

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Комсомольский – на – Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Ситамов Эрадж Сикандарович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКАРНОЙ
ОБРАБОТКИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ НЕРЖАВЕЮЩИХ
СТАЛЕЙ ЗА СЧЁТ РАЗРАБОТКИ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ
СМЕННЫХ ТИПОВЫХ ТВЁРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности
05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки.

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Мокрицкий Борис Яковлевич

Комсомольск-на-Амуре, 2021

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	4
Актуальность темы исследования	4
Степень разработанности темы исследования	5
Цель и задачи исследования	6
Научная новизна работы	6
Теоретическая и практическая значимость работы	7
Методология и методы исследования	8
Положения, выносимые на защиту	9
Степень достоверности и апробация результатов	10
Личный вклад автора	11
Публикации	11
ГЛАВА 1. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ ПО ОБРАБОТКЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ	12
1.1 Общие положения	12
1.2 Сведения об исследованиях в области обработки нержавеющей сталей, об исследованиях работоспособности лезвийного режущего инструмента	13
1.3 Выводы по главе	20
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ	21
2.1. Общая позиция разработки методологии исследования	21
2.2. Предварительный этап разработки методологии исследования	24
2.3. Методическое, приборное и аппаратное обеспечение методологии исследования	25
2.4. Сущность предложенного подхода к решению задачи	27
2.5 Выводы по главе	31
ГЛАВА 3. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ИНСТРУМЕНТА	32
3.1. Общая часть	32
3.2. Принятая позиция имитационного моделирования	32
3.3. Математический аппарат имитационного моделирования	37
3.4. Принятые схемы имитационного моделирования	46
3.5. Анализ моделирования по производственным показателям	51
3.6. Полученные результаты моделирования разных инструментов	52
3.7 Выводы по главе	60

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ	63
4.1. Общие вопросы экспериментального исследования	63
4.2. Результаты предварительной разработки общей последовательности (методики) исследования	66
4.3. Описание токарного станда для экспериментальных исследований	67
4.4. Результаты экспериментальных исследований периода стойкости инструмента	86
4.5. Результаты материаловедческого исследования инструментов.....	100
4.6. Результаты исследования качества обработанной поверхности	104
4.7. Выводы по главе.....	126
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ И ОПУБЛИКОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ	130
Приложение 1. Иллюстрация взаимосвязи изменения во времени применительно к разным инструментальным материалам	145
Приложение 2. Акты принятия результатов исследования в производство.....	147
Приложение 3. Акт принятия результатов исследования в учебный процесс	149

ВВЕДЕНИЕ

В данной диссертации изложены результаты разработки и исследования нового разработанного инструмента применительно к токарной обработке трёх специализированных нержавеющей сталей марок 12X18H10T, 13X15H5 AM-3 и 09X17H7Ю с акцентом на обработку стали марки 09X17H7Ю как наиболее труднообрабатываемую.

Актуальность темы исследования

В условиях бурного роста, требований к производительности современных станков с ЧПУ, к качеству и точности изготовления деталей актуализируется необходимость совершенствования конструкции и качества металлорежущего инструмента.

В ряде отраслей отечественного и зарубежного машиностроения сложилось так, что затраты на изготовление инструмента в структуре себестоимости изготавливаемых изделий превышают 10%, что резко снижает эффективность производства. Соответственно, требуются меры по снижению затрат.

Известные решения не исчерпали проблему повышения работоспособности инструмента, в том числе проблему совершенствования инструментальных материалов сменных токарных режущих пластин. Эта проблема весьма острая при токарной обработке нержавеющей сталей, особенно специализированных коррозионностойких нержавеющей сталей.

Современные машиностроительные предприятия всё более ориентируются на высокопроизводительную обработку заготовок деталей высокой точности, выполненных из современных конструкционных или функциональных материалов. Для этого необходим соответствующий металлорежущий инструмент. Применительно к токарной обработке для этого в первую очередь необходима разработка новых эффективных инструментальных материалов твёрдосплавных типовых сменных пластин.

Особенно для обработки специализированных нержавеющей сталей. Например, для продольного точения заготовок, выполненных из труднообрабатываемой высоко коррозионностойкой стали марки 09X17H7Ю, область применения которой стремительно расширяется. Для сравнения в работе дополнительно стали двух марок 12X18H10T, 13X15H5 AM-3. Каждая из этих сталей уникальна по физико-механическим характеристикам и эксплуатационным свойствам. Они выбраны для исследования потому, что каждая из них является труднообрабатываемой и коррозионностойкой. Имеющиеся рекомендации по их обработке устарели. Например, сталь 09X17H7Ю была разработана в первой половине 20 века, покрытия на инструменте тогда только начинали применяться, а рекомендации по её обработке были ориентированы на станочное оборудование, которого сейчас нет.

Актуальность в научном аспекте обоснована острой необходимостью развития знаний и разрешения существующих противоречий. Актуальность в прикладном аспекте обоснована настоятельной потребностью решения стоящих задач по повышению работоспособности металлорежущего инструмента.

Степень разработанности темы исследования

Повышением работоспособности инструмента для обработки нержавеющей сталей занимаются специалисты многих ведущих в мире инструментальных фирм, известные зарубежные и отечественные учёные. Например, Аникин В.Н., Артамонов Б.Б., Безъязычный В.Ф., Бобров В.Ф., Верещака А.А., Верещака А.С., Григорьев С.Н., Евсеев Д.Г., Зорев Н.Н., Кабалдин Ю.Г., Куликов М.Ю., Лоладзе Т.Н., Наумов А.Г., Подураев В.Н., Пономарёв Б.Б., Промтов А.И., Табаков В.П., Питц Г., Трент В., Iochen M., Schneider, Fuch M, Schefftr M., Gunterrez G. и многие другие.

Полученные ими результаты общеизвестны. Но современным требованиям они не соответствуют. Рекомендации зарубежных производителей инструмента разработаны в целом на группу «нержавеющие стали», они не применимы, отказ инструмента происходит на первых минутах резания.

В диссертации предложено повышение периода стойкости сменных типовых твёрдосплавных пластин обеспечить за счёт нанесения новых покрытий, способных существенно повысить период стойкости.

Цель и задачи исследования

Цель - повышение периода стойкости токарного твёрдосплавного инструмента при обработке специализированных труднообрабатываемых нержавеющей сталей марок 09X17H7Ю, 12X18H10Т, 13X15H5 АМ-3 за счёт разработки и применения новых инструментальных покрытий.

Задачи:

1. Разработать покрытия для твёрдосплавных сменных токарных типовых пластин, обеспечивающих повышение периода стойкости более чем на 50% в сравнении с инструментом без покрытия.

2. Выработать рекомендации по выбору параметров режима резания при точении разработанными инструментами.

3. Разработать и обосновать рекомендации по обеспечению качества поверхностей деталей, обработанных инструментом с покрытиями без снижения производительности обработки.

Научная новизна работы

Научная новизна диссертационной работы включает следующие основные положения:

– методология разработки металлорежущего твёрдосплавного инструмента с покрытиями, обеспечивающими повышение периода

стойкости в два и более раз в сравнении с инструментом без покрытия при точении специализированных труднообрабатываемых нержавеющей сталей 09X17H7Ю, 12X18H10T, 13X15H5 AM-3 без снижения производительности обработки и с повышением качества обработанной поверхности. Методология построена на применении метода имитационного исследования, позволяющего создать многовариантные архитектуры покрытий, виртуально смоделировать эксплуатационные свойства инструмента с такими покрытиями, отобрать из них лучшие (по периоду стойкости) конкурентные покрытия, смоделировать ожидаемые величины искомых выходных параметров при тех или иных условиях эксплуатации инструмента;

– критерии (и их параметры) имитационного моделирования инструмента под заданные условия эксплуатации разработанных инструментов. Установлено, что такими критериями являются «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «деформация инструментального материала», «сила резания», «износ инструмента».

– уточнённый механизм стружкообразования при точении разработанным инструментом. Уточнение связано с изменением положения плоскости сдвига при использовании разных разработанных покрытий. Это позволяет минимизировать образование сливной стружки и обеспечивает повышение качества обработанной поверхности.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическую значимость работы подтверждают следующие основные положения:

– Разработана методология проектирования покрытий твёрдосплавного инструмента применительно к точению специализированных труднообрабатываемых нержавеющей сталей 09X17H7Ю, 12X18H10T, 13X15H5 AM-3.

– Предложены входные и выходные критерии имитационного проектирования покрытий и их параметры.

– Практическую значимость работы подтверждают следующие результаты:

– Разработана последовательность действий (методика) при проектировании покрытий для токарного инструмента под заданные условия его эксплуатации.

– Предложен ряд покрытий, из которых выбраны десять предпочтительных и выделены те, которые обеспечивают прирост периода стойкости в два раза и более до износа 0,5 мм по задней поверхности инструмента.

– Разработаны регрессионные (полиномные) уравнения, характеризующие зависимость величины износа инструмента от времени его работы при точении указанных нержавеющей сталей.

Методология и методы исследования

Сущность методологического подхода к разработке новых инструментов с покрытиями основана на применении имитационного моделирования как метода исследования для предварительного многовариантного проектирования покрытий. Для имитационного моделирования использована программная среда DEFORM, которая базируется на методе конечных элементов. Для моделирования процесса точения был принят ряд упрощений и ограничений. Рассматривалась плоская ортогональная схема свободного резания, представляющая внедрение режущего клина призматической формы в материал заготовки детали. Режущий клин принимали как твердое тело, полностью соответствующее форме и геометрии типовой сменной твёрдосплавной пластины. В качестве ограничений были приняты недопущение разрушения покрытия по хрупкому механизму и предотвращение пластической деформации покрытия и субстрата из-за избыточных температур в зоне резания. Установлено достаточным введение

следующих входных параметров и условий: физико-механические характеристики обрабатываемых материалов и архитектура (особенности конструкции, состава, технологии нанесения) покрытий инструмента. Установлено достаточным получение выходных прогнозных результатов по параметрам «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «износ инструмента», что характеризует сложно-напряжённое состояние материала инструмента. Установлено, что соотношение рассмотренных параметров существенно различается для разных инструментов, но тенденция их изменения во всех случаях сходная. Переход от этих параметров к прогнозному проектированию архитектуры покрытий осуществляли путём измерения силы резания при натуральном резании. Значения составляющих силы резания использовали для расчёта напряжений в инструментальном материале по известной зависимости профессора Петрушина С.И. Установлена правомерность такого подхода.

Положения, выносимые на защиту

1. Совокупность разработанных технических решений по разработке твёрдосплавного инструмента с новыми покрытиями, обеспечивающими повышение периода стойкости инструмента при точении специализированных труднообрабатываемых нержавеющей сталей 09X17N7Ю, 12X18N10T, 13X15N5 АМ-3.

2. Методология проектирования металлорежущего твёрдосплавного инструмента с покрытиями, обеспечивающими повышение периода стойкости в 2 и более раз в сравнении с инструментом без покрытия при точении специализированных труднообрабатываемых нержавеющей сталей 09X17N7Ю, 12X18N10T, 13X15N5 АМ-3 без снижения производительности обработки и с повышением качества обработанной поверхности.

3. Критерии и их параметры для имитационного моделирования инструмента под заданные условия эксплуатации разработанных

инструментов. Такими критериями являются «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «деформация инструментального материала», «сила резания», «износ инструмента».

4. Регрессионные (полиномные) зависимости, характеризующие величину износа разработанных инструментов с разными покрытиями с ростом периода их работы.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждена совпадением (в пределах погрешностей измерения периода стойкости инструмента и шероховатости обработанной поверхности) теоретических и экспериментальных данных. Реализация результатов осуществлена передачей рекомендаций к использованию в производстве и внедрением в учебном процессе. Полученные результаты не противоречат общепринятым положениям.

Апробация работы выполнена путём докладов и обсуждения на международных и республиканских научно – технических конференциях (2 заочных доклада на международной конференции (25-26 июня 2020 <https://iopscience.iop.org/issue/1757-899X/939/1>) при Новгородском государственном университете им. Ярослава Мудрого; 2 доклада на III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2019г ISBN 978-5-7765-1440-1 ISBN 978-5-7765-1438-8; доклад (в режиме видеоконференции) на научном семинаре кафедры «Технологии и оборудование машиностроительных производств» Иркутского национального исследовательского технического университета 14.01.2021.

Личный вклад автора

Состоит в разработке и исследовании инструмента путём имитационного моделирования и натуральных экспериментов при резании, в разработке методик и выборе приборного обеспечения исследования, в разработке технических решений повышения стойкости инструмента, в выборе критериев и параметров имитационного моделирования, в проведении экспериментов и обработке их результатов, в опубликовании полученных результатов.

Публикации

Основные положения работы опубликованы в **15** работах, в том числе, в изданиях, рекомендованных ВАК РФ – **6** публикаций, в международных базах Scopus, WOS – **3** публикации, русифицированной площадке Scopus или WOS – **2** публикации.

ГЛАВА 1. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ ПО ОБРАБОТКЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

1.1 Общие положения

Диссертация направлена на разработку и исследование нового токарного инструмента в целях повышения периода его стойкости при обработке нержавеющей сталей (на примере трёх разных марок).

Рассмотрено это с позиций проектирования новых инструментальных (покрытий) материалов для твёрдосплавных сменных пластин.

Из-за сложности используемых терминов в работе принято следующее:

1. Разработаны различные варианты покрытий для твёрдосплавных сменных пластин. Но покрытие рассматривается не с позиций научной специальности «Материаловедение». Оно рассматривается с позиций научной специальности 05.02.07 как средство создания нового инструмента (твёрдосплавный субстрат ВК8 + покрытие). Поэтому речь в диссертации идёт, по сути, о создании нового твёрдосплавного инструмента в виде типовой твёрдосплавной сменной пластины.

2. В качестве критерия сравнения такого твёрдосплавного инструмента принят период стойкости (времени работы) до достижения нормируемой величины износа по задней грани режущих пластин.

3. В качестве нормируемой величины износа принято 0,5 мм. Это обусловлено качеством поверхностей, обработанных инструментом при черновой обработке.

Диссертационная работа ориентирована на разработку методики повышения периода стойкости типовых твёрдосплавных сменных пластин путём разработки новых покрытий, обеспечивающих существенное повышение периода стойкости без снижения производительности обработки

и качества поверхности деталей, выполненных из трёх существенно разных нержавеющей специализированных сталей марок 12Х18Н10Т, 13Х15Н5 АМ-3 и 09Х17Н7Ю, отличающихся своими физико-механическими характеристиками, эксплуатационными свойствами и назначением.

Сталь марки 13Х15Н5 АМ-3 принята к анализу как базовая (как рядовая сталь, не представляющая особых сложностей при лезвийной обработке).

Сталь марки 12Х18Н10Т выбрана как труднообрабатываемая. Данная сталь уникальна тем, что на предел её прочности существенно влияют условия термообработки.

Сталь марки 09Х17Н7Ю выбрана как специализированная труднообрабатываемая сталь, область применения которой стремительно растёт. Она создана в первой половине 20 века как специализированная, обладающая высокой коррозионной стойкостью. Эти её достоинства, безусловно, повлекли за собой трудности в её обработке лезвийным инструментом, в частности, при токарной обработке.

Далее приведены результаты анализа источников информации по обработке нержавеющей сталей с позиций повышения работоспособности инструмента.

1.2 Сведения об исследованиях в области обработки нержавеющей сталей, об исследованиях работоспособности лезвийного режущего инструмента

1.2.1 Анализ исследований разрушения инструмента

Существуют различные подходы к классификации разрушения инструментальных материалов. Для твердосплавного инструмента разрушение наиболее просто классифицируют на хрупкое и вязкое (пластическое) разрушение.

Хрупкое разрушение исследовано А.И. Кашириным [1 с.42]¹ и Н.И. Резниковым [2 с.30]. Они связывали низкую работоспособность твердого сплава с выкрашиванием режущих кромок, обусловленным явлением "удара" в момент врезания инструмента в заготовку. В этой связи были выработаны ряд рекомендаций [(3,с.44)², (4 с.36), (5 54)] по повышению периода стойкости (далее для упрощения – стойкости) инструмента. Однако ряд последующих работ [(6 с.72), (7 с.49)] показал, что с точки зрения стойкости роль удара при врезании важна, но не принципиальна.

Теория термической усталости сформулирована Н.Н. Зоревым [8 с.26], согласно которой гребенчатые продольные трещины формируются в результате растягивающих температурных напряжений, возникающих из-за перепада температуры при нагреве поверхностных слоев и их резком охлаждении при холостом ходе инструмента. Эта концепция была развита [(6 с.75), (7 с.53), (8 с.28), (9 с.63), (10 с.45)] вплоть до расчета температурных напряжений и разработки [(11 с.19), (12 с.230), (13 с.28)] методов компенсации перепада температур. В ряде исследований [14 с.96] роль адгезионного схватывания определена как превалирующего в механизме разрушения.

Т.Н.Лоладзе и А.И.Бетанели [(15 с.162), (16 с.86)] выделили выкрашивание и скол как виды хрупкого разрушения. Под выкрашиванием классифицировалось отделение малых частиц инструментального материала и связывалось оно с неоднородностью структуры и с остаточными напряжениями. Сколы классифицировались как отделение большого объема материала и связывались с формой режущего клина, свойствами материала и толщиной среза. Эти представления о механизмах выкрашивания и скола со временем модернизировались [17 с.64].

¹ Указана страница в работе. Начиная с этой страницы в работе имеются сведения по данному вопросу.

² Скобки отделяют друг от друга публикации. Внутри скобок указаны страницы.

В целом хрупкое разрушение трактуется [(4 с.32), (18 с.12)] как результат образования и роста трещин, причем скалывание происходит на уровне микротрещин, а выкрашивание проявляется как результат роста гребенчатых трещин и образования поперечных трещин, ослабляющих прочность режущей кромки.

Обобщение представлений теории хрупкой прочности для практической реализации осуществлялось [19 с.34] путём разработки критериев прочности инструмента.

Напряжённое состояние в рабочей части инструмента исследуется в условиях свободного резания [20 с.216] как обобщённое плоско-напряжённое состояние. При этом важным вопросом является распределение нормальных и касательных напряжений на рабочих поверхностях инструмента. Эти распределения исследовались [(17 с.64), (21 с.33)], полученные данные не однозначны. Вопросы оценки и повышения надёжности работы инструмента рассмотрены в работах [(22 с.54), (23 с.71)].

В наиболее общем виде с позиций современных представлений и структурно-энергетического подхода вопросы хрупкого разрушения инструментальных материалов рассмотрены в работах [(24 с.96), (25 с.12), (26 с.39), (27 с.14)].

Вязкое (пластическое) разрушение инструмента отмечают при больших скоростях резания и связывают его с высокотемпературным размягчением контактных поверхностей, что приводит к пластической деформации слоев и их последующему срезу. При высокотемпературных условиях всестороннее сжатие объемов вблизи режущей кромки способствует снижению ее формоустойчивости [(19 с.122), (28 с.16), (29 с.54), (30 с.37), (31 с.74), (32 с.12)]. Мнения исследователей о механизме пластического разрушения в основном совпадают, запас прочности оценивается по отношению предела текучести к эквивалентному напряжению.

В.А.Остафьев [14 с.121] полагает, что начало пластической деформации обусловлено максимальными касательными напряжениями, но с ростом температуры оно определяется пределом текучести. В.А. Жилин связывает это с ослаблением связи зерен и матрицы из-за высокотемпературной ползучести. Превалирующая роль высокотемпературной ползучести отмечается также Н.В. Талантовым и В.Д. Бобровым.

1.2.2 Износ инструмента

Износ инструмента укрупнённо классифицируют как абразивный, адгезионный и диффузионный.

Сущность абразивного износа представляется [(28 с.14), (32 с.12)] в "пропахивании" контактных поверхностей инструмента твердыми частицами обрабатываемого материала с формированием рисок, борозд и вырывов. В исследованиях абразивного износа ведущая роль принадлежит М.И. Клушину.

Сущность адгезионного износа лежит в адгезионном схватывании за счет образования металлических связей при совместном пластическом деформировании и последующем отрыве частиц инструментального материала [(21 с.217), (29 с.54), (32 с.5), (33 с.9), (34 с.47), (35 с.42)]. Это основной вид изнашивания инструмента. Взгляды исследователей на механизм образования металлических связей различны. Так А.П.Семенов [36 с с.17] на использовании энергетической теории констатирует бездиффузионный механизм образования связей. В работах [(30 с.36), (31 с.124)] это связывается с возможностью образования устойчивых конфигураций электронов контактирующих материалов. Методами ОЖЕ-спектроскопии [(37 с.24), (38 с.46)] и микрорентгеноспектрального анализа [(31 с.39), (39 с.31)] подтверждается роль диффузии в адгезионном схватывании.

Сущность диффузионного износа состоит в образовании нароста на инструментальном материале вследствие отрыва и налипания частиц обрабатываемого материала, причем последующий срыв нароста сопровождается вырывом вместе с ним частиц инструментального материала. Концепции, объясняющие природу и роль нароста, различны и противоречивы. Наряду с отрицательным влиянием периодических срывов нароста на стойкость инструмента [(8 с.19), (38 с.49), (39 с.31)] исследователи отмечают его положительную роль [(40 с.208), (41 с.54)] как барьера, предохраняющего инструмент от износа.

Н.Н. Зорев связал [34 с.43]) образование нароста с дисперсионным твердением, М.И. Клушин, М.Б. Гордон, М.С. Беккер - с формированием граничного "белого" слоя, состоящего из окислов, карбидов и ряда других компонентов. В.Ф. Бобров показал образование "белого слоя" в подошве нароста при резании керамикой и связал это со структурными превращениями в приконтактных слоях. Влияние фазовых превращений отмечено также в работах [(42 с.420), (43 с.14)]. Тонкие физические исследования нароста с применением микронзондового анализа проведены Н.Опитцем [13 с.24]. В.А. Кудинов связывает нарост с градиентом температур [44 с.216] в поверхностном слое инструмента полагая, что максимальная температура формируется на некоторой глубине поверхностного слоя и подтверждает исчезновение нароста дополнительным нагревом инструмента.

В общем виде Т.Н. Лоладзе и Н.Н. Зорев трактуют износ как адгезионно-усталостный. Интенсивность адгезионного износа определяется микропрочностью поверхностных слоев и прочностью адгезионного взаимодействия обрабатываемого материала с инструментальным. Адгезионно-усталостный износ при низкой температуре характеризуется как хрупкое разрушение (вырывы), а при высокой температуре - как пластическое (срез) и соответственно оценивается интенсивность износа

пределом выносливости и прочности при низких температурах и пределом текучести и твердостью при высоких температурах.

1.2.3 Анализ современных представлений о разрушении и изнашивании инструмента при обработке труднообрабатываемых и нержавеющей сталей

Возможности совершенствования материалов в рамках триады «состав – структура – свойства» не исчерпаны. Разработка технологий [(45 с.16), (46 с.7), (47 с.12)] получения твёрдого сплава с размером зерна менее 1,5 мкм позволила существенно повысить работоспособность инструмента в стационарных условиях резания.

Моделирование и реализация наноструктурных материалов [(48 с.26), (49 с.34), (50 с.16), (51 с.26)] позволили получить не только геометрические эффекты в повышении работоспособности инструмента, но создали условия компьютерного проектирования свойств инструмента под заданные условия эксплуатации.

Необходимо отметить, что даже на такой высокоэффективный путь повышения работоспособности инструмента, как нанесение покрытий [(52 с.71), (53 с.46), (54 с.64), (55 с.42)] у исследователей нет единства мнений о роли, функциях и механизмах работы покрытий. Но это не мешает разработке новых архитектурных схем покрытий [(56 с.218), (57 с.197)] и многослойных композиционных покрытий [(58 с.683), (59 с.174), (60 с.125), (61 с.17), (62 с.14)].

Методология формирования покрытий наиболее полно сформулирована в работах Верещаки А.С. [(53 с.46), (54 с.201)], Григорьева С.Н. [63 с.208] и Табакова В.П. [55 с.43]. Вопросы проектирования покрытий в зависимости от условий эксплуатации инструмента рассмотрены Фадеевым В.С. в работе [64 с.27)], Куликовым М.Ю.

Наряду с этим работы ориентированы на разработку методов и устройств для нанесения покрытий, на отработку режимов осаждения (нанесения) покрытий. Сам диапазон конструкций покрытий узок, в основном в эксплуатации находятся покрытия из нитридов, карбидов и карбонитридов титана. С помощью этих конструкций покрытий и технологий их осаждения (нанесения) достигнуты определенные результаты. Эти результаты в большинстве случаев позволяют реализовывать процесс резания высокоэффективно.

Совершенствование металлорежущего оборудования и расширение номенклатуры обрабатываемых материалов вновь обостряет требования к инструментальным материалам. С этих позиций необходима разработка новых инструментальных материалов с повышенной работоспособностью, в том числе материалов с покрытиями.

Известен комплекс мер, основными направлениями которых являлось:

- разработка методов контроля параметров процесса резания,
- разработка методов прогнозирования работоспособности инструмента по косвенным параметрам [(65 с.13), (66 с.179)],
- разработка методов оценки свойств инструментальных материалов [(67 2), (68 с.24)].

В этих направлениях широко известны работы Подураева В.Н., Барзова А.А., Кибальченко А.П., Козочкина М.П., Сулейманова И.У. В то же время появились первые работы [(69 с.17), (70 с.25)], связанные с применением акустической эмиссии для изучения деформационных процессов в материале. В это же время предпринят ряд [(71 с.38), (72 с.23), (73 с.33), (74 с.38)] попыток применения метода акустической эмиссии для контроля покрытий и инструментальных материалов.

Отмеченные выше исследования и их результаты чрезвычайно важны. Однако сложность и взаимосвязанность процессов, протекающих в зоне резания, лезвийным инструментом не позволили учёным создать более или менее надёжную математическую модель процесса резания.

Современная вычислительная техника позволила создать программные среды, позволяющие в режиме имитационного моделирования решать задачи оптимизации инструментальных материалов для тех или иных условий их эксплуатации. Наиболее известны программные среды ANSYS и Deforv [(75 с.15), (76 с.70)]. Каждая из них имеет свои достоинства и недостатки. В литературе не обнаружены результаты применения этих программных сред для проектирования инструментальных материалов применительно к обработке указанных специализированных нержавеющей сталей.

В силу этого *актуальна задача разработки рекомендаций по выбору рациональных инструментальных материалов* для обработки нержавеющей сталей применительно к сегодняшним условиям и современным возможностям повышения работоспособности металлорежущего инструмента.

Выполненный анализ источников информации позволил сформулировать цель и задачи данной диссертации.

1.3 Выводы по главе

1. Выполненный анализ источников информации показал, что есть необходимость развивать решение вопросов по повышению работоспособности металлорежущего инструмента, в том числе по повышению периода стойкости токарных резцов при точении нержавеющей сталей.

2. На этом основании сформулированы цель и задачи работы.

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Общая позиция разработки методологии исследования

Несовершенство общей модели процесса резания лезвийным инструментом сдерживает развитие науки о резании металлов лезвийным инструментом и принуждает при исследованиях разрабатывать собственные методологические подходы к решению задач. Имеющиеся примеры моделей [(77 с.13), (78 с.6), (79 с.53), (80 с.70), (81 с.74), (82 с.77), (83 с.58), (84 с.16), (85 с.144), (86 с.8), (87 с.62)], разработанные зарубежными и отечественными учёными носят частный характер и применялись лишь в простых исследованиях.

Такая ситуация в большинстве случаев разрешается путём компьютерного численного имитационного моделирования. Имитационное (ситуационное) моделирование - это термин, в основе которого лежат термины «симуляция», «имитация» и «моделирование». Собирательное значение используемого термина «компьютерное численное имитационное моделирование» подразумевает использование:

- имитационного моделирования как метода исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальные процессы и системы так, как они проходили бы в действительности;

- численного моделирования, позволяющего свести решение к выполнению конечного числа арифметических действий;

- компьютерного моделирования как компьютерной программы (пакета программ, программной среды), описывающей поведение элементов исследуемого процесса или системы в процессе их функционирования, учитывающей их взаимодействие между собой и необходимой для проведения на ЭВМ серии вычислительных экспериментов.

Цель имитационного моделирования — получение приближенных знаний о параметрах объекта, не производя непосредственное измерение

значений параметров. Его применяют тогда, когда измерение невозможно или оно дорогое. Дополнительной целью является необходимость исследования поведения реального процесса или системы либо необходимость оценить различные стратегии, обеспечивающие рациональное функционирование данного процесса или системы.

В данной работе программная среда Deform использована как метод исследования разрабатываемых покрытий для твёрдосплавного токарного инструмента.

При сравнении программных сред ANSYS и Deform предпочтение отдано последней из-за простоты её использования, удобства ввода исходных данных и ограничений, из-за возможности управления количеством выходных критериев и их параметрами [(88 с.14), (89 с.12)].

В работе обоснована необходимость провести исследования по повышению периода стойкости различных типовых сменных твёрдосплавных пластин при точении нержавеющей сталей марок 12X18H10T, 13X15H5 АМ-3 и 09X17H7Ю, отличающихся своими физико-механическими характеристиками, эксплуатационными свойствами и назначением. Именно эти стали выбраны потому, что относятся к специализированным труднообрабатываемым и коррозионностойким. Они имеют общее назначение. С позиций механической обработки лезвийным режущим инструментом наиболее проста сталь марки 13X15H5 АМ-3 в силу хорошего сочетания прочности, ударной вязкости и пластичности. В силу этого она принята как базовая. Сталь марки 12X18H10T более сложна при лезвийной обработке. Сталь марки 09X17H7Ю выбрана как наиболее труднообрабатываемая.

По результатам обработки таких сталей предполагалось определить рациональные инструментальные материалы. Под рациональными далее понимаются те, которые обеспечивают необходимый период стойкости до износа 0,5 мм по задней грани. Такая величина износа является общепринятой для черновой и получистовой обработки.

Установлено, что при изменении скорости резания и глубины резания при точении стали 09Х17Н7Ю рациональность инструментальных материалов существенно менялась. Так, изменение скорости резания с 50 м/мин на 60 м/мин, а глубины резания с 1 мм на 2 мм при прежней величине продольной подачи показывало, что инструмент, являвшийся наиболее рациональным в первом случае, оказывался не рациональным во втором случае. Это повлекло за собой необходимость применения имитационного моделирования для оценки перспективности применения того или иного инструмента, оптимизировать параметры режима резания и «проектировать» новые инструментальные материалы для новых предполагаемых условий эксплуатации инструмента.

В работе не предполагалось определять экономическую эффективность применения того или иного инструментального материала в силу того, что экономический эффект зависит от очень многих факторов и ограничений.

Рассмотрены особенности применения пластин квадратной формы, треугольной и пятигранной форм. Большая востребованность установлена в пластинах квадратной формы с центральным отверстием. Далее в основном рассмотрены они. Типоразмер и топография передней поверхности пластин рассмотрены в соответствии с действующими в Российской Федерации ГОСТами.

Для указанных квадратных пластин с применением программной среды Deform разработано более 30-ти покрытий для инструментального твёрдого сплава марки ВК8. Именно этот материал сплава выбран как наиболее рекомендуемый в каталогах и источниках информации для обработки нержавеющей сталей. Из этих 30-ти покрытий нам оказалось доступным¹ нанесение 20-ти покрытий. Из этих 20-ти покрытий как наиболее перспективные выбраны десять. Далее они названы новыми инструментами.

¹ Нанесение покрытий осуществлено на оборудовании и с помощью специалистов ФГБОУ ВО «Технологический университет Станкин» (г. Москва) и отечественных инструментальных фирм «СКИФ-М» (г. Белгород) и «СКИФ - М ДВ» (г. Комсомольск-на-Амуре).

Они отличались архитектурой (количеством слоев в покрытии, толщинами слоев, их структурой и составом) покрытий.

2.2. Предварительный этап разработки методологии исследования

Разработка методологии исследования выполнена в два этапа: предварительный и основной.

Для проверки возможностей имитационного моделирования в программной среде Deforn провели предварительную (пробную) апробацию следующим образом. Для выбранного режима резания имитационным моделированием выявляли рациональность инструментов. Их выстраивали в рандометрический ряд по убыванию периода стойкости инструмента (т.е. инструмент, показавший минимальную величину износа, ставили первым в ряду, инструмент, показавший максимальную величину износа резца по задней грани, ставили последним). Затем испытывали их в реальных условиях резания. Также расставляли в рандометрический ряд по величине износа за равное время эксплуатации. Это делали при величине износа 0,1 мм, 0,2 мм, 0,3 мм. Рандометричность оказалась одинаковой для всех трех величин износа. Полученную последовательность расположения инструмента в рандометрическом ряду при имитационном моделировании и в рандометрическом ряду при натурном эксперименте сравнивали между собой. Она совпала. На этом основании сделан предварительный вывод об адекватности результатов имитационного моделирования и о правомерности возможного применения имитационного моделирования для наших задач исследования.

2.3. Методическое, приборное и аппаратное обеспечение методологии исследования

2.3.1 При проведении экспериментальных исследований

Потребовалась разработка станда на базе токарно-винторезного станка модели 16K25 с заменой резцедержателя на токарный динамометр модели STD 201-2, сопрягаемый с ПЭВМ, что обеспечило измерение составляющих силы резания.

При экспериментах использовали следующие заготовки:

а) Заготовки из стали марки 09X17H7Ю имели длину 600 – 800 мм, диаметр 300 мм, были предварительно обточены до удаления корки и центрованы, что позволяло устанавливать их в трёхкулачковый патрон станка и конус задней бабки. Такая длина и диаметр заготовок сочтены рациональными для проведения испытаний инструмента.

б) Заготовки из сталей 12X18H10T и 13X15H5 АМ-3 имели длину 450 мм и диаметр 120 мм. Их так же центровали и также устанавливали в трёхкулачковый патрон станка и конус задней бабки. Параметры режима резания для них обеспечивали такими же, как были режимы при обработке 09X17H7Ю. Это достигалось соответствующим изменением числа оборотов шпинделя станка согласно зависимости

$V = \pi \times d \times n / 1000$, где $\pi = 3,14$; d – диаметр заготовки (мм); n – назначаемое число оборотов (об.заг/мин) шпинделя при измеренном диаметре d заготовки; V – скорость резания (м/мин).

Для измерения величины износа использовали видеоизмерительную машину (сенсорный центр) модели Micro Vu Sol 161.

По результатам исследования строили графики «величина износа – время работы», описывали их математическими уравнениями.

2.3.2 При исследовании качества обработанной поверхности

В качестве критерия сравнения использовали шероховатость поверхности. Для измерения шероховатости использовали прибор контроля шероховатости модели TR200 со стойкой модели ТА-620. Параметры шероховатости определяли типовым методом согласно инструкции по применению указанного прибора.

2.3.3 При проведении имитационного моделирования

Получали результаты по ряду параметров (температура в зоне резания, напряжения, деформация и т.д.), характеризующих сложно-напряжённое деформационное состояние элементов зоны резания и, преимущественно, инструментального материала. Для этих параметров устанавливали критерии, адекватно описывающие взаимосвязь с результатами эксплуатационных исследований работоспособности режущих пластин. Полученные взаимосвязи использовали для имитационного проектирования покрытий режущих пластин под новые условия эксплуатации, для оптимизации параметров режима резания.

Для подтверждения (проверки их правильности) результатов, полученных при имитационном моделировании, проведена оценка состояния технологической системы резания «станок – приспособление – инструмент – деталь» по параметрам акустической эмиссии, излучаемой в процессе резания [(90 с.140), (91 с. 77), (92 с.2), (92 с.3), (93 с.2), (95 с.2)]. При этом полагали, что наиболее рационален тот разработанный инструмент, при резании которым параметры акустической эмиссии наиболее благоприятны, т.е. применение такого-то покрытия более предпочтительно, чем применение другого покрытия. Результаты такой проверки в диссертации не размещены (из-за ограничения диссертации по объёму), но они подтвердили

правильность выбранного подхода к проектированию покрытий. Эти результаты опубликованы в работе [95 с.63].

2.4. Сущность предложенного подхода к решению задачи

Подход построен на результатах анализа проблемной ситуации и на выдвинутой гипотезе.

Проблемная ситуация следующая:

В сложных условиях токарной обработки всегда стоит задача о необходимости повышения работоспособности режущего инструмента. Например, в судостроительной отрасли есть изделия (валопроводы) длиной 6 - 20 метров при диаметре 600 – 800 мм, при точении которых замена режущей кромки резца не допустима, а работоспособности режущей кромки хватает только на треть длины.

Чем более труднообрабатываемый материал, тем острее стоит задача повышения работоспособности сменных режущих пластин токарных резцов. Для специализированных нержавеющей сталей это крайне необходимо в силу того, что и отечественные и зарубежные инструментальные материалы не отвечают современным требованиям.

Решение этой задачи в мире ведётся по разным направлениям, в том числе путём нанесения покрытий на инструмент.

В данном исследовании сформирована следующая проблемная ситуация: Для обработки указанных нержавеющей сталей возможно ли достичь необходимого повышения работоспособности за счёт применения покрытий на твёрдосплавном субстрате? Если да, то каким образом проектировать такие инструментальные материалы под конкретные условия эксплуатации инструмента? Как обеспечить многовариантность решения задачи под каждые условия эксплуатации с минимальными затратами времени и средств? По каким критериям выбирать наиболее рациональные инструментальные материалы?

Именно на реализации указанных здесь функций покрытия построена выдвинутая гипотеза: до необходимого уровня повышение работоспособности инструмента при обработке специализированных труднообрабатываемых нержавеющей сталей без снижения качества обработанной поверхности и производительности обработки можно обеспечить новыми покрытиями на твёрдосплавном инструменте, проектирование таких покрытий осуществимо за счёт применения виртуального компьютерного проектирования.

Такая формулировка гипотезы основана на известных фактах значительного повышения работоспособности инструмента при применении покрытий. Ведущие учёные это связывают с теми эффектами, которые покрытие выполняет при резании металлов.

По своей сути методы, использующиеся для нанесения покрытий и упрочнения (модификации) рабочих поверхностей режущих инструментов, имеют существенные различия в применяемых источниках энергии, рабочих средах и т.д. Однако, эффекты, которые могут быть достигнуты при их применении, имеют существенные сходства и связаны с улучшением наиболее важных показателей эффективности (выходных параметров) процесса резания. В самом общем виде взаимосвязь между выходными параметрами процесса резания и физико-механическими и кристаллохимическими свойствами поверхности и поверхностного слоя инструмента показана Григорьевым С.Н. и отображена на заимствованном у него рисунке 1.

Представленная взаимосвязь показывает, что улучшение выходных параметров процесса резания является следствием изменения функциональных и физических параметров процесса резания, которое в свою очередь является следствием изменения физико-механических и кристаллохимических свойств поверхности и поверхностного слоя инструмента, происходящего в результате применения того или иного метода нанесения покрытий и модификации.

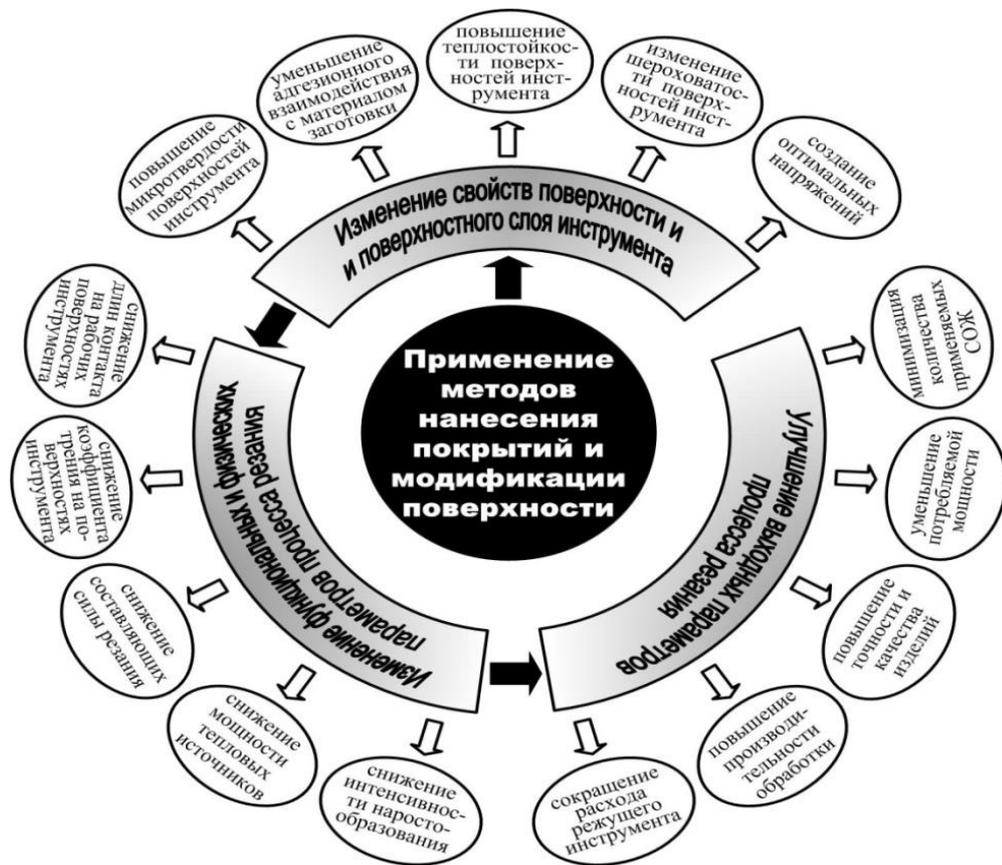


Рисунок 1 – Эффекты (по Григорьеву С.Н. [131 с.54]), достигаемые применением различных методов нанесения покрытий и модификации рабочих поверхностей режущих инструментов

В зависимости от решаемых задач поверхностный слой может выполнять функции:

- высокотвердого поверхностного слоя, препятствующего абразивному изнашиванию рабочих поверхностей инструмента в процессе резания;
- промежуточной среды, обладающей низким трением с обрабатываемым материалом и препятствующей интенсивному схватыванию в условиях адгезионного изнашивания;
- антифрикционной твердой смазки, минимизирующей налипание обрабатываемого материала на инструмент в процессе резания;
- барьерного слоя, препятствующего отпуску поверхностного слоя инструмента в результате воздействия повышенных тепло-силовых нагрузок;

•барьерного слоя, способного тормозить или останавливать распространение сетки усталостных трещин, приводящей к макровыкрашиванию рабочих кромок.

Принципиальная схема разработки предлагаемого инструмента приведена на рисунке 2.

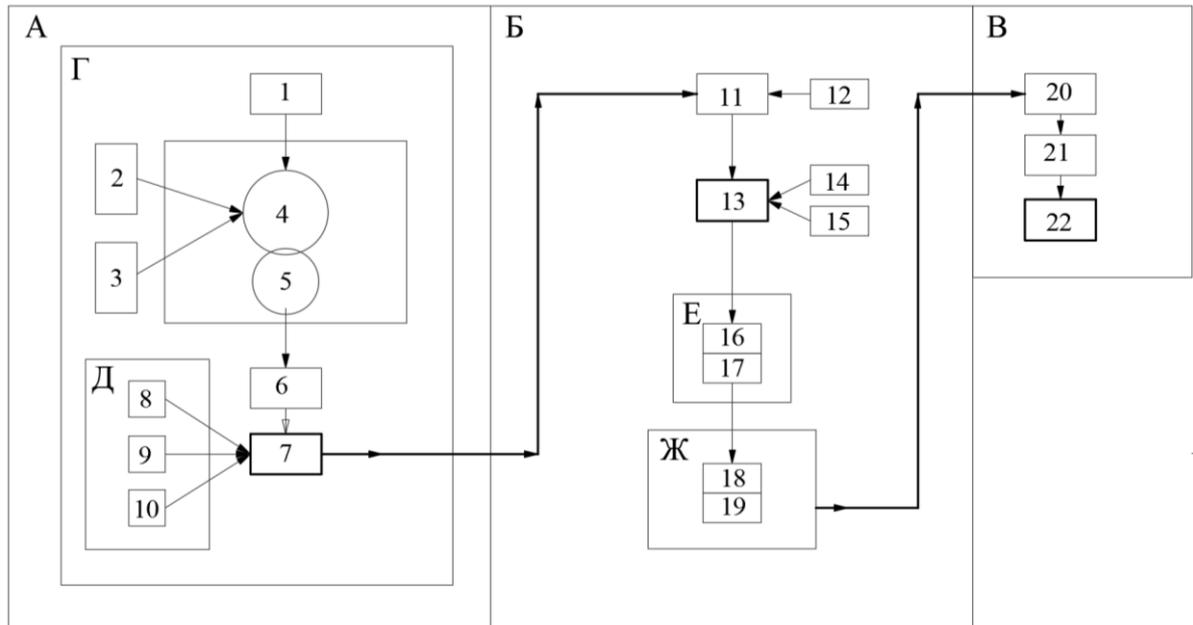


Рисунок 2 – Блок-схема разработки инструмента для точения нержавеющей стали 09X17H7Ю, 12X18H10Т, 13ХН5 АМ-3

1 - физико-механические характеристики (предел прочности, модуль упругости и т.д.) обрабатываемого материала; 2 - параметры (геометрия, материал субстрата и т.д.) режущего инструмента; 3 - технологические (по скорости резания, по температуре и т.д.) ограничения; 4 - расчёт параметров (σ_x , σ_y , τ_{xy}), характеризующих сложно-напряжённое состояние инструмента; 5 - ограничения по архитектуре (тип покрытия, способ его осаждения и т.д.) покрытия; 6 - проектирование возможных вариантов покрытий; 7 - отбор вариантов покрытий; 8 - технологические (оборудование и т.д.) возможности осаждения покрытий; 9 - затраты на осаждение покрытий; 10 - ограничения (по температуре, по напряжениям и т.д.); 11 - анализ результатов проектирования инструмента; 12 - прогнозируемые результаты (по износу, по температуре и т.д.) проектирования инструмента; 13 - отбор результатов проектирования; 14 - ограничения по количеству вариантов инструмента; 15 - исключение (объединение) близких результатов проектирования инструмента; 16 - отбор нескольких (например, 10 штук) рациональных инструментов; 17 - выявление рациональных параметров резания; 18 - отбор по величине износа; 19 - отбор по качеству (по параметрам шероховатости) поверхности, обработанной разными инструментами; 20 - вывод отобранных результатов проектирования инструмента; 21 - экспериментальная (при натуральном резании) оценка адекватности результатов, полученных при имитационном моделировании; 22 - разработка рекомендаций по токарной обработке нержавеющей стали

2.5 Выводы по главе

1. Методологическое приборное и аппаратное обеспечение исследования современное и обеспечивает решение поставленных задач.
2. В основу методологии исследования положено сопоставительное сравнение результатов экспериментальных (натурных) испытаний и результатов, полученных при имитационном моделировании.

ГЛАВА 3. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ ИНСТРУМЕНТА

3.1. Общая часть

В работе использовано имитационное моделирование как средство (как инструментарий) обеспечения возможности многовариантного проектирования инструмента с разными покрытиями.

В работе использованы результаты и методология имитационного моделирования, изложенные в работах [(96 с.52), (97 с.68), (98 с.79), (99 с.57), (100 с.360)]. Базовые моменты по экспериментальным исследованиям, предшествующие данной диссертации, имеются в работах [(101 с.19), (102 с.44)].

3.2. Принятая позиция имитационного моделирования

Основные методологические позиции сформированы следующим образом.

1. Имитационное моделирование использовано как виртуальное моделирование процесса токарной обработки специализированных труднообрабатываемых нержавеющей сталей указанных выше марок с точки зрения изучения процессов, протекающих в зоне резания технологической системы резания «станок-приспособление-инструмент-деталь».

2. Методика виртуального эксперимента ориентирована на изучение сложно-напряжённого состояния инструментального материала.

3. Изучение сложно-напряжённого состояния инструментального материала выполнено с учётом силы резания, возникающей в процессе резания.

4. Критериев и параметров оценки сложно-напряжённого состояния инструментального материала много. Важно определиться какие из них

выбрать, как задать их в качестве входных параметров в среде Deform. Выходные параметры оценки сложно-напряжённого состояния инструментального материала должны иметь физическую интерпретацию и должны быть адекватно подтверждены результатами эксплуатационных (натурных) испытаний. Выходными результатами применения имитационного моделирования должно быть обеспечение выбора (из числа имеющихся) рационального инструмента, режима работы им и обеспечение возможности проектирования новых инструментальных материалов для новых (предполагаемых) условий эксплуатации инструмента.

По поводу указанного здесь в пунктах 3 и 4 необходимые пояснения состоят в следующем.

В вопросах проектирования металлорежущего инструмента с применением программной среды Deform наиболее значимые результаты получены профессором Криворучко В.А. (Украина) [(99 с.56), (100 с.32)]. Его исходная позиция состоит в следующем. Среда (система) DEFORM базируется на математическом аппарате метода конечных элементов и имеет ряд встроенных инструментов, которые позволяют:

- в автоматическом режиме разбивать рассматриваемые объекты на сетки конечных элементов и корректировать их форму при достижении сетки определенной величины деформационного искажения;

- выбирать различные модели внешнего трения, в частности Аммонтона-Кулона и Зибеля;

- учитывать изменение сопротивляемости материала в зависимости от степени пластической деформации и температуры, а также переход деформационного процесса из упругой области в пластическую;

- учитывать изменения физико-механических и теплофизических свойств материала при изменении температуры и полиморфных превращениях;

- вычислять напряжения, температуру и деформацию в любой точке рассматриваемого объекта на протяжении всего деформационного процесса.

Программа DEFORM была специально разработана для решения деформационных задач, связанных с обработкой металлов давлением. При моделировании процесса резания материалов необходимо учитывать более высокую степень, скорость деформации и напряжения.

В данной диссертации его концепция принята не в полной мере. Это связано с тем, что Криворучко В.А. [100 с.32] осуществляет проектирование конструкций режущего инструмента при известных материалах этого инструмента. В силу этого он полагает возможным считать, что процессы, протекающие на передней и задней поверхностях режущего инструмента, известны и стационарны. Этим он объясняет правомерность считать известными модели внешнего и внутреннего трения в инструментальном материале. В упрощённом виде он считает, что эти модели описываются простейшими законами Аммонтона-Кулона и Зибеля.

Для задач, решаемых в данной диссертации, это неприемлемо хотя бы потому, что при разработке новых инструментов у нас неизвестны модели трения потому, что ещё не выбран материал покрытия инструмента. Среда DEFORM в данной диссертации использована именно для проектирования архитектуры этих покрытий. Следовательно, считать возможным применение тех или иных моделей, в том числе законов Аммонтона-Кулона и Зибеля, нельзя. Поэтому, для оценки сложно-напряжённого состояния материала инструмента в диссертации применён иной подход (как развитие программной среды DEFORM). Его суть в следующем. Неопределённость закономерностей протекания процессов на контактных поверхностях инструмента заранее (т.е. до начала моделирования), то мы имеем право предположить, что в любом из возможных вариантов протекания процессов это скажется на величине силы резания. Чем меньше она, тем более благоприятно протекали эти процессы, тем больший период стойкости можно ожидать от инструмента с таким покрытием, которое обеспечило меньшую силу резания. И наоборот. Соответственно, в диссертации в качестве концепции имитационного проектирования покрытий принято, что

величина силы резания – критерий, с помощью которого можно проектировать покрытие под заданные условия эксплуатации инструмента. Соответственно, для проверки этой концепции осуществлялось измерение всех трёх составляющих силы резания в процессе резания. Такая возможность была потому, что имелись образцы инструмента с теми или иными покрытиями. Установлено, что связь между силой резания и периодом стойкости существует. Примерное соотношение между ними установили и приняли его постоянным для задания данных при имитационном проектировании. Поскольку программная среда DEFORM не предполагает введение силы резания как входного параметра, нами осуществлён переход от силы резания к напряжениям в инструменте (именно на этом параметре задаются входные значения) через известную зависимость Пертушина С.И. [(140 с.54), (141 с.106)], в которой он констатирует эту связь в виде формул.

Этот этап работы позволил выявить критерии, которые необходимо задать как входные при имитационном моделировании (проектировании). Число выходных критериев минимизировали. В итоге важно было определить ожидаемый период стойкости проектируемого инструмента. Его отождествили с условной величиной износа проектируемого инструмента за заданный период его работы. Для понимания получаемых при проектировании величин износа важно было иметь в качестве выходных критериев те, которые характеризуют имитируемый процесс резания. Ими приняты «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «деформация инструментального материала».

Реализации виртуального моделирования выполнена по алгоритму, блок-схема которого приведена на рисунке 3.

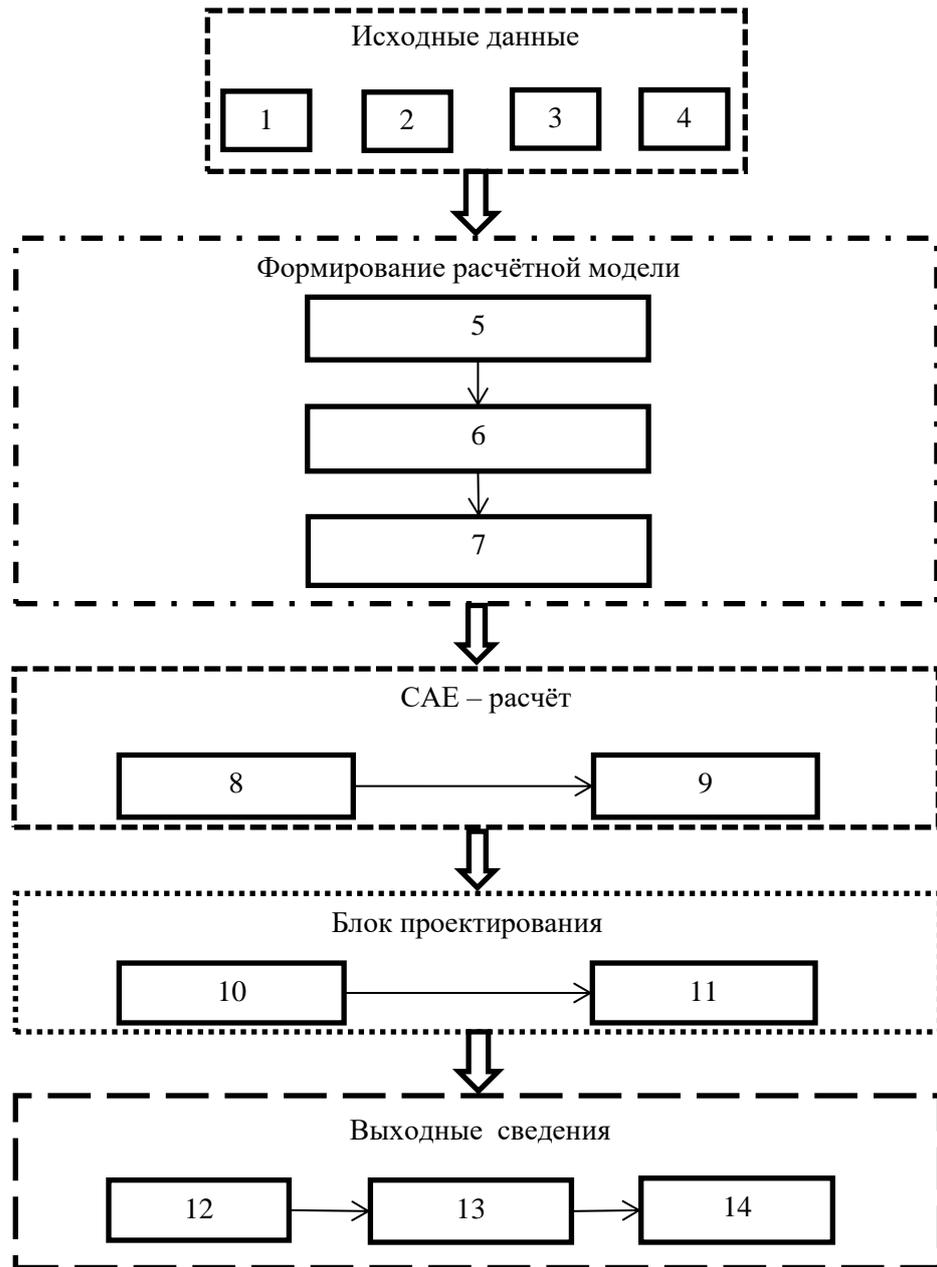


Рисунок 3 – Логистическая схема реализации имитационного моделирования: 1 – технические характеристики станка; 2 – физико-технические характеристики и эксплуатационные свойства материала заготовки; 3 – физико-технические характеристики и эксплуатационные свойства материала инструмента; 4 – силовые и температурные характеристики процесса резания; 5 – создание твёрдотельной модели заготовки и инструмента; 6 – разработка их конечно-элементных моделей; 7 – задание граничных условий и перечня требуемых выходных параметров моделирования; 8 – расчёт составляющих силы резания, температуры, напряжений и деформации инструмента, прогнозирование его работоспособности; 9 – вариационные расчёты указанных параметров; 10 – разработка инструментального материала и расчёт параметров режима резания им под новые и предполагаемые условия эксплуатации; 11 – разработка новых инструментальных материалов; 12 – визуализация результатов моделирования в виде диаграмм, показов слайдов и т.д.; 13 – распечатка и копирование результатов; 14 – создание банка данных

3.3. Математический аппарат имитационного моделирования

Программная среда DEFORM базируется на методе конечных элементов. Это метод численного решения дифференциальных уравнений в частных производных. Математически такие уравнения не имеют общего решения. Частные решения определяются граничными и начальными условиями. Изменением граничных и начальных условий можно получить много решений (т.е. вариантов покрытий), из которых затем можно выбрать предпочтительные решения. Это позволяет использовать DEFORM как средство творческой составляющей при разработке научного подхода к проектированию инструмента.

Процесс моделирования с позиций решения системы уравнений заимствован из работ Криворучко Д.В. и понимали его следующим образом. Напряжения, возникающие в элементарном объёме (элементе) режущей кромки, считаются постоянными и описываются [99 с.55] тензором напряжения (далее использованы общепринятые обозначения с их размерностью):

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

Одной из основных характеристик тензора напряжений является его квадратичный инвариант, который обычно называют эффективным напряжением:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}. \quad (2)$$

Деформация элемента также описывается шестью компонентами ε_x , ε_y , ε_z , γ_{xy} , γ_{yz} и γ_{zx} , которые определяются смещениями элемента u , v , w в направлении координат x , y , z соответственно:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; & \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}; \\
\varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}; & \gamma_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}; \\
\varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}; & \gamma_{zx} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}.
\end{aligned} \tag{3}$$

Интенсивность деформации определяется зависимостью

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{2} [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2]} + \frac{3}{4} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2). \tag{4}$$

Соотношения между деформациями и напряжениями в упругой области выражаются обобщенным законом Гука:

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= 2G \left[\varepsilon_x + \frac{\mu}{1-2\mu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right]; \\
\sigma_y &= 2G \left[\varepsilon_y + \frac{\mu}{1-2\mu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right]; \\
\sigma_z &= 2G \left[\varepsilon_z + \frac{\mu}{1-2\mu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right]; \\
\tau_{xy} &= G\gamma_{xy}; \\
\tau_{yz} &= G\gamma_{yz}; \\
\tau_{zx} &= G\gamma_{zx}.
\end{aligned} \tag{5}$$

Связь между G и E описывается соотношением:

$$E = \frac{2G}{1 + \mu}. \tag{6}$$

Зависимость между напряжениями и деформациями описывается:

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \frac{E}{(1-\mu^2)} (\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y); \\
\sigma_y &= \frac{E}{(1-\mu^2)} (\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y); \\
\tau_{xy} &= \frac{\gamma_{xy}}{2(1+\mu)} E.
\end{aligned} \tag{7}$$

При записи в матричной форме матрица $[D_y]$ формулы (7) определяется:

$$[D_y] = \frac{E}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Для определения зависимости между напряжениями и деформациями необходимо знать смещение элемента. Смещение элемента определяется:

$$\delta_\varepsilon = \begin{bmatrix} \delta_i \\ \delta_j \\ \delta_M \\ \delta_P \end{bmatrix}, \quad (9)$$

где $\delta_i, \delta_j, \delta_M, \delta_P$ – смещения узловых точек элемента, которые определяются составляющими смещения u, v и ω в направлении координатных осей x, y и z :

$$\delta_i = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

Смещение каждой узловой точки элемента происходит под действием силы, которая в общем случае ее приложения описывается тремя компонентами $F_{u_i}; F_{v_i}; F_{\omega_i}$;

$$[F_i] = \begin{bmatrix} F_{u_i} \\ F_{v_i} \\ F_{\omega_i} \end{bmatrix} \quad (11)$$

В целом на элемент действует сила F_e :

$$[F_e] = \begin{bmatrix} F_i \\ F_j \\ F_m \\ F_p \end{bmatrix} \quad (12)$$

Для исследования периода стойкости инструмента с покрытием необходимо представлять процесс развития трещин в износостойком

покрытии. Для этого необходимо знать величины напряжений и их распределение.

Напряжения, действующие в покрытии, представляют собой сумму напряжений, возникающих в процессе механической обработки, термических напряжений, возникающих в результате неравномерности распределения температуры, остаточных напряжений и напряжений возникающих в результате ползучести инструментальной основы.

$$\sigma_i = \sigma_1 + \sigma_{терм} + \sigma_{ост} + \sigma_n, \quad (13)$$

где σ_1 – напряжения, возникающие в процессе резания, Па;

$\sigma_{терм}$ – термические напряжения, Па;

$\sigma_{ост}$ – остаточные напряжения, Па;

σ_n – напряжения ползучести, Па.

Каждое из слагаемых действует на покрытие и основу независимо от других.

Условие равновесия инструментальной основы и слоя покрытия можно записать в виде:

$$N_0 + N_1 = 0, \quad (14)$$

где N_0 - нормальная сила, действующая на инструментальную основу;

N_1 - нормальная сила, действующая на покрытие;

Последнее уравнение запишем через нормальные напряжения:

$$\sigma_0 h_0 + \sigma_1 h_1 = 0 \quad (15)$$

где h_0 – толщина инструментальной основы;

h_1 – толщина покрытия. Причем $h_0 \gg h_1$.

Процесс решения системы дифференциальных уравнений длителен и не выполняется автоматически, т.е. в реперных точках расчёта оператор должен задавать то или иное значение, определяющее траекторию дальнейших расчётов и итераций.

Проблема использования программного обеспечения Deform состояла в том, что на определённом этапе требовалось задать (смотри уравнение 15) толщину покрытия. Если бы мы применяли однослойное покрытие, то для таких покрытий Deform обеспечивал бы получение выходных данных. Но однослойное покрытие не обеспечит желаемого повышения периода стойкости инструмента. Необходимы были многослойные покрытия. Поэтому выполнено адаптивное Deform за счёт следующих действий и допущений:

1. Учёт особенностей архитектуры покрытия осуществили за счёт контроля силы резания. Полагали, что каждое покрытие отличается (идентифицируется) по величине составляющих силы резания, возникающей при резании таким инструментом. Для проверки адекватности такого предположения осуществляли реальный процесс резания и регистрировали составляющие силы резания, рисунок 4. Различия в величинах составляющих силы резания для этих двух инструментов существенное. Численные значения величин составляющих силы резания, определённые по записям силы резания приведены в таблице 1. Считали такое различие в значениях составляющих силы резания достаточным для идентификации инструмента (субстрата с тем или иным покрытием).

2. Полагали, что от силы резания перейти к величинам напряжений можно по зависимости (С.И. Петрушин [(140 с. 43), (141 с.106)]) напряжений в инструментальном материале от составляющих силы резания. Под эквивалентными напряжениями в инструментальном материале понимали следующее:

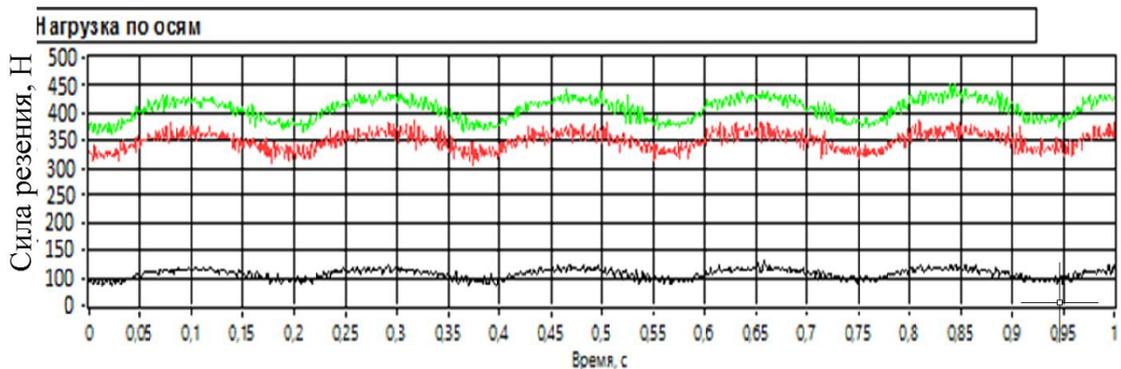
$$\sigma_{\text{эк}} = \sqrt{\sigma_{z \text{ max}}^2 + \sigma_{y \text{ max}}^2}, \quad (16)$$

где $\sigma_{z \text{ max}}$ – расчетные максимальные напряжения по передней поверхности режущего клина; $\sigma_{y \text{ max}}$ – расчетные максимальные напряжения по задней поверхности режущего клина.

а

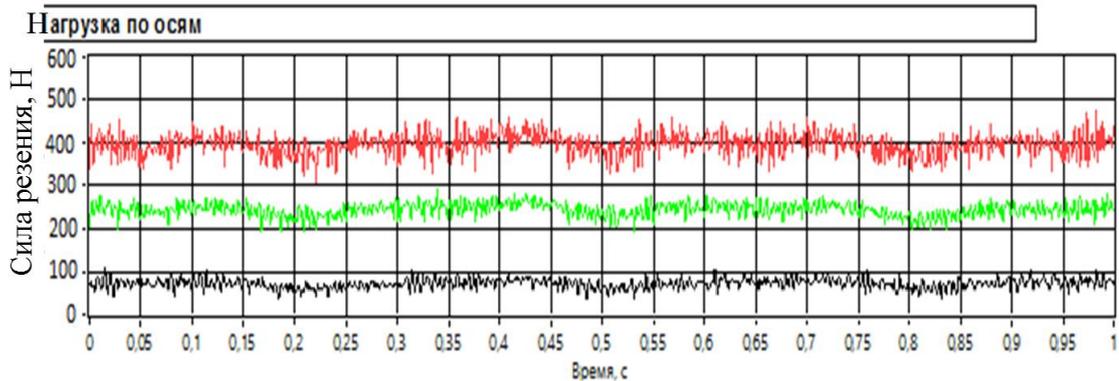


б



На графике верхняя линия отображает радиальную составляющую силу резания, нижняя линия – продольную составляющую, средняя линия – вертикальную составляющую. Использован инструмент $VK8 + TiN(2\mu m) + TiC(5\mu m)$

в



На графике верхняя линия отображает вертикальную составляющую силу резания, нижняя линия – продольную составляющую, средняя линия – отображает радиальную составляющую. Использован инструмент $VK8 + TiCN(0,5\mu m) + TiN(1\mu m)$

Рисунок 4 – Измерение (а) составляющих силы резания при замене резцедержателя станка токарным динамометром STD201-2; записи (б и в) составляющих силы резания инструментом с разными покрытиями.

Таблица 1 – Числовые значения величин составляющих силы резания

Составляющие силы резания	09X17H7Ю	12X18H10Т	13X15H AM-3
F _x – продольная составляющая силы резания, Н	85,5	64,7	35,2
F _y – радиальная составляющая силы резания, Н	305,2	308,0	310,1
F _z – вертикальная составляющая силы резания, Н	362,5	284,6	191,4

Взаимосвязь составляющих (независимо от схемы резания) P_z и P_y силы резания с напряжениями Петрушиным С.И. выражена [(140 с. 43), (141 с.106)] зависимостью

$$\sigma_{\max} = 2 \cdot \frac{P_y \cdot [\cos \gamma \cdot \sin(\gamma + \Theta) - \sin \alpha \cdot \cos(\alpha - \Theta) + \beta \cdot \cos \Theta] + P_z \cdot [\sin \alpha \cdot \sin(\alpha - \Theta) - \dots]}{r \cdot [(\sin^2 \alpha - \cos^2 \gamma) - \beta^2 + \dots]} \dots \frac{\cos \gamma \cdot \cos(\gamma + \Theta) - \beta \cdot \sin \Theta}{+(\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \sin \gamma \cdot \cos \gamma)^2} \quad (17)$$

где P_y – радиальная составляющая силы резания, P_z – главная составляющая сила резания, α – главный задний угол, γ – передний угол, r и Θ – полярные координаты в главной секущей плоскости резания.

По данной формуле не только определены сами величины максимальных напряжений, но и построены поля (картины) напряжений. Для понимания модели, предложенной С.И. Петрушиным, может быть использовано геометрическое представление конфигурации режущего клина (сменной пластины токарного резца), в котором сосредотачиваются и накапливаются напряжения, приводящие к износу и разрушению пластины, рисунок 5.

3. От полученных значений сил резания и напряжений необходимо установить их взаимосвязь с периодом стойкости инструмента. Полагали, что изложенное выше позволяло выявлять условия резания (применение того

или иного покрытия), при которых напряжения были бы минимальными. Считали, что такое покрытие (с минимальными напряжениями) может обеспечить максимальную работоспособность инструмента.

При каждом из покрытий поля напряжений и величины напряжений существенно отличались. Это позволило считать, что использование зависимости С.И. Петрушина правомерно.

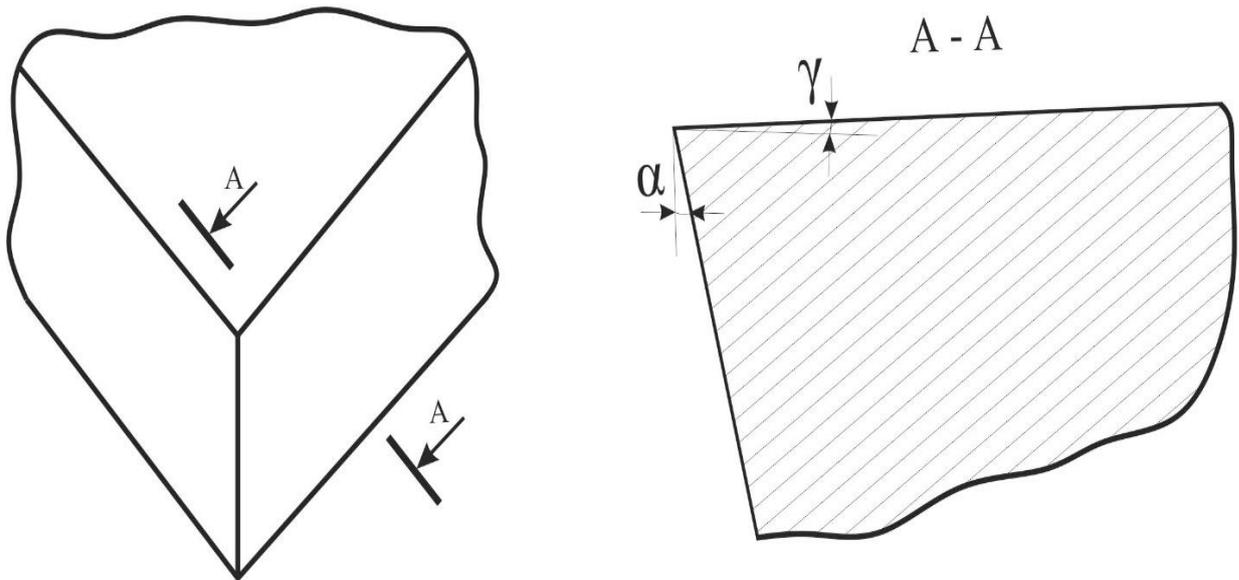


Рисунок 5 – Режущая часть резца из твердого сплава ВК8 (а) и сечение в главной секущей плоскости А – А: α – главный задний угол; γ – передний угол [(100 с.93)(141 с.106)]

Установлено, что значения составляющих сил резания были максимальными при резании инструментом без покрытия. Эти значения принимали как базовые. Затем осуществляли резание инструментом с тем или иным покрытием, определяли величины составляющих силы резания. Сопоставляли их с базовыми. Они оказывались меньшими. Пропорцию снижения сил резания считали константой до износа инструмента 0,5 мм по задней грани. Сопоставляли ожидаемый период стойкости (времени работы до достижения износа 0,5 мм), рисунок 6.

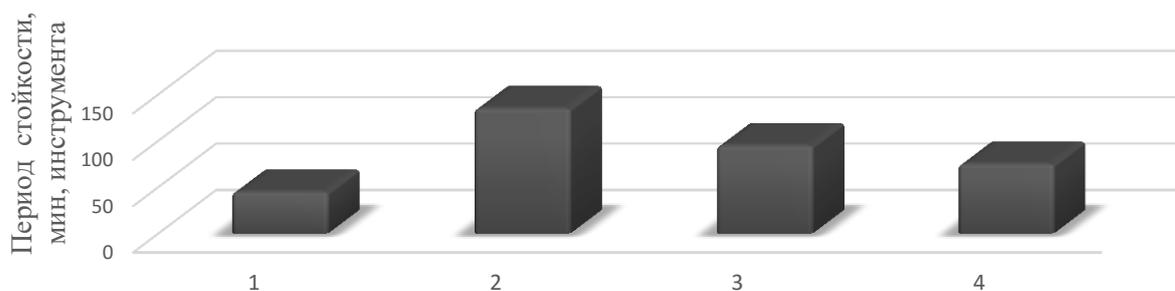


Рисунок 6 – Иллюстрация работоспособности (по периоду стойкости до износа 0,5 мм) различных инструментальных материалов: 1- инструментальный твёрдый сплав марки ВК8 (без покрытия); 2, 3, 4 - инструмент с разными вариантами покрытий (2 - ВК8 + (TiAl)N + Al₂O₃ + (TiAl)N + Al₂O₃; 3 - ВК8 + TiCN + (TiAl)N + TiN; 4 - ВК8 + TiN(0,5мкм) + TiC(1мкм)) (точение стали 09Х17Н7Ю при скорости резания 5- м/мин, подаче 0,21 мм/об.заготовки, глубине резания 1 мм)

Исходя из этого, с помощью имитационного моделирования рассчитывали величину условного износа для сравниваемых инструментальных материалов. При этом величину условного износа при использовании инструмента без покрытия принимали за 100% (за единицу). Пример такого сопоставления дан на рисунке 7.



Рисунок 7 – Иллюстрация результатов имитационного моделирования величины износа (по вертикали приведено как 100%) для разных (1 - ВК8+TiCN(5мкм) + (TiAl)N(3мкм) + Al₂O₃(5мкм) + TiC(5мкм); 2 - ВК8+Al₂O₃(2мкм) + (Ti)CN(5мкм) + (TiAl)N(3мкм) + TiN(3мкм); 3 - ВК8 + (TiAl)N(3мкм) + Al₂O₃(3мкм) + (TiAl)N(3мкм) + Al₂O₃(3мкм); 4 - ВК8 + TiN(3мкм) + TiC(3мкм) + TiN(3мкм) + TiC(3мкм); 5 - ВК8+TiC(3мкм) + TiN(3мкм) + (TiAl)N(2мкм); 6 - ВК8 + TiCN(2мкм) + TiC(3мкм) + TiN(1,5мкм); 7 - ВК8 + TiC(1,5 мкм) + TiN(3мкм); 8 - ВК8 + TiN(2мкм) + TiC(5мкм); 9 - ВК8 + TiCN(0,5мкм) + TiN(1мкм); 10 - ВК8 + TiN(0,5мкм) + TiC(1мкм); 11 – ВК8 без покрытия) разработанных инструментов (моделирование выполнено для точения стали 09Х17Н7Ю при скорости резания 5- м/мин, подаче 0,21 мм/об.заготовки, глубине

резания 1 мм)

Тенденции и взаимосвязи прогнозируемых параметров имитационного моделирования показаны на рисунке 8.

3.4. Принятые схемы имитационного моделирования

Заложенного в программной среде Deform математического аппарата недостаточно для использования в условиях промышленного предприятия, связанного с обработкой указанных сталей. Необходимы структурно-логические схемы, отображающие преобразование входных параметров в выходные искомые параметры. В совокупном виде структурная схема проектирования инструмента при имитационном моделировании представлена на рисунке 9.

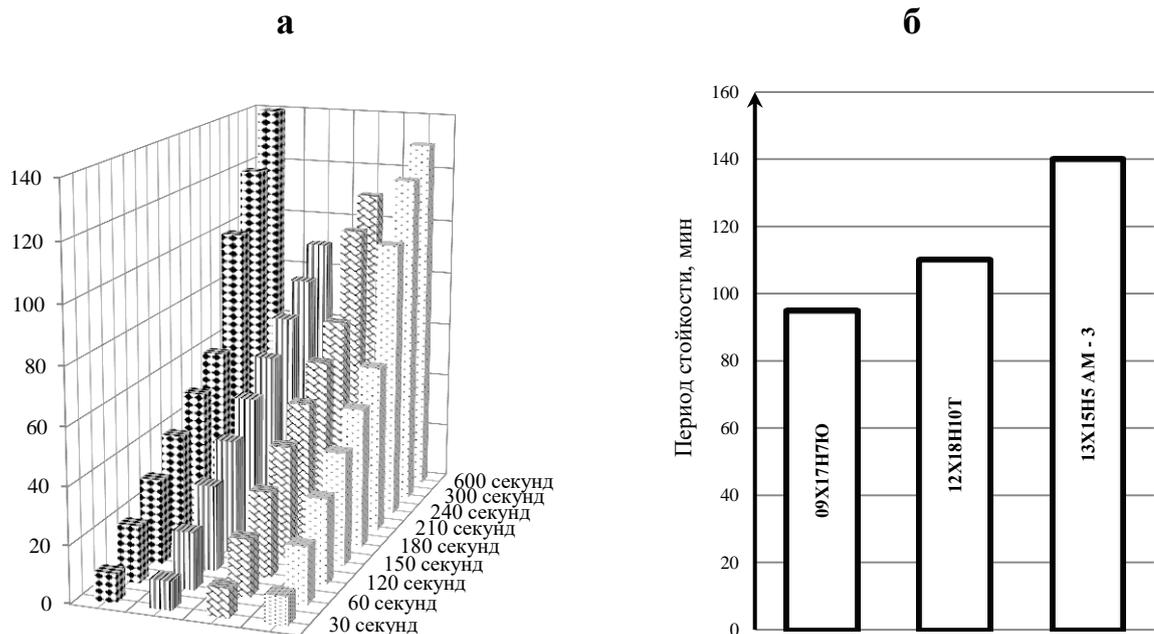


Рисунок 8 – Иллюстрация аналогии прогнозируемого темпа прироста (а) условного износа (левый ряд), температуры (второй ряд слева), напряжения (третий ряд слева), деформации (правый ряд) при обработке стали 09X17H7Ю инструментом BK8+TiC+TiN и прогнозируемая стойкость (б) инструмента BK8 + Ti + TiN + (TiAl)N + TiN при обработке разных сталей (моделирование выполнено для точения стали 09X17H7Ю при скорости резания 5- м/мин, подаче 0,21 мм/об.заготовки, глубине резания 1 мм) (на вертикальной оси условно отложены значения прогнозируемого периода стойкости инструмента инструмента BK8 + Ti + TiN + (TiAl)N + TiN)

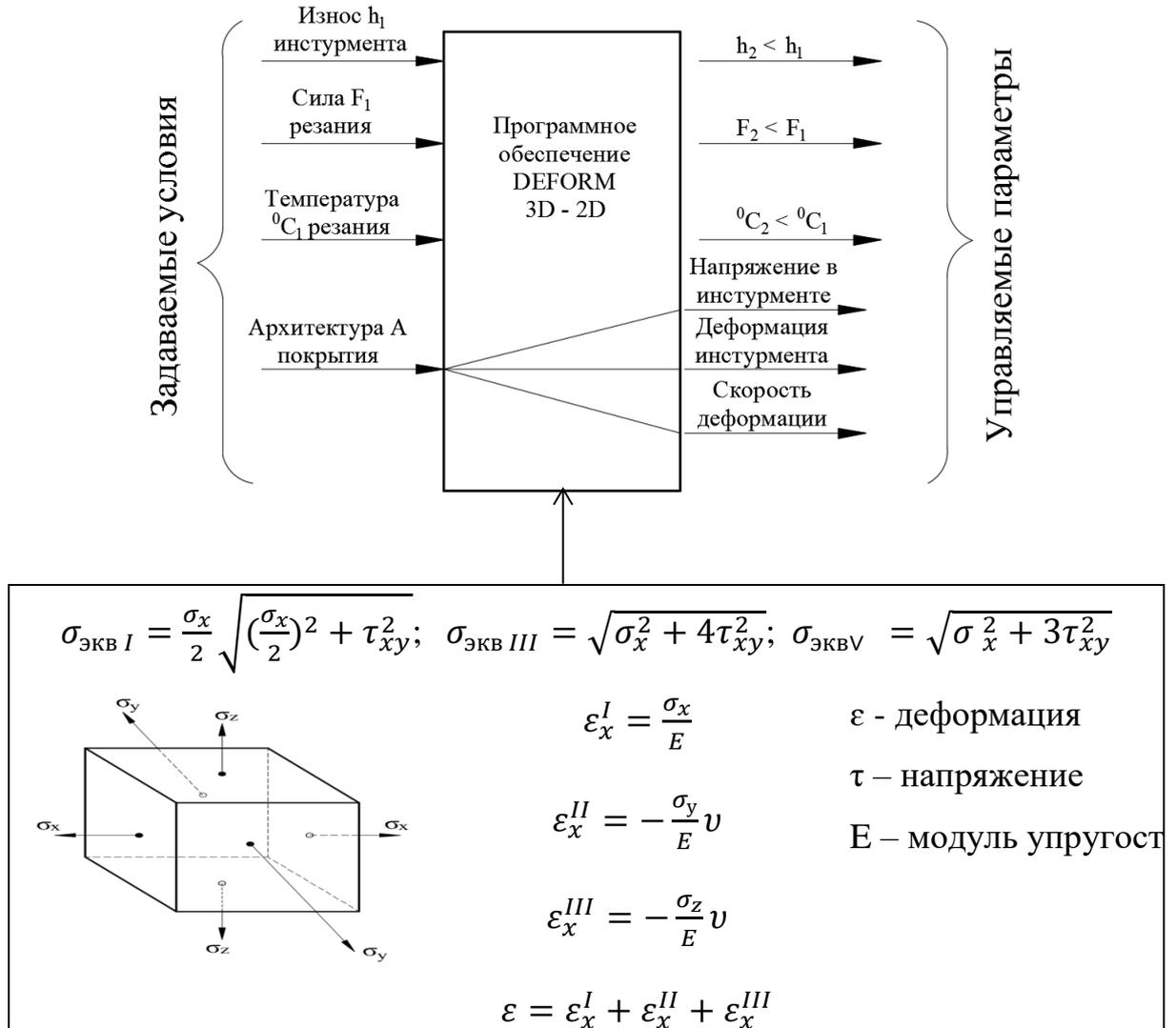


Рисунок 9 – Структурная модель разработки инструмента в программной среде Deform (используемые обозначения и их размерности общепринятые)

Её использование позволило изучить параметры сложно-напряжённого состояния инструмента в любой из моментов резания.

На рисунке 10 показаны примеры скриншотов, отображающих процесс резания в реалиях имитационного моделирования. Переходом от данных указанных скриншотов к параметрам, описывающим выходные параметры моделирования, были найдены основные параметры, оценивающие сложно-напряжённое состояние инструмента. Это температура резания, напряжения и деформация. Их расчётные (прогнозируемые при моделировании) значения показаны на рисунках 11, 12 и 13 (для тех же инструментов, которые приведены выше на рисунке 7).

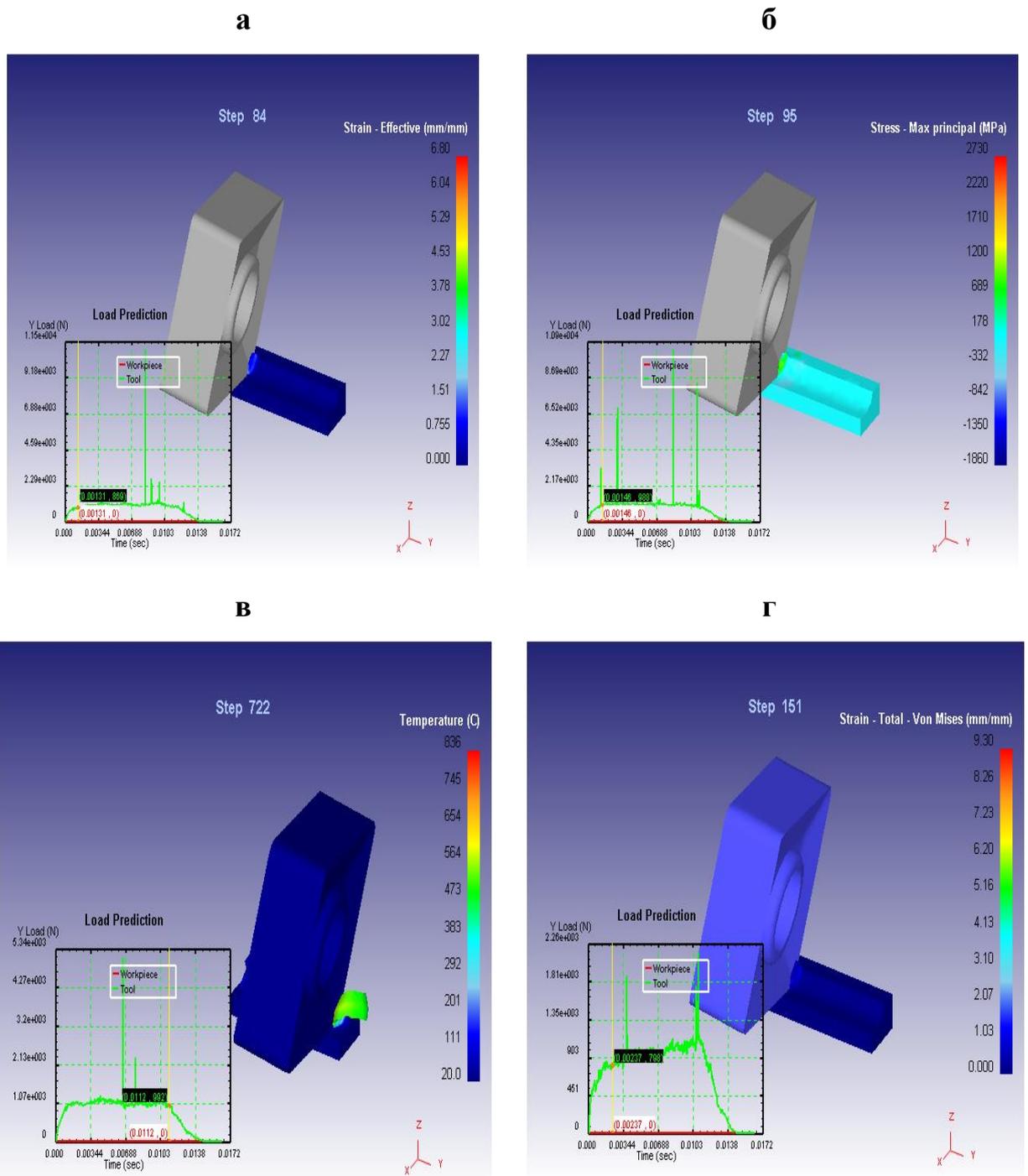


Рисунок 10 – Результаты имитационного моделирования напряжённого состояния элементов системы резания при точении специализированной нержавеющей стали марки 09X17H7Ю инструментальным твёрдым сплавом марки BK8 (а, в) и инструментальным материалом BK8 + Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм) с покрытием (г, д): а и б - максимальные основные напряжения (МПа); в и г – результирующие скорости деформации (мм/сек) (моделирование выполнено для точения стали 09X17H7Ю при скорости резания 50 м/мин, подаче 0,21 мм/об.заготовки, глубине резания 1 мм)

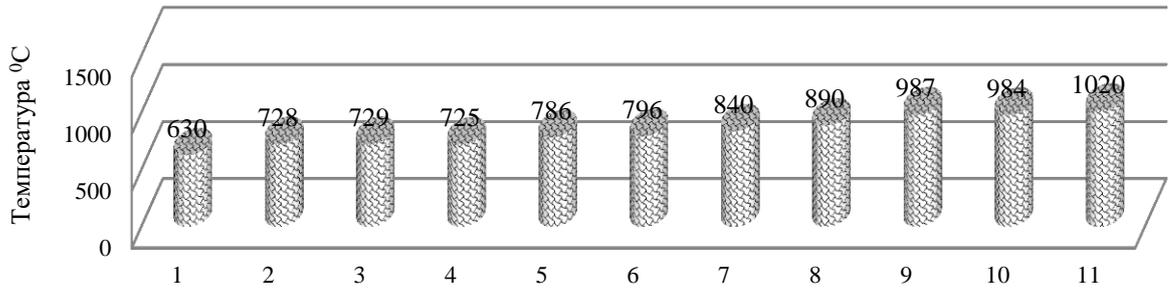


Рисунок 11 – Иллюстрация результатов имитационного моделирования температуры (по вертикали в градусах Цельсия) в зоне резания для разных инструментальных материалов (моделирование выполнено для точения стали 09Х17Н7Ю при скорости резания 50 м/мин, подаче 0,21 мм/об.заготовки, глубине резания 1 мм)

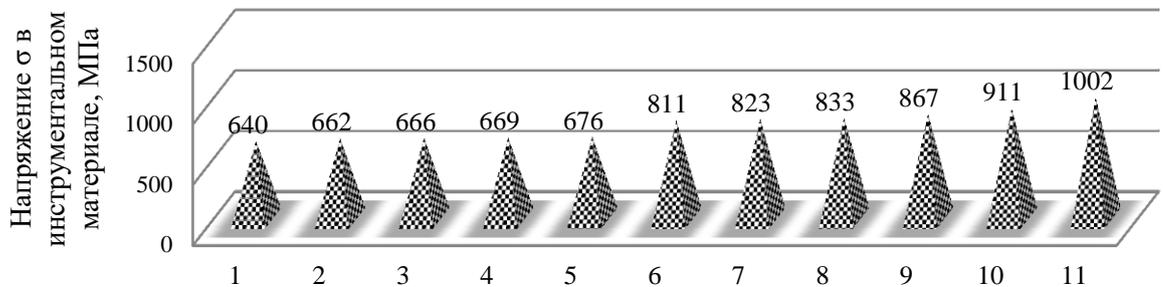


Рисунок 12 – Иллюстрация результатов имитационного моделирования величины эквивалентных напряжений (по вертикали в МПа) в инструменте для разных инструментальных материалов (моделирование выполнено для точения стали 09Х17Н7Ю при скорости резания 5- м/мин, подаче 0,21 мм/об.заготовки, глубине резания 1 мм)

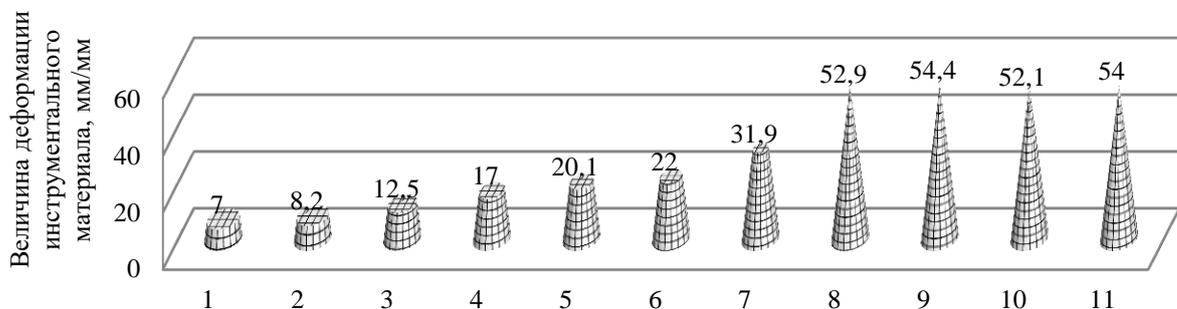


Рисунок 13 – Иллюстрация результатов имитационного моделирования величины деформации в инструменте (по вертикали в мкм/мкм) для разных инструментальных материалов (моделирование выполнено для точения стали 09Х17Н7Ю при скорости резания 5- м/мин, подаче 0,21 мм/об.заготовки, глубине резания 1 мм)

Они показывают причины, из-за которых при разных покрытиях имеет место разная сила резания и, соответственно, разная величина износа (рис.7).

В тех случаях, когда выходные параметры оказывались близки для разных покрытий, применяли моделирование по дополнительным параметрам: скорость деформации (мм/сек) и скорость ((мм/мм)сек) изменения максимальной деформации. Один из таких примеров показан на рисунке 14.

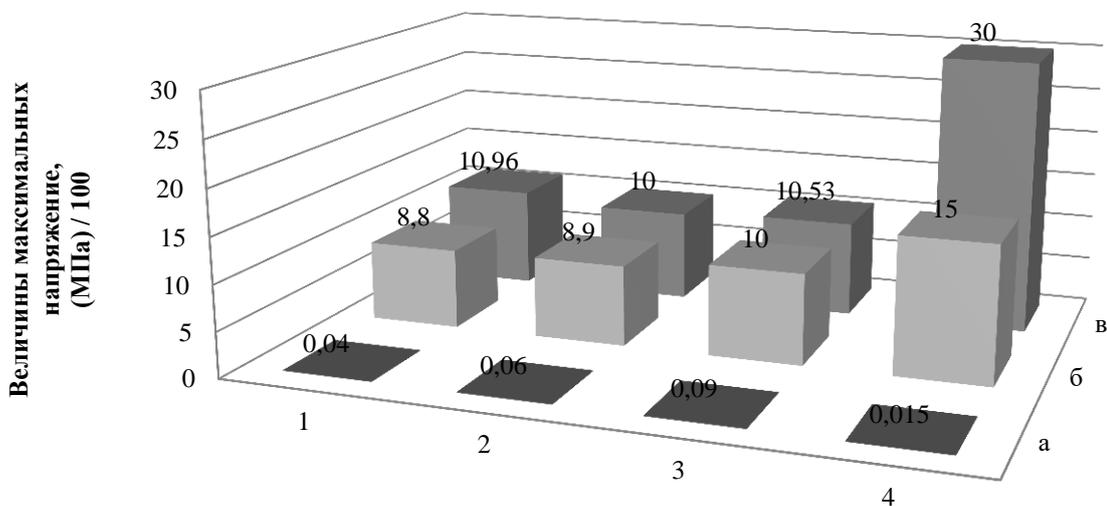


Рисунок 14 – Результаты моделирования по параметрам: а - скорость ((мм/мм)сек) изменения максимальной деформации; б - скорость деформации (мм/сек); величины максимальных напряжения, (МПа)

Используемые при моделировании варианты инструментальных материалов:

1. ВК8 + Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм) [нанесение слоёв покрытия методом конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами].
2. ВК8 + Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (TiAl)N(2 мкм) + TiN(0,5 мкм)[нанесение слоёв покрытия методом конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами].
3. ВК8 + (AlCr)N(1,5 мкм) + (AlTi)N(2мкм) [нанесение слоёв покрытия методом конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы без ассистирования ускоренными ионами].
4. ВК8

Примечание: Для удобства отображения величины скоростей изменения максимальной деформации, ((мм/мм)сек) условно разделены на 100.

Моделирование выполнено для продольного течения (скорость резания $v=50$ м/мин, подача $s=0,21$ мм/об, глубина резания $t=1$ мм) четырёхгранный сменной пластиной (ГОСТ 19052-80).

3.5. Анализ моделирования по производственным показателям

Ранее, на рисунке 9 показана структурная схема проектирования инструмента, построенная с позиций проектирования и исследования инструмента (покрытий). Она не отражает сущность проектирования с позиций обеспечения требуемой производительности обработки и качества обработанной поверхности детали.

На рисунке 15 отражена модель разработки инструмента с указанных позиций.



Рисунок 15 – Применённая модель реализации процесса имитационного проектирования инструментальных материалов

Она показывает, что важен не только математический аппарат имитационного моделирования. Не менее важна и затратная часть такого моделирования. В данном исследовании рассмотрены только период стойкости инструмента до достижения регламентированной величины его износа и качество обработанной поверхности. Это приведено в следующей главе.

3.6. Полученные результаты моделирования разных инструментов

На основании изложенной выше методологии имитационного моделирования выполнен ряд исследований (изложены ниже) в рамках задач диссертации.

3.6.1 Прогнозное проектирование выходных параметров

Выполнено с целью проследить кинетику процессов и оценить уровень сложно-напряжённого состояния инструмента.

Например, на рисунке 16 показана закономерность изменения выходных параметров «деформация», «напряжение», «температура» и «условный износ» для случая точения специализированной нержавеющей стали марки 09X17H7Ю (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки) разными инструментами.

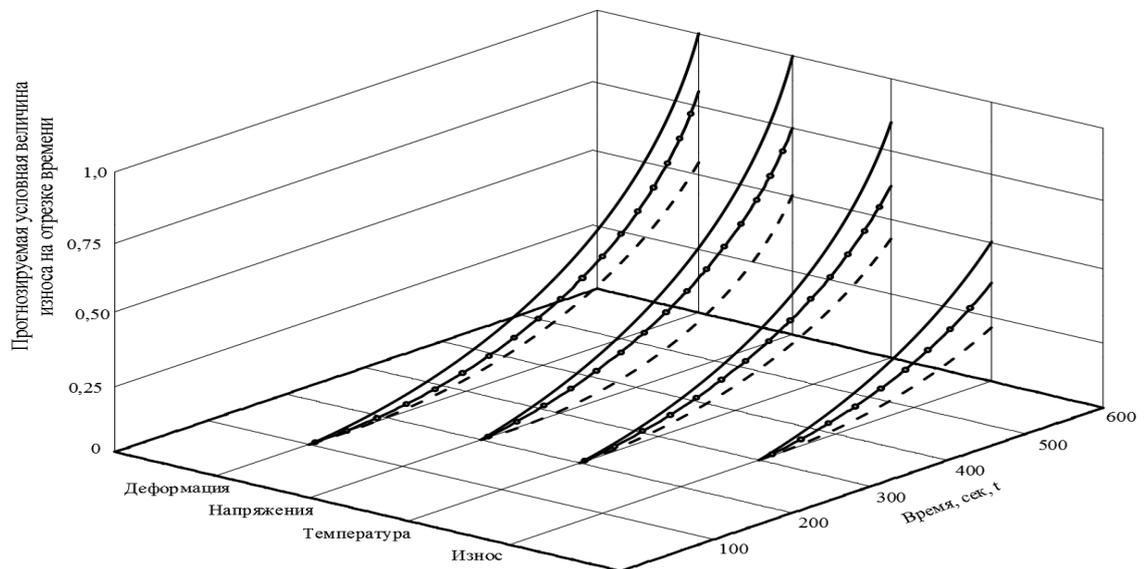


Рисунок 16 – Прогнозируемое соотношение исследуемых параметров (условного износа, температуры, напряжения, деформации) при использовании инструментальных материалов: сплошная линия – материал инструмента BK8; сплошная с точками - BK8 + TiCN+ TiN; штриховая линия - BK8 + TiC + TiN + (TiAl)N

На вертикальной оси этого рисунка цифрами указана величина условного износа, принятая за единицу. Из этого рисунка следует, что

наиболее рационален (как обеспечивающий максимальный прирост периода стойкости) инструмент, выполненный из материала $ВК8 + TiC + TiN + (TiAl)N$. Причём его износ прогнозируется меньшим более чем в 2 раза в сравнении с $ВК8$ и меньшим в 1,4 раза в сравнении с $ВК8 + TiCN + TiN$. Тенденции в изменении параметров «деформация», «напряжение» и «температура» аналогичны изменению параметра «износ».

Подобные построения выполнены более чем для 30 инструментальных материалов. В порядке убывания периода стойкости при равных условиях эксплуатации разработанные при имитационном моделировании инструменты расположились в следующей последовательности:

- 1 - $ВК8 + TiCN(5\text{мкм}) + (TiAl)N(3\text{мкм}) + Al_2O_3(5\text{мкм}) + TiC(5\text{мкм})$;
2. $ВК8 + Al_2O_3(2\text{мкм}) + (Ti)CN(5\text{мкм}) + (TiAl)N(3\text{мкм}) + TiN(3\text{мкм})$;
3. $ВК8 + (TiAl)N(3\text{мкм}) + Al_2O_3(3\text{мкм}) + (TiAl)N(3\text{мкм}) + Al_2O_3(3\text{мкм})$;
4. $ВК8 + TiN(3\text{мкм}) + TiC(3\text{мкм}) + TiN(3\text{мкм}) + TiC(3\text{мкм})$;
5. $ВК8 + TiC(3\text{мкм}) + TiN(3\text{мкм}) + (TiAl)N(2\text{мкм})$;
6. $ВК8 + TiCN(2\text{мкм}) + TiC(3\text{мкм}) + TiN(1,5\text{мкм})$;
7. $ВК8 + TiC(1,5\text{ мкм}) + TiN(3\text{мкм})$;
8. $ВК8 + TiN(2\text{мкм}) + TiC(5\text{мкм})$;
9. $ВК8 + TiCN(0,5\text{мкм}) + TiN(1\text{мкм})$;
10. $ВК8 + TiN(0,5\text{мкм}) + TiC(1\text{мкм})$;
11. $ВК8$ без покрытия.

Расположены инструменты в этом списке в порядке убывания эффективности их применения. В следующей главе показано, что в результате эксплуатационных испытаний при резании этот прогноз подтвердился.

Важно было проследить эту закономерность при других условиях эксплуатации. Так, на рисунке 17 показаны результаты прогнозного моделирования при разных скоростях резания (50 и 60 м/мин) и при разных глубинах резания (1 и 2,5 мм) (данный рисунок в силу необходимости будет повторён в главе 4).

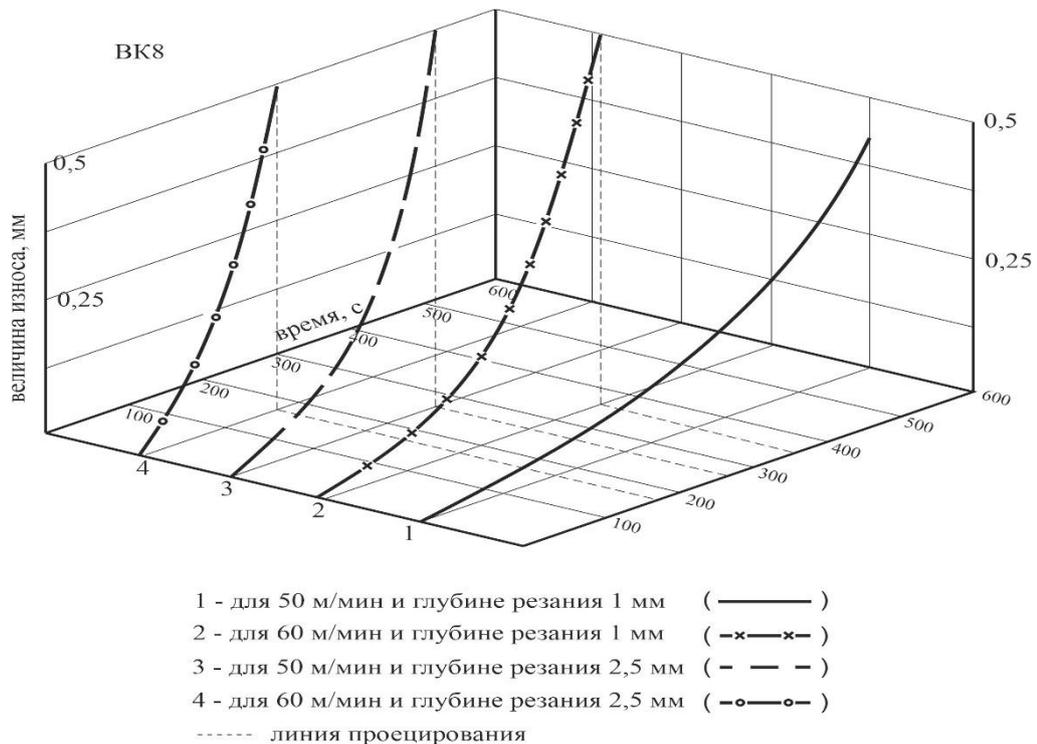


Рисунок 17 – Прогнозируемый условный износ (%) при разных режимах резания инструментом ВК8

Из рисунка видно насколько зависима величина износа от условий эксплуатации.

Подобные зависимости построены для всех спроектированных инструментов.

3.6.2 Детализированные результаты прогнозного моделирования

Выше в разделе 3.6.1 показаны обобщённые результаты моделирования инструментов.

Выполнено построение и анализ результатов моделирования для каждого из указанных выше 10-ти инструментов, Приложение 1. На рисунке 18 показаны номограммы параметров (1 - величины износа инструмента; 2 – температуры в зоне резания; 3 – эквивалентных напряжений в инструментальном материале; 4 – величины деформации инструментального материала; 5 – максимальной составляющей силы резания (её значения в ньютонах показаны на вертикальной оси) для случая имитационного моделирования процесса токарной обработки (скорость резания 50 м/мин,

глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/оборот заготовки) нержавеющей стали марки 09X17H7Ю типовой сменной токарной пластинкой, выполненной из инструментального твёрдого сплава марки ВК8.

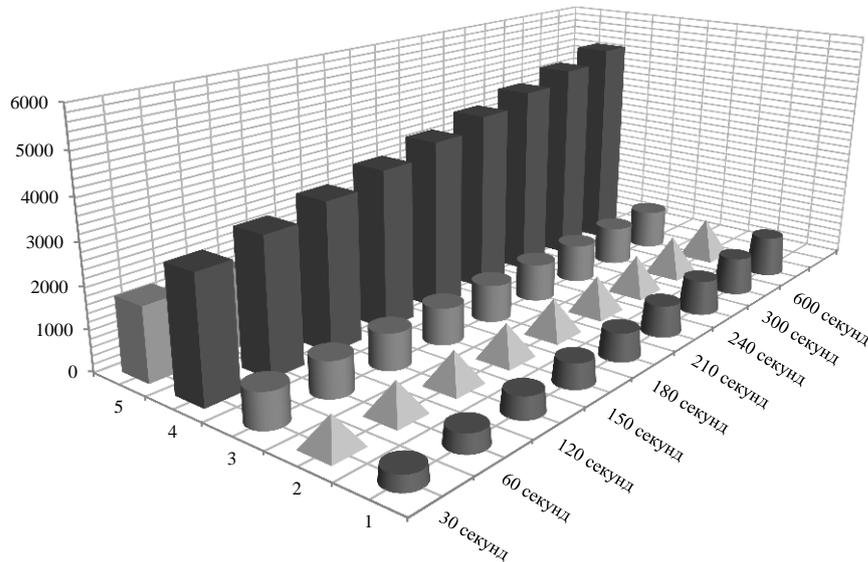


Рисунок 18 – Пример изменения во времени пяти разных параметров исследования (1 - величины условного износа инструмента; 2 – температуры в зоне резания; 3 – эквивалентных напряжений в инструментальном материале; 4 – максимальной составляющей силы резания (её значения в ньютонах показаны на вертикальной оси)); 5 – величины деформации инструментального материала для инструментального твёрдого сплава марки ВК8 в исходном состоянии (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

Соотношение масштабов для каждого из параметров здесь выбрано произвольным, важно было проследить динамику (изменение) параметров во времени для каждого из параметров. Поясняем: износ (ряд 1) показан в условных единицах (максимум принят за 100%), температура, напряжение и деформация – в своих масштабах, но крупно выделено то (сила резания, ряд 4), что имеет определяющее влияние на величину износа.

Из рисунка 18 видно, что следует ожидать стремительный рост силы резания (достигает 5200 ньютон), отставание во времени темпа прироста износа, деформации инструмента, температуры в зоне резания и рост темпа напряжений в инструментальном материале.

Подобные номограммы были построены для всех инструментальных материалов с разработанными покрытиями. Часть из них показана на рисунках 19 – 21.

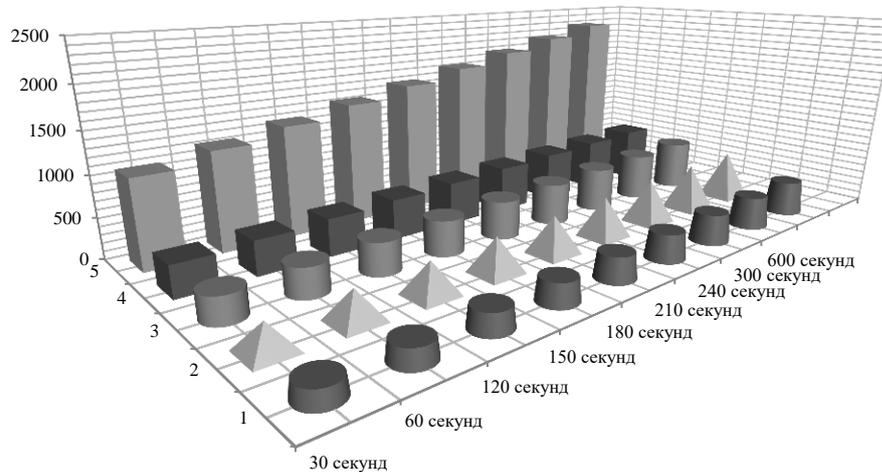


Рисунок 19 – Изменение во времени параметров исследования (1 - величины износа инструмента; 2 – температуры в зоне резания; 3 – эквивалентных напряжений в инструментальном материале; 4 – максимальной составляющей силы резания (её значения в ньютонах показаны на вертикальной оси)); 5 – величины деформации инструментального материала для инструментального материала $\text{VK8} + \text{TiCN}(5\text{мкм}) + (\text{TiAl})\text{N}(3\text{мкм}) + \text{Al}_2\text{O}_3(5\text{мкм}) + \text{TiC}(5\text{мкм})$ (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

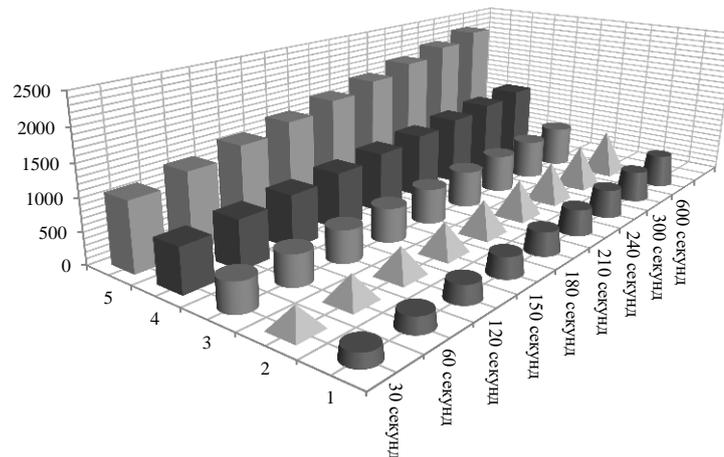


Рисунок 20 – Изменение во времени параметров исследования (1 - величины износа инструмента; 2 – температуры в зоне резания; 3 – эквивалентных напряжений в инструментальном материале; 4 – величины деформации инструментального материала; 5 – максимальной составляющей силы резания (её значения в ньютонах показаны на вертикальной оси)) для инструментального материала $\text{VK8} + (\text{TiAl})\text{N}(3\text{мкм}) + \text{Al}_2\text{O}_3(3\text{мкм}) + (\text{TiAl})\text{N}(3\text{мкм}) + \text{Al}_2\text{O}_3(3\text{мкм})$ (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

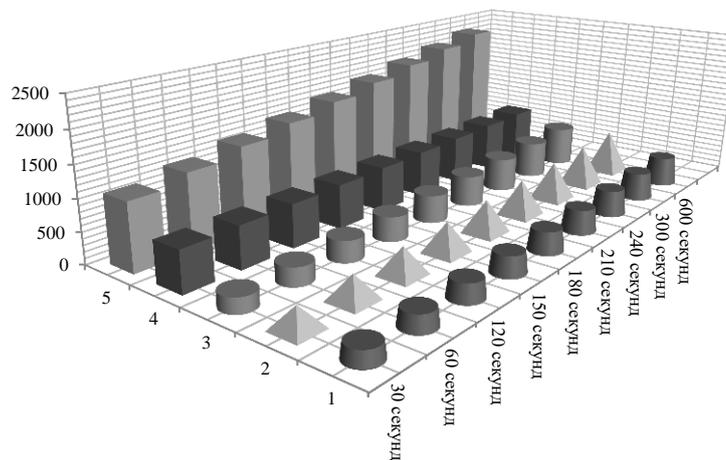


Рисунок 21 – Изменение во времени разных параметров исследования (1 - величины износа инструмента; 2 – температуры в зоне резания; 3 – эквивалентных напряжений в инструментальном материале; 4 – величины деформации инструментального материала; 5 – максимальной составляющей силы резания (её значения в ньютонах показаны на вертикальной оси)) для инструментального материала $VK8+Al_2O_3(2\text{мкм}) + (Ti)CN(5\text{мкм}) + (TiAl)N(3\text{мкм}) + TiN(3\text{мкм})$ (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

Сравнение данных, приведённых на этих (и других не указанных здесь из-за ограничения объёма диссертации) рисунках показывает, что каждый из спроектированных инструментальных материалов индивидуален по ожидаемым выходным параметрам имитационного моделирования. Это служит основанием для выбора наиболее рациональных инструментальных материалов под требуемые условия их эксплуатации.

Анализ номограмм позволяет заключить следующее:

1. Полученные результаты имитационного моделирования разработанного инструмента могут быть использованы в деятельности промышленных предприятий как некий банк данных для выбора инструмента под конкретные производственные условия эксплуатации. Это и послужило основанием для принятия рекомендаций к использованию на производстве (Приложение 2, акты принятия к использованию на производствах).

2. Используемая методология отображения результатов имитационного моделирования позволяет осуществлять выбор пути

повышения требуемых параметров инструментального материала для новых условий (изменение скорости резания, глубины резания, геометрии режущей пластины и т.д.) их эксплуатации, что, по сути, является обеспечением возможности робастного проектирования необходимого металлорежущего инструмента и его инструментального материала.

3. Данная методология является средством управления созданием и выбора инструмента с заданными эксплуатационными свойствами.

Аналогичные номограммы построены с использованием имитационного моделирования для других (12X18Н10Т и 13X15Н5 АМ-3) обрабатываемых сталей. В качестве примера приведён рисунок 22.

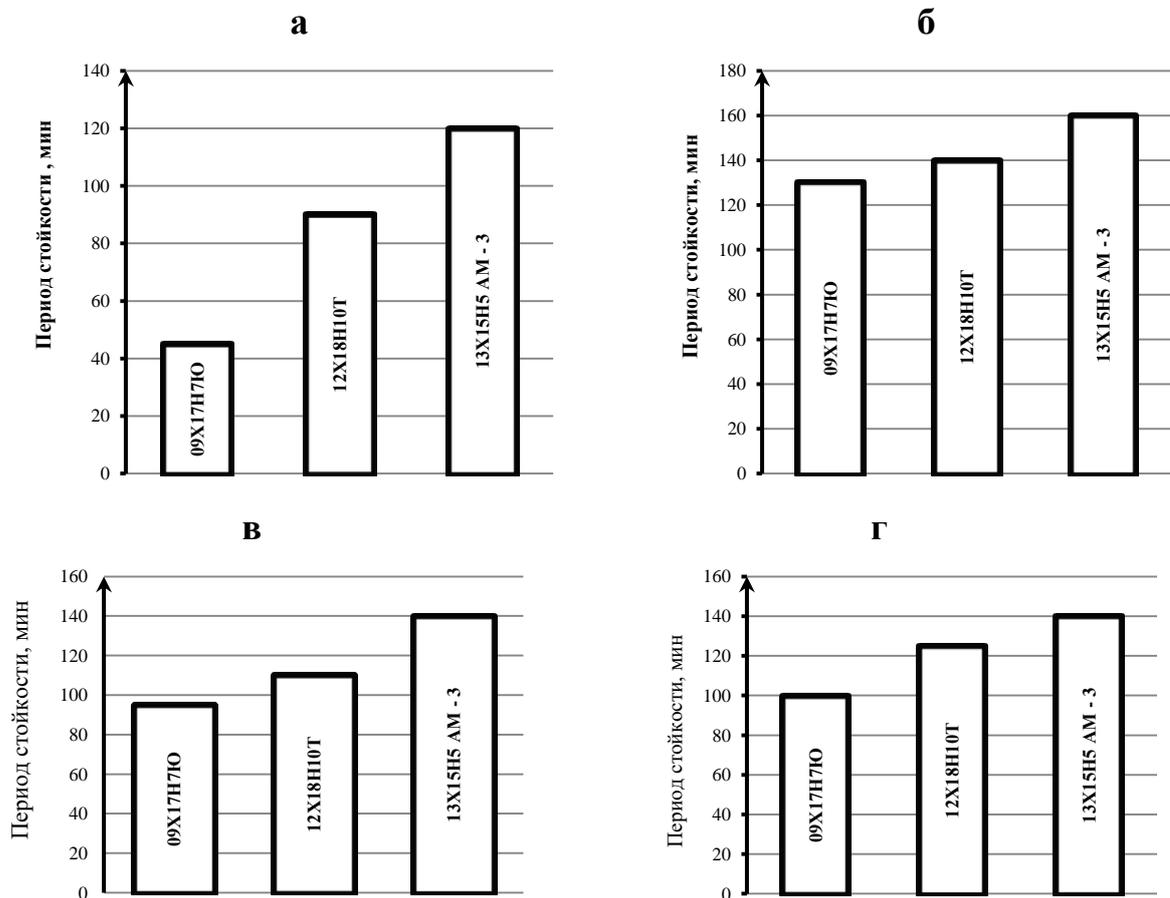


Рисунок 22 – Номограммы, характеризующие износостойкость отдельных инструментальных материалов при обработке разных нержавеющей сталей: **а** – период работы базового инструментального материала; **б** – период работы инструментального материала $ВК8 + Ti + TiN + (NbZrTiAl)N$; **в** – период работы инструментального материала $ВК8 + Ti + TiN + (TiAl)N + TiN$; **г** - период работы пятигранной пластины, выполненной из материала ВК8 (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

Из данных, приведённых на этих рисунках, видно насколько неравноценны условия нагружения (сложно-напряжённое состояние) в разных инструментальных материалах. По результатам имитационного моделирования температура и напряжения в разных инструментальных материалах изменяется почти в 2 раза, величина деформации – в 7 раз.

Анализ рисунка 22 позволяет сделать следующие выводы:

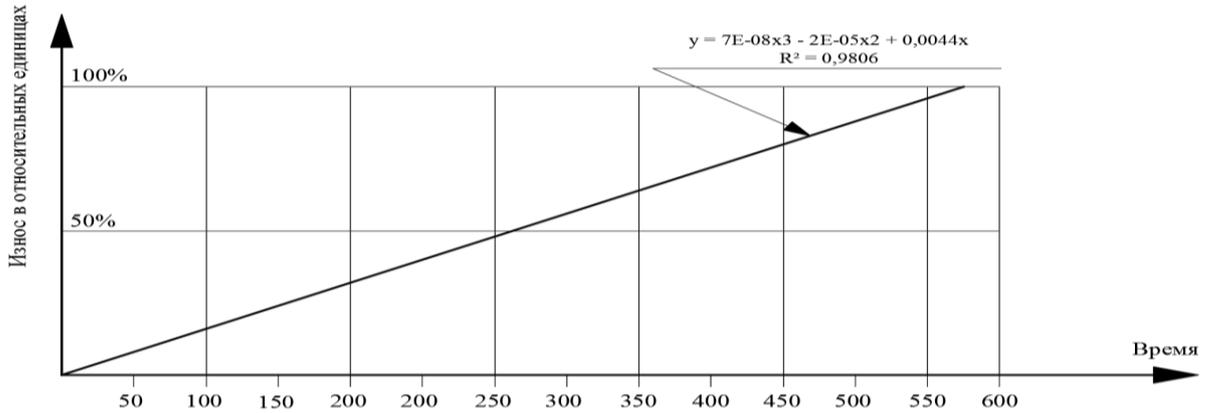
1. В сравнении с инструментальным материалом ВК8 по результатам имитационного моделирования следует прогнозировать (ожидать) прирост периода стойкости инструментов с покрытиями.

2. Для инструментального материала ВК8 +Ti + TiN + (NbZrTiAl)N следует ожидать минимальную стойкость при точении стали 09X17H7Ю, максимальную – при 13X15H5 АМ-3 с различием в 30 минут. Для инструментального материала ВК8 + Ti + TiN + (TiAl)N + TiN следует ожидать минимальную стойкость (95 минут) при точении стали 09X17H7Ю, максимальную – при 13X15H5 АМ-3 с разницей в 45 минут.

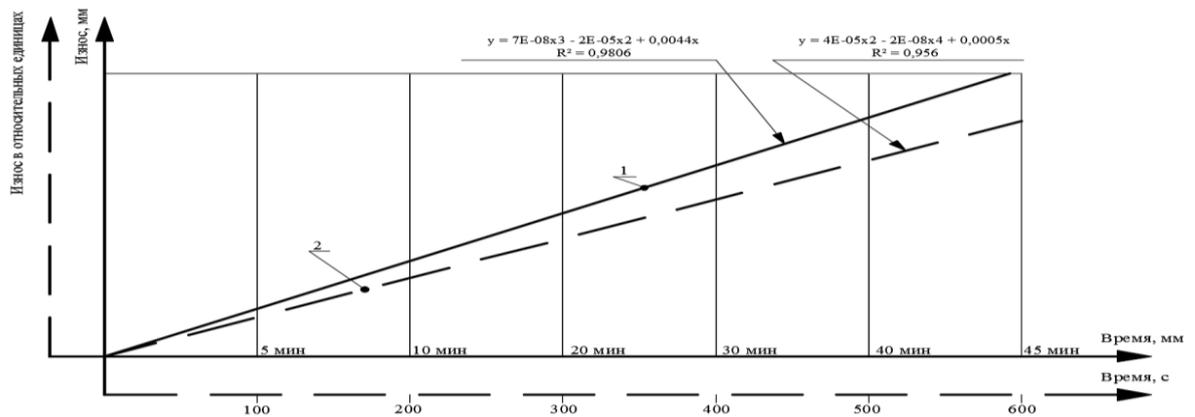
Ниже приведён пример сопоставления результатов моделирования и результатов натуральных экспериментов по величине износа различных инструментальных материалов, рисунок 23.

Анализ данных этого рисунка показывает, что корреляция между экспериментальными и моделированными данными существует. Это позволяет прогнозировать эксплуатационные свойства инструментальных материалов под необходимые условия их эксплуатации.

а



б



1 - экспериментальная линия износа режущей пластины (до достижения 0,5 мм); 2 - линия износа, полученная при моделировании

Рисунок 23 – Сопоставление графиков износа режущей пластины (ВК8) при натуральных экспериментах и при имитационном моделировании: а – график прироста износа за первые 600 секунд резания (имитационное

б – график прироста износа при натурном эксперименте (сплошная линия 1) до достижения 0,5 мм и график прироста износа, полученный путём имитационного моделирования за первые 600 секунд резания (пунктирная линия 2)

Примечание: в верхней части рисунков приведены уравнения, описывающие эти линии

3.7 Выводы по главе

1. Имитационное моделирование позволило виртуально спроектировать новые инструменты под исследуемые условия их эксплуатации. Оно показало, что следует ожидать (прогнозировать) от каждого из инструментального материала по тем или иным выходным управляемым параметрам.

В целом по результатам исследований, изложенных в данной главе, можно заключить, что имитационное моделирование является достаточно надёжным средством (инструментарием) для решения задач данной диссертации. Более детально можно сделать следующие выводы:

2. Результаты имитационного моделирования получили подтверждение при экспериментальных (натурных) испытаниях.

3. Имитационное моделирование выполнено по параметрам «величина износа», «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «деформация инструмента». Это позволило оценить прирост величин этих параметров за время работы инструмента и темп этого прироста. Полученные результаты логичны с позиций физических явлений и принятых представлений о сложно-напряженном состоянии образцов инструментальных материалов. Напряжения и деформацию экспериментально не проверяли, но износ и температура подтверждены. Сходимость результатов находится в пределах погрешностей измерения.

4. Имитационное моделирование для достижения цели, поставленной в диссертации, применено:

а) для установления влияния инструментального материала отдельно по параметрам «величина износа», «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «деформация инструмента»;

б) для установления влияния инструментального материала совокупно по параметрам «величина износа», «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «деформация инструмента». Адекватность и актуальность результатов доказаны.

5. Выполнена сравнительная оценка идентичности прироста во времени параметров «величина износа», «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «деформация инструмента». Полученные результаты укладываются в существующие представления о сложно-напряженном состоянии образцов инструментальных материалов.

6. Выполнена сравнительная оценка идентичности прироста во времени параметров «величина износа», «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «деформация инструмента» при различных значениях скорости резания и глубины резания. Полученные результаты укладываются в существующие представления о процессе резания.

7. Выполнена сравнительная оценка идентичности прироста во времени параметров «величина износа», «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «деформация инструмента» при точении заготовок деталей, выполненных из разных сталей. Полученные результаты укладываются в существующие представления.

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

4.1. Общие вопросы экспериментального исследования

Экспериментальные исследования проведены при точении специализированных труднообрабатываемых нержавеющей сталей марок 12X18H10T, 13X15H5 АМ-3 и 09X17H7Ю, отличающихся своими физико-механическими характеристиками, эксплуатационными свойствами и назначением. Выбор именно этих сталей объясняется тем, что они имеют общее назначение.

Сталь марки 13X15H5 АМ-3 принята к анализу как базовая. Сталь марки 12X18H10T выбрана как более труднообрабатываемая, чем сталь марки 13X15H5 АМ-3. Сталь марки 09X17H7Ю выбрана как ещё более труднообрабатываемая.

В одном из случаев для сравнения сил резания рассмотрено точение титанового сплава.

4.1.1 Краткие сведения о характеристиках и свойствах указанных сталей

Сталь марки 13X15H5 АМ-3 (иное обозначения ЭП310, ВНС -5) в силу своих эксплуатационных особенностей не является ГОСТовской (её нет в ГОСТ 5362-2014 «Нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные»). Она изготавливается по отраслевому стандарту ОСТ 1 90005-91 и по техническим условиям ТУ14-1-1271-75 завода-изготовителя. Ближайшими её заменителями являются стали марок 07X16H6 (ЭП-288), 18X14H4 АМ-3. Она обладает хорошим сочетанием прочности, ударной вязкости и пластичности. Трудность её обработки обусловлена значительным наличием хрома (14 – 16%) и никеля (4 – 6%). Её твёрдость зависит от многих параметров, в первую очередь от условий её

упрочнения. Небольшой предел прочности (500 – 800 МПа) этой стали отмечен при её термообработке в нормальных условиях. При её закалке холодом предел прочности возрастает до 1200 – 1700 МПа. Ударная вязкость КСУ составляет 18 - 22 кДж / м². Наиболее общепринятой областью применения этой стали являются детали компрессоров, лопатки турбин и другие нагруженные детали.

Эта высоколегированная жаропрочная коррозионностойкая нержавеющая сталь аустенитного класса после закалки имеет преимущественно аустенитную структуру и в таком состоянии характеризуются высокой технологической пластичностью. Упрочнение деталей (до 1200-1700 МПа) достигается после закалки (обработкой) холодом, при которой происходит переход аустенита низкой прочности в высокопрочный мартенсит. После обработки холодом сохраняется 15-30% остаточного аустенита, что обеспечивает стали высокую вязкость. Окончательная термообработка - отпуск при температуре 200-450 градусов Цельсия. Химический состав стали марки 13X15H5 AM - 3: сера (S), не более 0,03; молибден (Mo) 2-4; фосфор (P), не более 0,035; марганец (Mn), не более 1; азот (N) 0,08-0,12; кремний (Si) , не более 0,6; никель (Ni) 4 – 6; хром (Cr) 14 – 16; углерод (C) 0,13 процентов.

Сталь марки 12X18H10T изготавливается согласно ГОСТ 5362-2014 «Нержавеющие стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные», позиция 6-42. В ней 17 – 19% хрома и 9 – 11% никеля. Её твёрдость по Бринелю HB 179 МПа. Ударная вязкость КСУ составляет 285 кДж / см². Сведения о её прочности различны, например предел прочности $\sigma_{-1} = 279$ МПа, $\sigma_{\text{в}} = 610$ МПа, $\sigma_{02} = 196 - 236$ МПа. Её ближайшими заменителями являются стали марок 08X18Г8H2T и 12X18H9T. Аналогом в США являются стали марок 321, 321H, S32109. В Германии – X12CrNiNi8-9. Областью применения этой стали являются изделия, работающие в агрессивных средах, в разбавленных растворах кислот, в теплообменниках.

Сталь марки 09X17H7Ю является наиболее труднообрабатываемой из этих трёх сталей. В силу этого основное исследование в диссертации проведено для этой стали. Она разработана (ГОСТ 5632-72 на материал и ГОСТ 7350-77 на сортамент проката) в первой половине 20 века для ряда деталей, работающих в морской среде применительно к подводным транспортным средствам. Рекомендации по обработке этой стали с тех пор устарели хотя бы потому, что уже нет тех станков, на которые была ориентирована обработка заготовок деталей. Область применения данной стали значительно возросла. Это нефтегазовая отрасль, пищевая и медицинская промышленность, оборудование морских причалов и пирсов, агрегаты и машины по добыче солей и т.д. Прямых зарубежных аналогов указанной стали нет. Уникальность физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств, табл. 2 и табл.3, специализированной нержавеющей стали марки 09X17H7Ю [103 с.2)] создаёт сложности [(104 с.5), (105 с.37), (106 с.77)] при её механической обработке лезвийным металлорежущим инструментом.

Таблица 2 – Химический состав стали марки 09X17H7Ю

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr
до 0.09	до 0.8	до 0.08	7 – 8	до 0.02	до 0.03	16 -17.5

Высокая прочность и вязкость этой стали не позволяют применять высокие скорости резания, период стойкости режущего инструмента низок, что не приемлемо в тех случаях, когда при обработке поверхности заготовки недопустима смена режущей кромки режущей пластины или замена режущего инструмента.

Таблица 3 – Физико-механические характеристики стали марки 09X17H7Ю

Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Ударная вязкость КСУ, кДж / м ²
830	735	12	490

4.1.2 Общие сведения о заготовках, инструменте и параметрах режима резания

Использовали цилиндрические заготовки детали длиной 800-900 мм и диаметром около 300 мм. Корка с заготовок предварительно удалена. Заготовки имели центровые отверстия для установки в патрон и задний центр токарного станка.

Исследовано наружное точение проходными резцами с механическим креплением режущих пластин. Использовали типовые отечественные твёрдосплавные пластины трехгранные, квадратные, ромбические и пятигранные. А также использовали пластины зарубежных фирм KORLOY Inc. (Корея) (электронный адрес каталогов фирмы info@halte.ru; WWW.halte.ru Export@korloy.com); Walter AG (Германия) (электронный адрес каталогов фирмы WWW.Walter-tools.com Service.ru@Walter-tools.com); Sandvik coromant (Швеция) (электронный адрес каталогов фирмы info.coromant@sandvik.com WWW.coromant.sandvik.com).

Подача резца из требований шероховатости обрабатываемой поверхности выбрана равной 0,21 мм/об. Заготовки. Глубину резания принимали равной 0,5 мм для условий чистовой обработки, 1 мм – для условий получистовой обработки и 2 – 2,5 мм – для условий черновой обработки. Сопоставляли режущий инструмент по периоду стойкости, т.е. по времени работы режущих пластин до износа 0,5 мм по задней грани. Измерения достигнутой величины износа выполняли через каждые 15 минут.

4.2. Результаты предварительной разработки общей последовательности (методики) исследования

Предварительное исследование включало в себя следующее:

а) Исследовали особенности процесса изнашивания пластин на разных стадиях его износа при обработке указанных сталей. Для этого строили

графики зависимости величины износа от времени его работы при величинах износа 0,1 мм, 0,2 мм, 0,3 мм, 0,5мм.

б) Затем ставили задачу определить «чувствительность» имитационного моделирования на примере изменения толщины какого–либо слоя покрытия. Установлено, что программная среда Deform (смотри главу 3) по исследуемым параметрам позволяет отличить (идентифицировать) инструмент, отличающийся покрытиями.

В) Затем виртуально методом имитационного исследования [107 с.186] «спроектировали» более 30 инструментов ВК8 + то или иное покрытие) и отобрали из них 10 наиболее конкурентных по периоду стойкости.

4.3. Описание токарного станда для экспериментальных исследований

4.3.1 Описание токарного станда

В качестве токарного станда использовали токарно-винторезный станок модели 16К25. Выбор предопределён его жёсткостью (перед испытаниями станок был дополнительно обслужен), возможностью размещать заготовки, имеющиеся для проведения исследования, возможностью базирования на нём токарного динамометра и устройства для контроля шероховатости обработанной поверхности.

Общее представление о токарном станде дают фотографии рисунка 24.

а**б****в**

Рисунок 24 – Фотографии обустройства токарного станка для проведения: **а** – продольного точения заготовки; **б** – измерения составляющих силы резания при замене резцедержателя станка токарным динамометром STD201-2; **в** – измерения параметров шероховатости обработанной поверхности

4.3.2 Описание токарного станка для измерения сил резания.

Полученные результаты

Здесь приведены лишь отдельные результаты исследований из-за ограничений в объёме диссертации. Более значительный объём результатов исследований опубликован в работах [(108 с.112), (109 с.153), (110 с.154)].

Ниже даны отдельные примеры результатов измерения и анализа составляющих силы резания при точении заготовки детали, выполненной из стали 09Х17Н7Ю. Для сравниваемых сталей марок 13Х15Н5 АМ-3 и 12Х18Н10Т это выполнено тоже и сведения приведены далее как обобщающие.

На рисунке 25 приведены примеры записи всех трёх составляющих силы резания при использовании четырехгранной пластины, выполненной из ВК8. При чёрно-белом изображении детализация записей просматриваются трудно. Хорошо они видны при цветном изображении, например, как в работе [108 с.106].

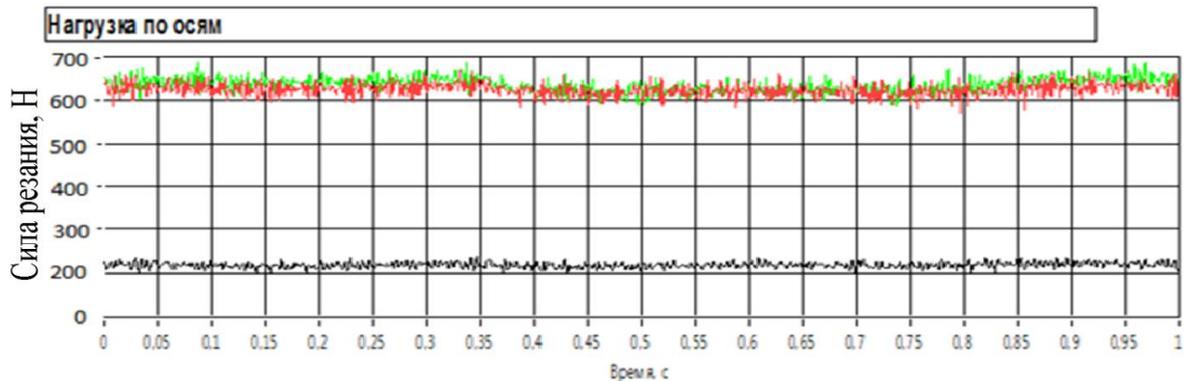
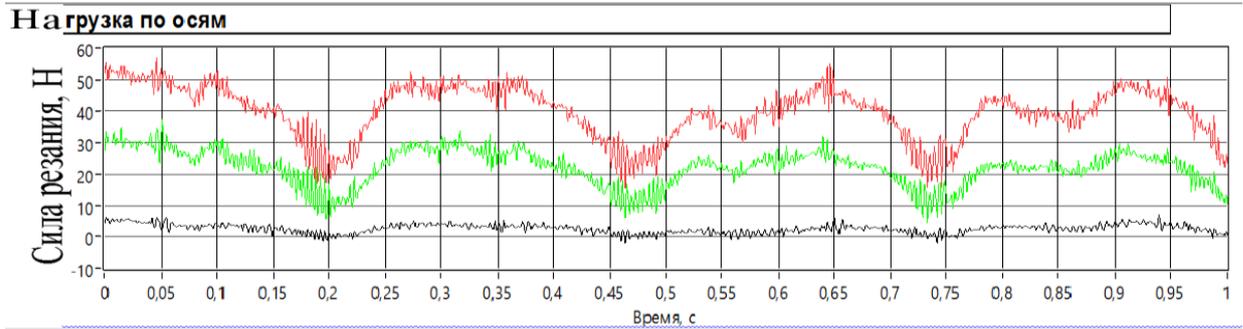


Рисунок 25 – Иллюстрация записей составляющих силы резания четырехгранной пластины, выполненной из твёрдого сплава марки ВК8 (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

На рисунке 26 приведены аналогичные записи при использовании такой же пластины, но с покрытием.



На графике верхняя линия отображает вертикальную составляющую силу резания, нижняя линия – продольную составляющую, средняя линия – отображает радиальную составляющую

Рисунок 26 – Иллюстрация записей составляющих силы резания четырехгранной пластины, выполненной инструментом $ВК8 + (AlCr)N(1,5\text{мкм}) + (AlTi)N(2\text{мкм})$ (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

Различие в величинах составляющих силы резания для этих двух инструментов существенное. Численные значения величин составляющих силы резания, определённые по записям силы резания приведены в таблице 4 (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки).

В таблице 4 приведены для сравнения сведения о силе резания при обработке титанового сплава марки ВТ-22. Они значительно выше, чем при рассматриваемых сталях марок 13Х15Н5 АМ-3, 12Х18Н10Т, 09Х 17Н7Ю, особенно вертикальная составляющая силы резания.

Таблица 4 – Числовые значения величин составляющих силы резания

Составляющие силы резания	09Х17Н7Ю	12Х18Н10Т	13Х15Н АМ-3	ВТ-22
F_x – продольная составляющая силы резания, Н	85,5	64,7	35,2	199,4
F_y – радиальная составляющая силы резания, Н	305,2	308	310,1	572
F_z – вертикальная составляющая силы резания, Н	362,5	284,6	191,4	578,2

По данным таблицы 4 для стали 09X17H7Ю построены номограммы, представленные на рисунке 27. Номограммы наглядно показывают различие в величинах составляющих силы резания.

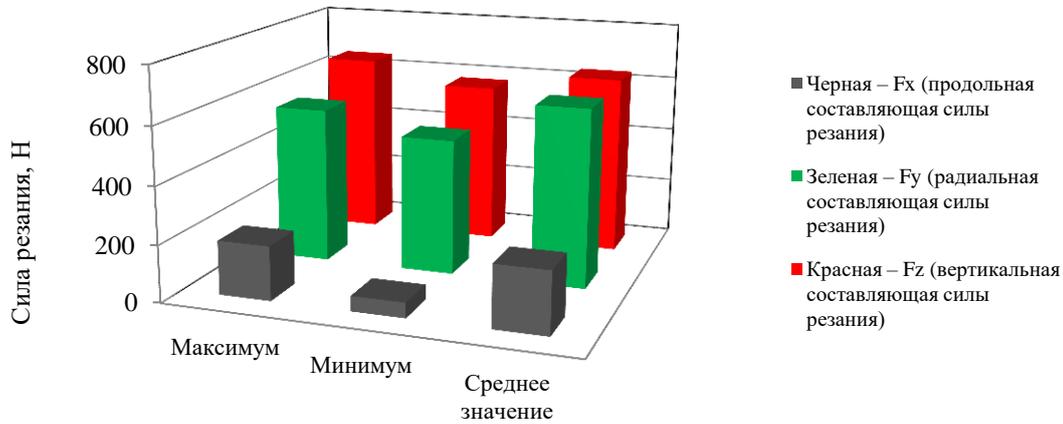


Рисунок 27 – Диапазоны изменения величин составляющих силы резания (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

Для сравнения составляющих сил резания при обработке различных материалов приведён рисунок 28. Сведения по титановому сплаву ВТ-22 приведены для сопоставления составляющих сил резания.

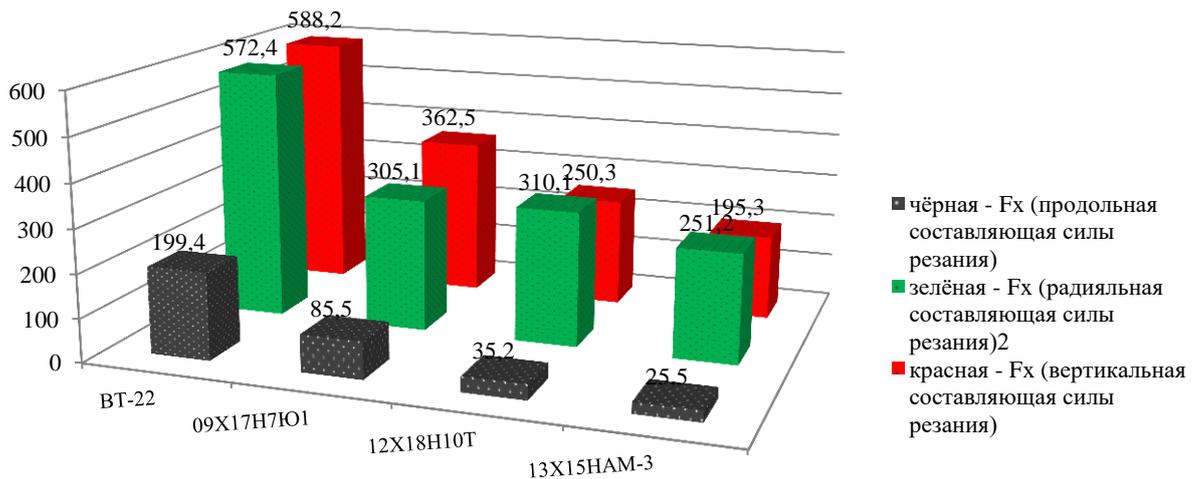
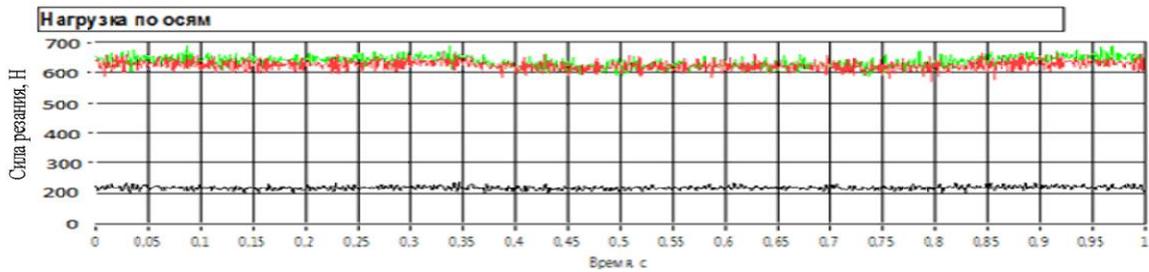


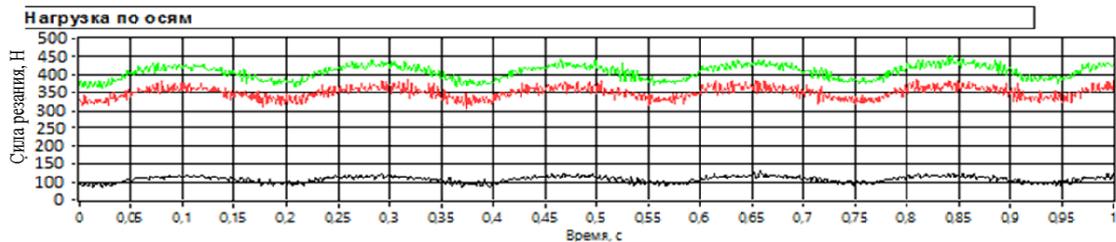
Рисунок 28 – Диапазоны изменения величин составляющих силы резания при обработке заготовок, выполненных из разных материалов (здесь режимы резания изменены по отношению к данным, приведённым на рис. 28, по необходимости (это связано с ограничениями по юстировке используемого динамометра) не превышения силы резания более 800 – 1000 Н)

На рисунке 29 приведены примеры записей составляющих силы резания при обработке разных материалов, указанных на рисунке 29.

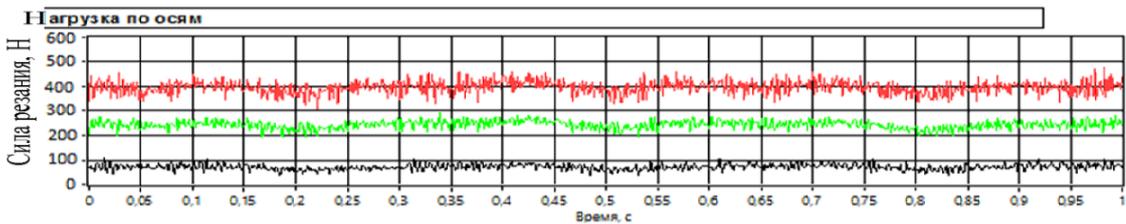
а



б



в



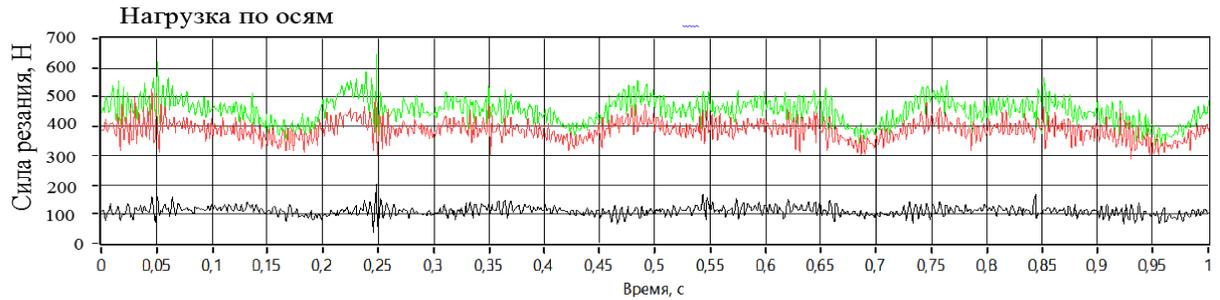
На графике верхняя линия отображает вертикальную составляющую силу резанию, нижняя линия – продольную составляющую, средняя линия – отображает радиальную составляющую

Рисунок 29 – Примеры записи составляющих сил резания: а – обрабатываемый материал 09X17H7Ю; б – обрабатываемый материал 13X15HAM-3); в – обрабатываемый материал VT-22. Режимы резания те же, что на рис.29

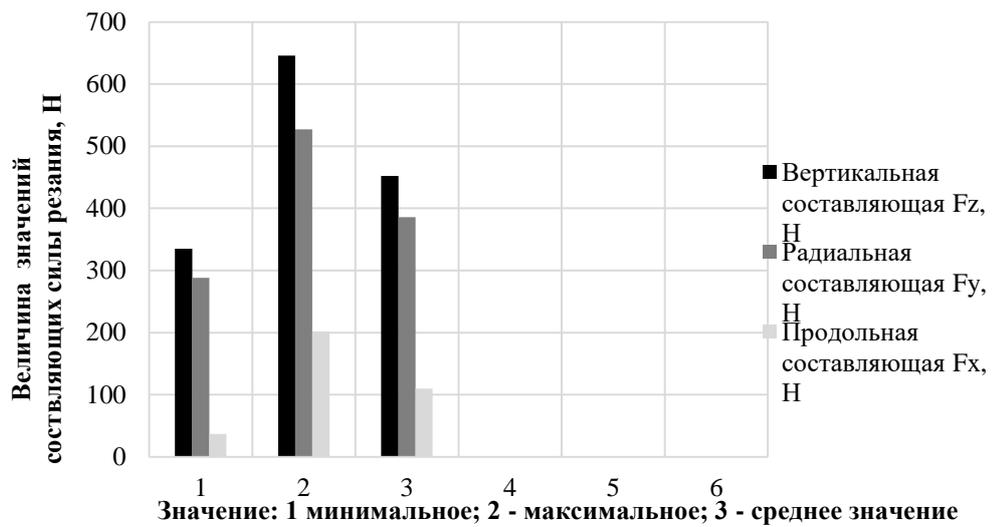
Из рисунка 29 следует, что при обработке нержавеющей сталей (показаны только две марки) значения сил сопоставимы, но при обработке 09X17H7Ю цикличность изменения сил резания более существенна (ещё более существенное различие отмечено при обработке титанового сплава VT-22).

Примеры для обработки нержавеющей стали марки 13X15H5 AM-3) показаны на рисунке 30.

а



б

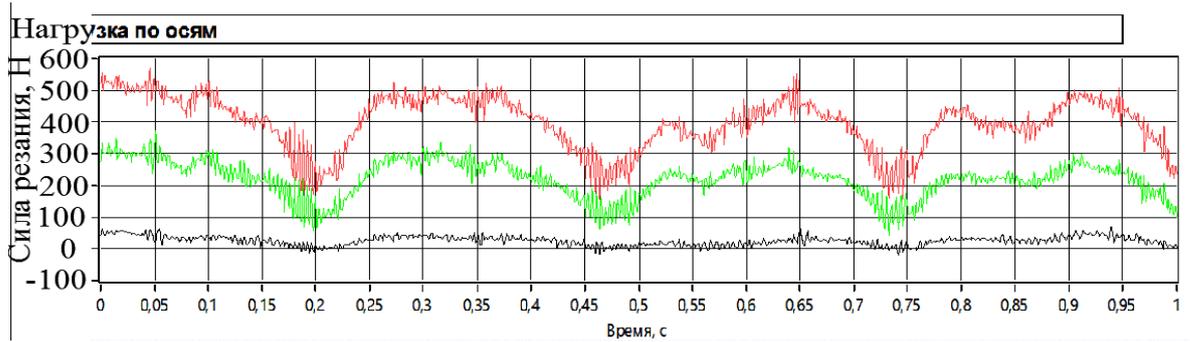


в



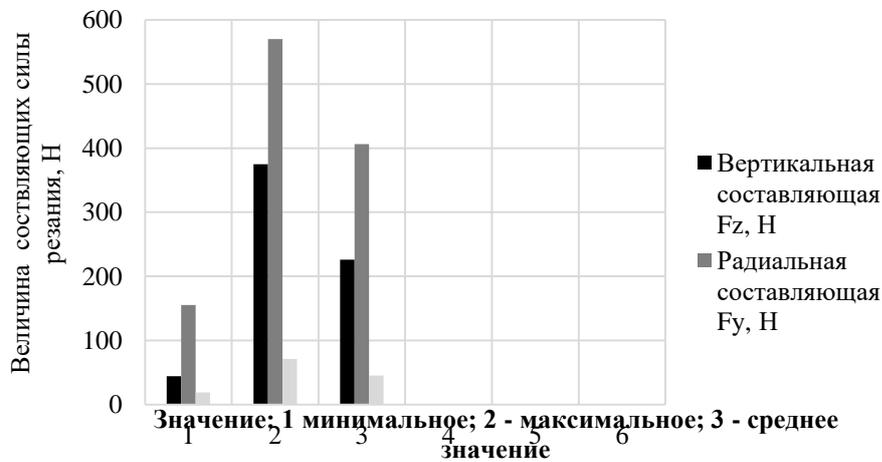
Рисунок 30 – Графическая иллюстрация результатов контроля сил резания при обработке стали марки 13X15H5 АМ-3 квадратной сменной пластиной из ВК8 (в состоянии поставки): а – запись составляющих силы резания; б – номограммы соотношения составляющих силы резания; в – номограммы соотношения максимальных значений составляющих силы резания (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

а



На графике верхняя линия отображает вертикальную составляющую силу резания, нижняя линия – продольную составляющую, средняя линия – отображает радиальную составляющую

б



в

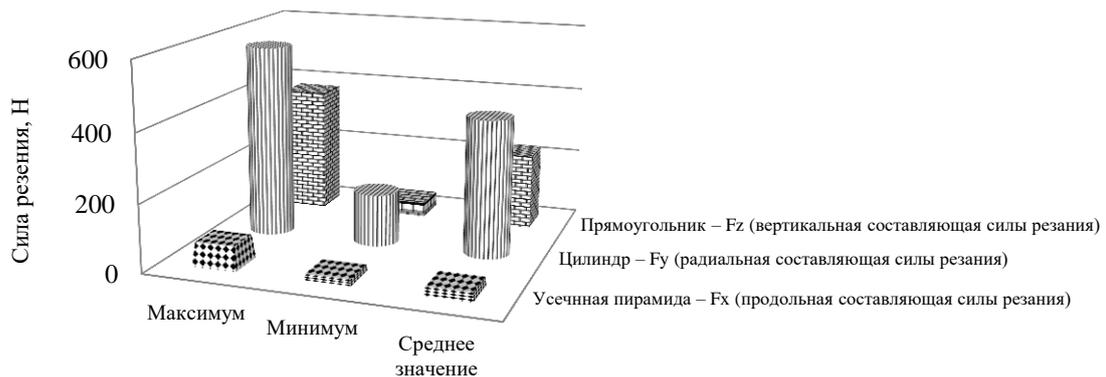


Рисунок 31 – Графическая иллюстрация результатов контроля сил резания при обработке стали марки 13X15H5 AM-3 квадратной сменной пластиной из VK8 с покрытием $(AlCr)N(1,5\text{мкм}) + (AlTi)N(2\text{мкм})$ [цифра в скобке показывает толщину данного слоя покрытия], покрытие нанесено методом конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы: а – запись составляющих силы резания; б – номограммы соотношения составляющих силы резания; в – номограммы соотношения максимальных значений составляющих силы резания (скорость резания 50

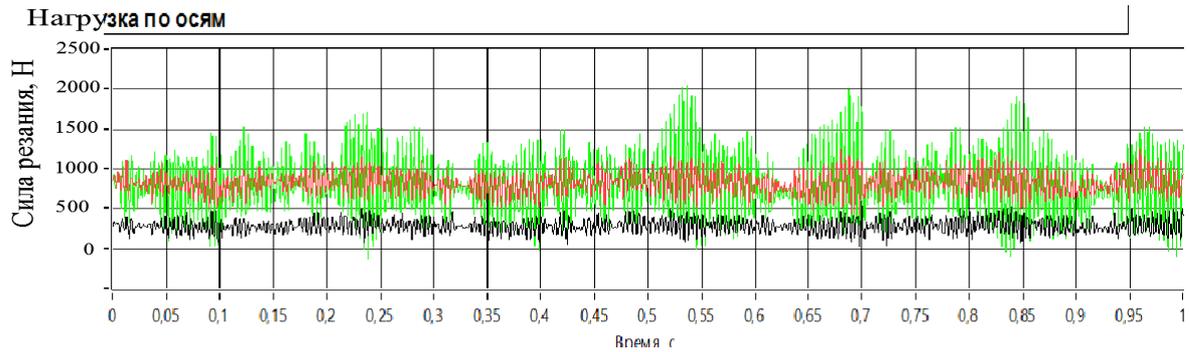
м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

На рисунке 31 показаны результаты, аналогичные результатам, приведённым на рисунке 31, но при использовании такой же пластины с покрытием (AlCr)N(1,5 мкм) + (AlTi)N(2мкм) [нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы без ассистирования ускоренными ионами].

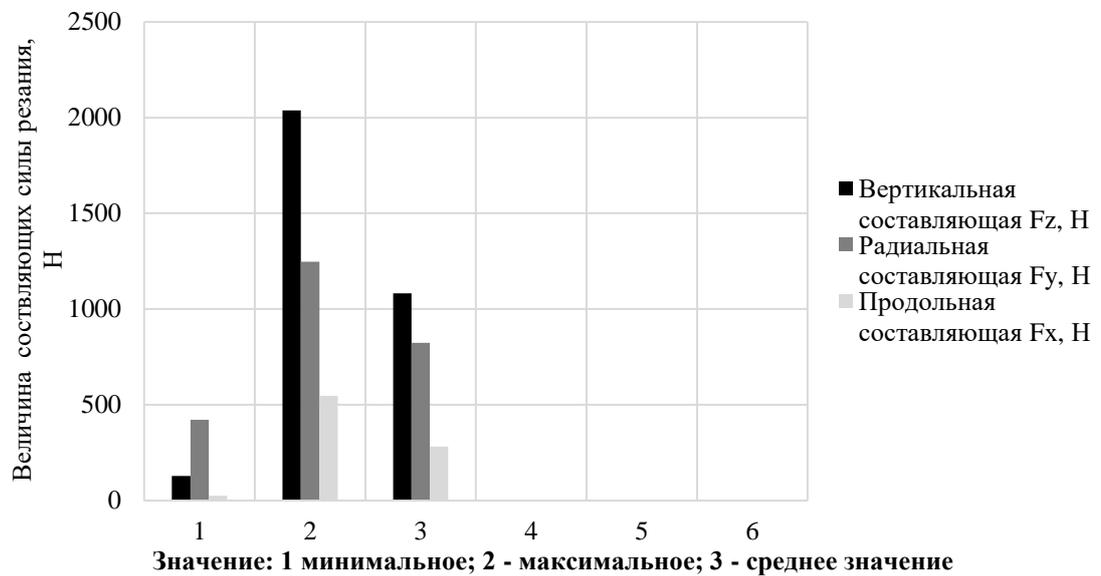
Из сравнения рисунков 31 и 32 видно благотворное (способствующее минимизации износа и повышению качества обработанной поверхности) влияние покрытия. Ещё более значительное влияние выявлено при применении многослойных покрытий.

Аналогичные картины получены при обработке пластинами не разработанными нами. Это сделано для обеспечения возможности сравнения результатов. Так, на рисунке 32 показаны записи составляющих силы резания при точении квадратной пластиной, выполненной из материала ВП1255 (это мелкозернистая основа сплава ТТ7К12 с трёхслойным покрытием TiC + TiCN + TiN,

а



б



в

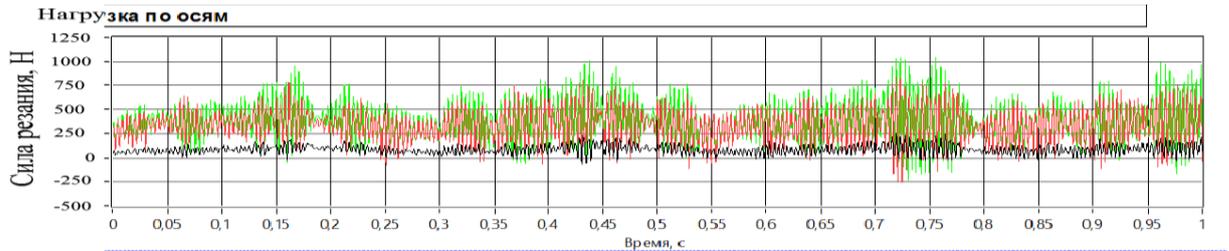


Рисунок 32 – Графическая иллюстрация результатов измерения сил резания при обработке стали марки 13X15H5 АМ-3 квадратной сменной пластиной из ВП1255: а – запись составляющих силы резания; б – номограммы соотношения составляющих силы

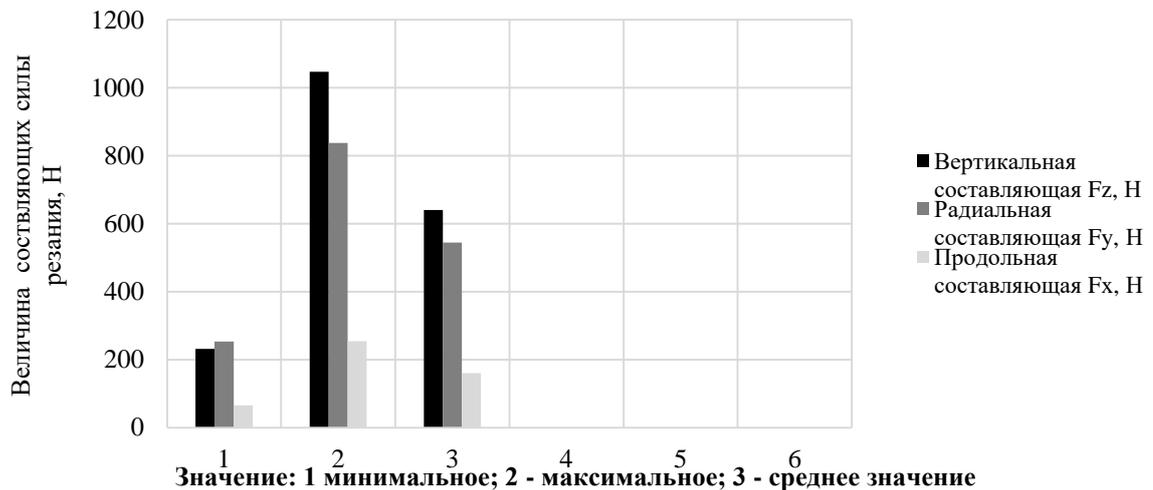
резания; в – номограммы соотношения максимальных значений составляющих силы резания (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

На рисунке 33 показаны записи составляющих силы резания при использовании пластины, выполненной из сплава MC2210, на рисунке 34 - трёхгранной пластиной (BK8), на рисунке 35 - пятигранной пластиной (BK8).

а



б



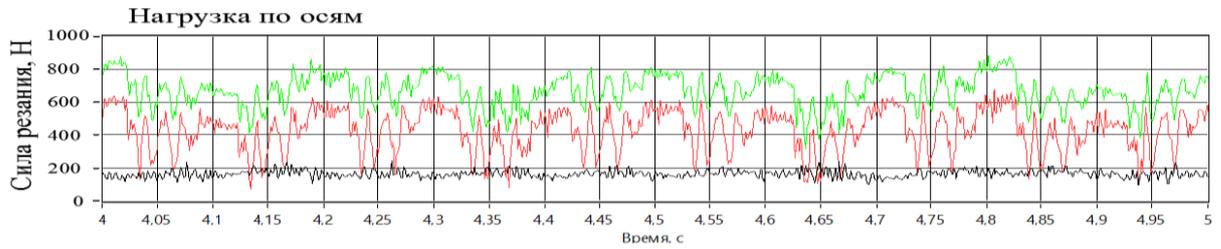
в



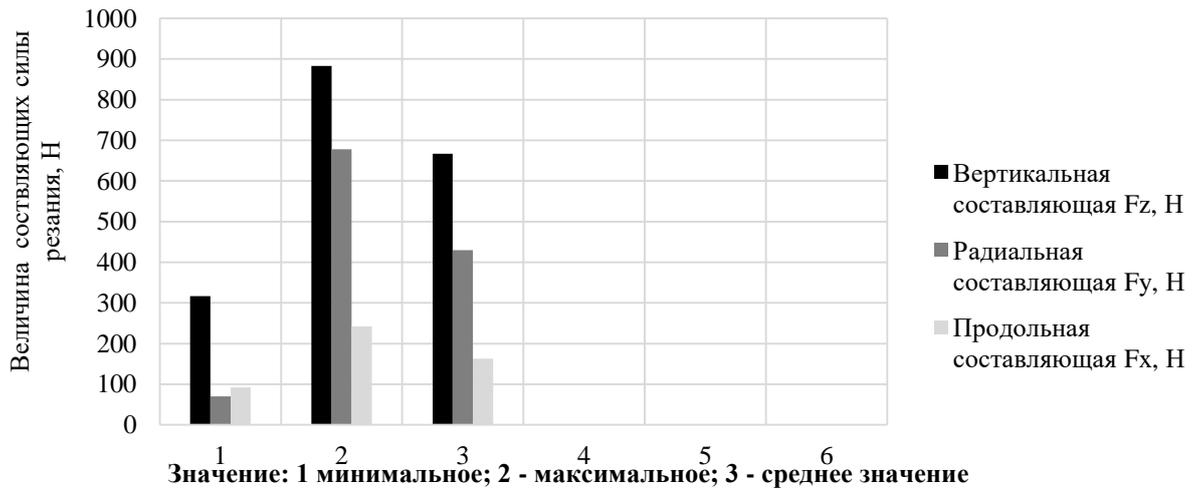
Рисунок 33 – Графическая иллюстрация результатов записи сил резания при обработке стали марки 13X15H5 АМ-3 квадратной сменной пластиной из MC2210: а – запись составляющих силы резания; б – номограммы соотношения составляющих силы резания; в – номограммы соотношения максимальных значений составляющих силы

резания (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

а



б

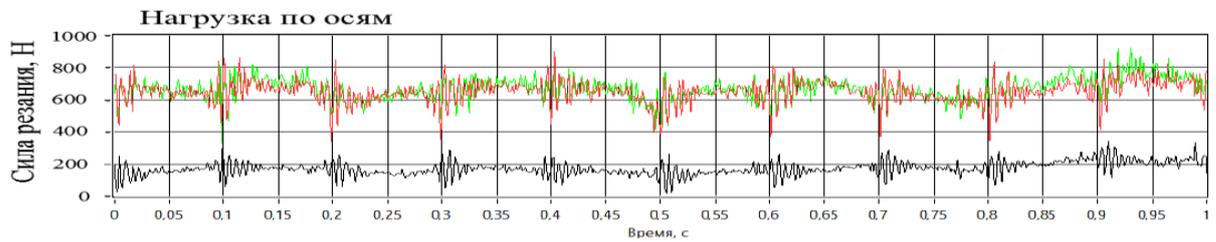


в

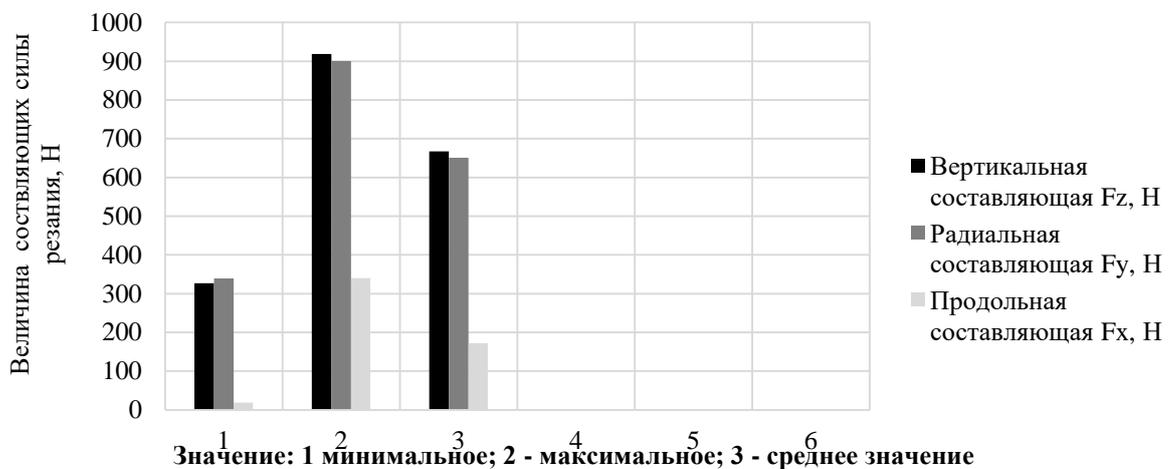


Рисунок 34 – Графическая иллюстрация результатов записи сил резания при обработке стали марки 13X15H5 АМ-3 трёхгранной сменной пластиной из ВК8: а – запись составляющих силы резания; б – номограммы соотношения составляющих силы резания; в – номограммы соотношения максимальных значений составляющих силы резания (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

а



б



в

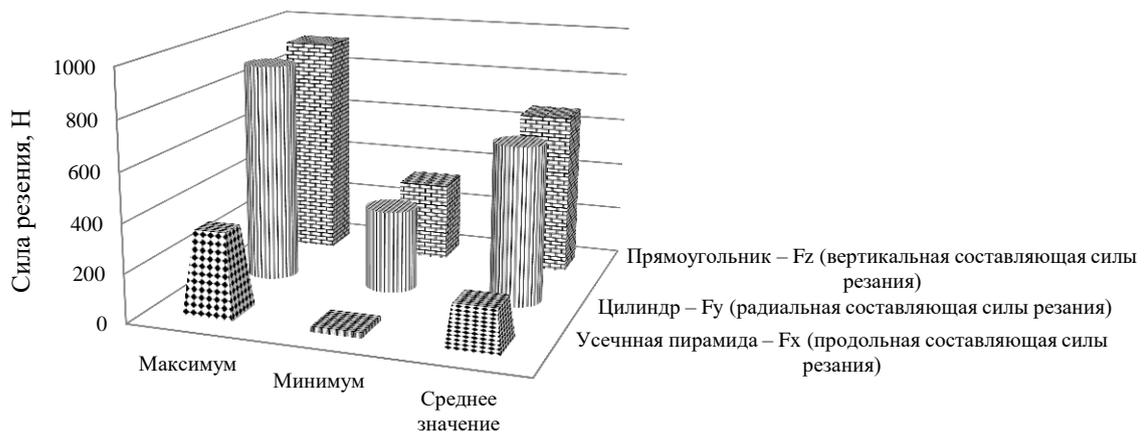


Рисунок 35. Графическая иллюстрация результатов измерения сил резания при обработке стали марки 13X15H5 АМ-3 пятигранной сменной пластиной из ВК8 (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

Из рисунков 32 – 35 видно существенное влияние свойств инструментального материала, геометрии (формы) режущей пластины на изменение сил резания. При точении стали 09X17H7Ю это влияние более

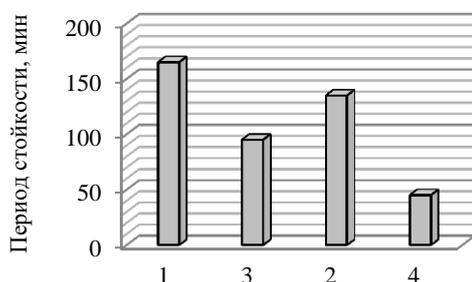
значительно из-за того, что свойства и характеристики стали 13X15P5 AM-3 значительно ниже (свойства стали 09X17H7Ю указаны ранее).

Значения величин сил резания являются важным показателем процессов, протекающих в зоне резания и на поверхности режущего инструмента. Но более важно выявить взаимосвязи между силами резания и периодом стойкости пластин. Такие взаимосвязи выявляли путем построения сравнительных диаграмм. По ним чётко установлен факт меньшего периода стойкости инструмента при большей силе резания и наоборот. Результаты определения периода стойкости инструментов (материала ВК8 с покрытиями) при обработке стали 09X17H7Ю показаны на рисунке 36.

Из рисунка 36 следует, что самый низкий период стойкости у материала ВК8 (позиция 4 на рис.36). Применение упрочняющих покрытий (позиции 2 и 3 на рис.36) существенно увеличивает период стойкости. На позиции 1 рисунка 36 показано, что применение покрытий не является единственной мерой повышения периода стойкости, т.е. могут быть применены и иные упрочняющие воздействия.

Исследовали работоспособность аналогичных импортных режущих пластин, в том числе «Korloy.Inc»(Корея), «Kennametal» (США). Пример оценки работоспособности импортной пластины показан на рисунке 37.

а)



б)



Рисунок 36 – Сравнительная оценка периода стойкости инструментальной основы (субстрата) марки ВК8 при разных приёмах (а) упрочнения; б – внешний вид режущей пластины, подвергнутой термозаточке и полированию: 1 – ВК8 подвергнутый термозаточке и полированию; 2 – ВК8 +Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм) [нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами]; 3 – ВК8 + Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (TiAl)N(2 мкм) + TiN(0,5 мкм)[нанесение слоёв покрытия

методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами]; 4 – инструментальный материал ВК8 в исходном состоянии

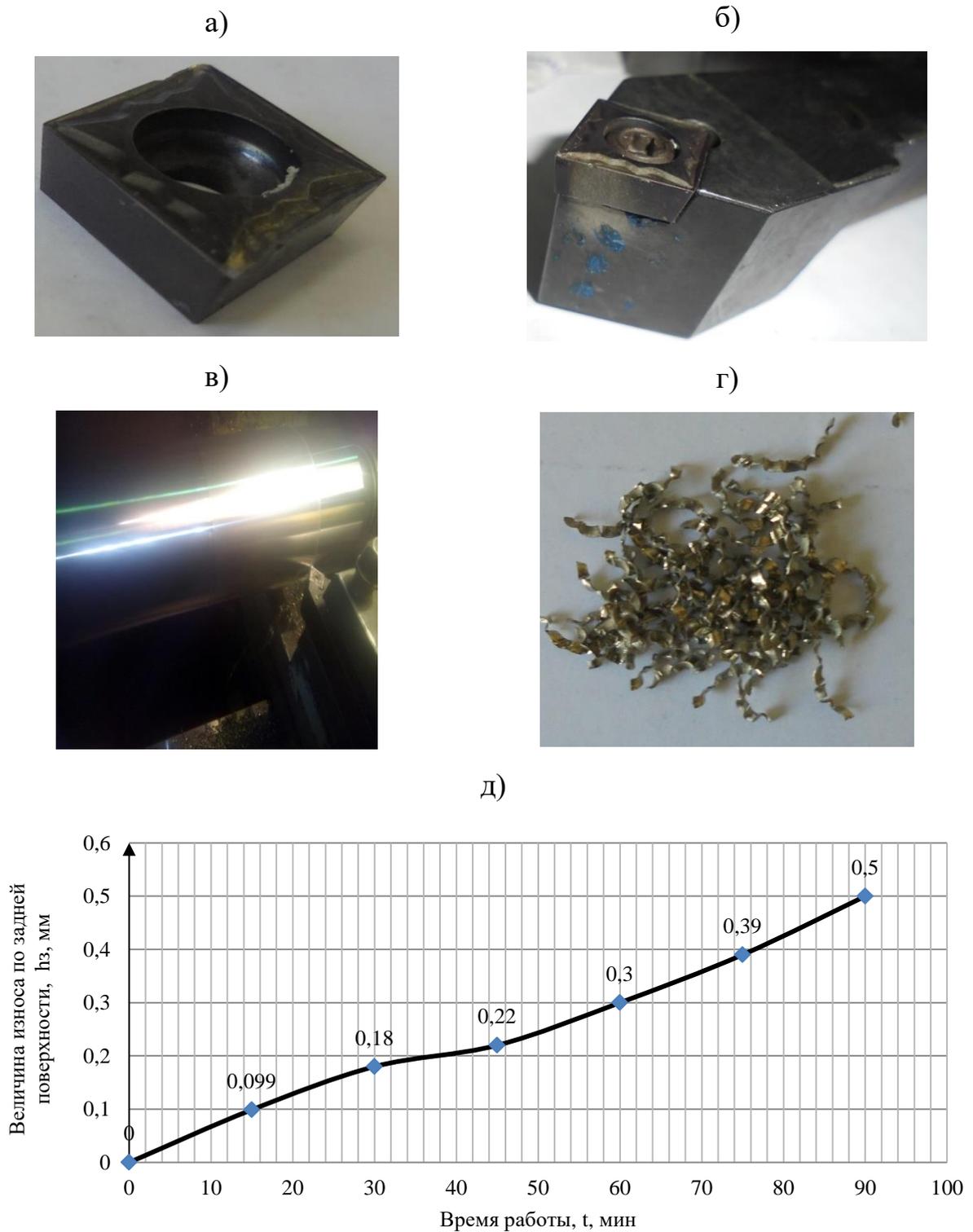


Рисунок 37 – Пример применения режущей пластины фирмы KORLOY. Inc: а – фото пластины; б – фото реза; в – фото зоны обработки; г – фото стружки; д – график зависимости износа h , от времени t работы инструмента (показан лучший из 20 режущих кромок результат 90 мин, среднее значение периода стойкости 30 минут,

разброс между режущими кромками пластин составлял до 20 минут и более)
(скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

Необходимо отметить факт хорошего (в пределах погрешности измерения) согласования результатов экспериментального исследования применения покрытий с результатами имитационного моделирования покрытий.

Изложенное выше позволяет сформулировать следующие выводы:

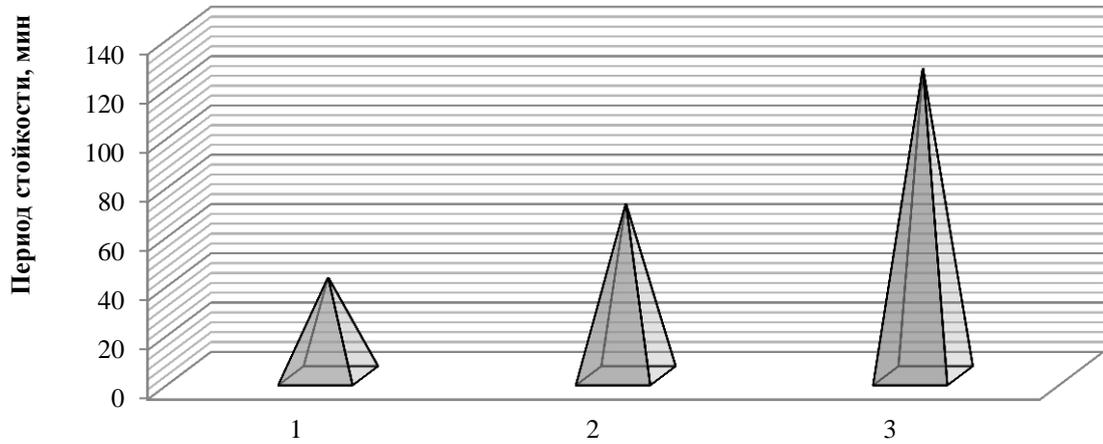
1. Нанесение покрытий уменьшают величину составляющих силы резания. Это ведет к снижению максимальных эквивалентных напряжений.

2. Более высокие контактные напряжения на передней поверхности характерные для покрытия TiN. Это покрытие в сравнении с многослойными покрытиями Ti+TiN+(TiAl)N и Ti+TiN+(TiAlCr)N приводит к приросту эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{эkv}}$ на 5 – 10%. Однако нанесение покрытия TiN уменьшает контактные напряжения на передней поверхности по сравнению с инструментом без покрытия на 8 – 12 % [(111, с.4), (112, с.6)].

3. Максимальное снижение контактных напряжений σ_z (до 15%) по сравнению с режущим инструментом без покрытия показало покрытие Ti+TiN+(TiAlCr)N.

На рисунке 38 показаны результаты оценки периода стойкости разных инструментальных материалов при равных условиях их эксплуатации при обработке стали 09X17H7Ю.

а)



б)

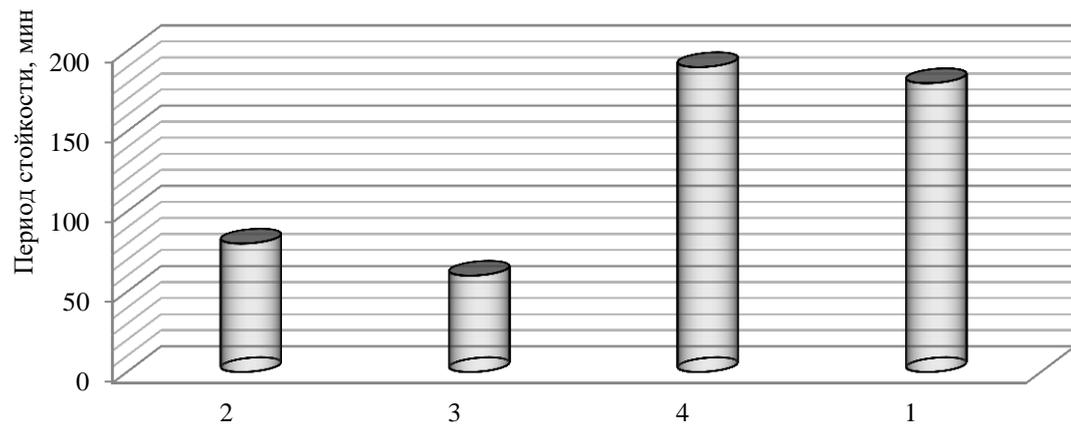


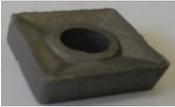
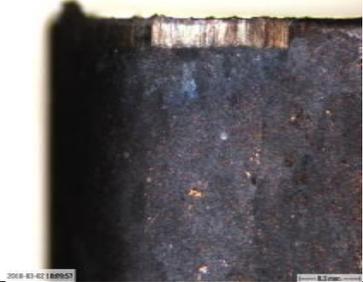
Рисунок 38. Примеры гистограмм: **а** – инструментальных материалов без покрытия (1 – VK8; 2 – T15K6; 3 – TT14K8B; **б** – инструментальных материалов с покрытиями (1 – VP1255 (мелкозернистая основа твёрдого сплава TT7K12(Co – до 12%, WC = 81 %; TiC = 4 %; TaC = 3 %) + трёхслойное покрытие (TiC - $TiCN$ - TiN), группа применения P15-P35); 2 – VK8 + покрытие №3; 3 – VK6M + покрытие TiN); 4 – материал MC2210 (материал основы MC221 + покрытие TiC, группа применения P10-P30) (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

В таблице 5 приведены отдельные результаты испытания режущих пластин при обработке стали 09X17H7Ю (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки).

В результате проведённых исследований сформулированы следующие выводы:

1. Несущественное различие в размерах и форме пластин средней размерности (диаметр описывающей окружности от 16,5 до 18 мм) влечёт за собой существенное различие в периоде стойкости и характере износа режущей пластины.

Таблица 5 – Сведения по отдельным используемым пластинам

Сведения о режущей пластине	Период стойкости, мин.	Характер износа по задней поверхности
<p>Квадратная пластина (диаметр описывающей окружности равен 17,5 мм) с центральным отверстием</p> 	45	
<p>Пятигранная пластина без стружкозавивающей канавки</p> 	100	
<p>Ромбическая пластина ССМТ 120404 – НМР KORLOY. Inc с двумя режущими кромками</p> 	90	
<p>Треугольная (с ломанными линиями сторон) пластина (диаметр описывающей окружности 21,5 мм)</p> 	17	

<p>Квадратная пластина двухсторонняя (диаметр описывающей окружности 21,5 мм)</p> 	65	
---	----	---

2. Для пластин большей размерности (диаметр описывающей окружности 21,5 мм) форма пластины существенно определяет её период стойкости, при этом предпочтительна четырёхгранная квадратная форма.

3. Для большинства типоразмера (квадратные пластины с диаметром описывающей окружности 17,5 мм) сменных режущих пластин применение отечественного твёрдого сплава марки ВК8 не решает проблему обеспечения работоспособности инструмента на уровне, необходимом для применения в станках с ЧПУ в связи с тем, что период стойкости таких пластин не достигает 60 мин и процесс стружкообразования при этом оставляет желать лучшего (т.е. формируется сливная стружка).

4. Применение функциональных покрытий на отечественный инструментальный твёрдый сплав марки ВК8 существенно изменяет результаты, а именно, период стойкости возрастает до 2 часов и существенно улучшает процесс стружкообразования.

4.3.3 Выбранный режущий инструмент и параметры режима резания им

Использованы типовые (ГОСТовские [(113 с.3), (114 с.2), 115 с.2), (116 с.4), (117 с.2), (118 с.4), (119 с.2), (120 с.3)]) сменные твёрдосплавные пластины с механическим креплением в корпусе резцов.

Общее представление об исследованных отдельных режущих инструментах даёт рисунок 39.



Рисунок 39 – Примеры режущих пластин и их расположение в токарном проходном резце (первые слева два фото – импортные пластины, остальные фото – отечественная типовая пластина)

Безусловно, испытаны и другие (трёзгранные, пятигранные) пластины, но основные результаты получены именно для типовых (третье слева фото на рисунке 40) квадратных пластин с отверстием.

Для стали 09Х17Н7Ю варьирование скорости резания более 50 – 60 м/мин не удавалось, происходило термо-механическое разрушение инструментального материала в области режущей кромки. При более низкой скорости резания варьирование осуществляли, но такие скорости считали не рациональными с позиций производительности обработки.

Глубину резания варьировали от 0,5 мм до 2,5 мм. Изменение глубины резания за пределами 2 мм влекло за собой ухудшение шероховатости обработанной поверхности.

Изменение величины продольной подачи варьировали значительно. С позиций качества обработанной поверхности преимущественно использовали подачу 0,21 мм/оборот заготовки в направлении от задней бабки к патрону.

4.4. Результаты экспериментальных исследований периода стойкости инструмента

Под периодом стойкости принято время работы инструмента до достижения некоторой величины износа. Через некоторые промежутки времени измеряли величину износа по задней грани. Для измерения использовали высокоточный мультисенсорный видеокамерный прибор

модели Micro Vu Sol 161, имеющий хорошую (фирмы Цейс) оптику с различными вариантами подсветки образца (увеличение от 20 до 600 раз), имеющий сопряжение с ПЭВМ при хорошем программном обеспечении, что позволяло производить не только точные линейные измерения величины износа, но дополнительно позволяло проводить ряд других измерений и автоматизированных вычислений. Например, определять объём изношенного материала, глубину микровыкрашиваний, определить высоту нароста на передней поверхности пластины, площадь и объём нароста, описать фигуру изношенного участка уравнением и т.д.

По результатам измерений износа строили графики зависимости величины износа от времени работы режущей пластины. По этим графикам проводили аппроксимирование и описание зависимостей уравнениями.

4.4.1 Результаты исследования периода стойкости при точении стали 09X17H7Ю

Примеры графиков, иллюстрирующих зависимость величины износа инструментального материала от времени его работы при точении стали 09X17H7Ю, приведены на рисунках 40 – 47.

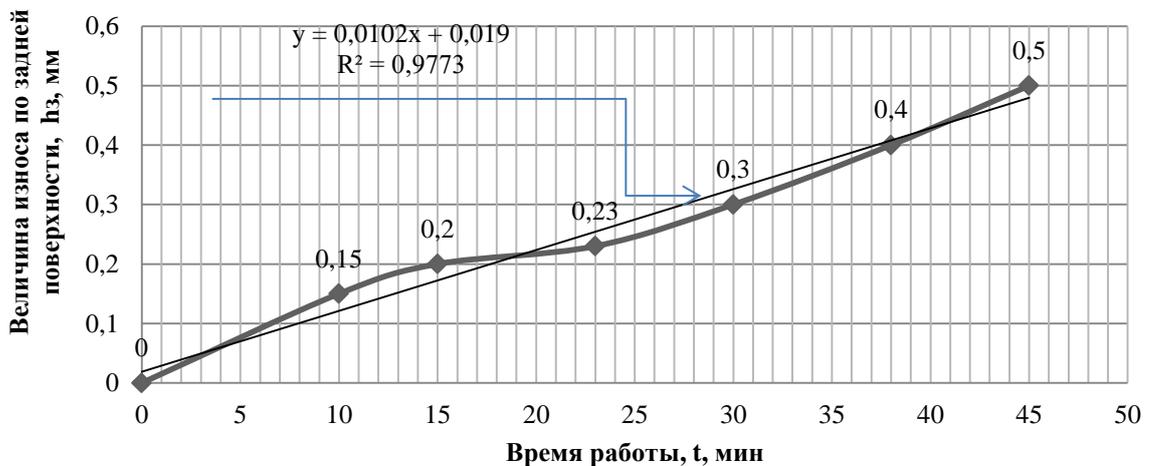


Рисунок 40 – Пример зависимости величины износа h_z от времени t работы твёрдосплавного (марка ВК8) инструмента (режим резания $v=55$ м/мин, $n=160$ об/мин, $s=0.21$ мм/об, $t=1$ мм)

На рисунке 40 жирной линией показан экспериментальный результат. Тонкой линией показан вариант замены (с достаточной вероятностью) экспериментальной линии прямой линией. В верхней левой части рисунка показано уравнение, описывающее эту прямую линию с дисперсией $R^2=0,9197$, что характеризует хороший результат замены экспериментальной линии прямолинейной линией.

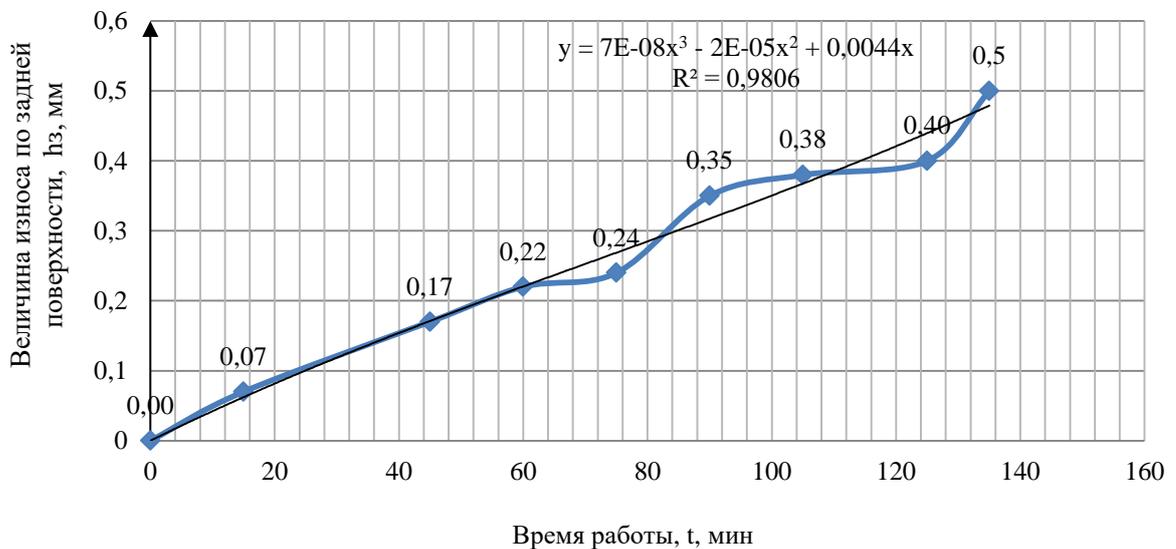


Рисунок 41 – График износа (по задней поверхности) сменной режущей пластины (материал ВК8 + Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм) [нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами]), типоразмер (диаметр описывающей окружности 17,5 мм), с отверстием, режущая кромка №1, скорость резания $v=55-50$ м/мин, число оборотов заготовки $n=160$ об/мин, величина продольной подачи $s=0.21$ мм/об, глубина резания $t=1$ мм, обрабатываемый материал: сталь марки 09Х17Н7Ю за 135 минут работы

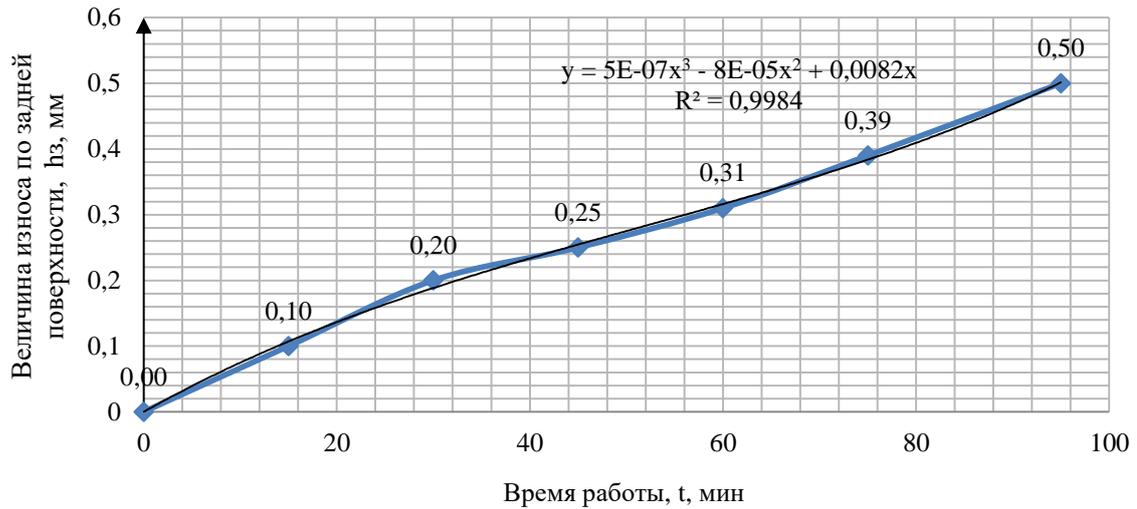


Рисунок 42 – График износа (по задней поверхности) сменной режущей пластины (материал ВК8 + Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (TiAl)N(2 мкм) + TiN(0,5 мкм)[нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировки (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами]), типоразмер (диаметр описывающей окружности 17,5 мм), с отверстием, режущая кромка №1, скорость резания $v=55-50$ м/мин, число оборотов заготовки $n=160$ об/мин, величина продольной подачи $s=0.21$ мм/об, глубина резания $t=1$ мм, обрабатываемый материал: сталь марки 09X17H7Ю)

В отдельных случаях экспериментальную линию тоже описывали уравнением. Но это оказалось весьма сложным. Даже регрессионные уравнения (полином 4 порядка) не всегда обеспечивали хорошее описание уравнением.

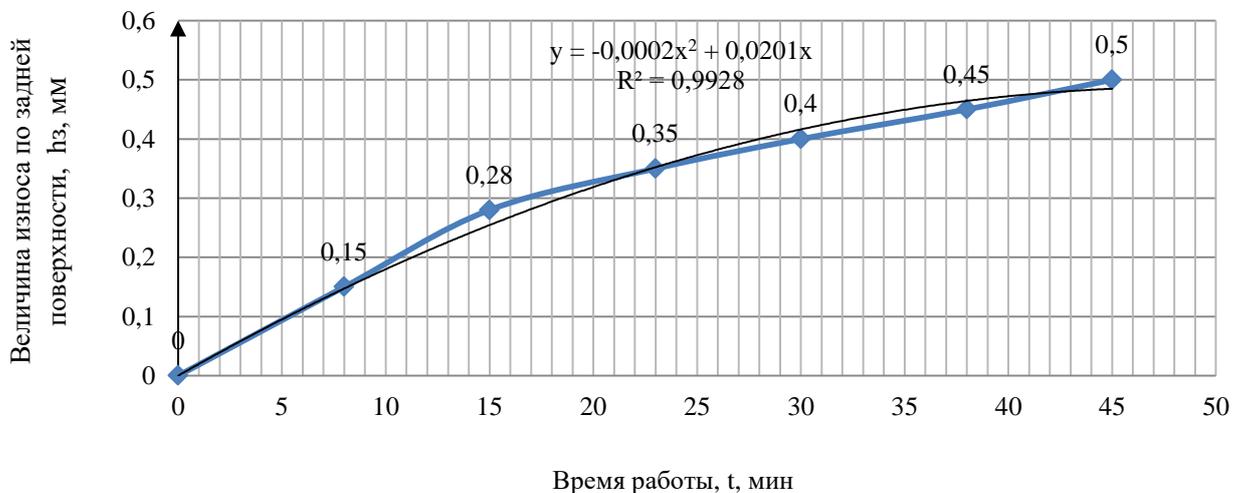


Рисунок 43 – График износа (по задней поверхности) сменной режущей пластины №2.1 (режущая кромка 3, материал ВК8 + Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (TiAl)N(2 мкм) +

TiN(0,5 мкм)[нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами]), типоразмер (диаметр описывающей окружности 17,5 мм), с отверстием, режущая кромка №1, скорость резания $v=55-50$ м/мин, число оборотов заготовки $n=160$ об/мин, величина продольной подачи $s=0.21$ мм/об, глубина резания $t=1$ мм, обрабатываемый материал: сталь марки 09X17H7Ю)

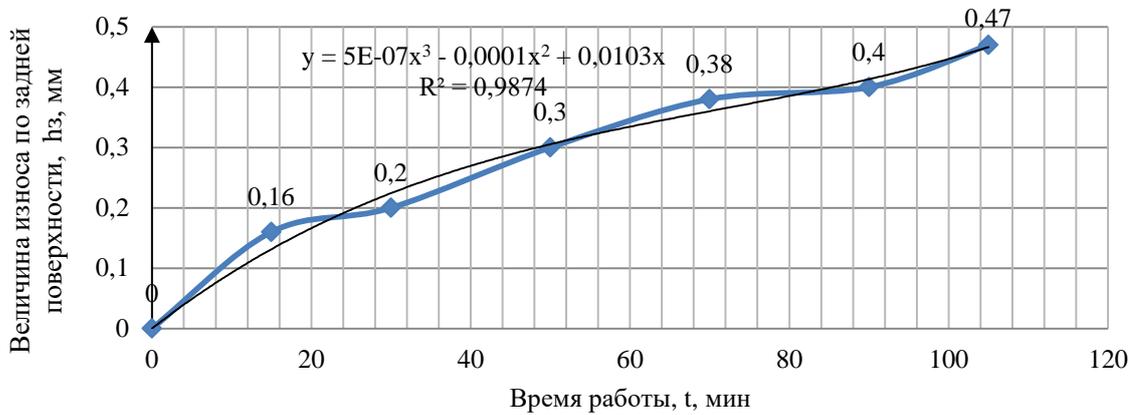


Рисунок 44 – График износа (по задней поверхности) сменной режущей пластины №5 (материал ВК8 в состоянии поставки, режущая кромка №1, скорость резания $v=55-50$ м/мин, число оборотов заготовки $n=160$ об/мин, величина продольной подачи $s=0.21$ мм/об, глубина резания $t=1$ мм, обрабатываемый материал: сталь марки 09X17H7Ю) за 90 минут работы

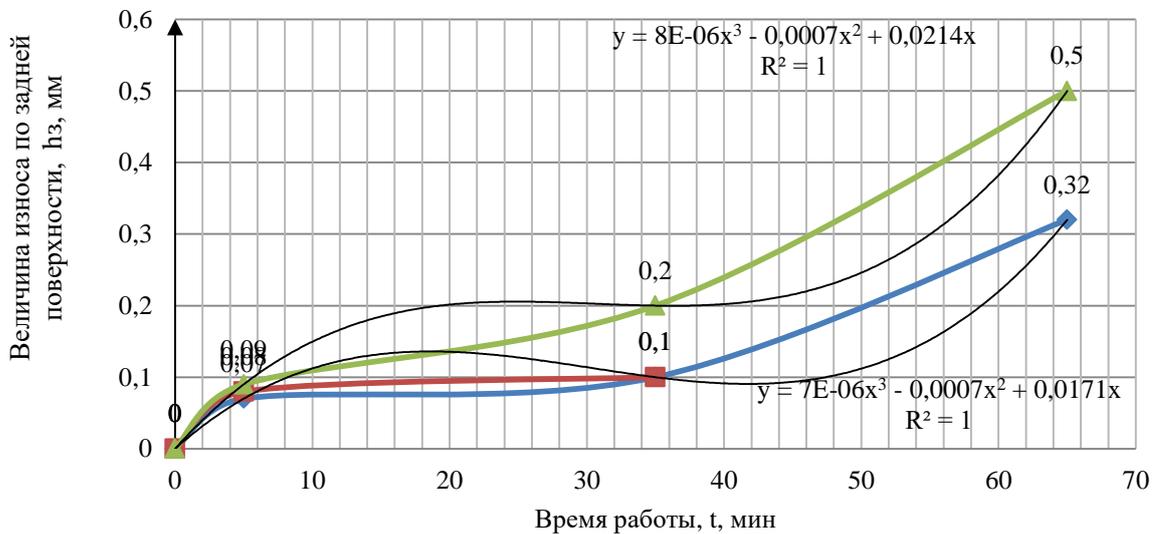


Рисунок 45 – График износа (по задней поверхности) сменной режущей пластины фирмы «Karloy» (скорость резания $v=55-50$ м/мин, число оборотов заготовки $n=160$ об/мин, величина продольной подачи $s=0.21$ мм/об, глубина резания $t=1$ мм, обрабатываемый материал: сталь марки 09X17H7Ю) за 65 минут работы

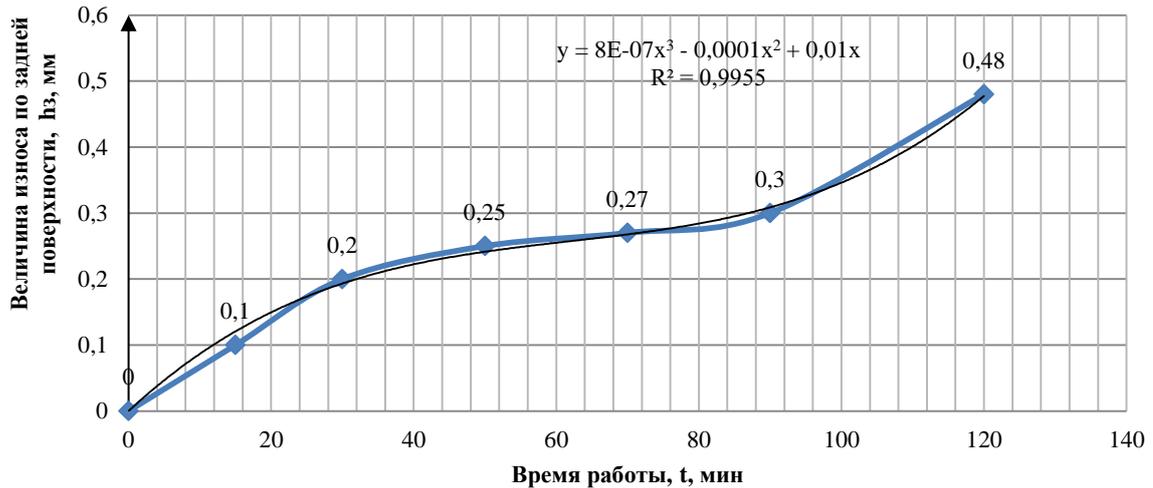


Рисунок 46. График износа (по задней поверхности) сменной режущей пластины №14 режущая кромка №1, (материал ВК8 + (AlCr)N(1,5 мкм) + (AlTi)N(2мкм) [нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы без ассистирования ускоренными ионами]), скорость резания $v=55-50$ м/мин, число оборотов заготовки $n=160$ об/мин, величина продольной подачи $s=0.21$ мм/об, глубина резания $t=1$ мм, обрабатываемый материал: сталь марки 09X17H7Ю) за 145 минут работы

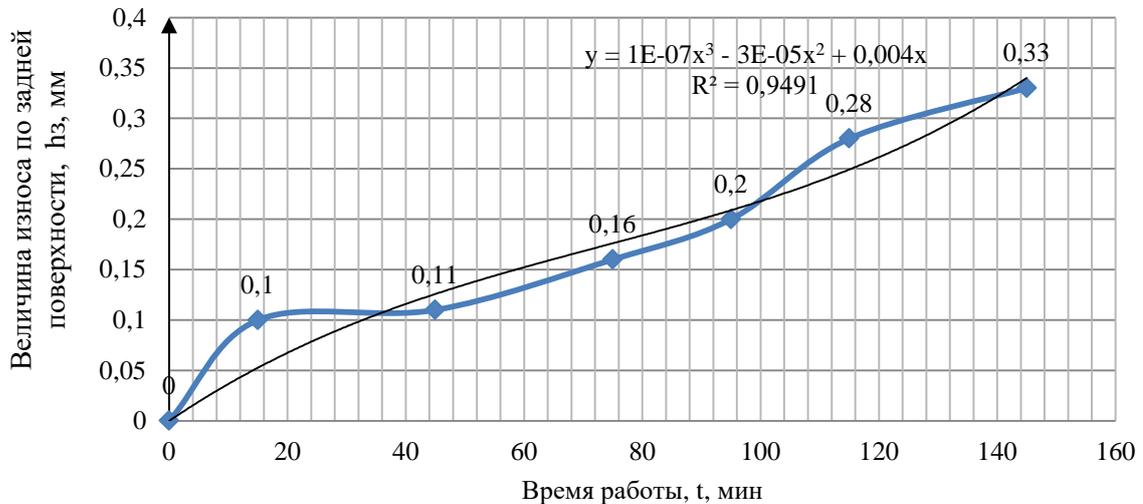


Рисунок 47. График износа (по задней поверхности) сменной режущей пластины №16 режущая кромка №1, материал ТТ14К8Б со своим специальным покрытием, скорость резания $v=55-50$ м/мин, число оборотов заготовки $n=160$ об/мин, величина продольной подачи $s=0.21$ мм/об, глубина резания $t=1$ мм, обрабатываемый материал: сталь марки 09X17H7Ю) за 145 минут работы

Примеры уравнений, описывающих зависимость износа от времени работы инструмента, приведены в таблице 6 (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки).

Таблица 6 – примеры уравнений, описывающих зависимость износа от времени работы инструмента (h_3 – величина износа, x – текущая величина времени работы) аппроксимирующие уравнения для ряда экспериментально испытанных пластин (с дисперсией R^2 , h_3 – величина износа, x – текущая величина времени работы пластины)

Условный номер пластины	Уравнение и его дисперсия R^2 (верхнее уравнение – с использованием натурального числа E , указывающего число нулей до первой значащей цифры, нижнее уравнение – типовая форма записей уравнений)
1	$h_3 = 0,00000007x^3 - 0,00002x^2 + 0,0044x \quad R^2 = 0,9806$
2	$h_3 = 0,000001x^3 - 0,0001x^2 + 0,005x \quad R^2 = 0,9973$
2.1	$h_3 = -0,0003x^2 + 0,0224x \quad R^2 = 1$
2.2	$h_3 = 0,0011x^2 - 0,0293x \quad R^2 = 1$
4	$h_3 = 0,00002x^3 - 0,0014x^2 + 0,0311x \quad R^2 = 1$
5 без покрытия	$h_3 = 0,0000007x^3 - 0,00009x^2 + 0,0098x \quad R^2 = 0,9835$

Продолжение таблицы 6

5.1с покрытием	$h_3 = 0,0000008x^3 - 0,0002x^2 + 0,143x \quad R^2 = 0,9963$
(спец. материал) 1-ая кромка	$h_3 = 0,000008x^3 - 0,0007x^2 + 0,0214x \quad R^2 = 1$
9 (спец. материал) 2-ая кромка	$h_3 = 0,000007x^3 - 0,0007x^2 + 0,0171x \quad R^2 = 1$
14	$h_3 = 0,000007x^2 + 0,0306x \quad R^2 = 1$
16	$h_3 = 0,0000008x^3 - 0,0001x^2 + 0,01x \quad R^2 = 0,9955$
18	$h_3 = 0,0000001x^3 - 0,00003x^2 + 0,004x \quad R^2 = 0,9491$
19	$h_3 = 0,0000001x^3 - 0,00003x^2 + 0,005x \quad R^2 = 0,978$
20 1-ая кромка	$h_3 = 0,0000008x^3 - 0,0001x^2 + 0,0084x \quad R^2 = 0,9998$
20 2-ая кромка	$h_3 = 0,000001x^3 - 0,0001x^2 + 0,0083x \quad R^2 = 0,999$
21 1-ая кромка	$h_3 = 0,00000004x^3 - 0,00001x^2 + 0,003x \quad R^2 = 0,9321$
21 2-ая кромка	$h_3 = -0,0011x^2 + 0,1167x \quad R^2 = 1$
22	$h_3 = -0,0004x^2 + 0,0188x \quad R^2 = 1$
23	$h_3 = 0,000004x^3 - 0,0003x^2 + 0,0111x \quad R^2 = 0,9905$

Калроу (Халтек)	$h_3 = 0,0000009x^3 - 0,0001x^2 + 0,0086x \quad R^2 = 1$
Изменить величину числа (количество знаков после запятой) перед временем x нельзя в силу того, что это влечёт за собой совершенно иной график износа.	

Данные уравнения позволяют прогнозировать ожидаемый период стойкости инструмента. Они могут быть положены в основу создания некоего банка уравнений, использование которого возможно при расчёте потребности в инструменте и при выборе инструментального материала под новые условия эксплуатации

4.4.2 Исследование совпадения прогнозируемого периода стойкости с фактическим периодом стойкости

Ранее в главе 3 на рисунке 22 показаны номограммы, характеризующие прогнозируемый период стойкости инструмента ВК8. Анализ этого рисунка позволяет сделать следующий вывод: Минимальную стойкость инструментальный твёрдый сплав марки ВК8 имеет при точении стали 09Х17Н7Ю. Максимальную – при точении стали 13Х15Н5 АМ-3. При обработке стали 12Х18Н10Т стойкость выше в 2 раза, чем при обработке 09Х17Н7Ю, и в 2,6 раза выше при обработке стали 13Х15Н5 АМ-3.

На рисунке 48 приведены аналогичные номограммы для разных инструментов.

Анализ номограмм, подобных приведённой на рисунке 49, позволил сделать следующие выводы:

1. В сравнении с инструментом ВК8 период стойкости инструментов с покрытием возрос.

2. Для покрытия Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм) [нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами] минимальная стойкость имела место при точении стали

09X17H7Ю, максимальная – при 13X15H5 AM-3. Различие составило 30 минут.

3. Для покрытия Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (TiAl)N(2 мкм) + TiN(0,5 мкм)[нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами], минимальная стойкость составила 95 минут при точении стали 09X17H7Ю, максимальная – при 13X15H5 AM-3. Различие составило 45 минут.

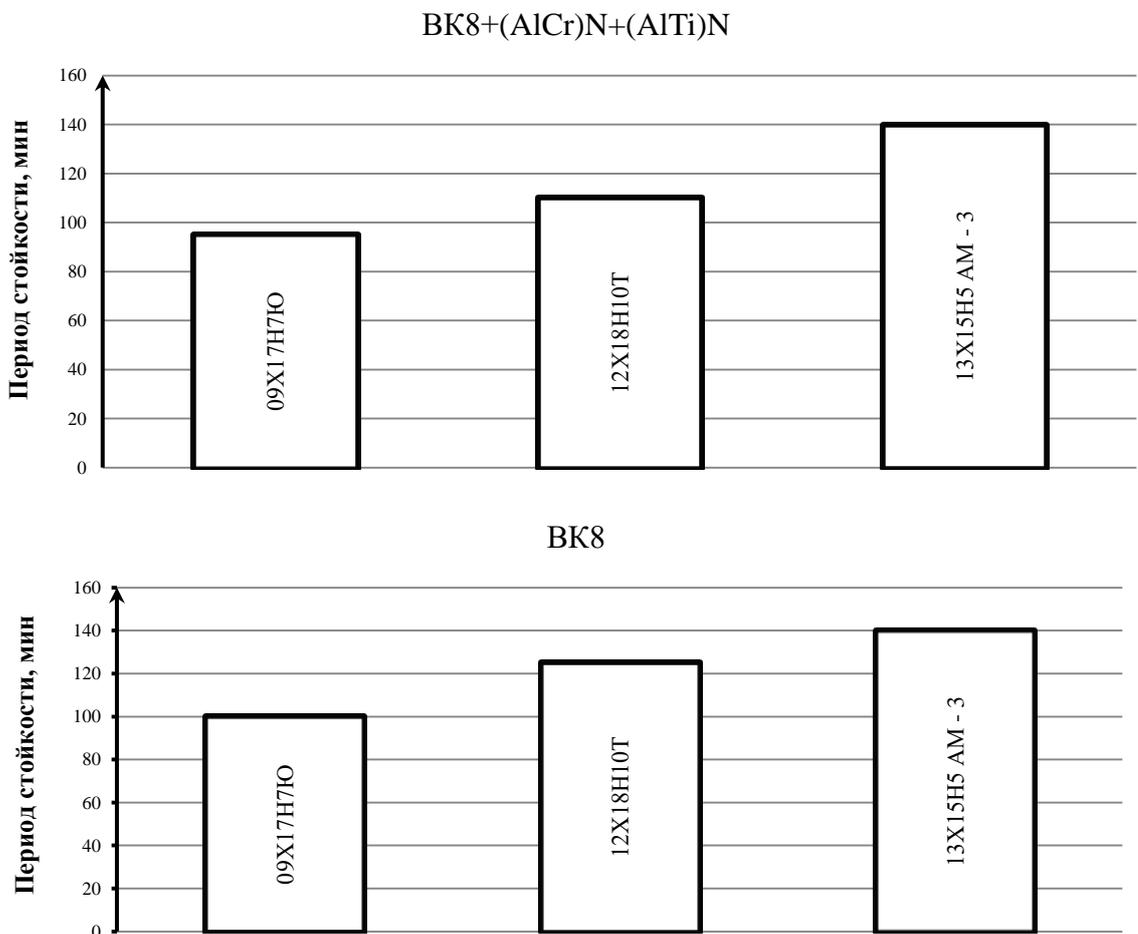


Рисунок 48 – Номограммы, характеризующие период стойкости разных

инструментальных материалов при токарной обработке разных нержавеющей сталей (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

4. В целом покрытие Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм) [нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами] с позиции стойкости более рационально, чем покрытие Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм) [нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами]].

На рисунке 49 приведены фактические результаты периода стойкости инструмента при натурном точении. На нём показан график прироста величины износа за время инструмента ВК8 до достижения допустимой величины износа 0,5 мм при точении разных сталей. Эта величина 0,5 мм общепринята применительно к черновой обработке заготовок.

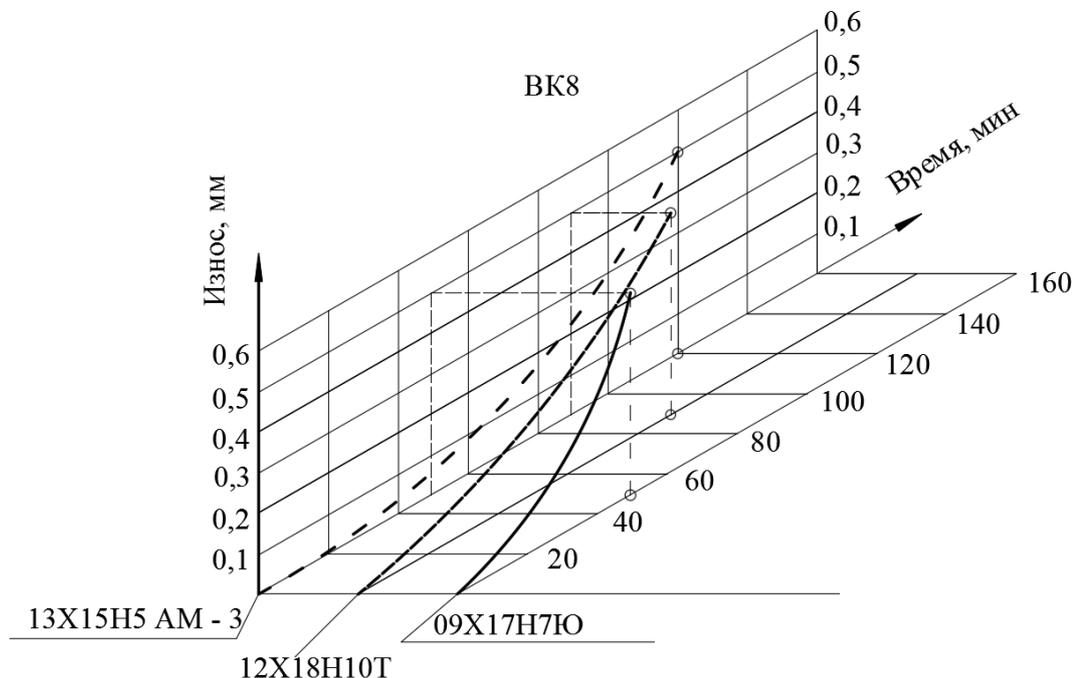


Рисунок 49 – График различия времён работы инструмента ВК8 до износа 0,5 мм при обработке разных сталей (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

Рисунок позволяет сделать следующие выводы:

1. Для обработки всех сталей износ прирастает линейно без экстремумов. Это свидетельствует о нормальных параметрах режима резания.

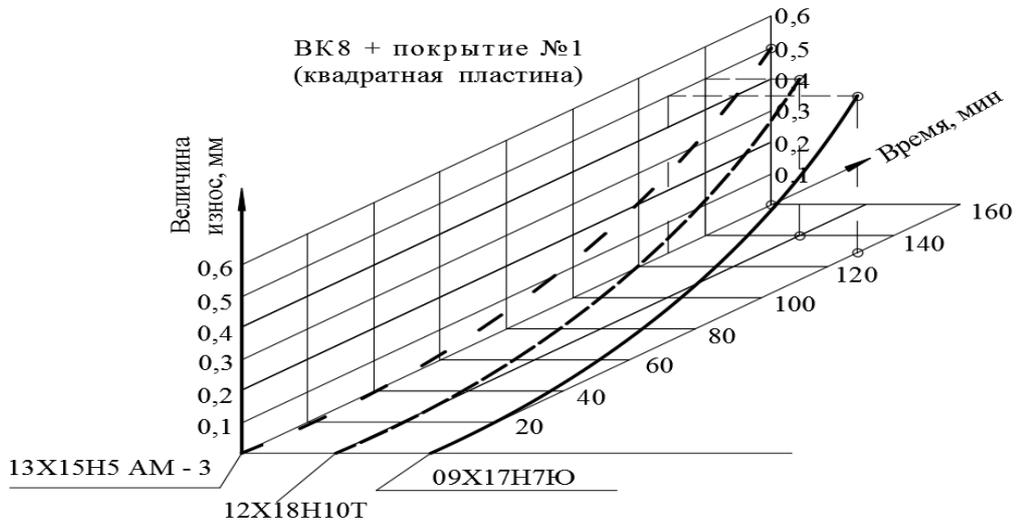
2. Минимальный период стойкости выявлен при точении стали 09X17H7Ю, максимальный – при 13X15H5 АМ-3.

На рисунке 50 для этой же пластины показан график для инструментального материала ВК8 + Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм) [нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами]) и для инструментального материала ВК8 + Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (TiAl)N(2 мкм) + TiN(0,5 мкм)[нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами]).

Рисунок позволяет сделать вывод о том, что оба инструментальных материала показали нормальный характер (без экстремумов) прироста износа, их период стойкости сопоставим между собой, но время работы инструмента ВК8 + Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм) [нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами]) на 20 минут больше, чем у инструмента ВК8 + Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (TiAl)N(2 мкм) + TiN(0,5 мкм)[нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами]).

На основе анализа приведённых выше результатов исследования стойкости инструментов при обработке разных (09X17H7Ю, 12X18H10Т и 13X15H5 АМ-3, для всех них были построены графики износа, подобные приведённым на рисунках 40 – 44, нержавеющей сталей сделан вывод о том, что особые сложности в обработке представляет сталь 09X17H7Ю.

Предположено, что если для её обработки сможем разработать эффективные инструментальные материалы, то они же могут оказаться эффективными и при обработке сталей 12X18H10T и 13X15H5 AM-3. Так оно и оказалось при экспериментальном течении. Поэтому далее основной акцент в работе сделан на исследование особенностей обработки стали 09X17H7Ю.



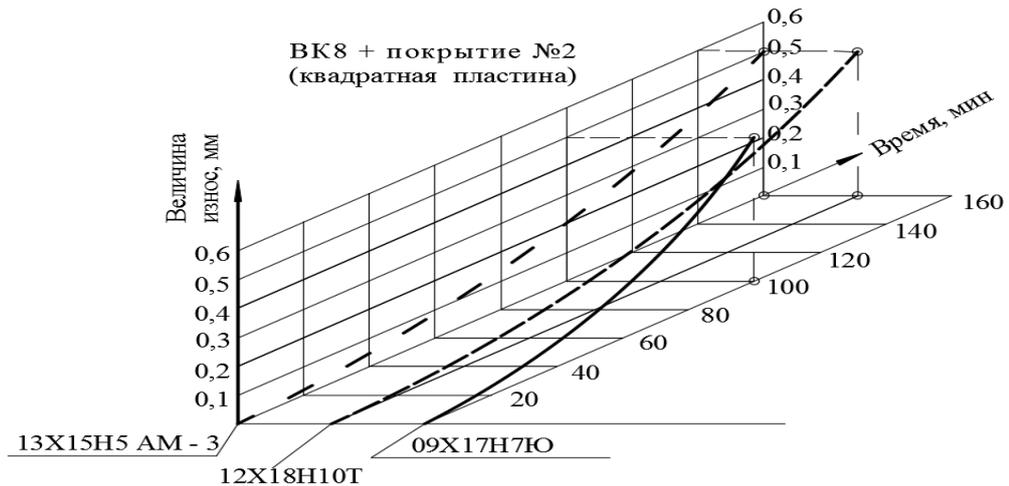


Рисунок 50 – Время работы инструментов материалов при обработке разных сталей до износа 0,5 мм: **а** – инструмент ВК8 + Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (NbZrTiAl)N(2,5 мкм) [нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами]; **б** – инструмент ВК8 + Ti(до 1мкм) + TiN(1мкм) + (TiAl)N(2 мкм) + TiN(0,5 мкм) [нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ) с фильтрацией капельной фазы и при ассистировании ускоренными ионами] (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

Анализ приведённых результатов исследования позволил сформулировать следующие промежуточные выводы:

1. Изложенные выше результаты указывают, что цель диссертационной работы достигнута и решены задачи по её достижению.

2. Разработаны новые инструменты (ВК8 + покрытие) для точения специализированных труднообрабатываемых нержавеющей сталей марок 09X17H7Ю, 12X18H10T, 13X15H5 AM-3. Они позволяют повысить период стойкости инструмент в 2 и более раз по сравнению с ВК8 без покрытия. Спроектирована архитектура более 30 покрытий. Часть из них нами не реализована из-за отсутствия технических возможностей. Из числа изготовленных сменных твёрдосплавных пластин отобрано 10-ть инструментов с различными покрытиями, от простейшего однослойного до многослойных наноструктурированных. В порядке убывания по периоду стойкости они по результатам эксплуатационных испытаний расположены следующим образом:

- ВК8+TiCN(5мкм) + (TiAl)N(3мкм) + Al₂O₃(5мкм) + TiC(5мкм);

- BK8+Al₂O₃(2мкм) + (Ti)CN(5мкм) + (TiAl)N(3мкм) + TiN(3мкм);
- BK8 + (TiAl)N(3мкм) + Al₂O₃(3мкм) + (TiAl)N(3мкм) + Al₂O₃(3мкм);
- BK8 + TiN(3мкм) + TiC(3мкм) + TiN(3мкм) + TiC(3мкм);
- BK8+TiC(3мкм) + TiN(3мкм) + (TiAl)N(2мкм);
- BK8 + TiCN(2мкм) + TiC(3мкм) + TiN(1,5мкм);
- BK8 + TiC(1,5 мкм) + TiN(3мкм);
- BK8 + TiN(2мкм) + TiC(5мкм)
- BK8 + TiCN(0,5мкм) + TiN(1мкм);
- BK8 + TiN(0,5мкм) + TiC(1мкм).

3. Указанная последовательность расположения инструментов по периоду их стойкости получена, в том числе, и по результатам имитационного моделирования. Такая совпадаемость полученных результатов позволяет заключить, что используемые при имитационном моделировании последовательность (методика) действий, выбранные критерии и верно выбраны их параметры. Установлено, что достаточно в качестве критериев использовать «температуру в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «деформацию +/- точение указанных сталей разработанными инструментами.

Однако, наряду с полученными выводами, в диссертации сочтено необходимым:

а) выполнить отдельные материаловедческие исследования разработанных покрытий (чтобы убедиться, что полученная при нанесении покрытий архитектура покрытий именно такая, какая получена при имитационном моделировании);

б) выполнить оценку качества поверхности, обработанной инструментами с разными покрытиями (чтобы убедиться, не ухудшилось ли качество обработанной поверхности по параметрам её шероховатости).

В Приложении 2 приведены результаты принятия разработанных в диссертации рекомендаций в производство.

В Приложении 3 приведены результаты внедрения разработок в учебный процесс.

4.5. Результаты материаловедческого исследования инструментов

Для исследования разработанного инструмента и слоёв его покрытия выполняли отдельные материаловедческие исследования.

Так, например, на рисунке 51 показано фото разрушения (ступенчатого скола по хрупко-пластическому механизму разрушения) основы инструментального материала.

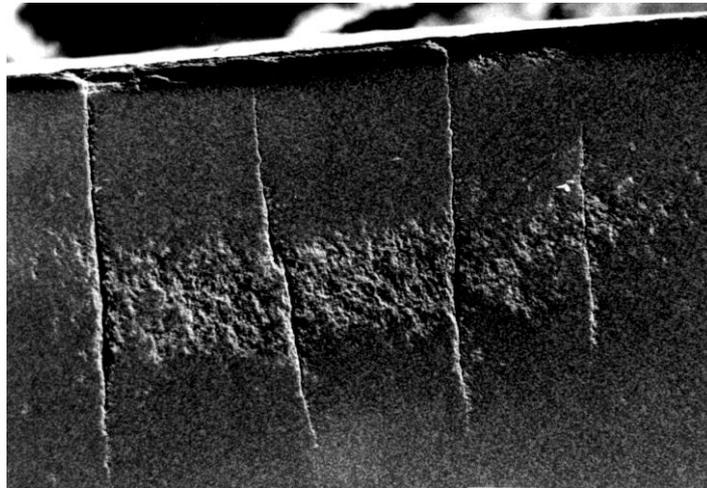
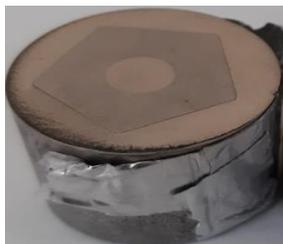


Рисунок 51 – Иллюстрация ступенчатого характера разрушения твёрдосплавной сменной режущей пластины ВК8

На рисунке 52 показан пример образцов для материаловедческих исследований.



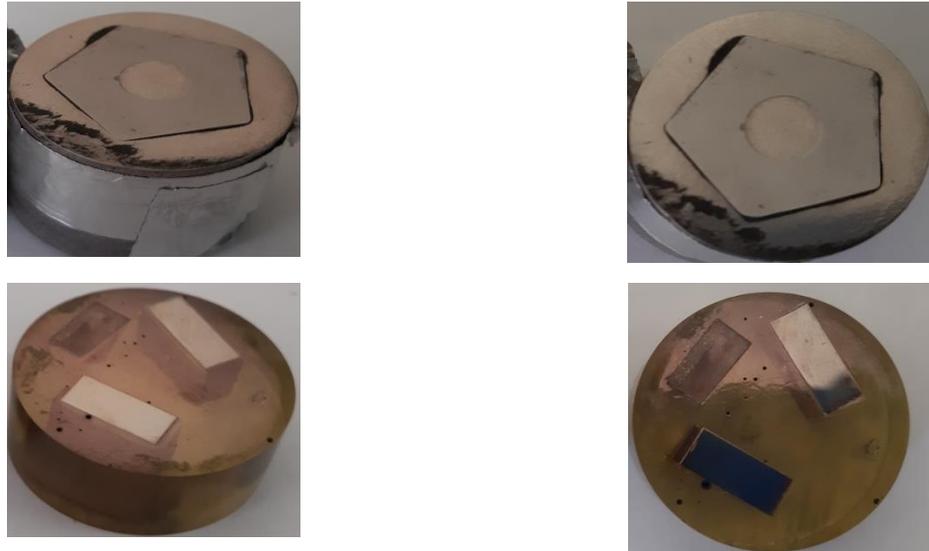


Рисунок 52 – Примеры образцов режущих пластин, подготовленных к исследованию архитектуры нанесённых покрытий

Примеры исследования инструмента на электронных микроскопах приведены ниже. Целью таких исследований являлось изучение архитектуры (количества слоёв, толщины слоёв, состав слоёв и т.д.) инструментального материала на предмет соответствия тому, который был спроектирован при имитационном моделировании.

На рисунке 53 показано электронное фото (режимы работы электронного микроскопа и величина увеличения указаны под фотографией) шлифа инструментального материала с однослойным покрытием.

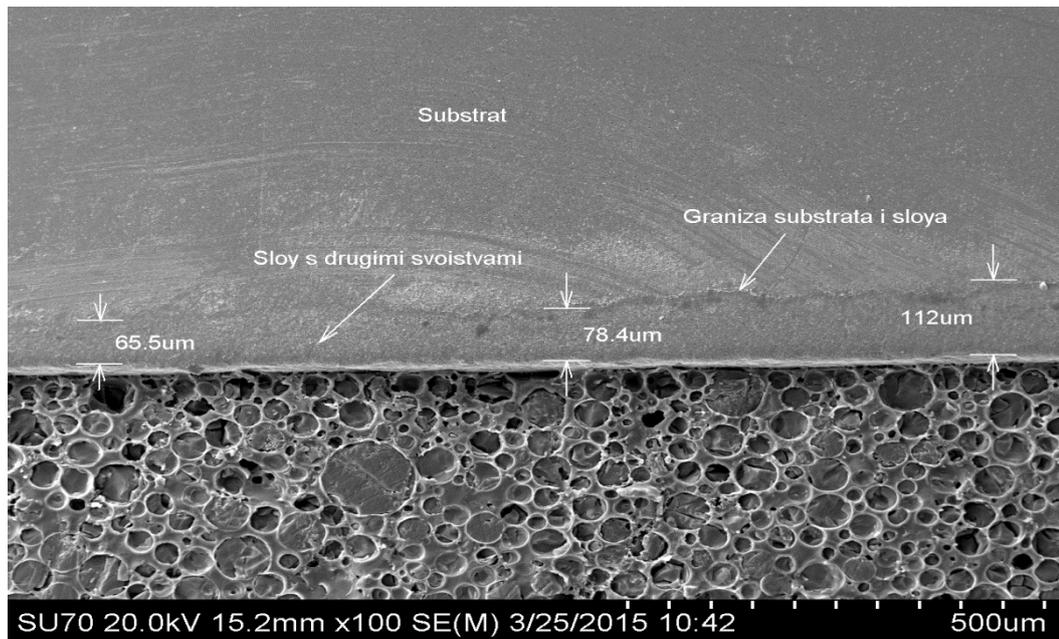


Рисунок 53 – Пример результатов исследования инструментального материала ВК8 + TiN (образец изготовлен со значительной (от 65,5 мкм до 12 мкм) толщиной слоя покрытия)

Поясним рисунок. В самой нижней части рисунка 53 приведена строкой (на чёрном фоне) информация о параметрах исследования. Выше этой строки в кадре поместился участок материала (твердеющее вещество в виде сфер), в котором был залит образец инструментального материала. Выше этого участка изображён слой покрытия и затем (выше) материал субстрата (основы). Недостаточно чёткое изображение объясняется тем, что образец не подвергали травлению. Размерными линиями на фото показано, что толщина слоя покрытия TiN изменяется в пределах от 65,5 мкм до 112 мкм. Выше покрытия просматривается граница раздела между покрытием и субстратом (ВК8).

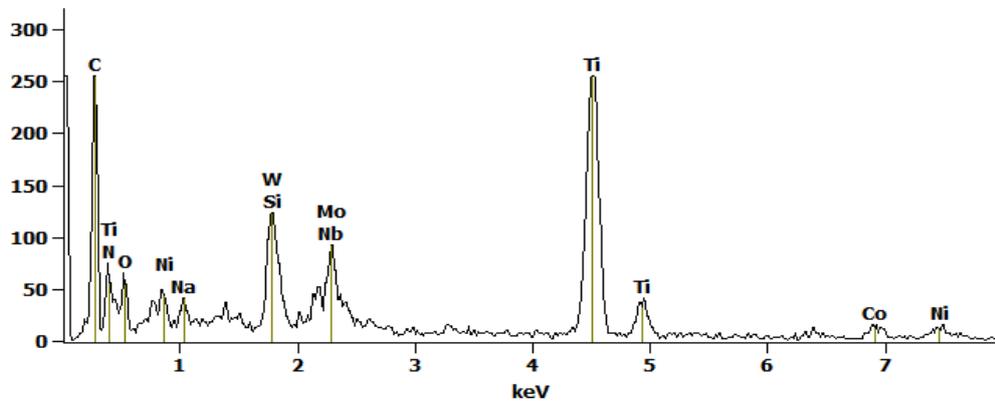
На рисунке 54 показано фото многослойного инструментального материала. В его нижней части рисунка 54а расположен участок субстрата (основы). В самой верхней части – участок материала (твердеющее вещество в виде сфер), в котором был залит образец инструментального материала. Субстратом является твёрдый сплав группы ТК.



Б

Full scale counts: 255

kvadrat skol(1)_pt1



В

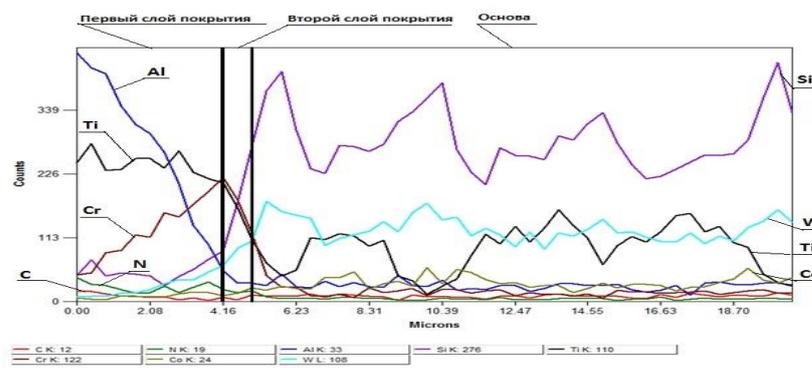


Рисунок 54 – Пример результатов исследования двухслойного покрытия инструментального материала: **а** – структура; **б** – химический состав; **в** – распределение элементов по линии сканирования

Первый слой покрытия толщиной 4,17 мкм выполнен из карбонитрида алюминия, титана и хрома (AlTiCr)CN, второй слой толщиной 1,39 мкм выполнен из нитрида кремния (борида кремния), титана, хрома и вольфрама (SiTiCrW)N.

На рисунке 55б показано наличие химических элементов (взят участок на границе раздела между покрытием и субстратом). По характерным пикам на этом рисунке сделан вывод о долевого наличии химических элементов на этом участке.

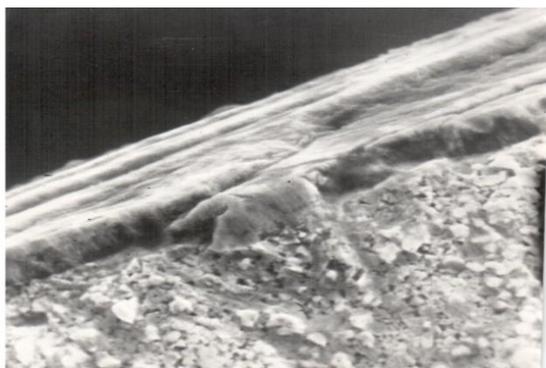
С помощью аналогичных металловедческих исследований установлено, что архитектура покрытия соответствует той, которая была спроектирована при имитационном моделировании.

В диссертации не исследованы механизмы разрушения разработанных покрытий. Такая задача не ставилась. Но при анализе причин различного периода стойкости инструмента с разными покрытиями учитывались особенности их разрушения. Для этого использовались схемы и фоторафии, заимствованные из совместных работ Мокрицкого Б.Я. и Кабалдина Ю.Г. Отдельные их примеры приведены на рисунке 55.

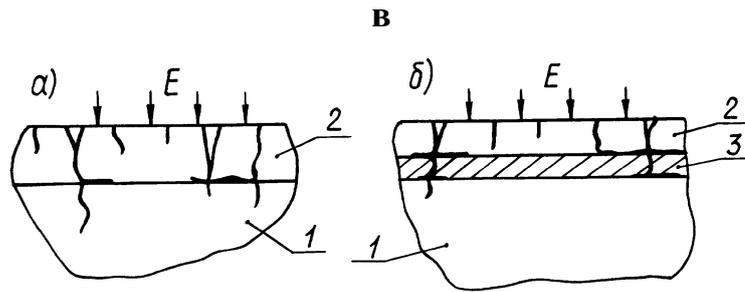
4.6. Результаты исследования качества обработанной поверхности

Исследованием причин образования волнистости и шероховатости на обрабатываемых поверхностях деталей, управления ими занимаются многие исследователи [(121 с.57), (122 с.19), (123 с.106), (124 с.19), (125 с. 24), (126 с.32), (127 с.210), (128 с.17), (129 с.3), (130 с.107)]. Полученные ими результаты учтены в нашем исследовании изложенном ниже.

а

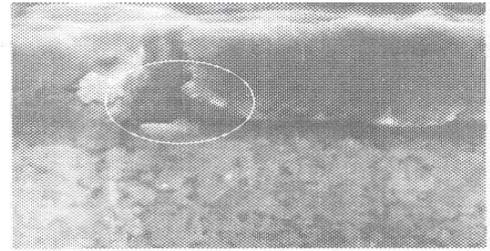
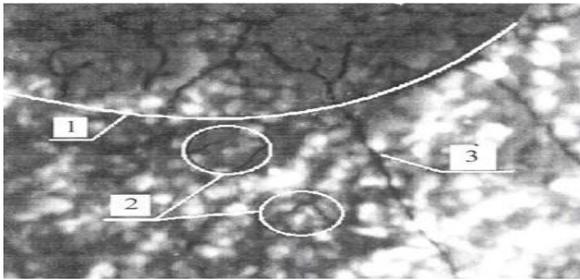


б



Г

Д



е

ж

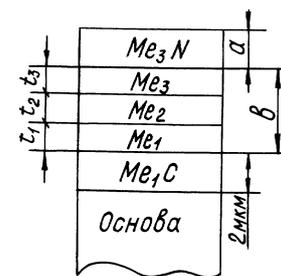
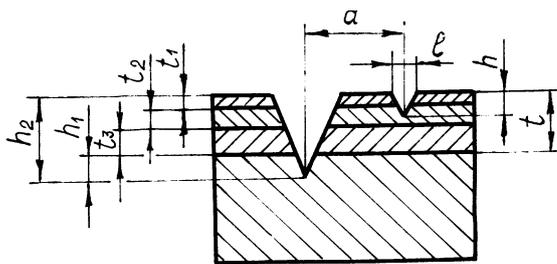


Рисунок 55 – Примеры фотографий и схем (заимствованы из диссертации Мокрицкого Б.Я. с его согласия) разрушения инструментальных материалов: **а** – твёрдый сплав (внизу) с разрушающимся покрытием (вверху); **б** – пример прорастания трещин из покрытия в твёрдый сплав; **в** – схемы торможения трещин на границах раздела сред; **г** – пример образования сетки микротрещин в покрытии; **д** – пример разветвления трещины на «мягком» (металлическом) слое покрытия; **е** – пример получения образцов для исследования толщин покрытий путём их скрайбирования (царапания индентором микротвёрдомера модели ПМТ – 3); **ж** – один из вариантов архитектуры покрытия

4.6.1 Описание стенда и результаты контроля шероховатости обработанной поверхности

4.6.1.1 Общие положения

Для оценки влияния свойств и геометрии режущих пластин на параметры шероховатости обработанной поверхности исследования выполнены с измерением на токарном станке сразу же после обработки участка поверхности на заготовке детали и вне станка. Это не являлось дублированием. Объясняется тем, что на станке и вне станка применялся один и тот же прибор модели TR200, но на станке ещё приходилось использовать дополнительное устройство для размещения и позиционирования щупа прибора в виде стойки модели ТА-620.

Устройство измерительного стенда показано на рисунке 56. Измерение шероховатости вне станка осуществлялось при расположении прибора на обработанной поверхности заготовки.

В зависимости от стоящих задач в мировой практике используют от двух до 30 параметров. Наиболее известны из них Ra и Rz. Из всех параметров шероховатости нами учитывались далее только шесть. Остальные в нашем случае не играли существенной роли.

а



б



Рисунок 56 – Иллюстрация измерений шероховатости на станке: **а** – расположение измерительного устройства на стойке; **б** – этап подвода щупа измерительной головки к заготовке

4.6.1.2 Диагностика технологической системы резания по параметрам шероховатости

Параметры обработанной поверхности являются результатом комплекса взаимосвязанных процессов, протекающих в технологической системе резания [(131 с.56, (132 с.), (132 с.79)]. Под технологической системой резания условимся здесь понимать систему «станок-приспособление-инструмент-деталь». При хорошо настроенных входных параметрах этой системы изменение состояния любого из её компонентов вызывает

изменение выходных параметров. Из большого числа выходных параметров здесь рассмотрена только шероховатость поверхности.

Известна зависимость шероховатости поверхности от ряда параметров процесса резания. Но это выполнено для обработки простых конструкционных материалов применительно к машиностроительным предприятиям, где не требуется высокой точности обработки. При обработке более сложных конструкционных материалов эти взаимосвязи не определены.

Возникла необходимость [133 с.22] исследования параметров шероховатости применительно к токарной обработке специализированной высоко коррозионностойкой труднообрабатываемой нержавеющей стали марки 09X17H7Ю. Необходимость исследования вызвана тем, что имевшиеся ранее рекомендации по её обработке устарели по ряду причин. Требуется разработка новых рекомендаций по параметрам режима резания, по материалам и геометрии режущего инструмента в связи с тем, что область применения этой стали стремительно расширяется.

Целью данного раздела диссертации является:

- а) разработка методики диагностирования системы резания по параметрам шероховатости;
- б) настройка элементов системы резания на получение необходимых параметров шероховатости обработанной поверхности;
- в) прогнозное проектирование металлорежущего инструмента и инструментального материала, обеспечивающих требуемые параметры шероховатости при новых условиях эксплуатации.

Из всех параметров шероховатости здесь учтено только шесть. Примеры пояснения того, какие параметры выбраны, приведены ниже на рисунках 57, 58. Из этого ясно, почему использованы именно они.

На рисунке 57 показан пример определения среднего арифметического отклонения профиля R_a и формула для его расчёта. Под R_a принято

понимать среднее арифметическое абсолютных значений отклонения профиля Y_i от средней линии в пределах длины оценки.

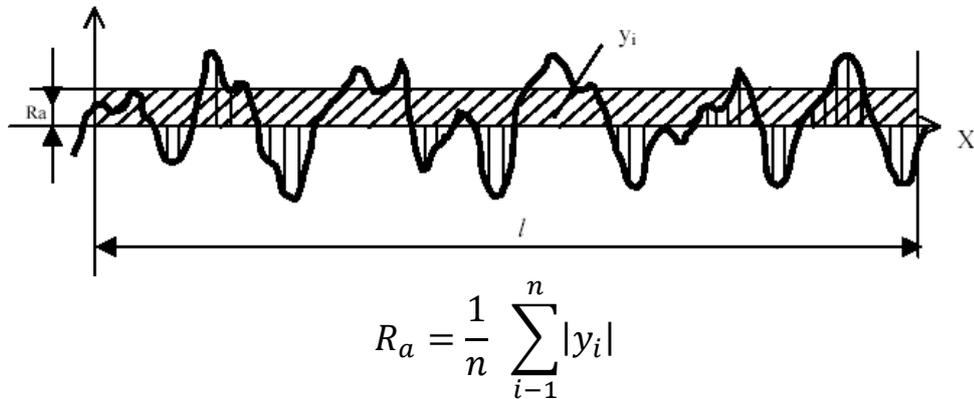


Рисунок 57 – Иллюстрация (заимствована из ГОСТ) определения R_a

На рисунке 58 показан пример определения параметра R_z шероховатости, называемого высотой неровностей профиля по десяти точкам. Под R_z понимают среднее от суммы высот пяти наибольших выступов профиля и глубины наибольших впадин профиля в пределах длины оценки.

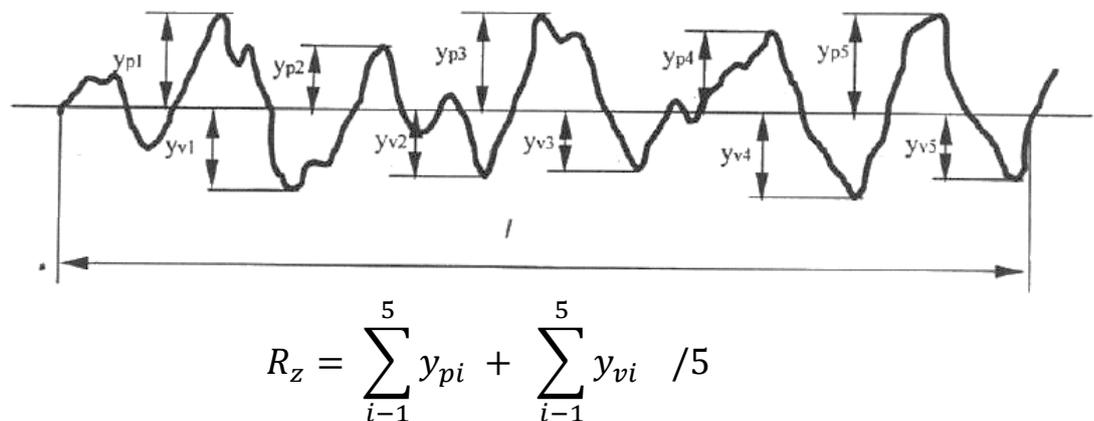


Рисунок 58 – Иллюстрация (заимствована из ГОСТ) определения R_z

Параметры R_a и R_z характеризуют только общее представление о шероховатости поверхности. Но никак не характеризуют представление об иных, не менее важных в ряде случаев, например таких, как герметичность соединения, самоцентрирование соединения, зеркальность поверхности, предотвращение от самооткручивания соединения при вибрациях и т.д.

Соответствующим образом определены значения наибольшей высоты профиля R_y (ISO), общая высота неровностей R_t , высота наибольшего выступа профиля R_p , высота неровностей по трём максимальным значениям R_{3z} . Графическая и формульная иллюстрация их не приводится здесь.

Таблица 7 – Соотношение параметров шероховатости для разных инструментальных материалов и режущих пластин

Сведения о материале и геометрии сменной режущей пластины	Параметры шероховатости и её величины, мкм	
	Параметры шероховатости	величины
MC2210 	R_a	5,030
	R_q	5,806
	R_z	21,31
	R_t	28,87
	R_p	11,14
	R_{3z}	10,17
ВП1255 (мелкозернистая основа твёрдого сплава ТТ7К12 (Со	R_a	6,204
	R_q	7,070
	R_z	24,06
– до 12%, WC= 81 %; TiC= 4 %; TaC= 3 %) + трёхслойное покрытие (TiC-TiCN-TiN) 	R_t	28,05
	R_p	12,03
	R_{3z}	12,02
5-ти гранная пластина, материал ВК8 	R_a	7,10
	R_q	8,25
	R_z	28,95
	R_t	30,97
	R_p	16,28
5-ти гранная пластина с покрытием. ВК8 + (TiAl)N(3мкм) [нанесение слоёв покрытия методом конденсации ионной бомбардировкой (КИБ)] 	R_a	8,127
	R_q	8,791
	R_z	24,266
	R_t	27,000
	R_p	10,900
	R_{3z}	13,350

В таблице 7 приведены сведения по отдельным режущим пластинам, которые были использованы для установления параметров шероховатости

(скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки).

Ниже приведены обобщающие выводы.

1. Несущественное различие в размерах и форме пластин средней размерности (диаметр описывающей окружности от 16,5 до 18 мм) влечёт за собой существенное различие в параметрах шероховатости обработанной поверхности.

2. Для пластин большей размерности (диаметр описывающей окружности 21,5 мм) форма пластины существенно определяет параметры шероховатости, предпочтительна четырёхгранная квадратная форма.

3. Для типоразмера (квадратные пластины с диаметром описывающей окружности 17,5 мм) сменных режущих пластин применение отечественного твёрдого сплава марки ВК8 с покрытиями существенно изменяет шероховатость поверхности.

Достижение поставленной цели осуществлялось несколькими этапами.

Этап 1. Обеспечение диагностики системы резания по параметрам шероховатости

Режущим инструментом со сменной пластиной того или иного типоразмера осуществляли продольное точение при тех или иных параметрах режима резания. На обработанных поверхностях измеряли выбранные параметры шероховатости. Выявляли те параметры (значения скорости резания, глубины резания и величины подачи) режима резания, которые обеспечивали максимальный период стойкости инструмента, т.е. время его работы до достижения допустимой величины износа. Эти условия работы технологической системы резания считали наиболее благоприятными [134 с.250]. Контролировали параметры шероховатости (смотри таблицу 7). Производили изменение состояния системы резания последовательным изменением одного из входных параметров (значения скорости резания, глубины резания и величины подачи, типоразмер пластины, её

инструментальный материал) и несколькими из них. Вновь контролировали параметры шероховатости. Регистрировали при изменении какого из входных параметров изменялось значение какого из параметров шероховатости. Эту взаимосвязь входного (входных) параметра с выходными параметрами (значениями параметров шероховатости) считали существующей.

Ниже, таблица 8, приведены отдельные результаты такого исследования. Из сведений, приведённых в таблице 8, следует:

1. Для 1-ого режима резания значения параметров шероховатости R_a и R_z находятся в пределах допустимых для изделий общемашиностроительного назначения. В сравнении с ВК8 применение покрытий снизило значения параметров шероховатости, иначе говоря, качество обработанной поверхности возросло.

2. При 2-ом режиме резания значения параметров возросли. Для ВК8 они выходят за пределы, допустимые для изделий общемашиностроительного назначения, при применении покрытия они находятся в пределах допустимых.

Таблица 8 – Сведения по шероховатости поверхности, обработанной при разных условиях эксплуатации

Сведения об входных параметрах системы резания.	Период износостойкости пластины. Сведения о режущей пластине		Значения параметров шероховатости для ВК8	Значения параметров шероховатости и для ВК8+TiCN(1мкм) + (TiAl)N(3мкм) + TiN(2мкм)
<p>1 – ый режим: скорость резания 50 м/мин, подача 0,21 мм/об.заготовки, глубина резания 1 мм.</p>	<p>45 минут</p> <p>ВК8 Пластина квадратная, диаметр описывающей окружности 16,5мм</p> 	<p>160 минут</p> <p>ВК8 + TiCN(1мкм) + (TiAl)N(3мкм) + TiN(2мкм) Пластина квадратная, диаметр описывающей окружности 16,5мм</p> 	<p>Ra 5, 430 R 7,092 Rz 30,905 Rt 31,472 Rp 15, 345 R3z 12,654</p>	<p>Ra 5,220 Rq 6,825 Rz 29,054 Rt 29, 685 Rp 12, 456 R3z 11, 658</p>
<p>2-ой режим резания: скорость резания 50 м/мин, подача 0,21</p>	<p>15 минут</p> <p>ВК8 Пластина квадратная, диаметр описывающей</p>	<p>26 минут</p> <p>ВК8 + TiCN(1мкм) + (TiAl)N(3мкм) +</p>	<p>Ra 6,800 Rq 9,354 Rz 45,320 Rt 48, 985 Rp 17, 680 R3z 15, 545</p>	<p>Ra 5,346 Rq 8,235 Rz 42,116 Rt 44, 012 Rp 14, 021 R3z 12,565</p>
<p>мм/об.заготовки, глубина резания 2 мм.</p>	<p>окружности 16,5мм</p> 	<p>TiN(2мкм) Пластина квадратная, диаметр описывающей окружности 16,5мм</p> 		

<p>3- ий режим: скорость резания 50 м/мин, подача 0,21 мм/об.заготовки, глубина резания 1,5 мм.</p>	<p>28 минут ВК8 пятигранная пластина</p> 	<p>40 минут пятигранная пластина ВК8 + TiC(1мкм) + (TiAl)N(3мкм)</p> 	<p>Ra 6,245 Rq 8,355 Rz 36,700 Rt 38,023 Rp 12,665 R3z 10,125</p>	<p>Ra 5,245 Rq 6,243 Rz 31,035 Rt 32,016 Rp 9,445 R3z 9,235</p>
---	---	--	--	--

3. При 3-ем режиме резания (он не сопоставим с 1-ым и со 2-ым из-за иного типоразмера пластин) значения параметров шероховатости для ВК8 заметно изменились. Это связано с условиями стружкообразования и разной топографией передней поверхности пятигранных пластин. Но соотношение величин параметров примерно осталось аналогичным. При инструментальном материале ВК8 + TiC(1мкм) + (TiAl)N(3мкм) значения параметров шероховатости снизились. Снижение особо заметно для параметров Rq, Rt, Rp. Совокупность этих параметров влияет на товарный вид (на уровень зеркальности) обработанной поверхности, а совокупность параметров Rt и Rp характеризует способность обработанной поверхности к образованию герметичного соединения с ответной поверхностью сопрягаемой детали (чем меньше у них или хотя бы у одной из них Rt и Rp, тем более герметично соединение)

В таблице 9 на примере точения стали 09Х17Н7Ю показано изменение параметров шероховатости в зависимости от применяемого разработанного инструмента (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки).

Таблица 9 – Сопоставление влияния архитектуры покрытия инструмента на параметры шероховатости обработанной поверхности при точении стали 09X17H7Ю

№ п/п	Инструментальный материал	Параметр шероховатости	Значения соотношения V1/V2 параметров
1	BK8+TiCN(5мкм) + (TiAl)N(3мкм) + Al ₂ O ₃ (5мкм) + TiC(5мкм)	Ra	1,46
		Rz	1,25
2	BK8+Al ₂ O ₃ (2мкм) + (Ti)CN(5мкм) + (TiAl)N(3мкм) + TiN(3мкм)	Ra	1,26
		Rz	1,24
3	BK8 + (TiAl)N(3мкм) + Al ₂ O ₃ (3мкм) + (TiAl)N(3мкм) + Al ₂ O ₃ (3мкм)	Ra	1,19
		Rz	1,10
4	BK8 + TiN(3мкм) + TiC(3мкм) + TiN(3мкм) + TiC(3мкм)	Ra	1,16
		Rz	1,09
5	BK8+TiC(3мкм) + TiN(3мкм) + (TiAl)N(2мкм)	Ra	1,14
		Rz	1,09
6	BK8 + TiCN(2мкм) + TiC(3мкм) + TiN(1,5мкм)	Ra	1,14
		Rz	1,07
7	BK8 + TiC(1,5 мкм) + TiN(3мкм)	Ra	1,13
		Rz	1,06
8	BK8 + TiN(2мкм) + TiC(5мкм)	Ra	1,12
		Rz	1,04
9	BK8 + TiCN(0,5мкм) + TiN(1мкм)	Ra	1,11
		Rz	1,03
10	BK8 + TiN(0,5мкм) + TiC(1мкм)	Ra	1,11
		Rz	1,02

Примечание: V1 - значение параметра шероховатости для инструментального материала BK8, V2 – для данного инструментального материала.

Из таблицы следует: для всех разработанных инструментов соотношение V1/V2 всегда более единицы и достигает значения 1,45, т.е. параметры шероховатости в этом случае снизилась на 45%. Эти данные позволяют выбрать покрытие, наилучшим образом отвечающее требованиям шероховатости обработанной поверхности детали, выполненной из стали 09X17H7Ю. Для сталей 12X18H10T и 13X15H5-AM3 соотношение V1/V2 имеет значительно большие значения. Для всех рассматриваемых специализированных нержавеющей сталей наиболее рациональны по этому параметру инструменты материалы BK8+TiCN(5мкм) + (TiAl)N(3мкм) +

$\text{Al}_2\text{O}_3(5\text{мкм}) + \text{TiC}(5\text{мкм})$ и $\text{VK8} + \text{Al}_2\text{O}_3(2\text{мкм}) + (\text{Ti})\text{CN}(5\text{мкм}) + (\text{TiAl})\text{N}(3\text{мкм}) + \text{TiN}(3\text{мкм})$.

Эти (и другие не указанные здесь) результаты позволили:

а) Заключить о наличии взаимосвязи между параметрами шероховатости (как выходными параметрами системы резания) и склонности системы резания к диагностике её состояния по выявленным параметрам шероховатости. Более того, они показали, какое изменение состояния системы резания влечёт за собой изменение какого из параметров шероховатости преимущественно.

б) На этом основании сделан обоснованный вывод о возможности диагностики системы резания по параметрам шероховатости.

Этап 2. Настройка элементов системы резания на получение необходимых параметров шероховатости обработанной поверхности

Здесь и далее приведены только результаты для пластин квадратной формы с диаметром описывающей окружности 16,5мм, выполненных из инструментальных материалов VK8 и $\text{VK8} + \text{TiCN}(1\text{мкм}) + (\text{TiAl})\text{N}(3\text{мкм}) + \text{TiN}(2\text{мкм})$.

Суть этого этапа по действиям обратна тому решению, которое выполнено в подразделе «Этап 1». Потребность в решении такой обратной задачи возникает тогда, когда необходимо на обработанной поверхности воссоздать такие значения параметров шероховатости, которые обеспечат те или иные эксплуатационные свойства изделию с такой поверхностью. Например, в подразделе «Этап 1» показано как параметры R_t и R_p характеризуют способность обработанной поверхности к образованию герметичного соединения (процесс испытания на герметичность здесь не описан, он типовой) с ответной поверхностью сопрягаемой детали.

В данном подразделе «Этап 2» ставится задача о том, какие параметры системы резания необходимо изменить (и на сколько) для того, чтобы обеспечить необходимые значения параметров R_t и R_p . Установлено, что для снижения значений параметров R_t и R_p могут быть применены следующие действия:

а) Применение инструментального материала с покрытием. Это можно увидеть, в том числе, из строк 1 и 2 (1-ый и 2-ой режимы) в двух последних столбцах таблицы 8.

Б) Изменить параметр режима резания, предпочтительно уменьшить глубину резания. Это тоже можно увидеть из строк 1 и 2 (1-ый и 2-ой режимы) в двух последних столбцах таблицы 8. Можно также уменьшить величину подачи инструмента. Можно, в том числе, увеличить скорость резания, но это может привести к снижению износостойкости инструмента и образованию витой стружки сливной формы, что травмоопасно.

Этап 3. О прогнозном проектировании металлорежущего инструмента и инструментального материала, обеспечивающих требуемые параметры шероховатости при новых условиях эксплуатации.

Потребность в решении такой задачи возникает тогда, когда:

- а) без ухудшения качества обработанной поверхности необходимо повысить производительность обработки;
- б) когда заданы новые условия эксплуатации инструмента и необходимо определить ожидаемые (прогнозируемые) величины параметров шероховатости;
- в) когда заданы новые условия эксплуатации инструмента и необходимо выбрать (спроектировать) инструмент, способный обеспечить требуемые параметры шероховатости.

Рассмотрим решение этой задачи на примере необходимости обеспечения зеркальности обработанной поверхности. В формировании зеркальности участвует не только значения параметров R_a и R_z . Безусловно, что они должны быть минимизированы до предельно возможных значений. Кроме R_a и R_z на уровень зеркальности влияют параметры R_t (общая высота неровностей), $R_y(ISO)$ (наибольшая высота профиля по системе ISO), $R_y(DIN)$ (наибольшая высота профиля по системе DIN), R_p (высота наибольшего выступа профиля), R_m (глубина наибольшей впадины профиля), S (средний шаг местных выступов профиля), S_m (средний шаг

неровностей профиля), S_k (асимметрия профиля). У нас не было возможности для всей номенклатуры рассматриваемых токарных пластин выявить вклад (долю) каждого из перечисленных параметров шероховатости. Но была получена поверхность, зеркальность которой сопоставима (имеются эталоны) с зеркальностью металлических зеркал, применяемых в летательных аппаратах. В обиходе такую зеркальность можно получить при полировании поверхности или при её никелировании.

Полученные результаты позволили сформулировать следующие выводы:

1. Разработаны рекомендации, позволяющие:

а) диагностировать состояние технологической системы резания по результатам контроля параметров шероховатости;

б) решить обратную задачу, то есть управлять параметрами шероховатости по результатам анализа диагностики состояния системы;

в) оптимизировать параметры режима резания для обеспечения требуемых параметров шероховатости;

г) рекомендовать инструментальные материалы для повышения качества обработанной поверхности, в том числе, для получения требуемой шероховатости;

д) прогнозировать период стойкости инструмента за счёт проектирования новых инструментальных материалов и геометрии инструмента под новые условия их эксплуатации.

2. Выявлены наиболее рациональные покрытия, необходимые при токарной обработке специализированной нержавеющей стали марки 09X17H7Ю.

3. Кроме указанных выше инструментальных материалов разработаны рекомендации применительно к следующим инструментальным материалам: $VK8+TiCN(5\text{мкм}) + (TiAl)N(3\text{мкм}) + Al_2O_3(5\text{мкм}) + TiC(5\text{мкм})$; $VK8+Al_2O_3(2\text{мкм}) + (Ti)CN(5\text{мкм}) + (TiAl)N(3\text{мкм}) + TiN(3\text{мкм})$; $VK8 +$

(TiAl)N(3мкм) + Al₂O₃(3мкм) + (TiAl)N(3мкм) + Al₂O₃(3мкм); BK8 + TiN(3мкм) + TiC(3мкм) + TiN(3мкм) + TiC(3мкм); BK8+TiC(3мкм) + TiN(3мкм) + (TiAl)N(2мкм); BK8 + TiCN(2мкм) + TiC(3мкм) + TiN(1,5мкм); BK8 + TiC(1,5 мкм) + TiN(3мкм); BK8 + TiN(2мкм) + TiC(5мкм); BK8 + TiCN(0,5мкм) + TiN(1мкм); BK8 + TiN(0,5мкм) + TiC(1мкм).

4. По результатам контроля шероховатости сформулирован следующий вывод: Величины параметров шероховатости неравноценны при использовании пластин разной формы и геометрии пластин, а также от наличия покрытия на пластине. Наиболее это заметно при сравнении параметров шероховатости поверхности, обработанной пластинами разной формы и с разным покрытием.

4.6.2 Влияние шероховатости и волнистости поверхности на стружкообразование

Исследованием данного вопроса занимались многие учёные [(136 с.35), (137 с.45), (138 с.154), (139 с.42)]. Изучению контактных процессов в зоне резания посвящены исследования Штрейнберга И.С., Кузнецова В.Д., Тиме И.А., Зварыкина К.А., Усачева Я.Г., Зорева Н.Н., Клушина М.И., Исаева А.И. и др. Из зарубежных исследователей наиболее значимый вклад в исследование этих вопросов внесли Шоу, Кобаяси, Уоллес, Альбхерт и другие. Каждый из исследователей внес свой вклад в развитие представлений о контактных явлениях. Существенное развитие эти представления получили при привлечении закономерностей, выявленных на основе трибологии и механики трения по теориям Крагельского И.В. и Гаркунова Д.Н. Обобщая известные исследования можно заключить, что при резании имеет место сложный комплекс явлений, характерных только для процесса резания, сочетающего интенсивные упругие и пластические деформации, трение, давление и высокие температуры с протеканием физико-химических явлений от макроуровней до дислокационного уровня, диффузионных, адгезионных, электромагнитных и прочих явлений.

В рамках данной диссертации важно было проследить насколько на стружкообразование влияет изменение шероховатости поверхности, обработанной разработанными сменными токарными пластинами. Для этого сочли необходимым исследовать возможное изменение положения плоскости сдвига в зоне резания при инструменте с разными покрытиями. Для этого исследовали изменение не только шероховатости, но и волнистости

В работе [139 с.24] и в работах Мокрицкого Б.Я. эти вопросы исследованы при разных углах наклона ступени припуска. Схема срезания таких припусков показана на рисунке 59.

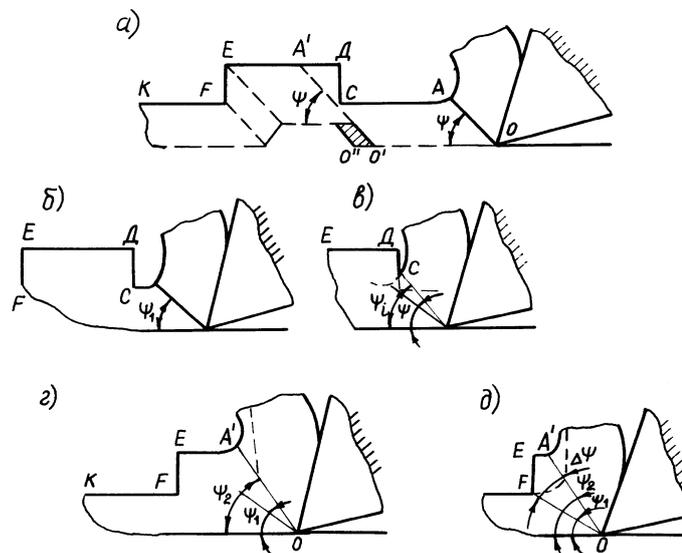


Рисунок 59 – Схема срезания ступенчатого припуска: а – общая схема; б, в, г, д – этапы срезания припуска (рисунок заимствован из диссертации Мокрицкого Б.Я. с его согласия)

Это позволило получить зависимость изменения угла плоскости сдвига от параметров процесса резания.

Для рассматриваемой в диссертации задачи использование представлений, положенных в основу рисунка 59, позволило связать это с нестационарностью процесса стружкообразования.

В общем виде систему резания принято рассматривать как динамическую систему, которая по типу и разнообразию движений входящих в нее элементов (структур) может стремиться к занятию таких двух принципиально различных и энергетически противоположных

состояний как порядок и хаос. Эти два состояния имеют временное и пространственное значение. Порядок во временном изменении – это уравновешенность взаимодействия, приводящая к устойчивому равновесию, синхронности движения отдельных частей (структур) системы. Хаос во временном изменении – это отсутствие регулярности, непредсказуемость и случайность состояния и движения структур в отдельности и системы в целом. Пространственное проявление порядка – это пространственная согласованность структур и регулярность движений системы. Пространственный хаос – отсутствие согласованности и регулярности. С этой точки зрения зону резания можно рассматривать как динамическую систему, стремящуюся к порядку и выводимую из этого состояния в хаотическое под действием процессов в зоне деформации и на контактных поверхностях.

В экстремальных случаях процесс резания одновременно находится в двух противоположных состояниях: изменение условий резания из-за изменения параметров срезаемого припуска выводит систему резания из устойчивого состояния в неустойчивое, а система резания, как всякая диссипативная система, стремится вновь занять устойчивое положение. Это может приводить к вибрациям и резонансу, что недопустимо для обеспечения качества обработки поверхности. Не допускать это можно разными путями.

Обычно рассматривают идеализированную схему резания, при которой предполагается стационарное положение режущей кромки, рисунок 60.

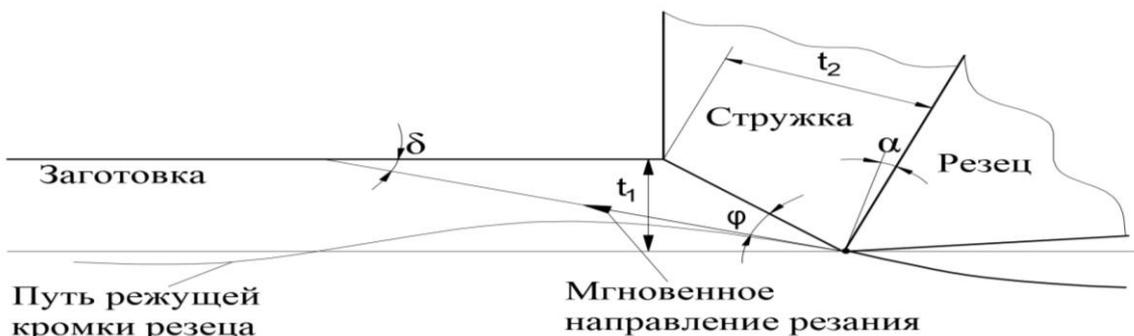


Рисунок 60 – Идеализированная схема образования волнистости при резании остролезвийным инструментом.

При исследовании процесса срезания волнистости обычно используют идеализированную схему, представленную на рисунке 61.

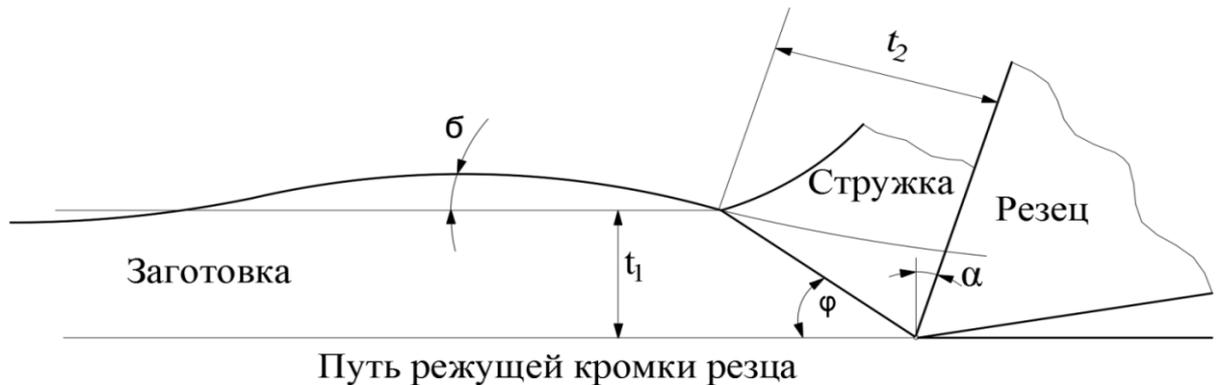


Рисунок 61 – Идеализированная схема срезания волнистости

Действительно, наличие периодической составляющей силы резания регистрируют многие исследователи (например, профессор Кабалдин Ю.Г. много занимался вопросами стружкообразования при резании простых конструкционных сталей, он связывал это с самоорганизацией технологической системы резания). Но прямых доказательств причин периодичности составляющих силы резания нет. Ряд исследователей импульсное нагружение (гармоники второго рода на периодической составляющей силы резания) связывают с шероховатостью и волнистостью поверхности, которые сформированы при предшествующем проходе инструмента.

Установлено, что разработанные покрытия инструмента формируют разное протекание процесса стружкообразования. Это приводит к образованию существенно разных стружек, рисунок 62.

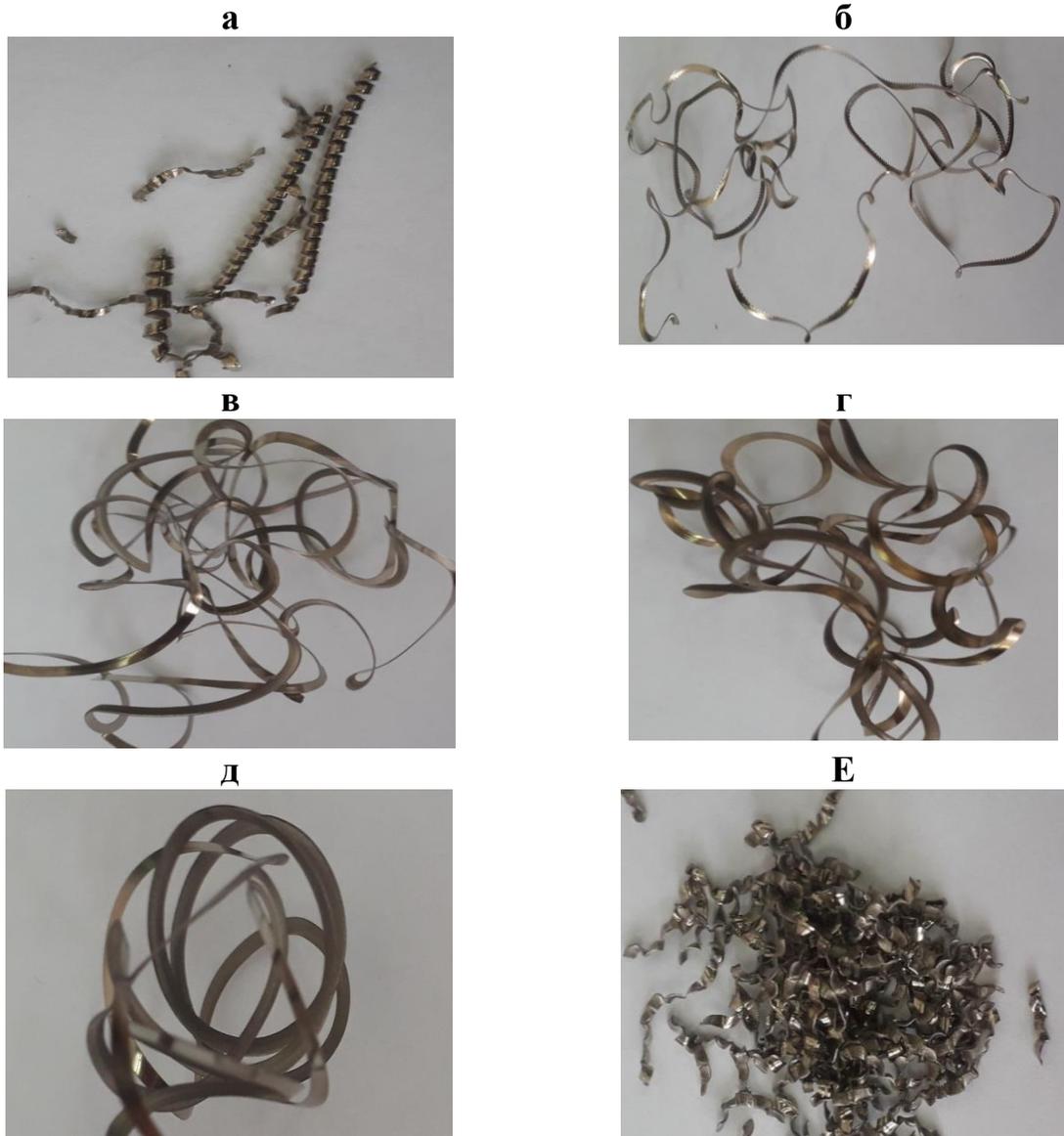


Рисунок 62 – Примеры стружек, формировавшихся при использовании инструмента с разными разработанными покрытиями (на рисунке 63е показана стружка, формировавшаяся при точении пластиной корейской фирмой Karloy Inc) (скорость резания 50 м/мин, глубина резания 1 мм, подача 0,21 мм/об.заготовки)

Визуально это наблюдается как смена процесса образования сливной стружки (которая не желательна) на дроблённую или суставчатую стружку. Исследованием корней стружек установлено разное положение (и протяжённость) плоскости сдвига при применении разных покрытий. Очевидно, это связано с изменением контактных явлений на передней поверхности инструмента при применении разных покрытий.

Изменение положения плоскости сдвига при применении разработанных покрытий происходит в разных диапазонах в зависимости от применяемого покрытия.

Экспериментальное исследование шлифов корней стружек (использован мультисенсорный измерительный центр модели Mikro Vu Sol 161, имеющий высококачественную оптику фирмы Цейс с высокой разрешающей способностью и обеспечивающей точность измерения до 0,001 мм) показало:

– изменение частоты стружкообразования в зависимости от применяемого инструментального материала;

– изменение положения и протяжённости плоскости сдвига при применяемых покрытиях, рисунок 63.

Установлено, что при замене инструментального материала с BK8 на BK8 + TiN + TiC угол наклона плоскости сдвига изменился на 4 градуса, а при использовании инструмента BK8+TiCN + (TiAl)N + Al₂O₃ + TiC угол наклона плоскости сдвига изменился на 7 градусов¹.

Полученные результаты исследования непостоянства положения плоскости сдвига в зоне резания являются основанием для нового толкования взаимосвязи изменения параметров волнистости и шероховатости обработанной поверхности с изменением положения плоскости сдвига, что, в свою очередь, даёт новое толкование механизму изменения условий стружкообразования, которые влекут за собой вынужденный переход системы резания с дроблёной стружки на сливную стружку и наоборот.

¹ Изменение зарегистрировано при постоянной погрешности измерения (плюс минус 0,3 градуса).

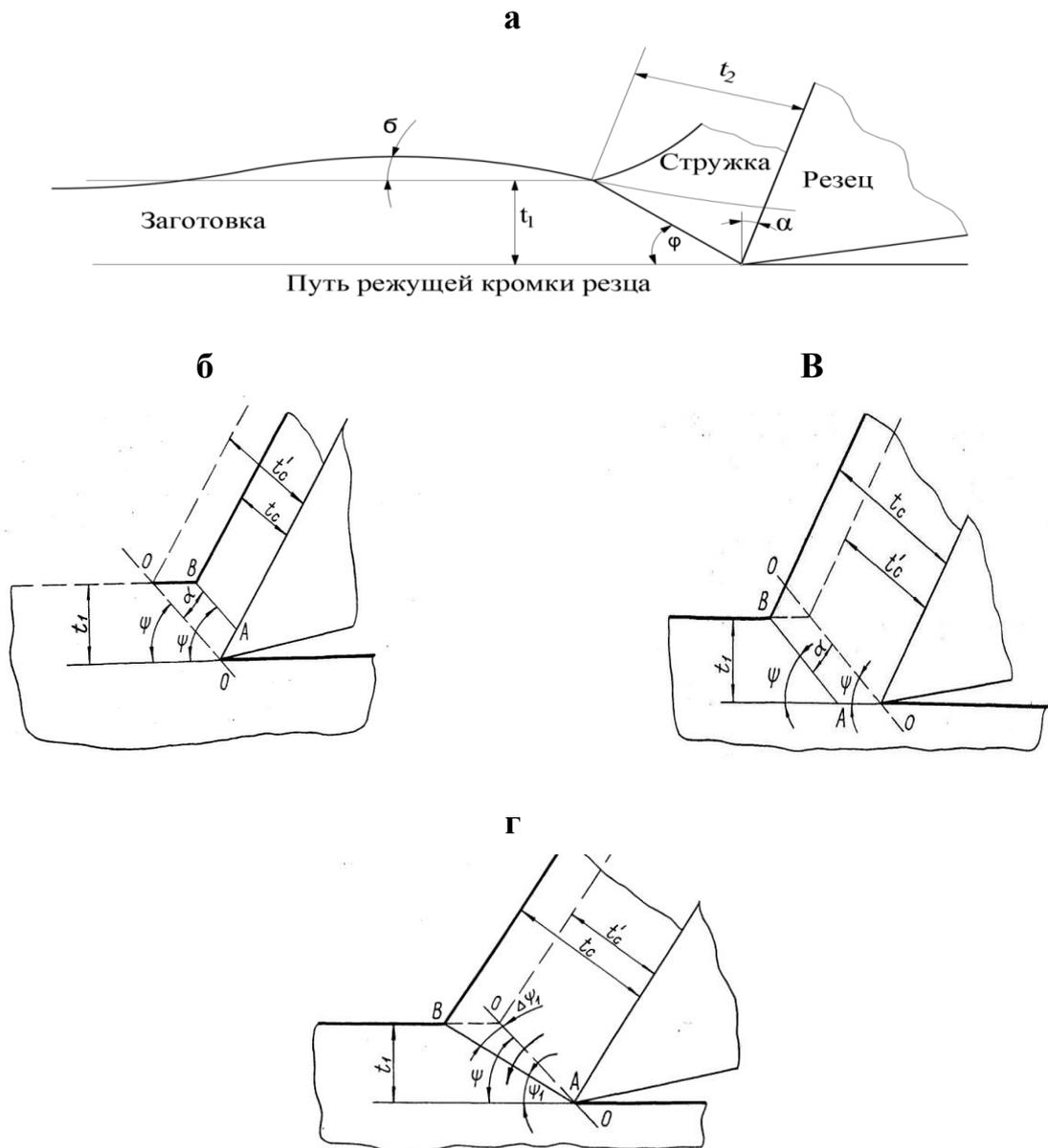


Рисунок 63 – Принятая схема анализа особенностей процесса стружкообразования при использовании разных разработанных инструментов: **а** – идеализированная схема срезания волнистости; **б** – стружкообразование при смещении плоскости сдвига «в металл заготовки»; **в** - стружкообразование при смещении плоскости сдвига «в металл стружки»; **г** - стружкообразование при повороте плоскости сдвига «в металл заготовки» Обозначение угла сдвига φ на рисунке **а** и угла сдвига ψ на рисунках **б**, **в** и **г** обозначены по разному для удобства анализ

Нами это толкуется как изменение вязко-хрупкого механизма отделения стружки в плоскости сдвига на механизм, в котором превалирует доля хрупкого разрушения. Доля этого хрупкого разрушения разная для разных инструментальных материалов.

4.7. Выводы по главе

Комплекс результатов экспериментального исследования, изложенных в данной главе, позволяет сформулировать следующие основные выводы:

1. Систематизация полученных экспериментальных зависимостей величины износа от времени работы различных инструментальных материалов позволила описать зависимости математически в виде регрессионных (полиномных) уравнений. Такие уравнения позволяют прогнозировать величину износа инструмента в искомый момент (заданный интервал) времени. Это может быть использовано как рекомендации по обработке стали марки 09X17H7Ю. В том числе может быть использовано для обоснованного объёма закупок сменных твёрдосплавных пластин.

2. Установлено, что базовый инструментальный материал ВК8 не в состоянии удовлетворить современные требования, его период стойкости недостаточен.

3. Предложенные покрытия на ВК8 увеличивают период стойкости инструмента значительно, наиболее рациональные покрытия увеличивают период стойкости в 3 раза.

4. Разработанные инструменты превосходят по периоду стойкости инструментальные материалы ведущих иностранных фирм без ущерба производительности и качеству обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена разработке архитектуры многослойных покрытий для твердосплавных пластин металлорежущего инструмента. Решена актуальная научно-техническая задача, направленная на повышение периода стойкости металлорежущих инструментов при обработке специализированных нержавеющей сталей. В результате исследования получены следующие научные и практические результаты:

1. Установлена возможность адаптирования программной среды Deform под задачи диссертационной работы, что позволило использовать её как метод исследования. В результате минимизировано число (а именно допустимая величина износа инструмента, допустимая величина силы резания, вариант архитектуры покрытия, физико-механические характеристики обрабатываемой стали) задаваемых входных параметров для получения необходимого количества выходных параметров (а именно прогнозируемые величины износа инструмента, силы резания и температуры резания, напряжения в инструментальном материале, его деформация и скорость деформации).

2. Получены критерии имитационного моделирования, обеспечивающие получение необходимых выходных параметров проектирования инструмента. Критерии позволяют проектировать несколько вариантов архитектуры (мало- (два) и много- (четыре и более)) слойных покрытий, конкурирующих между собой по периоду стойкости инструмента и по качеству обработанной поверхности заготовки детали. Установлено, что для условий течения указанных специализированных нержавеющей сталей управление периодом стойкости инструмента можно осуществить за счёт архитектурирования покрытия, т.е. путем виртуального проектирования состава и структуры слоёв покрытий, количества слоёв и порядка их чередования, толщин слоёв.

3. Установлено, что изменение разработанных покрытий на инструменте приводит к перестройке (самоорганизации) традиционного вязко-хрупкого механизма отделения стружки в плоскости сдвига на механизм, в котором превалирует доля хрупкого разрушения. Это связано с изменением угла наклона плоскости сдвига. При использовании разработанных покрытий установлено изменение от 4 до 7 градусов в сравнении с инструментом без покрытия. Полученные результаты исследования непостоянства положения плоскости сдвига в зоне резания являются основанием для нового толкования взаимосвязи изменения параметров волнистости и шероховатости обработанной поверхности с изменением положения плоскости сдвига, что, в свою очередь, даёт новое толкование механизму изменения условий стружкообразования, которые влекут за собой возможность перевода системы резания в условия, при которых снижается доля сливной стружки и существенно (до 80%) растёт доля суставчатой или дроблённой стружки, что целесообразно с позиций снижения травматизма сливной стружкой и с улучшением условий её сбора и транспортировки.

4. Установлено, что для выбора необходимого режущего инструмента достаточно использовать критерии «температура в зоне резания», «напряжения в инструментальном материале», «деформация инструментального материала», «сила резания» и «износ инструмента». Это позволяет обеспечить многовариантное проектирование архитектур покрытий для последующего отбора из них наиболее рационального под конкретные условия эксплуатации.

5. Установлено, что для рассматриваемых специализированных труднообрабатываемых нержавеющей сталей марок 09X17H7Ю, 12X18H10Т, 13X15H5 АМ-3 наиболее рациональными и конкурирующими между собой являются инструменты $\text{VK8} + \text{TiCN}(5\text{мкм}) + (\text{TiAl})\text{N}(3\text{мкм}) + \text{Al}_2\text{O}_3(5\text{мкм}) + \text{TiC}(5\text{мкм})$, $\text{VK8} + \text{Al}_2\text{O}_3(2\text{мкм}) + (\text{Ti})\text{CN}(5\text{мкм}) + (\text{TiAl})\text{N}(3\text{мкм}) + \text{TiN}(3\text{мкм})$ и $\text{VK8} + (\text{TiAl})\text{N}(3\text{мкм}) + \text{Al}_2\text{O}_3(3\text{мкм}) + (\text{TiAl})\text{N}(3\text{мкм}) +$

Al₂O₃(3мкм). Они обеспечивают повышение периода стойкости инструментов в 2 и более раз в сравнении с инструментом без покрытия.

6. Практическая значимость работы подтверждена принятием разработанных рекомендаций в производство промышленных предприятий и внедрением в учебный процесс.

Перспективами дальнейшего разработки выполненного исследования могут быть:

1. Разработка новых инструментов (для другой основы с другими покрытиями) для иных обрабатываемых материалов.

2. Оптимизация топографии передней поверхности режущих пластин.

3. Применение акустической эмиссии для оценки стабильности состояния технологической системы резания (частично это выполнено, но в диссертации не отражено). Управление состоянием технологической системы резания «станок – приспособление – инструмент – деталь» по параметрам акустической эмиссии, излучаемой в процессе резания.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ И ОПУБЛИКОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. Каширин А.И. К вопросу о прочности режущей кромки инструмента при резании труднообрабатываемых материалов/Сб. Трение и износ при резании металлов. - М.: Машгиз, 1955, с.37-52.
2. Резников Н.И. Вопросы скоростного фрезерования.// Вестник машиностроения, № 11, 1947, с. 29-34.
3. Зорев Н.Н. Влияние установки заготовки на стойкость фрез при торцевом фрезеровании// Вестник машиностроения, № 8, 1951, с.42-46.
4. Зорев Н.Н. Обработка сталей твердосплавным инструментом в условиях прерывистого резания/ / Вестник машиностроения, № 2, 1963, с.34-36.
5. Этин А.О. Влияние условий врезания торцевой фрезы на ее стойкость/Сб. Динамика процесса резания. -М., Машгиз, 1953, с.53-58.
6. Андреев Г.С. Влияние тепловых и адгезионных явлений на работоспособность твердосплавного инструмента при периодическом резании.// Вестник машиностроения. 1974, № 10, с.71-74.
7. Андреев Г.С. Повышение производительности обработки деталей в условиях периодического прерывистого резания.// Вестник машиностроения. 1978, № 12, с.48-52.
8. Зорев Н.Н., Фетисова З.М. Обработка резанием тугоплавких сплавов. - М.: Машиностроение, 1966,-227 с.
9. Бердников, Л.Н. Предупреждение хрупкого разрушения режущего инструмента, обусловленного тепловой нагрузкой. // Вестник машиностроения. 1976, № 11, с.62-65.
10. Синопальников В.А., Гурин, В.Д. Температурное поле в режущем клине инструмента при прерывистом резании. // Вестник машиностроения. 1981, № 4, с.44-47.

11. Остафьев В.А. Учет прочности инструмента при его проектировании и эксплуатации.// Станки и инструмент. 1983, № 7, с.19-20.
12. Kaning W. Der Werkzeugverschleiß bei der spanenden Bearbeitung von Stahlwerkstoffen. Werkstatttechnik, 1966, 56 N5, с.229-234.
13. Opitz H., Schilling W. Untersuchung der Verschleißreaktionen bei der Bearbeitung Von Stahl mit Schnellarbeits-stahlwerkzeugen. Forschungsber. Landes Nordrhein- Westfalen., 1967, N17, 196, с.3-95.
14. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности режущей части инструмента. - М.: Машиностроение, 1979, - 168 с.
15. Лоладзе Т.Н., Бетанели, А.И. Прочность режущего инструмента. - В кн.: Развитие науки о резании металлов./Под ред. Н.Н.Зорева. - М.: Машиностроение, 1967, с.157-181.
16. Бетанели А.М. Прочность и надежность режущего инструмента. - Тбилисси. Сабцора Сахартвело, 1973. - 302 с.
17. Андреев Г.С. Контактные напряжения при периодическом резании. // Вестник машиностроения. 1969, № 8, с.63-66.
18. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 1982, - 320 с.
19. Куклин Л.Г., Сагалов, В.И., Серебровский, В.Б. Повышение прочности и износостойкости твердосплавного инструмента. - М.: Машиностроение. 1968. - 140 с.
20. Гордон М.Б. Исследование трения и смазки при резании металлов. - В кн.: Трение и смазка при резании металлов. Чебоксары, ЧГУ, 1972, с.7-137.
21. Лоладзе Т.Н. Износ режущего инструмента. - М.: Машгиз, 1958, - 536 с.
22. Хае Г.Л. Прочность режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 1975, - 168 с.
23. Утешев М.Х., Синюков, В.А. Напряженное состояние режущей части инструмента с округленной режущей кромкой. // Вестник машиностроения, 1970, № 2, с.70-73.

24. Кабалдин Ю.Г. Структура, прочность и износостойкость композицион-ных инструментальных материалов. - Комсомольск-на-Амуре, издательство технического университета, 1994, - 215 с.

25. Кабалдин Ю.Г. Принципы конструирования композиционных инструментальных материалов с повышенной работоспособностью. - Владивосток, ДВО АН СССР, 1990, - 58 с.

26. Кабалдин Ю.Г., Шпилев, А.М. Повышение надежности процессов механообработки в автоматизированном производстве. - Владивосток: Дальнаука, 1996. - 264 с.

27. Синопальников В.А., Гурин, В.Д. Тепловые условия работы быстрорежущего инструмента с покрытием из нитрида TiN. // Станки и инструмент, 1983, №1, с.14-15.

28. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания металлов. - М.: Машиностроение. 1976. - 278 с.

29. Бобров В.Ф., Иванов, В.В. Режущие свойства титановых твердых сплавов при непрерывном точении углеродистых и легированных конструкционных сталей.// Вестник машиностроения, 1979, № 3, с.53-56.

30. Жилин В.А., Стебленко, В.П. Пластический износ режущего инструмента с пластинками из твердого сплава.// Станки и инструмент, 1976, № 3, с.36-38.

31. Жили В.А. Субатомный механизм износа режущего инструмента. - Ростов-на-Дону, издательство РГУ, 1973, - 168 с.

32. Талантов Н.В., Черемушкин, Н.П. Закономерности пластического деформирования при обработке упрочняющих материалов. / В кн.: Теплофизика технологических процессов. Волгоград, издательство ВПИ, 1979, с.3-29.

33. Боровский Г.В. Оценка эффективности применения инструмента, оснащенного сверхтвердыми материалами// Станки и инструмент, 1988, № 2, с.8-11.

34. Зорев Н.Н. О взаимосвязи процессов в зоне стружкообразования и в зоне контакта передней поверхности инструмента. Вестник машиностроения. 1963, № 12, с.42-51.

35. Колев Н.С. Теоретическое и экспериментальное исследование трения и изнашивания вольфрамо-карбидных и титано-вольфрамо-карбидных сплавов. Автореф. дисс. ...докт.техн.наук. Ростов, 1973, - 53 с.

36. Семенов А.П. Трение и адгезионное взаимодействие тугоплавких металлов при высоких температурах. - М.: Наука, 1972, - 156 с.

37. Талантов Н.В., Дудкин, М.Е. О структурных превращениях в твердом сплаве при резании стали. // Сверхтвердые материалы. 1982, № 1, с.23-27.

38. Беккер М.С. Металлофизика износа режущего инструмента. Сб.: Теория трения, смазки и обрабатываемости металлов. Чебоксары, ЧГУ, 1978, с.47-58.

39. Гуревич Д.М. Причины образования экстремума стойкостной зависимости твердосплавного инструмента.// Вестник машиностроения. 1976, № 12, с.30-32.

40. Грановский Г.И., Панченко, В.Ф. Фасонные резцы. - М.: Машиностроение. 1980. - 309 с.

41. Клушин М.И., Беккер, М.С., Гордон, М.Б. К характеристике контактного взаимодействия стружки с инструментом. - Сб.: Вопросы теории действия СОЖ в процессах обработки резанием. Горький, 1975, № 3, с.52-56.

42. Deederich N. Metallischer Zwischeuschichten im Bereich der Aufbanschneidesbildung. Ind. -Anz., 1968, 90, N24, с.457-460.

43. Хаккен Г. Явления перехода и переходные процессы в нелинейных системах. Синергетика/Сб.статей. Пер. с англ.//Под ред. Кадомцева Б.Б., М.: Мир, 1984, с.7-17.

44. Кудинов В.А. Динамика станков, - М., Машиностроение, 1967, - 359 с.

45. Method of making ultrafine WC-CO alloys: patent IPN 99/131280 Great Britain: IPS C22C 29/08 / Applicant : Sandvik AB (SE); S-811 81 Sandviken (SE). IAN PST/SE98/01573; Filing date 04.09.98; Publikation date 18.03.99; Prioritu data 05.09.97, 9703203-1 (SE).

46. Zhijun Lin, Lin Wang, Jianzhong Zhan, Ho-kwang Mao, Yusheng Zhao. Nanocrystalline tungsten carbide: As incompressible as diamond. Applied Physics Letters 95, 211906 (2009).

47. Fuch M., Scheffer M. Ab initio pseudopotentials for electronic structure calculations of polu-atomic systems using density-functional theory.//Comp. Phys. Commun. 1999. Vol. 119.P.67-11.

48. Iochen M. Schneider. Effect of transition metal additives on electronic structure and elastic properties of TiAl and Ti₃Al. Phys. Rev. B 74, 174110, 2006.

49. Gunterrez G., Taga A., Johansson B. Phys. Rev. B 65, 012101 (2001).

50. Fernandez E.M., Borstel G., Soler J. and Balbas L.C. Study of Eur. Phys. J. D 24, 245-248 (2003).

51. Gunterrez G., Johansson B. Phys. Rev. B 65, 104202 (2002).

52. Платонов Г.Л., Аникин, В.Н., Анিকেев, А.И. и др. Влияние состава твердых сплавов на кристаллохимические характеристики нанесенных на них покрытий из карбида титана.// Порошковая металлургия. 1982, № 11, с.69-75.

53. Верещака А.С., Табаков, В.П., Жогин, А.С. Износ твердосплавных инструментов с покрытием.// Вестник машиностроения, 1981, № 4, с.45-47.

54. Верещака А.С., Третьяков, И.П. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. - М.: Машиностроение, 1986, - 192 с.

55. Табаков В.П., Порохин С.С. Применение многослойных покрытий для повышения эффективности режущего инструмента, работающего в стеснённых условиях// Металлообработка, №3, 2010, с.40-44.

56. Григорьев С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента (учебник для студентов вузов) М.: Машиностроение, 2009. – 368 с.

57. Верещака А.С., Верещака А.А. Тенденции совершенствования и методология создания функциональных покрытий для режущего инструмента. Современные технологии в машиностроении: Сб. науч. статей /Под редакцией А.И.Грабченко. – Харьков: НТУ «ХПИ»,2007. С. 192-235.

58. C. Ducros, V. Benevent, F. Savchette. Deposition, characterisation and machining performance of multilayer PVD coatings on cemented carbide cutting tools. // Surface and Coatings Technology. 2003, v. 163 – 164, pp. 681 – 688.

59. P.H. Mayrhofer, H. Willmann, C. Mitterer. Recrystallisation and grain growth of nanocomposite Ti-B-N coatings. // Thin Solid Films. 2003, v. 440, pp. 174 – 179.

60. Okumiya, M. Mechanical properties and tribological behavior of TiN-CrAlN and CrN-CrAlN multilayer coatings. /M. Okumiya, M. Gripenrog.// Surface and Coating Technologies 112 (1999). - P.123-128.

61. Byrne, G. Advancing Cutting Technology. / G.Byrne, D.Dornfeld, B. Denkena. // CIRP Annals. Vol 52/2/2003.

62. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // Acta mater. 2000. V.48. P.1-29.

63. Григорьев, С.Н. Методы повышения стойкости режущего инструмента: учебник для студентов вузов. - М.: Машиностроение, 2011. - 368 с.: ил. - ISBN 978-5-94275-591-1.

64. Фадеев В.С. Научные основы разработки и получения слоистых материалов на поверхности твердых сплавов и оксидной керамики для повышения работоспособности режущего инструмента. Автореферат диссерт. на соиск. уч. степени докт. наук. Якутск, 2005, 44с.

65. Шоршоров М.Х. Физико-химическое взаимодействие компонентов в композиционных материалах// Композиционные материалы. М., Наука, 1981, с.11-18.

66. Карпинос Д.М., Максимович, Г.Г., Кадыров, В.Х., Лютый, Е.М. Прочность композиционных материалов. - Киев: Наукова думка, 1978, 236 с.

67. А.с. СССР № 1240505, МКИ В 23 В 25/06. Устройство для контроля работоспособности резцов./ Козочкин М.П. и др., 1986.

68. Иванова В.С., Копьев, И.М., Овчинский, А.С. К вопросу о распределении напряжений при деформировании композиций различного типа// Физ.-хим. механика материалов, 1974, № 4, с.23-26.

69. Иванов В.И. Применение метода акустической эмиссии для неразрушающего контроля и исследования материалов. //Дефектоскопия, №5, 1980. С.16-23.

70. Кунченко В.В., Кудрявцева, Е.Е., Сапрыкин, Л.И. и др. О взаимосвязи структурного состояния материала и характера акустической эмиссии, возникающей при деформации сосредоточенной нагрузкой. // Дефектоскопия, №3, 1994. С. 24-28.

71. Муравин Г.Б., Синкин, Я.В., Мерман, А.И. Идентификация механизма разрушения методами спектрального анализа сигналов акустической эмиссии.// Дефектоскопия, №1, 1989. С.36-47.

72. Пятыхин Л.И., Кунченко. В.В., Гурин, Е.П. и др. Обнаружение микротрещин в покрытиях методом акустической эмиссии.// Дефектоскопия №11, 1988. С.21-24.

73. Вайнберг В.Е., Клейман, А.Ш., Берман, С.Х. и др. Акустико-эмиссионный контроль газотермических покрытий. // Дефектоскопия, №7, 1990. С.32-34.

74. Новиков, Н.В., Лысенко, О.Г., Девин, Л.В. Диагностика разрушения поликристаллических сверхтвердых материалов методом АЭ.// Сверхтвердые материалы, №4, 1991. С.36-44.

75. Мокрицкий Б.Я., Верещагин В.Ю., Верещагина А.С. Моделирование как средство оптимизации геометрии металлорежущего инструмента // Металлообработка. 2018. №1. С. 14 - 19.

76. Мокрицкий Б.Я., Верещагин В.Ю., Верещагина А.С. Моделирование процесса резания с применением программы ANSYS// Вестник машиностроения, 2018. №4, с. 69 – 72.

77. C. Espinosa. Modeling High Speed Machining the SPH Meihod //10 International LS-DYNA Users Conference, June 8-10, 2008/ Dearborg, Michigan. USA: conference proceedings. – Dearborn. 2008. p/1-1 – 1-12.

78. Нарыжный А.Г., Куценко Ю.М., Гром М.В., Степаненко Д.Р. Термомеханическая модель процесса резания резцом с износостойким покрытием //Авиационно-космическая техника и технологии. -2014, 35 (112). -С. 4 – 10. ISSN 1727-7337.

79. Кривцов В.С., Нарыжный А.Г. Механико-математическое моделирование технологических систем //Технологические системы. -2012. Вып.4 (61). –С. 51-60.

80. Олейник А.П., Михайлов С.В. Моделирование процесса формирования сливной стружки с учётом термо-механической нагрузки //Вестник Костромского государственного университета. – Кострома. -2008. №17.-С.68-72.

81. Волков Д.И., Проскуряков С.Л. Разработка модели процесса резания с учётом цикличности формирования стружки //Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – Уфа. -2011. Т.15, №3943). – С.72-78.

82. Бурков П.В., Стефанов Ю.П. Динамическое численное моделирование напряжённо-деформированного состояния обрабатываемого изделия и стружки //Вестник Томского государственного педагогического университета. Томск. – 2004. №6(43). –С. 76-80.

83. Залого В.А., Криворучко Д.В., Хвостик С.Н. Имитационная модель прямоугольного свободного резания //Вестник Сумского университета. Сумы. 2005. Вып.11(83). –С.55-66.

84. Корендяев Г.К. О конечно-элементном моделировании процесса обработки металлов резанием (часть 2) // Вестник научно-технического развития. 2015. №3 (91). –С.14 – 24. www.vntr.ru.

85. T. Ozel and N. Altan. Determination of Workpiece From Stress and Friction at the Chip-Tool Contact for High-Speed Cutting. *Inter. J. Mach. Manuf.*, vol.40, no. 1. Pp.133-152. 2000.

86. Антонов А.С., Криворучко Д.В., Банников А.И. Имитационная модель стружкообразования при резании горячего металла методом конечных элементов // *Известия ВолгГТУ*. -2013. №6. –С. 7-9.

87. Шашок А.В. Оценка надёжности функционирования режущего инструмента на операциях токарной обработки // *Вестник машиностроения*. 2002. №9. –С.60 – 63. ISSN 0042-4633.

88. Применение специализированного программного комплекса DEFORM в курсовом проектировании / сост. Б.В. Каргин, Я.А. Ерисов. – Самара: СГАУ, 2010. – 28 с.

89. Практическое руководство к программному комплексу Deform-3D : : учебное пособие / В.С. Сергеев, А.С. Особенности построения математической модели расчета параметра шероховатости при многолезвийной обработке углеродистых сталей торцевыми фрезами / А.С. Сергеев, А.Л. Плотников, А.М. Макаров, Т.В. Уварова // Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, А.И. Пугин, А.А. Федулов. Екатеринбург: УрФУ, 2010. 266 с. ISBN 978-5-321-01772-2.

90. Корчевский В.В. Акустическая эмиссия при пластической деформации термически упрочнённой стали // *Физика металлов и материаловедение*. 1992. №1. –С.137-144.

91. Мокрицкий Б.Я. Акустическая эмиссия как средство оценки и прогнозирования свойств инструмента // *Вестник машиностроения*. №10. 2010. –С.76-78.

92. Патент №1522913 Q01N29/00 на изобретение. Способ акустического контроля трещиностойкости изделий. Мокрицкий Б.Я., Кабалдин Ю.Г., Самашко Н.А., Тараев С.П., Селезнёв В.В. Оpubл. Бюл.3 от 2010 года.

93. Патент №2138038 G 01 N 29/14 на изобретение. Способ контроля физико-механических свойств изделия. Самашко Н.А., Мокрицкая Е.Б.,

Мокрицкий Б.Я., Филоненко С.Ф., Вахрушев О.М. Оpubл. Бюл.3 от 2010 года.

94. Патент №2138039 G 01 N 29/14 на изобретение. Способ контроля свойств и диагностики разрушения. Семашко Н.А., Мокрицкая Е.Б., Мокрицкий Б.Я., Филоненко С.Ф. Оpubл. Бюл.3 от 2010 года.

95. Мокрицкий Б.Я. Диагностика технологической системы резания по параметрам акустической эмиссии//Контроль. Диагностика. 2021.Т.24. №2. с.60 – 64.

96. Кривцов В.С., Нарыжный А.Г. Механико-математическое моделирование технологических систем //Технологические системы. -2012. Вып.4 (61). –С. 51-60.

97. Олейник А.П., Михайлов С.В. Моделирование процесса формирования сливной стружки с учётом термо-механической нагрузки //Вестник Костромского государственного университета. – Кострома. -2008. №17. -С.68-72.

98. Бурков П.В., Стефанов Ю.П. Динамическое численное моделирование напряжённо-деформированного состояния обрабатываемого изделия и стружки //Вестник Томского государственного педагогического университета. Томск. – 2004. №6(43). –С. 76-80.

99. Залого В.А., Криворучко Д.В., Хвостик С.Н. Имитационная модель прямоугольного свободного резания //Вестник Сумского университета. Сумы. 2005. Вып.11(83). –С.55-66.

100. Криворучко Д.В. Моделирование процессов резания методом конечных элементов : методологические основы : монография / Д.В. Криворучко, В.А. Залого; под общ. Ред. В.А. Залого.- Сумы.: Университетская книга. 2012. – 496 с.

101. Мокрицкий Б.Я., Бурков А.А. К вопросу о выборе эффективного металлорежущего инструмента для токарной обработки твёрдых сплавов низшей групп// Технология машиностроения, 2011, №12, стр.18-20

102. Мокрицкий Б.Я., Бурков А.А. Архитектурование покрытий как один из факторов концепции многостадийного упрочняющего воздействия на металлорежущий инструмент // Упрочняющие технологии и покрытия, №3, 2012, с.42-48.

103. ГОСТ 5632-72 Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки.

104. Мокрицкий Б.Я., Верещака А.А., Белых С.В., Мокрицкая Е.Б. Упрочнение сложносоставными покрытиями режущих пластин для обработки коррозионностойкой стали 09X17H7Ю// Упрочняющие технологии и покрытия, 2016, №5, стр. 3-6.

105. Мокрицкий Б.Я., Высоцкий В.В., Соболев Е.Ю., Дроздов К.Ю. Методики и некоторые результаты применения метода акустической эмиссии для оценки эксплуатационных свойств инструментальных материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2012, №7, с.37-42.

106. Мокрицкий Б.Я. Акустическая эмиссия как средство оценки и прогнозирования свойств инструментальных материалов //Вестник машиностроения. №10, 2010, с.76-78.

107. Верещагина А.С., Мокрицкий Б.Я. Диагностика и управление процессом резания на основе критериев нелинейной динамики. Стр. 180-227. Коллективная монография: / А.С. Верещагина, А.П. Возняковский, Т.Ф. Григорьева, О.Н. Кирилов, А.М. Козлов, А.А. Козлов, В.А. Лиопо, А.В. Мандыркин, Б.Я. Мокрицкий, А.В. Морозова, Е.В. Овчиников, В.А. Панайоти, Д.И. Петрешин, С.А. Попов, Д.А. Прушак, А.Ю. Рязанцев, О.В. Скрыгин, В.П. Смоленцев, В.А. Струк, С.Ю. Съянов, О.Н. Федонин, А.В. Хандожко, Е.И. Эйсымонт,; Под ред. А.В. Киричека. –М.: Издательский дом «Спектр», 2015. – 464 с. ISBN 978-5-4442-0088-9. DOI 10.14489/4442-0088-9.

108. Мокрицкий Б.Я. Применение покрытий для создания инструментальных материалов : моногр. /Б.Я. Мокрицкий, Е.В. Безолукова, Э.С. Ситамов. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – 118 с. ISBN 978-5-7765-1307-7.

109. Мокрицкий Б.Я., Савин Д.А., Конюхова Я.В. Имитационное моделирование рационального металлорежущего инструмента : монография / Б.Я. Мокрицкий, Д.А. Савин, Я.В. Конюхова. – Старый Оскол : ТНТ, 2020. – 172 с. ISBN 978-5-94178-687-9.

110. Мокрицкий Б.Я., Ситамов Э.С. Концептуальные проблемы разработки и упрочнения лезвийного металлорежущего инструмента : монография /Б.Я. Мокрицкий, Э.С. Ситамов. – Москва : РУСАЙНС, 2020. – 166 с. ISBN 978-5-4365-5890-5.

111. Мокрицкий Б.Я., Верещака А.А., Белых С.В., Мокрицкая Е.Б. Упрочнение сложносоставными покрытиями режущих пластин для обработки коррозионностойкой стали 09X17H7Ю// Упрочняющие технологии и покрытия, 2016, №5, стр. 3-6.

112. Мокрицкий Б.Я. Инструментальное обеспечение современных машиностроительных производств : моногр. /Б.Я. Мокрицкий, П.А. Саблин, А.А. Верещака. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2017. – 200 с. ISBN 978-5-7765-1201-8

113. ГОСТ 19086-80. Пластины сменные многогранные твёрдосплавные. Технические условия (с Изменениями №1-6). (Межгосударственный стандарт). М.: Стандартинформ, 2006.

114. ГОСТ 19049-80. Пластины режущие сменные многогранные твёрдосплавные квадратной формы. Конструкция и размеры (с Изменениями N 1, 2). (Межгосударственный стандарт) М.: Стандартинформ, 2006.

115. ГОСТ 19051-80. Пластины режущие сменные многогранные твёрдосплавные квадратной формы с отверстием. Конструкция и размеры (с Изменениями 1 и 2). (Межгосударственный стандарт) М.: Стандартинформ, 2006.

116. ГОСТ 19085-80. Пластины режущие сменные многогранные твёрдосплавные квадратной формы. Конструкция и размеры (с Изменениями 1 и 2) (Межгосударственный стандарт) М.: Стандартинформ, 2006.

117. ГОСТ 19050-80. Пластины режущие сменные многогранные твёрдосплавные квадратной формы с задним углом 11° . Конструкция и размеры (с Изменениями 1, 2 и 3) (Межгосударственный стандарт) М.: Стандартинформ, 2006.

118. ГОСТ 24248-80. Пластины режущие сменные многогранные твёрдосплавные квадратной формы. Конструкция и размеры (с Изменениями 1, 2 и 3) (Межгосударственный стандарт) М.: Стандартинформ, 2006.

119. ГОСТ 24253-80. Пластины режущие сменные многогранные твёрдосплавные квадратной формы с задним углом 20° . Конструкция и размеры (с Изменениями 1, 2 и 3) (Межгосударственный стандарт) М.: Стандартинформ, 2006.

120. ГОСТ 19063-80. Пластины режущие сменные многогранные твёрдосплавные пятигранной формы. Конструкция и размеры (с Изменением 1) (Межгосударственный стандарт) М.: Стандартинформ, 2006.

121. Мокрицкий Б.Я., Панова Е.А., Козлова М.А., Саблин П.А. К вопросу об управлении работоспособностью металлорежущего инструмента: учёт влияния нестационарности стружкообразования и динамического качества станка на работоспособность инструмента// Учёные записки КНАГТУ, 2015, №1-1(21), с.56-60. ISBN 2076-4359

122. Инженерия поверхности деталей / кол. авт.; под ред. А.Г. Сулова.- М.: Машиностроение, 2008.-320 с.

123. Дёмкин, Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б.Дёмкин, Э. В. Рыжов. –М.: Машиностроение, 1981. –244 с.

124. Сулима, А. М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных сплавов / А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев. –М.: Машиностроение, 1974. –256 с.

125. Шнейдер Ю.Г. Технология финишной обработки давлением: Справочник. СПб.: Политехника, 1998. 414 с.

126. Безъязычный, В. Ф. Метод подобия в технологии машиностроения/ В.Ф. Безъязычный. –М.: Машиностроение, 2012. -320 с.

127. Гайнуллина, Р. Р. Галямов, В. В. Кузьмин, А. В. Чупаев. Влияние шероховатости рабочей поверхности расходомерного сопла на величину коэффициента истечения //Вестник Казанского технологического университета. Том 16 (4). 2013. С. 209-211.

128. Безъязычный В.Ф., Прокофьев М.А., Филиппова А.В. Взаимосвязь параметров шероховатости и наклёпа в поверхностном слое деталей, обработанных точением// Вестник Брянского технического университета, №3 (47). 2015. С.15 – 18.

129. ГОСТ 9378-93 (ИСО 2632-1-85, ИСО 2632-2-85) Образцы шероховатости поверхности (сравнения). Общие технические условия. Межгосударственный стандарт (взамен ГОСТ 9378-75).

130. Остапчук А.К., Симонов А.М., Рогов Е.Ю., Грохотов Ю.В. К вопросу моделирования профиля шероховатости поверхности деталей// Курганский институт железнодорожного транспорта – филиал УрГУПС. №1, 2011. С. 107-108.

131. Григорьев С.Н., Табаков В.П., Волосова М.А. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента: монография / С.Н. Григорьев, В.П. Табаков, М.А. Волосова. – Старый Оскол: ТНТ, 2011, - 380 с.

132. Alexey Vereschaka, Boris Mokritskii, Elena Mokritskaya, Oleg Sharipov and Maksim Oganyan. Two-component end mills with multilayer composite nano-structured coatings as a viable alternative to monolithic carbide end mills //Mechanics & Industry 18, 705 (2017), © AFM, EDP Sciences 2017, <https://doi.org/10.1051/meca/2017052>. С. 77 – 98.

133. Мокрицкий Б.Я., Серебренникова А.Г. Результаты сравнительного исследования работоспособности режущих инструментов при обработке специализированных нержавеющей сталей// Вестник ИрГТУ Том 22, №12 2018/ PROCEEDINGS of ISTU Vol. 22, №12 2018 ISBN 1814 – 3520 DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-96-103>.

134. Мокрицкий Б.Я., Ситамов Э.С., Верещагин В.Ю., Шакирова О.Г.

Управление выбором упрочнённого инструмента на основе моделирования в программной среде DEFORM.//Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Том 15, №6. С.249 – 251.

135. Alexey Vereschaka, Maksim Oganyan , Yuri Bublikov, Nikolay Sitnikov, Konstantin Deev , Vladimir Pupchin and Boris Mokritskii. Application of nanostructured Zr-ZrN-(Zr,Al)N and Zr-ZrN-(Zr,Cr,Al)N coatings for improvement of tool life and performance in end milling of carbides. IC-CMTP. IOP Publishing. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 613 (2019) 012020. doi:10.1088/1757-899X/613/1/012020.

136. Зорев, Н.Н. Обработка сталей твердосплавным инструментом в условиях прерывистого резания/ / Вестник машиностроения, № 2, 1963, с.34-36.

137. Синопальников, В.А., Гурин, В.Д. Температурное поле в режущем клине инструмента при прерывистом резании. // Вестник машиностроения. 1981, № 4, с.44-47.

138. Остафьев, В.А. Расчет динамической прочности режущей части инструмента. - М.: Машиностроение, 1979, - 168 с.

139. Кабалдин, Ю.Г. Принципы конструирования композиционных инструментальных материалов с повышенной работоспособностью. - Владивосток, ДВО АН СССР, 1990, - 58 с.

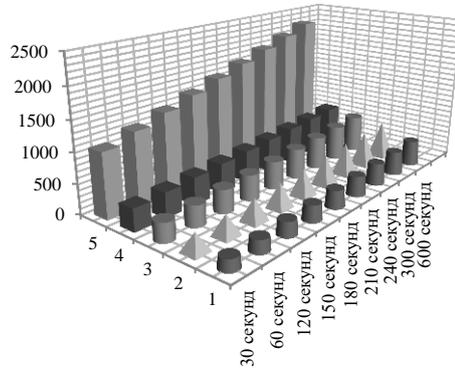
140. Петрушин С.И. Стружкообразование с развитой зоной пластических деформации при резании металлов/ Известия Томского политехнического университета. 2009. Т.314. №2, с. 62.

141. Петрушин С.И. Основы формообразования резанием лезвийными инструментами. – Томск: Изд-во ТПУ. 2004. – 204 с.

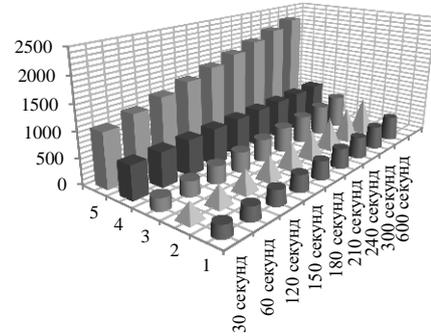
ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. Иллюстрация взаимосвязи изменения во времени применительно к разным инструментальным материалам

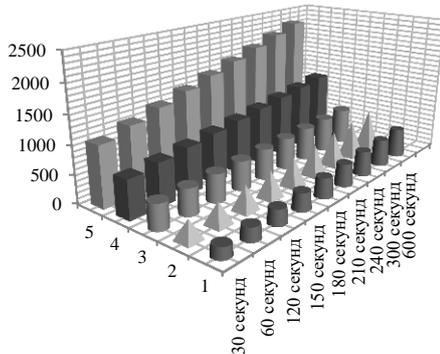
а



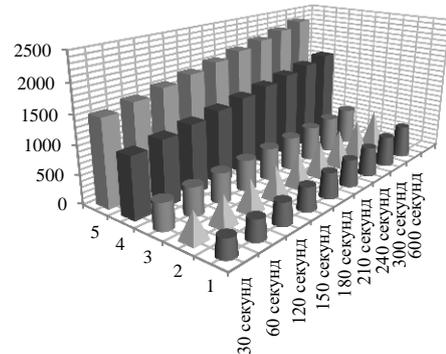
б



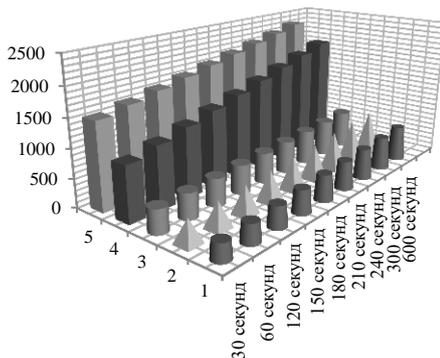
в



г



д



е

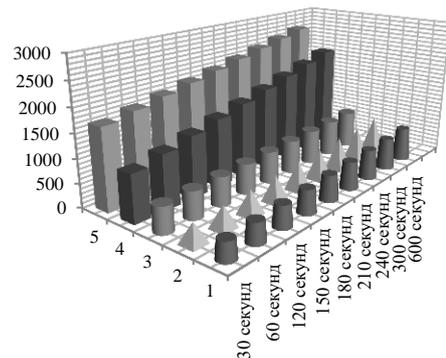
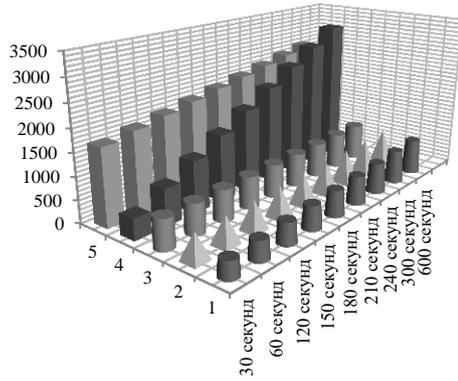
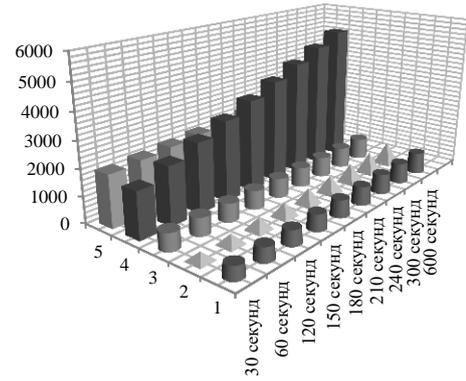


Рисунок А – Иллюстрация взаимосвязи изменения во времени (600 секунд) применительно к разным инструментальным материалам: 1 - величины износа инструмента; 2 – температуры в зоне резания; 3 – эквивалентных напряжений в инструментальном материале; 4 – максимальной составляющей силы резания (её значения в ньютонах показаны на вертикальной оси), а именно для инструментальных материалов; 5 – величины деформации инструментального материала), а именно для инструментальных материалов: **а** - $\text{VK8} + \text{TiCN}(5\text{мкм}) + (\text{TiAl})\text{N}(3\text{мкм}) + \text{Al}_2\text{O}_3(5\text{мкм}) + \text{TiC}(5\text{мкм})$; **б** - $\text{VK8} + \text{Al}_2\text{O}_3(2\text{мкм}) + (\text{Ti})\text{CN}(5\text{мкм}) + (\text{TiAl})\text{N}(3\text{мкм}) + \text{TiN}(3\text{мкм})$; **в** - $\text{VK8} + (\text{TiAl})\text{N}(3\text{мкм}) + \text{Al}_2\text{O}_3(3\text{мкм}) + (\text{TiAl})\text{N}(3\text{мкм}) + \text{Al}_2\text{O}_3(3\text{мкм})$; **г** - $\text{VK8} + \text{TiN}(3\text{мкм}) + \text{TiC}(3\text{мкм}) + \text{TiN}(3\text{мкм}) + \text{TiC}(3\text{мкм})$; **д** - $\text{VK8} + \text{TiC}(3\text{мкм}) + \text{TiN}(3\text{мкм}) + (\text{TiAl})\text{N}(2\text{мкм})$; **е** - $\text{VK8} + \text{TiCN}(2\text{мкм}) + \text{TiC}(3\text{мкм}) + \text{TiN}(1,5\text{мкм})$;

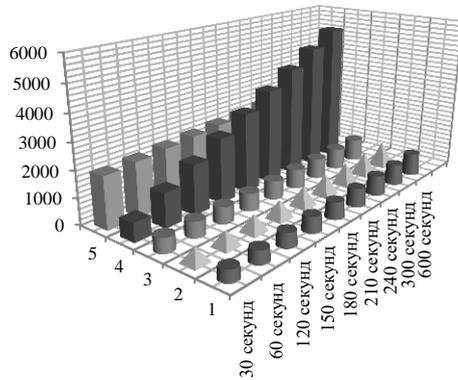
ё



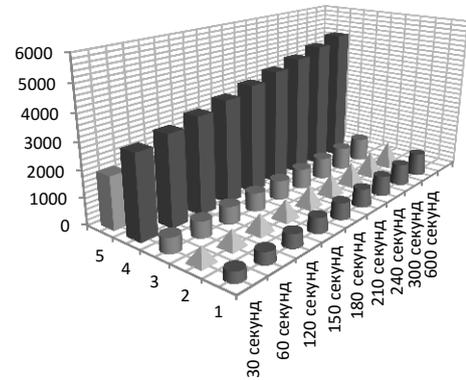
ж



з



и



к

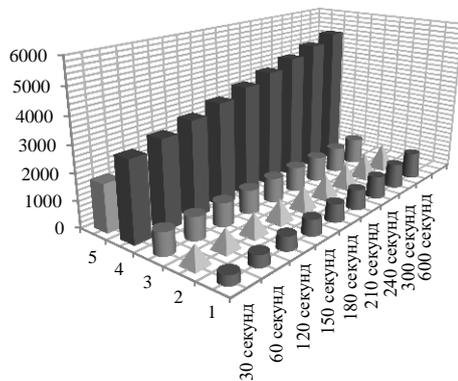


Рисунок А – Иллюстрация взаимосвязи изменения во времени (600 секунд) применительно к разным инструментальным материалам: 1 - величины износа инструмента; 2 – температуры в зоне резания; 3 – эквивалентных напряжений в инструментальном материале; 4 – максимальной составляющей силы резания (её значения в ньютонах показаны на вертикальной оси), а именно для инструментальных материалов; 5 – величины деформации инструментального материала), а именно для инструментальных материалов: **ё** - BK8 + TiC(1,5 мкм) + TiN(3мкм); **ж** - BK8 + TiN(2мкм) + TiC(5мкм); **з** - BK8 + TiCN(0,5мкм) + TiN(1мкм); **и** - BK8 + TiN(0,5мкм) + TiC(1мкм); **к** – BK8

Приложение 2. Акты принятия результатов исследования в производство

Общество с ограниченной ответственностью
ООО "Композит-ДВ"
681010, Хабаровский край,
г.Комсомольск-на-Амуре,
ул. Парижской Коммуны, д.26/2
ИНН 2703058390 • КПП 270301001

Справка о принятии научно-технических результатов к использованию

Настоящим подтверждается, что в организацию ООО «Композит-ДВ» (681010, г.Комсомольск-на-Амуре, ул. Парижской Коммуны, д.26,к.2) приняты к использованию рекомендации, разработанные Ситамовым Э.С. по выбору эффективных токарных резцов и их сменных твёрдосплавных пластин для продольного точения труднообрабатываемой специализированной нержавеющей стали марки 09X17H7Ю. В основу этих рекомендаций положены результаты экспериментального исследования работоспособности сменных типовых пластин отечественной номенклатуры (материал ВК8 с 10 различными покрытиями) и результаты имитационного моделирования оптимальных параметров режима резания.

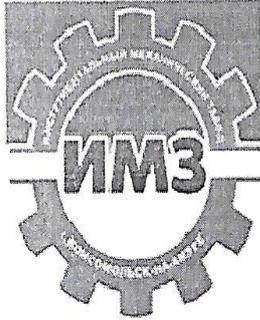
Рекомендации по использованию переданы на предприятие в виде автореферата кандидатской диссертации Ситамова Э.С.

Данный документ не является основанием для выплаты вознаграждения авторам рекомендаций.

Директор ООО «Композит-ДВ»



А.С. Мешков



**Общество с ограниченной ответственностью
«Инструментальный механический завод»**

681008, РФ, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Культурная, 1
 • ИНН 2703088436 • КПП 270301001 • ОГРН 1162724054569
 E-mail: imzkms@mail.ru

Исх. № 55-01/64 от « 25 » мая 2020г



Утверждаю

Генеральный директор

О.В. Довгаль

Справка

о принятии научно-технических результатов к использованию

Настоящим подтверждается, что в предприятие ООО «Инструментальный механический завод» (681008, РФ, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Культурная, 1) приняты к использованию рекомендации, разработанные научно-технической группой в составе Ситамов Э.С. и Мокрицкий Б.Я., относящиеся к выбору и проектированию рациональных инструментальных материалов при обработке труднообрабатываемых нержавеющей сталей.

Рекомендации приняты в виде автореферата кандидатской диссертации Ситамова Э.С.

Данный документ не является основанием для выплаты вознаграждения авторам рекомендаций.

Ведущий технолог

Ларионов Ю.В.

Приложение 3. Акт принятия результатов исследования в учебный процесс



Проректор ФГБОУ ВО «КНАГУ»

Т.Е. Наливайко

АКТ № 4 от 02 июля 2020

внедрения научных результатов в учебный процесс

Настоящий акт свидетельствует о том, что научные результаты, полученные аспирантом Ситамовым Э.С. при выполнении выпускной работы аспиранта и диссертации, приняты к внедрению в учебный процесс кафедры «Машиностроение» в виде лекции (её раздела) и лабораторной работы по дисциплинам «Металлорежущий инструмент» и «Методология и организация научных исследований». Принятые к внедрению материалы относятся к совершенствованию металлорежущего инструмента, инструментального материала и параметров режима резания применительно к токарной обработке труднообрабатываемой специализированной нержавеющей стали марки 09X17H7Ю.

Указанные материалы имеют апробацию (опубликованы в нескольких отечественных и зарубежных базах в виде статей, а также в виде двух монографий).

Лекция и лабораторная работа размещены на сайте университета.

Проректор

Декан факультета

Заведующий кафедрой

А.В. Космынин

П.А. Саблин

М.Ю. Сарилов