиль 0,95
0,26	3,67	0,53	42,52	Гамма	7,76	13,72	39,97
0,30	3,84	0,48	40,85	Гамма	8,47	13,80	38,75
0,32	3,92	0,46	84,99	Гамма	23,19	36,89	100,01
0,38	5,25	0	95,40	Гамма	44,34	52,56	105,73

Таблица 4.4

Результаты моделирования данных опытно-промышленной эксплуатации модифицированного инструмента в ОАО «Саратовский агрегатный завод»

Подача, мм/мин.	Толщина сошедшего модифицированного слоя, мкм	Вероятность отказа	Время устойчивой работы, мин.	Распределение времени стойкости	Параметры распределения, мин.		
					Мода	Медиана	Квантиль 0,95
306,0	2,77	0,78	49,80	Гамма	0	9,62	52,28
499,2	2,99	0,73	89,74	Гамма	0	24,38	113,55
600,0	3,27	0,65	50,02	Гамма	0	17,74	76,99
306,0	2,77	0,78	49,80	Гамма	0	9,62	52,28

Анализ данных таблиц на принципиальном уровне позволил установить следующее.

1. Время стойкости модифицированного инструмента имеет гамма-распределение (рисунок 4.19) [146, 147] с параметром формы, изменяющимся в диапазоне от 1,0 до 6,0 (рисунок 4.20). Полученный результат является не только новым,

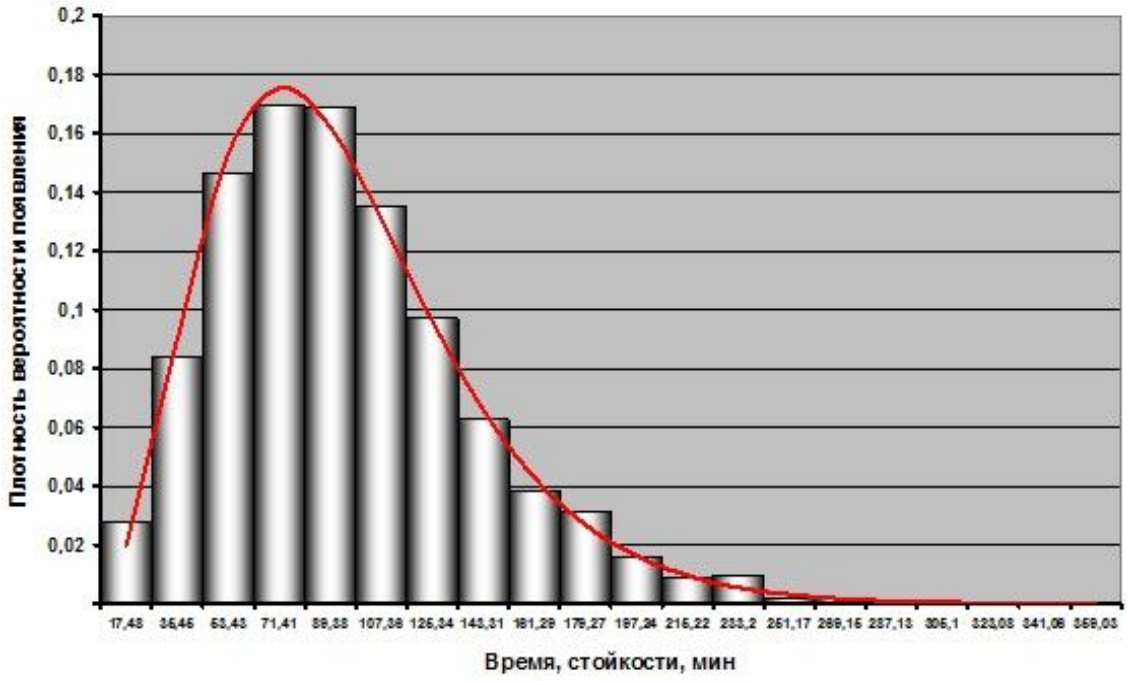


Рисунок 4.19 – Эмпирическое и теоретическое гамма-распределения времени разрушения модифицированного слоя

но и достоверным, поскольку гамма-распределение хорошо описывает наработку до отказа многих невосстанавливаемых монотонно стареющих механических систем и изделий на различных стадиях их рабочего процесса, т.е. когда проявляются как внезапные или постепенные отказы, так и отказы обоих видов. При этом увеличение параметра формы соответствует повышению роли постепенных отказов, вызванных, прежде всего, износом материалов [116, 178]. В связи с этим гамма-распределение и его частный случай – экспоненциальное распределение (когда параметр формы равен 1) можно рассматривать как статистическое отображение механизма повышения сопротивляемости модифицированного слоя процессам ползучести и изнашивания. При этом чем большее значение имеет параметр формы, тем сопротивляемость имеет место в большей степени.

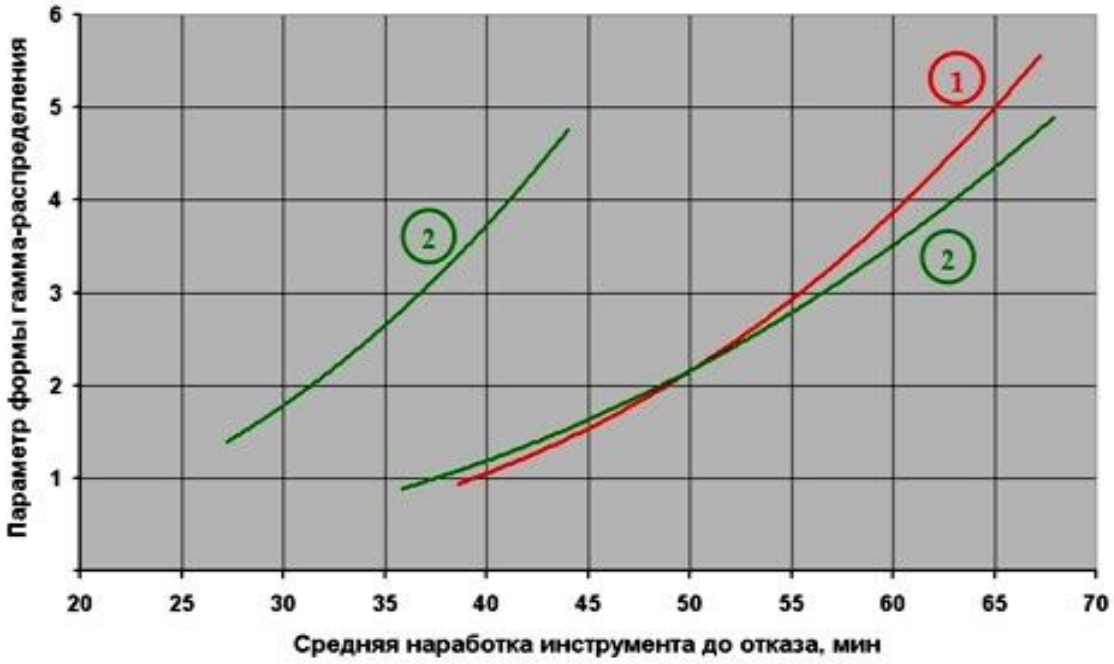


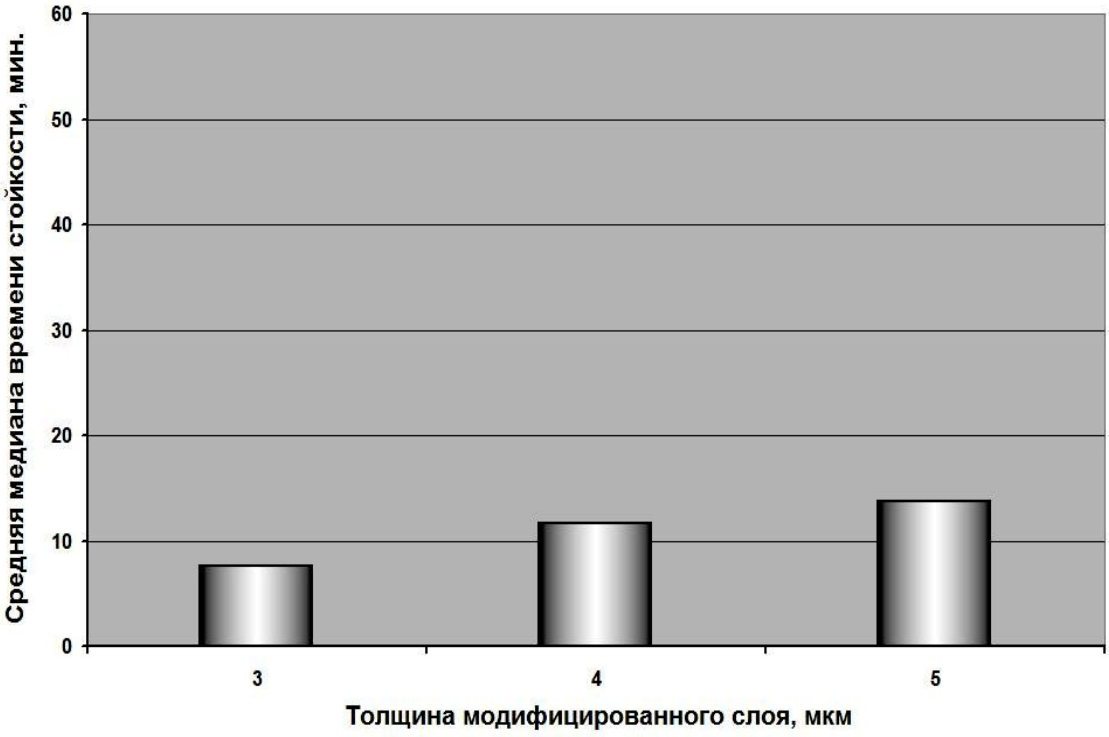
Рисунок 4.20 – Вариации параметра формы гамма-распределения от средней наработки до отказа при изготовлении изделий из хромокремнемарганцовых (1) и конструкционных (2) сталей

2. Количество и качество полученных данных в совокупности с данными сформированной базы делают возможным поиск условий повышения эксплуатационной надежности модифицированного инструмента.

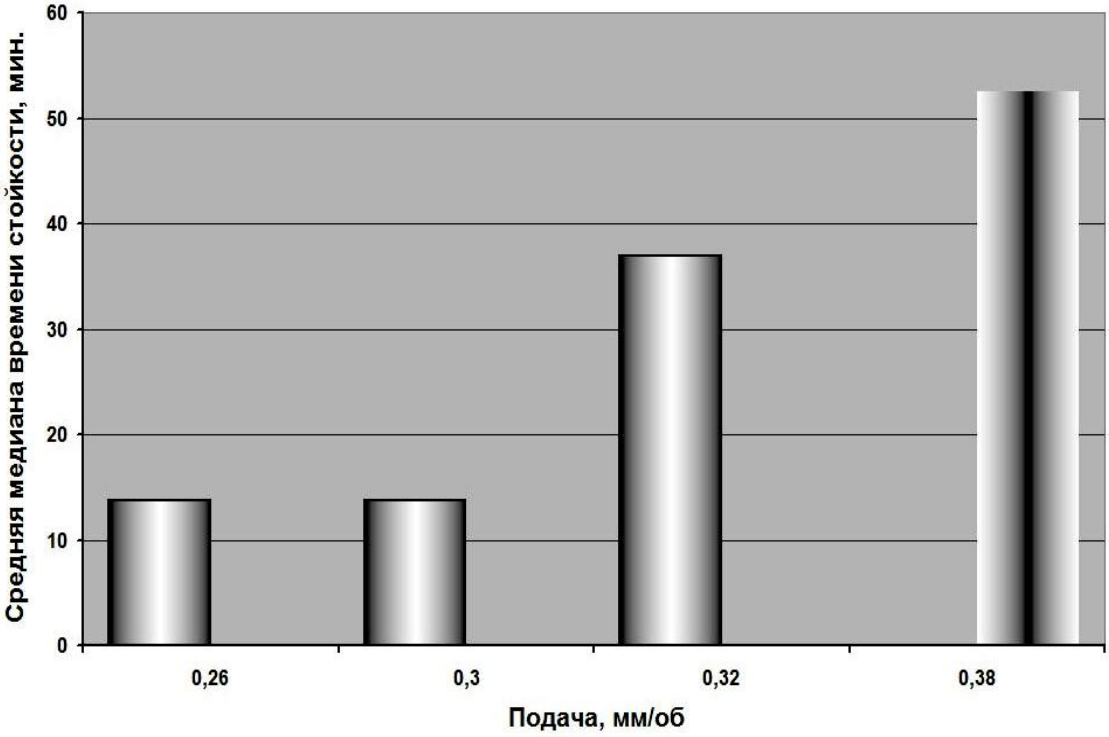
4.4.3. Условия повышения эксплуатационной надежности модифицированного инструмента

Поиск условий повышения эксплуатационной надежности модифицированного инструмента осуществлялся при сравнении усредненных по соответствующему числу пластин результатов моделирования с режимными параметрами и результатами процессов модификации и эксплуатации инструмента.

Пластины из сплава Т15К6. Рисунок 4.21, а отражает влияние на медиану времени стойкости пластин Т15К6 толщины модифицированного слоя при точении на рабочей подаче (0,26 мм/об.). Как видно это влияние существует и обеспечивает повышение надежности, в среднем, в 1,8 раза за счет формирования подслоя (см. п.2.3.4). Дальнейшее сравнение было выполнено при точении с различными



а



б

Рисунок 4.21. Влияние на медиану времени стойкости толщины модифицированного слоя (а) и подачи (б)

значениями подачи. Результаты, представленные на рисунке 4.21, б, показали, что увеличение подачи до 0,32 мм/об. (~1,2 раза) обеспечивает повышение показателей надежности, в среднем, в 2,7 раза. На принципиальном уровне данный результат означает, что увеличение подачи может рассматриваться как направление повышения надежности модифицированного инструмента. В качестве дополнительного аргумента на рисунке 4,21, б приведен результат моделирования работы пластины с подачей 0,38 мм/об.

На рисунке 4.22 приведены результаты сравнения данных о влиянии на время устойчивой работы пластин плотности модифицированного слоя. Закономерность влияния сомнений не вызывает, поэтому были проанализированы условия, обеспечивающие повышение плотности с позиций хода процессов, определяющих результаты модификации, прежде всего, тепловых [183-186]. На рисунке 4.23, а показана зависимость плотности модифицированного слоя от приращения температуры за время плазменной обработки пластин, которое связано с дозой облучения их поверхности, определяемой произведением значений режимных параметров (потенциала, СВЧ-мощности и времени). Корреляционный анализ значений тепловых и режимных параметров показал (рисунок 4.23, б), что оптимальный ход

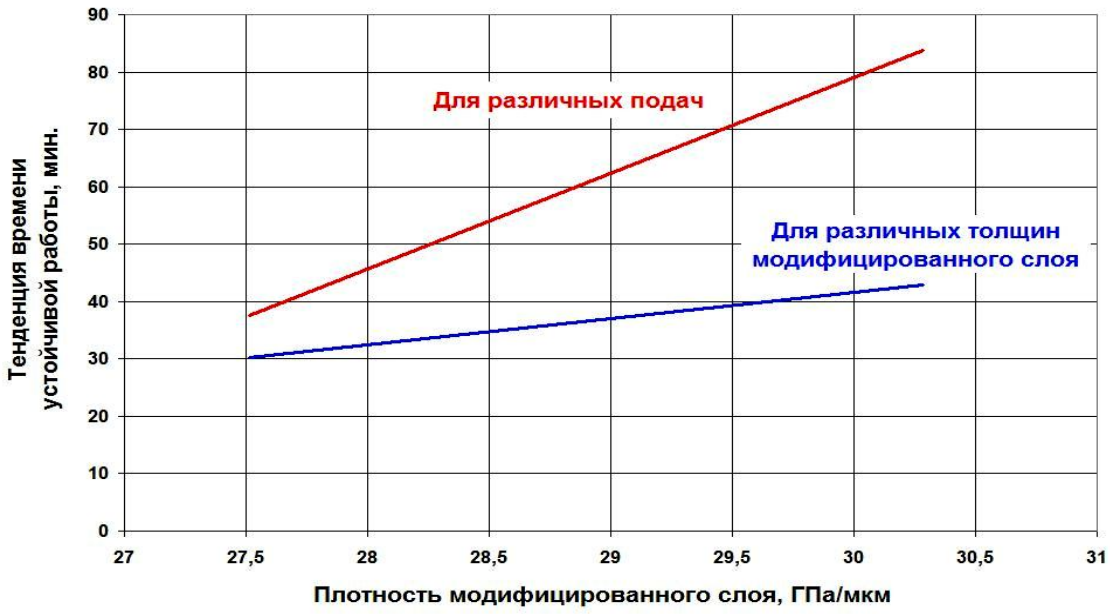


Рисунок 4.22. Влияние плотности модифицированного слоя на время устойчивой работы пластин

а

б

Рисунок 4.23. Влияние параметров на результат (а) и ход (б) процесса модификации

тепловых процессов обеспечивается при условии минимизации разброса значений режимных параметров, т.е. их стабилизации. Сравнение средней вероятности отказа за реальное время работы с вероятностью, полученной по результатам моделирования, показало, что стабилизация может обеспечить повышение времени стойкости пластин с 95 до 144 мин., т.е. в 1,52 раза и на этой основе повышение производительности обработки в 1,23 раза.

Пластины из сплава RX-10. Обработка и анализ данных моделирования были проведены в направлении оценки целесообразности оптимизации минутной подачи, определяющей скорость съема припуска, т.е. повышение не только надежности, но и производительности обработки. Результаты показали (рисунок 4.24), что максимальное (по отношению к реальному) повышение времени стойкости (1,6 раза) обеспечивает подача 499,2 мм/мин., в то время как большая (с точки зрения производительности) подача 600,0 мм/мин. повышает время стойкости (по отношению к реальному) в 1,4 раза.

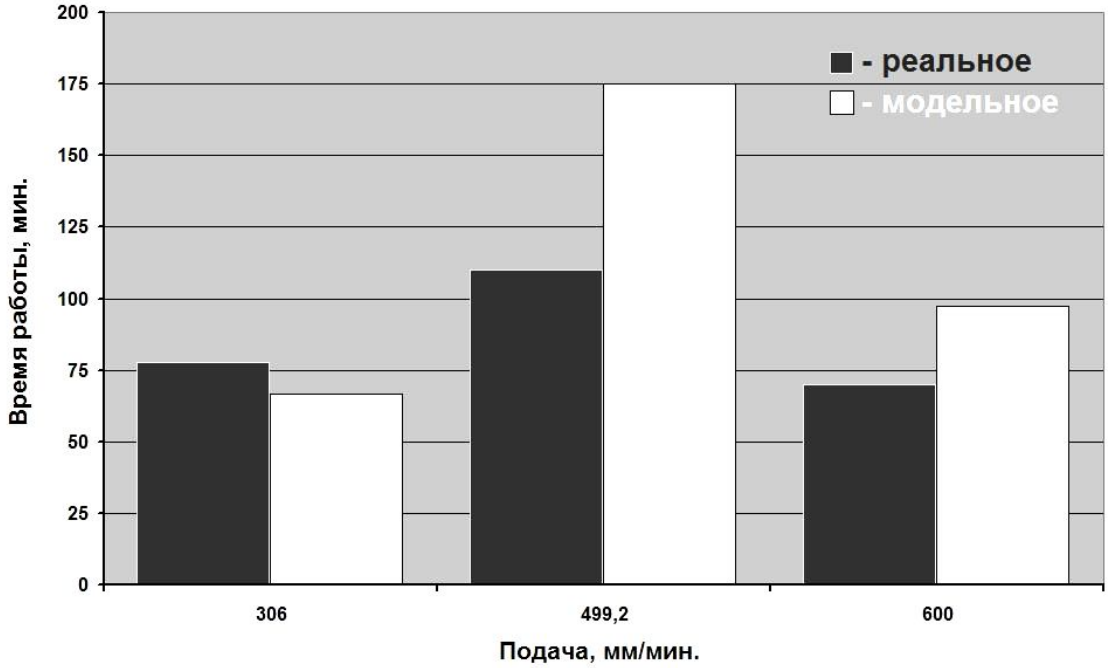


Рисунок 4.24. Влияние минутной подачи на показатели надежности пластин

Дальнейший анализ показал (рисунок 4.25), что повышение надежности при работе с подачей 499,2 мм/мин. обеспечивалось за счет повышения устойчивости как к процессам, связанным с развитием параметрического отказа (минимальная ско-

рость износа модифицированного слоя), так и к процессам, связанным с развитием функционального отказа (минимальная интенсивность образования дефектов). Сравнение параметров надежности с суммарным приращением плотности модифицированного слоя пластин показало, что у пластин, работавших с подачами 499,2 и 600,0 мм/мин. оно в среднем в 1,56 раза превышает приращение плотности модифицированного слоя пластин, работавших с подачей 306,0 мм/мин. Это обеспечивает повышение временных показателей надежности, в среднем, в 2 раза при уменьшении вероятности возникновения функциональных отказов в 1,14 раза, параметрических – в 1,23 раза. Что же касается подач 499,2 и 600,0 мм/мин., то здесь повышение плотности модифицированного слоя явного положительного результата не обеспечивает. Оптимизация же минутной подачи его обеспечивает, создавая возможности повышения производительности обработки за счет увеличения не столько скорости съема материала, сколько времени работы инструмента (рисунок 4.24).

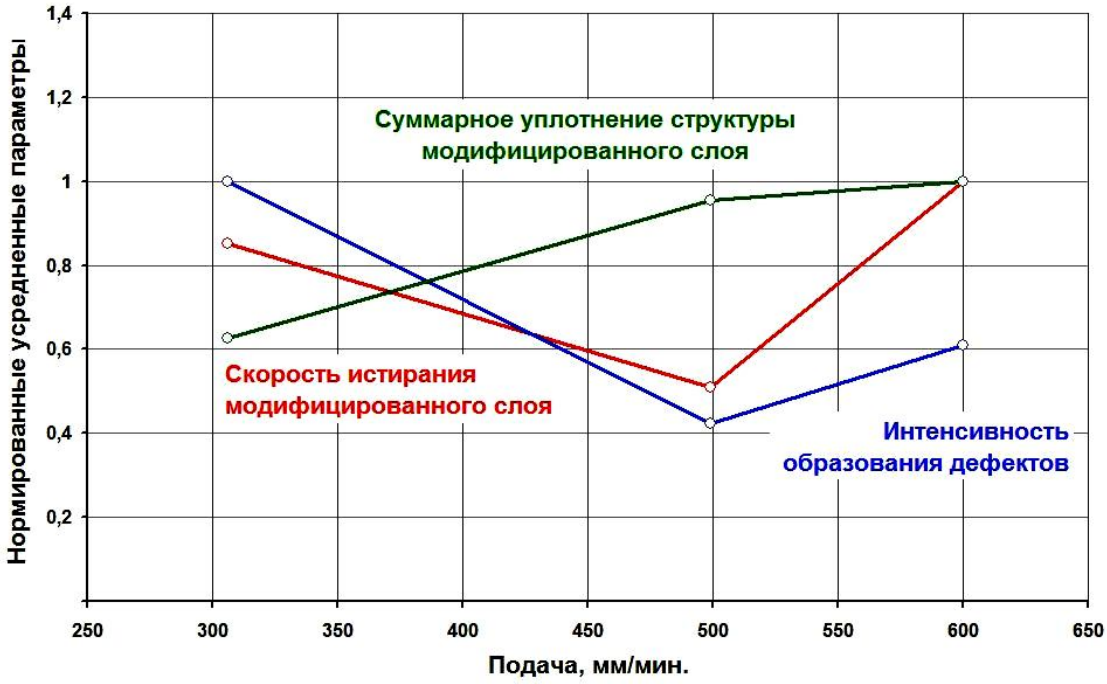


Рисунок 4.25. Сравнение результатов модификации пластин и оптимизации условий их работы

В целом полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что моделирование позволяет не только находить условия для повышения показателей надежности модифицированного металлорежущего инструмента, но и проводить количественную оценку их эффективности.

С целью подтверждения достоверности этого вывода была выполнена процедура дополнительного статистического оценивания данных сформированной базы по технологическим и физико-механическим параметрам по критерию их влияния на стойкость модифицированных пластин. Оценивание проводилось с использованием процедуры непараметрического корреляционного анализа, основанного на вычислении коэффициента конкордации, который позволяет проверить степень согласованности между собой нескольких наборов данных, представленных рангами [113]. Влияние на стойкость имеет место, если выполняется неравенство: $F \geq F_{0,95}(k_1,\ k_2)$, где F и $F_{0,95}(k_1,\ k_2)$ – вычисленное через коэффициент конкордации значение статистики Фишера и ее табличное значение при числе степеней свободы k_1, k_2 и доверительной вероятности 0,95.

Результаты, представленные на рисунках 4.26, 4.27, показали следующее.

1. Время стойкости T пластин из сплава Т15К6 зависит от оборотной подачи S (в большей степени) и плотности модифицированного слоя ρ (в меньшей степени) и не зависит от глубины резания t (рисунок 4.26).

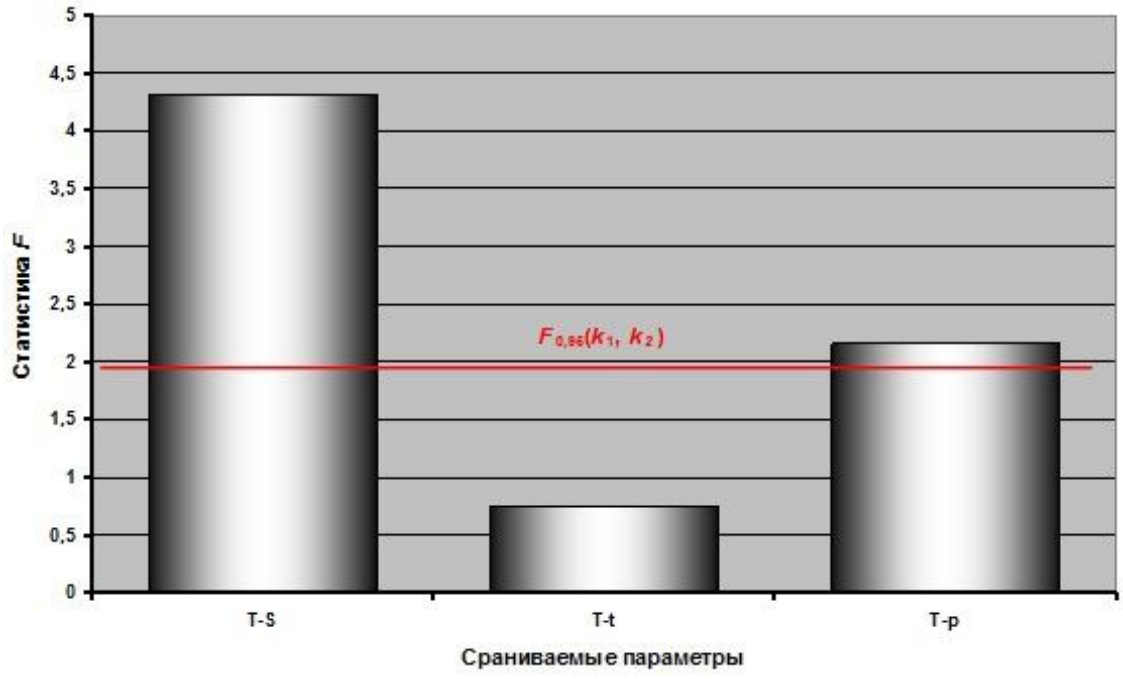
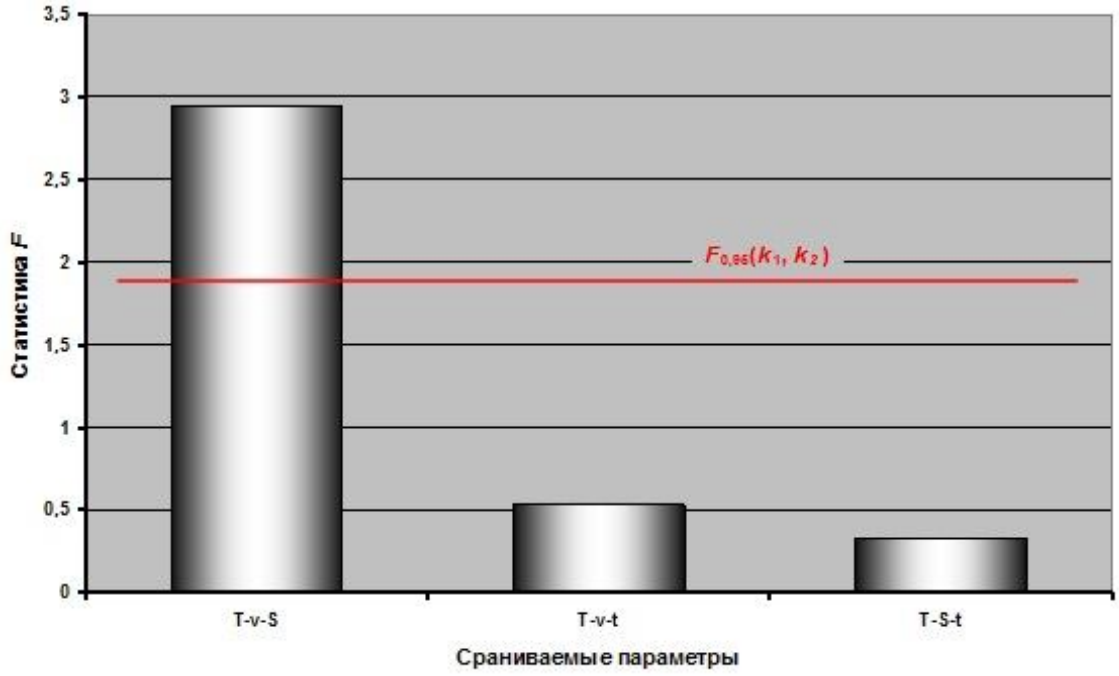
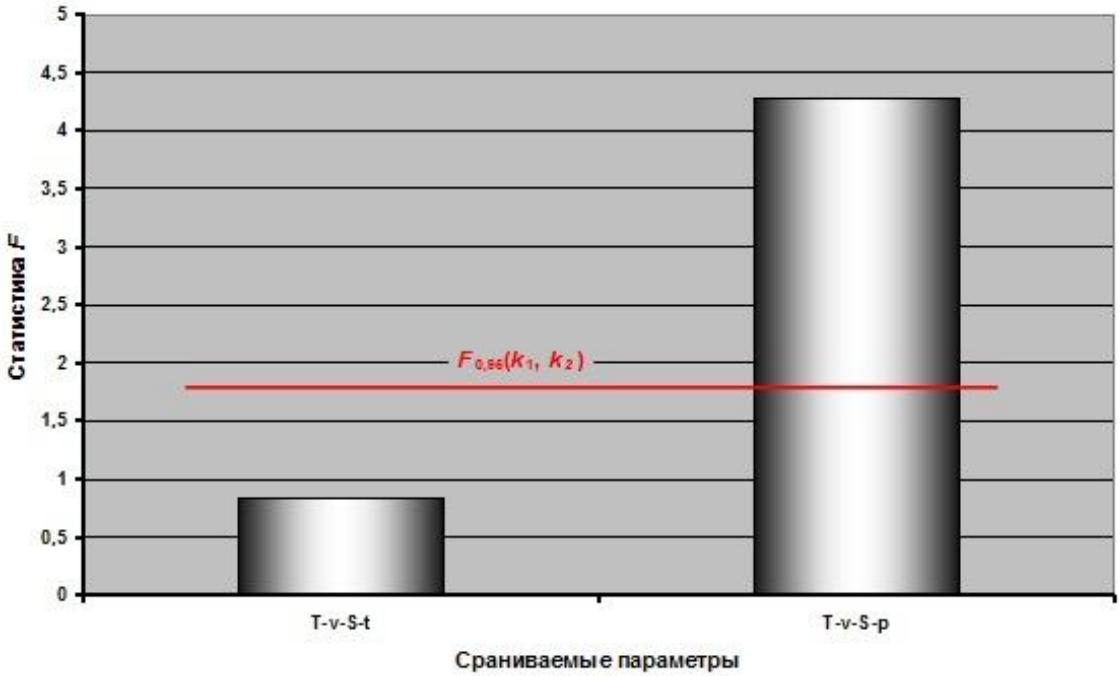


Рисунок 4.26 – Результаты рангового корреляционного анализа данных ОАО «Саратовский подшипниковый завод»

2. Время стойкости пластин из сплава RX-10 зависит как от сочетания скорости резания *v* и оборотной подачи, т.е. минутной подачи (рисунок 4.27, а), так и от их сочетания и плотности модифицированного слоя (рисунок 4.27, б), причем во втором случае в большей степени, и не зависит от глубины резания.



а



б

Рисунок 4.27 – Результаты рангового корреляционного анализа данных ОАО «Саратовский агрегатный завод»

Полученные результаты являются вполне закономерными, поскольку обусловлены различием физико-механических характеристик материалов (см. п.4.3.1). В частности, для более прочного сплава Т15К6 влияние на стойкость плотности модифицированного слоя проявляется в меньшей степени, чем для менее твердого сплава RX-10. Большее влияние на стойкость первого сплава величины оборотной подачи означает наличие преобладающих изменений в модифицированном слое в направлении касательном к передней поверхности пластин, т.е. в горизонтальной плоскости. Но это возможно только в случае устойчивости инструментальной матрицы, что подтверждает РЭМ-изображение поверхности на рисунке 4.13, б. Влияние же на стойкость сплава RX-10 и минутной подачи, и плотности означает наличие преобладающих изменений в модифицированном слое в направлении, нормальном к режущей кромке, т.е. в вертикальной плоскости. А это возможно только в случае неустойчивости инструментальной матрицы, приводящей к ее локальной деформации (проседанию), что также подтверждает РЭМ-изображение на рисунке 4.13, а.

Таким образом, к основным условиям, обеспечивающим повышение эффективности эксплуатации модифицированного металлорежущего инструмента, можно отнести:

1. Учет результатов анализа распределения микротвердости материала по глубине поверхностного слоя при назначении режимных параметров процесса модификации инструмента.

2. Стабилизация значений режимных параметров с целью обеспечения оптимального хода тепловых процессов.

3. Оптимизация значения оборотной подачи для инструмента, уплотнение поверхностного слоя которого по результатам модификации в максимальной степени произошло на больших от поверхности глубинах, поскольку это свидетельствует о формировании подслоя и, как следствие, повышении прочности инструментальной матрицы.

4. Оптимизация значения минутной подачи для инструмента, уплотнение поверхностного слоя которого произошло вблизи поверхности, поскольку это свидетельствует о непрочности инструментальной матрицы.

Выполнение 1 и 2 условий обеспечит формирование модифицированного слоя оптимальной толщины и плотности.

Выполнение 3 и 4 условий обеспечит создание такого режима эксплуатации инструмента, при котором процесс постепенного истирания модифицированного слоя будет преобладать над процессами образования и развития дефектов, приводящих к возникновению отказов.

Результативность выполнения перечисленных условий подтверждается документами о практическом использовании результатов работы, представленными в приложении Г и полученными при непосредственном участии автора.

4.4.4. Алгоритм оптимизации процесса эксплуатации модифицированного инструмента

Результаты оценивания и моделирования данных о надежности модифицированного режущего инструмента были положены в основу разработки алгоритма оптимизации процесса его эксплуатации (рисунок 4.28).

На первом этапе производится моделирование процесса эксплуатации инструмента на различных сочетаниях значений параметров технологического режима: частоты вращения n и оборотной подачи S. Для реализации этой процедуры необходимо только решить вопрос о том, какую совокупность дефектов принять в качестве исходных данных. На принципиальном уровне для этого можно использовать два подхода. Первый подход заключается в том, чтобы для каждого сочетания параметров использовать ту совокупность, которая имеется в базе данных разработанной компьютерной системы и, таким образом, отражает индивидуальные особенности соответствующего технологического режима. Второй подход предполагает использование совокупности, которая встречается во всех сочетаниях, т.е. является наиболее вероятной и, соответственно, отражает общие закономерности качества процесса эксплуатации инструмента. Результатом работы алгоритма на этом этапе становится вычисление массивов значений наработок до отказа и после идентификации их распределений – любой из вероятностных

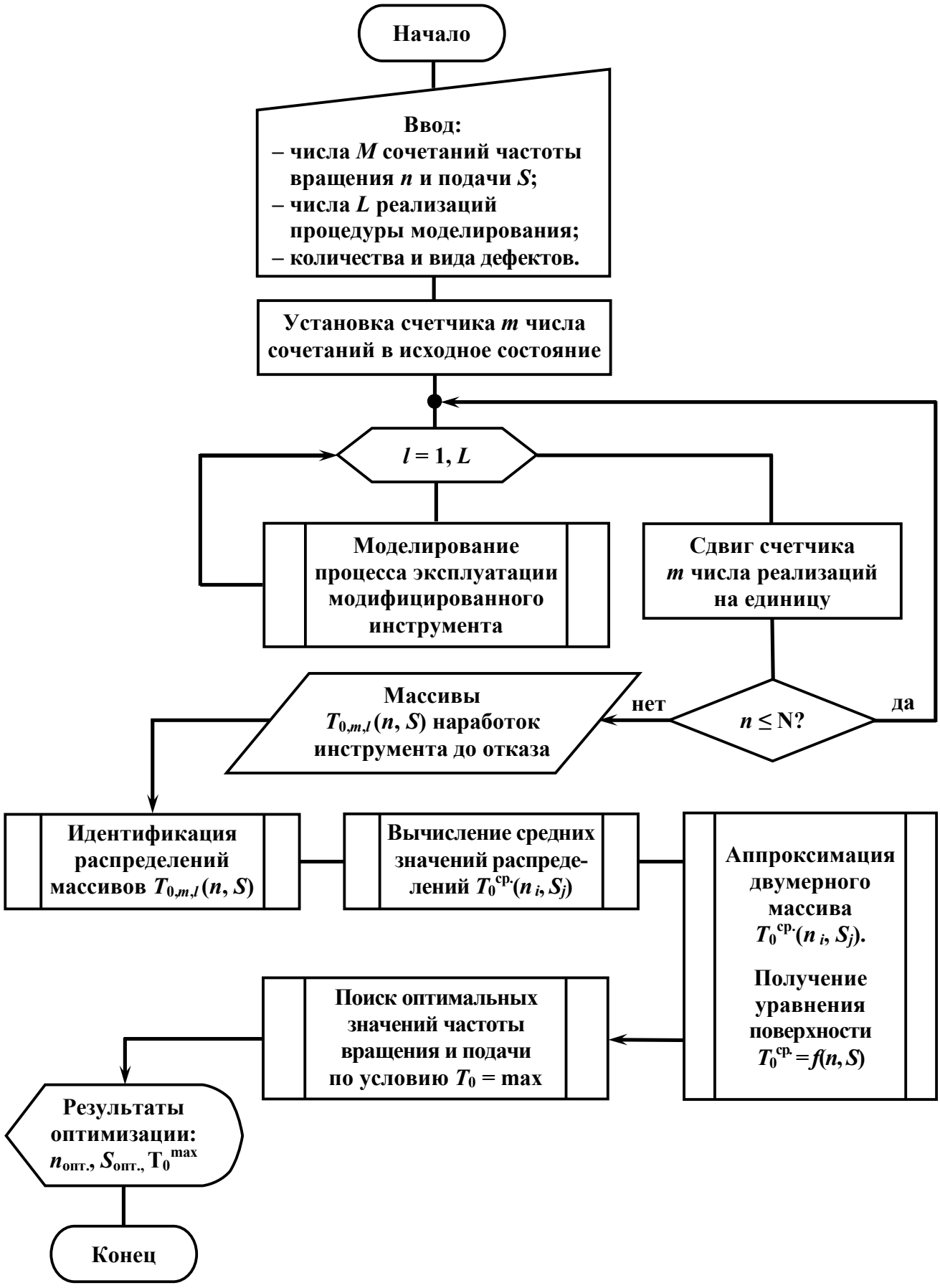


Рис.4.28 – Алгоритм оптимизации процесса эксплуатации модифицированного инструмента

характеристик, например, среднего, значения которого $T_{\text{о}}^{\text{ср.}}(n_i, S_j)$, по сути, становятся точками поверхности отклика времени стойкости на режим эксплуатации модифицированного инструмента.

На втором этапе производится аппроксимация двумерного массива $T_{\text{о}}^{\text{ср.}}(n_i, S_j)$ выражением $T_{\text{о}}^{\text{ср.}} = f(n, S)$. С этой целью можно использовать различные программные приложения Microsoft Office, например, DataFit 9.0, которое позволяет не только строить поверхности по дискретным данным, но и находить их уравнения.

На третьем этапе реализуется процедура оптимизации значений параметров n и S как классический поиск экстремума на построенной поверхности, за который принимается максимальная наработка модифицированного инструмента до отказа, т.е. стратегия оптимизации формулируется как

$$T_{\text{о}}^{\text{ср.}} = f(n, S) \rightarrow \max. \qquad (4.2)$$

В настоящее время существует большое число методов оптимизации, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки, однако целесообразным является использование метода, который позволяет эффективно отыскивать глобальный максимум функции (4.1). Одним из таких методов является метод Хука-Дживса [187], суть которого состоит в комбинации исследующего поиска и ускоряющегося поиска по образцу.

Исследующий поиск начинается с некоторым шагом из точки, которая соответствует начальным значениям оптимизируемых параметров. После перебора всех параметров с целью определения точки, в которой будет достигнуто комплексное увеличение значения функции (4.1), исследующий поиск завершается, а полученная при этом точка принимается за базовую.

Поиск по образцу заключается в реализации единственного шага из полученной базовой точки вдоль прямой, соединяющей ее с предыдущей базовой точкой. Новая базовая точка определяется в соответствии с формулой

$$x_p^{(k+1)} = x^{(k)} + (x^{(k)} - x^{(k-1)}). \qquad (4.2)$$

Если при движении по образцу значение функции (4.1) начинает уменьшаться, то эта точка фиксируется в качестве временной базовой и в ее окрестности производится исследующий поиск. В случае положительного результата она

принимается за новую базовую, в случае отрицательного осуществляется возврат в точку $x^{(k)}$ и исследующий поиск повторяется вновь. Если и здесь результат будет отрицательным, производится уменьшение шага и процедура оптимизации повторяется. Поиск завершается, когда шаг становится меньше некоторой наперед заданной величины. Соответствующие найденному T_o значения n и S и будут являться оптимальными.

В качестве примера на рисунке 4.29 представлен пример результатов второго и третьего этапов работы алгоритма.

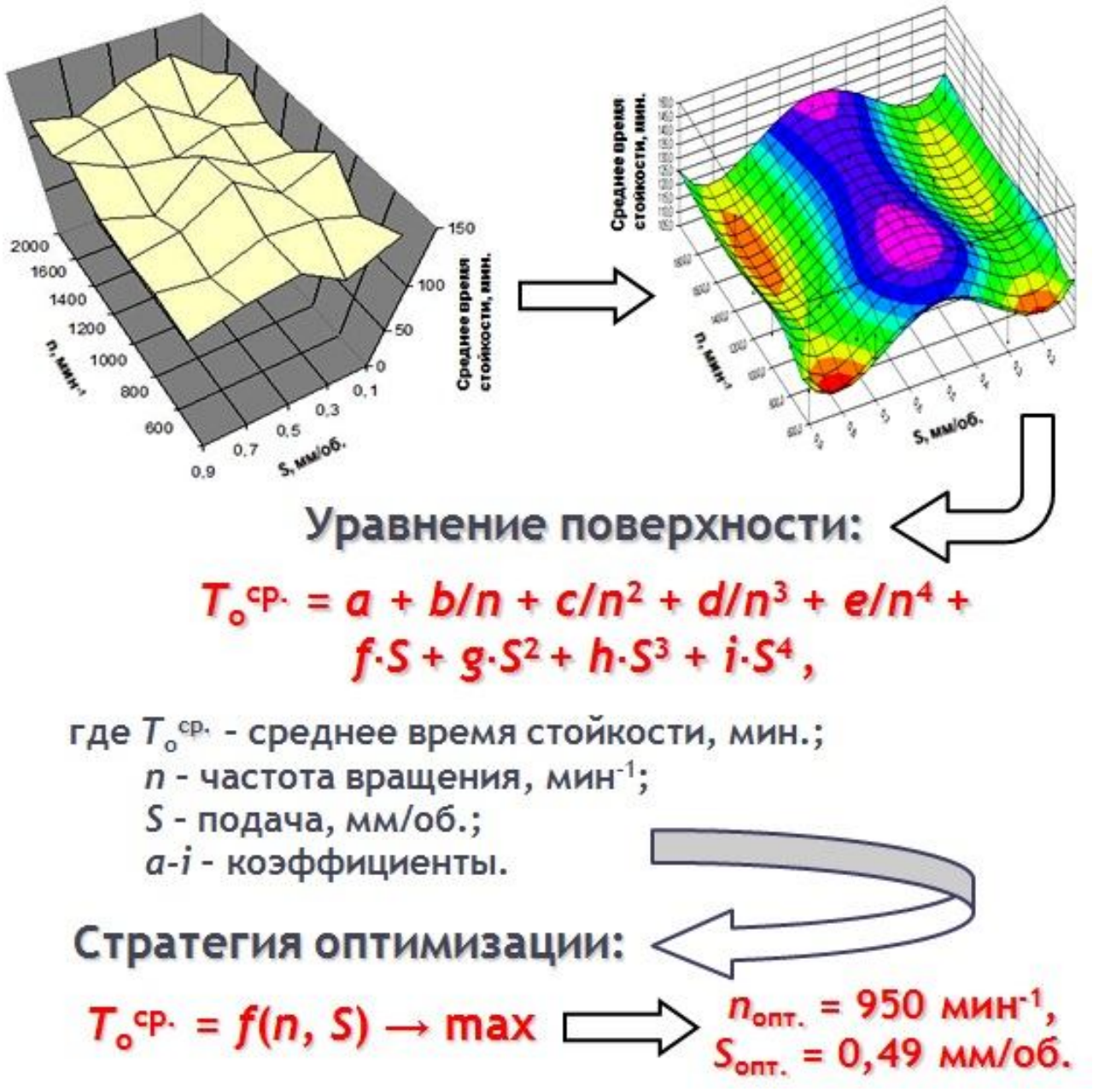


Рисунок 4.29 – Пример работы алгоритма оптимизации

4.5. База знаний системы

Материалы практической реализации процесса оценивания качества эксплуатации модифицированного инструмента и материалы, по которым они были получены, могут быть положены в основу формирования базы знаний системы оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента (рисунок 4.30).

Рисунок 4.30 – Структура базы знаний компьютерной системы

По своей сути, формирование базы сводится к решению вопроса о представлении знаний; наиболее часто для этого используются семантические сети или фреймы [188]. Однако с учетом того, что в данном случае знания несут в большей степени информационную функцию, целесообразным является их представление в виде так называемой простой базы [189]: документации, руководств, статей,

технического обеспечения. В данном случае основным документом базы будет гипертекст (электронный справочник), структура (содержание) которого разрабатывается на этапе решения принципиальных вопросов, связанных с созданием системы оценивания, прежде всего с обоснованием структуры базы ее данных.

Формирование гипертекста происходит в режиме сеансного интерактивного взаимодействия с системой, и предполагает последовательное выполнение следующих действий [190]:

– внесение в базу информации: текстовой, графической или табличной;

– перемещение внесенной информации в соответствующий раздел справочника;

– размещение и форматирование информации в разделе;

– сохранение измененного раздела.

Предусмотрено также редактирование уже сформированных разделов.

Воспроизведение справочника может осуществляться как полностью, так и фрагментарно на основе переходов по гиперссылкам.

В заключение отметим, что двумя наиболее важными требованиями к хранящейся в справочнике информации, являются ее достоверность (на уровне как конкретных, так и обобщенных сведений) и релевантность (в аспекте степени практической применимости), обеспечиваемыми способами обработки содержащихся в базе данных и принимаемыми по результатам обработки решениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Материалы исследований, выполненных по повышению надежности модифицированного металлорежущего инструмента на основе автоматизированного оценивания качества процесса его эксплуатации по параметрам дефектов рабочей части, позволяют сформулировать следующие основные результаты и выводы.

1. Модификация рабочей части металлорежущего инструмента воздействием низкотемпературной плазмы является одним из перспективных направлений повышения его эксплуатационной надежности. Поскольку основным результатом модификации становится повышение устойчивости инструмента к образованию дефектов на его рабочих поверхностях, формирующих постэксплуатационное состояние, постольку дефекты могут быть использованы для оценивания качества процесса эксплуатации инструмента с целью поиска условий, обеспечивающих повышение его эксплуатационной надежности.

2. На основе методов кластерного анализа, обработки категоризированных данных, расстановки приоритетов и разработанной стратегии принятия решений разработана процедура классификации дефектов, позволившая:

– объединить дефекты в три группы и с учетом использованных для классификации признаков, а также комплекса дополнительных параметров, уточняющих вид, расположение и количество дефектов присвоить им названия микролокальные, микроповерхностные и макродефекты;

– определить параметры дефектов на основе установления их взаимосвязи с условиями формирования для оценивания направлений и степени воздействия дефектов на состояние модифицированного инструмента в процессе его эксплуатации.

Универсальность процедуры позволяет использовать ее и для классификации дефектов обычного инструмента.

3. Разработан способ оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента с использованием его имитационной модели. Модель отображает процессы, связанные с изменением состояния модифицированного ин-

струмента, через параметры дефектов и расчетную схему самоорганизации модифицированного слоя. Технология моделирования обладает элементами адаптации как к входной информации, так и к информации, получаемой в ходе моделирования. Это позволяет, воспроизводя процессы самоорганизации модифицированного слоя, возникновения и развития дефектов, определять время работы инструмента, вероятности возникновения отказов и формировать траекторию изменения его состояния, т.е. получать информацию об основных закономерностях и причинах изменения состояния модифицированной рабочей части инструмента.

4. Создана компьютерная система автоматизированного оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента, включающая базу данных и комплекс имитационного моделирования. Система организована таким образом, чтобы обеспечивала не только получение информации, но и ее анализ, позволяющий:

– раскрывать физические механизмы, лежащие в основе формирования информации о процессах модификации и эксплуатации модифицированного инструмента;

– обеспечивать достоверность (на уровне как конкретных, так и обобщенных сведений) и релевантность (в аспекте степени практической применимости) полученной информации, т.е. выводить ее на уровень знаний.

5. Практическая реализация оценивания и моделирования качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента на примере сменных многогранных пластин из вольфрамокобальтовых и титано-вольфрамокобальтовых твердых сплавов позволила:

– определить, что физико-механические свойства поверхностного слоя материалов в процессе изготовления и модификации режущего инструмента претерпевают изменения в соответствии с закономерностями технологического наследования, поскольку влияющие на свойства факторы действуют не аддитивно, а мультипликативно, т.е. в соответствии со своими величинами. Как следствие, это приводит не только к различному повышению времени стойкости инструмента, но и к различной степени сопротивляемости нагрузкам при резании, вызывающим

различные по величине и направлению изменения состояния не только модифицированного слоя, но и матрицы, вплоть до качественных (проседание);

– установить, что статистической моделью времени стойкости модифицированного инструмента является гамма-распределение, позволяющее по значению параметра формы оценить связь отказов инструмента не только с процессами износа, но и с процессами образования и развития дефектов. Большему значению параметра формы соответствует повышение роли отказов, вызванных истиранием модифицированного слоя, т.е. параметрических, меньшему – повышение роли отказов, вызванных образованием дефектов, т.е. функциональных. В связи с этим гамма-распределение можно рассматривать как статистическое отображение механизма повышения сопротивляемости модифицированного слоя процессам ползучести и изнашивания;

– определить условия, обеспечивающие повышение эффективности эксплуатации модифицированного металлорежущего инструмента. Выполнение условий способствует формированию модифицированного слоя оптимальной толщины и плотности и созданию такого режима эксплуатации инструмента, при котором процесс постепенного истирания модифицированного слоя будет преобладать над процессами образования и развития дефектов. Практически это позволит изменить вид износа инструмента с абразивного, диффузионного и адгезионного износа матрицы на механический износ (истирание) модифицированного слоя;

– разработать алгоритм оптимизации процесса эксплуатации модифицированного инструмента.

6. Практическая реализация автоматизированного оценивания качества процесса эксплуатации по параметрам дефектов рабочей части позволяет прогнозировать следующие результаты дальнейшего повышения показателей надежности и эффективности использования модифицированного металлорежущего инструмента:

– времени стойкости в 1,5…1,6 раза;

– производительности обработки в 1,2…1,6 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проников А.С. Параметрическая надежность машин / А.С. Проников. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 560 с.

2. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник: в 3 т. Т.1. Проектирование станков / А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов и др.; под общ. ред. А.С. Проникова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1994. – 444 с.

3. Износостойкость пар трения, упрочненных методом электроакустического напыления / В.С. Минаков, О.Е. Тарелов, Д.Д. Дымочкин, В.Х. Аль-Тибби // СТИН. – 2005. – №6. – С. 34-35.

4. Наплавочные сплавы для повышения износостойкости рабочих поверхностей / А.К. Прыгаев, Г.М. Сорокин, А.П. Ефремов, Д.С. Буркеня // Вестник машиностроения. – 2006. – №9. – С. 46-49.

5. Гефаров А.М. Технологические способы повышения износостойкости деталей нефтепромыслового оборудования / А.М. Гефаров, Н.Ш. Алиев // СТИН. – 2011. – №6. – С. 30-35.

6. Киричек А.В. Параметры упрочняющей статико-импульсной обработки / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // СТИН. – 2006. – №2. – С. 30-33.

7. Обеспечение точности обработки на автоматизированных прецизионных металлорежущих станках / Б.М. Бржозовский, А.А. Игнатьев, В.А. Добряков, В.В. Мартынов: обзорн. инф.. – М.: ВНИИТЭМР, 1992. – 68 с. (Машиностр. пр-во. Сер. Технология и оборудование обработки металлов резанием. Вып.5).

8. Перекомпонуемые производственные системы реконфигурируемого производства И.Ю. Юнин, А.Н. Феофанов СТИН 2010 № 8 стр. 2-6.

9. Романченко М.К. Устройства, снижающие шум и вибрации на деревообрабатывающем производстве / М.К. Романченко // СТИН. – 2010. – №8. – С. 38-40.

10. Жиганов В.И. Повышение точности прецизионных токарных станков путем динамической балансировки технологической системы / В.И. Жиганов, Ю.Н. Санкин // СТИН. – 2011. – №5. С. 2-5.

11. Козочкин М.П. Особенности вибрации при резании материалов / М.П. Козочкин // СТИН. – 2009. – №1. С. 29-35.

12. Дружинский И.А. Концепция конкурентоспособных станков / И.А. Дружинский. – Л.: Машиностроение, 1990. – 247 с.

13. Бушуев В.В. Красота конструкций / В.В. Бушуев. – СТИН. – 2009. – №3. – С. 2-5.

14. Афонина Н.А. Экспериментальная оценка обеспечения виброустойчивости процесса резания на основе управляемой девиации скорости резания / Н.А. Афонина. – СТИН. – 2005. – №11. С. 10-12.

15. Зориктуев В.Ц. Мехатронные станочные системы / В.Ц. Зориктуев // СТИН. – 2007. – №10. – С. 10-16.

16. Мартинов Г.М. Современные тенденции в области числового программного управления станочными комплексами / Г.М. Мартинов, Л.И. Мартинова // СТИН. – 2010. – №7. С. 7-11.

17. Рубашкин И.Б. Оптимизация металлообработки при прямом цифровом управлении станками / И.Б.Рубашкин. – Л., Машиностроение, 1980. – 144 с.

18. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – Л.: Машиностроение. 1986. – 184 с.

19. Бржозовский Б.М. Обеспечение надежности определения режимов лезвийной обработки для автоматизированного станочного оборудования / Б.М. Бржозовский, Н.Л. Плотников. – Саратов: СГТУ, 2001. – 88 с.

20. Ерофеев Н.А. Амплитудно-частотная характеристика термодинамической неустойчивости процесса резания титанового сплава / Н.А. Ерофеев, Л.А. Вакуленко // Физические процессы при резании металлов: сб. ст. – Волгоград: Волгоград. политехн. ин-т, 1986. – С. 32-38.

21. Маркарьян Ю.А. Управление процессом глубокого сверления / Ю.А. Маркарьян // Станки и инструмент. – 2007. – №6. – С. 2-4.

22. Солоненко В.Г. Повышение качества режущего инструмента / В.Г. Солоненко, Л.А. Солоненко, И.В. Дваденко и др. // СТИН. – 2007. – №7. – С. 12-16.

23. Гаврикова И.С. Влияние температуры на формирование ионно-плазменных покрытий / И.С. Гаврикова, А.И. Додонова, В.В. Мокрый и др. // Физика и химия обработки материалов. – 1989. – №1. – С. 140-141.

24. Табаков В.П. Повышение работоспособности инструмента из быстрорежущей стали / В.П. Табаков, Ю.Н. Николаев, С.А. Журавский // Физикохимия процессов резания металлов: межвуз. сб. науч. ст. – Чебоксары: Чуваш. ун-т, 1986. – С. 51-55.

25. Табаков В.П. Повышение стойкости режущего инструмента путем изменения адгезионно-прочностных свойств износостойкого покрытия / В.П. Табаков, Ю.Н. Николаев, Ю.В. Полянсков и др. // Станки и инструмент. – 1990. – №3. – С. 22-23.

26. Платонов Г.Л. Влияние содержания углерода в твердых сплавах на скорость роста покрытий из карбида титана и стойкость инструмента с этими покрытиями / Г.Л. Платонов и др. / Порошковая металлургия. – 1989. – №12. – С. 29-34.

27. Мигранов М.Ш. Износостойкость и трибологические свойства покрытий для режущего инструмента / М.Ш. Мигранов, А.Ш. Махмутова // Вестник машиностроения. – 2007. – №11. – С. 43-46.

28. Табаков В.П. Влияние состава трехэлементных нитридных покрытий на тепловое и напряженное состояние режущего инструмента и интенсивность его износа / В. П. Табаков, А. В. Чихранов // СТИН. – 2009. – №10. – С. 20-26.

29. Полевой С.Н. Упрочнение металлов: справочник / С.Н. Полевой, В.Д. Евдокимов. – М.: Машиностроение, 1986. – 320 с.

30. Лабунец В.Ф. Износостойкие боридные покрытия / В.Ф. Лабунец, Л.Г. Ворошкин. – Киев: Техніка, 1989. – 158 с.

31. Рогов В.И. Технологические возможности установки ЭДГУ-1 для электроискрового легирования / В.И. Рогов, Ю.А. Эпов // Повышение стойкости режущего инструмента: сб. науч. трудов. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1983. – С. 36-39.

32. Лашманов В.И. Повышение износостойкости инструмента / В.И. Лашманов // ПРОинструмент. – 2002. – №18. – С. 16-18.

33. Бровер Г.И. Особенности лазерной и электронно-лучевой обработки инструментальных сталей / Г.И. Бровер, А.А. Шульга, П.И. Русин // Электронная обработка материалов. – 1989. – №1(151). – С. 15-18.

34. Разработка режимов лазерного упрочнения: отчет о НИР / Физ.-тех. ин-т АН БССР: №ГР 80049952; инв. №0283 0036873. – Минск, 1981. – 30 с.

35. Латышев В.Н. Повышение стойкости быстрорежущего инструмента ионно-лазерным поверхностным упрочнением / В.Н. Латышев, А.Г. Наумов, В.В. Новиков и др. // Станки и инструмент. – 2005. – №6. – С. 17-20.

36. Даниленко С.А. Технологическая установка с лазером ЛТН-102А / С.А. Даниленко, И.М. Муха // Технология и организация производства. – 1988. – №2. – С. 48-49.

37. Смольников Е.А. Термическая и химико-термическая обработка инструментов в соляных ваннах / Е.А. Смольников. – М.: Машиностроение. – 1989. – 148 с.

38. Никитин А.И. Исследование влияния термоокисления на работоспособность твердосплавных режущих пластин / А.И. Никитин, В.П. Трифонов // Физикохимия процесса резания металлов: сб. статей. – Чебоксары: Чуваш. ун-т, 1986. – С. 71-74.

39. Шумаков А.И. Поверхностное упрочнение деталей сверхнауглероживанием с последующим азотированием / А.И. Шумаков, Л.А. Желанова, В.Р. Бежин // Современные проблемы триботехнологии: тез. докл. Всесоюзн. науч.-тех. конф. – Николаев, 1988. – С. 83-84.

40. Разработка и внедрение технологии химико-термической обработки деталей и инструмента в условиях тлеющего разряда: отчет о НИР (окончательн.) / МВТУ им. Н.Э Баумана: №ГР 80005837; Инв. №02840 035457. – М., 1983. – 106 с.

41. Химико-термическая обработка металлов и сплавов: тез. докл. 1V Всесоюзн. науч. конф. – Минск, 1981. – 398 с.

42. Котков Ю.К. Повышение износостойкости металлорежущего инструмента из быстрорежущих сталей / Ю.К. Котков, А.Г. Наумов // Физика триботехнологических систем: сб. ст. – Иваново: Иванов. хим.-техн. ин-т, 1988. – С. 94-98.

43. Бхатнагар С.С. Азотирование Nitriding / Bhatnagar S.S. // Tool and alloy steels. – 1985. – Т.19. – №5. – С. 155-159.

44. Куликов А.И. Исследование нового процесса азотирования металлов и сплавов / А.И. Куликов // Машиностроитель. – 1995. – №4-5. – С. 16-17.

45. Разработка прогрессивного технологического процесса упрочнения режущего инструмента из быстрорежущей стали (заключительный): отчет по х/д теме / Ивановск. ордена Труд. Красн. Знамени хим.-технол. ин-т: №ГР 01821005550; инв. №02025 005545. – Иваново, 1981. – 52 с.

46. Пархоменко В.А. Плазменное упрочнение сверл из стали Р6М5 / В.А. Пархоменко и др. // Технология и организация производства. – 1989. – №2. – С. 55-56.

47. А.с. 1793004 СССР. МКИ3 С 23 С 8.36. Способ химико-термической обработки изделий из твердого сплава / Г.Е. Рабинович и др. – 2 с.

48. Райчук Д.Ю. Поверхностное упрочнение стали методом плазменной закалки с нанесением покрытия карбида кремния / Д.Ю. Райчук и др. // Повышение качества, надежности и долговечности изделий из конструкционных, жаропрочных, порошковых и инструментальных сталей и сплавов: сб. ст. – Ленинград: Ленинград. дом науч.-техн. пропаганды, 1986. – С. 73-77.

49. Дашкевич И.П. Плазменное упрочнение металлообрабатывающего инструмента и штамповой оснастки / И.П.Дашкевич, Г.С. Княжевская, Ю.Г. Томашевич // Новая высокочастотная техника для машиностроительного производства: сб. науч. тр. – М.: ВНИИЭТО, 1988. – С. 32-37.

50. Пат. 1407384 Россия. МКИ5 Н 05 Н 1/00. Способ обработки металлических деталей импульсной плазмой / В.Н. Ляшенко – 4 с.

51. Исследование влияния параметров обработки материалов высокотемпературной импульсной плазмой на повышение их эксплуатационных характеристик: отчет о НИР / Всесоюз. межотраслевой НИИ по защите металлов от коррозии (ВМНИИК): №ГР 01.85.0037897; инв. №02860 108738. – М., 1986. – 36 с.

52. Иванов В.А. Микроплазменная технология упрочнения металлов. E-mail IVANOV@FPL.GPI.RU URL: http://www.plasmaiofan.ru.

53. Салькова С.С. Опыт применения ионного азотирования в машиностроении / С.С. Салькова, В.А. Рудман. – Л.: Ленинград. дом науч.-тех. пропаганды, 1987. – 20 с.

54. Каплун В.Г. Упрочнение в тлеющем разряде деталей топливной аппаратуры. / В.Г. Каплун // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 1990. – №18. – С. 86-89.

55. Современное электротермическое оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов: тез. докл. II Всесоюзн. науч.-тех. симпозиума. – М.: Информэлектро, 1990. – 132 с.

56. Немешев Д.Ф. Износо- и окалиностойкость сталей различных классов после нанесения покрытий ионно-плазмекнной бомбардировкой. / Д.Ф. Немешев, Ю.В. Шахназаров. – Л.: Ленинград. дом науч.-тех. пропаганды, 1986. – С. 63-66.

57. Гусева Н.И. Упрочнение деталей машин методом ионной имплантации / Н.И. Гусева // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1991. – №4. – С. 80-89.

58. Лабунов В.А. Ионно-лучевые источники для обработки поверхности твердых тел и получения тонких пленок / В.А.Лабунов, Г. Рейсе // Зарубежная электронная техника. – 1982. – Вып.1. – С. 1-45.

59. Погребняк А.Д. Модификация свойств металлов под действием мощных ионных пучков / А.Д. Погребняк, Ремнев Г.Е., Чистяков С.А., Легачев А.Е. // Известия ВУЗов. Физика. – 1987. – №1. – С. 52-55.

60. Бельский С.Е. Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента / С.Е. Бельский, Р.Л. Тофренец. – Мн.: Наука и техника, 1984. – 128 с.

61. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущего инструмента / А.Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1966. – 263 с.

62. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М. Машиностроение, 1982. – 320 с.

63. Основы трибологии (трение, износ, смазка): учеб. для технич. ВУЗов. – М.: Центр «Наука и техника», 1995. – 778 с.

64. Зорев Н.Н. Исследования процесса резания / Н.Н. Зорев. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.

65. Усманов К.Б. Влияние внешних сред на износ и стойкость режущих инструментов / К.Б. Усманов. – М.: Машиностроение, 1984. – 112 с.

66. Башков В.М. Испытания режущего инструмента на стойкость / В.М. Башков, П.Г. Кацев. – М. Машиностроение, 1985. – 134 с.

67. Солоненко В.Г. Критерий износа металлорежущих инструментов / В.Г. Солоненко, Г.А. Зарецкий // Надежность инструментальных и станочных систем: межвуз. сб. научн. тр. – Краснодар: Краснодар. политехн. ин-т., 1991. – С. 10-15.

68. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

69. Гостев Г.В. Исследование закономерностей рассеивания стойкости торцевых и концевых фрез / Г.В. Гостев, В.А. Колюнов, Е.В.Гусев // Физико-химия процессов резания металлов: межвуз. сб. науч. ст. – Чебоксары: Чувашский гос. ун-т, 1986. – С. 75-77.

70. Гуревич Д.М. Расчет стойкости твердосплавного инструмента в условиях адгезионно-усталостного изнашивания карбидов / Д.М. Гуревич // Повышение эксплуатационных свойств деталей машин и инструментов: сб. научн. тр. – Иркутск: Иркутский политехн. ин-т, 1984. – 140 с.

71. Постнов В.В. Влияние микротвердости режущего инструмента на его изнашивание / В.В. Постнов, С.Х. Хадиуллин, И.Г. Каримов // СТИН. – 2007. – №10. – С. 34-37.

72. Бобровский В.А. Электродиффузионный износ инструмента / В.А. Бобровский. – М. Машиностроение, 1970. – 200 с.

73. Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом / Л.Ш. Шустер. – М.: Машиностроение, 1988. – 96 с.

74. Егоров С.В. Резание конструкционных материалов и режущий инструмент / С.В. Егоров, А.Г. Червяков. – М.: Высш. шк., 1975. – 168 с.

75. Кравченко Б.А. Силы, остаточные напряжения и трение при резании металлов / Б.А.Кравченко. – Куйбышев, Облиздат, 1962. – 134 с.

76. Горнова Н.Н. Взаимосвязь шероховатости обрабатываемой поверхности и оптимальной скорости резания / Н.Н. Горнова, Ю.М. Захаров, Е.В. Лукьянов //

Повышение эксплуатационных свойств деталей машин и инструментов: сб. науч. тр. – Иркутск: Иркутс. политех. ин-т, 1984. – С. 99-103.

77. Талантов Н.В. Закономерности формирования контактных касательных напряжений при резании сталей / Н.В. Талантов // Физические процессы при резании металлов: межвуз. сб. науч. тр. – Волгоград: Волгоград. политехн. ин-т, 1986. – С.13-14.

78. Степанов П.М. Особенности изнашивания инструментов при обработке серого чугуна / П.М. Степанов // Физико-химия процесса резания металлов: межвуз. сб. науч. тр. – Чебоксары: Чуваш. гос. ун-т, 1986. – С. 60-64.

79. Подураев В.Н. Исследование износа твердосплавного режущего инструмента / В.Н. Подураев, С.М.Касьян // Станки и инструмент. – 1984. – №5. – С. 25-27.

80. Казаков Н.Ф. Радиоактивные изотопы в исследовании износа режущего инструмента / Н.Ф. Казаков. – Машгиз, 1960. – 138 с.

81. Гуревич Д.М. Механизм изнашивания твердосплавного инструмента / Д.М. Гуревич // Перспективы развития резания конструкционных материалов. – М., 1980. – С. 95-97.

82. Солоненко В.Г. К вопросу об износе режущих инструментов / В.Г. Солоненко, Г.А.Зарецкий // Надежность инструментальных и станочных систем: межвуз. сб. науч. тр. – Ростов-на-Дону: Изд. РИСХМ, 1991. – С. 56-62.

83. Наяк Кук. Влияние температурных воздействий на износ инструмента / Кук Наяк // Труды междунар. общества инженеров-механиков. Сер.8. Конструирование и технология машиностроения. – 1966. – Т.88. – №1. – С. 82-90.

84. Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с.

85. Якубов Ф.Я. Энергетические соотношения процесса механической обработки материалов / Ф.Я. Якубов. – Ташкент: ФАН. – 1985. – 105 с.

86. Кабалдин Ю.Г. Повышение надежности инструментального обеспечения гибких производственных систем / Ю.Г. Кабалдин, Б.Я. Мокрицкий, Б.И. Молоканов. – Комсомольск-на-Амуре: Краевой совет НТО, 1988.– 64 с.

87. Якубов Ф.Я. Исследование связи внутренних энергетических характеристик инструментального материала с его износостойкостью / Ф.Я. Якубов, В.А. Ким, А.А. Мухаммедов / Перспективы развития резания конструкционных материалов. – М., 1980. – С. 103-108.

88. Мокрицкий Б.Я. Управление работоспособностью инструмента при нанесении покрытий / Б.Я. Мокрицкий. // СТИН. – 2010. – №11. – С. 11-15.

89. Верещака А.С. К вопросу о диагностике состояния твердосплавных инструментов с покрытием в условиях использования ГПС / А.С. Верещака, М.П. Козочкин, И.У. Сулейманов, В.В. Кузин // Вестник машиностроения. – 1988. – №9. – С. 40-44.

90. Бржозовский Б.М. Упрочнение режущего инструмента воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. – 176 с.

91. Бржозовский Б.М. Повышение эффективности механической обработки деталей на основе применения инструмента с модифицированными рабочими поверхностями и оптимизации процесса резания / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, М.Б. Бровкова, Е.П. Зинина // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2012. – №1. – С. 3-10.

92. Патент №2428521 РФ. Способ обработки режущего инструмента в стационарном комбинированном разряде низкотемпературной плазмы пониженного давления / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина // Б.И. – 2011. – №25.

93. Адаптивное управление станками / Б.М. Базров, Б.С. Балакшин, И.Н. Баранчукова и др.; под ред. Б.С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1973. – 688 с.

94. Волошин Д.В. Методика выбора оптимальных траекторий формообразующих движений при обработке резанием / Д.В.Волошин, В.Л. Заковоротный // Исследования станков и инструментов для обработки сложных и точных поверхностей: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2002. – С. 35-47.

95. Зориктуев В.Ц. Термодинамическое описание контактных процессов при нестационарном резании / В.Ц. Зориктуев, В.В. Постнов, М.В. Паршина // Динамика технологических систем: сб. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. – Саратов: СГТУ, 2004. – С. 145-148.

96. Зориктуев В.Ц. Мехатронные станочные системы / В.Ц. Зориктуев // СТИН. – 2007. – №10. – С. 10-16.

97. Активный контроль размеров / С.С. Волосов, М.Л. Шлейфер, В.Я. Рюмкин и др.; под ред. С.С. Волосова. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.

98. Невельсон М.С. Автоматическое управление точностью металлообработки / М.С. Невельсон. – Л.: Машиностроение, 1973. – 176 с.

99. Сизенов Л.К. Анализ и расчет точности обработки в судовом машино- и приборостроении / Л.К. Сизенов, А.М. Масленников. – Л.: Судостроение, 1988. – 272 с.

100. Письман В.Л. Метод автоматической подналадки металлорежущих станков / В.Л. Письман // Станки и инструмент. – 1989. – №6. – С. 7-8.

101. Martynov V.V. The problem of providing operational reliability of cutting tools with a modified working part / V.V. Martynov, E.S. Pleshakova // Bringing Science to Life: Наука и жизнь: материалы научно-практической Интернет-конференции с международным участием 2013. – Saratov: Saratov State Technical University, 2013. – P. 49-51.

102. Надежность режущего инструмента с модифицированной рабочей частью / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина, Е.С. Плешакова // СТИН. – 2014. – №5 – С. 8-11.

103. Прогрессивные направления повышения эффективности использования металлорежущего инструмента / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, О.В. Захаров и др. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 256 с.

104. Reliability of Modified Cutting Tools / B.M. Brzhozovskii, V.V. Martynov, E.P. Zinina, E.S. Pleshakova // Russian Engineering Research. – 2014. – Volume 34. – Issue 12. – Pp. 769-772.

105. Экспериментальное исследование качества эксплуатации модифицированного инструмента / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Вестник машиностроения. – 2015. – №6. – С.69-72.

106. Автоматизированное оценивание качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента по параметрам дефектов рабочей части / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина, Е.С. Плешакова // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование материалы – 2013: мат. Междунар. науч.-техн. конф. и Форума «Повышение конкурентоспособности и энерго-

эффективности машиностроительных предприятий в условиях ВТО». Ч.2. – Казань, Фолиант, 2013. – С. 28-31.

107. Зинина Е.П. Классификация дефектов режущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы / Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Технологическое обеспечение машиностроительных производств: сб. докл. I междунар. заочн. науч.-техн. конф. – Челябинск: ЮУрГУ (НИУ), 2013. – С. 292-297.

108. Жамбю М. Иерархический кластер-анализ и соответствия: пер. с фр. / М. Жамбю. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 342 с.

109. Мартынов В.В. Классификация дефектов модифицированного режущего инструмента / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – №12. – С.21-25.

110. Классификация и кластер / под ред. Дж. Вэн Райзина. – М.: Мир, 1980. – 390 с.

111. Sneath P.H.A. Numerical taxonomy: The principles and practices of numerical classification / P.H.A. Sneath, R.R. Sokal. – San-Francisco: Freeman, 1973. – 573 p.

112. Ивахненко А.Г. Моделирование сложных систем (информационный подход). – Киев: Вища школа, 1987. – 63 с.

113. Каримов Р.Н. Обработка экспериментальной информации. Ч.1. Разведочный анализ. Анализ качественных данных: учеб. пособие / Р.Н. Каримов. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2002. – 112 с.

114. Грубый С.В. Имитационное моделирование процессов резания и изнашивания инструмента / С.В. Грубый // Вестник машиностроения. – 2007. – №7. – С. 38-42.

115. Советов Б.Я. Моделирование систем: учебник для вузов / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 1985. – 271 с.

116. Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах: пер. с англ. / Г. Хан, С. Шапиро. – М.: Мир, 1968. – 396 с.

117. Пухальский П.В. Классификация отказов инструмента на основе структуры его конструкции / П.В. Пухальский, В.А. Пухальский // СТИН. – 2011. – №1. – С. 13-15.

118. Рыжкин А.А. Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов / А.А. Рыжкин. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2005. – 311 с.

119. Блюмберг В.А. Какое решение лучше? Метод расстановки приоритетов / В.А. Блюмберг, В.Ф. Глущенко. – Л.: Лениздат, 1982. – 160 с.

120. Глухов Ю.Г. Влияние радиуса ρ на ползучесть режущего клина / Ю.Г. Глухов, Л.А. Хохряков, Т.В. Шитова // Физические процессы при резании металлов: сб. науч. тр. – Волгоград: Изд-во ВолгПИ, 1986. – С. 174-177.

121. Мухортов В.С. Внутренние термические напряжения инструментального материала / В.С. Мухортов // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 3: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ, 2007. – №4. – С. 56-57.

122. Безъязычный В.Ф. Расчетное определение степени влияния покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей / В.Ф. Безъязычный, М.В. Басков // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2017. – №7. – С. 20-24.

123. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

124. Определение параметров дефектов инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 11: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ, 2014. – №8. – С. 13-16.

125. Мартынов В.В. Постановка задачи классификации дефектов модифицированного режущего инструмента / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Бъдещето въпроси от света на науката – 2013: Материали за 9-а международна научна практична конференция. Том 37. Технологии. Химия и химически технологии. – София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2013. – С. 3-7.

126. Плешакова Е.С. Исходные предпосылки к разработке модели процесса формирования состояния режущего инструмента с модифицированной рабочей ча-

стью / Е.С. Плешакова // Исследование сложных технических и технологических систем: науч. сб. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2015. – С.70-77.

127. Табаков В.П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания / В. П. Табаков, Д.И. Сагитов. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 179 с.

128. Липатов А.А. Температурно-силовые характеристики контактного взаимодействия при резании аустенитной стали / А.А. Липатов, Ю.Л. Чигиринский, С.И. Кормилицин // СТИН. – 2013. – № 7. – С. 21-25.

129. Липатов А.А. Расчет температуры на режущих поверхностях инструмента с учетом зависимости теплопроводности обрабатываемого материала от температуры / А.А. Липатов, Ю.Л. Чигиринский // СТИН. – 2012. – № 7. – С. 28-30.

130. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н.В. Талантов. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.

131. Болотина Е.М. Оптимизация периода стойкости режущего инструмента для станков с ЧПУ / Е.М. Болотина, О.И. Аверьянов, И.О. Аверьянова // СТИН. – 2012. – №8. – С. 14-17.

132. Хает Г.Л. Прочность режущего инструмента / Г.Л. Хает. – М.: Машиностроение, 1975. – 189 с.

133. Постнов В.В. Оптимальная температура резания – основа эффективной эксплуатации мехатронных станочных систем / В.В. Постнов // СТИН. – 2009. – №9. – С. 3-8.

134. Анализ возможностей формирования диссипативных структур в поверхностном слое рабочей части металлорежущего инструмента / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина, Е.С. Плешакова // Наукоемкие технологии в машиностроении – 2015 – №8. – С.28-37.

135. Вероятностные методы в вычислительной технике / А.В. Крайников, Б.А. Курдиков, А.Н. Лебедев и др. / под ред. А.Н. Лебедева и Е.А. Чернявского. – М.: Высшая школа, 1986. – 312 с.

136. Хенли Э.Дж. Надежность технических систем и оценка риска: пер. с англ. / Э.Дж. Хенли, Х. Кумамото. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.

137. Пешель М. Применение статистических методов в технике регулирования: пер с нем. / М. Пешель. – М.: Энергия, 1977. – 192 с.

138. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.

139. Кабалдин Ю.Г. Математическое моделирование динамической устойчивости системы резания в виде нелинейного осциллятора с разрывными характеристиками / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Биленко, П.А. Саблин // Вестник машиностроения. – 2006. – №10. – С. 35-43.

140. Грановский Г.И. Резание металлов: учебник для машиностроительных и приборостроительных специальностей вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.

141. Справочник по машиностроительным материалам / Под ред. Г.И. Погодина-Алексеева. Т.1. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроительной литературы, 1959. – 908 с.

142. Справочник нормировщика-машиностроителя. Т.2. Техническое нормирование станочных работ / Под ред. Е.И. Стружестраха. – М.: Гос. науч.-техн, изд-во машиностроит. лит., 1961. – 892 с.

143. Интегральное оценивание качества процесса плазменной модификации рабочей части металлорежущего инструмента / Б.М. Бржозовский, С.Б. Вениг, В.В. Галушка и др. – Саратов: Издательский дом «Райт-Экспо», 2014. – 160 с.

144. Праведников И.С. Исследование механизма образования циклической стружки / И.С. Праведников // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2011. – №3. – С. 283-296 (http://www.ogbus.ru).

145. Санкин Ю.Н. Устойчивость токарных станков при нелинейной характеристике процесса резания / Ю.Н. Санкин, Н.Ю. Санкин; под общ. ред. Ю.Н. Санкина. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 137 с.

146. Мигранов М.Ш. Исследование износостойких покрытий для режущего инструмента с нанокристаллической структурой / М.Ш. Мигранов // Известия вузов. Машиностроение. – 2005. – №1. – С. 56-62.

147. Аналитическая модель износостойкости модифицированного режущего инструмента / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Вестник машиностроения. – 2017. – №7. – С.75-80.

148. Wear Resistance of Cutting Tools with a Plasma-Modified Surface Layer / B.M. Brzhozovskii, E.P. Zinina, V.V. Martynov, E.S. Pleshakova // Russian Engineering Research. – 2017. – Vol.37, №10. – Pp. 882-887.

149. ГОСТ 8233-56. Сталь. Эталоны микроструктуры. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 10 с.

150. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 21 с.

151. ГОСТ 801-78. Сталь подшипниковая. Технические условия. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 24 с.

152. ГОСТ 4543-71. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 39 с.

153. Лахтин Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1972. – 510 с.

154. Владимиров В.И. Физическая природа разрушения металлов / В.И. Владимиров. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.

155. Тахман С.И. Разработка единых моделей процесса изнашивания инструментальных твердых сплавов / С.И. Тахман // Вестник машиностроения. – 2008. – №9. – С.56-59.

156. Берсудский А.Л. Влияние напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя на износостойкость поверхностей деталей / А.Л. Берсудский // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2006. – №6. – С.52-59.

157. Обоснование способа оценивания состояния рабочей части модифицированного режущего инструмента / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Наука и образование в XXI веке: сб. науч. тр. по мат. Междунар. науч.-практ. конф. В 34 ч. Ч.27. – Мин. обр. и науки РФ. Тамбов: Изд-во ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С. 31-33.

158. Плешакова Е.С. Инновационный программный комплекс оценивания состояния модифицированного режущего инструмента / Е.С. Плешакова // Инновационный программный комплекс оценивания состояния модифицированного режущего инструмента / Е.С. Плешакова // Инновации в профессиональном обра-

зовании и научных исследованиях вуза: сб. мат. Междунар. науч.-практ. конф. Ч.3. – Брянск: БГТУ, 2014. – С. 34-39.

159. Плешакова Е.С. Разработка программного комплекса оценивания состояния модифицированного режущего инструмента / Е.С. Плешакова, В.В. Мартынов // Участники школы молодых ученых и программы УМНИК: сб. тр. XXVII Междунар. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-27»: в 12 т. Т.11 / под общ. ред. А.А. Большакова. – Саратов: СГТУ, 2014. – С. 58-61.

160. Павловская Т.А. C#. Программирование на языке высокого уровня: учебник для вузов / Т.А. Павловская. – СПб.: Питер, 2007. – 432 с.

161. Шилдт Г. Полный справочник по C# / Г. Шилдт. – Вильямс, 2008. – 752 с.

162. Мартынов В.В. База данных для автоматизированного оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного режущего инструмента по параметрам дефектов / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Wykształcenie i nauka bez granic – 2013: materiały IX Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji. Volume 45. Techniczne nauki. – Przemyśl: Nauka i studia, 2013. – S. 55-58.

163. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2015620259. Дефекты модифицированного металлорежущего инструмента / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова. Заявка №2014622006. Дата поступления 22.12.2014. Дата регистрации 11.02.2015.

164. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник для студентов вузов / С.Н. Григорьев. – М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.

165. Анализ результатов эксплуатации металлорежущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина, В.О. Стариннова // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2013. – №8. – С. 35-39.

166. Солонин И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1972. – 216 с.

167. Мартынов В.В. Статистические методы обработки экспериментальных данных / В.В. Мартынов, П.В. Мартынов. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2011. – 188 с.

168. Мартынов В.В. Алгоритмизация процесса идентификации распределения данных о свойствах модифицированного режущего инструмента / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Vědecký průmysl evropského kontinentu – 2013: materiály IX mezinárodní vědecko-praktická konference. Díl 32. Technické vědy. – Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o., 2013 – S. 77-84.

169. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015617335. Программа имитационного моделирования процесса формирования состояния модифицированного металлорежущего инструмента / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова. Заявка №2015617134. Дата поступления 03.08.2015. Дата регистрации 29.09.2015.

170. Автоматизированное оценивание состояния модифицированного режущего инструмента по параметрам дефектов рабочей части / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Автоматизация и современные технологии. – 2014. – №4. – С. 7-12.

171. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015611620. Оценивание качества эксплуатации модифицированного металлорежущего инструмента / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова. Заявка №2014662618. Дата поступления 08.12.2014. Дата регистрации 08.02.2015.

172. Гринберг Ф. Самоучитель программирования на входном языке СУБД dBASE III / Ф. Гринберг, Р. Гринберг. – М.: Мир, 1989. – 453 с.

173. Основные аспекты наноструктурирования режущего инструмента различного назначения воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Инновации. Технологии. Производство: сб. тезисов Междунар. технолог. форума. – Рыбинск: РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2014. – С. 41-42.

174. Сравнительный анализ характеристик твердости инструментальных материалов / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – №3. – С. 3-7.

175. Оценивание качества поверхностного слоя рабочей части режущего инструмента по параметру микротвердости / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Металлообработка. – 2015. – №2(86. – С.15-21.

176. Технология и оборудование для синтеза нанокомпозитных ионно-плазменных покрытий на рабочих поверхностях геометрически сложных изделий / Б.М. Бржозовский, М.Б. Бровкова, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева. – 2017. – №1(40). – С.216-222.

177. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М.: Издательство стандартов, 1993. – 34 с.

178. Хазов Б.Ф. Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования / Б.Ф. Хазов, Б.А. Дидусев. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

179. Экспериментальное изучение поведения комбинированной структуры, сформированной воздействием низкотемпературной плазмы / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова, И.Н. Янкин // Металлообработка. – 2017. – №3(99). – С.35-42.

180. Экспериментальное исследование процесса механической обработки материалов инструментом с модифицированной рабочей частью / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова, И.Н. Янкин // Наукоемкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2013. – С. 414-420.

181. Повышение эксплуатационной надежности изделий с наноструктурированным поверхностным слоем: монография / Б.М. Бржозовский, М.Б. Бровкова, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, П.В. Мартынов, Е.С. Плешакова. – Старый Оскол: ТНТ, 2018. – 132 с.

182. Самоорганизация композитной структуры, сформированной при низкотемпературном плазменном упрочнении, в процессе эксплуатации / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2017. – Т.13. №5. – С.213-218.

183. Формирование композитных структур на поверхностях сложного профиля воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда / Б.М. Бржозовский, Е.П. Зинина, В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова. – Старый Оскол: ТНТ, 2017. – 140 с.

184. Analysis of Composite Structure Formation in the Surface Layer of Complex-Shaped Products when Exposed to Low-Temperature Plasma of Combined Discharge /

B.M. Brzhozovsky, V.V. Martynov, E.P. Zinina, M.B. Brovkova, E.S. Pleshakova // Published in 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). Publisher: IEEE. 4 p.

185. Повышение надежности механической обработки на основе низкотемпературной плазменной модификации режущего инструмента / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, Е.П. Зинина, Е.С. Плешакова // Производительность и надежность технологических систем в машиностроении: сб. науч. тр. МНТК / под науч. ред. В.В. Прейса и И.Л. Волчкевича. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. – С.159-163.

186. Basic features of low-temperature plasma formation in the course of composite coating synthesis at the active faces of complex contoured hard tools / B.M. Brzhozovsky D.A. Zimnyakov E.P. Zinina, V.V. Martynov, E.S. Pleshakova S.A. Yuvchenko // Proc. of SPIE. – Saratov, 2016. – Vol.9917.

187. Банди Б. Методы оптимизации / Б. Банди; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.

188. Егоров Б.Е. База знаний автоматизированной системы выбора инструмента для технологического процесса на основе фреймовой модели / Б.Е. Егоров, Л.А. Симонова, К.В. Клочкова // СТИН. – 2014. – №6. – С. 2-5.

189. Гаврилова и др. Базы знаний интеллектуальных систем // Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2000.

190. Мартынов В.В. База знаний автоматизированной системы оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента / В.В. Мартынов, Е.С. Плешакова // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 11: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ, 2014. – №8. – С. 31-33.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Матрицы попарных сравнений объектов и признаков

Таблица А.1

Матрица попарных сравнений объектов по признаку 1 – «Скорость резания»

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0
2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	0,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
3	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5	0,5	1,0
4	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5	1,5	0,5	1,5
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
6	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0
7	0,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
8	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	0,5	1,5	1,0	1,0
10	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0
11	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0
12	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
13	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
14	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0
15	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0
16	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
17	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0
18	1,0	0,5	1,5	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
19	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0

Таблица А.2

Матрица попарных сравнений объектов по признаку 2 – «Подача»

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5
2	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	0,5	1,0	1,0	1,5
3	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0
4	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5	1,0	1,5
5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0
6	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5
7	0,5	1,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
8	0,5	1,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
9	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
10	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0
11	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,5
12	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0
13	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
14	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5	0,5	1,5
15	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
16	0,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
17	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0
18	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
19	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0

Таблица А.3

**Матрица попарных сравнений объектов
по признаку 3 – «Глубина резания»**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
2	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	15	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
3	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0
4	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5	0,5	1,5
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
6	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
7	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
8	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
9	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
10	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5	1,0	1,5
11	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,5
12	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
13	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
14	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5	1,5	1,0
15	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
16	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5
17	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,5	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
18	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,5
19	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0

Таблица А.4

**Матрица попарных сравнений объектов
по признаку 4 – «Радиус при вершине пластины»**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5
2	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5
3	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,5
4	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,5
5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5
6	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
7	0,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	0,5	1,5
8	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5
9	0,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	0,5	1,5
10	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	1,5
11	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,5
12	0,5	1,0	0,5	1,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5
13	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5
14	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,5
15	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
16	1,0	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	0,5	1,5
17	0,5	0,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,5
18	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5
19	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0

Таблица А.5

Матрица попарных сравнений объектов
по признаку 5 – «Толщина пластины»

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5
2	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
3	0,5	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0
4	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
6	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
7	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
8	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0
9	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
10	0,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,5	0,5	1,5	1,5	1,5	0,5	1,0	1,0	1,5
11	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0
12	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5
13	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
14	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5	0,5	1,0
15	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
16	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
17	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
18	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
19	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0

Таблица А.6

Матрица попарных сравнений объектов
по признаку 6 – «Твердость инструментальной матрицы»

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
2	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
3	0,5	1,5	1,0	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5
4	0,5	1,0	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5
5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
6	1,0	1,5	0,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
7	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
8	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
9	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
10	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5
11	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,5
12	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
13	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
14	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5	0,5	1,0
15	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
16	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
17	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,0	1,5	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,5
18	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
19	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0

Таблица А.7

**Матрица попарных сравнений объектов
по признаку 7 – «Толщина модифицированного слоя»**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	2,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
2	0,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
3	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
4	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5
5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
7	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
8	1,0	1,5	1,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
9	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
10	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5	1,0	1,0
11	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0
12	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
13	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
14	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	1,5
15	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
16	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
17	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0
18	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5	1,0	0,5	1,5	1,0	1,5
19	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0

Таблица А.8

**Матрица попарных сравнений объектов
по признаку 8 – «Химический состав инструментального материала»**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
2	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5
3	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0
4	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0
5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5
6	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
7	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
8	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
9	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
10	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0
11	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,0	1,5	1,0
12	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
13	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0
14	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0
15	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0
16	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
17	1,5	1,5	1,0	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0
18	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
19	1,5	1,5	1,0	1,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0

Таблица А.9

**Матрица попарных сравнений объектов
по признаку 9 – «Зернистость инструментального материала»**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
2	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5
3	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0
4	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0
5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5
6	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
7	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
8	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
9	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
10	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0
11	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,0	1,5	1,0
12	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
13	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0
14	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0
15	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0
16	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
17	1,5	1,5	1,0	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0
18	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
19	1,5	1,5	1,0	1,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0

Таблица А.10

**Матрица попарных сравнений объектов
по признаку 10 – «Твердость обрабатываемого материала»**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5
2	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
3	1,5	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,5	1,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0
4	1,5	0,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	0,5	1,0
5	1,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5	1,5	1,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0
6	1,5	1,5	1,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5
8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
9	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0
10	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0
11	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	0,5	1,0
12	1,5	1,5	1,5	1,0	0,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5
13	1,5	1,0	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0
14	1,5	1,0	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5	0,5	1,0
15	1,5	1,0	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0
16	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5	1,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5
17	1,5	1,5	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0
18	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5
19	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0

Таблица А.11

**Матрица попарных сравнений объектов
по признаку 11 – «Химический состав обрабатываемого материала»**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,5	1,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5	1,5
2	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	0,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5
3	0,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
4	0,5	1,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5
5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0
6	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5
7	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5
8	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0
9	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5
10	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0
11	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0
12	1,5	1,0	0,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5
13	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	1,5	1,0	1,5	1,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0
14	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	0,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0
15	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	0,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5
16	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,5
17	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0
18	1,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5
19	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0

Таблица А.12

**Матрица попарных сравнений объектов
по признаку 12 – «Схема обработки»**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5
3	1,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5	0,5	1,0
4	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	1,5
5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0
6	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	1,5	1,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	0,5	1,0	1,5
7	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
8	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5
9	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
10	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0
11	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0
12	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5
13	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0
14	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0
15	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
16	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	1,0	1,5
17	1,5	0,5	1,5	1,0	1,0	1,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0
18	1,5	0,5	1,5	1,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
19	1,5	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0

Таблица А.13

**Матрица попарных сравнений объектов
по признаку 13 – «Размеры дефектов по параметру площади,
занимаемой на рабочей части»**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	2,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0
2	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5
3	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	0,5
4	0,5	1,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5
5	0,5	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	1,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	1,0	0,5	0,5
6	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0
7	0,5	1,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5
8	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	0,5
9	0,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	0,5
10	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	0,5
11	0,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0
12	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0
13	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
14	0,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0
15	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0
16	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5
17	0,5	1,5	0,5	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	1,5	1,0	0,5	0,5
18	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	0,5
19	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0

Таблица А.14

**Матрица попарных сравнений объектов
по признаку 1 – «Оптимальная скорость резания»**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5
2	0,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
3	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
4	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5
5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
6	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5
7	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
8	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
9	0,5	0,5	1,0	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5
10	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5
11	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5
12	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,0	0,5	1,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5
13	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
14	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	1,0	1,5
15	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
16	0,5	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
17	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5
18	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5
19	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0

Таблица А.15

**Матрица попарных сравнений объектов
по признаку 2 – «Оптимальная подача»**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5
2	0,5	1,0	15	1,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5
3	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5
4	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5
5	0,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
6	0,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5
7	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
8	0,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
9	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	0,5	1,5	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5
10	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,0
11	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0
12	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5
13	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
14	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	1,0	1,5
15	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
16	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
17	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5
18	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5
19	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0

Таблица А.16

**Матрица попарных сравнений объектов
по признаку 3 – «Оптимальная глубина резания»**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5
2	0,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5
3	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5
4	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5
5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5
6	0,5	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5
7	1,0	1,0	1,5	1,5	0,5	1,5	1,0	1,0	1,5	15	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5
8	1,0	1,0	1,5	1,5	0,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
9	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5
10	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	0,5	1,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5
11	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5
12	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,0	0,5	1,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5
13	0,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
14	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5
15	1,0	1,0	1,0	1,5	0,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5
16	0,5	0,5	1,5	1,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5
17	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,5
18	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,0	1,5
19	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0

Таблица А.17

Матрица попарных сравнений объектов по признаку 7 – «Оптимальная толщина модифицированного слоя»

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5
2	0,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
3	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	1,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	0,5	1,5	1,5	1,5
4	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5
5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
6	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5	1,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5
7	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5
8	1,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5
9	0,5	0,5	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5	0,5	1,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5
10	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	1,5
11	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5
12	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5
13	0,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
14	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,5	0,5	1,0	0,5	0,5	1,5	0,5	1,5
15	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
16	0,5	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	0,5	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
17	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	0,5	1,5
18	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	1,5	0,5	0,5	1,5	0,5	0,5	1,5	1,0	1,5
19	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0

Примечание:
1 – истирание покрытия, **2 –** микротрещина, **3 –** истирание зерен матрицы, **4 –** вырыв зерен, **5 –** деформирование матрицы, **6 –** вкрапление продуктов износа в поверхность, **7 –** козырек, **8 –** наплыв, **9 –** несплошности, **10 –** трещины, **11 –** пропахивание (микропроточины), **12 –** налипание обрабатываемого материала на продукты износа, **13 –** проточина, **14 –** лунка износа, **15 –** фаска износа, **16 –** розетка, **17 – в**ыкрашивание, **18 –** отслаивание покрытия, **19 –** локальные разрушения.

Таблица А.18

Матрица попарных сравнений признаков (факторов)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1,0	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1.5
2	0,5	1,0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0
3	0,5	1.0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
4	1,0	1.0	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5
5	1,0	1.0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5
6	1,0	1.0	1,0	1,5	1,0	1,0	0,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5
7	0,5	0.5	0,5	1,5	1,0	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5
8	1,0	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	0,5	1,0	0,5	1,5
9	1,0	0,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5	1,5
10	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	1,5	1,5	0,5	1,0	1,5	1,5	1,5
11	0,5	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	1,5	1,0	1,0	0,5	1,0	0,5	1,5
12	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0	1,0	1,5	1,5	0,5	0,5	1,5	1,0	1,5
13	0.5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0

Примечание:
1 – скорость резания, **2 –** подача, **3 –** глубина резания, **4 –** радиус при вершине пластины, **5** – толщина пластины, **6 –** твердость инструментальной матрицы, **7 –** толщина модифицированного слоя, **8 –** химический состав инструментального материала, **9** – зернистость инструментального материала, **10 –** твердость обрабатываемого материала, **11 –** химический состав обрабатываемого материала, **12 –** схема обработки, **13 –** размеры дефектов по параметру площади, занимаемой на рабочей части.

Приложение Б

Матрицы влияния факторов на вероятности переходов при моделировании

Таблица Б.1

Вероятность $P_{4,6}$ при возникновении микролокальных дефектов

Дефекты	Факторы												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0,5	0,5	1	0
2	1	1	0,5	0,5	0	1	1	1	1	1	1	1	0
3	1	1	0,5	0,5	0	1	0	1	1	1	1	1	0
4	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0,5	1	1	0
5	1	1	0,5	1	1	1	1	0,5	1	0,5	1	1	0
6	1	0,5	0,5	0,5	0	0	0,5	1	0	0,5	1	0,5	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица Б.2

Вероятность $P_{4,6}$ при развитии микролокальных и возникновении микроповерхностных дефектов

Дефекты	Факторы												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
1	1	1	1	1	0	0,5	1	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0
2	1	1	0,5	0,5	0	1	1	1	1	1	1	1	0
3	1	1	0,5	0,5	0	1	0	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
4	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0,5	0,5	0,5	0
5	1	1	0,5	1	1	1	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0

6	1	0,5	0,5	0,5	0	0	1	1	0	0,5	0,5	0,5	0
7	0,5	1	0	0,5	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0
8	0,5	1	1	0,5	0	1	1	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5
9	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	0,5	0,5	1	0,5	0
10	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	0	0,5	0
11	1	1	1	0,5	0	1	0,5	0,5	1	1	0,5	1	0
12	1	1	0,5	1	0	0	0	0,5	0	0,5	1	1	0,5
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица Б.3

Вероятность $P_{4,6}$ при развитии микролокальных и микроповерхностных и возникновении макродефектов

Дефек-ты	**Факторы**												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
1	1	1	1	1	0	0,5	1	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0
2	1	1	0,5	0,5	0	1	1	1	1	1	1	1	0
3	1	1	0,5	0,5	0	1	0	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
4	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0,5	0,5	0,5	0
5	1	1	0,5	1	1	1	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0
6	1	0,5	0,5	0,5	0	0	1	1	0	0,5	0,5	0,5	0
7	0,5	1	0	1	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
8	1	1	0,5	0,5	0	1	1	0,5	0	1	0,5	0,5	0,5
9	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
10	0,5	1	1	1	0,5	1	0,5	0,5	1	1	0	0,5	0
11	0,5	0,5	1	0,5	0	1	1	0,5	0,5	1	0,5	1	0
12	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	1	0,5	0	0,5	1	0,5	0,5
13	1	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	1	1	1	0,5	0
14	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	1	0,5	1	1	0,5	0,5	0
15	1	1	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	1	0,5
16	0,5	0,5	0	0	0	0	1	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0
17	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	0,5	1	0,5	1	0
18	1	1	0,5	1	0	1	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

При развитии макродефектов

13	1	1	0,5	0,5	0	1	1	0,5	1	1	0,5	0,5	0
14	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5

15	1	1	0,5	0,5	0	1	1	0,5	0,5	1	0,5	1	0,5
16	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0
17	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	1	0
18	0,5	0,5	0,5	1	0	1	1	0,5	0,5	1	1	0,5	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица Б.4

Вероятность $P_{4,7}$

Дефекты	**Факторы**												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
1	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	1	0	0	1	1	1	0
2	1	0,5	0	0	0	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0
3	1	1	0	0	0	0,5	0	0,5	1	1	1	0,5	0
4	0,5	0,5	0	0	0	1	0	0,5	1	1	0,5	0,5	0
5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1	0
6	1	0,5	0,5	0	0	0	0	0,5	0	0	0,5	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица Б.5

Вероятность $P_{4,8}$

Дефекты	**Факторы**												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
1	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0,5	0
2	1	0,5	0	0	0	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	0
3	1	1	0	0	0	0,5	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0
4	0,5	0,5	0	0	0	1	0	0,5	1	1	0,5	0,5	0
5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	0
6	1	0,5	0,5	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0,5	0	0
7	0,5	1	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0	0	0,5	0	0

8	1	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0	1	1	0,5	0,5
9	1	1	0,5	1	0	0,5	0,5	0,5	0	1	0,5	0	0,5
10	0,5	1	0,5	0,5	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
11	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
12	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица Б.6

Вероятность $P_{4,9}$ при развитии микролокальных и микроповерхностных и возникновении макродефектов

Дефек-ты	**Факторы**												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
1	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0,5	0
2	1	0,5	0	0	0	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	0
3	1	1	0	0	0	0,5	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0
4	0,5	0,5	0	0	0	1	0	0,5	1	1	0,5	0,5	0
5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	0
6	1	0,5	0,5	0	0	0	0	0,5	0	0,5	0,5	0	0
7	0,5	1	0	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0	0
8	1	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0	1	1	0,5	0,5
9	1	1	0,5	1	0	0,5	0,5	0,5	0	1	0,5	0	0,5
10	1	1	0,5	0,5	1	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
11	1	0,5	0,5	0,5	0	0,5	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5
12	1	1	0,5	0,5	0	0,5	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1
13	1	0,5	0,5	1	0,5	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
14	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0
15	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
16	0,5	0,5	0	0	0	0	1	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5
17	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	0,5	1	0,5	1	0,5	0,5	0
18	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

При развитии макродефектов

13	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5
14	1	0,5	0,5	0,5	0	0,5	1	0,5	0,5	1	1	0,5	1
15	1	0,5	0,5	0,5	0	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1
16	1	1	0,5	0,5	0	0	1	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5

17	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	0,5	1	0,5	1	0,5	0,5	0,5
18	1	1	0,5	0,5	0	1	0,5	1	0,5	1	0,5	0,5	1
19	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1

Таблица Б.7

Вероятность $P_{7,2}$

Дефекты	**Факторы**												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
1	1	1	1	0,5	0	0	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
2	1	1	1	1	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
3	1	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	1	1	1	0,5	0
4	1	1	0,5	0,5	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
5	1	1	1	1	0,5	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0
6	1	1	1	0,5	0	0	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица Б.8

Вероятность $P_{7,8}$

Дефекты	**Факторы**												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
1	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0,5	0,5	0	1	1	0,5	0
2	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	0
3	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0,5	0	0
4	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	0	0,5	0,5	1	0,5	1	0
5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0	0,5	1	1	0,5	0,5	0
6	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица Б.9

Вероятность $P_{8,2}$

Дефекты	**Факторы**												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
1	1	1	1	0,5	0	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
2	1	1	1	0,5	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
3	1	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	1	1	1	0,5	0
4	1	1	0,5	0,5	0	1	0	1	1	0,5	0,5	0,5	0
5	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0
6	1	0,5	0,5	0,5	0	0	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
7	1	1	0,5	1	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
8	1	1	0,5	0,5	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
9	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	0,5	1	0,5	0,5	0
10	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
11	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
12	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица Б.10

Вероятность $P_{8,9}$

Дефекты	**Факторы**												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
1	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5	0,5	0
2	1	0,5	0	0	0	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	0

3	1	1	0	0	0	0,5	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0
4	0,5	0,5	0	0	0	1	0	0,5	1	1	0,5	0,5	0
5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	0
6	1	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0
7	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	1	0
8	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0	1	0,5	0,5	0
9	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0	0,5	1	1	0,5	0,5	0
10	1	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0	0,5	1	1	0,5	0,5	0
11	1	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0	0,5	1	1	0,5	0,5	0
12	1	1	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица Б.11

Вероятность $P_{9,2}$

Дефек-ты	**Факторы**												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
1	1	1	1	0,5	0	0,5	1	1	0	0,5	0,5	0,5	0
2	1	1	1	0,5	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
3	1	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	1	1	1	0,5	0
4	1	1	0,5	0,5	0	1	0	1	1	0,5	0,5	0,5	0
5	1	1	0,5	0,5	0,5	1	1	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0
6	1	0,5	0,5	0,5	0	0	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
7	1	1	0,5	1	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
8	1	1	0,5	0,5	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
9	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	0,5	1	0,5	0,5	0
10	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
11	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
12	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
13	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
14	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
15	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
16	1	1	0,5	0,5	0	0,5	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0
17	0,5	0,5	0,5	0,5	0	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0
18	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица Б.12

Вероятность $P_{9,10}$

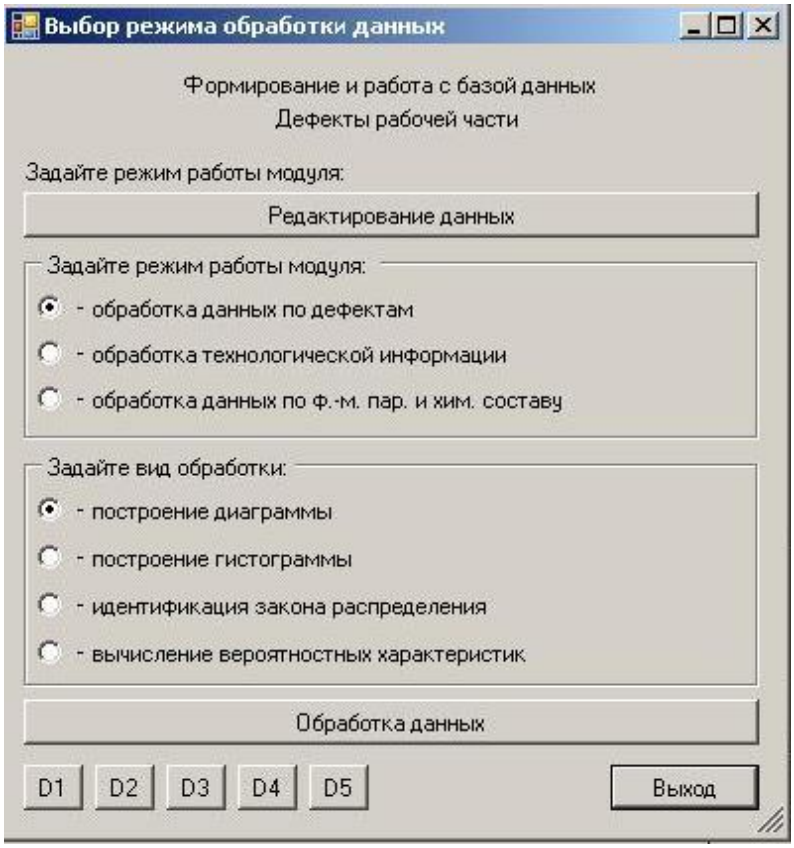
Дефекты	Факторы												
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1	0,5	0,5	0,5	0	0,5	0	0,5	1	1	0,5	0,5	1
15	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0,5	1	1	0,5	0,5	1
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	1	1	0,5	0,5	0	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1

Дефекты: 1 – истирание покрытия, **2** – микротрещина, **3** – истирание зерен матрицы, **4** – вырыв зерен, **5** – деформирование матрицы, **6** – вкрапление продуктов износа в поверхность, **7** – козырек, **8** – наплыв, **9** – несплошности, **10** – трещины, **11** – пропахивание (микропроточины), **12** – налипание обрабатываемого материала на продукты износа, **13** – проточина, **14** – лунка износа, **15** – фаска износа, **16** – розетка, **17** – выкрашивание, **18** – отслаивание покрытия, **19** – локальные разрушения.

Факторы: 1 – скорость резания; 2 – подача; 3 – глубина резания; 4 – радиус округления пластины; 5 – толщина пластины; 6 – твердость инструментальной матрицы; 7 – толщина модифицированного слоя; 8 – химический состав инструментального материала; 9 – зернистость инструментального материала; 10 – твердость обрабатываемого материала; 11 – химический состав обрабатываемого материала; 12 – схема обработки; 13 – размеры дефектов по параметру суммарной площади (или объему), занимаемой на рабочей части.

Приложение В

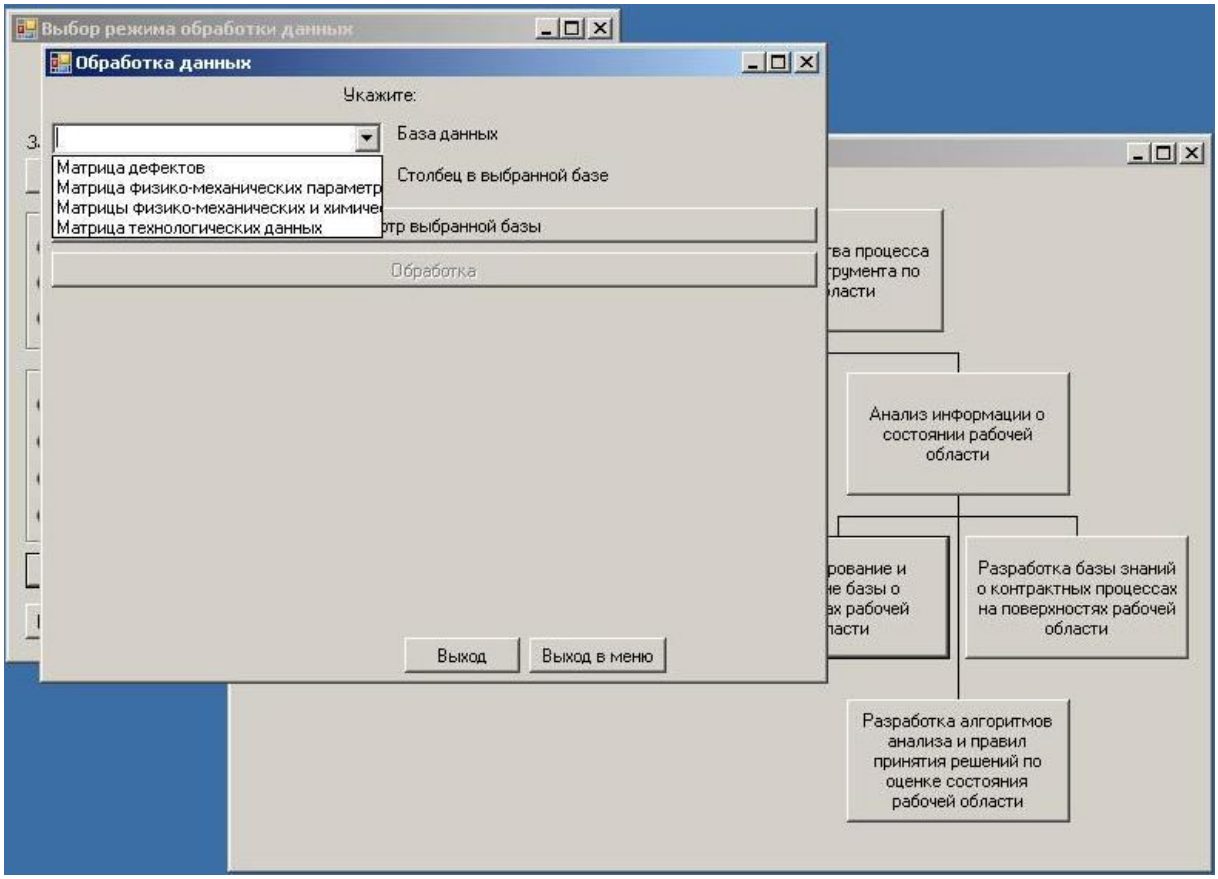
Основные экранные формы компьютерной системы оценивания качества процесса эксплуатации модифицированного металлорежущего инструмента

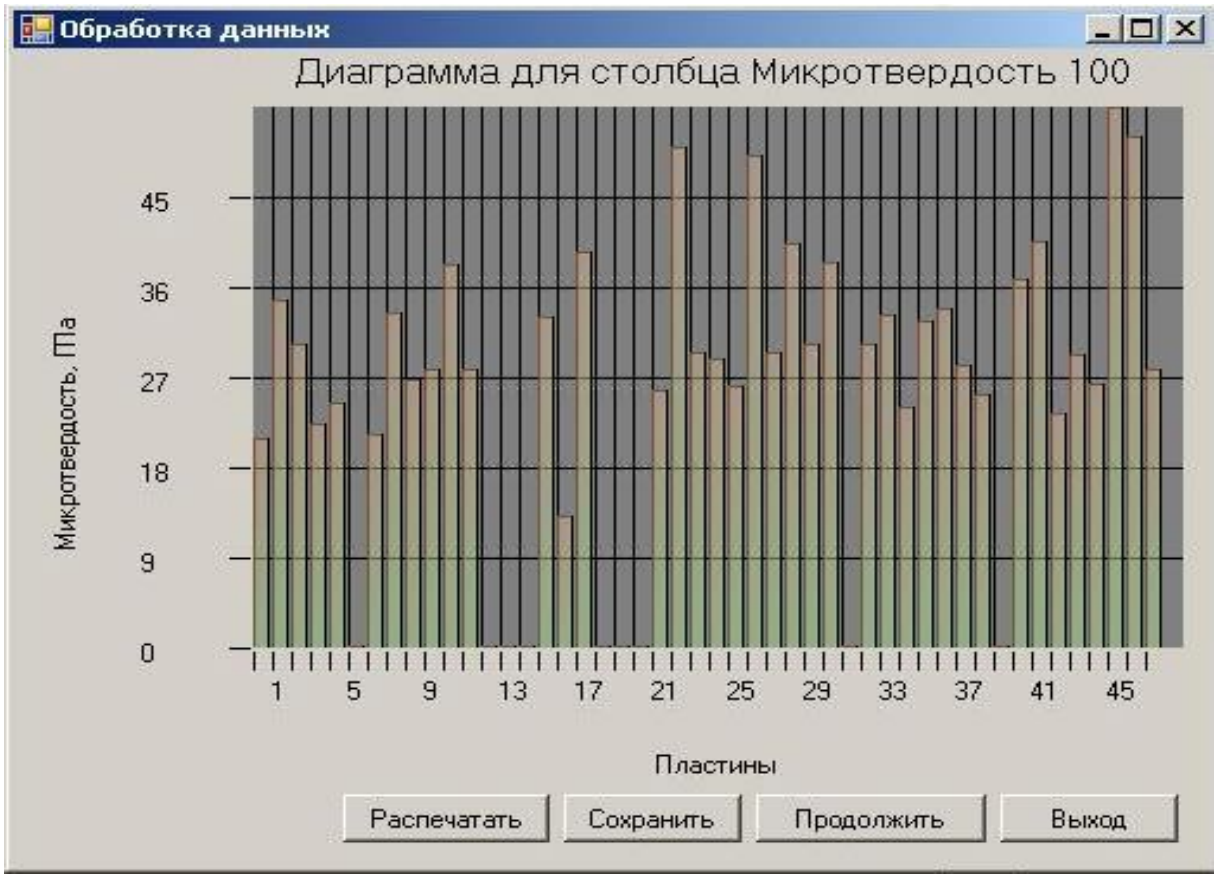


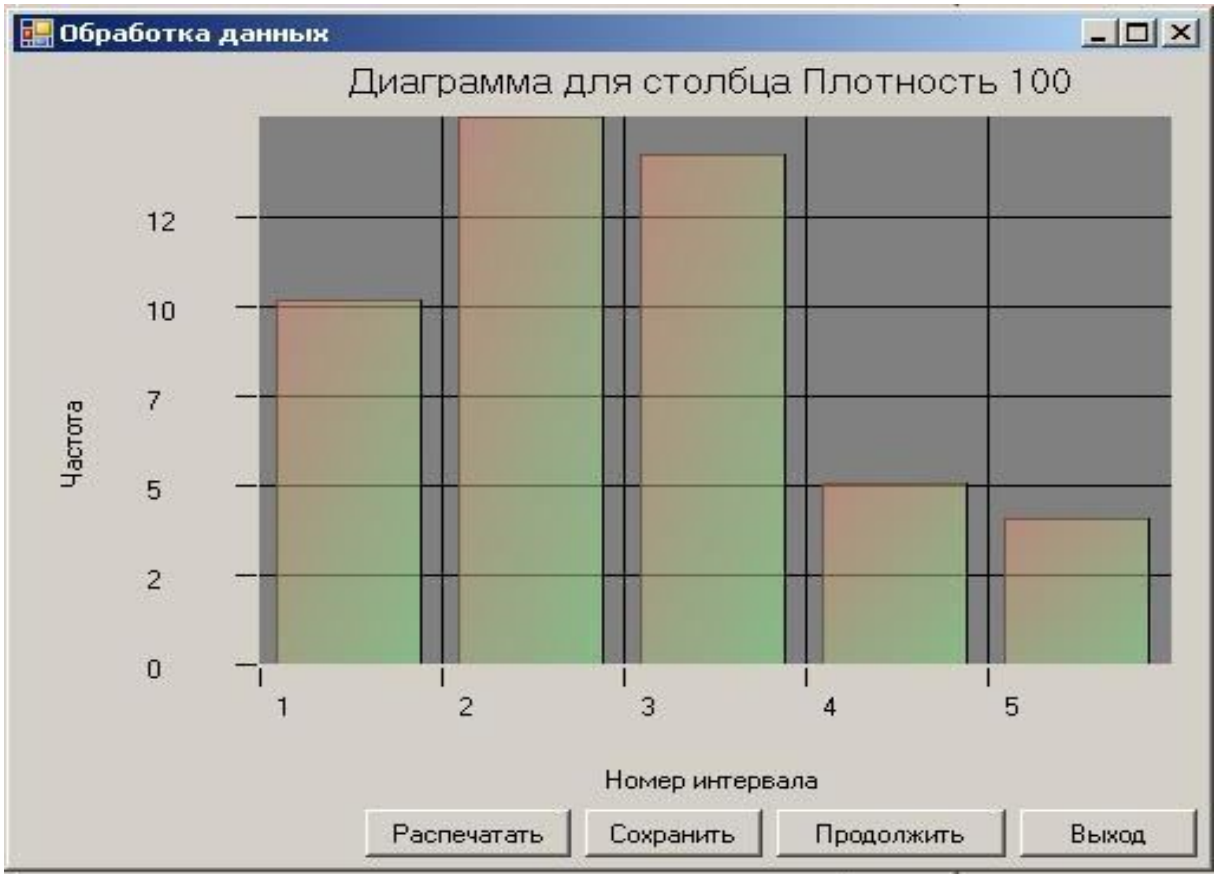
TehnoDataDlg

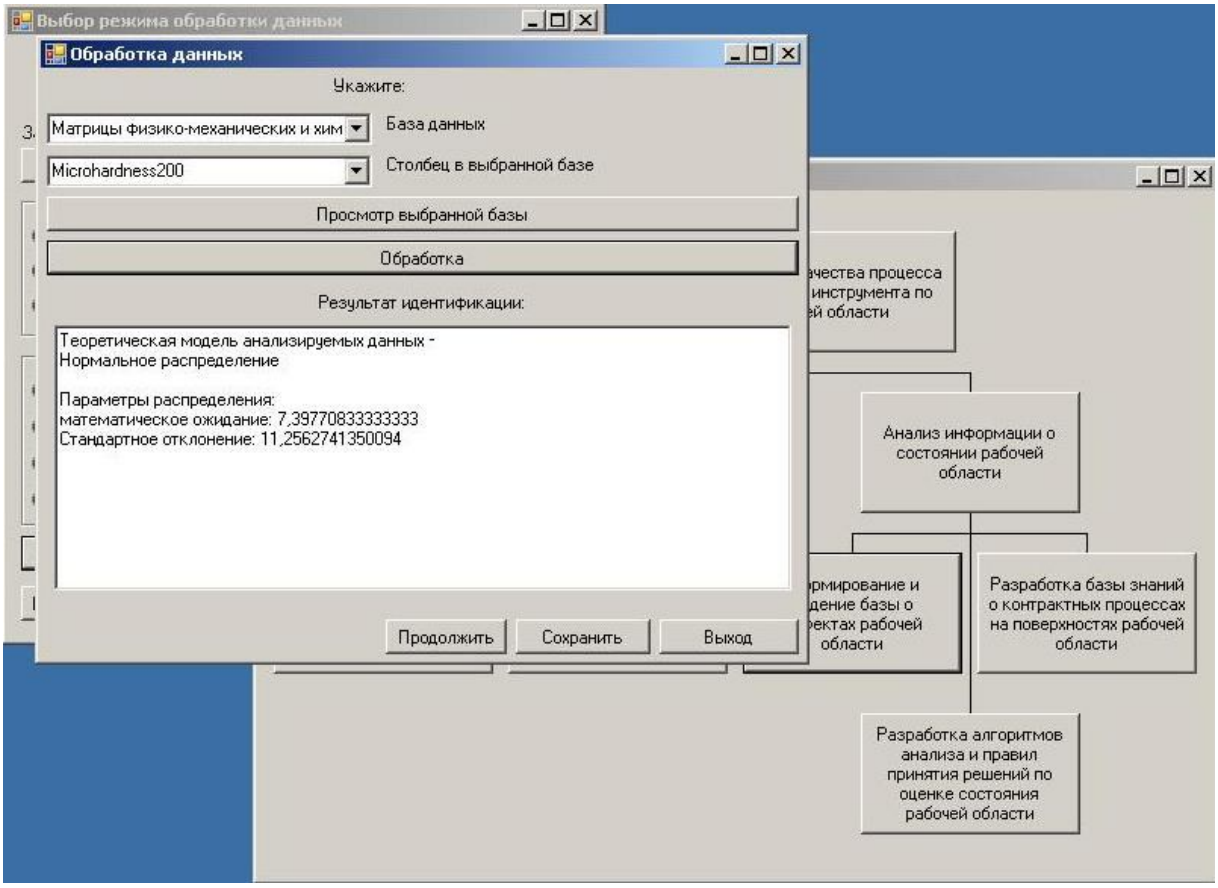
Добавить запись. Сохранить изменения.

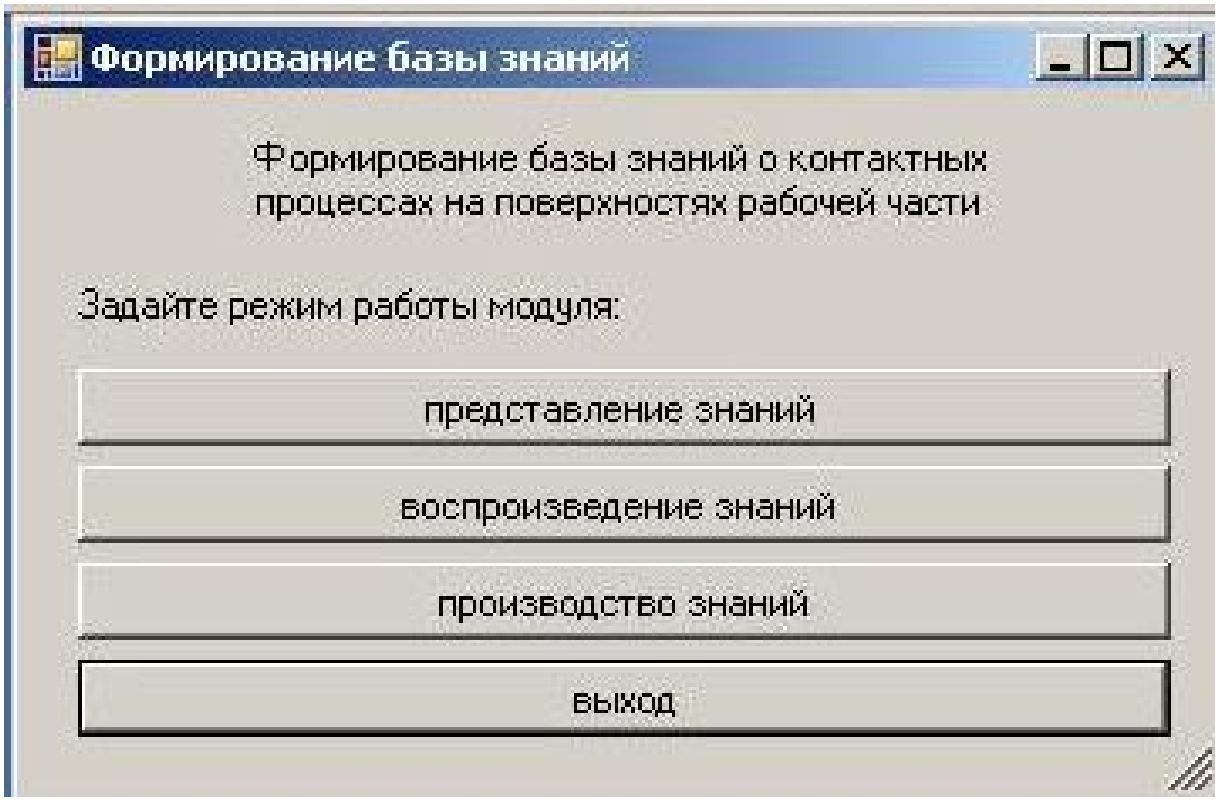
Класси-фикатор	Номер пластин	Микротвердость при нагрузке, г									Плотность при нагрузке, г									Приращение плотности при нагрузке, г								Dps
		20	40	60	80	100	120	150	200	Средняя	20	40	60	80	100	120	150	200	Средняя	20	40	60	80	100	120	150	200	
I	1	40.4	30.4	28.6	30.8	21.0	27.8	22.4	30.8	29.06	68.3	31.5	23.3	22.6	11.4	15.5	10.2	14.2	24.66	0	-6.8	-3.7	6.2	-5.0	4.03	0.19	6.54	1.33
I	1	28.7	47.5	49.8	28.6	34.9	39.1	30.8	27.5	37.16	63.8	60.7	53.5	20.2	24.3	25.9	16.6	11.8	34.67	0	-6.1	-16.	-14.	-1.3	4.04	-0.5	-0.1	-34.5
I	1	40.8	31.3	32.2	37.6	30.4	30.4	28.4	33.0	33.06	69.3	32.5	27.7	30.6	19.7	17.8	14.6	15.8	28.54	8.94	-2.7	6.6	19.5	0.27	4.36	2.03	6.24	45.18
I	2	23.1	26.9	30.2	35.3	22.5	23.7	24.5	27.6	26.77	28.3	25.4	24.8	27.3	12.3	12.0	11.5	11.9	19.21	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	2	39.5	36.5	26.5	22.2	24.6	23.3	27.1	20.5	27.58	62.8	38.8	20.4	13.6	14.2	11.7	13.3	7.62	22.83	38.0	18.4	-1.4	-1.8	1.8	0.21	4.02	-2.4	56.78
I	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	3	20.0	27.7	26.5	20.9	21.5	18.8	22.4	22.9	22.62	23.7	27.2	20.9	12.7	11.7	8.65	10.2	9.21	15.57	-18.(	12.8	7.2	0.7	3.14	-0.6	1.16	0.77	7.12
I	3	17.6	25.4	39.5	32.3	33.5	40.4	28.8	27.1	30.61	19.6	23.8	37.6	24.3	23	26.4	14.9	11.8	22.71	-6.4	2.38	19.3	8.21	12.7	14.3	5.2	4.86	60.6
I	3	39.6	30.6	47.9	33.6	26.8	23.2	31.2	31.2	33.05	66.1	31.8	46.9	25.7	16.4	11.8	16.9	14.4	28.79	21.6	12.6	34.6	13.3	6.16	0.18	7.34	3	98.87
I	4	37.3	40.3	29.9	37.3	27.8	30.2	31.5	23.7	32.28	60.4	48.0	25.0	30.2	17.4	17.6	17.1	9.68	28.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	4	22.1	40.5	40.2	52.6	38.4	35.7	45.4	36.1	38.91	27.5	47.8	39.0	50.0	27.9	22.6	29.3	18.2	32.83	7.28	28.5	24.0	35.4	13.3	6.94	18.7	3.82	138.23
I	4	34.9	34.9	41.5	37.6	28.0	28.5	31.7	27.7	33.15	54.6	38.3	41.0	30.5	17.6	16.1	17.2	12.1	28.47	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	9	21.2	26.2	42	30.8	33.2	28.4	28.2	21.0	28.92	25.9	25.1	40.0	22.6	22.5	16.1	14.5	8.04	21.89	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	9	42.0	34.3	23.3	16.8	13.3	17.3	18.9	26.5	24.11	71.1	37.7	17.3	9.2	5.76	7.66	7.92	11.4	21.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	9	0	42.2	56.7	40.3	39.6	43.4	32.7	34.3	40.45	0	51.4	63.7	33.4	29.6	30.3	17.9	16.8	34.78	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	11	24.9	20.2	15.0	16.4	25.8	16.2	20.2	30.6	21.19	33.0	16.8	8.84	8.8	15.5	6.95	8.76	13.8	14.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	11	25.5	39.6	34.2	42.4	50.2	37.1	29.1	29.7	36.02	34.2	46.6	30.6	36.2	42.1	23.8	15.2	13.6	30.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	11	37.1	32.5	52.9	34.1	29.7	33.6	36.5	36.1	36.6	59.3	34.7	59.0	26.1	19.1	20.7	21.1	18.2	32.31	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	12	28.8	31.1	26.0	28.2	29.0	36.8	24.2	31.3	29.48	40.7	31.9	20.3	19.8	18.5	23.6	11.4	14.5	22.64	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	12	34.1	37.6	33.0	38.9	26.2	39.1	34.5	34.8	34.82	52.7	43.0	29.0	31.5	15.9	25.9	19.2	17.2	29.34	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	12	40.2	36.4	34.6	33.4	49.3	35.1	32.3	36.9	37.32	67.5	41.2	31.0	25.6	40.7	21.9	17.5	18.5	33.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	13	42.8	36.6	40.1	47.6	29.6	30.1	32.2	28.7	36.01	74.4	41.5	38.9	42.3	19.1	17.5	17.6	12.9	33.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	13	39.4	37.5	35.3	39.3	40.5	35.2	43.5	38.8	38.74	64.7	43.2	32.2	32.5	30.3	21.9	27.8	20.2	34.14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	13	32.5	36.6	46.2	35.5	30.5	34.7	25.3	30.5	34.02	48.8	41.5	48	27.7	20	21.5	12.3	14.0	29.26	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	14	35.0	47.4	36.5	32.6	38.5	34.5	27.4	28.8	35.14	55.0	61.0	33.7	24.7	28.3	21.5	13.8	12.9	31.41	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	14	35.5	45.3	36.6	33.7	30.4	44.6	28.8	30.6	35.75	54.9	57.1	36.6	25.7	19.9	31.5	15.0	14.1	31.88	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	15	38.0	33.5	37.9	42.7	33.4	41.0	35.5	31.6	36.75	62.1	36.3	35.1	36.9	22.9	27.9	20.5	14.8	32.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	15	51.7	35.7	35.1	29.7	24.2	25.8	25.1	26.1	31.72	98.6	40.0	31.6	21.5	14.1	13.9	12.1	11.1	30.42	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	15	44.4	35.6	43.3	28.5	32.7	32.6	30.6	39.3	35.92	78.6	39.8	43.6	20.1	22.2	19.5	16.3	20.6	32.63	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	16	33.6	50.0	34.5	31.4	33.9	29.0	29.8	30.8	34.18	51.6	64.9	31.1	23.3	23.4	16.6	15.7	14.3	30.16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	16	55.7	64.7	44.6	41.2	28.4	33.3	36.6	31.8	42.09	110.	97.5	45.7	34.1	17.9	20.4	21.4	15.0	45.33	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	16	45.3	39.9	34.5	31.5	25.3	30.0	26.2	26.8	32.49	80.9	46.4	31.1	23.4	15.1	17.3	12.9	11.6	29.94	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	18	29.7	35.9	41.6	44.2	37.0	40.2	25.1	29.5	35.46	43	40.4	40.9	38.9	26.6	27.0	12.1	13.3	30.32	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	18	36.1	35.9	40.2	30.4	40.6	35.4	48.3	36.8	38.02	57.5	40.4	39.0	21.5	30.7	22.3	32.4	18.6	32.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	19	21.0	40.3	24.3	36.3	23.6	20.4	19.5	27.2	26.62	25.5	48.0	18.4	29.0	13.6	9.79	8.34	11.8	20.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	19	28.2	57.5	31.9	27.3	29.3	24.7	23	29.5	31.47	39.5	76.5	27.6	18.8	18.8	13.0	10.6	13.3	27.31	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	19	35.2	35.4	25.5	27.7	26.5	27.6	24.3	18.9	27.68	54.8	39.1	19.7	19.2	16.2	15.4	11.5	6.91	22.89	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	20	28.5	33.7	51.6	56.0	54.0	51.0	37.6	31.5	43.03	40.5	36.6	53.6	55.6	46	38.5	22.0	14.7	38.48	0	9.43	30.2	32.6	31.1	28.1	13.7	4.61	149.96

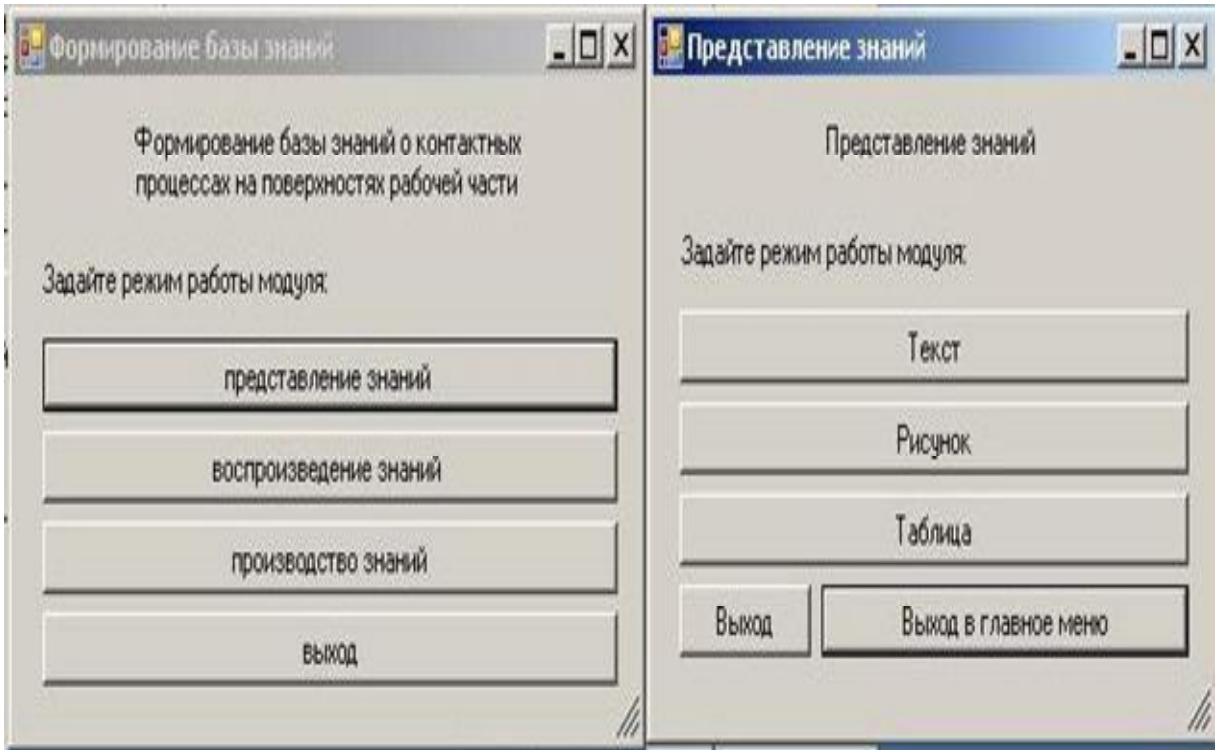

Выбор режима обработки данных
Обработка данных
Укажите:
База данных
Матрица дефектов
Матрица физико-механических параметр
Матрицы физико-механических и химиче
Матрица технологических данных
Столбец в выбранной базе
тр выбранной базы
Обработка
Выход
Выход в меню
Анализ информации о состоянии рабочей области
Разработка базы знаний о контрактных процессах на поверхностях рабочей области
Разработка алгоритмов анализа и правил принятия решений по оценке состояния рабочей области

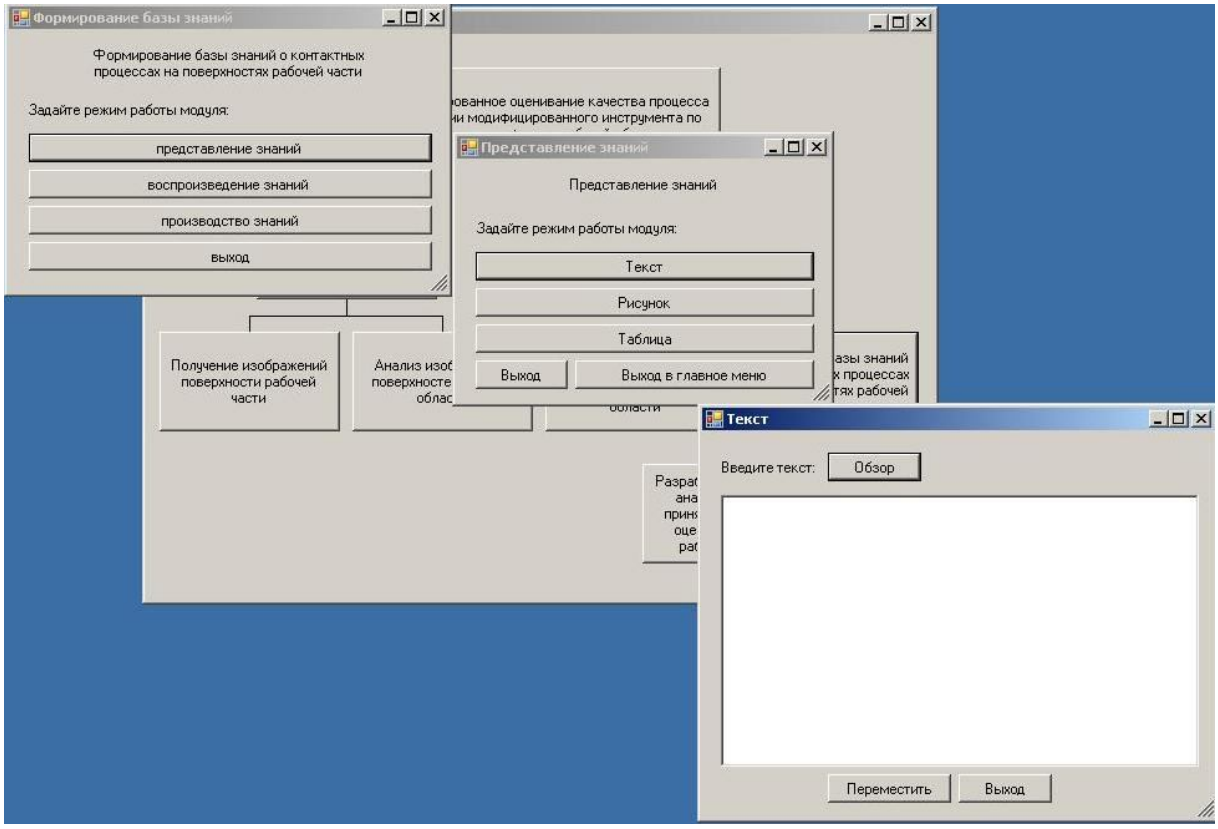

Обработка данных
Диаграмма для столбца Микротвердость 100
Микротвердость, Па
45
36
27
18
9
0
1
5
9
13
17
21
25
29
33
37
41
45
Пластины
Распечатать
Сохранить
Продолжить
Выход

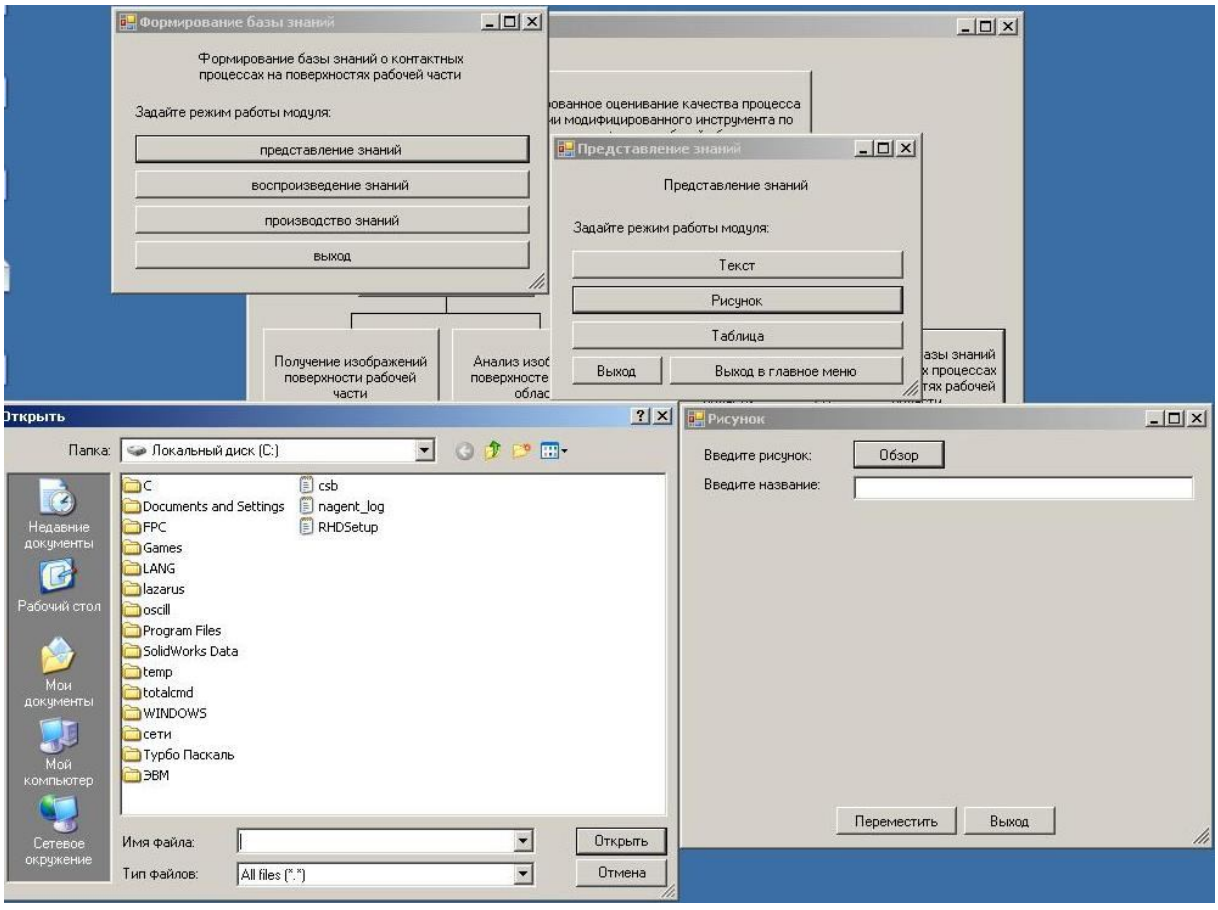

Обработка данных
Диаграмма для столбца Плотность 100
Частота
12
10
7
5
2
0
1
2
3
4
5
Номер интервала
Распечатать
Сохранить
Продолжить
Выход

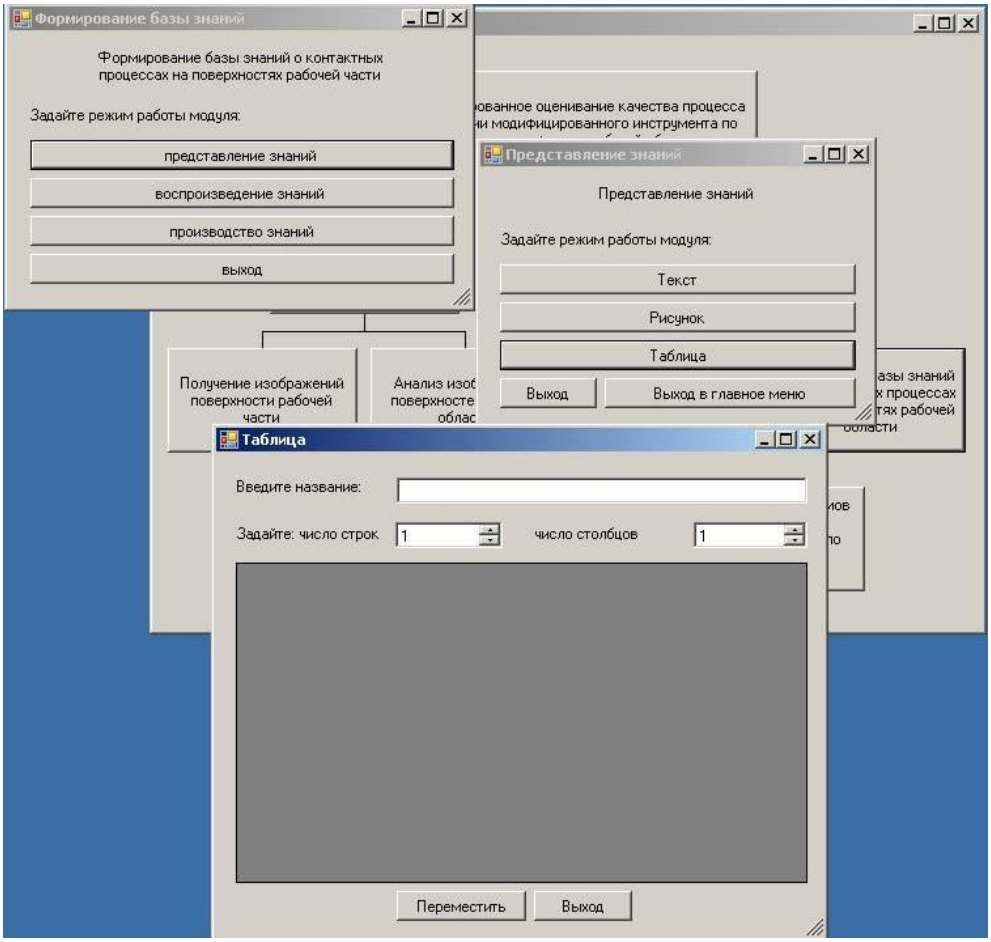

Выбор режима обработки данных
Обработка данных
Укажите:
Матрицы физико-механических и хим
База данных
Microhardness200
Столбец в выбранной базе
Просмотр выбранной базы
Обработка
Результат идентификации:
Теоретическая модель анализируемых данных -
Нормальное распределение
Параметры распределения:
математическое ожидание: 7,39770833333333
Стандартное отклонение: 11,2562741350094
Продолжить
Сохранить
Выход
Анализ информации о состоянии рабочей области
Разработка базы знаний о контрактных процессах на поверхностях рабочей области
Разработка алгоритмов анализа и правил принятия решений по оценке состояния рабочей области

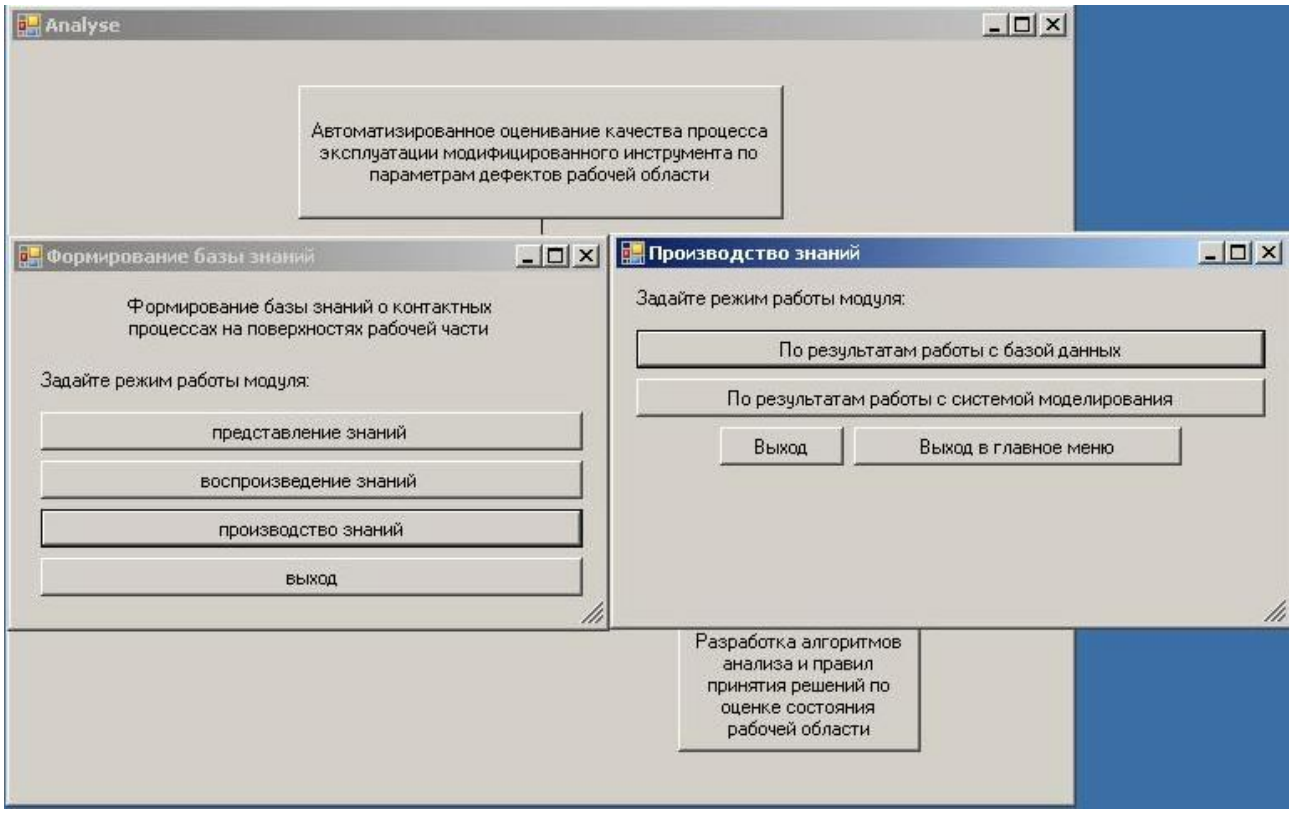

Формирование базы знаний
Формирование базы знаний о контактных процессах на поверхностях рабочей части
Задайте режим работы модуля:
представление знаний
воспроизведение знаний
производство знаний
выход


Формирование базы знаний
Формирование базы знаний о контактных процессах на поверхностях рабочей части
Задайте режим работы модуля:
представление знаний
воспроизведение знаний
производство знаний
выход
Представление знаний
Представление знаний
Задайте режим работы модуля:
Текст
Рисунок
Таблица
Выход
Выход в главное меню


Формирование базы знаний
Формирование базы знаний о контактных процессах на поверхностях рабочей части
Задайте режим работы модуля:
представление знаний
воспроизведение знаний
производство знаний
выход
Представление знаний
Представление знаний
Задайте режим работы модуля:
Текст
Рисунок
Таблица
Выход
Выход в главное меню
Получение изображений поверхности рабочей части
Текст
Введите текст:
Обзор
Переместить
Выход


Формирование базы знаний
Формирование базы знаний о контактных процессах на поверхностях рабочей части
Задайте режим работы модуля:
представление знаний
воспроизведение знаний
производство знаний
выход
Представление знаний
Представление знаний
Задайте режим работы модуля:
Текст
Рисунок
Таблица
Выход
Выход в главное меню
Получение изображений поверхности рабочей части
Открыть
Папка:
Локальный диск (C:)
C
Documents and Settings
FPC
Games
LANG
lazarus
oscill
Program Files
SolidWorks Data
temp
totalcmd
WINDOWS
сети
Турбо Паскаль
ЭВМ
csb
nagent_log
RHDSetup
Недавние документы
Рабочий стол
Мои документы
Мой компьютер
Сетевое окружение
Имя файла:
Тип файлов:
All files (*.*)
Открыть
Отмена
Рисунок
Введите рисунок:
Обзор
Введите название:
Переместить
Выход


Формирование базы знаний
Формирование базы знаний о контактных процессах на поверхностях рабочей части
Задайте режим работы модуля:
представление знаний
воспроизведение знаний
производство знаний
выход
Представление знаний
Представление знаний
Задайте режим работы модуля:
Текст
Рисунок
Таблица
Выход
Выход в главное меню
Получение изображений поверхности рабочей части
Таблица
Введите название:
Задайте: число строк
1
число столбцов
1
Переместить
Выход


Analyse
Автоматизированное оценивание качества процесса эксплуатации модифицированного инструмента по параметрам дефектов рабочей области
Формирование базы знаний
Формирование базы знаний о контактных процессах на поверхностях рабочей части
Задайте режим работы модуля:
представление знаний
воспроизведение знаний
производство знаний
выход
Производство знаний
Задайте режим работы модуля:
По результатам работы с базой данных
По результатам работы с системой моделирования
Выход
Выход в главное меню
Разработка алгоритмов анализа и правил принятия решений по оценке состояния рабочей области

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

♦

САРАТОВСКИЙ АГРЕГАТНЫЙ ЗАВОД
(ОАО «САЗ»)
410078, г.Саратов, ул. Астраханская,45
Факс: (845-2) 39-26--92, 51-48-58
Телефон: (845-2) 39-27-22
E-mail: oaosaz@mail.ru

« 25 » марта 2014г. № 100/1-22

Ректору
Саратовского государственного
технического университета
имени Гагарина Ю.А.
Плеве И.Р.

Уважаемый Игорь Рудольфович!

Сообщаю Вам, что ОАО «Саратовский агрегатный завод» выражает коммерческую заинтересованность в автоматизированной системе оценивания качества процесса эксплуатации режущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда, разработку которой осуществляет магистрант вашего университета Плешакова Е.С. под руководством д.т.н., профессора Мартынова В.В. в научном коллективе д.т.н., профессора Бржозовского Б.М. Эксплуатация этого инструмента (как сборного, так и цельного) в условиях нашего производства подтвердила увеличение его износостойкости в 1,5-3 раза, о чем имеются соответствующие документы, и определила целесообразность поиска условий повышения отказоустойчивости, что является особенно актуальным для цельного инструмента.

Считаю весьма своевременным и продуктивным привлечение молодых исследователей в рамках интеграции усилий СГТУ имени Гагарина Ю.А. и ОАО «Саратовский агрегатный завод» для решения задач, способствующих не только повышению качества нашей продукции, соответствующей Перечню критических технологий и Приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации, но и подготовке перспективных научных кадров.

Генеральный директор _____ Иванов И.Г.

Ф.0806

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
Завод электроагрегатного машиностроения «СЭПО-ЗЭМ»
Акционерного общества
«САРАТОВСКОЕ ЭЛЕКТРОАГРЕГАТНОЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ»
(ООО «СЭПО - ЗЭМ»)

Проспект 50 лет Октября, пл. Ленина, г. Саратов, 410040. Тел. (8452) 63-24-35, факс 30-82-82. E-mail: zem@sepo.ru
ОКПО 34209484, ОГРН 1026403046702, ИНН/КПП 6453037698/644750001

24.03.2014 № 410-09-17/5

На № _____ от _____

Ректору Саратовского
государственного технического
университета им. Гагарина Ю.А.
г. Плеве И.Р.

Уважаемый Игорь Рудольфович!

Сообщаю Вам, что ООО «СЭПО-ЗЭМ» выражает заинтересованность в опытно-промышленной апробации автоматизированной системы оценивания качества процесса эксплуатации режущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы комбинированного разряда, разработку которой осуществляет в научном коллективе д.т.н., профессора Бржозовского Б.М. магистрант вашего университета Плешакова Е.С. Эксплуатация обычного режущего инструмента в условиях нашего производства связана с большими затратами на его приобретение, поэтому использование инструмента, позволяющего снизить объем этих затрат, в том числе за счет поиска условий его максимально эффективного использования, является актуальным и своевременным, особенно при производстве изделий из труднообрабатываемых материалов, составляющих значительную часть в общем объеме изготавливаемой продукции. Перспектива последующей коммерциализации проекта внедрения системы имеется.

Зам. директора
по качеству _____ Е.Н. Баринов

00217633

Саратовское Акционерное Производственно – Коммерческое открытое Общество "Нефтемаш"

ОАО "НЕФТЕМАШ" – САПКОН

основано в 1926 году

Интегрированная система менеджмента соответствует требованиям ISO 9001, ISO 14001

РОССИЯ, 410012, г. Саратов, ул. Б. Казачья, 113
Тел.: (845-2) 26-16-59 Факс.: (845-2) 50-60-30
E-mail: neftemash@sapcon.ru
http://www.sapcon.ru

_____№ _____ _____
На № _____ от_____

Ректору Саратовского
государственного технического
университета имени
Гагарина Ю.А. Плеве И.Р.

Уважаемый Игорь Рудольфович!

Сообщаю Вам, что ОАО «Нефтемаш» – САПКОН заинтересовано в апробации автоматизированной системы оценивания качества процесса эксплуатации режущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы, разработку которой осуществляет магистрант вашего университета Плешакова Е.С. под руководством д.т.н., профессора В.В. Мартынова. Применение традиционного режущего инструмента в некоторых технологических процессах нашего производства связано с проблемами назначения оптимальных режимов резания, приводящими к отказам инструмента и увеличению, как следствие, времени изготовления деталей и неоправданным простоям дорогостоящего оборудования. В связи с этим использование модифицированного инструмента и данной системы является для нас актуальным с точки зрения соблюдения договорных обязательств о сроках поставки нашей продукции предприятиям нефтегазодобывающего комплекса страны. Перспектива коммерциализации проекта внедрения системы и модифицированного инструмента имеется.

С уважением,
Генеральный директор В.С. Мигаль

исп Зуев А.Г. (8452) 50-84-39

Рег. № 807

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ЦЕНТРАЛЬНОЕ КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО «ТИТАН»
Федеральный научно – производственный центр
(АО "ЦКБ "ТИТАН")
400071, Волгоград, пр. Ленина
Тел. 27-19-10
Факс. (8442) 27-57-36, 27-40-20
E-mail: cdb@cdbtitan.ru
ОКПО 08630976 ОГРН 1103459004362
ИНН 3442110950 / КПП 344201001

от 06.04.2015 № 244/911 АА

на № ____ от ____

Об автоматизированной системе оценивания процесса эксплуатации инструмента

410054, г. Саратов,
ул. Политехническая, 77

Ректору
Саратовского государственного технического университета
им. Гагарина Ю. А.

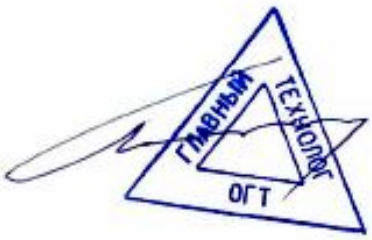
профессору Плеве И. Р.

Уважаемый Игорь Рудольфович!

Сообщаю Вам, что АО «ЦКБ «Титан» выражает заинтересованность в опытно-промышленной апробации на безвозмездных условиях автоматизированной системы оценивания качества процесса эксплуатации режущего инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы, разработанной аспирантом Плешаковой Е.С. под руководством профессоров В.В. Мартынова и Б.М. Бржозовского. Эксплуатация режущего инструмента в условиях нашего производства связана с большими затратами на его приобретение, поэтому возможность оперативного оценивания режущих способностей инструмента и, как следствие, обоснованное управление оптимальными режимами обработки, весьма значима для нашего предприятия, особенно при производстве изделий из труднообрабатываемых материалов и материалов, прошедших различные стадии термической обработки, составляющих значительную часть в общем объеме выпускаемой продукции.

Считаю, что привлечение молодых исследователей к решению проблем современного машиностроительного производства способствует как повышению качества подготовки кадров для ОПК, так и повышению эффективности работы машиностроительных предприятий.

Главный технолог
АО «ЦКБ «Титан» С. И. Пеньшин



Приложение Г

Материалы практической реализации результатов работы

Приложение Г.1

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ОАО «Саратовский агрегатный завод» (САЗ)

_____ И.Г. Иванов

«__» _____ 2013 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (СГТУ)

д.т.н., профессор _____ А.А. Сытник

«10» мая 2013 г.

Акт испытаний

Настоящий акт составлен о том, что в период с 24 по 30 мая 2013 г. в цехе №5 предприятия проводились сравнительные стойкостные испытания трех фрез Ø10 ЕЦ-А4 100-22Ц10-70 из твердого сплава RX10, модифицированных методом низкотемпературного плазменного воздействия по технологии, разработанной сотрудниками кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» (КиМО) СГТУ. Испытания проводились в процессе изготовления деталей 9П157-03.186 «Ловитель» из стали 35 ХГСЛ (твердость 24 HRC) на многоцелевом станке HURCO VMX 30 (наладчики Гусев С.А., Демченко И.С., Печников Н.А.) на операции чернового фрезерования 3 выступов и торца при следующих значениях параметров технологического режима:

– 1 фреза: частота вращения – 3000 мин$^{-1}$, подача – 1300 мм/мин, ширина резания – 0,3 мм, глубина резания – 1,85 мм;

– 2 фреза: частота вращения – 3000 мин$^{-1}$, подача – 600 мм/мин, ширина резания – 0,2 мм, глубина резания – 1,85 мм;

– 3 фреза: частота вращения – 3000 мин$^{-1}$, подача – 600 мм/мин, ширина резания – 0,5 мм, глубина резания – 1,85 мм.

Результаты испытаний позволили зафиксировать следующее.

1. Параметры размерной точности обработанных поверхностей соответствуют требованиям технической документации на операцию.

2. Количество обработанных деталей составило:

– первой фрезой – 3 за 10,86 мин. машинного времени;

– второй фрезой – 7 за 37,94 мин. машинного времени;

– третьей фрезой – 14 за 65,8 мин. машинного времени.

Количество деталей, обработанных на данной операции обычной фрезой, составляет 4 за 21,68 мин. машинного времени при следующих значениях параметров технологического режима: частота вращения – 6000 мин$^{-1}$, подача – 1300 мм/мин, ширина резания – 0,2 мм, глубина резания – 1,85 мм, что аналогично рабочим параметрам 2 модифицированной фрезы.

Сравнение результатов испытаний позволяет сделать следующие выводы.

1. Повышение времени стойкости модифицированных фрез зависит не только от их прочностных характеристик, но и от условий эксплуатации, в значительной степени определяемых параметрами технологического режима:

– при одновременном увеличении рабочей подачи на зуб фрезы и ширины срезаемого слоя (1 фреза) не была обеспечена даже нормативная стойкость;

– при работе на принятом для данной операции сочетании параметров (2 фреза) повышение времени стойкости составило 1,75 раза.

– при увеличении ширины срезаемого слоя (3 фреза) повышение времени стойкости составило 3 раза.

2. Изучение состояния рабочих поверхностей 3 фрезы, показавшей наилучшие результаты (приложение), показало следующее:

– износостойкость определяется устойчивостью режущей кромки к нагрузкам в процессе фрезерования;

– потеря устойчивости кромки ведет к постепенному послойному смещению кромочных микрообъемов модифицированного материала по передней или задней поверхностям зуба в новое положение и формированию «розеток» – устойчивых выпуклых образований (наплывов), имеющих высокую адгезию с материалом основы (рис.П.1, а-в) в результате повышения сродства карбидной фазы и связки, возникшего при плазменной обработке инструмента;

– на задней поверхности фрезы наблюдается износ без образования грубых проточин (рис.П.1, г);

– в точке врезания формируется режущий клин с радиусом округления аналогичным твердосплавным пластинам (рис.П.1, г):

– модификация поверхности приводит к изменению механизма износа режущих кромок: износ приобретает характер истирания передней и задней поверхности зуба до состояния, при котором происходит потеря устойчивости режущего клина, а также срыв «розеток» (рис.П.1, д);

– разрушение кромки провоцируют ступенчатые дефекты на ее поверхности в исходном состоянии (рис.П.1, г);

– неравномерность износа зубьев провоцирует саморазрушение (рис.П.1, е).

– разрушение зубьев является неравномерным.

Дальнейшее повышение эффективности использования модифицированного инструмента на данной операции целесообразно вести в направлении оптимизации ширины срезаемого слоя, формирования между торцовой и цилиндрической режущими кромками радиуса округления вместо переходной фаски, обеспечения равномерности плазменной обработки зубьев, поскольку это позволит снизить или полностью устранить их разрушение, повысить износостойкость и сократить время обработки за счет уменьшения количества проходов.

Настоящий акт составили в 5-ти экземплярах и подписали:

От ОАО «САЗ»:

Главный технолог _____ А.И. Папков

Начальник цеха №5 _____ А.Н. Рыжов

Технолог _____ В.И. Рожок

От СГТУ:

Зав. кафедрой КиМО, д.т.н., профессор _____ Б.М. Бржозовский

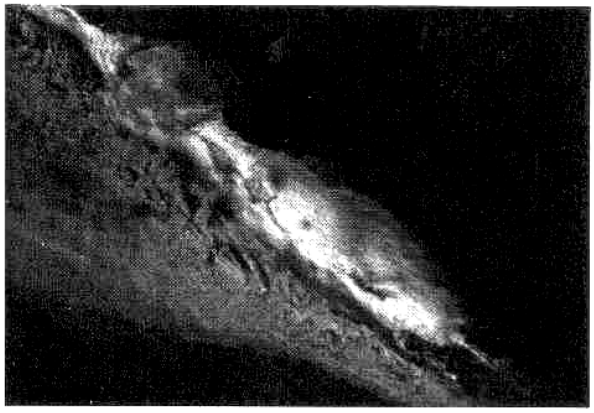
Профессор кафедры, д.т.н., профессор _____ В.В. Мартынов

К.т.н., докторант _____ Е.П. Зинина

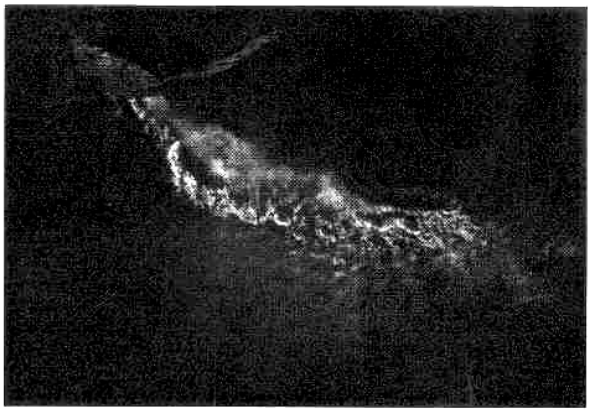
Магистрант _____ Е.С. Плешакова

Приложение

Характерные дефекты рабочей части модифицированной фрезы (увеличение – 500$^{\times}$)

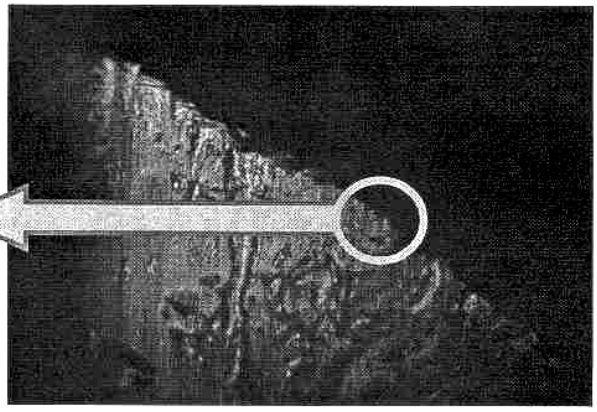


а (зуб 1)

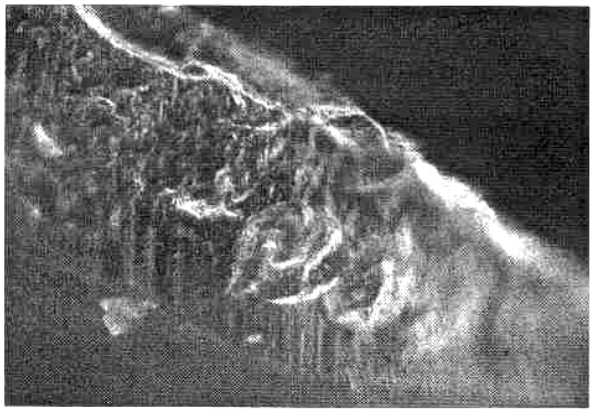


б (зуб 2)

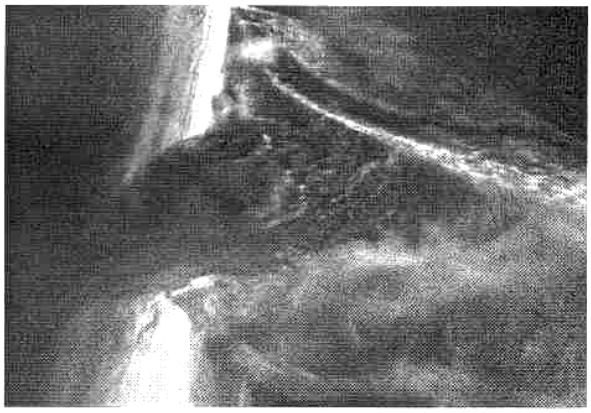
в



г (зуб 1)



д (зуб 3)



е (зуб 4)

Рис.П.1

Приложение Г.2

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ОАО «Саратовский агрегатный завод» (САЗ)

_____ И.Г. Иванов

«17» июля 2013 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (СГТУ)

д.т.н., профессор _____ А.А. Сытник

«18» июля 2013 г.

Акт испытаний

Настоящий акт составлен о том, что 2-3 июля 2013 г. в цехе №5 предприятия проводились сравнительные стойкостные испытания ромбических пластин ISCAR CCGT 2-0-SM CCGT 060202-SM IC907 с фасонным стружколомом: обычной и четырех модифицированных методом низкотемпературного плазменного воздействия при различных сочетаниях режимных параметров по технологии, разработанной сотрудниками кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» (КиМО) СГТУ. Испытания проводились на токарно-фрезерном станке СТХ 310 (наладчик Рожок В.И.) в процессе растачивания отверстий в заготовках «Подушка» из стали 30ХГСА (твердость по КТ – 60) на длине 35 мм, от начального Ø33 мм до конечного Ø60 мм. Инструмент был закреплен в цилиндрической оправке Ø16 мм и имел вылет 43 мм.

Растачивание производилось при следующих значениях параметров технологического режима:

– частота вращения – 1000 мин$^{-1}$;

– подача – 0,15 мм/об (при растачивании 1 вершиной) и 0,2 мм/об (при растачивании 2 вершиной);

– глубина резания на черновых проходах – 1 мм;

– глубина резания на чистовом проходе – 0,3 мм.

Результаты испытаний позволили зафиксировать следующее.

1. Параметры размерной точности и шероховатости обработанных поверхностей соответствовали требованиям технической документации на операцию.

2. Данные по стойкости пластин в количестве изготовленных деталей распределились следующим образом:

Пластина	**Стойкость, в количестве изготовленных деталей**		**Причина потери работоспособности**
	Вершина 1	**Вершина 2**	
	Подача, мм/об		
	0,15	**0,2**	
Обычная	3	1	Скол вершины / Скол вершины
Модифицированные			
1	3	2	Скол вершины / Скол грани
2	8	3	Скол вершины / Скол вершины
3	7	–	Поломка при изготовлении 8 детали (раскол на 2 части)
4	7	1	Скол грани / Скол грани

Повышение времени стойкости модифицированных пластин по сравнению с обычной пластиной составило:

1 пластина: 1 вершина – нет, 2 вершина – 2 раза;

2 пластина: 1 вершина – 2,67 раза, 2 вершина – 3 раза;

3 пластина: 1 вершина – 2,33 раза, 2 вершина – нет;

4 пластина: 1 вершина – 2,33 раза, 2 вершина – нет.

3. Износостойкость модифицированных пластин в значительной степени зависит от качества их рабочих поверхностей (в том числе, режущих кромок), определяемых наличием дефектов. Это связано с тем, что в местах наличия дефектов происходит зарождение микротрещин, число которых под действием силовых и тепловых процессов при резании растет в результате ослабления и разрушения связей между модифицированным слоем и расположенным под ним подслоем, особенно если твердость последнего является низкой. В конечном итоге микротрещины могут объединяться и локализоваться в макродефекты с последующим отслаиванием и выносом из зоны локализации.

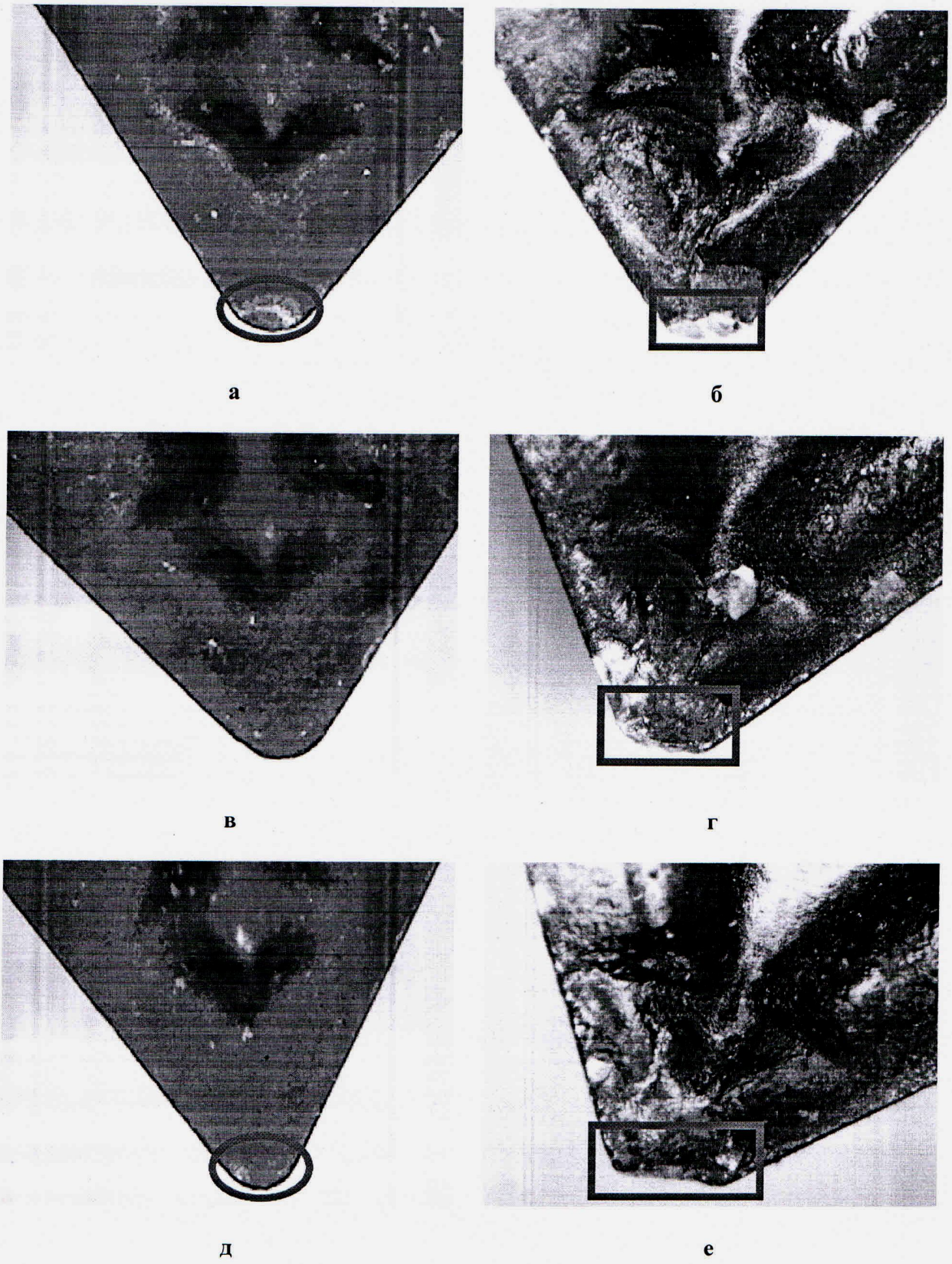


Рис.1. Состояние рабочих поверхностей пластин до (левые) и после (правые) эксплуатации: а, б – первая, в, г – вторая, д, е – четвертая; ⬭ – исходные дефекты, ▭ – сколы

Так, наличие дефектов на передней поверхности пластин 1 и 4 (рис.1, а, д) привело к тому, что, обладая бóльшей прочностью, они не показали лучших результатов. Это связано с тем, что плазменная модификация является финишной операцией, поэтому устранить существующие дефекты не может. У второй же пластины крупные дефекты на кромках отсутствовали (рис.1, в), поэтому она показала наилучшие результаты. Изложенное означает, что плазменная модификация, вызывая структурную перестройку поверхностного слоя, повышает его устойчивость к процессу образования и воздействия дефектов на рабочие поверхности и режущие кромки инструмента.

4. Износостойкость модифицированного инструмента зависит не только от степени изменения его механических свойств, обеспечивающих повышение прочности рабочей части, но и от условий резания, определяемых значениями параметров технологического режима. В данном случае условия были переменными, поскольку частота вращения устанавливалась постоянной, что изменяло скорость резания с 94,2 мм/мин в начале растачивания до 188,4 м/мин. в конце, т.е. увеличивало ее в 2 раза. Результатом стало повышение касательной нагрузки на заднюю поверхность пластин, что в результате привело к сколам вершин (рис.1, б, г, е) тем в бóльшей степени, чем в бóльшей степени прочность модифицированного слоя превышала прочность подслоя (особенно у 4 пластины), что лишало последнего возможности удержать модифицированный слой.

Настоящий акт составили в 5-ти экземплярах и подписали:

От ОАО «САЗ»:

Главный технолог _____ А.И. Папков

Начальник цеха №5 _____ А.Н. Рыжов

Технолог _____ В.И. Рожок

От СГТУ:

Зав. кафедрой КиМО, д.т.н., профессор _____ В.М. Бржозовский

Профессор кафедры, д.т.н., профессор _____ В.В. Мартынов

К.т.н. _____ Е.П. Зинина

Аспирант _____ В.О. Стариннова

Магистрант _____ Е.С. Плешакова

Приложение Г.3

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ОАО «Саратовский агрегатный завод» (САЗ)

_____ И.Г. Иванов

«09» 06 2014 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (СГТУ)

д.т.н., профессор _____ А.А. Сытник

«09» 06 2014 г.

Акт испытаний

Настоящий акт составлен о том, что в период с 03 по 06 марта 2014 г. в цехе №5 предприятия проводились сравнительные стойкостные испытания двух сборных фрез Ø25 мм, оснащенных четырьмя сменными четырехгранными пластинами ICSAR T490 из твердого сплава RX-10: обычными (первая) и модифицированными (вторая) методом низкотемпературного плазменного воздействия по технологии, разработанной сотрудниками кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» (ПТК) СГТУ имени Гагарина Ю.А. Испытания проводились в процессе изготовления деталей «Ползун» из стали 30ХГСА, твердость 24 HRC на многоцелевом станке DMU 80 (наладчик Игнатенко А.Ю.) методом контурного фрезерования при следующих значениях параметров технологического режима:

– частота вращения – 960 $мин^{-1}$;

– подача – 500 мм/мин;

– снимаемый припуск – 0,2 мм.

Результаты испытаний позволили зафиксировать следующее.

1. Параметры размерной точности и шероховатости обработанных поверхностей соответствуют требованиям технической документации на операцию.

2. Фреза с обычными пластинами проработала 90 минут.

3. Фреза с модифицированными пластинами проработала 110 минут.

Повышение времени стойкости фрезы с модифицированными пластинами составило 1,22 раза.

В указанный период аналогичной фрезой с модифицированными пластинами была проведена обработка партии деталей «Опора» из стали 30ХГСА, твердость 28…35 HRC при следующих значениях параметров технологического режима:

– частота вращения – 2500 мин$^{-1}$;

– подача – 600 мм/мин;

– снимаемый припуск – 0,2 мм;

Время обработки партии составило 70 минут. Видимых проявлений изнашивания на рабочих поверхностях пластин по окончании обработки не зафиксировано.

Настоящий акт составили в 5 экземплярах и подписали:

От ОАО «САЗ»:

Главный технолог _____ А.И. Папков

Начальник цеха №5 _____ С.В. Портнов

Технолог _____ В.И. Рожок

От СГТУ имени Гагарина Ю.А.:

Профессор кафедры ПТК, д.т.н., профессор _____ Б.М. Бржозовский

Профессор кафедры ПТК, д.т.н., профессор _____ В.В. Мартынов

Докторант кафедры ПТК, к.т.н. _____ Е.П. Зинина

Магистрант _____ Е.С. Плешакова

Приложение Г.4

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ОАО «Саратовский агрегатный завод» (САЗ)

_____ И.Г. Иванов

«09» _____ 2014 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (СГТУ)

д.т.н., профессор _____ А.А. Сытник

«09» _____ 2014 г.

Акт испытаний

Настоящий акт составлен о том, что 05 февраля 2014 г. в цехе №5 предприятия проводились сравнительные стойкостные испытания двух сборных фрез Ø32 мм, оснащенных пятью сменными четырехгранными пластинами ICSAR T490 из твердого сплава RX-10: обычными (первая) и модифицированными (вторая) методом низкотемпературного плазменного воздействия по технологии, разработанной сотрудниками кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» (ПТК) СГТУ имени Гагарина Ю.А. Испытания проводились в процессе изготовления деталей «Опора» из стали 35ХГСЛ, твердость 24 HRC на многоцелевом станке DMU 80 (наладчик Игнатенко А.Ю.) методом контурного фрезерования при следующих значениях параметров технологического режима:

– частота вращения – 1800 $мин^{-1}$;

– подача – 350 мм/мин (обычные пластины) и 500 мм/мин (модифицированные пластины);

– снимаемый припуск – 0,5 мм.

Результаты испытаний позволили зафиксировать следующее.

1. Параметры размерной точности и шероховатости обработанных поверхностей соответствуют требованиям технической документации на операцию.

2. Фреза с обычными пластинами проработала 100 минут.

3. Фреза с модифицированными пластинами проработала 100 минут.

Путь, пройденный фрезами за время стойкости, составил:

– фреза с обычными пластинами – 35 м;

– фреза с модифицированными пластинами – 50 м.

Таким образом, повышение производительности обработки фрезой, оснащенной модифицированными пластинами по сравнению фрезой, оснащенной обычными пластинами, составило 1,43 раза.

Настоящий акт составили в 5 экземплярах и подписали:

От ОАО «САЗ»:

Главный технолог _____ А.И. Папков

Начальник цеха №5 _____ С.В. Портнов

Технолог _____ В.И. Рожок

От СГТУ имени Гагарина Ю.А.:

Профессор кафедры ПТК, д.т.н., профессор _____ Б.М. Бржозовский

Профессор кафедры ПТК, д.т.н., профессор _____ В.В. Мартынов

Докторант кафедры ПТК, к.т.н. _____ Е.П. Зинина

Магистрант _____ Е.С. Плешакова

Приложение Г.5

АО «ЦКБ «Титан»
АКТ ИСПЫТАНИЙ

Настоящий акт составлен о том, что в период с 12.03.2016г. по 15.04.2016г. в цехе №4 предприятия АО «ЦКБ «Титан» проводились сравнительные стойкостные испытания торцевых фрез диаметром 63мм, оснащенных СМП из твердого сплава марки ВК8:

Использовались:

-комплекты СМП в состоянии поставки;

-комплекты СМП, модифицированных методом низкотемпературного плазменного воздействия по технологии, разработанной сотрудниками кафедры «Проектирование технических и технологических комплексов» (ПТК) Саратовского Государственного Технического Университета.

Испытания проводились в процессе торцевого фрезерования заготовок: 121-63, 121-21 и 121- 53, изготовленных из коррозионно-стойкой стали 25Х13Н2 с твердостью НВ 126...197 на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ мод. «Микрон» при следующих значениях режимов обработки:

- скорость резания 72 м/мин.;
- подача 0,07 мм/зуб;
- снимаемый припуск 1,6 мм.

Результаты испытаний позволили зафиксировать следующее:

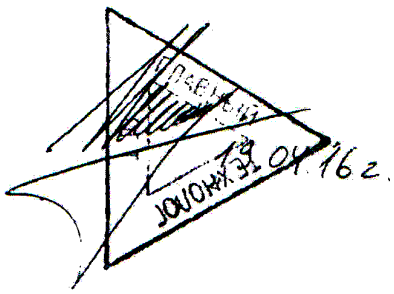
1. Параметры размерной точности и шероховатости обработанных поверхностей деталей 121-63, 121-21 и 121- 53 соответствовали требованиям технической документации (Ra = 2,5мкм и 10-му квалитету точности).

2. СМП в состоянии поставки до замены (при износе по задней поверхности 0,2 мм) проработали: 1-й комплект – 35 мин., 2-й комплект – 31 мин.

3. Модифицированные СМП до замены (при износе по задней поверхности 0,2 мм) проработали: 1-й комплект – 49 мин, 2-й комплект – 51 мин.

Заключение: стойкость модифицированных СМП повысилась в 1,4...1,6 раза по сравнению с СМП в состоянии поставки.

Зам. Главного технолога
АО «ЦКБ «Титан»,
Кандидат технических наук



А.Р. Ингеманссон