

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Братский государственный университет»;

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

На правах рукописи

**Лобанов Дмитрий Владимирович**

**РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕТОДОВ  
СОЗДАНИЯ, ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ВЫБОРА ФРЕЗЕРНОГО  
ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ОБРАБОТКИ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.02.07 - «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»

диссертация

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:  
доктор технических наук,  
профессор Янюшкин  
Александр Сергеевич

Новосибирск – 2013

## Оглавление

Список сокращений .....	7
ВВЕДЕНИЕ .....	8
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕОРИИ В ОБЛАСТИ СОВРЕМЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И СПЕЦИФИКА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ИХ ОБРАБОТКИ .....	16
1.1. Анализ современных композиционных материалов. Область применения и перспективы использования.....	16
1.1.1. Структура и классификация некоторых видов современных композиционных материалов .....	17
1.1.2. Композиционные материалы на древесной основе .....	24
1.1.3. Полимерные композиционные материалы.....	34
1.2. Особенности процесса резания композиционных материалов .....	37
1.3. Инструмент для обработки композиционных материалов и пути его совершенствования (на примере фрезерного инструмента) .....	41
1.3.1. Конструктивные особенности инструментов для обработки композиционных материалов .....	41
1.3.2. Инструментальные материалы, применяемые для изготовления инструмента для обработки композиционных материалов .....	44
1.3.3. Методы и способы повышения работоспособности инструмента.....	51
1.3.4. Организация системы инструментального обеспечения на предприятиях .....	55
Выводы по 1 главе: .....	63
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СБОРНОГО ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВАРЬИРУЕМЫХ УСЛОВИЯХ СОПОСТАВИМОСТИ.....	67

2.1. Основные принципы автоматизации процесса выбора и систематизации режущего инструмента.....	68
2.2. Разработка методологии моделирования и систематизации сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов.....	76
2.3. Теоретические положения для создания методики сравнительного анализа конструкций инструмента при варьируемых условиях сопоставления.....	88
2.4. Создание единой автоматизированной системы для формирования базы данных и многокритериального сравнительного анализа конструкций сборного фрезерного инструмента .....	92
2.5. Разработка инженерной методики обоснования использования нового программного обеспечения для выбора рациональной конструкции инструмента .....	103
Выводы по 2 главе: .....	106
<b>ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И УСЛОВИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	109
3.1. Причины потери режущей способности режущего инструмента при обработке композиционных материалов .....	111
3.2. Анализ традиционных способов изготовления и восстановления твердосплавного инструмента для обработки композиционных материалов ...	115
3.3. Исследование процесса потери режущей способности алмазных кругов на металлической связке при шлифовании твердого сплава .....	127
3.3.1. Исследование эталонной поверхности алмазного круга .....	129
3.3.2. Исследование поверхности алмазного круга на металлической связке в процессе обработки твердого сплава .....	133
3.4. Моделирование напряженно-деформированного состояния в пластине режущего элемента из инструментального твердого сплава группы ВК ( <i>WC-Co</i> ) при алмазном затачивании .....	142
Выводы по 3 главе: .....	201

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	205
4.1. Прогрессивные методы и технологий изготовления (восстановления) твердосплавного инструмента для обработки композиционных материалов ...	206
4.2. Выявление рациональных электрических режимов комбинированной электроалмазной обработки.....	209
4.3. Влияние методов электроалмазной обработки на расход алмазного абразивного инструмента.....	222
4.4. Влияние методов электроалмазной обработки на изменение мощности резания при шлифовании .....	227
4.5. Микротвердость обработанной поверхности после различных методов электроалмазной обработки.....	231
4.6. Влияние методов электроалмазной обработки на шероховатость обработанной поверхности .....	234
4.7. Исследование состояния твердосплавных режущих инструментов для обработки композиционных материалов, заточенных различными методами электроалмазной обработки .....	238
4.7.1. Состояние поверхностей и режущей кромки твердосплавных инструментов, заточенных традиционным алмазным шлифованием .....	240
4.7.2. Состояние поверхностей и режущей кромки твердосплавных инструментов, заточенных электрохимическим алмазным шлифованием....	245
4.7.3. Состояние поверхностей и режущей кромки твердосплавных инструментов, заточенных алмазным шлифованием с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга .....	250
4.7.4. Состояние поверхностей и режущей кромки твердосплавных инструментов, заточенных комбинированным методом электроалмазной обработки .....	255

4.8. Разработка инженерной методики сравнительного анализа методов комбинированной электроалмазной обработки по экономическим и качественным параметрам .....	261
Выводы по 4 главе: .....	265
<b>ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ФРЕЗЕРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ .....</b>	<b>269</b>
5.1. Работоспособность фрезерного инструмента, оснащенного твердыми сплавами при обработке композиционных материалов на древесной основе ..	269
5.1.1. Влияние марки твердого сплава на работоспособность фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов на древесной основе .....	273
5.1.2. Влияние режимов резания и геометрии режущего элемента на работоспособность инструмента при обработке композиционных материалов на древесной основе .....	281
5.1.3. Влияние режимов резания и геометрии режущего элемента на качество обработанной поверхности композиционных материалов на древесной основе .....	289
5.2. Работоспособность фрезерного инструмента, оснащенного твердыми сплавами при обработке полимерных композиционных материалов .....	297
5.2.1. Зависимость работоспособности инструмента от режимов обработки при фрезеровании полимерных композиционных материалов .....	300
5.2.2. Зависимость качества обработанной поверхности и мощности резания от режимов обработки при фрезеровании полимерных композиционных материалов .....	306
Выводы по 5 главе: .....	315
<b>ГЛАВА 6. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....</b>	<b>317</b>

6.1. Рекомендации по конструктивным решениям сборного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов .....	317
6.2. Выбор инструментальных материалов, геометрии инструмента и режимов для обработки композиционных неметаллических материалов .....	322
6.3. Рекомендации по реализации методик моделирования и сравнительного анализа режущего инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов .....	325
6.4. Реализация комбинированной технологии изготовления (восстановления) твердосплавного режущего инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов .....	333
6.5. Перспективы дальнейшего развития тематики исследования .....	342
Выводы по 6 главе: .....	347
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	350
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	354
Приложения .....	382

## Список сокращений

КМ – композиционные материалы.

ДПКТ - древесно-полимерные композиты.

ПКМ – полимерные композиционные материалы.

СОТС – смазочно-охлаждающие технологические среды.

СОЖ - смазочно-охлаждающие жидкости.

ВК - однокарбидные вольфрамкобальтовые твёрдые сплавы.

ТК - двухкарбидные титановольфрамовые твёрдые сплавы.

БВТС - безвольфрамовые твёрдые сплавы.

ПК – персональный компьютер

САПР – система автоматизированного проектирования.

АСУ – автоматизированная система управления.

ТП – технологический процесс.

CAD – computer-aided design (компьютерная поддержка конструирования).

CAM – computer-aided manufacturing (компьютерная поддержка изготовления).

CAPP – computer-aided process planning (компьютерная поддержка планирования технологических процессов).

СУБД – система управления базами данных.

СБД – система баз данных.

БД – база данных.

ЭАШ – электроалмазное шлифование.

## ВВЕДЕНИЕ

Среди требований, предъявляемых к современным конструкционным материалам можно назвать снижение массы, увеличение жесткости и прочности, максимальный ресурс изготавливаемых изделий в различных условиях эксплуатации, высокая надежность создаваемых из таких материалов конструкций. Перечисленные требования, как правило, обеспечиваются на стадиях выбора материала и совершенствования технологии изготовления изделий. Тенденции развития промышленности направлены на переход к применению в качестве конструкционных материалов, отвечающих комплексу перечисленных требований, композиционных материалов.

В последнее время значительно увеличилась доля использования композитов в машиностроении, автомобилестроении, энергетике, судостроении, деревообработке, станкостроении, строительстве, ракетной, аэрокосмической, химической и нефтяной промышленности. Достижения в области применения изделий из композиционных материалов во многом зависят от совершенствования технологий производства элементов различных конструкций из композиционных материалов.

В связи с этим, одним из перспективных направлений развития научно-технического комплекса страны является повышение эффективности обработки современных композиционных материалов лезвийным инструментом с целью расширения области их использования. Появляется необходимость в исследовании методов и способов повышения работоспособности инструмента, создания новых конструктивных решений, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, отыскания рациональных условий его эксплуатации с обеспечением требуемого качества изготавливаемой продукции. Актуальной становится проблема эффективной и качественной технологической подготовки режущего инструмента для обработки композиционных материалов.

**Целью данной работы является** повышение эффективности фрезерной обработки композиционных неметаллических материалов за счет разработки и

реализации технологических методов создания, изготовления и выбора режущего инструмента.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **задачи исследования:**

1. Для выявления характера структурных связей в системе сборного инструмента и математического описания конструктивных и геометрических особенностей провести моделирование фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов. Определить характерные структурные параметры инструмента и, на их основе, создать программные продукты, ориентированные на систематизацию номенклатуры сборного фрезерного инструмента для обработки изделий из композиционных материалов.

2. Разработать методику многокритериального сравнительного анализа конструктивных решений инструмента, предназначенную для выбора рациональной конструкции с учетом параметров, характеризующих инструмент, и варьируемых условий реализации процесса лезвийной обработки, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества и экономичности обработки. Создать единый программный комплекс для формирования базы данных и выбора рациональной конструкции сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов.

3. Спроектировать новые конструкции сборного фрезерного инструмента, отличающиеся повышенной работоспособностью при обработке композиционных материалов. Выявить инструментальные материалы, обеспечивающие рациональную технологию фрезерной обработки изделий из композиционных неметаллических материалов.

4. Разработать технологию и условия комбинированной электроалмазной обработки при формообразовании режущих элементов инструментов, оснащенных инструментальными материалами с повышенными эксплуатационными свойствами. Сформулировать рекомендации для реализации предложенной технологии.

5. Исследовать процесс обработки композиционных неметаллических мате-

риалов инструментом, подготовленным с учетом рекомендаций по созданию, изготовлению и анализу конструктивных решений. Получить аналитические зависимости, характеризующие влияние геометрии режущего инструмента и режимов резания на качество и производительность обработки изделий из композиционных материалов инструментом, оснащенным инструментальными материалами с повышенными эксплуатационными свойствами.

6. Разработать рекомендации по реализации системы мероприятий, направленных на повышение эффективности фрезерного инструмента при обработке композиционных неметаллических материалов.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Разработаны теоретические положения и научно обоснована система мероприятий, методов и технологий, направленных на повышение эффективности обработки композиционных неметаллических материалов фрезерным инструментом.

2. Предложена методология моделирования и многокритериального сравнительного анализа конструкций сборного фрезерного инструмента при варьируемых условиях сопоставимости, направленная на повышение производительности создания и выбора режущего инструмента для оснащения технологических процессов обработки изделий из композиционных неметаллических материалов.

3. Научно обоснованы и подтверждены результатами экспериментальных исследований разработанные физические, математические модели и аналитические зависимости, характеризующие технологию формообразования режущих элементов твердосплавного инструмента комбинированными методами электроалмазной обработки, а также процесс механической обработки композиционных неметаллических материалов фрезерным инструментом.

**Практическая ценность работы** заключается в следующем:

1. Созданы программные продукты для систематизации сборного инструмента и анализа конструктивных решений на основе значимых варьируемых критериев, с учетом имеющейся базы данных, позволяющие значительно сократить время на поиск и обработку информации по конструктивным

решениям инструмента; упростить процесс составления, редактирования и хранения базы данных инструментов; автоматизировать работу конструкторов и технологов; проводить сравнительный анализ вариантов конструкций инструмента для принятия синтезированных конструктивных решений при варьируемых условиях сопоставимости.

2. Спроектированы новые конструкции сборного фрезерного инструмента, позволяющие увеличить его технологические возможности и повысить адаптивность при изменяющихся условиях обработки; снизить расход инструментальных материалов и простои, связанные с переналадкой инструмента, его заменой при потере режущей способности, что сказывается на повышении производительности обработки и качестве выпускаемой продукции.

3. Разработаны рекомендации по модернизации технологического оборудования для реализации технологии комбинированного электроалмазного затачивания режущих инструментов, оснащенных инструментальными материалами с повышенными эксплуатационными свойствами, позволяющие повысить эффективность изготовления (восстановления) инструмента.

4. Сформулированы рекомендации по реализации системы мероприятий, направленных на повышение эффективности обработки композиционных неметаллических материалов фрезерным инструментом.

#### **Методология и методы исследования.**

В основе научных результатов лежат фундаментальные положения технологии машиностроения, теории резания, физики твердого тела, теории графов, теории планирования эксперимента; численные методы решения систем дифференциальных уравнений, статистической обработки экспериментальных данных и регрессионного моделирования. Экспериментальные исследования проводились с использованием оптической, растровой, сканирующей зондовой микроскопии, оптической интерферометрии, спектрального и рентгеноструктурного анализа.

#### **На защиту выносятся:**

- решение научной проблемы повышения работоспособности фрезерного инструмента, качества и экономичности обработки композиционных неметалли-

ческих материалов;

- методология моделирования и многокритериального сравнительного анализа конструкций сборного фрезерного инструмента при варьируемых условиях сопоставимости;

- программные продукты для систематизации сборного инструмента и выбора из базы данных рациональной конструкции на основе значимых критериальных показателей;

- физические и математические модели, характеризующие процесс формообразования режущих элементов инструмента комбинированными методами электроалмазной обработки, рациональные режимы и условия затачивания, обеспечивающие гарантированное качество твердосплавного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов;

- аналитические зависимости, характеризующие процесс механической обработки композиционных неметаллических материалов фрезерным инструментом, рациональные параметры инструмента и режимы обработки композиционных неметаллических материалов;

- рекомендации по реализации системы мероприятий, направленных на повышение эффективности фрезерного инструмента при обработке композиционных неметаллических материалов.

**Результаты работы** апробированы и внедрены на предприятиях машиностроительного и деревообрабатывающего комплексов Иркутской области (ОАО «БЗСИ», ЗАО «БДЗ», ООО «Сибирская лесная компания», ООО Фирма «Савва Сервис»), Красноярского края (ОАО «СибНИИСтройдормаш», ФГУП ЦКБ «Геофизика») и Республики Монголия (НИиПО электронной техники и машиноведения). Отдельные научные результаты используются в учебном процессе Братского государственного университета (ФГБОУ ВПО «БрГУ», Россия) и Инженерно-механического института (МГУНТ, Монголия).

Диссертация состоит из введения, шести глав, основных выводов и результатов работы, списка использованной литературы и приложений.. Во введении обосновывается актуальность работы и представлена общая характеристика диссертации. Сформулированы цель, задачи исследования, научная новизна и прак-

тическая ценность работы.

В первой главе рассмотрен аналитический обзор по теме диссертации, приведен анализ современных композиционных материалов и рассмотрена специфика инструмента для их обработки.

Во второй главе представлены этапы разработки методологии моделирования сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов и сравнительного анализа конструкций инструмента при варьируемых условиях сопоставимости. Описана методология моделирования сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов и систематизации режущего инструмента на предприятиях. Рассмотрены теоретические положения для создания методики сравнительного анализа конструкций инструмента при варьируемых условиях сопоставления. Отражены этапы разработки единой автоматизированной системы для формирования базы данных и многокритериального сравнительного анализа конструкций сборного фрезерного инструмента.

В третьей главе представлены результаты исследований методов и условий формообразования режущих элементов твердосплавного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов. Разобраны причины потери режущей способности режущего инструмента при обработке композиционных материалов. Проанализированы традиционные способы изготовления и восстановления инструмента для обработки композиционных материалов. Исследован процесс потери режущей способности алмазных кругов на металлической связке при шлифовании твердого сплава. Разработана физико-математическая модель напряженно-деформированного состояния в пластине из инструментального материала (WC-Co) при алмазном затачивании.

В четвертой главе представлены результаты разработки и исследований комбинированных методов изготовления и восстановления твердосплавного режущего инструмента для обработки композиционных материалов. С использованием оптической, растровой электронной, сканирующей зондовой микроскопии, оптической интерферометрии установлено преимущество комбинированного метода электрохимического алмазного шлифования с одновременной непрерывной электрохимической правкой поверхности алмазного круга при затачивании твер-

досплавного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов. Сформулированы рекомендации по методам, способам и условиям эффективного формообразованию режущей части твердосплавного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса обработки композиционных неметаллических материалов твердосплавным фрезерным инструментом. Оценена работоспособность фрезерного инструмента, оснащенного твердыми сплавами при обработке композиционных материалов на древесной основе и полимерных композиционных материалов. Исследовано влияние режимов резания и геометрии режущего элемента на производительность обработки и качество обработанной поверхности. Получены научно обоснованные модели процесса обработки композиционных неметаллических материалов фрезерным инструментом.

В шестой главе приведены практические рекомендации по повышению эффективности работы фрезерного твердосплавного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов. Оценены перспективы дальнейшего развития тематики исследований. Предложены новые конструктивные решения инструментов, позволяющие увеличить их технологические возможности и повысить адаптивность при изменяющихся условиях обработки; снизить расход инструментальных материалов и простои, связанные с переналадкой инструмента и его заменой при потере режущей способности. Представлены теоретико-экспериментальные исследования эффективности применения различных марок инструментальных материалов в конструкциях инструмента для обработки композиционных материалов.

Рассмотрен пример использования методик моделирования и сравнительного анализа сборного фрезерного инструмента на примере новых конструктивных решений с выходом на рациональное применение специализированного программного обеспечения для создания базы данных сборного инструмента и его обоснованного выбора при варьируемых производственных условиях.

Предложены рекомендации по модернизации имеющегося на предприятиях заточного оборудования под процессы комбинированной электроалмазной обработки. Приведены рекомендации по выбору технологических режимов обработки,

характеристик абразивного инструмента, специальной оснастки, состава технологических сред, для рациональной реализации предложенной технологии, ориентированной на обеспечение высокого качества режущих элементов инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов, оснащенного инструментальными материалами с повышенными эксплуатационными свойствами. Рассмотрены перспективы развития тематики исследований.

Сформулированы рекомендации по реализации системы мероприятий, направленных на повышение производительности и качества изготовления изделий из труднообрабатываемых композиционных неметаллических материалов, что позволяет значительно расширить область применения таких материалов в различных отраслях промышленности.

Работа над диссертацией выполнялась в соответствии с тематикой ряда государственных научно-исследовательских работ и грантов, в том числе:

1. Проект АВЦП № 2.1.2/5996 «Основные закономерности микроконтактных процессов комбинированной электроалмазной обработки композиционных и сверхтвердых материалов» выполняемый по заданию Рособразования по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2009 – 2011 годы)», г. Братск.

2. Грант в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы», г. Новосибирск.

3. Грант РФФИ 11-08-90709 «Исследование структуры и физико-механических свойств композиционных инструментальных материалов после комбинированной электроалмазной обработки», 2011 г, г. Томск

4. Тема 05-У-0619 «Повышение эффективности обработки высокопрочных и наноструктурированных материалов» 2008-2012, г. Братск.

# **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕОРИИ В ОБЛАСТИ СОВРЕМЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И СПЕЦИФИКА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ИХ ОБРАБОТКИ**

Несмотря на то, что композиты - известные материалы для различных отраслей промышленности, с развитием науки ежегодно интенсивно увеличивается количество создаваемых новых композиционных материалов с широкой гаммой свойств, отвечающих возрастающим требованиям, предъявляемым к готовым изделиям и конструкциям в разных отраслях промышленности (машиностроение, авиастроение, судостроение, вагоностроение, строительство, автомобильная промышленность, мебельная промышленность и т.д.).

## **1.1. Анализ современных композиционных материалов. Область применения и перспективы использования**

Развитие современных отраслей промышленности в значительной мере связано с использованием прогрессивных конструкционных материалов. Одним из развивающихся направлений в этой области является создание материалов, отвечающих высоким эксплуатационным и физико-химическим требованиям в сочетании с уменьшением массы и стоимости в сравнении с традиционными металлическими материалами.

В настоящее время одним из основных способов получения материалов с заданными свойствами является создание композиций на основе известных, широко используемых в практике веществ (минеральных вяжущих, полимеров и т.п.) и различных ингредиентов природного и синтетического происхождения. Необходимым требованием к комбинированию различных компонентов является создание нового материала более сложной структуры и с новым комплексом свойств при сохранении индивидуальности каждого компонента.

### **1.1.1. Структура и классификация некоторых видов современных композиционных материалов**

Композиционные материалы представляют собой металлические и неметаллические матрицы (основы) с заданным распределением в них упрочнителей (волокон, дисперсных частиц); при этом эффективно используются индивидуальные свойства составляющих композиции.

Важнейшими технологическими методами изготовления композиционных материалов являются: пропитка армирующих волокон матричным материалом; формование в пресс-форме лент упрочнителя и матрицы, получаемых намоткой; холодное прессование обоих компонентов с последующим спеканием; электрохимическое нанесение покрытий на волокна с последующим прессованием; осаждение матрицы плазменным напылением на упрочнитель с последующим обжатием; пакетная диффузионная сварка монослойных лент компонентов; совместная прокатка армирующих элементов с матрицей и другие.

Создание композиционных материалов преследует следующие цели: удешевление материалов, получаемых на основе комбинации тех или иных веществ с меньшей стоимостью, в сравнении с используемыми материалами; придание этим материалам желаемого комплекса свойств; снижение удельной массы; увеличение сроков старения. Следует обратить внимание на то, что никогда не удастся достичь всех указанных положительных свойств в одной композиции. Более того, достижение тех или иных желаемых свойств систем часто сопровождается и появлением отрицательных явлений, например, затруднениями в переработке композиций, что резко осложняет получение из них изделий, нежелательно изменяет некоторые физико-механические показатели системы.

В целом композиционный материал – гетерогенная система, состоящая из двух или более компонентов, взаимодействие которых на границе раздела фаз приводит к образованию межфазного слоя, придающего материалу новые свойства при сохранении индивидуальности каждого компонента [17, 19].

Наличие границы раздела фаз – основная характеристика, присущая только

композиционному материалу, придающая ему компактность, целостность и технологичность. Вблизи границы реализуется особое расположение молекул матрицы и наполнителя, определяющее межфазный (граничный или переходный) слой между компонентами композита.

Комбинируя объемное содержание компонентов, можно в зависимости от назначения получать материалы с требуемыми параметрами прочности, жаропрочности, модуля упругости, абразивной стойкости, а также создавать композиции с необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами, что отражено в работах [19, 172, 228, 229, 242, 250, 253].

Свойства композиционных материалов зависят главным образом [103]:

- от размера и площади поверхности частиц наполнителя, их объемной доли и характера распределения в матрице;
- физико-химических свойств, как матрицы, так и наполнителя;
- прочности связи на границе раздела фаз.

По своему строению композиционные материалы делятся на анизотропные, свойства которых значительно различаются между собой вдоль и поперек материала, и изотропные, свойства которых неизменны.

Таким образом, физико-химические особенности поведения подобного рода систем обуславливаются возможностью образования химических связей между поверхностями наполнителя и матрицы, а также условиями взаимодействия на границе раздела фаз.

Новое сочетание свойств, при сохранении индивидуальности каждого компонента, возникает в композите за счет межфазных явлений и возникновения граничных или переходных слоев в результате адгезионного взаимодействия.

Возможность существования тела в твердом или жидком (конденсированном) состоянии обусловлена когезией, определяемой межмолекулярными и межатомными взаимодействиями.

Механизм образования адгезионного контакта может быть различным. Возможны механические, химические и другие соединения компонентов.

Определяющую роль при этом играют взаимодействия молекул на границе раздела фаз. При этом возможны химические реакции, а также межмолекулярные или вандерваальсовы взаимодействия, т.е. взаимодействия между атомами и молекулами, химически несвязанными между собой и не реагирующими друг с другом.

Различают несколько типов взаимодействия [17, 19, 172]:

- ориентационное, возникающее при взаимодействии двух полярных групп;
- дисперсионное, возникающее при взаимодействии как полярных, так и неполярных молекул вследствие квантовой природы материи (по законам квантовой механики);

- индукционное (деформационное), реализующееся при взаимодействии полярной и неполярной молекул.

Водородная связь является особым типом межмолекулярных взаимодействий. Она возникает между двумя электроотрицательными атомами через ионизированный атом  $H^+$ . При этом ион водорода валентно связан с одним электроотрицательным атомом ( $O$ ;  $F$ ;  $Cl$  и т.п.) и одновременно взаимодействует с неподеленной парой другого.

Возникновение внутренних напряжений в ходе формирования адгезионного контакта обусловлено как изменением объема адгезива вследствие процессов химического (поликонденсация связующего и т.п.) или физического (испарение растворителя, кристаллизация компонента и т.п.) структурирования компонента, так и термическими напряжениями в системе матрица-наполнитель за счет разницы их теплоемкостей. Поскольку внутренние напряжения направлены против сил адгезионного сцепления, зависимость адгезионной прочности системы от внутренних напряжений имеет сложный характер, что может приводить к самопроизвольному отслаиванию композита в процессе эксплуатации.

В композиционных материалах армирующие элементы соединены изотропной полимерной, металлической или другими видами матрицы, которая обеспечивает монолитность материала, фиксирует форму изделия, способствует совместной работе волокон и перераспределяет нагрузку при разрушении части воло-

кон [17]. Общепринято характеризовать современные композиты типом матрицы (Рисунок 1.1.).



Рисунок 1.1. Классификация композиционных материалов по типам матриц

Так как матрица существенно отличается по своим физико-химическим свойствам от наполнителя, при ее твердении, кристаллизации, охлаждении и т.п. на границе раздела фаз возникают остаточные напряжения, что приводит к формированию особой области – межфазного слоя – определяющего модуль упругости, прочность, ударную вязкость и другие свойства композита.

При получении композита, как правило, основные характеристики компонента, являющегося матрицей системы, хорошо известны. Поэтому при создании композиционных материалов большое внимание уделяют физико-химическим свойствам наполнителя, химический состав которого является основной его характеристикой, в большинстве случаев определяющей возможности его использования. Особое значение имеет реакционная способность наполнителя, которая зависит не только от его химического состава, но и от его молекулярной структуры.

Очень важным свойством наполнителя является плотность. Она в значительной степени определяет эффективность его использования. Так, пористый наполнитель имеет низкую плотность, зависящую от объема содержащихся в нем пор, что, с одной стороны, значительно облегчает композит, уменьшает его теплопроводность, а с другой – требует повышенного содержания матричного материала.

Поскольку композиционные материалы обычно перерабатывают при повышенных температурах, а при эксплуатации они могут быть подвержены различным воздействиям (температурным, влажностным и т.д.), необходимо заранее знать теплофизические, сорбционные и другие характеристики наполнителя.

Целью введения наполнителя является получение материала, в котором матрица занимает минимальный объем [19]. При этом общий объем системы дает упаковка наиболее крупных частиц наполнителя. При введении более мелких они занимают пустоты между крупными частицами – суммарный объем не увеличивается. Следовательно, для достижения высокой степени наполнения требуются очень широкие интервалы размеров частиц. При одном их размерах достигается минимальная плотность упаковки.

Таким образом, распределение частиц по размерам характеризует расположение наполнителя в композиционном материале, т.е. плотность упаковки частиц. По наполнению композиционные материалы делят на две группы [17, 19, 172]:

1. Наполненные системы – композиции с твердыми, жидкими или газообразными веществами (наполнителями), которые определенным образом распределяются в объеме основного компонента (матрицы) и имеют четко выраженную границу раздела между наполнителем и матрицей. Такие материалы представляют собой частный случай дисперсных систем, где дисперсной (непрерывной) средой является матрица, а дисперсной фазой – наполнитель.

2. Смеси компонентов различной химической природы; к ним также относят полимер-полимерные композиции и, условно, блок- и привитые сополимеры.

Среднестатистическое расстояние между частицами можно оценить экспериментально для частиц практически любой формы и систем с различным распределением частиц по размерам.

Форма дискретных частиц различного происхождения, используемых в качестве наполнителя в композиционном материале, может быть различной: шарообразной, кубической, пластинчатой, игольчатой, волокнистой, неправильной и т.д. Для большинства наполнителей она не может быть строго охарактеризованной. Поэтому только размеры и площадь поверхности частиц могут служить для

оценки их влияния на свойства системы матрица-наполнитель.

В общем случае различие в характере распределения частиц по размерам резко проявляется в устойчивости к истиранию композитов. При этом средние размеры частиц могут ввести в заблуждение, так как в одной фракции возможны значительные отклонения от среднего значения. Поэтому на практике определяют распределение частиц по размерам, т.е. отношение количества частиц (или массы), приблизительно одинаковых по длине, ширине, толщине (иногда частиц одной фракции в ситовом анализаторе), к общему количеству (или массе) наполнителя.

Материалы, наполнителями в которых являются непрерывные волокна или сплошные структуры, образуемые ткаными и неткаными полотнами, листами шпона и т.п., обычно называют армированными.

По характеру структуры композиционные материалы подразделяются на следующие группы [17, 19, 159, 172]:

- волокнистые, упрочнённые непрерывными волокнами и нитевидными кристаллами;
- дисперсноупрочнённые, полученные путём введения в металлическую матрицу дисперсных частиц упрочнителей;
- слоистые, созданные путем прессования или прокатки разнородных материалов.

Волокнистые композиционные материалы, армированные нитевидными кристаллами и непрерывными волокнами тугоплавких соединений и элементов ( $SiC$ ,  $Al_2O_3$ , бор, углерод и др.), являются новым классом материалов. Успешному их развитию содействовали: разработка и применение в конструкциях волокнистых стеклопластиков, обладающих высокой удельной прочностью; открытие весьма высокой прочности, приближающейся к теоретической, нитевидных кристаллов и доказательства возможности использования их для упрочнения металлических и неметаллических материалов; разработка новых армирующих материалов – высокопрочных и высокомодульных непрерывных волокон бора, углерода,  $Al_2O_3$ ,  $SiC$  и волокон других неорганических тугоплавких соединений, а

также упрочнителей на основе металлов.

В машиностроительном производстве широкое распространение получили волокнистые композитные материалы, армированные высокопрочными и высокомодульными непрерывными волокнами, в которых армирующие элементы несут основную нагрузку, тогда как матрица передаёт напряжение волокнам [17]. Волокнистые композитные материалы, как правило, анизотропны. Механические свойства их определяются не только свойствами самих волокон, но и их ориентацией, объёмным содержанием, способностью матрицы передавать волокнам приложенную нагрузку и др. Диаметр непрерывных волокон углерода, бора, а также тугоплавких соединений ( $B_4C$ ,  $SiC$  и др.) обычно составляет 100...150 мкм.

Волокнистые композитные материалы, в отличие от монолитных сплавов, обладают высокой усталостной прочностью. Так, например, у алюминиевых сплавов она составляет 130...150 МН/м<sup>2</sup>, в то время как у армированного борным волокном алюминиевого композитного материала – около 500 МН/м<sup>2</sup>. Предел прочности и модуль упругости композитного материала на основе алюминия, армированного борным волокном, примерно в два раза больше, чем у алюминиевых сплавов В-95 и АК4-1.



Рисунок 1.2. Примеры изделий, полученных механической обработкой заготовок из композиционных неметаллических материалов

Наибольшее распространение на сегодняшний день получили композиционные материалы на древесной основе и полимерные композиты в силу экономичности и доступности исходного сырья и высоких физических свойств изделий, изготовленных из этих материалов при значительном снижении удельной массы. Примером могут являться детали для различных конструкций машин, приборов, аппаратов используемых в различных отраслях промышленности (Рисунок 1.2.).

В связи с этим в данной работе представленные группы композиционных материалов были выбраны для проведения исследований. Далее рассмотрим эти группы материалов более подробно.

### **1.1.2. Композиционные материалы на древесной основе**

Одним из наиболее распространенных известных видов композиционных материалов являются древесные композиционные материалы.

Древесина – это один из наиболее важных природных материалов, используемых человеком в своей практической деятельности. Всевозрастающая потребность производства в этом ценном сырье обусловила создание композиционных материалов на его основе. Наиболее широкое применение в технике получили модифицированная древесина, древесно-минеральные композиционные материалы, изделия из древесных пресс-масс и т.д.

Как показывает отечественная и зарубежная практика строительства, использование древесных композиционных материалов – это один из путей, обеспечивающих уменьшение массы зданий и сооружений и улучшение их теплозащиты [14].

В последние годы возрос интерес к применению древесных и сельскохозяйственных отходов в производстве различных отделочных и теплоизоляционных материалов.

Технологические и эксплуатационные свойства получаемых древесных композиционных материалов определяются не только способом переработки и типом связующего, но в большей степени физико-химическими характеристиками

древесного наполнителя.

Наряду с древесиной во всех отраслях народного хозяйства все более широкое применение находят композиционные материалы: клееная древесина, материалы на основе измельченной древесины, массивная древесина с модифицированными свойствами. Такие материалы относятся к разряду труднообрабатываемых [3]. В качестве исходного сырья для них используют массивную древесину (в производстве клееных досок, брусков, брусьев), шпон (в производстве фанеры, фанерных плит, древесных слоистых пластиков), их комбинацию (столярные плиты), волокна (ДВП), опилки и древесную крошку (ксилолит и др.). Связующее, в тех или иных количествах вводимое во все композиционные материалы, пропитывает поверхностные слои древесины, а в процессе прессования происходит термомеханическая и термохимическая модификация исходного сырья.

Наполнитель в композиционном материале (размеры и характеристики) оказывает существенное влияние на свойства композита, его обрабатываемость резанием, выбор режущего инструмента для обработки, стойкость инструмента. В связи с этим требуется осветить и различные виды наполнителей древесных композиционных материалов. В зависимости от вида древесного наполнителя композиционные материалы можно разделить на три группы [172].

К первой группе относятся материалы на основе массивной древесины. Представителем этой группы композиционных древесных материалов является модифицированная древесина. Для ее изготовления используют древесину мягких лиственных пород.

Во вторую группу входят композиционные материалы на основе лущеного шпона. Шпон – это тонкие листы древесины, полученные в результате лущения круглого сортимента. Толщина шпона небольшая 0,55...1,20 мм. Пропитанные синтетической смолой и спрессованные при высокой температуре под давлением листы шпона образуют древесно-слоистый пластик (ДСП).

Третья группа – материалы, наполненные дискретными частицами. К этой группе относятся отходы деревообработки, лесопиления, лесосеки, имеющие различную форму, размеры, гранулометрический состав.

Волокно, используемое для гипсоволокнистых и древесноволокнистых плит, получают размолом щепы на дефибраторах и рафинаторах. Длина волокон 0,7...2,0 мм, средний диаметр 0,04 мм. Дробленка представляет собой пластинчатые или игольчатые частицы размером 2...20 мм. Ее получают из кусковых отходов путем переработки на рубильных машинах и молотковых мельницах. Дробленка входит в состав арболита.

Древесная «шерсть», применяемая для фибролита, – это стружки длиной 500 мм, шириной 2...5 мм и толщиной 0,2...0,7 мм. Такой наполнитель получают строганием чураков на древесно-шерстных станках. Кора в виде частиц, измельченных до размеров 10...40 мм по длине, может быть использована для производства теплоизоляционного материала – королита.

Стружка – специально приготовленные для цементно-стружечных плит на стружечных станках барабанного типа пластинчатые частицы длиной 2...20 мм, толщиной 0,2...0,5 мм. Из такого материала изготавливают древесностружечные и цементно-стружечные плиты и изделия из древесно-прессовочных масс.

Стружка-отходы, полученные в процессе обработки древесины на строгальных, фрезерных и других станках, имеют ширину не более 15 мм и толщину не более 2 мм. Такие наполнители используют для изделий из древесно-прессовочных масс и некоторых видов арболита.

Опилки – это отходы, полученные в результате пиления древесины. Они представляют собой частицы шириной и толщиной 0,5...4,5 мм. Опилки находят широкое применение в композиционных материалах: в изделиях из древесно-прессовочных масс, в гипсоопилочных блоках, опилкобетоне, термизе, термопирите, ксилолите, пьезотермопластиках, лигноуглеводных пластиках и других материалах.

Древесная крошка является результатом дробления кусков шпона, не используемых в фанерном производстве. Она представляет собой частицы длиной 50...80 мм, шириной 5...10 мм, толщиной до 1,8 мм. Крошка применяется для получения древесных пресс-масс.

Кроме того, для получения композиционных материалов могут быть ис-

пользованы дискретные частицы растительного сырья, которые в зависимости от морфологического строения и способов обработки подразделяют на два вида [172]:

– частицы, не подлежащие измельчению (лузга риса, подсолнечник, костральна);

– частицы в виде дробленки, получаемые в результате обработки сырья на кормодробилках или в роторных измельчителях (дробленка из стеблей хлопчатника, соломы и т.д.).

В зависимости от природы матрицы – все древесные композиционные материалы делятся на три группы [172].

К первой группе могут быть отнесены материалы, в которых в качестве матрицы применяются синтетические полимеры: модифицированная древесина, древеснослоистые пластики, тырсолит, изделия из МДП, ДКК, ДВП, ДСтП. Во всех этих материалах в качестве связующего применяются фенолоформальдегидные, карбамидоформальдегидные и другие синтетические полимеры, олигомеры и мономеры.

Во вторую группу входят композиционные материалы, матрицы которых являются неорганическими вяжущими веществами. Эти материалы относятся к искусственным конгломератам. Для производства композиционных материалов на основе древесного наполнителя наиболее применимы клинкерные цементы (для арболита, ЦСП, опилкобетона, фибролита и др.), гипс (гипсоопилочные блоки, гипсоволокнистые плиты и др.), магнезиальные вяжущие (ЦСП, ксилолит, магнезионный фибролит, прессованный строительный брус и т.д.). Все эти материалы применяются в строительстве.

В третью группу могут быть включены материалы, матрицы которых представляют собой природные клеящие вещества или продукты гидролитического расщепления углеводородного комплекса древесины. К таким материалам относятся пьезотермопластики и лигноуглеводные пластики.

Еще один классификационный признак дает возможность разграничить области применения композиционных материалов в различных отраслях народного

хозяйства. Так, материалы на основе минеральных вяжущих применяются в строительстве, модифицированная древесина – в строительстве, в изделиях мебели, на транспорте, в горнодобывающей и легкой промышленности [14]. Изделия из МДП и древеснослоистого пластика используются в машиностроении, химической и радиопромышленности; из древесных пресс-масс – в мебельном и тарном производстве, в автомобильной промышленности [172].

В дальнейшем сфера использования древесных композиционных материалов будет, несомненно, расширяться и они займут достойное место во многих отраслях народного хозяйства.

Возобновляемость сырья, высокая экономическая эффективность при невысокой плотности ( $50 \dots 1400 \text{ кг/м}^3$ ), достаточная прочность (до 300 МПа), низкая трудоемкость и энергоемкость изготовления, потребление вторичного сырья – основные факторы, гарантирующие древесным композитам дальнейшее развитие.

На сегодняшний день широко применяются искусственные материалы на древесной основе (ДСтП – древесностружечные плиты, ЦСП – цементно-стружечные плиты, ДВП – древесно-волокнистые плиты, многослойная фанера, ДСП – древесно-слоистые пластики и др.) [14, 172].

Рассмотрим некоторые виды таких материалов.

Древесностружечные плиты (ДСтП) получают горячим прессованием смешанных со связующим древесных частиц [172]. Промышленность выпускает плиты однослойные (размеры древесных частиц и содержание связующего примерно одинаковы по их толщине), трехслойные (наружные слои и внутренний слой различаются размерами частиц и содержанием связующего) и плиты, содержащие более трех слоев, симметрично расположенных относительно среднего слоя.

На физико-механические свойства ДСтП влияют порода древесины, тип, размеры и ориентация частиц древесины, вид связующего, его количество и распределение по слоям, плотность плит.

Некоторые физико-механические показатели и шероховатость поверхности древесно-стружечных плит представлены в Таблице 1.1.

Таблица 1.1.

Физико-механические показатели и шероховатость поверхности древесно-стружечных плит (ГОСТ 10632–2007)

Наименование показателя	Норма для плит марок	
	П-А	П-Б
Влажность, %	5...13	
Предельное отклонение плотности в пределах плиты, не более	± 10 %	
Предел прочности при изгибе, МПа	13...7	14...5,5
Предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти плиты, Па	0,45...0,2	0,31...0,14
Модуль упругости при изгибе, МПа	1800...1050	–
Покоробленность, мм	1,2	1,6
Шероховатость поверхности пласти $R_m$ , мкм, не более: для шлифованных плит для нешлифованных плит	50	63
	320	500
Разбухание по толщине за 2 ч (размер образцов 25 × 25 мм), % *	12	15

\* Для плит повышенной водостойкости

В качестве связующего используют фенолформальдегидные и карбамидоформальдегидные смолы в количестве 6...10 % от массы абсолютно сухой древесины.

При сжигании ДСтП образуется зола, количество которой немного превышает 1 % от массы сожженной навески. В составе золы обнаружены абразивные частицы. Около половины состава золы – крупные зерна абразива диаметром 0,2 мм и более, которые являются одной из причин абразивного изнашивания режущего инструмента.

Многие листовые древесные материалы благодаря своей структуре являются поперечно-изотропными [43]. Это означает, что все направления на плоскости листа равноценны в отношении свойств материала, а анизотропия материала определяется только различием между его свойствами в плоскости листа и его свойствами в направлении, перпендикулярном плоскости листа.

Древесноволокнистые плиты (ДВП) – листовой материал, изготовленный в процессе горячего прессования массы, сформированной в виде ковра из древесных волокон [172]. Древесными волокнами условно называют клетки, их обрывки и группы, получаемые при размоле древесины.

В качестве проклеивающих веществ при производстве ДВП используют парафин (1,0...1,5 % от массы абсолютно сухого волокна) и глинозем (2...3 %), который служит для осаждения парафина на волокна. Кроме упомянутых компонентов в ДВП может присутствовать до 0,5 % песка, попадающего в плиты с сырьем.

Волокна уже на стадии формования ковра ориентируются параллельно плоскости плиты, при этом более крупные оказываются на ее внутренней стороне. При прессовании практически все волокна занимают горизонтальное положение. Переплетенные волокна, имеющие наиболее прочные межволоконные связи, образуют один слой, а плита в целом по толщине состоит из множества достаточно прочных слоев. Связи между слоями значительно слабее. В плоскости плиты волокна располагаются хаотично. Поэтому различия в свойствах по длине и ширине плиты незначительны. ДВП принято относить к трансропным (поперечно изотропным) материалам, в которых плоскость плиты является плоскостью изотропии.

Промышленность выпускает большое разнообразие композиционных материалов с полимерной матрицей. К таким материалам относятся древесно-полимерные композиты (ДПКТ).

Современные древесно-полимерные композиционные материалы, предназначенные для переработки методом экструзии, состоят из трех основных компонентов: специально подготовленных частиц измельченной древесины; синтетических или органических термопластичных полимеров или их смесей; комплекса специальных химических добавок (модификаторов), улучшающих потребительские и технологические свойства исходной смеси и готовой продукции. Еще одним направлением в производстве ДПКТ является применение в качестве связующего биологических полимеров, например зерновых крахмалов, отходов кожевенного и бумажного производства и др.

Физико-механические свойства древесно-полимерных композитов представлены в Таблице 1.2.

Физические и механические свойства древесно-полимерных композитов

Наименование показателя, ед. измерения	Значение
Плотность, кг/дм <sup>3</sup>	1,0...1,4
Временное сопротивление, МПа	15...50
Модуль упругости при растяжении, ГПа	4...8
Сопротивление изгибу, МПа	25...60
Модуль упругости при изгибе, ГПа	3...6
Относительное удлинение при растяжении, %	0,5...1,0
Ударная вязкость по Шарп, КД/м <sup>2</sup>	3...4

В отличие от широко представленных на нашем рынке MDF профилей и панелей, ДПКТ не содержат никаких фенолформальдегидных смол. Их связующее – биополимеры – абсолютно экологически безопасно. ДПКТ являются био-разлагаемыми полимерами.

При производстве ДПКТ могут использоваться любые термопластичные полимеры и их смеси, однако на практике применяются три группы термопластичных смол: полиэтилен (PE), полипропилен (PP) и поливинилхлорид (PVC). Больше всего используется полиэтилен – до 70 %. Для управления технологическим процессом и свойствами ДПКТ в их состав вводятся различные добавки-модификаторы: антиокислители, антимикробные средства, поверхностно-активные вещества, противоударные модификаторы, смазочные материалы, температурные стабилизаторы, огнезащитные средства, светостабилизаторы и вспенивающие агенты.

Стекломагниево-листья (СМЛ), или магнелит, изготавливают на основе древесной (мелко-дисперсионной) стружки (до 15 %), оксида магния (40 %), хлорида магния (35 %), перлита (5 %), стеклотканой сетки (1 %) и связующих композиционных материалов (4 %) путем желатинизирования магnezитовой смеси [172]. Полученный в результате специального технологического процесса материал обладает высокой прочностью, твердостью и легкостью. А такие свойства СМЛ, как водонепроницаемость, негорючесть, устойчивость к коррозии и пластичность, гораздо превосходят аналогичные свойства гипсокартона, ДВП, ДСП, фанеры и др.

Особый интерес представляют цементно-стружечные плиты (ЦСП) [3, 60]. Их производят главным образом из известных и испытанных сырьевых материалов – цемента и древесной стружки, к которым добавляется небольшое количество химической добавки для минерализации последней. Физико-механические свойства цементно-стружечных плит представлены в Таблице 1.3.

Таблица 1.3

Физико-механические свойства цементно-стружечных плит

Наименование показателя, ед. измерения	Значение
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1100...1400
Влажность, %	9±3
Твердость, МПа	45...65
Ударная вязкость, Дж/м <sup>2</sup> , не менее	1800
Разбухание по толщине за 24 ч, %, не более	2
Водопоглощение за 24 ч, %, не более	16
Прочность при изгибе, МПа, не менее, для толщины, мм:	
10, 12, 16	≥ 12
24	≥ 10
36	≥ 9
Прочность при растяжении, перпендикулярно пласти плиты, МПа	≥ 0,5
Разбухание по толщине после циклического испытания, %	Не более 1,5
Предельные отклонения по толщине плиты, мм:	
10	± 0,6
12, 16	± 0,8
24	± 1,0
36	± 1,4
Предельные отклонения по длине и ширине плиты, мм	± 5
Модуль упругости, МПа	≥ 4 500

Процесс минерализации позволяет древесной стружке противостоять биологическому воздействию, эрозии и гниению. Фактически это трансформация органического материала в состояние, при котором он способен сопротивляться воздействию влаги, гнили, грызунов, грибков, огня, насекомых, химикатов, погодных условий и т.д.

С помощью ЦСП можно выполнять:

- внешнюю отделку домов;
- внутреннюю отделку помещений;
- обшивку сухих и влажных помещений;
- реставрационные и восстановительные работы.

Одним из перспективных направлений применения ЦСП выступает строи-

тельство различных зданий и сооружений. Это направление получило мощный толчок в последнее десятилетие в развитых странах Запада (США, Канада, Германия, Финляндия) и постепенно начинает завоевывать позиции и в странах бывшего СССР.

Также можно отметить постоянное совершенствование композиционных древесных материалов. Анализ работ [14, 22, 43, 115] показывает, что композиционные материалы постепенно находят применение во всех отраслях промышленности, в том числе и в машиностроении.

Так, к примеру, в работе [115] рассмотрено применение древесно-металлических композиционных материалов (ДМКМ) в технике с целью повышения продолжительности ее срока службы. ДМКМ применяются в качестве антифрикционного материала для изготовления подшипниковых узлов, работающих в условиях наличия загрязнений и ограниченного смазывания. Это объясняется тем, что предлагаемые ДМКМ, состоящие из модифицированной древесины и введенной в нее металлической фазы, обладают повышенными антифрикционными, демпфирующими и теплофизическими свойствами, что и определяет значительный эффект их использования при изготовлении узлов трения техники.

В процессе механической лезвийной обработки ДМКМ происходит одновременное резание древесной и металлической фазы. При этом металлическая фаза под действием сил резания может вдавливаться в упругую основу, перерезаться либо полностью вырываться из древесной основы. Величины параметров процесса резания зависят от степени закрепления металлической фазы в матрице, сопротивления имплантированного металла срезанию. Эти характеристики определяются преимущественно прочностными свойствами материала, уровнем срезания частицы и угловыми параметрами используемых инструментов. Для удовлетворения необходимым требованиям следует использовать соответствующим образом выбранные режущие инструменты, характеризующиеся высокой стабильностью величин геометрических параметров в течение всего продолжительного срока эксплуатации.

### 1.1.3. Полимерные композиционные материалы

К другой распространенной группе композиционных материалов относят полимерные композиционные материалы [17, 19, 34, 139].

Полимерные композиционные материалы (стеклопластики, органопластики, боропластики, углепластики) находят широкое применение в таких областях промышленности, как космическая техника, авиа-, судо-, автомобилестроение и т.д. Применение композиционных материалов в современных конструкциях дает существенный выигрыш в массе, прочности, долговечности, стойкости к коррозии и агрессивным химическим средам [17].

Так конструкционные углепластики на основе углеродных наполнителей различных текстурных форм (жгуты, ленты, ткань) предназначены для использования в силовых конструкциях планера самолета.

Высокопрочные (прочность 1200...1500 МПа) стеклопластики на основе кордных стеклотканей и полимерных связующих для используются для изготовления многолопастных высоконагруженных малошумных винтов винтовентиляторных двигателей широкофюзеляжных самолетов короткого взлета и посадки.

Высокопрочные, негорючие полиимидные стеклопластики конструкционного и радиотехнического назначения с рабочей температурой до 350°C применяются в мотогондолах двигателей, для изготовления панелей капотов различных кожухов и защитных экранов самолетов.

Конструкционные микросферостеклотекстолиты на различных связующих с температурой эксплуатации 80...400°C и плотностью 0,6...0,9 г/см<sup>3</sup> используются для изготовления малонагруженных конструкционных изделий, изделий радиотехнического назначения и в качестве негорючих отделочных материалов в авиационном, судостроении и других областях техники.

Таким образом, приведенные примеры показывают, что современные полимерные композиционные материалы широко используются в различных отраслях промышленности и область их применения в дальнейшем будет только расширяться.

Особенностью таких материалов является то, что они во многих случаях производятся непосредственно в процессе изготовления необходимого изделия, но могут изготавливаться и в виде заготовок (листов, стержней и др.) для последующей обработки и получения изделий механическими и термомеханическими методами.

Свойства получаемого композиционного материала зависят от выбора исходных компонентов и их соотношения, взаимодействия между ними, вида и расположения волокон в армирующем наполнителе, метода и технологических условий изготовления изделия (давления, температуры, времени), дополнительной обработки изделия и ряда других факторов. Выбор основных компонентов наполненных и армированных полимерных композитов определяется многими факторами: необходимыми функциональными требованиями к готовым материалам и изделиям, их эксплуатационной надежностью и безопасностью эксплуатации, совместимостью и взаимным влиянием компонентов, технологичностью переработки, доступностью и стоимостью.

Среди наиболее распространенных можно выделить композиционные материалы на полимерной основе, армированные стеклянными, углеродными, борными и органическими волокнами [8, 17, 19]. В качестве матриц в металлических композиционных материалах в основном применяется алюминий, титан и магний, упрочненные борными и углеродными волокнами, дисперсными частицами оксидов и карбидов тугоплавких металлов.

Физико-механические свойства некоторых композиционных материалов на полимерной и металлической основе представлены в Таблицах 1.4...1.5. Рассмотрим некоторые виды таких материалов.

Стеклопластики – материалы, наполнителем в которых служат стеклянные волокна [8, 17]. У таких материалов ярко выражена анизотропия не только механических, но и теплофизических свойств. Основная масса стеклопластиков может работать при температурах 130...150 °С.

Органопластики – материалы, наполнителем в которых являются органические волокна [8, 17]. При сравнительно невысокой плотности этот материал имеет

достаточно высокие показатели удельной жесткости и прочности, хорошо работает при знакопеременных нагрузках.

Таблица 1.4

Физико-механические свойства некоторых композиционных материалов на полимерной и металлической основе

Материал	Прочность ( $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), МПа			Модуль упругости при растяжении $E$ , ГПа	Длительная прочность (500 ч, $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), МПа	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$
	при растяжении	при сжатии	при сдвиге			
Стеклопластик	500...2100	-	-	26...70	-	1950...2200
Углепластик	380...1431	250...1451	25...112	81...143	-	1300...1570
Бороволокнит	1200	1160	60	250	1060	-
Бороалюминий ВКА-1	60...90	1200	70...160	250	600	-
Углеалюминий	500...1000	300...400	375...632	133...168	-	2100...2250

Таблица 1.5

Физико-механические и технические свойства некоторых марок стеклотекстолита

Показатели и единицы измерения	Марки стеклотекстолита					
	СТЭФ	СТЭФ-1	СТЭФ-У	СТЭБ	СТТ	СТ-ЭТФ
Разрушающее напряжение при изгибе перпендикулярно слоям, МПа не менее	350	350	370	350	250	350
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа не менее	220	220	240	220	220	220
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа не менее	400	400	420	400	400	400
Ударная вязкость по Шарпи с надрезом $\text{КДж}/\text{м}^2$ , не менее	50	50	58	50	50	50
Нагревостойкость, $^{\circ}\text{C}$	155	155	155	140	180	180
Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	1,6...1,9	1,6...1,9	1,7...1,9	1,75...2,05	1,7...1,9	1,7...1,9
Цена, руб/кг	185	175	220	210	210	360

Боропластики – материалы, наполнителем которых являются борные волокна [8, 17]. Обладают высокой тепло- и водостойкостью.

Углепластики – материалы, содержащие в качестве наполнителя углеродные волокна [8, 17]. Основные свойства углепластиков – низкая плотность, высокий модуль упругости, высокие прочность и термостойкость, низкий коэффициент трения.

Наличие высоких прочностных свойств у композиционных материалов, как

на древесной основе, так и полимерных, вызывает трудности при их обработке: режущий инструмент быстро изнашивается и требует частых переточек, что снижает производительность и увеличивает затраты производства. В связи с этим, обратим внимание на особенности процесса резания композиционных материалов.

## **1.2. Особенности процесса резания композиционных материалов**

Механическая обработка композиционных материалов применяется для доведения деталей и изделий до заданных размеров. Она необходима для достижения требуемой точности и качества поверхности, получения сложных конфигураций изделия. Для достижения максимальной производительности процесса получения изделий из композиционных материалов следует оптимизировать механическую обработку, для чего необходимо её изучение. Проведение аналогий с подобной механической обработкой металлов не дает желаемого результата, т.к. процесс резания полимерных композиционных материалов существенным образом отличается от процесса резания металлов. Это объясняется специфическими свойствами обрабатываемых материалов. Отсюда следует вывод о необходимости всестороннего исследования процесса резания композиционных материалов.

Изготовление изделий из листовых, цилиндрических и других заготовок из композиционных материалов производится методами механической обработки (точение, фрезерование, строгание, сверление, шлифование). В зависимости от вида материала и содержащегося в нем армирующего компонента применяются различные виды инструмента [223]:

- при обработке древесных и полимерных композиционных материалов, содержащих наполнители с невысокой твердостью, используются обычные виды инструмента с углами заточки, зависящими от вида и механических свойств материалов;

- при обработке стеклопластиков используются инструменты на керамической основе или абразивные инструменты;

- при обработке композиционных материалов, содержащих арамидные волокна, используются инструменты на алмазной основе или оснащенные твердым сплавом, а также лазерные методы обработки.

При обработке резанием происходит нарушение связи между частицами материала по строго заданному направлению, когда обрабатываемый материал разделяется на части с образованием стружки или без нее.

Исходные характеристики процесса резания обусловлены рядом факторов, которые группируются следующим образом:

1. Факторы, относящиеся к заготовке: вид материала, его физико-механические свойства, наличие в материале связующего и др.

2. Факторы, относящиеся к резцу: угловые параметры, физико-механические свойства материала резца, геометрия резца, степень шероховатости граней, острота резца и др. [9, 79].

3. Режимы и размеры обработки: толщина и ширина слоя, скорости подачи и резания, толщина снимаемого припуска, направление резания по отношению к направлению волокон и др. [9, 79].

Перечисленные выше параметры задаются условиями и требованиями технологического процесса изготовления деталей. Они определяют протекание процесса резания и в первую очередь величину усилия резания, характер стружкообразования и качество получаемой поверхности в результате обработки [8, 79, 159].

Обработка резанием композиционных материалов обладает рядом особенностей, отличающих ее от аналогичной обработки металлов [8, 80, 159, 161]. Это объясняется характерными свойствами и структурой обрабатываемых материалов. Особенности процесса резания композиционных материалов следующие:

1. Относительная сложность получения высокого качества поверхности вследствие невысоких прочностных характеристик композиционных материалов, а также из-за слоистой структуры.

2. Высокая твердость некоторых видов наполнителя.

3. Низкая теплопроводность композиционных материалов, что обуславливает слабый отвод тепла вместе со стружкой и в обрабатываемое изделие.

4. Абразивное воздействие наполнителя. Наличие в зоне резания твердых составляющих приводит к абразивному износу инструмента.

5. Деструкция полимерного связующего при резании. В результате этого возникает механохимический адсорбционный износ инструмента.

6. Высокие упругие свойства материалов. Увеличение площади контакта упругого композиционного материала с задней поверхностью инструмента, что приводит к повышению значений нагрузки со стороны задней поверхности.

7. Технологический критерий износа. При обработке композиционных материалов образуются характерные дефекты поверхности (сколы, расслоения, прижоги), в связи с этим, при определении допустимого износа преобладает технологический фактор. Поэтому допустимый износ инструмента при обработке композиционных материалов всегда ниже, чем при обработке металлов.

8. Низкая теплостойкость композиционных материалов. При высоких температурах в зоне резания происходит выгорание связующего, на обработанной поверхности появляются прижоги. Поэтому требуется более низкий уровень температур в зоне резания. Это усугубляется еще и тем, что в большинстве случаев не допускается применение СОТС, т.к. многие материалы обладают таким свойством, как влагопоглощение.

Несмотря на различия составов и свойств композиционных материалов, их обрабатываемость по ряду критериев идентична. Обрабатываемость того или иного материала — понятие комплексное. Ее основные показатели: интенсивность затупления режущего инструмента, характеризуемая скоростью резания при определенной стойкости; качество поверхностного слоя, постоянство размеров в пределах допусков и другие параметры; сила резания и расходуемая мощность.

Поэтому целесообразно подразделять материалы по обрабатываемости на группы, и в дальнейшем при появлении новых материалов прогнозировать режим обработки на основании предложенной классификации.

Анализ свойств и состава композиционных материалов позволяет выделить основные критерии, по которым их следует относить к той или иной группе обрабатываемости. Это, в первую очередь, тип связующего (термопластичный или

терморезактивный). Важным фактором является тип наполнителя, т.е. его состав (органический или неорганический), его физическая природа и свойства, и, наконец, структура наполнителя (волокнистый, листовой, порошкообразный и т.д.). Однако, авторами [8] отмечается, что такие высокопрочные материалы на полимерной основе, как стекло-, органо-, боро- и углепластики, имея одинаковую волокнистую структуру, весьма отличаются по своим физико-механическим свойствам, а следовательно, и закономерности их резания не будут столь близки, как для остальных групп композиционных материалов. Так, например, полимерные композиты с волокнистым наполнителем относятся к пятой группе обрабатываемости резанием (из шести групп обрабатываемости полимерных материалов), а пятую группу, в свою очередь, целесообразно разделить на подгруппы: Стеклопластики – Органопластики – Боропластики - Углепластики - Гибридные материалы (композиции типа органопластик-боропластик, стеклопластик-углепластик и т.п.).

Обрабатываемость различных видов композиционных материалов отличается, однако, в большинстве своем, такие материалы относят к классу труднообрабатываемых.

Перечисленные особенности обработки композиционных материалов показывают, что прямой перенос закономерностей процесса резания металлических материалов или древесины на эти материалы недопустим. Следовательно, для оптимизации процесса резания композиционных материалов, достижения максимальной производительности и требуемого качества поверхности необходим специально подготовленный режущий инструмент, обладающий:

- высокой остротой режущего лезвия;
- повышенными физико-механическими свойствами инструментального материала;
- увеличенными требованиями к качеству подготовки режущих поверхностей и кромки;
- высокими технологическими показателями.

Следовательно, детального изучения требуют конструктивные особенности инструментов для обработки композиционных материалов, свойства и возможно-

сти инструментальных материалов для оснащения такого инструмента, параметры геометрии и микрогеометрии режущих элементов.

### **1.3. Инструмент для обработки композиционных материалов и пути его совершенствования (на примере фрезерного инструмента)**

Фрезерование является одной из часто встречающихся операций обработки изделий из композиционных материалов [1, 3, 8, 35, 109, 110]. Из-за специфических особенностей композитов как конструкционных материалов их фрезерование обладает рядом характерных особенностей, отличающих от аналогичного фрезерования металлов. Это, в свою очередь, приводит к некоторому конструктивному различию фрез.

#### **1.3.1. Конструктивные особенности инструментов для обработки композиционных материалов**

Для обработки композиционных материалов применяются цельные и составные фрезы с затылованными и острозаточенными зубьями, а также сборные конструкции фрез.

Отличительная особенность фрез с острозаточенными зубьями состоит в том, что задние поверхности зубьев прямолинейны. Это позволяет изменять в широких пределах число зубьев, угловые параметры фрез и обрабатывать детали с глубоким профилем. Такие фрезы применяются для обработки плоскостей, пазов и фасонных поверхностей. В последнем случае при переточках происходит существенное искажение профиля обрабатываемой детали. Поэтому фрезы с остроконечными зубьями для обработки фасонных поверхностей обычно оснащаются напаянными пластинами. Для фрез этого типа возможно ограниченное число переточек, определяемое размерами пластин по толщине.

При обработке фасонных поверхностей с целью уменьшения искажения профиля обрабатываемой детали заднюю поверхность режущей части формируют

по определенной кривой (затыловывают). Это позволяет уменьшить погрешности изготовления фасонного профиля детали.

Существует несколько способов формирования затылованной поверхности: по логарифмической спирали, по спирали Архимеда, по дуге окружности и по прямой линии [113].

При изготовлении зубьев фрезы на специализированных инструментальных предприятиях конструирование задней поверхности удобнее всего производить по архимедовой спирали, удовлетворяющей с достаточной для практики степенью точности.

Под цельными понимают инструменты с режущими элементами (зубьями), неразъемно-соединенными с корпусом инструмента. Цельные конструкции фрез изготавливают целиком из инструментальных сталей.

Фрезы из цельного материала при утрате режущей способности – перетачиваются; при полном износе – более не используются [35, 109, 170].

Основной недостаток цельных фрез, изготовленных целиком из инструментальных сталей, состоит в том, что в случае поломки или аварийного износа одного из зубьев вся фреза становится негодной к эксплуатации. Такой инструмент либо подлежит восстановлению и ремонту, а это процесс достаточно трудоемкий, либо совсем не используется в дальнейшем, что тоже не выгодно с точки зрения экономии материалов. Кроме того, для обработки сложнопрофильных поверхностей таким инструментом необходимы несколько разных фрез, или их комплекты.

При производстве сложнопрофильных изделий из композиционных материалов широкое применение нашли составные фрезы. Большинство их в зависимости от обрабатываемых профилей состоит из двух или трех одинарных фрез, которые обычно используют для обработки сложных профилей, имеющих участки, лежащие в плоскости вращения фрезы. Как правило, при конструировании составных фрез сложный обрабатываемый профиль разбивают на более простые с прямолинейными или наклонными участками. От количества участков зависит и количество одинарных фрез, собираемых на одной оправке в один блок. В составные фрезы могут входить инструменты с одинаковыми или разными параметра-

ми. Технология изготовления отдельных фрез, входящих в составные, не отличается существенно от технологии изготовления цельного или сборного инструмента [35, 170].

Для обработки сложных профилей применяют составные саморегулирующиеся фрезы, состоящие из двух и более отдельных фрез, соединенных между собой штифтами или другими крепежными элементами. Постоянство обрабатываемого профиля детали в процессе эксплуатации инструмента обеспечивается автоматически. Наряду с саморегулирующимися фрезами применяют регулируемые. Настройка, или корректировка, обрабатываемого размера ведется путем вращения регулировочных винтов на фрезе [109, 170].

Одним из перспективных направлений повышения стойкости и работоспособности инструмента является переход на изготовление сборных конструкций, что отмечается многими авторами в работах [5, 6, 17, 35, 119...125, 127...129, 165, 241].

Сборные фрезы предназначены для фрезерования плоских и профильных поверхностей изделий из композиционных материалов. Они состоят из корпуса, сменных режущих элементов, деталей крепления и регулирования. Все эти элементы изготавливаются отдельно, затем собираются в единую фрезу; режущие элементы регулируются на диаметр резания. Изготовленная и собранная фреза проходит контроль и испытания (статические и динамические) [165, 170].

Основное достоинство сборных фрез – экономия дорогостоящих инструментальных материалов. Кроме того, по сравнению с цельными, они имеют и другие преимущества: более рациональное использование инструментальных материалов, повышенный срок службы корпуса. В то же время данный тип фрез имеет и недостатки: относительно более высокую трудоемкость изготовления и эксплуатации и меньшую жесткость [165, 170].

Сборные конструкции имеют многоцелевое назначение, т.е. в процессе обработки профильных поверхностей различной конфигурации имеется возможность использовать единый универсальный корпус, в который крепятся вставки различного технологического назначения. Вставки подразумевают либо механи-

ческое, либо паяное крепление пластин, как из традиционных, так и из перспективных инструментальных материалов [35, 109, 110, 119, 120, 165].

Конструкции сборных фрез отличаются разнообразием структурных составляющих и элементов. При этом уделяется внимание точности инструмента, надежности крепления и удобству регулирования.

В последнее время широко применяются конструкции фрезерного инструмента с поворотными неперетачиваемыми пластинами из твердого сплава, которые имеют ряд несомненных достоинств.

Применение сборных конструкций позволяет значительно увеличить возможности инструмента. Использование резцовых вставок, оснащенных различными видами инструментальных материалов, позволяет учитывать рекомендации по сочетаниям инструментального и обрабатываемого материалов с заменой только режущих элементов в корпусе без необходимости снятия со станка всего инструмента целиком. Кроме того, имеется возможность варьирования геометрическими параметрами фрез для определенных условий обработки, замены технологического назначения инструмента. При этом корпус инструмента и элементы крепления остаются неизменными, что позволяет экономить конструкционные материалы. В целом такие конструкции повышают универсальность инструмента и находят все большее применение в современном производстве.

В настоящее время разработаны новые конструкции сборных фрез, но они также обладают рядом недостатков: малый ресурс и жесткость режущих элементов; сложность крепления резцов и отсутствие единой схемы базирования; сложность установки и регулировки на размер резания при сборке инструмента; уменьшение точности и жесткости всего инструмента в целом.

### **1.3.2. Инструментальные материалы, применяемые для изготовления инструмента для обработки композиционных материалов**

Процесс резания композиционных материалов сопровождается большим давлением на режущий инструмент, трением и тепловыделением. Таким условиям

работы должны соответствовать материалы, имеющие высокую твердость. Высокая твердость может быть обеспечена физико-механическими свойствами материала или его термической обработкой.

В процессе резания композиционных материалов срезаемый слой давит на переднюю поверхность инструмента, создавая в пределах площади контакта напряжение. При резании с некоторых видов композитов установленными режимами резания контактные напряжения могут достигать значительных величин. Инструмент может работать в условиях переменных значений сил, например из-за неравномерно снимаемого слоя композиционного материала исходной заготовки. Важно, чтобы инструментальный материал сочетал в себе высокую твердость с сопротивляемостью на сжатие и изгиб, обладал высоким пределом выносливости и ударной вязкостью.

При резании композиционных неметаллических материалов, как правило, протекающем без применения охлаждающих средств, в силу ранее перечисленных специфических свойств композитов, со стороны заготовки на инструмент воздействует и температурный фактор. Это приводит к тому, что режущие элементы инструмента интенсивно теряют свою твердость и изнашиваются. Следовательно, важным требованием, предъявляемым к инструментальному материалу для обработки композиционных неметаллических материалов, является высокая теплостойкость.

Контактные процессы, протекающие в зоне резания при обработке композитов, приводят к интенсификации процесса изнашивания рабочих поверхностей инструмента. Следовательно, другим важным требованием, предъявляемым к инструментальным материалам для обработки композиционных неметаллических материалов, является повышенная износостойкость.

Кроме того, инструментальный материал должен обладать высокой теплопроводностью для отвода тепла из зоны резания при обработке композиционных неметаллических материалов, причем, чем она выше, тем меньше и опасность возникновения шлифовочных прижогов и трещин также при формообразовании режущих элементов на стадии изготовления и восстановления инструмента.

В промышленности используются разнообразные виды инструментов для обработки композиционных неметаллических материалов [8], что приводит к соответствующему расходу инструментального материала. Последний должен быть по возможности недорогим и не содержать дефицитных компонентов, что снизит стоимость инструмента и, соответственно, стоимость изготовления изделий. Рассмотрим некоторые виды инструментальных материалов и их применяемость при обработке композиционных неметаллических материалов [8].

Углеродистые инструментальные стали. Она характеризуются относительно высокой твердостью, прочностью и удовлетворительной износостойкостью. Однако эти свойства сохраняются только при температурах до 200...250 °С. Инструментальные углеродистые стали имеют ограниченное применение при изготовлении инструмента для обработки композиционных материалов [66, 113].

Инструментальные легированные стали. Для повышения эксплуатационных характеристик инструмента в стали вводят легирующие элементы, которые образуют с основной стали или другими элементами химические соединения, которые характеризуются высокими твердостью, прочностью, износо- и теплостойкостью. Инструментальная легированная сталь, вследствие влияния легирующих примесей, обладает лучшими режущими и механическими свойствами, однако также не нашла широкого применения при обработке композиционных материалов [8, 66, 113].

Быстрорежущие стали. Высокими режущими свойствами характеризуются быстрорежущие стали, что достигается значительным и комплексным легированием их такими элементами, как вольфрам, молибден, кобальт, ванадий, хром и др. Важнейшим легирующим элементом быстрорежущих сталей является вольфрам, который придает им свойства жаропрочности [8, 66, 113].

Однако инструментальные стали (углеродистые, легированные и быстрорежущие) не обладают высокой износостойкостью и приводят к быстрой потере работоспособности инструмента: режущая способность лезвий уменьшается из-за их затупления, увеличение шероховатости режущих поверхностей приводит к увеличению трения и температуры в зоне резания, ухудшается качество обрабо-

танных поверхностей. Инструмент, изготовленный из таких инструментальных материалов, требует частых переточек, что уменьшает эффективность производства.

Одно из решений данной проблемы – применение инструментальных материалов, обладающих более высокой износостойкостью и твердостью по сравнению с перечисленными материалами. Такие материалы широко используются в машиностроении для обработки металлических материалов, однако для обработки композиционных материалов мало используются из-за сложностей, связанных с формированием специфических требований к режущим элементам инструмента для обработки композиционных материалов (представленными ранее) традиционными способами формообразования. К прогрессивным можно отнести металлокерамические и сверхтвердые инструментальные материалы [5, 36, 54, 56, 66, 112, 113, 220].

Металлокерамические твердые сплавы обладают комплексом свойств, которые отличают их от традиционных материалов, что и предопределило их успешное применение для совершенствования современных и разработки принципиально новых конструкций инструмента [8, 66, 113, 116, 136, 231, 239, 254].

Твердые сплавы, применяемые для оснащения различных видов инструментов инструментов, по составу и областям применения условно делят на четыре основные группы:

- однокарбидные вольфрамокобальтовые (ВК);
- двухкарбидные титановольфрамовые (ТК);
- трехкарбидные титанотанталовольфрамовые (ТТК);
- безвольфрамовые на основе карбида и карбонитрида титана.

Наличие карбидов титана повышает сопротивляемость инструментов износу по передним поверхностям. У двухкарбидных твердых сплавов (группа ТК), так же как и у однокарбидных, уменьшение содержания кобальта способствует повышению тепло- и износостойкости, но снижает их прочность (Таблицы 1.6...1.7).

Сплавы группы ВК обладают наиболее разнообразными и более высокими

свойствами, в частности более высокой теплопроводностью, ударной вязкостью, прочностью на изгиб и модулем упругости [116].

Таблица 1.6

Физико-механические свойства и химический состав некоторых твердых сплавов группы ВК

Марка сплава	WC, %	TiC, %	TaC, %	Co, %	$\sigma_{изг}$ , МПа	HRA	$\sigma_{сж}$ , МПа	НВ
ВК2	98	-	-	2	1100	90	416	-
ВК3	97	-	-	3	1100	91	-	-
ВК3М	97	-	-	3	-	-	-	-
ВК6	94	-	-	6	1450	88	460	-
ВК6М	94	-	-	6	1500	87	-	-
ВК8	98	-	-	8	-	88	-	-
ВК10	90	-	-	10	1700	86	-	366
ВК25	75	-	-	25	2000	83,5	-	370

Таблица 1.7

Физико-механические свойства и химический состав некоторых твердых сплавов групп ТК и ТТК

Марка сплава	WC, %	TiC, %	TaC, %	Co, %	$\sigma_{изг}$ , МПа	HRA	$\sigma_{сж}$ , МПа
T30K4	66	30	-	4	900	92	-
T15K6	79	15	-	6	1159	90	3900
T5K10	85	6	-	9	1385	88	4000
ТТ7К12	81	4	3	12	1600	87	-
ТТ10К8Б	82	3	7	8	1400	89	-

Режущие свойства и качество твердосплавного инструмента определяются не только его химическим составом, но и его структурой, т.е. величиной зерен. С увеличением их размера прочность сплава возрастает, а износостойкость уменьшается. Мелкозернистые структуры обладают высокой износостойкостью и большой размерной стабильностью. Крупнозернистые же более прочны и лучше сопротивляются ударным и вибрационным нагрузкам.

Разработано несколько марок мелкозернистых и особо мелкозернистых сплавов с размером зерен карбидов 1 мкм и менее. Для обозначения структуры в конце маркировки таких сплавов ставятся буквы М или ОМ, например ВК6-М, ВК10-ОМ и др.

Крупнозернистые сплавы с размером зерен карбидов вольфрама 3...5 мкм, например твердые сплавы марок ВК4В, ВК8В, имеют большую прочность, чем

обычные сплавы, и рекомендуются для черновой обработки и для резания с ударами.

Все большее значение в условиях дефицита вольфрама приобретает производство безвольфрамовых твердых сплавов (БВТС). Их выпуск позволяет заменить относительно дорогой вольфрам более дешевыми металлами, расширить номенклатуру твердых сплавов со специфическими свойствами, создать твердые сплавы с более высокими эксплуатационными характеристиками (Таблица 1.8).

Таблица 1.8

Физико-механические свойства безвольфрамовых твердых сплавов

Марка твердого сплава	Плотность, г/см <sup>3</sup>	$\sigma_{изг}$ , МПа	$\sigma_{сж}$ , МПа	Твердость, HRA	Модуль упругости · 10 <sup>3</sup> МПа	Величина зерна, мкм
ТМЗ	5,9	1150	3600	89	410	-
ТН-20	5,5	1000	3500	89,5	400	1-2
ТП-50	6,2	1250	-	86,5	-	-
КНТ-16	5,8	1150	3900	89	440	1,2-1,8
МНТ-А2	5,5	1000	-	90	-	-

Эти сплавы делятся на группы:

- сплавы на основе сложного карбида титана и ниобия (ТМ1 и ТМЗ);
- на основе карбида титана (ТН-20);
- на основе карбонитрида титана (КНТ-16).

В качестве связки используют чаще всего никель и молибден.

Помимо этого, перспективными при изготовлении инструмента для обработки композиционных материалов является режущая минералокерамика, сверхтвердые материалы [3].

В результате интенсивных исследований, проведенных как в нашей стране, так и за рубежом, были разработаны новые марки минералокерамики, в состав которых с целью повышения прочности введены добавки карбидов, нитридов, оксидов вольфрама, титана, молибдена и циркония.

Сверхтвердые материалы также ограниченно используются при изготовлении режущего инструмента для обработки композиционных материалов в силу сложностей, связанных с формообразованием традиционными методами из этих

материалов режущих элементов инструмента со специфической для обработки композитов геометрией [54, 66, 113, 235].

При большом разнообразии инструментальных материалов не все они, однако, подходят для обработки композитов. Так, например, стеклопластики имеют низкую теплопроводность, они являются термореактивными материалами; в зоне резания температура не должна превышать 300 °С. Выше этих температур происходит их размягчение и выгорание, а также интенсивная термодеструкция связующего. Поэтому для поддержания указанных температур при значительных скоростях резания необходим инструментальный материал с высокой теплопроводностью.

Результаты исследований процесса обработки композитов [8, 17] показали, что наиболее оптимальным инструментальным материалом при обработке композиционных материалов являются твердые сплавы. Так, теплопроводность однокарбидных вольфрамокобальтовых твердых сплавов в 1,6...2,6 раза выше, чем двухкарбидных сплавов, а это означает, что их стойкость при одинаковой твердости различается порой в шесть раз.

При назначении марки твердого сплава для обработки композиционных материалов следует иметь в виду, что с повышением содержания кобальта в сплаве увеличивается его прочность, но снижается износостойкость, поэтому легко объяснима более высокая стойкость сплавов с меньшим содержанием кобальта.

Выбор марки твердого сплава инструмента для обработки композиционных материалов зависит от многих факторов: физико-механических свойств инструментального и обрабатываемого материалов, условий эксплуатации инструмента, объемов механической обработки изделий из композиционных материалов, требуемой производительности, типа инструмента, угловых параметров, режимов резания.

Изнашивание твердых сплавов при обработке композиционных материалов происходит главным образом за счет абразивного истирания кобальта и выпадения вследствие этого отдельных зерен карбидов. Этим можно объяснить и более высокую стойкость мелкозернистых сплавов с достаточно высоким со-

держанием кобальта.

Таким образом, для дальнейших исследований процесса обработки композиционных материалов (на древесной основе и полимерных композитов) принято решение использовать при оснащении режущего инструмента однокарбидные твердые сплавы (группа ВК), безвольфрамовые твердые сплавы (ТН20), рекомендуемые в литературе для замены этой группы инструментальных материалов при обработке неметаллических материалов и, для сравнительного анализа, – двухкарбидные твердые сплавы (группа ТК). Это позволит разносторонне проанализировать влияние марки инструментального твердого сплава на повышение производительности режущего инструмента, предназначенного для обработки композиционных неметаллических материалов.

### **1.3.3. Методы и способы повышения работоспособности инструмента**

Одним и наиболее важных показателей эксплуатации режущего инструмента является его работоспособность, определяющая состояние, при котором режущий инструмент выполняет свою работу, имея износ рабочих поверхностей меньше критического значения.

Работоспособность режущего инструмента может быть повышена благодаря такому изменению поверхностных свойств инструментального материала, при котором контактная поверхность инструмента будет наиболее эффективно сопротивляться абразивному, адгезионному, коррозионно-окислительному и другими видами износа как при комнатной, так и при повышенной температурах. Также инструментальный материал должен обладать достаточным запасом прочности при сжатии, изгибе, приложении ударных нагрузок.

Большинство инструментальных материалов обладают лишь несколькими из указанных выше свойств, что резко снижает их область применения.

Повысить работоспособность режущего инструмента можно путем проведения конструкторско-технологических и эксплуатационных мероприятий, как то:

- 1) оптимизация выбора инструментального материала;

- 2) улучшение шероховатости поверхностей инструмента;
- 3) совершенствование технологии его производства;
- 4) оптимизация геометрических параметров;
- 5) упрочнение режущей части инструмента;
- 6) эффективное использование смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) и др.

Вопросы, касающиеся повышения работоспособности инструмента, рассматривались и ранее, в частности, в работах [1, 4, 5, 7, 10, 16, 25, 33, 41, 50, 51, 60, 69, 70, 99, 105, 108, 110, 126, 137, 226].

Кратко остановимся на некоторых из них.

Оптимизация выбора инструментального материала зависит от многих факторов: обрабатываемого материала, вида обработки, применяемого оборудования, жесткости системы СПИД, а в ряде случаев и от регламентируемых режимов резания [1, 16, 25, 50].

Улучшение шероховатости поверхностей режущего инструмента, контактирующих со стружкой и обрабатываемой заготовкой, позволяет снизить интенсивность изнашивания этих поверхностей и, как следствие, повысить работоспособность инструмента [61].

Оптимизация геометрических параметров обеспечивает получение максимально возможной экономической стойкости. Ранее проведенные исследования [8, 17] показывают, что при обработке композиционных материалов необходимо стремиться к увеличению задних углов, что ведет к уменьшению интенсивности износа инструмента по задней поверхности, в свою очередь, это приводит к уменьшению угла при вершине резца, а, следовательно, к сложностям формообразования качественного режущего лезвия. Кроме того, исследования показали, что при обработке композиционных материалов большое значение для увеличения стойкости инструмента имеет его заточка с минимальным радиусом округления режущей кромки. Добиться качественной геометрии режущих элементов возможно с использованием современных технологий производства инструментов.

Таким образом, совершенствование технологии производства режущего ин-

струмента возможно при широком использовании прогрессивных технологий в сочетании с высокоточным автоматизированным оборудованием, что позволяет повысить качество инструмента и его эффективность.

Упрочнение режущей части инструмента. Применяемые методы упрочнения различаются между собой как физической природой воздействия на инструмент, так и достигаемыми результатами и эффективностью.

Используются следующие методы упрочнения: нанесение износостойких покрытий; нанесение антифрикционных покрытий; механическое упрочнение (дробеструйная обработка и виброобработка); химико-термическая обработка (азотирование, цементация, карбонитрация и т.п.); гальваническое упрочнение (омеднение); упрочнение с использованием физических методов (обработка в магнитном поле, лазерное упрочнение, обработка глубоким холодом).

В связи с высокой эффективностью, универсальностью и относительно простой технологией нанесения в настоящее время наибольшее распространение получили износостойкие покрытия и химико-термическое упрочнение.

Химико-термическая обработка позволяет упрочнить поверхностный слой инструмента, а в некоторых случаях и снизить коэффициент трения. Обработка сочетает термическое и химическое воздействие с целью изменения химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя инструментального материала. Она осуществляется в результате диффузионного насыщения поверхностного слоя неметаллами: азотом (азотирование), углеродом (цементация), бором и т.п.

Главная цель нанесения износостойких покрытий – получение повышенной твердости и износостойкости контактных поверхностей режущего инструмента при сохранении относительно высокой его прочности на изгиб и высокой ударной вязкости основы [11, 70]. Кроме того, износостойкие покрытия обеспечивают следующие дополнительные преимущества: снижение коэффициента трения в процессе резания; уменьшение силы резания; снижение интенсивности наростообразования; защита инструментального материала от адгезии и диффузии; повышение стойкости инструмента; расширение области применения инструментального материала.

В настоящее время широкое использование получили покрытия из карбида титана  $TiC$ , нитрида титана  $TiN$ , карбонитрида титана  $TiCN$ , нитрида молибдена  $Mo_2N$ , диоксида алюминия  $Al_2O_3$ . Наиболее распространенными способами их нанесения являются: термодиффузионное насыщение; осаждение из газовой фазы, или химическое осаждение паров; конденсация наносимого вещества в вакууме с последующей ионной бомбардировкой; реактивное электронно-плазменное напыление [105, 108].

Антифрикционные покрытия (сульфиды и фосфаты различных металлов:  $MoS_2$ ,  $NiP$  и др.) наносят на контактные поверхности режущего инструмента. Они имеют твердость меньше, чем материал основы, и выполняют функции твердых смазок, что ведет к снижению коэффициента трения и уменьшению изнашивания инструмента.

Гальваническое упрочнение. Главной его целью является создание надежного диффузионного барьера между инструментальным и обрабатываемым материалами. Наиболее известным из способов является хромирование. Карбиды хрома обладают повышенной прочностью. Износостойкость хромированных поверхностей увеличивается 2...4 раза. Сопутствующим эффектом такого упрочнения является снижение работы трения и улучшение теплоотвода.

Повышению стойкости режущих инструментов способствует эффективное использование СОТС, которые обеспечивают снижение температуры резания, повышение качества обработанной поверхности и получение транспортабельной формы стружки. В качестве СОТС применяют обычно различные смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ), аэрозоли, сжатый воздух и др. Эффективность их использования состоит в том, что они оказывают: смазывающее действие, уменьшающее трение рабочих поверхностей инструмента о стружку и обрабатываемую поверхность заготовки, ликвидирующее явление схватывания, а также приводящее к удалению стружки из зоны резания; охлаждающее действие, вызывающее понижение температуры нагрева рабочих поверхностей инструмента; режущее действие, облегчающее процесс резания вследствие уменьшения работы и сил, необходимых для деформирования и разрушения срезаемого слоя; химическую

защиту заготовки, образующейся в процессе резания обработанной поверхности, от вредного воздействия атмосферы воздуха.

Однако, следует отметить, что применение смазывающе-охлаждающих жидкостей при обработке композиционных неметаллических материалов значительно ограничено в связи со специфическими свойствами таких материалов.

Обобщая вышесказанное, можно сделать следующие выводы.

Повысить работоспособность режущего инструмента можно путем оптимизации следующих условий:

- сочетания прочностных, теплофизических и химических свойств инструментального материала, обеспечиваемых использованием новых или упрочнением традиционных инструментальных материалов;

- режимов резания, угловых параметров и начальной микрогеометрии инструмента, снижающих контактные нагрузки на поверхность лезвия;

- схемы резания и расположения лезвий, уменьшающих фактический путь трения и цикличность возникновения нагрузок;

- конструкций сборного инструмента, повышающих его надежность и технологические возможности.

#### **1.3.4. Организация системы инструментального обеспечения на предприятиях**

При выборе метода повышения стойкости режущего инструмента необходимо учитывать конкретные условия его работы. Большое значение имеет также учет организационных и экономических факторов: объема производства, количества находящегося в эксплуатации инструмента и оборудования, возможности инструментальных цехов и участков.

Правильно проведенные мероприятия по повышению работоспособности инструмента приведут к улучшению его качества и качества изготавливаемых деталей, увеличению точности изделий и эффективности производства в целом.

Самостоятельной службой предприятия, снабжающей производство, ис-

пользующее в своих технологиях режущий инструмент, является система инструментального обеспечения. В общем случае эта служба должна решать следующие задачи [39, 40, 45, 51, 59, 76, 114, 140, 164]:

1. Определение потребностей предприятия в технологическом инструменте и инструменте для его восстановления (изготовления).
2. Определение потребности в контрольно-измерительном оборудовании для подготовки режущего инструмента.
3. Приобретение стандартного режущего инструмента или изготовление специального.
4. Организация технологических процессов изготовления и ремонта режущего инструмента.
5. Надзор за соблюдением требований по эксплуатации режущего инструмента.
6. Обеспечение технологического процесса режущим инструментом.
7. Систематизация и хранение режущего и абразивного инструмента.

Объем работ по решению перечисленных задач зависит от количества находящегося в работе на предприятии режущего инструмента. Наиболее трудоемкие задачи – выбор, ремонт и изготовление – могут решаться либо силами инструментальной службы самого предприятия, либо путем привлечения специализированных центров подготовки режущего инструмента.

При централизованном подходе система инструментального обеспечения включает следующие структурные подразделения: инструментальный цех, центральный инструментальный склад, инструментально-раздаточную кладовую, инструментальную лабораторию, заточные отделения.

Инструментальный цех включает в свою структуру участки по изготовлению специального инструмента, оснащению инструмента износостойкими материалами и его ремонту, а также изготовлению инструментальной оснастки и приспособлений.

Инструментально-раздаточные кладовые организуются для обеспечения рабочих мест технологического процесса режущим инструментом.

Инструментальная лаборатория организуется при необходимости разработки и изготовления специального режущего инструмента, инструментальной оснастки и приспособлений. Она осуществляет разработку конструкций и технологии изготовления инструмента, выбор условий его эксплуатации и разработку мероприятий по повышению его работоспособности.

В заточном отделении выполняются все работы по подготовке режущего инструмента: заточке, правке, проковке и вальцеванию, наладке сборного инструмента, балансировке и др.

Приобретая или изготавливая те или иные виды инструмента, предприятие удовлетворяет потребность в них.

Стандартный инструмент приобретает обычно отдел снабжения по заявке, составленной технологом и завизированной начальником инструментального хозяйства. В заявке должны быть четко указаны все необходимые данные: наименование и конкретное технологическое назначение инструмента; ГОСТ на него или фирменный каталог, по которому он выбран; обозначение инструмента по ГОСТу или каталогу; его основные параметры (размеры, число зубьев и др.); число инструментов, подлежащих приобретению.

Специальный инструмент подлежит изготовлению либо собственным инструментальным цехом, либо специализированным инструментальным предприятием. В любом случае технологом должна быть составлена заявка на изготовление, в которой указывается:

- наименование заказанного инструмента и его тип;
- размеры заготовки и профиль обработанной детали;
- материал заготовки;
- требования к точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей;
- модель станка, на котором будет обрабатываться заготовка, и по возможности его основные данные (мощность привода механизмов резания и подачи, диапазон скоростей подачи, частота вращения и диаметр шпинделя, направление вращения шпинделя, габаритные предельно допустимые размеры инструмента);
- желательная величина скорости подачи;

– дополнительные требования к инструменту (по усмотрению заказчика).

Рынок инструмента в последние годы все больше насыщается продукцией отечественных и зарубежных изготовителей. Задача – подобрать подходящий – сегодня уже не актуальна. Сегодня стоит другая задача: выбрать инструмент, оптимальный для заданных условий работы.

Выбор инструмента включает следующие этапы [39, 40, 45, 51, 59, 76, 140, 164]:

1. Уточнение исходных данных для выбора инструмента.
2. Определение основных точностных и геометрических параметров режущего инструмента.
3. Уточнение конструктивного решения инструмента.
4. Подбор стандартного инструмента или оформление заказа на специальный инструмент. Анализ сведений о его эксплуатационных и стоимостных параметрах.
5. Определение производителя и поставщика инструмента по критерию «цена-качество».

На первом этапе уточняют исходные данные, характеризующие деталь и технологию ее обработки.

На втором этапе определяют основные параметры режущего инструмента. Каждый его вид характеризуется своим набором параметров. Один из них – конструктивные особенности закрепления оборудования, на котором будет работать данный инструмент. Как правило, конструктивные решения устройств для закрепления инструмента на станках унифицированы. Однако некоторые изготовители станков не всегда обоснованно применяют нестандартные диаметры шпинделей, специальные втулки-оправки, встроенные в инструмент цанги, радиальные или торцевые шпонки и т.п. В результате весь инструмент, применяемый на данной станке, становится специальным, что значительно сужает круг возможных его поставщиков.

На третьем этапе предварительно выбирают тип инструмента (цельный или сборный, затылованный или незатылованный, со стальными или твердосплавными

ми режущими пластинами и т.д.). Выбор этот чаще всего делается на основании некоторых общих соображений, выработанных многолетней практикой исходя из объемов производства, особенностей обрабатываемых материалов и т.п.

Четвертый этап наиболее трудоемкий. В ходе его выполнения предстоит выяснить, выпускается ли инструмент данного типа с определенными основными параметрами каким-либо известным инструментальным предприятием. Для этого надо иметь в распоряжении большое количество справочной литературы. Собрать эти сведения в единый справочник практически невозможно из-за большого их объема и очень частого обновления содержания.

Для выбора оптимального варианта решения на пятом этапе следует сопоставить все альтернативные варианты «цена-качество».

После затачивания инструмента обычно производят наладку сборных фрез, которая состоит в выверке и закреплении лезвий в корпусе.

Грамотно спроектированное центробежно-клиновое крепление предусматривает минимальное монтажное усилие затяжки крепежных винтов. Достаточно силы 10...20 Н на гаечном ключе длиной 100 мм, чтобы обеспечить надежное закрепление ножа в невращающейся фрезе. При ее вращении усилие закрепления автоматически увеличивается.

При правильной установке клин не только закрепляет нож, но и служит для предотвращения образования сколов на обработанной поверхности при срезе толстых стружек. Следствием воздействия клина на стружку является не только повышение качества обработанной поверхности, но и увеличение сил и мощности резания. При тонких стружках качество обработки удовлетворительное и без воздействия на них.

Основные требования к установке режущих элементов фрез сводятся к следующему: опорные поверхности режущих элементов должны плотно прилегать к поверхностям клина и корпуса; режущие кромки всех режущих элементов должны быть расположены параллельно оси вращения фрезы; разность радиусов резания лезвий не должна превышать 0,05 мм. Неточная установка лезвий ведет к снижению качества обработки, неравномерной нагрузке лезвий, повышенной

вибрации шпинделя.

Процедура наладки сборных фрез достаточно трудоемка, требует терпения и аккуратности исполнителя. Она существенно упрощается при использовании специальных конструкций фрез.

Наиболее простой способ установки инструмента на оборудование – непосредственная установка фрезы на шпинделе с зажимом ее гайкой. Направление резьбы должно быть противоположно направлению вращения шпинделя.

При непосредственной посадке на шпиндель фреза упирается в буртик шпинделя и зажимается гайкой. Для изменения положения фрезы по высоте используют постановочные кольца, прокладки или шайбы.

Если диаметр посадочного отверстия больше диаметра шпинделя, применяют посадку на шпиндель через втулку. Фрезу сначала закрепляют на втулке гайкой, а затем втулку устанавливают на шпиндель и крепят затяжной гайкой.

В случае, когда шпиндель не имеет резьбы для крепления фрезы, используют цанговую оправку, которая имеет внутреннюю конусную разрезную и наружную втулки. Фрезу устанавливают на наружную втулку и крепят гайкой. Затем оправку с инструментом устанавливают на шпиндель и закрепляют, вращая верхнюю затяжную гайку. При этом наружная втулка смещается по внутренней конической, в результате чего ее разрезная часть плотно охватывает шпиндель.

Если шпиндель станка не имеет осевого регулировочного перемещения, фреза может крепиться в установочной головке, снабженной устройством для регулирования положения фрезы относительно рабочей поверхности стола. Положение головки с фрезой регулируют при ослабленной внутренней втулке вращением винта, который упирается в торец шпинделя.

Распространение получило стандартное крепление фрез на горизонтальном шпинделе двумя короткими конусными цангами, зажимаемыми гайками. Штифты в корпусе фрезы входят в прорези цанг, предотвращая их поворот. Направляющий винт при ввинчивании входит в шпоночный паз шпинделя и служит для фиксации головки и увеличения надежности передачи крутящего момента.

На сегодняшний день получили распространение гидропластовые устройст-

ва для закрепления фрез на шпинделях. Тонкостенная втулка запрессовывается в корпус фрезы. Внутренняя поверхность втулки одновременно является центрирующей и зажимающей. В полость между втулкой и фрезой под давлением нагнетается гидропластмасса. Давление создают вращением винта-плунжера. Для открепления фрезы давление в полости уменьшают, вывинчивая винт. Крепление обеспечивает повышенную точность центрирования фрезы на шпинделе.

Фрезы вращаются с большой угловой скоростью вокруг оси. Если центр масс вращающегося тела не совпадает с осью вращения, то на подшипники действуют дополнительные динамические силы. Они пропорциональны квадрату угловой скорости, массе тела и смещению центра массы относительно оси вращения. Увеличение динамических сил отрицательно сказывается на долговечности подшипников, вызывает вибрацию инструмента и станка, является причиной увеличения уровня шума при работе.

Дисбаланс изготовленного инструмента оказывает негативное влияние на процесс обработки. Он приводит к потере качества обработанной поверхности, увеличению износа инструмента и оборудования [74]. Для выявления величины дисбаланса после изготовления инструмента проводят его балансировку.

Различают два вида балансировки – статическую и динамическую.

Насадные фрезы обычно балансируют статически, т.е. без вращения фрезы с рабочей скоростью.

Статическая балансировка заключается в уравнивании сил, действующих на вращающийся инструмент, т.е. обеспечивает совпадение центра его массы с осью вращения при использовании одной плоскости исправления. Неуровновешенность фрезы, насаженной на оправку, выявляют на призматических параллелях балансировочного прибора (максимальный диаметр фрезы 400 мм). Главный вектор дисбалансов фрезы, находящейся в покое, под действием силы тяжести создает момент относительно оси или точки подвеса фрезы и стремится повернуть фрезу так, чтобы центр масс занял самое низкое положение. На этом принципе основано действие различных средств для выявления и определения статической неуравновешенности в поле силы тяжести. Проверку делают 3...4 раза. Для

установления величины неуравновешенности (дисбаланса) к легкой части фрезы прикрепляют грузики (например, кусочки пластилина). Добившись уравновешенности, грузики взвешивают. Произведение добавочной массы на радиус ее крепления дает величину дисбаланса (г/см). Для фрез диаметром 120...180 мм дисбаланс допускается до 3...5 г/см. Фрезу уравнивают удалением (стачиванием, высверливанием) металла с тяжелой ее части в нерабочей зоне.

При динамической балансировке используют две плоскости исправления, что позволяет уравновесить не только силы, но и моменты. Отклонение от параллельности оси вращения фрезы ее главной центральной оси инерции может быть выявлено при вращении фрезы на специальном балансировочном станке. Обычно действие на фрезу главного момента и главного вектора заменяют действием эквивалентных систем. При вращении неуравновешенных масс, находящихся от оси на расстоянии  $e$ , возникают центробежные силы, пропорциональные дисбалансам в плоскостях опор [74]:

$$F_A = m_A e_A \omega^2; \quad (1.1.)$$

$$F_B = m_B e_B \omega^2. \quad (1.2.)$$

Эти силы вызывают давление или вибрации в опорах ротора станка и через вибропреобразователи различных типов фиксируются соответствующей измерительной системой.

Данный способ выявления дисбалансов не является единственным, но практически для всех балансировочных станков используют именно его.

Динамическая балансировка позволяет с высокой точностью (остаточная неуравновешенность не более 1 г/см) уравновесить не только силы, но и моменты.

Ось динамически сбалансированного инструмента не испытывает никаких динамических давлений, то есть является свободной. Это важно для инструментов, длина которых сопоставима с их диаметром.

В результате анализа мероприятий по подготовке инструмента на предприятиях выделим два основных этапа:

1. Комплекс мероприятий по систематизации инструмента, имеющегося в

распоряжении предприятия; подбору конструктивных решений инструмента с необходимыми характеристиками для осуществления технологического процесса обработки материалов резанием; выбору рациональных условий его эксплуатации.

2. Комплекс технологических процессов, обеспечивающих его оптимальные рабочие параметры при минимальных трудозатратах. Состав технологических процессов определяется конструкцией инструмента и условиями его работы. В них входят операции заточки, балансирования, правки, выверки, установки в станок и т.д.

Таким образом, процесс подготовки инструмента включает в себя систему мероприятий, направленных на обеспечение требуемых технологических параметров инструмента, гарантирующих его бесперебойную работу, с максимальной эффективностью и качеством обработанной продукции. Сюда можно отнести:

- моделирование оптимальных конструкций инструмента, обладающих наилучшими технологическими параметрами;
- систематизацию имеющегося в распоряжении инструмента для возможности принятия синтезированных конструкторско-технологических решений при выборе рациональной конструкции для заданных производственных условий;
- изготовление инструмента или восстановление его режущих способностей после изнашивания или поломки;
- балансировку инструмента;
- правильную установку инструмента на оборудование;
- подбор рациональных режимов обработки.

### **Выводы по 1 главе:**

Композиционные материалы, в силу многих положительных свойств, занимают свое место в списке прогрессивных материалов и уверенно завоевывают общемировой рынок. Широко развивается индустрия создания новых композиционных неметаллических материалов с широкой гаммой свойств, отвечающих тре-

бованиям, предъявляемым к готовым изделиям и конструкциям в разных отраслях промышленности (машиностроение, авиастроение, судостроение, вагоностроение, строительство, автомобильная промышленность, мебельная промышленность и т.д.). Их использование во многих отраслях промышленности отвечает актуальным требованиям рационального природопользования.

Среди широкой гаммы композиционных труднообрабатываемых материалов наибольшее распространение получили композиционные материалы на древесной основе и полимерные композиционные материалы, в силу невысокой стоимости и доступности исходного сырья.

Расширение области применения композиционных материалов в первую очередь требует исследования процесса их механической обработки лезвийным инструментом, применяемого для окончательного формирования изделий с заданной формой, точностью и качеством обработанных поверхностей. В то же время, в силу разнообразного состава матрицы и наполнителей, с точки зрения механической обработки, такие материалы имеют свою специфику, в сравнении металлическими и древесными материалами, относятся к разряду труднообрабатываемых, что приводит к повышенной потере работоспособности режущего инструмента.

Для оптимизации процесса резания композиционных материалов, достижения максимальной производительности и требуемого качества обработанной поверхности необходим инструмент, обладающий специфическими требованиями к качеству формирования режущих элементов, остроте режущего лезвия, оснащенный современными инструментальными материалами с повышенными физико-механическими свойствами, характеризующий высокими технологическими показателями. Многие авторы отмечают преимущества применения сборных конструкций инструментов, их особенности, характерные при обработке композиционных материалов. Однако исследования носили фрагментарный характер и не привели к формированию четких рекомендаций по подготовке инструмента для обработки композиционных материалов.

Требуется создание комплекса мероприятий, направленных на повышение

эффективности использования режущего инструмента на операциях механической обработки, создание новых конструктивных решений, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, отыскания рациональных условий их эксплуатации с обеспечением требуемого качества изготавливаемой продукции из композиционных неметаллических материалов.

Приняв во внимание, что на сегодняшний день более 60 % операций механической обработки выполняется с использованием фрезерного инструмента, что обусловлено разнообразием конструктивных решений и его широкими технологическими возможностями, принято решение для уменьшения объема экспериментальных данных выполнить исследования на примере одного из видов лезвийного инструмента – сборных дисковых фрез. Это не снижает значимости других видов режущего инструмента и создает предпосылки для дальнейшего развития тематики исследований, применительно к другим видам инструментов для обработки композиционных неметаллических материалов.

Таким образом, по результатам анализа теории в области композиционных неметаллических материалов и специфики режущего инструмента для их обработки *целью* исследований является повышение эффективности фрезерной обработки композиционных неметаллических материалов за счет разработки и реализации технологических методов создания, изготовления и выбора режущего инструмента.

Достижение поставленной цели требует решения следующих *задач*:

1. Для выявления характера структурных связей в системе сборного инструмента и математического описания конструктивных и геометрических особенностей провести моделирование фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов. Определить характерные структурные параметры инструмента и, на их основе, создать программные продукты, ориентированные на систематизацию номенклатуры сборного фрезерного инструмента для обработки изделий из композиционных материалов.

2. Разработать методику многокритериального сравнительного анализа кон-

структивных решений инструмента, предназначенную для выбора рациональной конструкции с учетом параметров, характеризующих инструмент, и варьируемых условий реализации процесса лезвийной обработки, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества и экономичности обработки. Создать единый программный комплекс для формирования базы данных и выбора рациональной конструкции сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов.

3. Спроектировать новые конструкции сборного фрезерного инструмента, отличающиеся повышенной работоспособностью при обработке композиционных материалов. Выявить инструментальные материалы, обеспечивающие рациональную технологию фрезерной обработки изделий из композиционных неметаллических материалов.

4. Разработать технологию и условия комбинированной электроалмазной обработки при формообразовании режущих элементов инструментов, оснащенных инструментальными материалами с повышенными эксплуатационными свойствами. Сформулировать рекомендации для реализации предложенной технологии.

5. Исследовать процесс обработки композиционных неметаллических материалов инструментом, подготовленным с учетом рекомендаций по созданию, изготовлению и анализу конструктивных решений. Получить аналитические зависимости, характеризующие влияние геометрии режущего инструмента и режимов резания на качество и производительность обработки изделий из композиционных материалов инструментом, оснащенным инструментальными материалами с повышенными эксплуатационными свойствами.

6. Разработать рекомендации по реализации системы мероприятий, направленных на повышение эффективности фрезерного инструмента при обработке композиционных неметаллических материалов.

## **ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СБОРНОГО ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА КОНСТРУКЦИЙ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВАРЬИРУЕМЫХ УСЛОВИЯХ СОПОСТАВИМОСТИ**

Подготовка режущего инструмента на предприятиях, занимающихся обработкой резанием композиционных материалов, на сегодняшний день характеризуется высокими затратами времени и ресурсов. Труд проектировщиков и конструкторов нового и специального инструмента, а также технологов, занимающихся его подготовкой к работе с учетом варьируемых условий производства, зачастую рутинен, связан с необходимостью использования большого объема информации. Хотя в конечном итоге и достигается рациональный выбор инструмента и режимов обработки, гарантирующих необходимое качество обработки и производительность, но это приводит к снижению эффективности производства в целом. Особо остро эта проблема прослеживается при использовании широкой номенклатуры сборного инструмента, оснащенного режущими элементами из разных инструментальных материалов и имеющими различное технологическое назначение.

Оборудование, приспособления и инструмент практически для всех технологических переделов и способов обработки представлены на рынке весьма широко. Помимо стандартного отечественного или импортного инструмента, который можно свободно приобрести, множество фирм и организаций предлагают свои услуги по производству специализированного инструмента под заказ. То есть, у производственных предприятий нет недостатка в выборе подходящих средств технологического оснащения.

В то же время, поскольку хороший инструмент совсем не дешев, многие руководители уделяют всё больше внимания, в том числе, и контролю за его использованием. Причем интересуются не только его наличием и местоположением, но и более детальными показателями, например, текущей наработкой конкретного экземпляра инструмента, историей его использования и т.д. Подобная информа-

ция очень полезна и с точки зрения оценки эффективности использования дорогостоящего инструмента, и для отслеживания его реального состояния, которое, в свою очередь, напрямую влияет на такие важнейшие показатели, как качество выпускаемой продукции и процент брака.

Один из путей повышения результативности таких мероприятий, на наш взгляд, видится в переходе от ручной обработки информации к автоматизации организационной подготовки инструмента, что позволит принимать технико-экономические обоснованные решения с учетом большего числа факторов, влияющих на выбор, в короткие сроки.

## **2.1. Основные принципы автоматизации процесса выбора и систематизации режущего инструмента**

В процессе развития вычислительной техники функции ПК становятся все более сложными с тенденцией к постепенной передаче ПК решения творческих задач.

Как отмечается многими авторами в работах [2, 27, 39, 40, 45, 58, 59, 68, 72 и др.], производительность труда инженерных работников, занимающихся подготовкой инструмента на предприятиях, повышается благодаря мерам следующего характера:

- совершенствование системы обеспечения инструментом, включая систематизацию самого процесса и улучшение труда инженерных работников;
- комплексная автоматизация нетворческих функций проектировщика в процессе проектирования;
- разработка имитационных моделей для автоматического воспроизведения деятельности человека, его способности принимать решения в условиях полной или частичной неопределенности создавшихся ситуаций.

Если из числа вариантов структуры необходимо выбрать наилучший по какому-либо параметрам, то такую задачу синтеза называют структурной оптимизацией [58].

Выбор режущего инструмента при заданных параметрах с позиции некоторых критериев называют параметрической оптимизацией. Возможности постановки и решения задач структурной оптимизации ограничены, поэтому под оптимизацией часто понимают только параметрическую оптимизацию. Следовательно, параметрическая оптимизация – это определение таких значений параметров  $X$ , при которых некоторая функция  $F(X)$ , называемая целевой или функцией эффективности, принимает экстремальное значение.

Следует отметить, что при множестве возможных вариантов поиск оптимального из них сводится к нахождению лучшего, который лишь приближается к оптимальному.

При решении технологической задачи взаимодействие технолога-проектировщика с ПК представляет собой процесс обмена информацией в определенном режиме. Различают два основных режима: пакетный (автоматический) и диалоговый (оперативный).

При пакетном (автоматическом) режиме технолог-пользователь и программист, как правило, не имеют прямой связи с ПК. Тексты программ, результаты их проверки и решения технологической задачи передаются через оператора машине. Пакет прикладных программ представляет собой комплекс программ, работающих под управлением программы-монитора и предназначенных для решения определенного класса близких между собой технологических задач.

При диалоговом (оперативном) режиме пользователь непосредственно связан с ПК посредством пользовательского интерфейса, обеспечивающего достаточно быстрое получение информации через интервал времени, не нарушающий естественного хода его мысли. Диалоговый режим целесообразно применять тогда, когда этот метод является единственным, а также, если он эффективен.

К числу наиболее сложных и наукоемких систем в современной технике относят системы автоматизированного проектирования (САПР), разработка которых включает следующие основные задачи: анализ процессов технологического проектирования; алгоритмизация проектных задач на базе методов оптимизации и математического моделирования; создание проектов САПР, включая выбор и

адаптацию программных и технических средств, а также разработку операционных сред САПР [68]. Все рассмотренное выше является комплексом задач, решаемых разработчиком САПР при участии специалиста в предметной области.

При создании САПР необходимо учитывать следующий ряд важных положений:

- САПР строится как открытая и развивающаяся система, в которой проектирование ведется с помощью ПК. САПР разрабатывают продолжительное время, поэтому экономически целесообразно вводить ее в эксплуатацию по частям по мере готовности. Созданный базовый вариант системы может расширяться. Кроме того, возможно появление новых, более совершенных математических моделей и программ, изменяются также и объекты проектирования.

- САПР создается как иерархическая система, реализующая комплексный подход к автоматизации на всех уровнях проектирования. Иерархическое построение САПР относится также к специальному программному обеспечению и к техническим средствам.

- САПР представляет собой совокупность информационно-согласованных подсистем. Обслуживание всех или большинства последовательно решаемых задач ведется информационно-согласованными программами. Плохая информационная согласованность приводит к тому, что САПР превращается в совокупность автономных программ.

- САПР должна быть инвариантной системой, т.е. универсальной или типовой. Структурными частями САПР являются подсистемы. Подсистема – выделяемая часть системы, с помощью которой можно получить законченные результаты проектирования. Каждая подсистема содержит элементы обеспечения.

Предусматриваются следующие обеспечения автоматизированного (автоматического) проектирования [58]:

- а) методическое обеспечение – совокупность документов, устанавливающих состав и правила отбора и эксплуатации средств;

- б) обеспечение проектирования, необходимого для выполнения автоматизированного проектирования;

в) информационное обеспечение – совокупность сведений, необходимых для выполнения проектирования, представленных в заданной форме;

г) математическое обеспечение – совокупность математических методов, математических моделей и алгоритмов, необходимых для проектирования, представленных в заданной форме;

д) лингвистическое обеспечение – совокупность языков проектирования, включая термины и определения, правила формализации естественного языка и методы сжатия и развертывания текстов, необходимых для проектирования, представленных в заданной форме;

е) программное обеспечение – совокупность машинных программ, необходимых для проектирования, представленных в заданной форме; программное обеспечение делят на две части:

– общее (операционная система), которое необходимо для функционирования ПК;

– специальное, которое включает все программы решения конкретных проектных задач.

ж) техническое обеспечение – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих технических средств, предназначенных для проектирования. К техническому обеспечению предъявляются следующие требования:

– достаточность вычислительных ресурсов (производительность и емкость памяти) для решения всех основных проектных задач;

– приближенность к рабочим местам проектировщиков, создание дружественного интерфейса пользователь – ПК; обеспечение коллективного выполнения проектирования;

з) организационное обеспечение – совокупность документов, устанавливающих состав проектной организации и ее подразделений, связи между ними, их функции, а также форму представления результата проектирования и порядок рассмотрения проектных документов, необходимых для выполнения проектирования.

Основные виды перечисленных обеспечений требуют разработки базы дан-

ных и, как следствие, их дальнейшего развития и интеллектуализации [12, 167].

База данных – структурированная совокупность данных. Наименьшая единица описания данных называется элементом описания. Совокупность элементов описания, объединенных отношением принадлежности к одному описываемому объекту, образует запись. Если элементы описания соотносятся с отдельными свойствами объекта, то запись описывает объект в целом.

Система управления базами данных (СУБД) состоит из языковых и программных средств, предназначенных для создания и использования базы данных прикладными программами, а также непосредственно пользователями-непрограммистами.

Банк данных – совокупность базы данных и системы управления базами данных (например, нормативно-технологическая информация).

Основные отличия знаний от данных сводятся к следующим понятиям:

1. Интерпретируемость – означает то, что данные, помещенные в ПК, могут содержательно интерпретироваться лишь соответствующими программами. В отрыве от программы данные не несут никакой содержательной информации, тогда как знания отличаются тем, что возможность содержательной интерпретации присутствует в них всегда.

2. Наличие классифицирующих отношений – эта особенность данных заключается в том, что, несмотря на разнообразие форм их хранения, возможности компактного описания всех связей между различными типами данных ограничены.

3. Ситуативные связи – определяют ситуативную совместимость отдельных событий или фактов, хранимых в памяти или вводимых в нее, и позволяют строить процедуры анализа знаний.

В информационной системе под рабочим процессом понимают преобразование входных данных в выходные. В данной системе это означает преобразование информации об инструменте, представленной в виде информационной модели, в технологическую документацию.

Решение о формальном распределении функций между ПК и человеком принимается проектировщиком, который непосредственно участвует в рабочем

процессе. Другим важным и необходимым элементом последнего является информационное обеспечение – характеристика обрабатываемых и инструментальных материалов, каталоги станочного оборудования, режущего и измерительного инструментов.

Эффективность создания и эксплуатации автоматизированных производственных систем обеспечивается интеграцией отдельных автоматизированных систем: АСНИ, САПР К (конструирование), САПР ТП (АСТПП), АСУ ТП, АСУ; за рубежом такие системы получили название *CIM (Computer Integrated Manufacturing)*. Разработкой таких систем занимались российские и зарубежные ученые [58, 72, 77, 81, 173, 225, 236, 244, 245, 252, 256].

Современные автоматизированные системы базируются на новых информационных технологиях. Вследствие этого для них характерен ряд признаков:

1. Объектно-ориентированное взаимодействие человека и ПК. В основу этого признака заложено программирование соответствующих процедур, выполняемых ПК. Человек видит информационные объекты, получаемые за счет средств вывода информации, и воздействует на них за счет средств ввода информации.

2. Сквозная информационная поддержка на всех этапах обработки информации на основе интегрированной базы данных. База данных предусматривает единую унифицированную форму представления, хранения, поиска, отображения, восстановления и защиты информации.

3. Безбумажный процесс обработки информации. Все промежуточные варианты и необходимые численные данные записываются на машинных носителях и доводятся до пользователя через экран монитора. На бумаге фиксируется только окончательный вариант документа.

4. Интерактивный режим решения задач, выполняемый в режиме диалога пользователя и ПК. Новые информационные технологии требуют высокого интеллектуального уровня, профессиональной и психологической подготовки пользователя, который должен досконально знать принципы и нюансы работы автоматизированными системами, а также их возможности; уметь свободно пользоваться средствами общения с компьютером; квалифицированно ставить задачи и ос-

мысливать результаты их решения.

Составными частями автоматизированных систем являются подсистемы. В каждой подсистеме решается функционально законченная последовательность задач.

Любая автоматизированная система состоит из проектирующих и обслуживающих подсистем.

Проектирующие подсистемы выполняют процедуры и операции получения новых данных. Они имеют объектную ориентацию и реализуют определенный этап проектирования или группу взаимосвязанных проектных задач.

Обслуживающие подсистемы имеют общесистемное применение и служат для обеспечения функционирования проектирующих подсистем, а также для оформления, передачи и вывода результатов проектирования.

Информационный фонд автоматизированных систем – это совокупность всех необходимых для функционирования данных.

Информационное обеспечение автоматизированных систем – это совокупность информационного фонда и средств его ведения, т.е. средств создания, реорганизации данных и обеспечения доступа к ним с использованием ПК.

Основой для объединения разных по назначению автоматизированных систем в комплексное автоматизированное производство является общность стратегий создания систем и применение для разработки составляющих их подсистем и основных средств обеспечения инструментальных комплексов.

Системы автоматизации относятся к тому типу современных организационно-технических комплексов, для которых характерно интенсивное развитие методов и средств. В связи с этим, затраты должны учитывать, с одной стороны, прогрессивный характер создания автоматизированных систем, а с другой – характер ее эволюционного развития, предполагающий периодическое вложение средств в актуализацию системы и повышение ее изменяющейся эффективности. При этом используют, как правило, следующие критерии выбора средств системы [58]:

- 1) максимум производительности при ограниченных затратах;
- 2) минимум затрат при ограниченной производительности;

- 3) максимум отношения производительности к затратам;
- 4) максимум разности экономии и затрат и т.д.

Существует множество автоматизированных систем, включающих обработку и хранение информации о режущих инструментах, технологической оснастке и условиях их использования на производстве. Рассмотрим лишь некоторые из них.

Информационная система *TechnologiCS* (Москва), предназначенная для решения различного рода практических задач. В этой системе производится учет дорогостоящего инструмента и контроль за его использованием в технологических процессах [169].

В практике широкое применение нашла система автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства *ADEM-VX*, которая имеет инструментарий для конструкторов (*CAD*), технологов (*CAPP*) и программистов ЧПУ (*CAM*) [57].

В комплексе *T-FLEX* (Москва) – проектирование операций (модуль «Технология v.10») – критерием выбора режущего инструмента является качество обрабатываемой поверхности. Программа содержит электронные справочники, в которых имеются записи с описанием приспособлений, режущих, измерительных, вспомогательных, слесарно-сборочных инструментов; оборудования и СОТС. Выбор режущего инструмента из электронных справочников производится в зависимости от качественных характеристик детали, указанных при её разработке [53].

Модуль *CAMWorks* программы *SolidWorks* позволяет проектировать многокоординатную обработку на фрезерных операциях с использованием оборудования с ЧПУ. САПР позволяет рассчитать траекторию движения режущего инструмента для каждой операции и произвести выбор фрез в зависимости от задаваемого качества обрабатываемой поверхности.

*CAMWorks* использует для диалога с пользователем интеллектуальную базу данных, хранящую и предоставляющую по мере необходимости технологическую информацию в виде библиотеки инструмента, материалов, режимов резания и станков. Принципы обработки исходных данных в *CAMWorks* состоят в выборе

операций для выполнения конструктивного элемента детали; значений параметров операции (припуски на обработку, порядок обработки, координатная система переходов, кинематика обработки, вспомогательные движения инструмента и т.д.); подборе режущего и вспомогательного инструмента для операции; выборе рациональных режимов резания.

Таким образом, анализ действующих САПР с возможностью выбора инструмента для технологических процессов позволил определить, что существующие автоматизированные комплексы программ в области проектирования технологических процессов широко используют правила выбора режущих инструментов для каждой отдельной операции, за счет чего решается проблема хранения инструментов и оснастки и обработки информации о них.

Однако широко известных автоматизированных систем инструментального обеспечения для обработки композиционных материалов пока немного.

Их формирование требует в первую очередь создания методики моделирования инструмента, позволяющей математическим языком описать конструктивные особенности, размеры и геометрические параметры, характеризующие инструмент.

## **2.2. Разработка методологии моделирования и систематизации сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов**

Подготовка режущих инструментов предусматривает решение ряда вопросов, связанных с их расчетом, конструированием, изготовлением и эксплуатацией. Методы решения этих вопросов зависят от средств, которыми располагает конструктор. Современная вычислительная техника дает возможность с предельной скоростью и точностью решать самые сложные аналитические задачи, осуществлять анализ получаемых результатов, отыскивать оптимальные параметры конструкции инструментов и в конечном итоге автоматизировать весь процесс подготовки инструмента к работе. Этой проблеме посвящены работы большого числа российских и зарубежных ученых [2, 23, 27, 30, 42, 68, 98, 104, 107, 135, 150...152,

160, 162, 171, 175, 219, 221, 245, 247, 248, 257].

При решении задач автоматизации проектирования основные свойства и характеристики режущих инструментов описывают с помощью формальных математических моделей, обеспечивающих адекватность и сохраняющих наглядность и необходимую содержательность.

К математической модели предъявляются следующие основные требования [47, 78, 102]:

- адекватность и простота представления объекта моделирования;
- информационная сложность, т.е. возможность адаптации математической модели к другим условиям, от объекта к модели и обратно;
- удовлетворение требований к допустимому объему памяти ПК;
- простота наглядность и обработки модели.

Выбор варианта математической модели зависит от постановки задачи. При оснащении технологического процесса инструментом задачи проектирования решаются на разных уровнях:

1. Поиск требуемого типоразмера инструмента с учетом его технологического назначения;
2. Корректировка параметров инструмента;
3. Проектирование нового (специального) инструмента.

Остановимся подробнее на формировании математических моделей при решении задач третьего уровня.

Достижение необходимых показателей в процессе резания во многом зависит от применяемого инструмента, его характеристик: рационально выбранных геометрии и микрогеометрии, режимов и условий обработки, сочетания обрабатываемого и инструментального материалов, точностных и размерных параметров, конструктивных особенностей инструмента. Каждая из характеристик по своему важна и оказывает определенное влияние на формирование процесса обработки изделия.

Выбор инструментального материала обеспечивает требуемую надежность, долговечность и работоспособность инструмента. Геометрические параметры

оказывают также значительное влияние на процесс резания. Рациональные режимы резания позволяют получить необходимые качественные параметры обрабатываемых изделий в сочетании с высокой производительностью процесса обработки. Точностные параметры инструмента оказывают существенное влияние на точность изготавливаемой продукции.

В процессе анализа и синтеза конструкций инструментов при автоматизированном проектировании определенные удобства представляют графовые модели, обладающие наглядностью и универсальностью и допускающие использование ПК [21, 32, 46, 52, 67, 102].

Нами разработана методика моделирования сборных конструкций фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов, которая может быть адаптирована при необходимости и под другие виды инструментов.

Этому предшествовало изучение существующих конструкций сборного фрезерного инструмента. В основе исследования лежит анализ вариантов исполнения режущей части, способов крепления режущих элементов в корпусе фрезы, применяемых марок инструментальных материалов, профилей режущих кромок, точностных и размерных характеристик, геометрии режущей части, характеристик корпуса фрез и схем крепления [193, 194].

В результате анализа поисковых исследований выявлены базовые характеристики, позволяющие описать конструкцию сборного фрезерного инструмента. Сборный фрезерный инструмент рассматривается как совокупность структурных, геометрических, конструктивных и эксплуатационных связей, объединенных в три основные части: режущую, корпусную и крепежную.

При описании режущей части фрезы используются:

- конструктивное исполнение режущей части инструмента, которое, в свою очередь, разделяет варианты исполнения режущей части на цельную, сборную с паяным соединением режущих элементов, сборную с клееным соединением режущих элементов и сборную с механическим соединением режущих пластин с державкой;

- геометрические характеристики режущей части, где выделяются основные

геометрические параметры, оказывающие существенное влияние на процесс резания материалов;

- материалы режущей части инструмента, сформированные в виде электронного списка инструментальных материалов, применяемых в современной промышленности;

- точностные и размерные характеристики режущей части, позволяющие определить габариты и точность изготовления режущих элементов;

- профиль режущей кромки, разделенный условно на прямой или фасонный, в зависимости от технологического назначения режущего инструмента;

- наличие или отсутствие износостойкого покрытия или упрочнения на режущем элементе.

Корпусную часть характеризуют:

- пазы в корпусной части; их количество, которое определяет число зубьев фрезы; линейные и геометрические размеры пазов;

- материал корпуса (конструкционные и легированные стали);

- упрочнение корпусной части (общее или местное);

- габаритные размеры корпуса.

Крепежная часть характеризуется схемой крепления, в которой описываются: наличие/отсутствие клиньев, крепежных и регулировочных болтов, штифтов, их количество, размеры, обозначение и точность.

Кроме того, в структуре отмечена информация о назначении инструмента и его изготовитель.

На основе полученных данных создана обобщенная графовая модель сборной конструкции фрезерного инструмента. Она включает в себя основные составляющие элементы, которые могут входить в состав различных конструкций инструментов, и наглядно описывает условную обобщенную конструкцию фрезы.

Конструкцию сборных фрез следует рассматривать как систему отдельных, функционально связанных между собой конструктивных элементов, наглядно представленную в виде ориентированного графа (Рисунок 2.1):

$$\Gamma = (X, E), \quad (2.1)$$

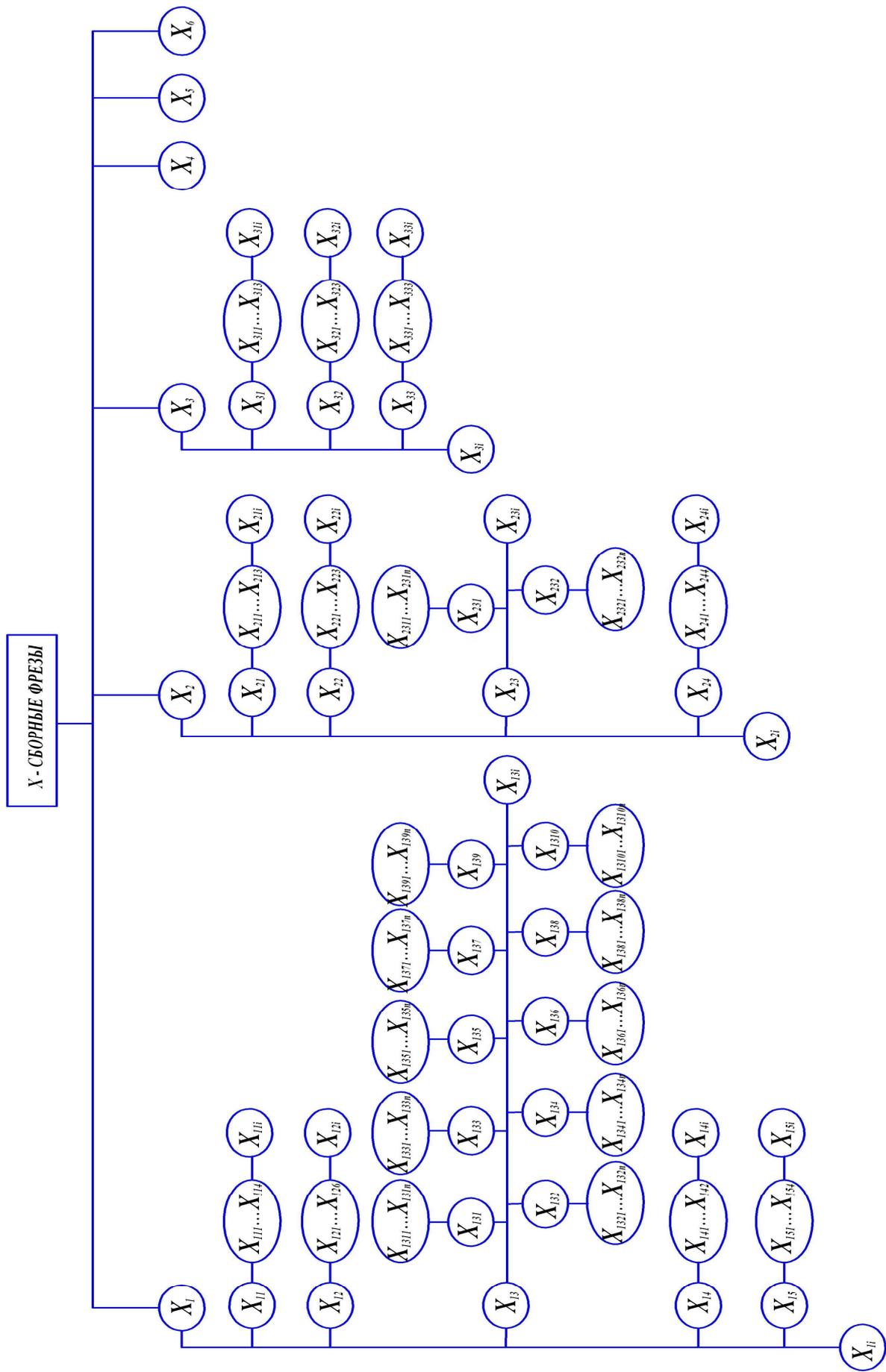


Рисунок 2.1. Графовая модель сборной фрезы

$X$  – множество вершин,  $E$  – отображение множества  $X$  в  $X$  или соответствие, которое показывает, как между собой связаны вершины графа (представленное линиями связи).

Соподчиненность частей инструмента, конструктивных элементов и их параметров на графе обозначена вершинно-реберными связями  $\{X_1, l_{x1}\}, \{X_2, l_{x2}\}, \dots$  и т.д. Каждая из них является ребром связанного графа, множество вершин которого представлено подмножеством вершин и подмножеством ребер.

Ребро графа  $l_i$  представляет собой множество вершин графа  $l_i \subset X$  и одновременно  $l_i = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ . Если  $X_1, X_2, \dots, X_n$  в свою очередь являются множествами,

$$l_i = \bigcup_{i=1}^n X_i . \quad (2.2)$$

На основании анализа графовой модели определяются параметры конструктивных элементов, частей инструмента и инструмента в целом как объединение множеств этих параметров, представленных ребрами данного графа. В результате выполнения операции объединения формируется множество неповторяющихся параметров. Из этого множества производится их выборка по которой проектируется инструмент на ПК. Для определения каждого элемента из множества параметров необходимо сформировать исходные данные, которые позволяют представить конструкцию режущего инструмента в целом.

Рассмотрим предметную ориентацию ребер и вершин графа  $\Gamma = (X, E)$ .

Укрупненно конструкция сборных фрез представлена в виде объединения режущей (вершина  $X_1$ ), корпусной (вершина  $X_2$ ), крепежной (вершина  $X_3$ ) и других частей (вершины  $X_4 \dots X_n$ ),

$$l_X = \bigcup_{i=1}^n X_i . \quad (2.3)$$

Режущая часть (вершина  $X_1$ ) характеризуется следующей системой параметров, являющихся вершинами ребра  $l_{X_1}$  :

$X_{11}$  – вид конструктивного исполнения режущей части;  $X_{12}$  – ее параметрические размеры;  $X_{13}$  – материал;  $X_{14}$  – профиль;  $X_{15}$  – износостойкое покрытие

и/или упрочнение;  $X_{n/X_1}$  – другие параметры,

$$l_{X_1} = \bigcup_{i=1}^n X_{1i} . \quad (2.4)$$

Вид конструктивного исполнения режущей части (вершина  $X_{11}$ ) целесообразно охарактеризовать следующими параметрами, являющимися вершинами ребра  $l_{X_{11}}$  :

$X_{111}$  – цельная режущая часть;  $X_{112}$  – сборная – клееное соединение;  $X_{113}$  – сборная – паяное соединение;  $X_{114}$  – сборная – с механическим креплением;  $X_{n/X_{11}}$  – другие варианты исполнения,

$$l_{X_{11}} = \bigcup_{i=1}^n X_{11i} . \quad (2.5)$$

Параметрические размеры режущей части (вершина  $X_{12}$ ) представлены различными вариантами размерных параметров, являющихся вершинами ребра  $l_{X_{12}}$  :

$X_{121}$  – диаметр резания;  $X_{122}$  – длина вставки;  $X_{123}$  – ширина вставки;  $X_{124}$  – высота вставки;  $X_{125}$  – передний угол;  $X_{126}$  – задний угол;  $X_{n/X_{12}}$  – другие параметры,

$$l_{X_{12}} = \bigcup_{i=1}^n X_{12i} . \quad (2.6)$$

Материал режущей части инструмента (вершина  $X_{13}$ ) целесообразно представить в виде следующих вариантов, являющихся вершинами ребра  $l_{X_{13}}$  :

$X_{131}$  – углеродистая сталь,  $X_{1311} \dots X_{131n}$  – марки углеродистых сталей;  $X_{132}$  – легированная сталь,  $X_{1321} \dots X_{132n}$  – марки легированных сталей;  $X_{133}$  – обычная быстрорежущая сталь (БРС),  $X_{1331} \dots X_{133n}$  – марки обычных БРС;  $X_{134}$  – БРС повышенной прочности,  $X_{1341} \dots X_{134n}$  – марки быстрорежущих сталей повышенной прочности;  $X_{135}$  – однокарбидные вольфрамо-кобальтовые твердые сплавы (ВКТС),  $X_{1351} \dots X_{135n}$  – марки однокарбидных вольфрамо-кобальтовых твердых сплавов;  $X_{136}$  – двухкарбидные ВКТС,  $X_{1361} \dots X_{136n}$  – марки двухкарбидных вольфрамо-кобальтовых твердых сплавов;  $X_{137}$  – трехкарбидные ВКТС,  $X_{1371} \dots X_{137n}$  –

марки трехкарбидных вольфрамо-кобальтовых твердых сплавов;  $X_{138}$  – безвольфрамовые твердые сплавы,  $X_{1381} \dots X_{138n}$  – марки безвольфрамовых твердых сплавов;  $X_{139}$  – минералокерамические материалы,  $X_{1391} \dots X_{139n}$  – марки минералокерамических материалов;  $X_{1310}$  – сверхтвердые материалы, где  $X_{13101} \dots X_{1310n}$  – марки сверхтвердых материалов,

$$l_{X_{13}} = \bigcup_{i=1}^n X_{13i} \quad (2.7)$$

Профиль режущей части (вершина  $X_{14}$ ) представлен разными вариантами его исполнения, являющимися вершинами ребра  $l_{X_{14}}$ :

$X_{141}$  – прямой профиль;  $X_{142}$  – фасонный острозаточенный;  $X_{143}$  – фасонный затылованный;  $X_{n l X_{14}}$  – другие варианты,

$$l_{X_{14}} = \bigcup_{i=1}^n X_{14i} \quad (2.8)$$

Износостойкое покрытие и упрочнение режущей части (вершина  $X_{15}$ ) представлены следующими параметрами, являющимися вершинами ребра  $l_{X_{15}}$ :

$X_{151}$  – вид упрочнения;  $X_{152}$  – глубина упрочнения;  $X_{153}$  – материал покрытия;  $X_{154}$  – толщина покрытия;  $X_{n l X_{15}}$  – другие варианты,

$$l_{X_{15}} = \bigcup_{i=1}^n X_{15i} \quad (2.9)$$

Корпусная часть сборных фрез (вершина  $X_2$ ) характеризуется следующей системой параметров, являющихся вершинами ребра  $l_{X_2}$ :

$X_{21}$  – пазы в корпусной части, где, в свою очередь,  $X_{211}$  – количество пазов;  $X_{212}$  – размеры паза ( $h \times b$ );  $X_{213}$  – угол наклона пазов;  $X_{22}$  – упрочнение корпусной части,  $X_{221}$  – общее упрочнение;  $X_{222}$  – местное упрочнение;  $X_{223}$  – упрочнение отсутствует;  $X_{23}$  – материал корпусной части,  $X_{231}$  – конструкционные стали,  $X_{2311} \dots X_{231n}$  – марки конструкционных сталей;  $X_{232}$  – легированные стали,  $X_{2321} \dots X_{232n}$  – марки легированных сталей;  $X_{24}$  – размеры корпусной части,  $X_{241}$  –

диаметр посадочного отверстия;  $X_{242}$  – квалитет точности отверстия;  $X_{243}$  – наружный диаметр корпусной части;  $X_{244}$  – ширина корпусной части;  $X_{n|X_2}$  – другие параметры, то есть

$$l_{X_2} = \bigcup_{i=1}^n X_{2i} . \quad (2.10)$$

Крепежная часть сборных фрез (вершина  $X_3$ ) характеризуется следующей системой параметров, являющихся вершинами ребра  $l_{X_3}$  :

$X_{31}$  – клинья крепежные,  $X_{311}$  – количество клиньев;  $X_{312}$  – линейные размеры клина;  $X_{313}$  – угол заклинивания;  $X_{32}$  – регулировочные болты,  $X_{321}$  – количество болтов;  $X_{322}$  – размеры резьбы;  $X_{323}$  – точность резьбы;  $X_{33}$  – крепежные болты,  $X_{331}$  – количество болтов;  $X_{332}$  – размеры резьбы;  $X_{333}$  – точность резьбы;  $X_{n|X_3}$  – другие составляющие,

$$l_{X_3} = \bigcup_{i=1}^n X_{3i} . \quad (2.11)$$

Назначение фрезы представлено вершиной  $X_4$ .

Завод-изготовитель определен вершиной  $X_5$ .

Другие параметры (примечания, дополнения) обозначены вершиной  $X_6$ .

Предложенная графовая структура является обобщённой, описывает варианты конструкций сборного режущего инструмента и позволяет, с одной стороны, разложить на элементы любую его конструкцию для получения более полного представления об устройстве, с другой стороны, построить логическую схему найденного технического решения и оценить его работоспособность.

Исходя из сказанного выше, задавшись чётким определением вершин графа, любую конструкцию инструмента, по обобщённой графовой модели, можно представить в виде матрицы  $B$ .

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1j} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{i1} & b_{i2} & \dots & b_{ij} \end{pmatrix}, \quad (2.12)$$

$$\text{где } b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } l_{ij} \in l_n, \\ 0, & \text{если } l_{ij} \notin l_n. \end{cases}$$

Матрица  $B$  отражает связи между проектированием фрезерного сборного инструмента и последовательностью действий по вариантному решению выбора её рациональных характеристик.

Графовая модель, преобразованная в матричную форму, дает возможность для создания информационной базы данных конструкций сборных режущих инструментов, что позволяет систематизировать режущий инструмент, имеющийся в распоряжении предприятий. Кроме того, возможно дополнение модели при создании конструкций с новыми составляющими.

Обработка и хранение информации в базе данных осуществляется с использованием связанных между собой табличных данных. В табличном представлении используются несколько типов данных, необходимых для создания описательных функций в оболочке программного модуля:

- 1) логический тип данных, определяющий кодированное значение поля таблицы как 1 или 0 (соответственно «Истина» или «Ложь»);
- 2) числовой тип данных, предполагающий хранение в поле таблицы только соответствующих численных значений;
- 3) текстовый тип данных, осуществляющий хранение в поле таблицы predeterminedного текстового фрагмента, включая численные значения;
- 4) графический тип данных, служащий для определения и хранения графической информации.

Для эффективной работы с базой данных рационально, кроме использования перечисленных типов данных, создать базу знаний, содержащую справочную информацию, дополняющую описание конструктивных особенностей режущего инструмента. База знаний позволит систематизировать сведения об инструментальных, обрабатываемых и конструкционных материалах и их свойствах, назначении инструмента, производителе и т.п.

Для оптимизации работы программного модуля составления и хранения базы данных предложенная графовая структура разбивается на ряд логически свя-

занных таблиц, среди которых выделяется основная, определяющая дальнейшие связи. Такая таблица не содержит явной информации и представляет собой кодированную матрицу из всех элементов графа. Код задает, какую информацию из связанной таблицы необходимо использовать в программном модуле.

Информация, не включенная в связанные таблицы, вносится непосредственно в главную таблицу без кодирования. Ввод данных без кодирования можно облегчить, создав шаблоны ввода, переключатели значений параметров.

Программный продукт, который обеспечивает работу с базой данных, не предполагает непосредственного взаимодействия пользователя с таблицами, а является инструментом для диалогового описания конструкции. В интерфейсе программы связанные таблицы представлены в виде раскрывающихся списков с соответствующими наборами данных и возможностью их дополнения.

Полученная графовая модель позволила, используя оболочку *Microsoft Office Access*, создать программу для составления базы данных сборного фрезерного инструмента [148]. Данная программа позволяет в диалоговом режиме описать составляющие и параметры конструктивных решений инструмента.

**Новая фреза**

Код фрезы: < Назначение: Фугование плоскостей Завод изготовитель:

**Режущая часть**

Исполнение | Материал | Параметрические размеры | Профиль | Износостойкое г. < >

Цельная режущая часть

Сборная режущая часть с механическим креплением

Отчет

Добавление параметров

Если Вы не находите нужных параметров на раскрывающихся списках, то нажмите кнопку "Добавление параметров"

**Корпусная часть**

Пазы | Материал | Упрочнение < >

**Крепежная часть (схема крепления)**

Клин | Болт | Штифт

Клин

Количество: 2

Линейные размеры (l\*h\*b), мм:

Геометрические размеры, град:

Рисунок 2.2. Форма для описания конструкции фрезы

В качестве примера представлено диалоговое окно программы (Рисунок 2.2), с помощью которого возможно описать конструкцию фрезы, выбирая параметры и расставляя метки напротив представленных характеристик, которые также можно выбрать из раскрывающихся списков.

Если в раскрывающихся списках недостаточно данных для описания конструкции сборной фрезы, то предусматривается их добавление в соответствующем диалоговом окне, которое открывается после нажатия кнопки «Добавление параметров». Представленная форма позволяет дополнить данные для имеющихся списков. При нажатии кнопки напротив раздела, в который вносятся добавляемые параметры, открывается окно, позволяющее пользователю внести новую информацию. При этом доступ к уже имеющимся данным закрыт, чтобы избежать их случайного или преднамеренного изменения.

Кроме того, имеется возможность автоматического создания отчета по регистрируемой конструкции фрезы, содержащего всю внесенную в форму информацию, и вывода ее на печать. Созданные базы данных сохраняются в файл и могут использоваться, изменяться и дополняться в любой момент по требованию пользователя [84, 184, 202, 206].

Преимуществами программного продукта является значительное сокращение времени на поиск и обработку информации по конструктивным решениям фрезерного сборного инструмента, имеющегося в распоряжении предприятия; упрощение процесса составления, редактирования и хранения базы данных инструментов; автоматизация работы конструкторов и технологов; возможность сравнительного анализа вариантов конструкций инструмента для принятия синтезированных конструктивных решений при заданных условиях производства. Основным недостатком программы является необходимость использования дополнительного программного обеспечения (*Microsoft Access*), что не всегда удобно, в особенности для специалистов не прошедших соответствующей подготовки для работы в данной системе или при изначальном отсутствии установленного соответствующего программного обеспечения на рабочем месте.

### 2.3. Теоретические положения для создания методики сравнительного анализа конструкций инструмента при варьируемых условиях сопоставления

Обоснованный, рациональный выбор режущего инструмента при варьируемых условиях сопоставления является неременным этапом подготовки производства [2].

С целью облегчения труда технологов при выборе конструкции инструмента для определенных условий производства разработана методика оценки синтезированных технических решений конструкций инструмента, которая позволяет сравнивать различные варианты конструктивных решений, выбирать конструкции, удовлетворяющие заданному перечню требований, а также получать научно обоснованные решения [174, 176, 177].

Определение рациональной конструкции фрезерного сборного инструмента базируется на методах, основанных на выявлении критериев, значимых для производства в каждом конкретном случае. Обозначим такие критерии через  $K_i$ , а варианты оцениваемых конструкций инструмента через  $X_i$ .

Определим множество критериев как  $K_1, K_2, K_3 \dots K_k$ , где  $k$  – количество критериев, используемых для анализа конструкции режущего инструмента. Каждый из критериев  $K$  также может зависеть от  $m$  численных значений различных параметров  $t_1, t_2, t_3 \dots t_m$ , определяющих его значение. Это влияние выражается в виде математической зависимости:

$$K = f(t_1, t_2, t_3, \dots, t_m). \quad (2.13)$$

Представим варианты сравниваемых конструктивных решений фрезерного инструмента как  $X_1, X_2, X_3, \dots X_n$ , где  $n$  – количество режущего инструмента, имеющегося в распоряжении предприятия и хранящегося в базе данных.

Значения критериев, присущие каждой конструкции, представим в виде матрицы смежности:

$$C(a_{ij}) = \begin{pmatrix} & K_1 & K_2 & K_3 & \dots & K_k \\ X_1 & a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1k} \\ X_2 & a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2k} \\ X_3 & a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_n & a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nk} \end{pmatrix}. \quad (2.14)$$

Элементы матрицы принимают количественные значения показателей, по которым оценивается соответствующий критерий. Если критерий обозначен как значимый в конкретном случае, то элементы  $a_{ij}$  принимают определенные значения в соответствующем столбце матрицы. Значение элемента  $a_{ij}$  исключается из расчета, когда критерий оценки не является значимым, другими словами, в матрице появляется «незначимый» столбец.

При корректном формировании матрицы необходимо учитывать предпочтительность значения критерия для каждой конструкции. Если конструкция считается более предпочтительной при максимальном значении критерия, то элемент матрицы  $a_{ij}$  принимается равным ему:

$$a_{ij} = [K_{ij}]. \quad (2.15)$$

В случае, когда предпочтительной является конструкция с минимальным значением критерия, необходимо принимать элемент матрицы  $a_{ij}$ , равным обратному значению:

$$a_{ij} = \frac{1}{[K_{ij}]}. \quad (2.16)$$

Такое условие построения матрицы смежности необходимо для корректного определения рациональной конструкции режущего инструмента при задаваемых производственных условиях.

Задав все элементы матрицы смежности, рассчитываем итерированную значимость 1-го и 2-го порядка и весовой критериальный коэффициент для каждой конструкции.

Итерированная значимость первого порядка для каждой  $i$ -й конструкции определяется по формуле:

$$Q'_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} . \quad (2.17)$$

Итерированная значимость второго порядка рассчитывается при необходимости оценки степени влияния критериев, с учетом значимости первого порядка каждого рассматриваемого варианта конструкции:

$$Q''_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot Q'_i . \quad (2.18)$$

Весовой критериальный коэффициент, оценивающий рациональность применения варианта конструктивного решения инструмента, вычисляем по формуле

$$q_i = \frac{Q'_i}{\sum_{i=1}^n Q'_i} . \quad (2.19)$$

Результаты расчета весового критериального коэффициента сводим в результирующий вектор, наглядно описывающий степень рациональности применения конструктивных решений инструмента в заданных условиях сопоставимости:

$$q(n) = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix}, \quad (2.20)$$

где  $n$  – количество сравниваемых конструкций.

Максимальное значение весового критериального коэффициента свидетельствует о рациональности применения данной конструкции режущего инструмента в заданных условиях.

Предложенная методика сравнения вариантов конструктивных решений фрез позволяет, определившись с параметрами, характеризующими конструкцию инструмента, и задавшись вариантами сопоставимости, провести сравнительный анализ инструментов и определить для заданных условий производства оптимальную конструкцию одного из них. Такая сравнительная методика позволяет оптимизировать и компьютеризировать процесс выбора инструмента для конкретных условий его эксплуатации, используя базы данных.

Исходные данные

Введите значения параметров для конструкций

Номер и описание конструкции	Стойкость (Т, мин)	Стоимость (С, руб)	К-т эквивалентности (а)	К-т вариации (var)
1 ВКЗМ	2019	7150	6.973	0.016
2 ВК15	407	7100	1.357	0.058
3 Т30К4	382	7050	1.273	0.093
4 Т15К6	300	7000	1	0.056

Укажите, какое значение параметра является приоритетным при сравнении (большее или меньшее)

	Т	С	а	var
Больше	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Меньше	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>

Укажите параметр(ы) наиболее значимый(ые) при сравнении

Т   
 С   
 а   
 var

---

Окно справок

---

Результаты

С учетом введенных значений параметров и указанных условий сравнения оптимальной является

конструкция №1 - ВКЗМ

Рисунок 2.3. Диалоговое окно программы для сопоставления конструкций режущего инструмента

Для облегчения вычислений разработана автоматизированная программа расчета весового критериального коэффициента и определения рациональной конструкции инструмента для заданных параметров [147]. Программа имеет диалоговое окно (Рисунок 2.3), в котором задаются исходные значения параметров сравниваемых конструкций и их описание, расставляется приоритетность параметров, указывается значимость параметров при сравнении. После ввода исходных данных производится расчет. Результаты расчета, с учетом введенных значений параметров и указанных условий сравнения, выводятся в диалоговом окне. Результатом расчета является определение оптимальной конструкции инструмента при заданных условиях сопоставимости.

При желании пользователя критерии, по которым ведется сравнение конструкций, могут меняться, что приводит и к изменению программного обеспечения.

Создание единого приложения, способного хранить базы данных и производить расчет оптимальной конструкции режущего инструмента на основе методики, учитывающей критерии, являющиеся наиболее актуальными для производства изделий из композиционных материалов сборным фрезерным инструментом, позволит устранить недостатки, связанные с использованием нескольких видов программного обеспечения, и производить обоснованный поиск оптимальной конструкции для варьируемых условий производства в одном программном продукте.

#### **2.4. Создание единой автоматизированной системы для формирования базы данных и многокритериального сравнительного анализа конструкций сборного фрезерного инструмента**

Для разработки автоматизированной системы формирования базы данных и многокритериального сравнительного анализа конструкций сборного фрезерного инструмента были выбраны критерии, наиболее значимые для современного производства.

Таковыми критериями являются: производительность обработки, работоспособность инструмента, экономическая целесообразность его применения, а также качество обработанной поверхности.

Одним из основных параметров, влияющих на значения перечисленных критериев, является технологический период стойкости инструмента. Однако, затруднительно определить достоверное значение этой величины при варьировании свойств обрабатываемого и инструментального материалов без проведения натурных экспериментов и разработки математических моделей, адекватно описывающих процесс обработки [44]. Это приводит к неоправданным затратам времени и средств. Необходимо создание методики, позволяющей произвести численный расчет технологического периода стойкости режущего инструмента с учетом

известных, полученных ранее экспериментальных данных по обработке схожих материалов и факторов, оказывающих определенное влияние на процесс резания.

Так в процессе фрезерной обработки в системе «режущий инструмент – деталь» значительное влияние на режущий клин инструмента оказывают силы резания и трения, возникающие при контакте инструмента и детали. Сопротивление режущего элемента инструмента этим силам зависит от свойств как обрабатываемого, так и инструментального материалов. На величину составляющих силы резания оказывают влияние режимы резания, конструктивные и геометрические особенности инструмента.

Используя результаты экспериментальных исследований технологической стойкости инструмента при определенном сочетании инструментального и обрабатываемого материалов, представим расчетный период стойкости режущего инструмента при другом варианте сочетаний материалов в виде:

$$T = T_{\text{э}} \cdot K_T, \text{ мин} \quad (2.21)$$

где  $T_{\text{э}}$  - период стойкости инструмента, полученный экспериментально при известном сочетании материалов, мин;  $K_T$  - коэффициент изменения периода стойкости, в зависимости от изменения свойств инструментального и обрабатываемого материалов в расчетной и экспериментальной системах.

$$K_T = K_y \cdot K_{mv} \cdot K_{np} \cdot K_{uz2} \cdot K_{сж} \quad (2.22)$$

где  $K_y$  - коэффициент, учитывающий изменение величины модуля упругости инструментального материала;  $K_{mv}$  - коэффициент, учитывающий изменение твердости инструментального и обрабатываемого материалов;  $K_{np}$  - коэффициент, учитывающий отношение прочности на сжатие к прочности на изгиб в расчетном инструментальном материале;  $K_{uz2}$  - коэффициент, учитывающий сопротивление расчетного инструментального материала изгибающим усилиям при резании;  $K_{сж}$  - коэффициент, учитывающий сопротивление расчетного инструментального материала сжимающим усилиям при резании.

Коэффициент, учитывающий изменение величины модуля упругости инструментального материала, определяем по формуле:

$$K_y = \frac{E_{инстр}}{E_{инстр}^{\mathcal{E}}}, \quad (2.23)$$

где  $E_{инстр}$ ,  $E_{инстр}^{\mathcal{E}}$  - модули упругости первого рода инструментального материала для расчетной системы и для системы, в которой получен экспериментальный период стойкости, МПа.

Коэффициент, учитывающий изменение твердости инструментального и обрабатываемого материалов определяем по формуле:

$$K_{тв} = \frac{\left(1 - \frac{4,5H_{обр}}{H_{инстр}}\right)}{\left(1 - \frac{4,5H_{обр}^{\mathcal{E}}}{H_{инстр}^{\mathcal{E}}}\right)} \quad (2.24)$$

где  $H_{обр}$ ,  $H_{инстр}$  - твердость обрабатываемого и инструментального материалов для расчетной системы, HRA;  $H_{обр}^{\mathcal{E}}$ ,  $H_{инстр}^{\mathcal{E}}$  - твердость обрабатываемого и инструментального материалов, на которых был получен экспериментальный период стойкости, HRA; 4,5 – коэффициент запаса твердости инструментального материала.

Если при расчете коэффициента  $K_{тв}$  числитель принимает отрицательное значение, то для обеспечения высокой работоспособности инструмента необходимо использование инструментального материала с большей твердостью.

Известно, что соотношение прочностных характеристик в инструментальном материале влияет на его эксплуатационные свойства. Увеличение прочности на изгиб приводит к повышению сопротивляемости к разрушению, что эффективно при обработке с высокой степенью нагружения (черновая обработка). Повышение предела прочности на сжатие ведет к возрастанию сопротивляемости износу, стабилизации геометрических параметров режущего элемента в процессе обработки (чистовая обработка). Так как специфика обработки композиционных материалов требует снижения у инструмента угла заострения режущего клина, в сравнении с инструментом для обработки металлических материалов, при сохранении качественной режущей кромки, то в инструментальном материале жела-

тельно преобладание прочности сжатия над прочностью изгиба. Чем выше степень этого преобладания, тем выше работоспособность такого инструмента.

Таким образом, коэффициент, учитывающий отношение прочности на сжатие к прочности на изгиб в расчетном инструментальном материале, определяет степень сопротивления износу и рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{пр}} = \frac{\sigma_{\text{сж}}^{\text{инстр}}}{\sigma_{\text{изг}}^{\text{инстр}}} \quad (2.25)$$

где  $\sigma_{\text{изг}}^{\text{инстр}}$ ,  $\sigma_{\text{сж}}^{\text{инстр}}$  - пределы прочности инструментального материала на изгиб и на сжатие соответственно, МПа.

Для определения влияния свойств материалов, конструктивных особенностей инструмента и режимов резания на величины сжимающих и изгибающих усилий, действующих на режущую кромку инструмента при встречном фрезеровании, воспользуемся положениями теоретической механики, сопротивления материалов и теории резания [15, 18, 31, 37, 75, 106, 158].

Согласно методике, полученной ранее [97], величины изгибающего давления, действующего на режущую кромку инструмента по нормали к биссектрисе угла заострения  $P_x$  и давления сжатия  $P_y$ , действующего по биссектрисе угла заострения в направлении режущей кромки и при фрезеровании составляют [97]:

$$P_x = \frac{F_{\text{рез}} \cdot \cos\left(\gamma + \frac{\beta}{2}\right)}{t' \cdot B}, \text{ Н/м}^2; \quad (2.26)$$

$$P_y = \frac{F_{\text{рез}} \cdot \sin\left(\gamma + \frac{\beta}{2}\right)}{r \cdot B}, \text{ Н/м}^2. \quad (2.27)$$

где  $F_{\text{рез}}$  – результирующая сила резания при фрезеровании, Н;  $B$  – ширина срезаемого слоя, м;  $\gamma$  и  $\beta$  – геометрические параметры режущего элемента;  $r$  – максимальный размер фаски износа на режущей кромке в поперечном сечении режущего элемента, м;  $t'$  – максимальное значение глубины резания, приходящейся на переднюю поверхность инструмента, в поперечном сечении срезаемого слоя при фрезеровании [97]:

$$t' = \frac{S_z \cdot t}{R \sin\left(\arccos\left(1 - \frac{t}{R}\right)\right)} \quad (2.28)$$

где  $S_z$  – подача на зуб фрезы, м/зуб;  $t$  – глубина срезаемого слоя, м;  $R$  – радиус фрезы, м.

С учетом рассчитанных изгибающих и сжимающих давлений, действующих на режущую кромку инструмента в процессе фрезерования, вычисляем коэффициенты, учитывающие сопротивление инструментального материала изгибающим и сжимающим усилиям при резании [97]:

$$K_{\text{изг}} = \frac{\sigma_{\text{изг}}^{\text{инстр}} \cdot 10^6}{P_x}; \quad (2.29)$$

$$K_{\text{сж}} = \frac{\sigma_{\text{сж}}^{\text{инстр}} \cdot 10^6}{P_y}, \quad (2.30)$$

где  $\sigma_{\text{изг}}^{\text{инстр}}$ ,  $\sigma_{\text{сж}}^{\text{инстр}}$  – пределы прочности инструментального материала на изгиб и на сжатие соответственно, МПа.

Результаты расчетов поправочных коэффициентов заносятся в формулу для определения расчетного значения периода стойкости, что позволяет вести дальнейший сравнительный анализ без дополнительных практических исследований. При появлении новых экспериментальных данных, данные могут корректироваться.

Полученное по приведенной методике расчетное значение периода стойкости используется при определении критериев работоспособности инструмента и экономичности использования инструмента [145].

Помимо работоспособности инструмента, определяемой периодом технологической стойкости, другим критерием, учитываемым при выборе рациональной конструкции фрезерного инструмента, является производительность обработки. На неё оказывают влияние режимы резания (подача на зуб, глубина резания и скорость), а также число размеры и конструкционные особенности фрезерного инструмента. Кроме того, важными являются возможности инструмента и его способность обеспечить заданные режимы резания [145].

Производительность обработки, которую возможно обеспечить режущим инструментом в соответствии с допустимыми режимами резания для выбранного инструментального материала для фрезерного инструмента определяется по формуле:

$$P = S_z \cdot z \cdot t \cdot b \cdot \frac{V}{\pi \cdot D_{\text{фр}}}, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (2.31),$$

где  $S_z$  – подача на зуб, м/зуб;  $z$  – число режущих элементов;  $t$  – глубина резания, м;  $b$  – ширина фрезерования, м;  $V$  – скорость резания, м/мин;  $D_{\text{фр}}$  – диаметр резания, м.

Затруднение может вызвать определение и выбор режимов резания для частных случаев обработки, когда отсутствует необходимая справочная информация. В связи с этим, целесообразно ввести в формулу (2.31) поправочные коэффициенты, определяющие изменение режимов резания и производительности в зависимости от применяемых инструментальных и обрабатываемых материалов. Исходные оптимальные значения режимов резания, с которыми производится расчет производительности инструментов с учетом поправочных коэффициентов, определяются возможностями некоторой (исходной) конструкции режущего инструмента, на которую имеются результаты экспериментальных исследований.

Таким образом, формула (2.31) примет вид:

$$P_i = (S_z^{\text{опт}} \cdot K_S) \cdot z_i \cdot (t_{\text{опт}} \cdot K_t) \cdot b_i \cdot \left( \frac{V_{\text{опт}}}{\pi D_{\text{фр}}} \cdot K_V \right), \text{ м}^3/\text{мин} \quad (2.32),$$

где  $P_i$  – производительность  $i$ -той конструкции инструмента;  $K_S$  – коэффициент, определяющий изменение подачи;  $K_t$  – коэффициент, определяющий изменение глубины резания;  $K_V$  – коэффициент, определяющий изменение скорости резания;  $z_i$ ,  $b_i$  – характеристики  $i$ -той конструкции инструмента;  $S_z^{\text{опт}}$ ,  $t_{\text{опт}}$ ,  $n_{\text{опт}}$  – оптимальные режимы резания для исходной конструкции инструмента.

Произведение поправочных коэффициентов  $K_S$ ,  $K_t$ ,  $K_V$  можно представить в виде коэффициента изменения производительности  $K_{\Pi}$ :

$$K_{\Pi} = K_S \cdot K_t \cdot K_V \quad (2.33).$$

Производительность зачастую определяется эксплуатационными характеристиками режущего инструмента и зависит от свойств инструментального материала, что характерно и для расчета периода технологической стойкости, поэтому для определения коэффициента изменения производительности воспользуемся методикой вычисления периода стойкости, представленной выше.

Коэффициент изменения производительности для  $i$ -той конструкции определится следующим образом:

$$K_{\Pi}^i = \frac{T_i}{T_{\Xi}} = K_{\Gamma}^i \quad (2.34),$$

где  $K_{\Gamma}^i$  определяется по формуле (2.22) для  $i$ -той конструкции инструмента;  $T_i$  – период стойкости  $i$ -той конструкции инструмента, мин;  $T_{\Xi}$  – период стойкости конструкции инструмента, на которую имеются экспериментальные данные, мин.

Для упрощения расчетов нами предлагается равновесная корректировка режимов резания. Согласно формулам (2.32) и (2.33), приняв допущение, что от коэффициента изменения производительности зависят только режимы резания, получим:

$$K_S = K_t = K_n = \sqrt[3]{K_{\Pi}} ; \quad (2.35)$$

$$S_z^i = S_z^{\text{опт}} \cdot \sqrt[3]{K_{\Pi}^i}, \text{ мм/зуб}; \quad (2.36)$$

$$t_i = t_{\text{опт}} \cdot \sqrt[3]{K_{\Pi}^i}, \text{ мм}; \quad (2.37)$$

$$n_i = n_{\text{опт}} \cdot \sqrt[3]{K_{\Pi}^i}, \text{ об/мин.} \quad (2.38)$$

Подставив полученные значения в формулу (2.32), получим значение производительности обработки, которую может обеспечить режущий инструмент, для  $i$ -той расчетной конструкции.

Таким образом, при отсутствии некоторых справочных данных, возможен расчет значения производительности, которую способен обеспечить инструмент, что дает возможность скорректировать режимы резания.

Еще одной характеристикой, влияющей на выбор оптимальной конструкции инструмента, выбрано качество обработанной поверхности, характеристикой ко-

того является высота микронеровностей, образующихся в результате обработки.

Значение условной высоты микронеровностей поверхности зависит от конструктивных особенностей режущего инструмента и режимов резания.

Согласно ранее полученным уравнениям [66, 97] искомая условная величина высоты неровностей  $h$ , возникающих при фрезеровании:

$$h = R - \frac{1}{2} \sqrt{4R^2 - S_z^2} . \quad (2.39)$$

$$\text{при } R = \frac{D_{\text{фр}}}{2}, \quad h = \frac{D_{\text{фр}}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D_{\text{фр}}^2 - S_z^2} . \quad (2.40)$$

Данное усредненное значение высоты микронеровностей может быть использовано при сравнении различных конструкций инструментов по критерию качества обработки.

И еще одной характеристикой для сравнительного анализа конструкций сборного фрезерного инструмента выбрана экономическая целесообразность применения определенного вида инструмента и его конструктивных особенностей для задаваемых условий производства.

На экономичность используемой в технологическом процессе конструкции инструмента влияют параметры, учитывающие стоимость инструмента, его качество и целесообразность применения в каждом конкретном случае. Нами предложена методика оценки экономической целесообразности использования определенного конструктивного решения инструмента [97].

Сущность методики заключается в определении приведенных затрат по каждой конструкции фрезерного инструмента и сравнении полученных значений между собой. Примем допущение, что тип производства и годовая программа выпуска изменяют конечный результат пропорционально для всех конструкций и в расчет не принимаются.

Приведенные затраты, в условиях принятых допущений, определяются по формуле:

$$ПЗ = \frac{C_{\text{фр}} + N_{\text{рем}} \cdot C_{\text{рем}} + C_{\text{ок}} + (t_{\text{з.п.}} + t_{\text{уст}}) \cdot C_{\text{ч}} \cdot i}{T \cdot z \cdot i}, \text{ руб/мин} \quad (2.41)$$

где  $C_{фр}$  – стоимость фрезы, руб.;  $N_{рем}$  – число ремонтов режущих элементов;  $C_{рем}$  – цена ремонта режущих элементов, руб.;  $C_{ок}$  – цена одного комплекта режущих элементов, руб.;  $t_{з.н.}$  – время на заточку одной фрезы или поворот и замену пластин;  $t_{уст}$  – время на установку фрез и настройку станка, ч;  $C_u$  – часовая ставка рабочего, руб/ч;  $T$  – период технологической стойкости инструмента, мин;  $z$  – число режущих элементов;  $i$  – допустимое число переточек режущих элементов или поворотов режущих пластин.

Число режущих элементов, цена одного комплекта режущих элементов, стоимость фрезы, определяются в зависимости от конструктивных особенностей режущего инструмента, заложенных производителем. Допустимое число перестановок, ремонта, переточек режущих элементов устанавливается производителем с учетом обеспечения надежности конструкции и его работоспособности. Цена ремонта режущих элементов, время на заточку одной фрезы, поворот или замену пластин, время на установку фрез и настройку станка и часовая ставка рабочего определяются из соответствующей нормативной документации для конкретного вида работ. Период технологической стойкости режущего инструмента определяется по методике, представленной выше.

Методика сравнительного анализа, включающая описанные выше параметры оценки, реализована в виде автоматизированных программных модулей, интерфейс которых позволяет работать с базами данных, а также производить расчет и определение оптимальной конструкции режущего инструмента при заданных условиях производства [149, 174, 183, 184, 196].

Интерфейс основного диалогового окна программного модуля для составления базы данных инструментов представлен на Рисунке 2.4. Данный модуль позволяет описать конструкцию режущего инструмента в диалоговом режиме. В верхней части диалогового окна располагается основное меню, позволяющее выполнять операции, связанные с определением оптимальной конструкции инструмента, создавать отчеты, содержащие информацию об имеющихся конструкциях, выполнять поиск информации по параметрам, задаваемым пользователем и выводить его на печать. Кроме того, имеется возможность вывода справки о программе.

<b>Назначение</b>		<b>Завод изготовитель</b>		<b>Стоимость фрезы</b>	
Для обработки КМ		ГОУ ВПО "Братский государственный университет"		4500 руб.	
<b>Вид конструктивного исполнения</b>		<b>Материал режущей части</b>			
<input type="radio"/> Цельная <input checked="" type="radio"/> Сборная (клееное соединение) <input type="radio"/> Сборная (паяное соединение) <input type="radio"/> Сборная (с механическим крепление)		Однокарбидный ВКТС ВКЗ			
<b>Параметрические размеры режущей части</b>		<b>Профиль режущей части</b>			
Диаметр резания 150 мм Длина вставки 30 мм Ширина вставки 20 мм Высота вставки 20 мм Передний угол 15 град Задний угол 10 град		<input checked="" type="radio"/> Прямой <input type="radio"/> Фасонный острозаточенный <input type="radio"/> Фасонный затывлованный			
<b>Износостойкое покрытие и упрочнение</b>		<b>Корпусная часть инструмента</b>			
Вид упрочнения Вид покрытия Толщина покрытия, мкм Глубина упрочнения, мкм		Пазы в корпусной части Количество 4 Размеры 0 мм Угол наклона град Упрочнение <input checked="" type="radio"/> Общее <input type="radio"/> Местное <input type="radio"/> Не имеется Материал корпусной части Конструкционная сталь Сталь 40Х			
<b>Примечания</b>		<b>Размеры корпусной части</b>			
		Диаметр отв. Посадка отв. Наруж. диаметр Ширина 32 мм Н9 140 мм 20 мм			
<b>Схема крепления</b>		<input checked="" type="checkbox"/> Клин Коллч. 4 <input type="checkbox"/> Регулировочный бол Коллч. 0 <input checked="" type="checkbox"/> Крепежный бол Коллч. 4 <input type="checkbox"/> Штифт Коллч. 0			
Линейные размеры Угол зажимания 0 мм 0 мм 0 мм 0 мм		Обозначение резьбы Точность 0 мм 0 мм 0 мм 0 мм			

Рисунок 2.4. Диалоговое окно модуля для формирования базы данных режущего инструмента

Ниже располагается навигатор, позволяющий перемещаться по записям, редактировать, добавлять и удалять исходные данные.

Основное поле программы позволяет вносить информацию о конструкции инструмента.

Для поиска оптимальной конструкции необходимо выбрать в меню пункт «Данные», затем «Оптимальные конструкции», после чего откроется доступ ко второму программному модулю, интерфейс которого представлен на Рисунке 2.5.

Первым этапом определения оптимальной конструкции инструмента является выбор обрабатываемого материала из раскрывающегося списка.

На втором этапе выбирают параметры расчета в зависимости от задач производства и требуемого эффекта. Не рекомендуется выбирать только один параметр при выборе оптимальной конструкции фрезы, поскольку это не позволяет достаточно полно оценить возможности инструмента на конкретной операции и получить достоверный результат.

Р М БД

1. Выберите обрабатываемый материал **VKA-1**

2. Выберите параметры расчета

- Работоспособность инструмента
- Качество поверхности
- Производительность
- Экономичность

Рекомендуемые режимы резания

Подача	Глубина резания	Скорость	
<input type="text" value="1,5"/> м/мин	<input type="text" value="2"/> мм	<input type="text" value="2826"/> м/мин	<input type="button" value="Расчет"/>

Оптимальной является конструкция:  
№3, стоимость 4500 руб., с перетачиваемыми пластинами

Рисунок 2.5. Диалоговое окно модуля для выбора рациональной конструкции режущего инструмента

На третьем этапе задаются режимы резания. При этом необходимо руково-

дствовать информацией, полученной на первом и втором этапах и учитывать особенности применяемого оборудования. В справочном модуле программы предусмотрены рекомендации по выбору рациональных режимов резания при обработке некоторых композиционных материалов. Для этого необходимо перейти в одно из полей режимов резания и нажать клавишу  $F1$ , после чего откроется окно справки, в котором находится соответствующая информация.

После ввода информации производится расчет, результат которого выводится в нижней части диалогового окна в виде описания оптимального варианта конструкции режущего инструмента с указанием его номера в базе данных, стоимости и конструктивного исполнения режущей части.

Для удобства пользователя предусмотрены кнопки быстрого перехода, позволяющие произвести расчет, добавить новый обрабатываемый материал, вернуться в базу данных или выйти из программы.

Преимуществами представленной автоматизированной системы является совмещение программных модулей составления и хранения базы данных и сравнительного анализа инструмента, что позволяет производить расчеты и выявлять оптимальную конструкцию режущего инструмента на основе данных, имеющихся на предприятии. В сравнении с другими представленными ранее программными продуктами, данный работает как единое приложение, не требуя дополнительного программного обеспечения.

## **2.5. Разработка инженерной методики обоснования использования нового программного обеспечения для выбора рациональной конструкции инструмента**

При оценке эффективности создания и функционирования программного обеспечения используются подходы, описанные ранее в работе. Вместе с тем его функционирование дает специфический экономический эффект, состоящий из прямой и косвенной составляющих [58]:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_П + \Delta \mathcal{E}_К, \quad (2.42)$$

где  $\Delta \mathcal{E}_{\Pi}$  — прямой экономический эффект, руб;  $\Delta \mathcal{E}_K$  — косвенный экономический эффект, руб.

Прямой экономический эффект достигается от снижения трудоемкости процесса проектирования:

$$\Delta \mathcal{E}_{\Pi} = \sum_{k=1}^n (C_1 M_1 - C_2 M_2), \quad (2.43)$$

где  $C_1, C_2$  — стоимость обработки единицы информации до и после внедрения разработанного программного продукта, руб;  $M_1, M_2$  — объем годовой информации технологической задачи до и после внедрения разработанного программного продукта;  $n$  — число взаимосвязанных задач.

Косвенный экономический эффект зависит от средств, высвобождаемых в производственном процессе:

$$\Delta \mathcal{E}_K = \Delta \mathcal{E}_p + \Delta \mathcal{E}_{n.u.} + \Delta \mathcal{E}_\phi, \quad (2.44)$$

где  $\Delta \mathcal{E}_p$  - экономия от высвобождения материальных ресурсов, руб;  $\Delta \mathcal{E}_{n.u.}$  - экономия за счет повышения производительности при изготовлении изделий, руб;  $\Delta \mathcal{E}_\phi$  - экономия в результате высвобождения элементов производственного фонда, руб.

Коэффициент сравнительной эффективности внедрения нового программного продукта определяют по формуле:

$$E_{\Pi} = \Delta \mathcal{E} / K_0, \quad (2.45)$$

где  $K_0$  – единовременные капитальные затраты, руб.

Срок окупаемости капитальных затрат:

$$T_{OK} = K_0 / \Delta \mathcal{E}_r, \text{ лет} \quad (2.46)$$

где  $\Delta \mathcal{E}_r$  - годовая экономия текущих затрат, руб.

Для расчета предполагаемого экономического эффекта от использования представленной автоматизированной системы в производственных условиях выберем задачу по выявлению рациональной конструкции при обработке одного из видов композиционных материалов, значимыми параметрами являются работоспособность инструмента, качество обработанной поверхности, производитель-

ность обработки и ее экономичность. Режимы обработки выбираются из рекомендованных значений. То есть, выбираем один из типов технологических задач, возможных при использовании одного модуля программы.

Допустим, что в год число подобных технологических задач, для которых необходимо выбрать режущий инструмент, составляет 150 единиц. Без применения представленного программного обеспечения на выбор оптимальной конструкции инструмента с использованием различных методик тратится в среднем 1,2 ч (значение определено в результате хронометража выполнения одной задачи по выбору инструмента по методике сравнительного анализа, приведенной выше). Применение разработанного программного обеспечения позволяет снизить это время до 0,08 ч (значение определено в результате хронометража выполнения одной задачи по выбору инструмента с помощью программного обеспечения с учетом затрат времени на ввод исходных данных и расчет).

Таким образом, объем годовой информации составит:

$$M_1 = 1,2 \cdot 150 = 180 \text{ ч/год};$$

$$M_2 = 0,08 \cdot 150 = 12 \text{ ч/год};$$

Стоимость обработки единицы информации без применения САПР будет равна часовой ставке технолога, которая составляет 188,55 руб/ч согласно распоряжения Правительства Иркутской области от 28.09.2011 г. № 333-РП. При применении программного обеспечения необходимо также учитывать стоимость программ и их окупаемость. Стоимость программного обеспечения для формирования базы данных и проведения сравнительного анализа составит порядка 50000 рублей с окупаемостью в один год. Таким образом, стоимость обработки единицы информации увеличится на 167 рублей:

$$C_1 = 188,55 \text{ руб/ч};$$

$$C_2 = 188,55 + 167 = 355,55 \text{ руб/ч};$$

В частном случае число взаимосвязанных задач равно единице, получим:

$$\Delta \mathcal{E}_{II} = 188,55 \cdot 180 - 355,55 \cdot 12 = 29672,4 \text{ руб/год.}$$

Применение представленной системы при организационной подготовке ин-

струмента, включающей в себя 150 задач в год только одного типа (выбор инструмента для осуществления обработки определенного композиционного материала при одном из вариантов сопоставимости критериев), позволяет получить экономический эффект до 30000 руб/год.

Эффективность применения автоматизированной системы повышается при увеличении типов поставленных перед системой задач и с увеличением вариантов сопоставимости. Таким образом эффективной применения автоматизированной системы взамен ручной обработки информации не вызывает сомнения.

### **Выводы по 2 главе:**

1. Решение задач структурной и параметрической оптимизации при конструировании нового инструмента, выборе и подготовке к работе определенного конструктивного решения режущего инструмента – процесс, требующий немалых временных затрат. Для повышения результативности принятия обоснованных технико-экономических решений технологическая подготовка инструмента для обработки композиционных материалов требует моделирования процессов подготовки инструмента и перехода к автоматизации процесса обработки информации. Однако, на сегодняшний день, слабо отражены вопросы моделирования инструмента для обработки изделий из композиционных неметаллических материалов с учетом его конструктивных и геометрических особенностей.

2. Анализ широкой номенклатуры действующих САПР с возможностью выбора инструмента для технологических процессов позволил определить, что существующие автоматизированные комплексы программ в области проектирования технологических процессов широко используют правила выбора режущих инструментов для каждой отдельной операции, за счет чего решается проблема хранения инструментов и оснастки и обработки информации о них. Однако широко известных автоматизированных систем инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов пока нет. Их создание требует в первую очередь специфической методики моделирования инструмента, позволяющей математическим языком описать конструктивные

особенности, размеры и геометрические параметры, характеризующие сборный режущий инструмент для обработки композиционных неметаллических материалов.

3. Предложена методология моделирования и сравнительного анализа конструкций сборного фрезерного инструмента при варьируемых условиях сопоставимости, направленная на повышение производительности, качества и экономичности обработки композиционных неметаллических материалов.

4. Для автоматизации процессов расчета, конструирования, изготовления и эксплуатации инструмента на основе теории графов предложена методология моделирования сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов и систематизации сборного режущего инструмента на предприятиях (на примере фрез), позволяющая проводить анализ и синтез конструктивных решений в процессе подготовки инструмента.

Предложенная графовая структура является обобщённой, описывает варианты конструкций сборного фрезерного инструмента и позволяет, с одной стороны, разложить на элементы любую его конструкцию для получения более полного представления об устройстве, с другой стороны, построить и оценить логическую схему найденного технического решения. При появлении новых составляющих имеется возможность дополнения модели.

4. Разработана методика сравнительного многофакторного анализа конструкций инструмента при варьируемых условиях сопоставимости инструмента, позволяющая оптимизировать и компьютеризировать процесс выбора рационального инструмента для оговоренных условий его эксплуатации. Для определения оптимальной конструкции фрезерного сборного инструмента используются методы, основанные на выявлении критериев, наиболее значимых для производства в каждом конкретном случае.

5. Разработана методика, позволяющая вести многокритериальный сравнительный анализ конструктивных решений инструмента с учетом физико-механических свойств инструментального и обрабатываемого материалов, а также накопленной в результате научных исследований базы знаний, характеризую-

щей процессы обработки лезвийным инструментом различных видов композиционных неметаллических материалов. В качестве критериев для сравнительного анализа выбраны: работоспособность инструмента, качество обработанной поверхности, производительность обработки и экономичность конструкции.

6. Созданы программные продукты для систематизации сборного инструмента и выбора из имеющейся базы данных рациональной конструкции для задаваемых условий, на основе значимых варьируемых критериальных показателей и накопленной в результате экспериментальных исследований базы знаний по процессам обработки различных видов композиционных неметаллических материалов лезвийным инструментом. Программный комплекс позволяет значительно сократить время на поиск и обработку информации по конструктивным решениям инструмента; упростить процесс составления, редактирования и хранения базы данных инструментов; автоматизировать работу конструкторов и технологов; проводить сравнительный анализ вариантов конструкций инструмента для принятия синтезированных конструктивных решений при варьируемых условиях сопоставимости.

7. Предполагаемый экономический эффект от внедрения автоматизированной системы при решении, например, 150 задач только одного типа (выбор инструмента для осуществления обработки композиционных материалов для одного из вариантов сопоставимости критериев) составит порядка 30000 руб/год. При повышении вариативности задач эффект от использования программных продуктов повышается.

8. Предложенные основы, положения и принципы автоматизации технологической подготовки режущего инструмента повышают производительность и эффективность работы конструкторов и технологов на стадии принятия решений по оснащению технологических процессов режущим инструментом.

### **ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И УСЛОВИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТВЕРДОСПЛАВНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Технологическая подготовка режущего инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов имеет немаловажное значение при организации инструментального обеспечения на предприятиях. Помимо структурной и параметрической оптимизации при конструировании нового инструмента, выборе и подготовке к работе режущего инструмента она включает в себя мероприятия по изготовлению (формообразованию) режущего инструмента. Особо актуальна эта проблема при изготовлении инструмента, оснащенного высокопрочными и труднообрабатываемыми инструментальными материалами и обладающего повышенной точностью, надежностью, ресурсом и, как следствие, высокой работоспособностью. Режущий инструмент должен быть ориентирован на получение продукции с высокими качественными и точностными параметрами. Обработка таким инструментом должна вести к повышению производительности и уменьшению себестоимости обработки изделий из композиционных неметаллических материалов.

Следовательно, совершенствование мероприятий по технологической подготовке инструментального обеспечения на предприятиях приобретает актуальность в условиях современного производства.

Подготовка к работе стандартного инструмента достаточно отражена в литературе [38, 51, 113, 170]. Однако при обработке изделий из композиционных материалов со специфическими требованиями к условиям их обработки появляется необходимость в изготовлении специального режущего инструмента с учетом характерных особенностей геометрии и микрогеометрии режущего лезвия и контактирующих поверхностей режущего элемента.

Требуемое качество обработки поверхностей изделий, минимальные сила и мощность резания достигаются концентрацией напряжений в локальной области

обрабатываемого материала, прилегающего к достаточно острому лезвию. Однако даже тщательно заточенные лезвия инструмента для обработки композиционных материалов не являются абсолютно острыми – их режущие кромки, образованные пересечением передней и задней поверхностей, представляют собой не линию, а переходную поверхность радиуса  $\rho_0$  (Рисунок 3.1). Чем больше наработка лезвия, тем больше величины радиуса затупления и износа по передней и задней поверхности.

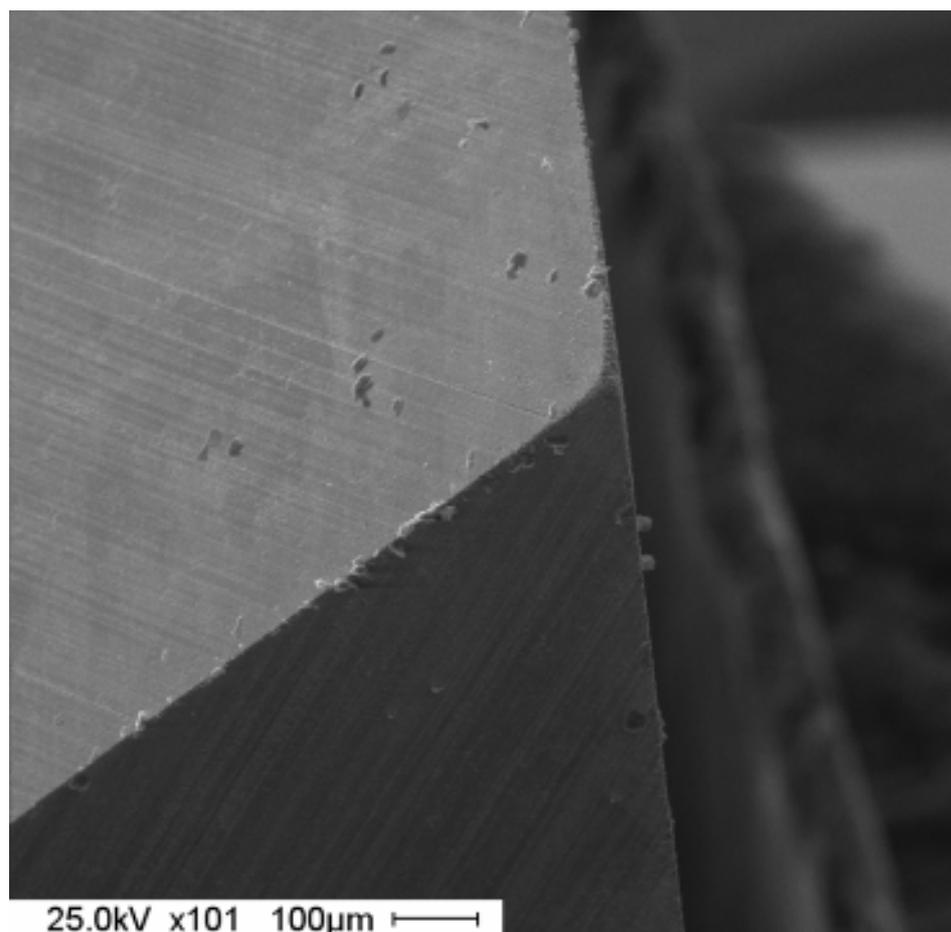


Рисунок 3.1. Состояние режущей кромки инструмента после затачивания

Чаще всего износ режущего инструмента для обработки композиционных материалов сопровождается уменьшением переднего и заднего углов и увеличением радиуса округления лезвия. Перечисленные параметры служат критериями затупления последнего. Увеличение параметров затупления сопровождается уменьшением режущей способности лезвия и ухудшением оценочных параметров процесса резания: повышением сил и мощности резания, температуры в зоне ре-

зания, вибраций, ухудшением качества обработки (шероховатости обработанной поверхности, длины сколов, точности получаемой детали и т.п.). Предельный радиус затупления на чистовых операциях фрезерования композиционных материалов не превышает обычно 20...30 мкм, на черновых может достигать 40...50 мкм.

В процессе эксплуатации инструмент теряет режущую способность и требует применения процессов повторного формообразования его режущих элементов. Требуются исследования, направленные на выявление причин, вызывающих потерю работоспособности режущего инструмента для обработки композитов, с целью уменьшения влияния методов изготовления (формообразования) на эксплуатационные характеристики инструмента.

### **3.1. Причины потери режущей способности режущего инструмента при обработке композиционных материалов**

В процессе резания в результате взаимодействия обрабатываемого материала с инструментальными (высокое давление, температура и скорость относительного перемещения) контактные площадки на передней и задней поверхностях инструмента изнашиваются. Износ при обработке композиционных неметаллических материалов происходит непрерывно, на протяжении всего процесса резания, практически при всех возможных условиях резания и физико-механических свойствах как инструментального, так и обрабатываемого материалов [1, 15, 101].

Инструменты сохраняют свои режущие свойства до тех пор, пока в процессе резания их зубья, имеющие форму несимметричного клина, сохраняют геометрические и линейные параметры. Потеря формы режущего клина может произойти либо из-за разрушения, либо из-за износа клина по передней и задней поверхностям.

Хрупкое разрушение режущего клина при обработке композиционных материалов происходит в виде мелкого выкрашивания режущих кромок, отслаивания инструментального материала на отдельных участках лезвий или крупных сколов. Такие разрушения характерны для инструментов из инструментальных

материалов, обладающих наименьшей пластичностью и прочностью на изгиб, таких, например, как твердые сплавы.

Выкрашивание режущих кромок происходит обычно при работе с ударами и переменной нагрузкой, имеющей место при врезании и выходе инструмента из контакта с заготовкой, а также связано с поверхностными дефектами инструментального материала, остаточными напряжениями и микротрещинами, вызванными пайкой и заточкой инструмента [101].

Отслаивание инструментального материала характерно для твердых сплавов. Оно возникает из-за дефектов структуры твердого сплава под действием больших сил адгезии со стороны сходящей стружки и особенно.

Сколы режущей части инструмента обычно происходят за пределами площадки контакта стружки с инструментом, когда микротрещины, увеличиваясь под действием внешних нагрузок, сливаются в магистральную макротрещину, приводящую к разрушению режущего клина [101, 217, 218]. Сколы режущей части инструмента наиболее опасны, так как ведут к большим потерям инструментального материала и браку изделия.

Из параметров режимов резания наибольшее влияние на величину растягивающих напряжений оказывает толщина срезаемого слоя, с увеличением которой растут контактные напряжения. Значение предельно допустимой толщины среза, при которой может произойти хрупкое разрушение режущего клина, зависит как от свойств обрабатываемого материала, так и от угла заострения режущего лезвия [101].

В процессе резания режущее лезвие иногда подвергается пластическому разрушению, которое выражается в пластической деформации его вершины и опускании режущей кромки. У твердосплавных инструментов пластическая деформация режущего клина наступает под действием высоких температур резания и вибраций. Хотя твердые сплавы и считаются хрупким материалом, но уже в нормальных условиях работы они подвергаются явлению ползучести, которое усиливается с ростом температуры резания.

Износ режущего инструмента при обработке композиционных неметалли-

ческих материалов - результат трения стружки о переднюю поверхность инструмента и его задней поверхности об обработанную поверхность, причем инструмент при обработке композиционных неметаллических материалов испытывает дополнительные нагрузки со стороны задней поверхности, связанные с упругими свойствами обрабатываемого материала. В целом это весьма сложный процесс, протекающий при высоких температурных и контактных нагрузках.

Существует ряд гипотез, объясняющих физическую природу изнашивания инструментов, работающих в различных условиях [15, 31, 35, 101, 109, 113, 158, 161, 224], которые подтверждаются и при обработке композиционных материалов:

1. Абразивное действие, оказываемое обрабатываемым материалом (абразивное изнашивание).

Механический (абразивный) износ происходит в результате резания-трения твердых включений инструментального и обрабатываемого материалов о переднюю и заднюю поверхности инструмента. При работе твердосплавных инструментов абразивный износ наблюдается в меньшей степени, в сравнении со стальными инструментами, из-за более высокой твердости и износостойкости твердых сплавов.

2. Адгезионное взаимодействие между инструментальными и обрабатываемыми материалами (адгезионное изнашивание).

Адгезионный износ является результатом действия сил адгезии, т.е. сил межмолекулярного взаимодействия ювенильных (химически чистых, очищенных от окислов) свежеобразованных поверхностей стружки и заготовки при их контакте с поверхностями инструмента в процессе совместного трения.

При скольжении одной поверхности по другой происходит непрерывный процесс срезания и возникновения адгезионных соединений.

У твердых сплавов отделение частиц износа обычно происходит по границам зерен карбидов, по менее прочной кобальтовой связке, объем которой с ростом температуры резания за счет выгорания уменьшается. Характерным признаком адгезионного износа является ячеистый (в виде мелких ямок) вид изношен-

ной поверхности инструмента.

3. Диффузионное растворение инструментального материала в обрабатываемом (диффузионное изнашивание).

Диффузионный износ происходит в результате взаимного переноса (диффузии) атомов контактирующих материалов – инструментального и обрабатываемого. Скорость диффузионных процессов зависит от подвижности атомов, которая, в свою очередь, определяется температурой резания.

4. Химические процессы, происходящие на передней и задней поверхностях (окислительное изнашивание).

Химический (окислительный) износ происходит за счет окисления при высоких температурах трущихся слоев благодаря высокой проникающей способности кислорода и ускоренного его соединения с ювенильными поверхностями стружки и инструмента. Образовавшиеся окисные пленки очень хрупки и поэтому легко разрушаются, оголяя нижеследующие слои, которые в свою очередь также окисляются и подвергаются разрушению.

В определенных условиях может преобладать один из этих видов износа, а в других – могут действовать одновременно несколько видов.

На протяжении всего времени работы инструмента износ его лезвий прогрессирует. Количественно износ лезвий принято определять линейными и объемными (или массовыми) величинами [15, 101, 109, 158, 218]. Если за меру изношенности инструмента принять линейный износ, то при этом измеряется только его максимальная величина и не учитывается ни местоположение максимального износа на лезвии инструмента, ни то, что во время его работы в результате местного выкрашивания инструментального материала максимальный износ может перемещаться вдоль лезвия.

Интенсивность изнашивания (отношение величины износа к времени изнашивания) и текущее значение линейного износа в количественном выражении зависят не только от продолжительности времени резания, но и от ряда других факторов, к которым относятся скорость резания, подача, геометрия инструмента, физико-механические свойства инструментального и обрабатываемого

материалов.

При обработке композиционных материалов на стойкость режущего инструмента могут оказывать влияние следующие факторы [1, 15, 101]:

- материал режущего элемента и его свойства;
- геометрические параметры резания;
- параметры микрогеометрии режущей части инструмента;
- состав композиционного материала;
- физические свойства композиционного материала;
- вид фрезерования;
- режимы резания;
- путь резания.

Достижение высоких показателей во время обработки возможно при соблюдении определенных условий эксплуатации инструмента: правильного выбора инструментального материала, конструкции и геометрических параметров инструмента, рациональных режимов резания, выполнения мероприятий по подготовке инструмента к работе [38, 50, 208].

### **3.2. Анализ традиционных способов изготовления и восстановления твердосплавного инструмента для обработки композиционных материалов**

Большое значение в процессе подготовки инструмента имеет правильно выбранная технология формообразования его режущих элементов, как правило, изготавливаемых из инструментальных материалов, имеющих повышенную твердость. Вследствие этого возникают проблемы при выборе последовательности затачивания, режимов обработки и характеристик абразивного инструмента.

Фрезерный инструмент для обработки композиционных материалов обычно имеет повышенные, по сравнению с металлорежущими инструментами, величины переднего и заднего углов и, соответственно, относительно меньший угол заострения режущего лезвия, что, в свою очередь, также затрудняет получение качественного режущего лезвия, особенно при затачивании режущих элементов из твер-

дого сплава.

Затачивание фрез осуществляют шлифованием лезвия по плоской передней или задней поверхности. В результате затачивания должны быть обеспечены острота лезвия (радиус округления режущей кромки  $\rho \leq 5$  мкм) и шероховатость шлифуемой поверхности по параметру  $R_a \leq 6,3$  мкм. Выполнение этих требований и производительность заточки зависят от выбора типа шлифовального круга, установки круга на шпинделе заточного станка и фрезы относительно круга, режимов затачивания [61].

Фрезы с криволинейной задней поверхностью и профильные фрезы затачивают по плоской передней поверхности. Фрезы с прямолинейной задней поверхностью можно затачивать как по передней, так и по задней поверхностям.

Режим заточки должен обеспечить и неизменность структуры инструментального материала. Рекомендуется после затачивания выполнять несколько проходов без поперечной подачи до пропадания искр и, сменив шлифовальный круг вместе с оправкой, на том же заточном станке, не меняя базирования фрезы, провести доводку лезвий [170].

Для правильного выбора шлифовального круга при формообразовании твердосплавных режущих элементов необходимо установить [35, 38, 113, 166, 170, 222, 232, 249]:

- материал шлифующих зерен;
- величину зерен (зернистость);
- вид связки;
- твердость;
- структуру шлифовального круга;
- его окружную скорость, а также размер и форму круга.

Работоспособность шлифовальных кругов и качество заточки повышаются в случае непрерывной подачи в зону шлифования смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) [62].

Традиционное затачивание стального инструмента осуществляется электрокорундовыми кругами и кругами из кубического нитрида бора (КНБ). Как прави-

ло, при снятии больших припусков применяют круги из электрокорунда. Для доводки и удаления малых припусков используют круги из КНБ. Рекомендации по затачиванию стального инструмента содержатся в литературе [38, 113, 170, 142]. Но стальной инструмент, в силу малой износостойкости, мало применяется для обработки композиционных материалов, поэтому уделим внимание изготовлению (затачиванию) инструмента, оснащенного труднообрабатываемыми инструментальными материалами.

Черновое затачивание твердосплавного инструмента предназначено для снятия основной части припуска с максимально допустимой интенсивностью съема и подготовки обрабатываемых поверхностей к чистовой заточке и доводке. Процесс затачивания твердосплавных фрез заключается в шлифовании режущих пластин с обоих торцов до получения номинального размера по высоте фрезы с припусками на чистовое шлифование. Затем ведется черновое шлифование передней и задней поверхностей с углами, увеличенными на  $2...4^\circ$  по сравнению с заданными.

Для чернового затачивания твердосплавного инструмента, как правило, применяются шлифовальные круги из карбида кремния зеленого. Так как черновая обработка позволяет вести интенсивный съем материала, то возможно использование крупнозернистых кругов (F46...F60) на керамической связке (V), среднемягкой группы твердости (K, L) и среднеплотной структуры (№ 5, 6). Предлагаются следующие режимы обработки: скорость круга 12...15 м/с, продольная подача 1,5...2,5 м/мин, глубина шлифования 0,08...0,12 мм [38, 55, 170]. Затачивание кругами из карбида кремния зеленого рекомендуется при обильном охлаждении, которое устраняет возможность перегрева, местных прижогов и образования микротрещин и улучшает качество затачиваемой поверхности.

Чистовое затачивание режущих поверхностей инструмента выполняется при требуемых углах с сохранением минимальных припусков на доводку инструмента и предназначено для повышения точности размеров и уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности [38, 113, 170].

Для чистового затачивания твердосплавного инструмента рекомендуются

круги из синтетического алмаза с зернистостью 80/63...50/40 на бакелитовой связке (В2-01, В1-02). Рекомендуемые режимы обработки следующие: скорость круга 25...30 м/с; продольная подача 1...2 м/мин; глубина шлифования 0,01...0,02 мм [38, 55, 143, 234]. В процессе затачивания инструмента алмазным кругом обработку рекомендуется вести также с охлаждением.

Доводка – процесс тонкого чистового шлифования со съемом припуска в пределах 0,03...0,05 мм, позволяющий достигнуть шероховатости  $Ra = 0,16...0,04$  мкм [38].

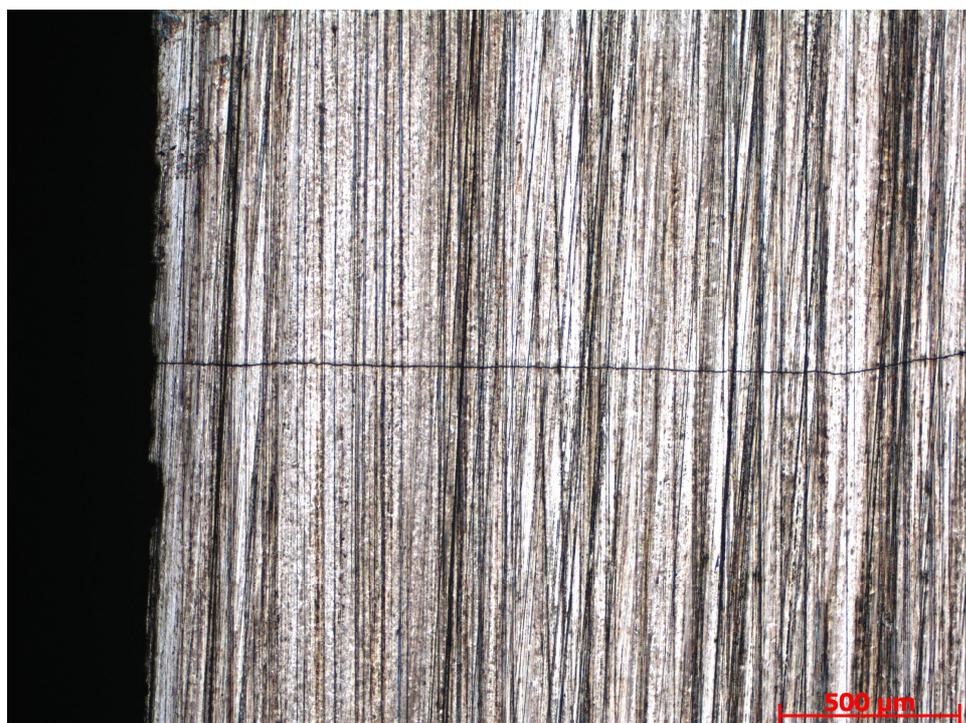
В качестве инструмента для доводки рекомендуются круги из синтетического алмаза зернистостью 40/28...28/20 на бакелитовой связке (В2-01) [38, 71, 143, 227, 240, 243].

Режимы обработки рекомендуются следующие: скорость круга 25...30 м/с; продольная подача 0,1...0,2 м/мин; глубина шлифования 0,005...0,001 мм. При доводке допускается обработка без СОЖ [38].

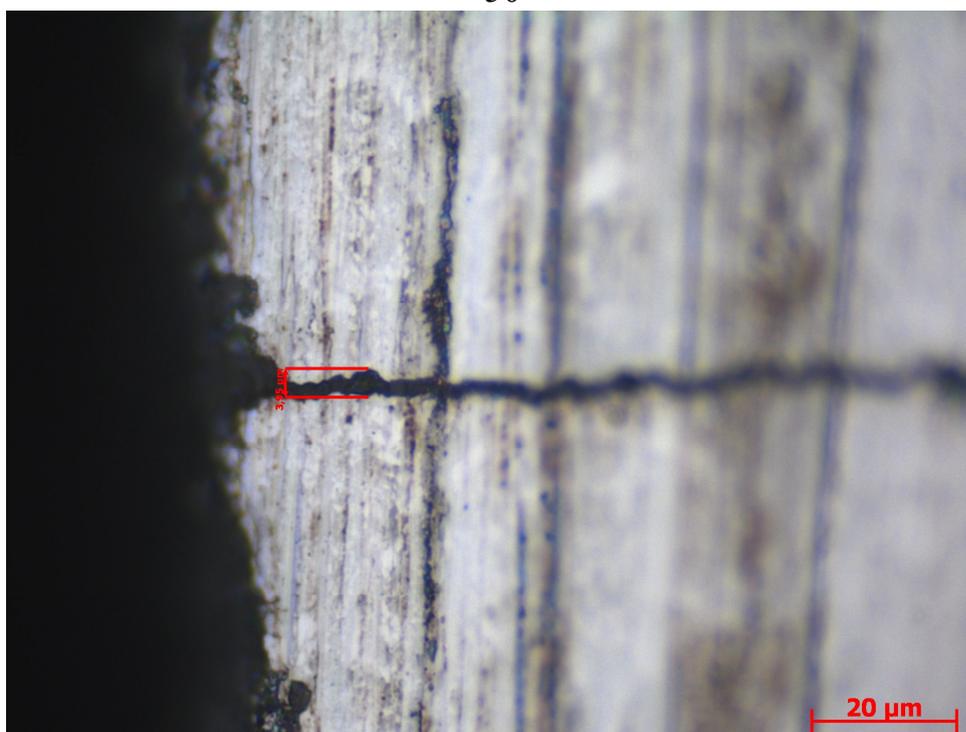
Эффективность использования алмазных кругов для затачивания твердосплавных инструментов достигается при безусловном выполнении рекомендаций по режимам шлифования, характеристике кругов и при соблюдении всех правил эксплуатации. Нарушение рекомендаций ведет к повышенному износу кругов, потере производительности и ухудшению качества обработки.

Однако, традиционно рекомендуемые технологии формообразования твердосплавных режущих элементов, на наш взгляд, обладают рядом недостатков. Так круги из карбида кремния зелёного, традиционно используемые в производственных условиях для чернового затачивания инструмента, оснащенного твердым сплавом, наносят серьезные дефекты инструментальному материалу в виде сколов, макро- и микротрещин (Рисунок 3.2). Это объясняется высокими силовыми и температурными нагрузками, возникающими в зоне обработки в процессе затачивания.

При эксплуатации инструмента такие дефекты обработанной поверхности, как правило, приводят к разрушению твердого сплава, появлению сколов, а, следовательно, к преждевременному выходу из строя режущего инструмента [217].



×50



×200

Рисунок 3.2. Общий вид передних поверхностей твердого сплава марки ВК8 после затачивания кругами из карбида кремния

Использование при чистовом затачивании твердосплавных инструментов абразивных кругов из синтетических алмазов позволяет частично решить эти проблемы. На практике нашли применение алмазные круги с керамическими и

органическими связками. Но, в силу особых свойств этих связок, такие круги также интенсивно и неравномерно изнашиваются, быстро теряют геометрическую форму профиля. Они в основном используются для доводки твёрдосплавных инструментов.

Но и алмазные круги в процессе затачивания оставляют на поверхности твердого сплава после обработки дефекты, как правило, в виде трещин [181, 182].

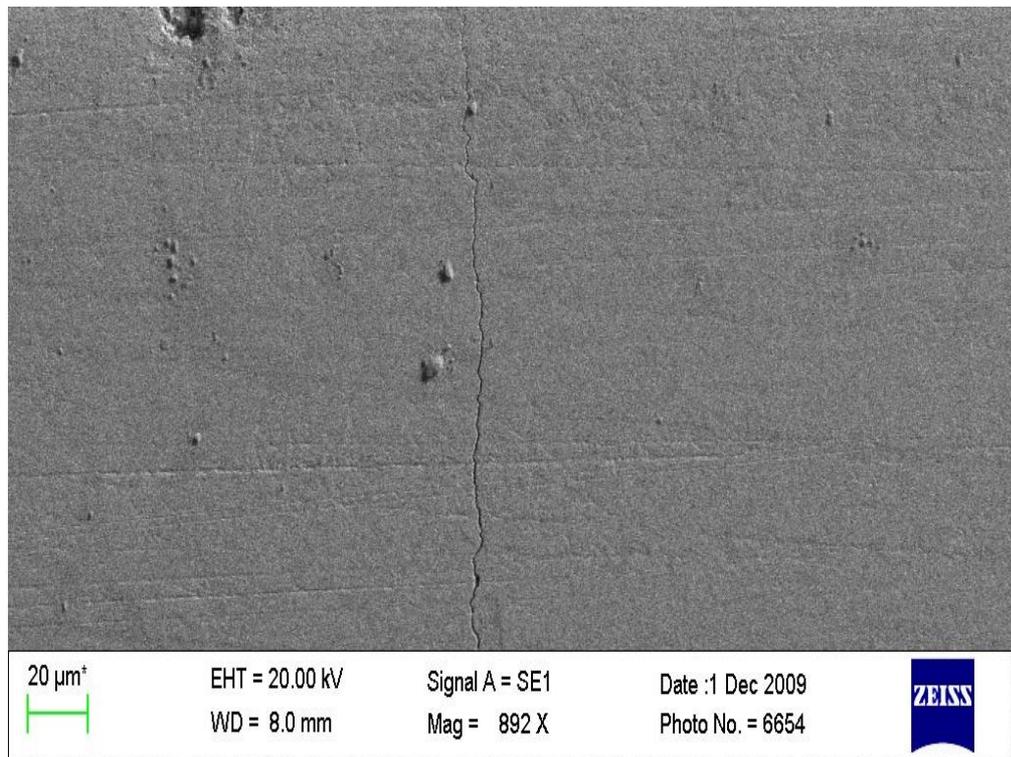
Такие дефекты на рабочих поверхностях инструмента слабо видны невооруженным глазом, однако, при более детальном изучении с использованием растровой электронной микроскопии они четко прослеживаются и имеют размерность до 3...4 мкм (Рисунок 3.3).

Что касается трещинообразования, то большинство авторов, исследовавших процесс обработки твердых сплавов, считают, что оно имеет термическое происхождение [15, 101, 187]. Высокие температуры образуются в зоне контакта круга с твердым сплавом, локализация их в верхних слоях последнего вызывает возникновение напряжений.

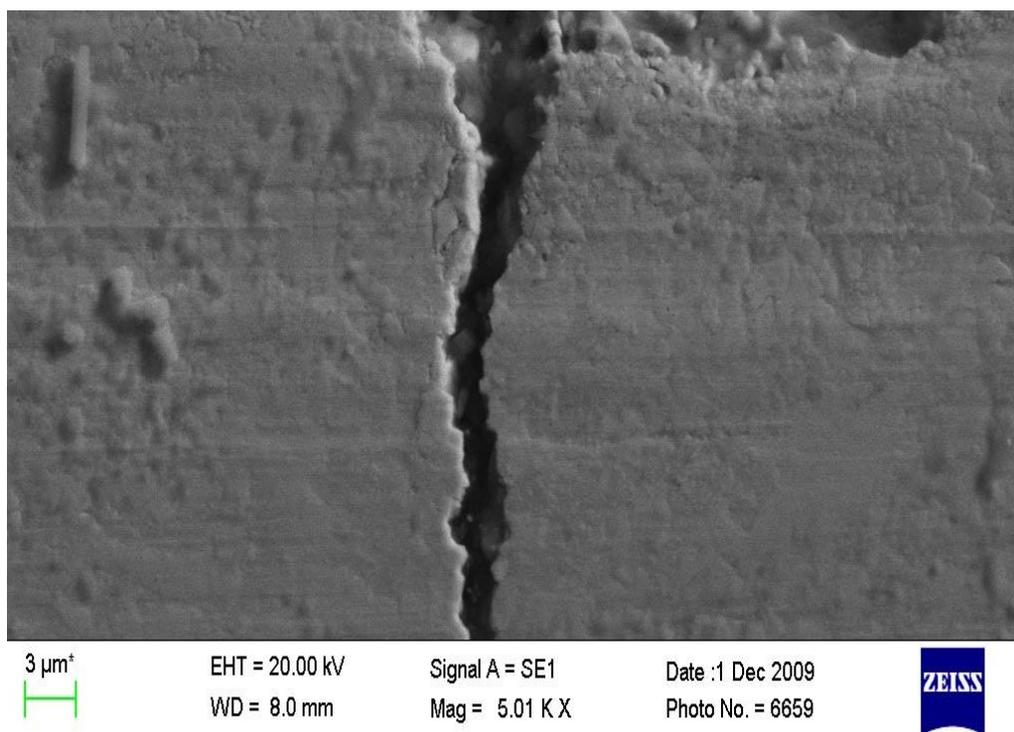
Коэффициенты линейного расширения карбидов и цементирующей фазы различны между собой. Значительный градиент температуры по глубине пластинки и различное расширение карбидов (Рисунок 3.4) и цементирующей фазы определяют объемные изменения в шлифуемом твердом сплаве и свидетельствуют о процессах вторичной рекристаллизации карбидов.

Объемные изменения вызывают возникновение напряжений, которые становятся причиной образования трещин (Рисунок 3.5).

Состояние заточенных поверхностей после традиционного алмазного затачивания дополнительно исследовалось также с применением методов оптической интерферометрии с использованием комплекса для изучения топографии поверхности *Zygo NewView™ 7300*, предназначенного для определения параметров микрорельефа и структуры объектов технического и биологического происхождения.

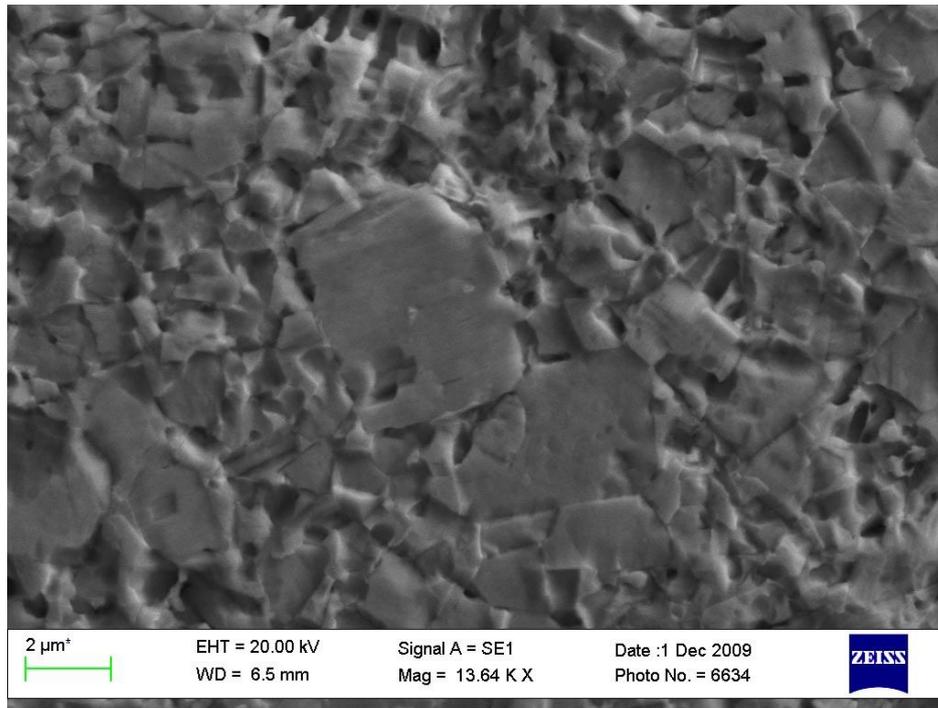


×890



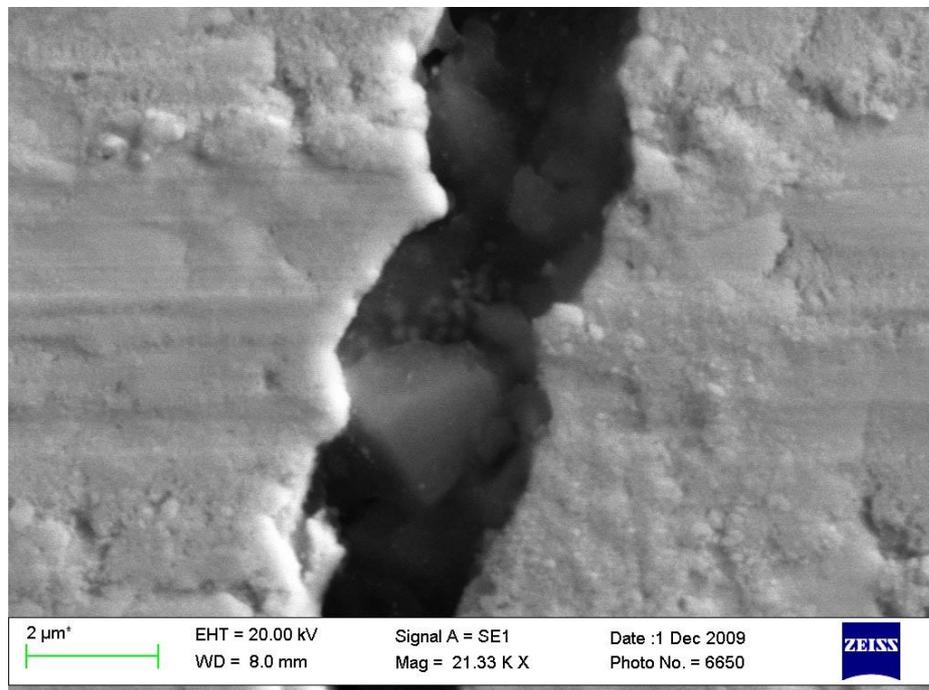
×5000

Рисунок 3.3. Состояние поверхности твердого сплава марки ВК8 поле алмазного затачивания кругами на органической связке



×13640

Рисунок 3.4. Увеличение зерен карбидов в твердом сплаве марки ВК8 после алмазного затачивания кругами на органической связке



×21330

Рисунок 3.5. Трещина на передней поверхности твердого сплава марки ВК8 после алмазного затачивания кругами на органической связке

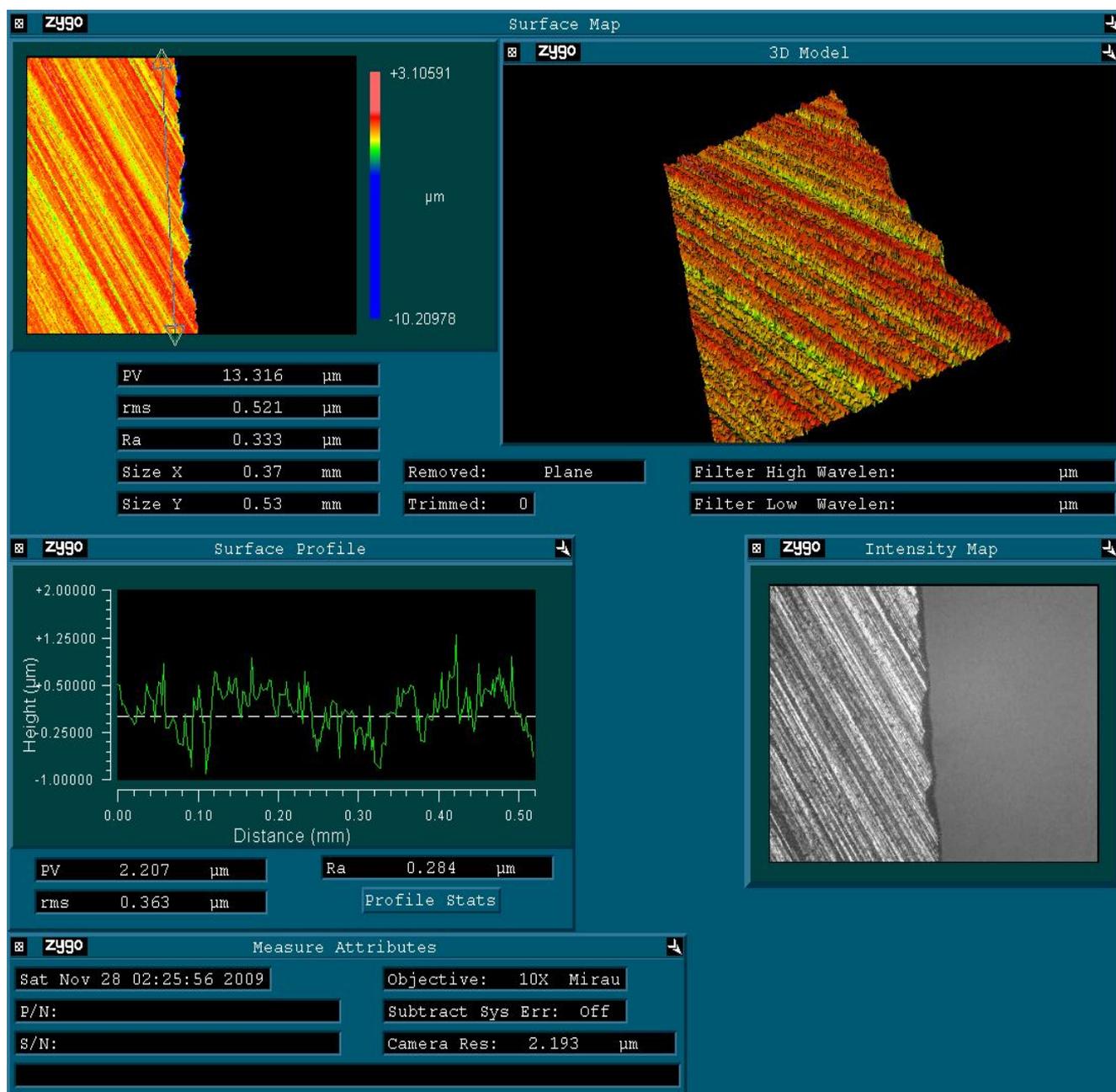


Рисунок 3.6. Результаты топографического исследования качества инструмента, оснащенного твердым сплавом марки ВКЗМ после традиционного алмазного затачивания

Исследование топографии поверхностей инструментов для обработки композиционных неметаллических материалов, оснащенных различными марками инструментальных твердых сплавов (Рисунки 3.6...3.9), заточенных традиционными методами алмазного шлифования, снятые вдоль участка режущей кромки, также подтверждают низкое качество заточенных поверхностей и режущей кромки инструмента.

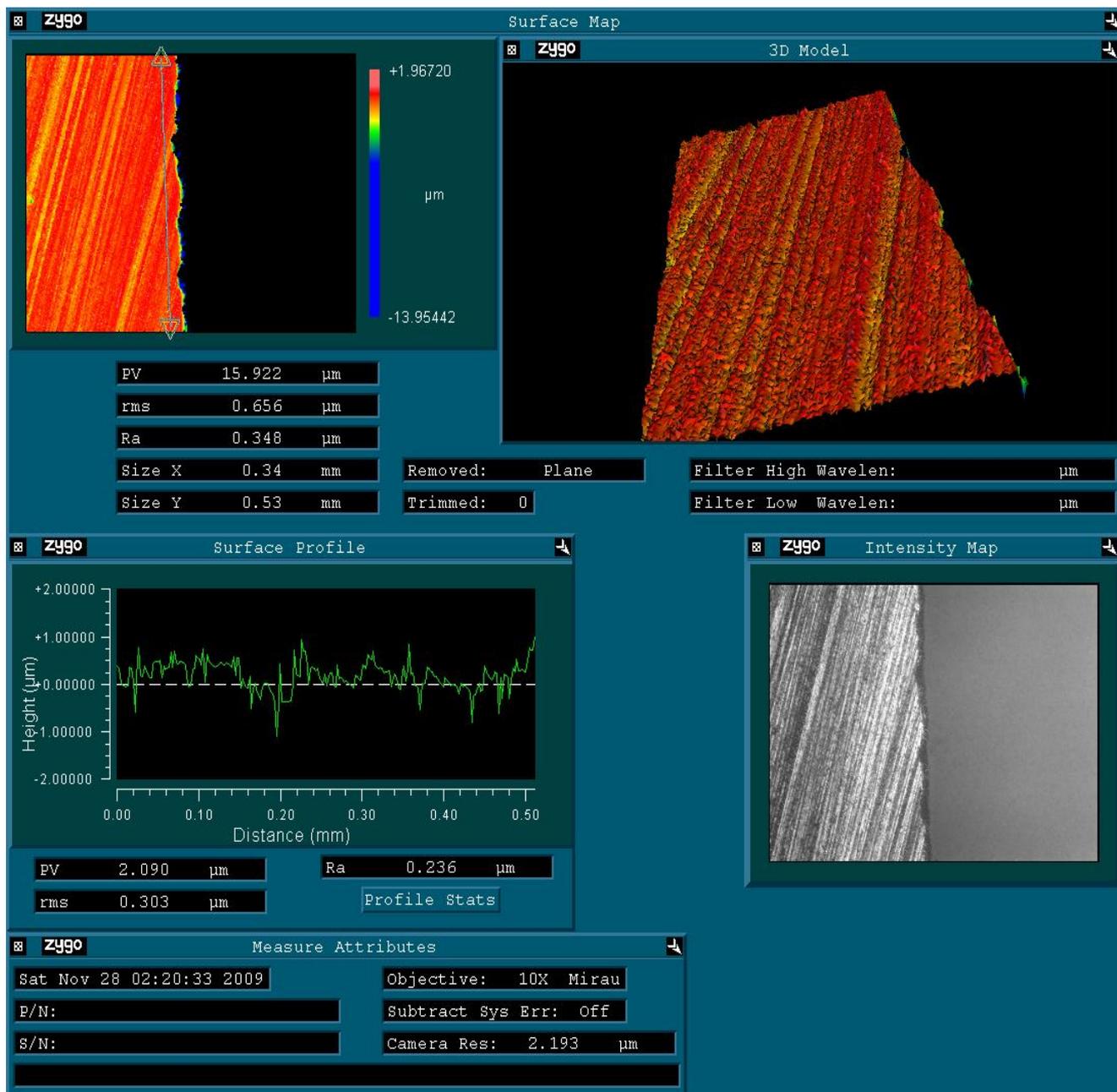


Рисунок 3.7. Результаты топографического исследования качества инструмента, оснащенного твердым сплавом марки ВК8 после традиционного алмазного затачивания

Потеря геометрической формы профиля, интенсивное и неравномерное изнашивание алмазного инструмента на керамической и органической связках, к тому же, отрицательно сказывается на размерной и геометрической точности обрабатываемых режущих элементов, снижает качество заточенных поверхностей и приводит к повышенному расходу абразивного инструмента.

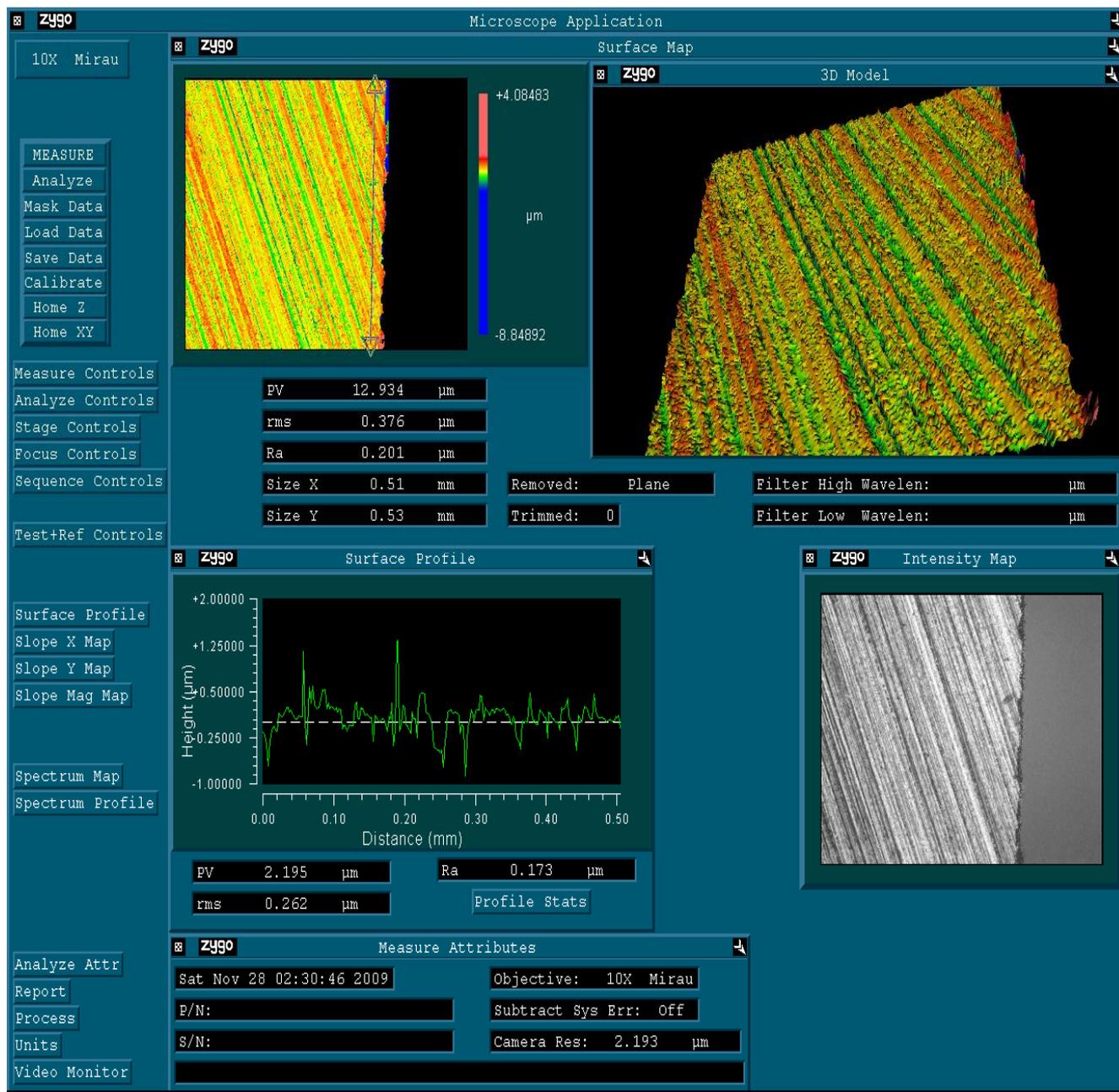


Рисунок 3.8. Результаты топографического исследования качества инструмента, оснащенного твердым сплавом марки ВК15 после традиционного алмазного затачивания

Данную проблему могли бы решить алмазные круги на металлических связках. Но затачивание твердосплавного инструмента таким абразивным инструментом представляет определенные трудности, связанные потерей режущей способности алмазных кругов уже в первые минуты работы.

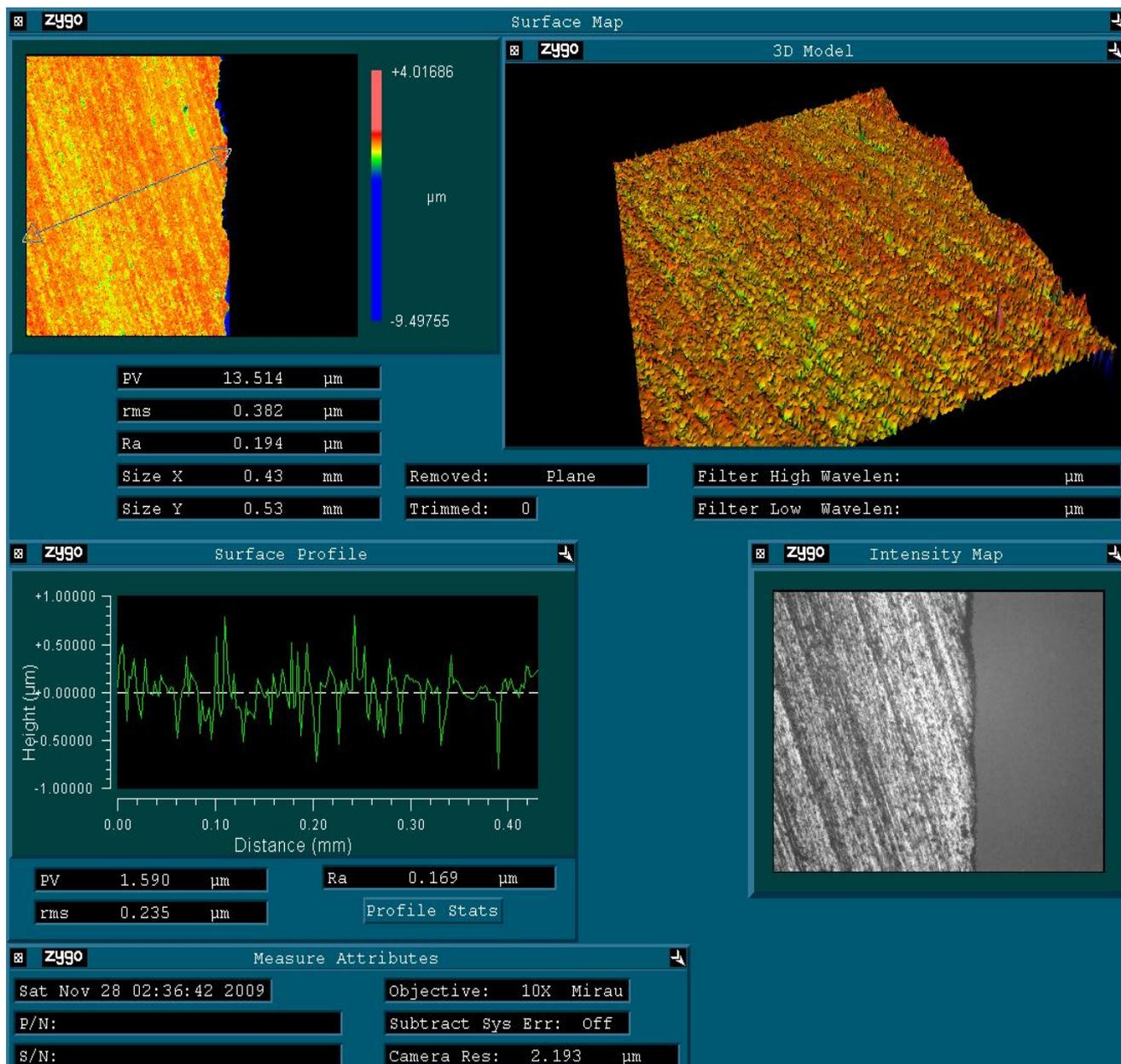


Рисунок 3.9. Результаты топографического исследования качества инструмента, оснащенного твердым сплавом марки ТН20 после традиционного алмазного затачивания

Потеря режущей способности приводит к ухудшению условий обработки, значительному возрастанию температуры и силы резания, что влечет за собой резкое ухудшение качественных показателей поверхностного слоя затачиваемого твердосплавного режущего элемента.

Следовательно, процесс потери режущей способности алмазных кругов на металлической связке при шлифовании твердого сплава требует детального изучения.

### **3.3. Исследование процесса потери режущей способности алмазных кругов на металлической связке при шлифовании твердого сплава**

Существует ряд гипотез потери режущей способности абразивного инструмента в процессе шлифования [48, 55, 168, 214].

Абразивное изнашивание алмазных шлифовальных кругов, может возникать за счет того, что зерна невыгодно ориентированные на поверхности круга вырываются из связки или механически изнашиваются под действием сил резания. Абразивное изнашивание усиливается при шлифовании в химически активных средах, ослабляющих сопротивляемость контактных поверхностей обрабатываемого материала и шлифовального круга.

В процессе шлифования между шлифовальным кругом и деталью имеются условия для образования адгезионного схватывания. Адгезионное изнашивание наблюдается, когда обрабатываемый металл прилипает на вершины и изношенные площадки алмазных зерен, вследствие схватывания или химического взаимодействия с абразивными зернами. Фактическая площадь контакта при микрорезании составляет незначительную часть от номинальной площади контакта. Вследствие высоких контактных давлений, в точках соприкосновения выступов абразивных зерен со шлифуемой поверхностью развиваются локальные пластические деформации с высокой температурой. В результате этого происходит соприкосновение химически чистых участков обрабатываемого материала с абразивными зернами и их взаимное схватывание с образованием очагов «мостиков» схватывания. При микрорезании абразивными зернами детали происходит непрерывное разрушение и возобновление «мостиков» схватывания.

Диффузионное изнашивание происходит вследствие того, что при микрорезании единичными зёрнами происходит развитие адгезионных процессов, то при контакте алмазного зерна и обрабатываемого материала, не исключено и возникновение диффузионных явлений.

Окислительное изнашивание основывается на известном факте коррозии

твердых сплавов при нагреве их в среде кислорода и отсутствии изменения свойств поверхностных слоев сплавов при нагреве их в инертных газах (аргоне, азоте, гелии). Согласно этой гипотезе, при температурах резания 700...800°C кислород воздуха вступает в химическую реакцию с кобальтовой фазой твердого сплава и карбидами вольфрама, причем наиболее сильно окисляется кобальт. Вследствие значительной пористости металлокерамических твердых сплавов окислительным процессам подвергаются не только сами контактные поверхности шлифовального круга, но и зерна твердого сплава, лежащие на некоторой глубине от этих поверхностей.

Процессы, протекающие в зоне резания при шлифовании твердых сплавов, приводят к потере режущей способности алмазных шлифовальных кругов на металлической связке, к такому явлению как засаливание.

Для изучения процесса засаливания алмазных кругов проведены исследования изменения состояния поверхности алмазного круга при шлифовании твердого сплава.

Проведены исследования образцов, вырезанных из алмазного шлифовального круга марки 12A2-45 150×10×3×40×32 AC6 M1-01 100/80. Исследовались образцы круга перед обработкой (эталон) и после обработки твердого сплава ВК8 через 15 и 30 минут после начала процесса шлифования.

Затачивание проводилось на механических режимах, рекомендуемых традиционно в литературе для затачивания твердосплавного режущего инструмента алмазным абразивным инструментом. Обработка проводилась без СОЖ для оценки взаимодействия только структуры абразивного инструмента с обрабатываемым образцом твердого сплава.

В качестве эталона была принята поверхность образца, вырезанного из шлифовального круга поставленного заводом изготовителем.

Образцы алмазного шлифовального круга исследовались с использованием рентгеновского дифрактометра *ARL X'TRA*, растрового электронного микроскопа *Carl Zeiss EVO50* со встроенным химическим анализатором *EDS X-Act*, оптического микроскопа *Carl Zeiss Axio Observer Alm*, а также оптического интерферометра *Zygo New View TM 7300*.

Для растровой и оптической микроскопии подготовлены шлифы образцов твердого сплава, обработка которых осуществлялась с использованием алмазных паст с зернистостью 60/40, 28/20, 14/10, 5/3 последовательно.

### 3.3.1. Исследование эталонной поверхности алмазного круга

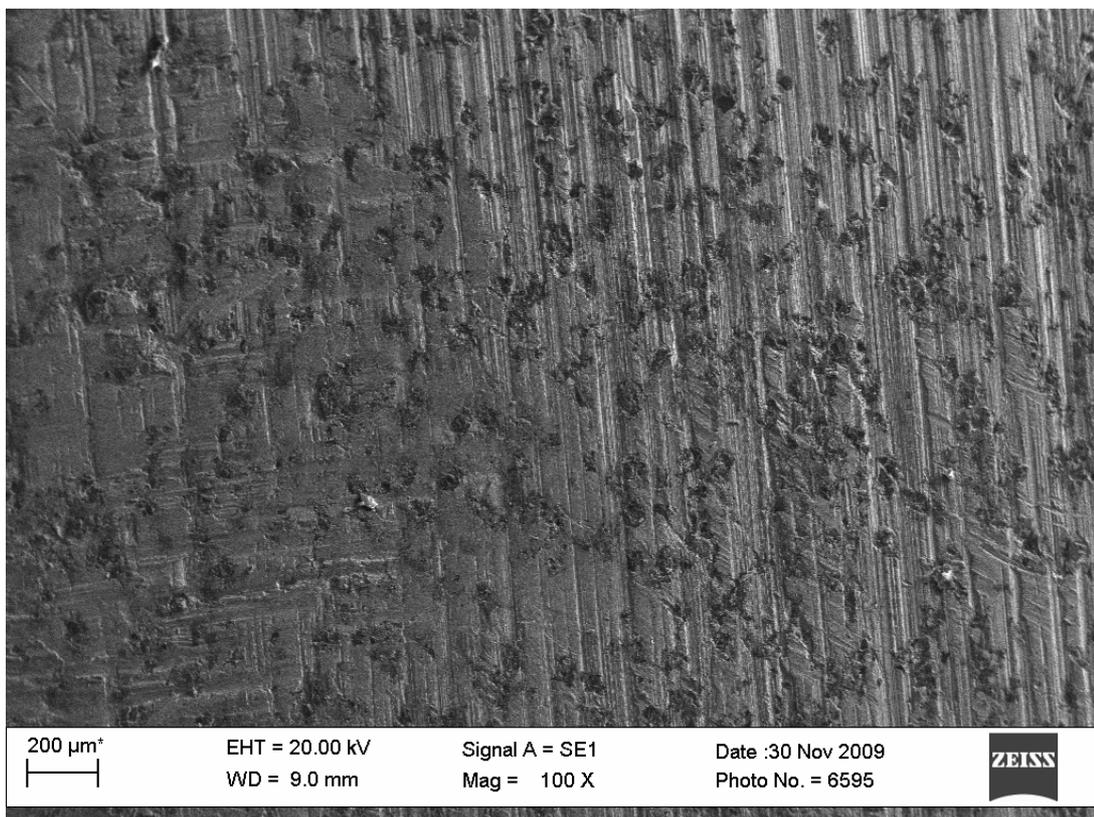
Исследование поверхности шлифовального круга (эталона), которая сформирована на стадии изготовления, показало, что поверхность имеет неразвитую структуру, большая часть алмазных зерен скрыта связкой, такая поверхность не может обладать высокими режущими свойствами (Рисунок 3.10).

Модель участка эталонной поверхности алмазного круга, исследованная с помощью оптической интерферометрии, показана на Рисунке 3.11. Темные участки на изображении соответствуют алмазным зернам, которые выступают из связки и участвуют в процессе шлифования.

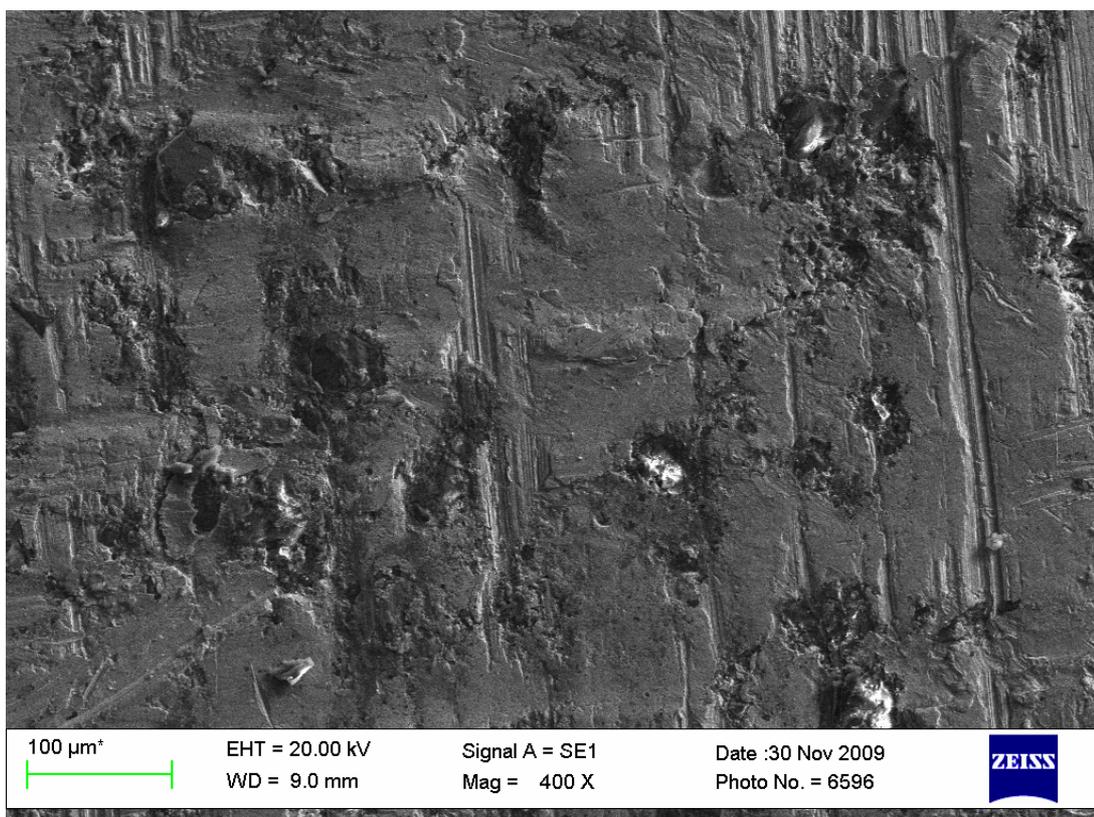
Топографическое исследование (Рисунок 3.12) показывает, что максимальная величина, на которую выступают отдельные алмазные зерна, колеблется в пределах 5 мкм, остальная часть рельефа образована неровностями связки и равна порядка 9 мкм.

Спектральный анализ поверхности эталона алмазного круга (Рисунок 3.13.) также свидетельствует о наличии фаз углерода – алмаза и элементов, входящих в состав связки (медь и олово).

Как показывает рентгенограмма (Рисунок 3.14), фазы меди и олова проявляются в виде твердых растворов  $Cu_{0.932}Sn_{0.068}$  и  $Cu_{41}Sn_{11}$ . Другие включения и соединения обнаружены не были.



× 100



× 400

Рисунок 3.10. Поверхность эталона алмазного круга

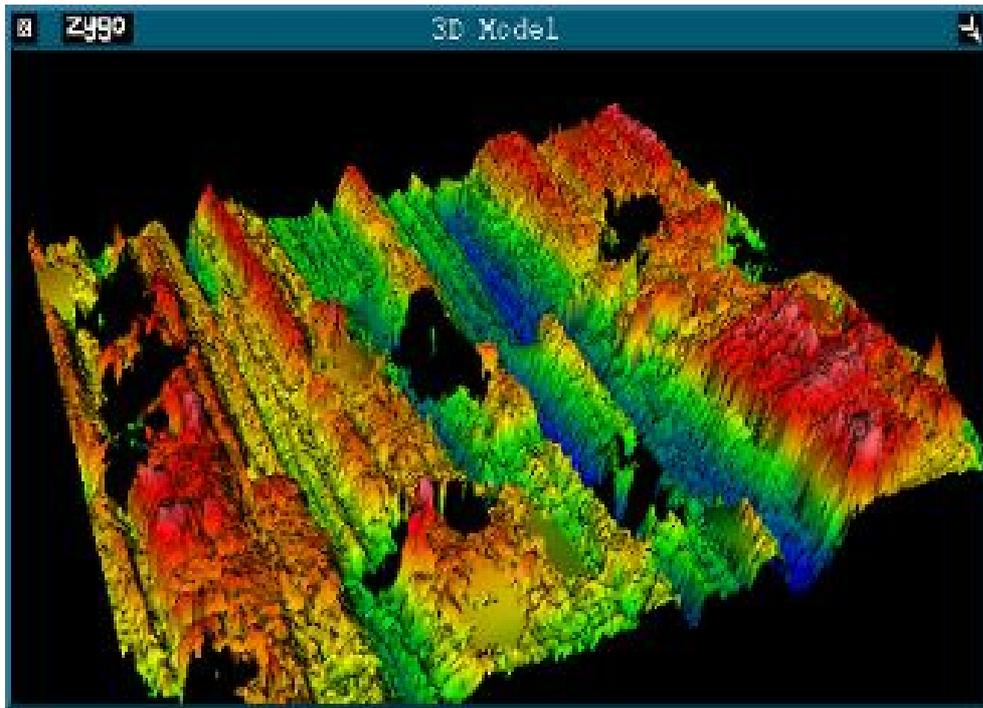


Рисунок 3.11. Модель поверхности эталона алмазного круга

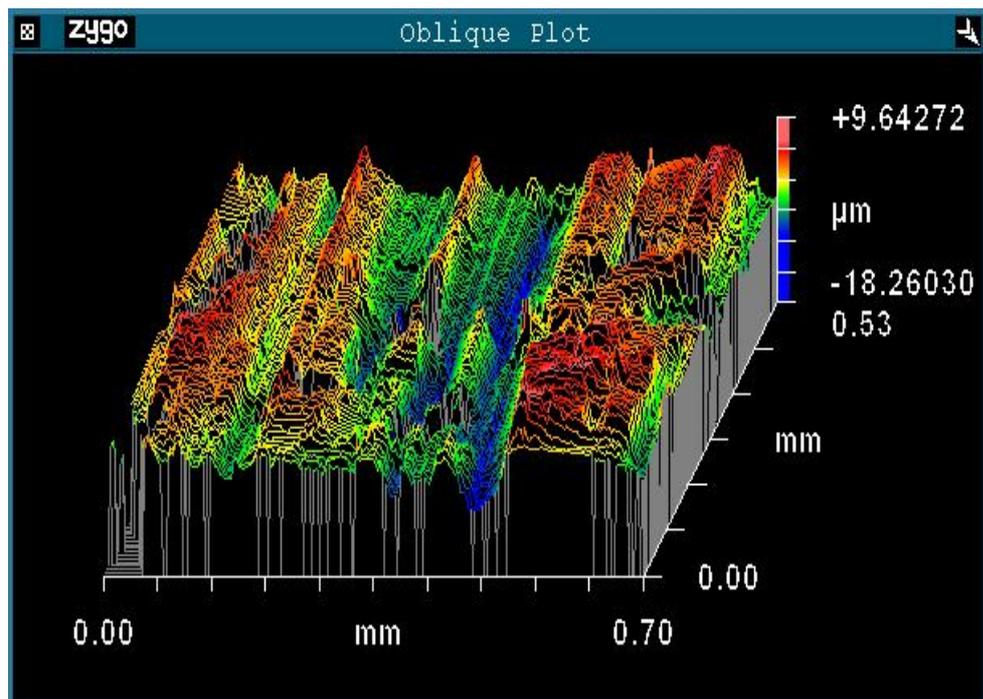
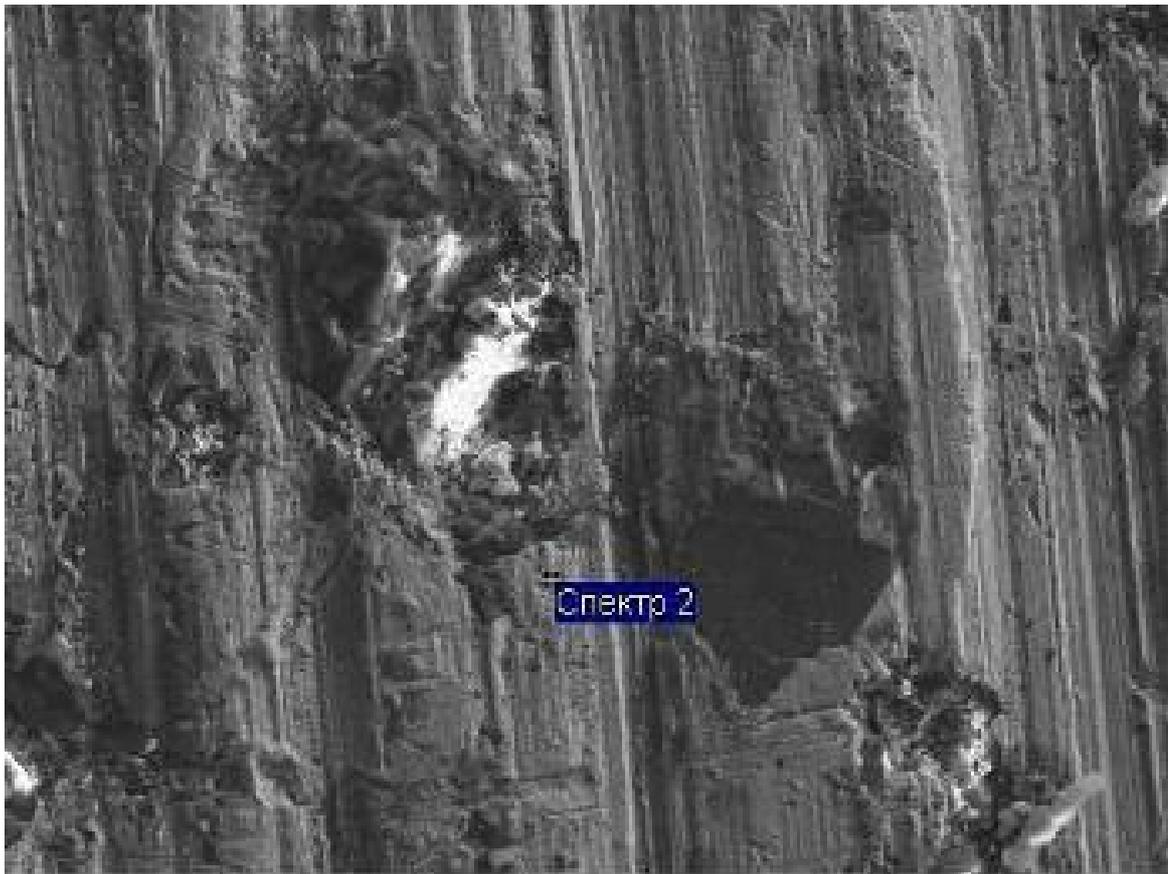


Рисунок 3.12. Топографическое изображение участка поверхности эталона алмазного круга



100мкм

Электронное изображение 1

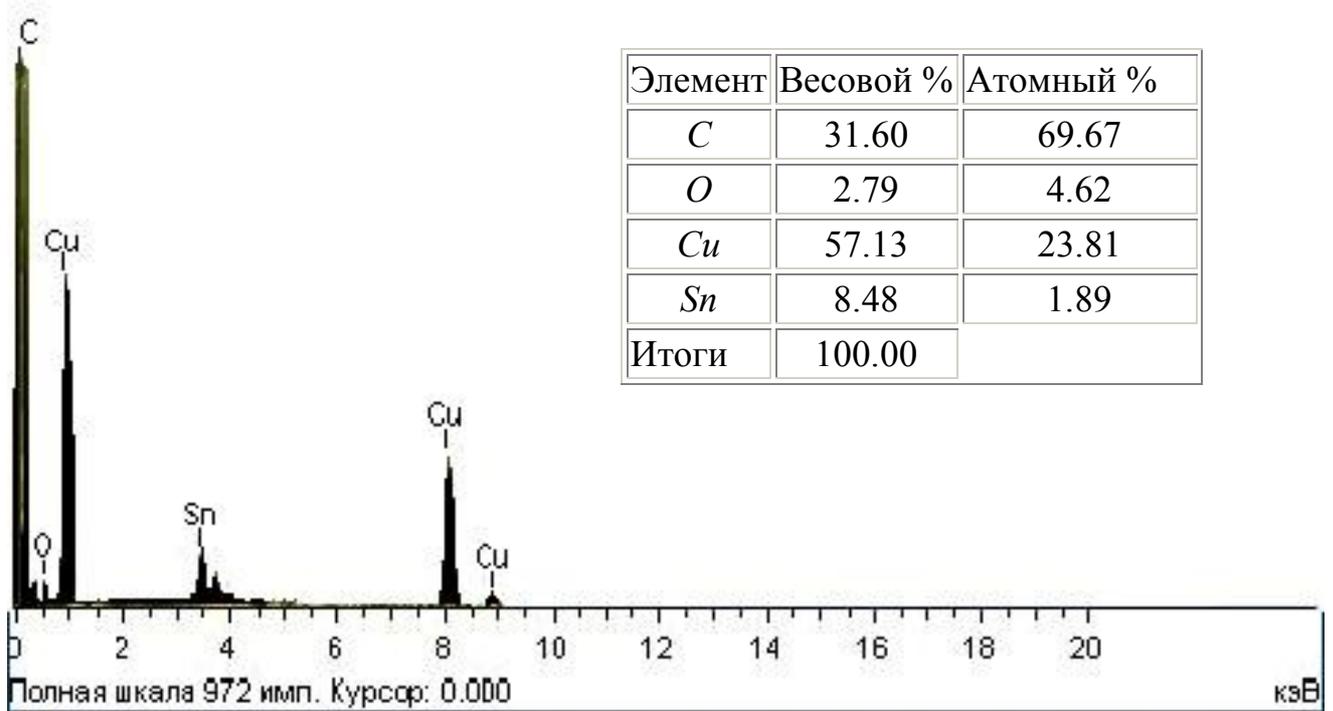


Рисунок 3.13. Спектральный анализ участка поверхности эталона алмазного круга

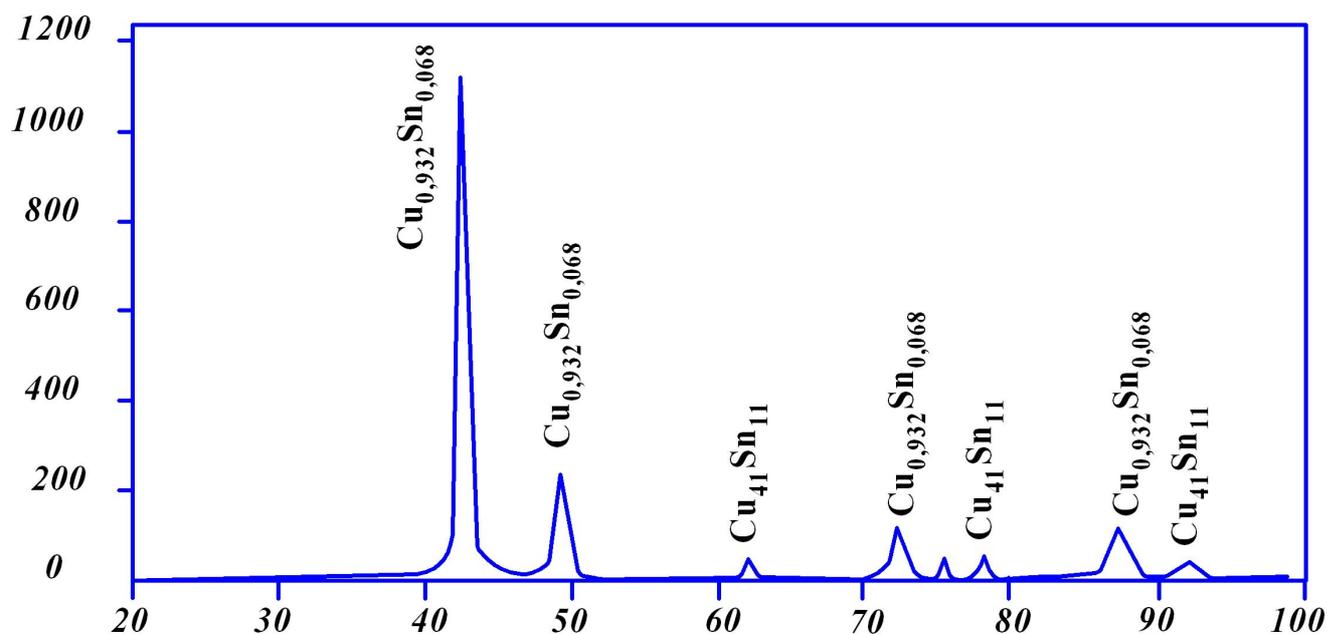


Рисунок 3.14. Рентгенограмма эталона алмазного круга

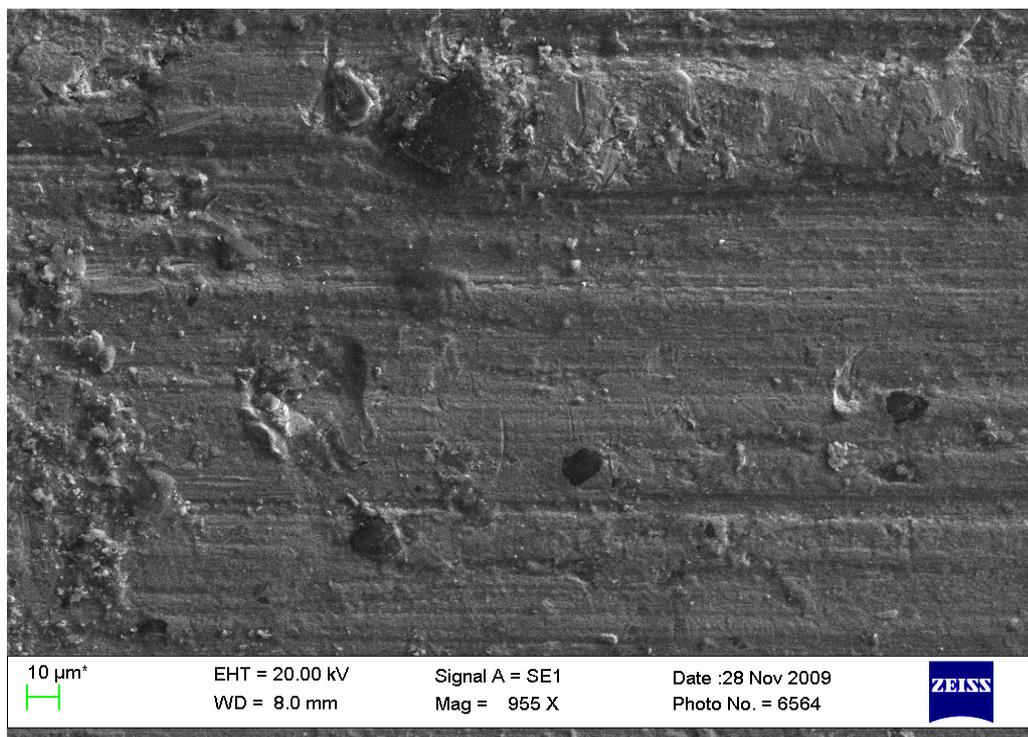
### 3.3.2. Исследование поверхности алмазного круга на металлической связке в процессе обработки твердого сплава

*Исследование образца поверхности алмазного круга на металлической связке после 15 минут шлифования твердого сплава ВК8*

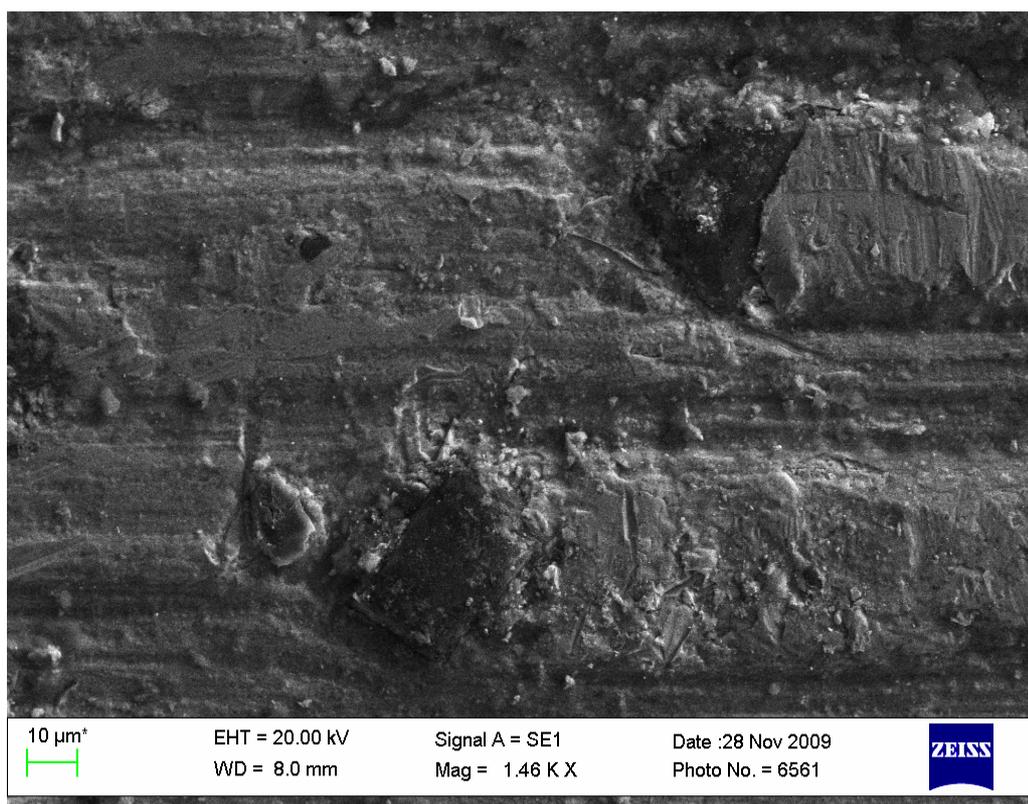
Известно, что алмазные круги на металлической связке, как правило, полностью теряют свои режущие свойства в течение первых минут работы, особенно при шлифовании без электрических процессов.

Исследования образца алмазного круга после 15 минут шлифования твердого сплава ВК8, позволили определить очаги образования засаленного слоя. Такими очагами могут являться как алмазные зерна, так и связка. Во время обработки твердый сплав образует навалы на боковой поверхности алмазного зерна, которые, взаимодействуя со связкой, способствуют дальнейшему развитию засаливания (Рисунок 3.15).

Спектральный анализ поверхности алмазного круга после 15-ти минут шлифования твердого сплава ВК8 показал, что засаленный слой формируется из вольфрама, который сосредоточен на боковых поверхностях алмазного зерна (Рисунок 3.16).



× 900



× 1400

Рисунок 3.15. Участок поверхности алмазного круга на металлической связке после 15 минут шлифования сплава ВК8

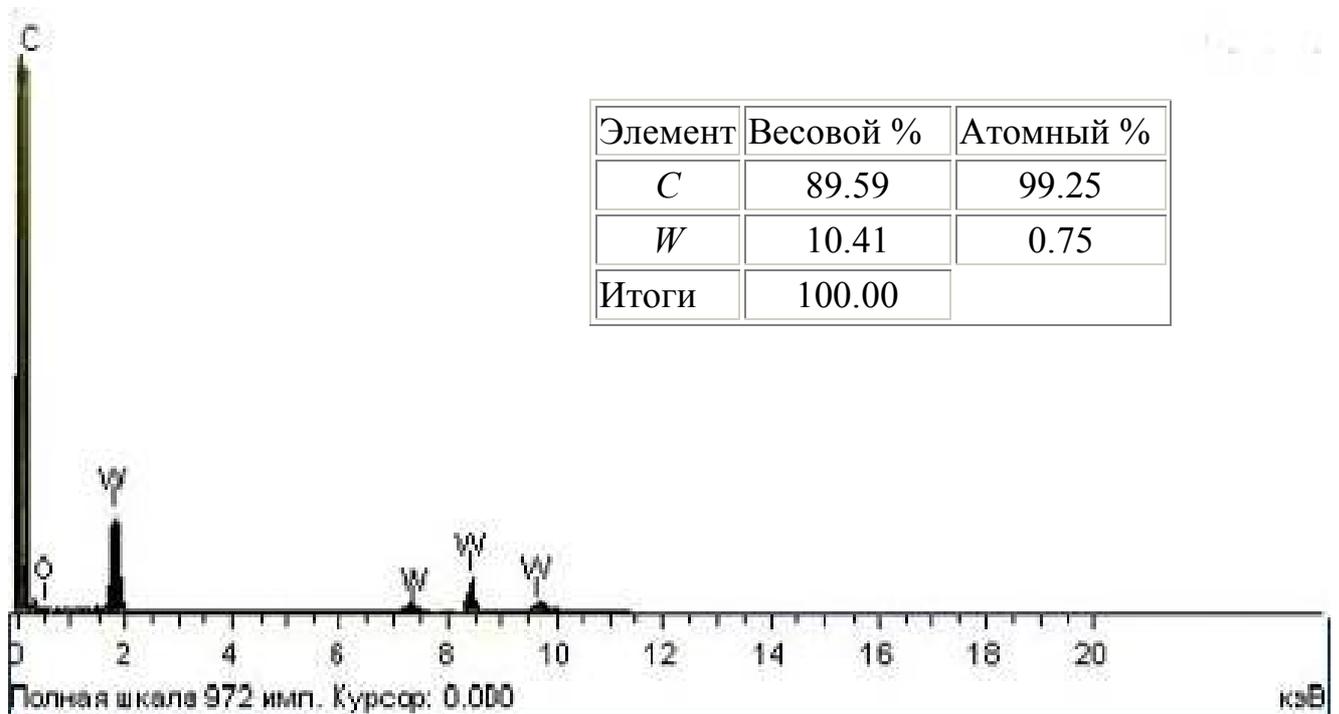
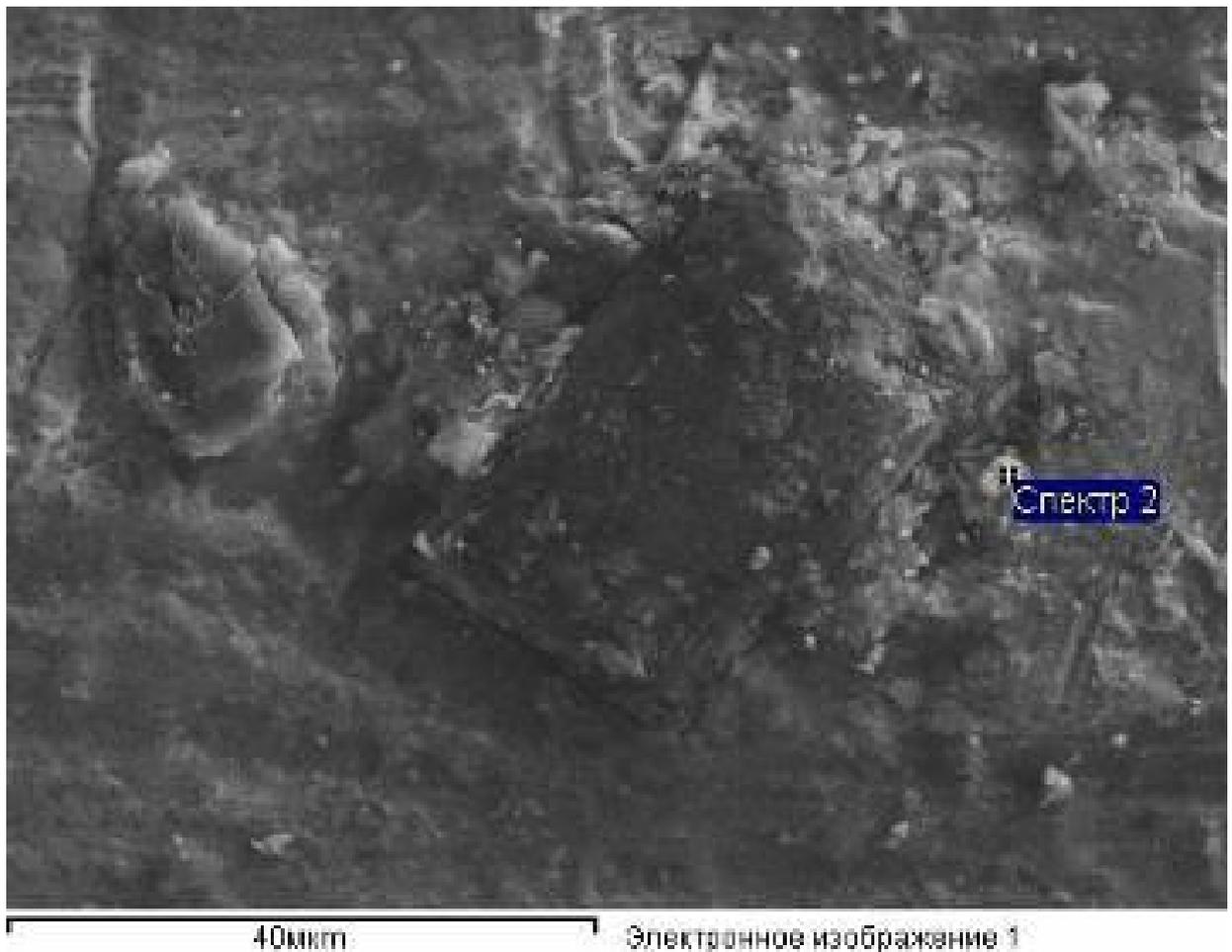


Рисунок 3.16. Спектральный анализ участка поверхности алмазного круга после 15 минут шлифования сплава ВК8

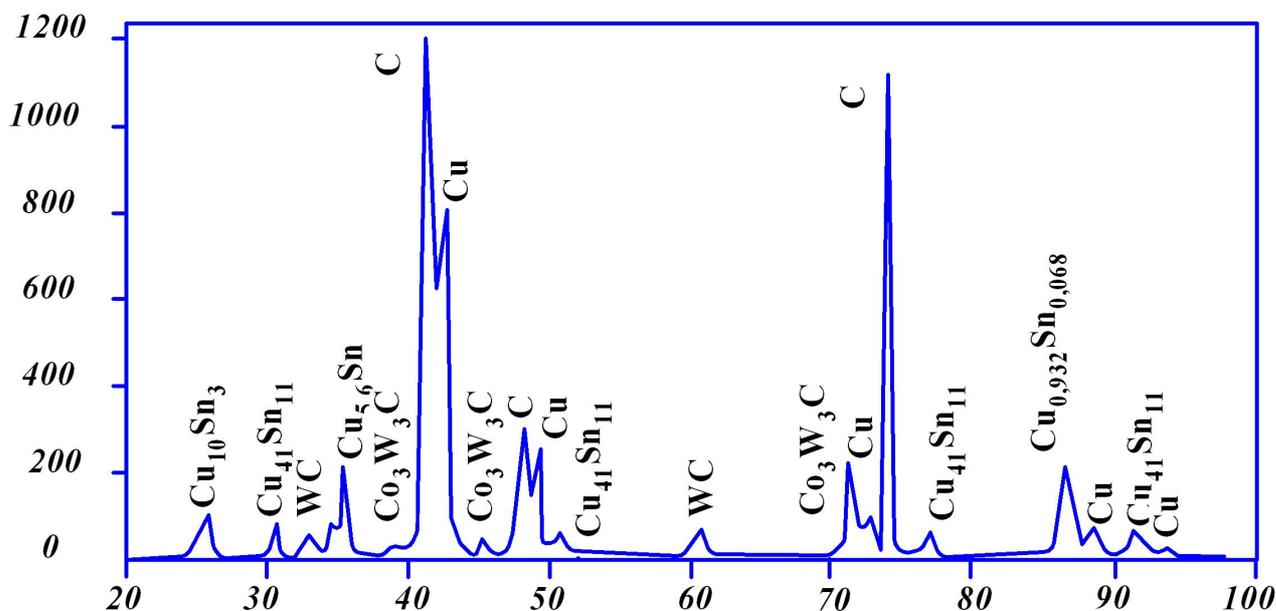


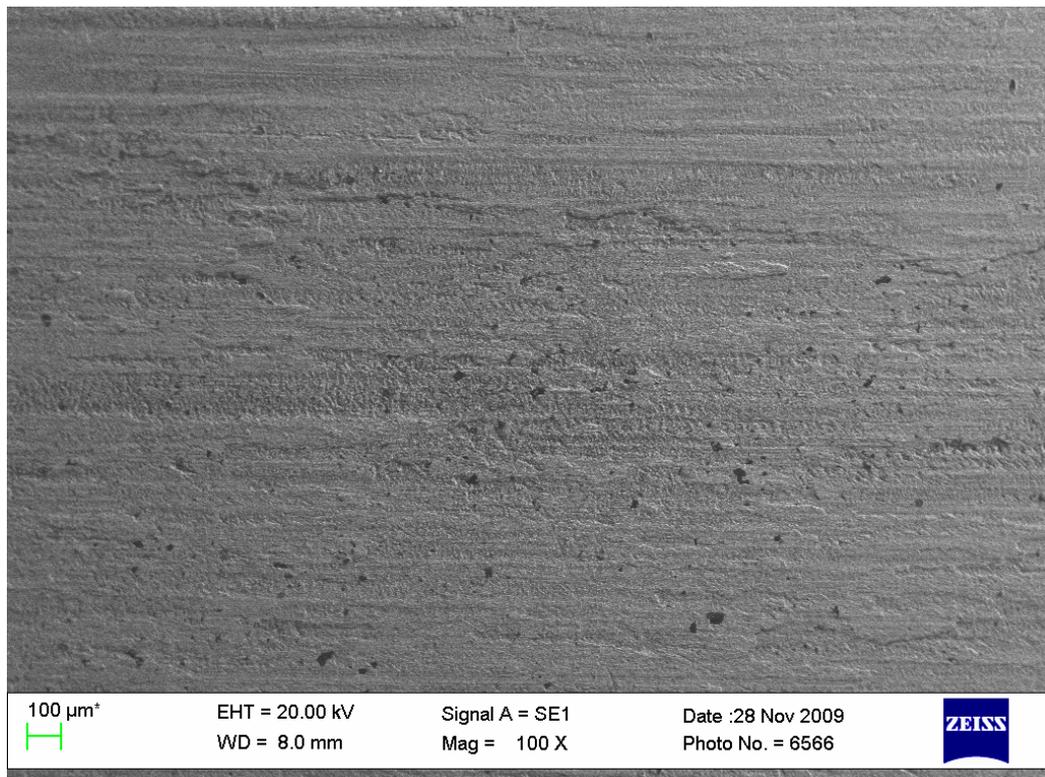
Рисунок 3.17. Рентгенограмма участка поверхности алмазного круга после 15 минут шлифования твердого сплава ВК8

Это позволяет сделать вывод, что первыми очагами засаливания являются алмазные зерна, через которые происходит контакт с обрабатываемой поверхностью. Связка также вносит существенный вклад в процесс засаливания за счет химической активности, входящих в ее состав элементов.

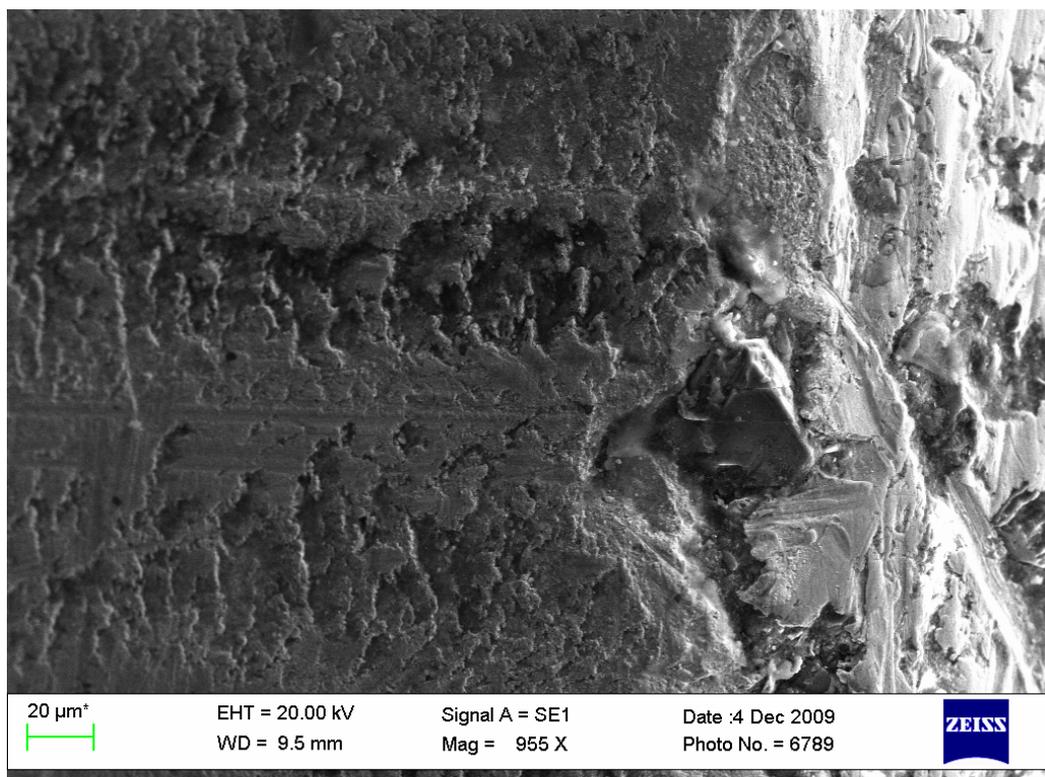
Рентгеноструктурный анализ поверхности алмазного круга после 15 минут шлифования твердого сплава ВК8 (Рисунок 3.17) показал наличие засаленного слоя, состоящего из фаз карбида вольфрама  $WC$  и сложного карбида  $Co_3W_3C$ . Свидетельством того, что засаленный слой частично скрывает поверхность алмазного круга, служит наличие фаз углерода  $C$  (алмаза) и элементов, входящих в состав связки. Такими фазами являются твердые растворы меди и олова  $Cu_{10}Sn_3$ ,  $Cu_{41}Sn_{11}$ ,  $Cu_{5.6}Sn$ ,  $Cu_{0.932}Sn_{0.068}$  и фаза меди  $Cu$ .

*Исследование поверхности алмазного круга на металлической связке после 30 минут шлифования твердого сплава ВК8*

Оптическое изображение участков поверхности алмазного круга после 30 минут шлифования твердого сплава ВК8 без электрических процессов позволила установить, что засаленный слой полностью скрывает алмазные зерна (Рисунок 3.18).



*а) прямое изображение*



*б) изометрическое изображение*

Рисунок 3.18. Участки поверхности алмазного круга  
после 30 минут шлифования сплава ВК8

Такая поверхность фактически не работоспособна, образовавшийся засаленный слой препятствует обновлению алмазных зерен и по мере их истирания и разрушения полностью покрывает поверхность шлифовального круга. Над поверхностью круга выступают вершины отдельных алмазных зерен, которые работают непродолжительное время и изнашиваются до уровня засаленного слоя. В результате, процесс шлифования переходит в пластическое деформирование, что приводит к дефектам и разрушению обрабатываемой поверхности.

Топографический анализ образца алмазного круга после 30 минут шлифования без электрических процессов (Рисунок 3.19.), также показал, что поверхность шлифовального круга полностью скрыта засаленным слоем. Средняя величина его составляет 10 мкм, а на отдельных участках порядка 20 мкм.

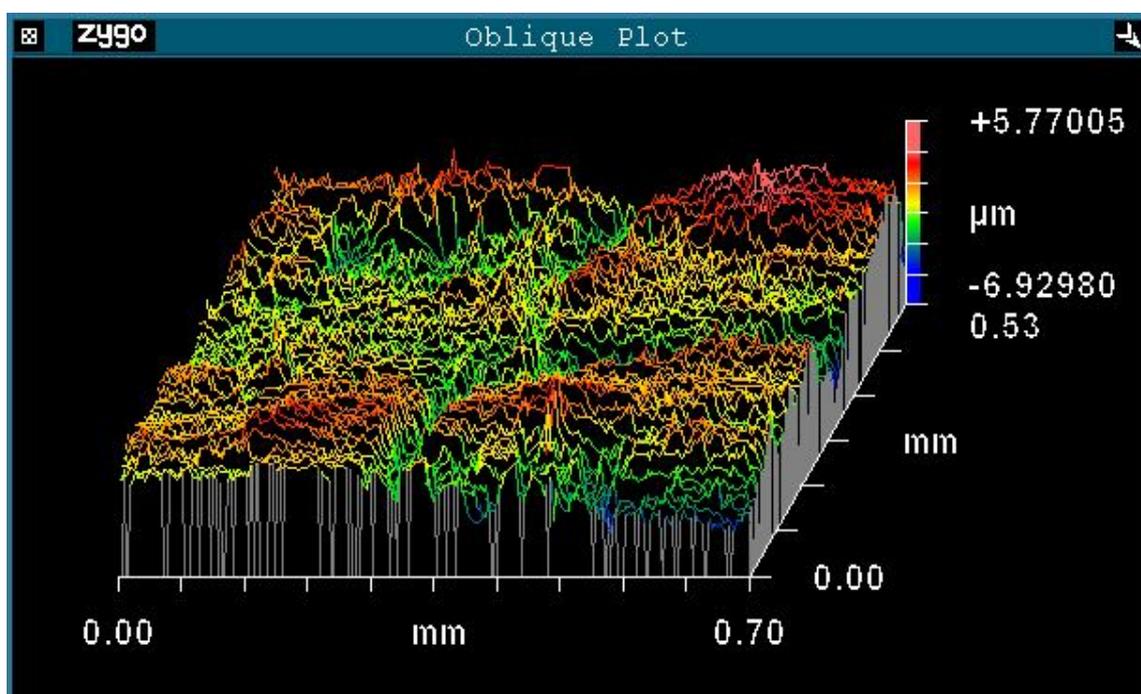


Рисунок 3.19. Топографическое изображение участка поверхности алмазного круга после 30 минут шлифования сплава ВК8

Проведенный спектральный анализ образца алмазного шлифовального круга после 30 минут шлифования твердого сплава ВК8 показал, что на поверхности образуется засаленный слой, строение которого определяется составом обрабатываемого материала.

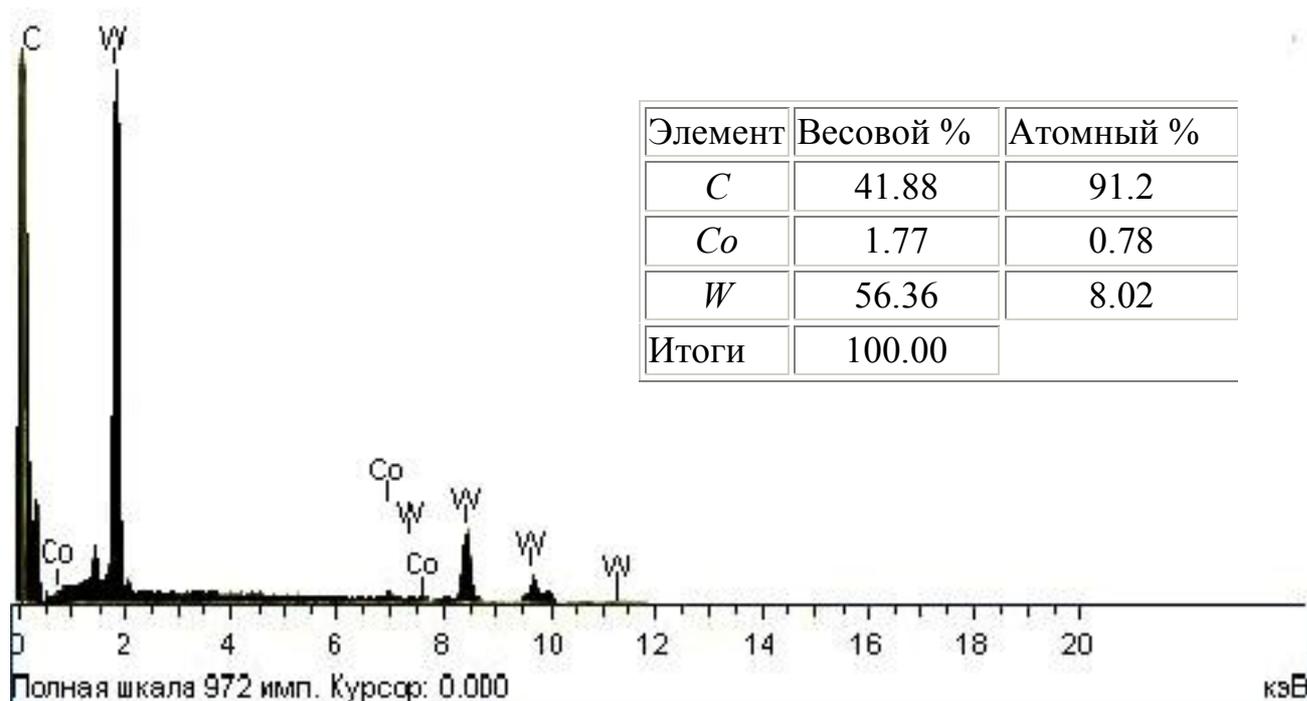
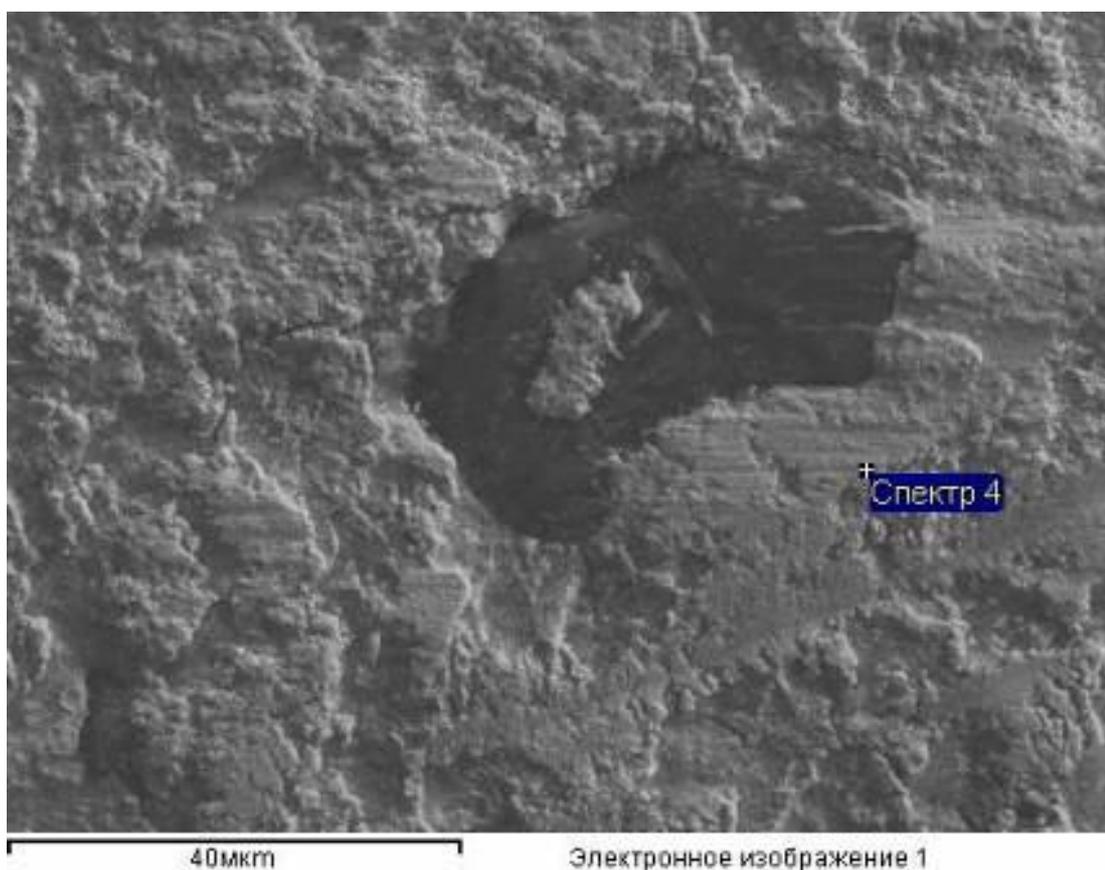


Рисунок 3.20. Спектральный анализ участка поверхности алмазного круга после 30 минут шлифования сплава ВК8

Анализ спектра (Рисунок 3.20), взятого с точки возле алмазного зерна, позволил определить, что засаженный слой состоит из кобальта, который является

связующим в твердом сплаве и вольфрама.

Рентгеноструктурный анализ подтверждает, что засаленный слой полностью скрывает алмазные зерна и связку круга. На рентгенограмме проявились только фаза карбида вольфрама  $WC$  и фаза вновь образовавшегося сложного карбида вольфрама  $Co_3W_3C$  (Рисунок 3.21), так называемой фазы  $\eta$ , представляющей собой двойной карбид вольфрама и кобальта. Образование фазы  $Co_3W_3C$  может свидетельствовать о деструкции карбида вольфрама  $WC$  в поверхностном слое твердого сплава.

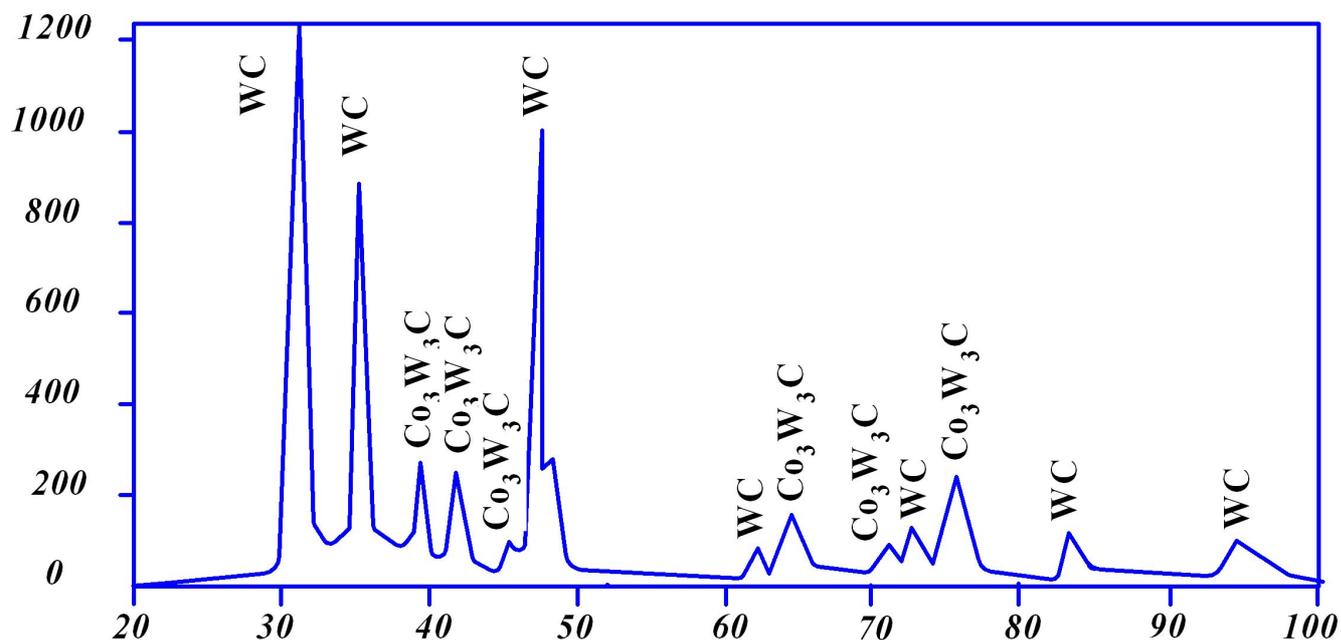
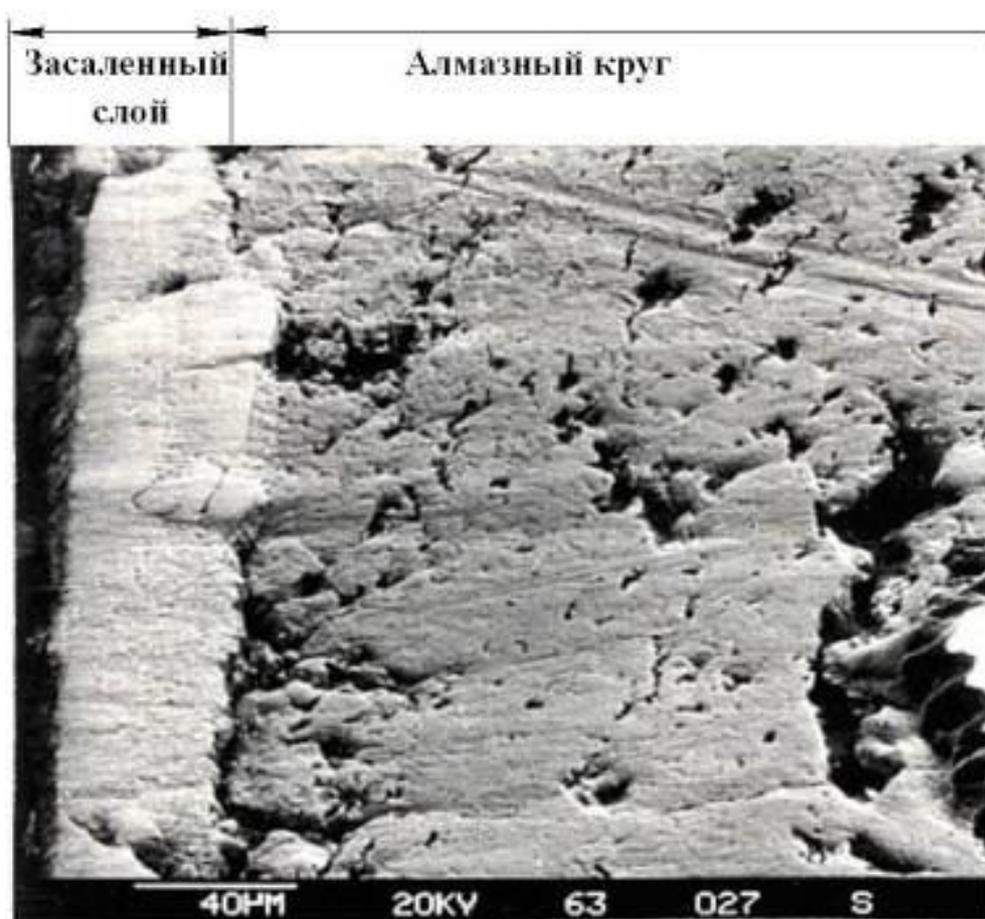


Рисунок 3.21. Рентгенограмма участка поверхности алмазного круга после 30 минут шлифования без электрических процессов

Проведенные исследования засаленного слоя, полученные многочисленные снимки, спектрограммы, а также рентгенограммы с поверхности алмазных кругов, позволяют предположить следующее: очевидно, что процесс засаливания шлифовальных кругов зависит от структуры и состава связки кругов и обрабатываемого материала. Очевидно, что процесс засаливания зависит не только от термодинамических параметров, но и от атомно-молекулярных связей, которые формируют структуру взаимодействующих материалов. Поэтому засаленный слой предлагается рассматривать как двойной электрический слой.

Согласно экспериментальным данным [187, 214] при исследовании кон-

тактных процессов шлифования алмазными кругами на металлической связке твердых сплавов максимальная величина засаленного слоя составляет порядка 30...40 мкм. В результате теоретического расчета, основанном на образовании двойного электрического слоя на границе контакта алмазного шлифовального круга с обрабатываемой деталью, получена величина засаленного слоя равная 31 мкм [181]. Эта величина хорошо видна на приведенной фотографии, полученной при исследовании поверхности алмазного круга и образовании на ней границ засаленного слоя (Рисунок 3.22).



× 425

Рисунок 3.22. Размеры засаленного слоя на поверхности алмазного круга после шлифования сплава ВК8

Проблема засаливания кругов при шлифовании должна решаться на атомном уровне с учетом атомно – молекулярных взаимодействий в промежуточном слое между контактирующими поверхностями шлифовального круга и обрабаты-

ваемой детали, который неизбежно образуется при обработке.

Восстановление режущей способности алмазного круга может осуществляться только правкой, которая производится с целью вскрытия зерен алмазного слоя, устранения биения, профилирования и тому подобного и может осуществляться механическими, физическими, химическими и комбинированными методами [62, 100, 168, 230]. Однако не все эти способы достаточно совершенны, поскольку занимают большое количество времени, ведут за собой механические повреждения абразивных зерен, а также увеличивают удельный расход алмазов.

Таким образом, при шлифовании необходимо создать условия в зоне резания, при которых взаимодействие связки и детали не будет сопровождаться образованием засаженного слоя. Такими условиями может служить подвод СОТС, периодическая правка шлифовального круга и использование комбинированных методов электроалмазного шлифования.

### **3.4. Моделирование напряженно-деформированного состояния в пластине режущего элемента из инструментального твердого сплава группы ВК (*WC-Co*) при алмазном затачивании**

Анализ технологий изготовления (формообразования) твердосплавных режущих элементов инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов показал, что при подготовке режущего инструмента к работе важное значение имеет качество формирования режущего лезвия, сведение к минимуму дефектов, возникающих на нем и непосредственно в его близи. Кроме того, существенным фактором, влияющим на износостойкость инструмента, является уровень остаточных напряжений на поверхности и в приповерхностных слоях на режущем лезвии, после операции затачивания. Качественно сформированные режущие поверхности и лезвие инструмента оказывают значительное влияние на процесс резания, износ режущего инструмента во время работы и качество обработанных поверхностей изделий [20, 37, 111, 117, 163]. Особо актуальна эта проблема при затачивании композиционных инструментальных материалов, где на-

блюдается хрупкое разрушение инструментального материала под действием сил резания.

В связи с этим, детального изучения требует напряжённо-деформированное состояние режущей кромки и поверхностей вблизи её при формообразовании (затачивании) инструмента со специфической для обработки композиционных неметаллических материалов геометрией традиционными и комбинированными методами.

### *Постановка задачи и методика моделирования*

Режущие элементы фрезерного инструмента имеют сложную трехмерную геометрическую конфигурацию. Как известно из проведенных ранее исследований [4...6, 15, 31, 48, 101, 111, 117, 163, 187, 214], разрушение материала режущих элементов, как правило, происходит вдоль режущего лезвия на расстояниях, не превышающих 0,25...0,3 мм. Это свидетельствует о том, что максимальные внутренние напряжения имеют место вблизи режущей кромки на расстояниях, значительно меньших поперечных и продольных размеров режущего элемента.

Для моделирования процесса затачивания твердосплавного режущего элемента рассмотрим схему обработки и действующие при этом динамические составляющие процесса (Рисунок 3.23).



Рисунок 3.23. Схема затачивания режущего элемента

Затачиваемый режущий элемент, имеющий форму клина с углом заострения  $\beta$  закреплен неподвижно в специальном крепежном приспособлении. Шлифо-

вальный круг (в данном случае чашечный конический) вращается вокруг своей оси с постоянной скоростью  $V$  (м/с). Кроме того, шлифовальный круг поступательно движется в сторону затачиваемого режущего элемента с постоянной скоростью, равной величине продольной подачи  $S_{np}$  (м/мин). В процессе затачивания с поверхности режущего элемента снимается слой материала равный величине поперечной подачи  $S_{nop}$  (мм/дв.ход).

В результате кинематического воздействия абразивного инструмента на обрабатываемую заготовку в зоне резания возникают технологические силы, которые достаточно просто измерить с высокой точностью.

Линейные скорости смещения поверхностного слоя материала непосредственно в месте контакта затачиваемого режущего элемента с шлифовальным кругом зависит от радиальных размеров круга.

Примем некоторые допущения для оценки напряжённо-деформированного состояния режущей кромки и поверхностей вблизи её при затачивании. Материал режущего элемента считается однородный сплошной и анизотропный. В процессе обработки он испытывает незначительные деформации. Разрушение материала считается хрупким, т.е. при превышении предела прочности происходит отслаивание материала. Технологические силы, действующие на режущий элемент со стороны абразивного инструмента, распределены равномерно по передней поверхности вдоль режущей кромки затачиваемого инструмента. Предполагается, что режущая кромка является абсолютно острой (радиус округления равен нулю) и внешние силы распределены равномерно по ширине резца, а задняя поверхность не нагружена.

Упрощенно процесс шлифования рассматривают как результат воздействия на обрабатываемую поверхность движущегося индентора (абразивного зерна). В действительности поверхность абразивного круга представляет собой распределенные по объему зерна-абразивы примерно одного размера и сами зерна геометрически отличаются друг от друга. В результате каждое зерно круга снимает малую часть материала, существенное влияние оказывает рабочий диаметр круга и скорость сдвига в месте обработки. Допущение об однородной поверхности круга

может приводить к завышенным значениям параметра поврежденности вблизи области шлифования. Тем не менее, качественно распределение повреждений в кромке должно быть подобно реализующемуся на практике.

Уровень остаточных напряжений и степень поврежденности твердых материалов в зоне шлифования зависят от большого количества технологических и физических факторов. Определение рационального сочетания параметров процесса шлифования зависит не только от физико-механических свойств обрабатываемого материала, но и конкретных геометрических размеров изделия.

Выберем в качестве объекта исследования клин определенной ширины и длины с углом при вершине варьирующемся в пределах  $\beta = 50^\circ \dots 60^\circ$  в зависимости от условий обработки и сочетания инструментального и обрабатываемого материала.

Условные размеры образца обрабатываемой пластины принятой в модели представлены на Рисунке 3.24.

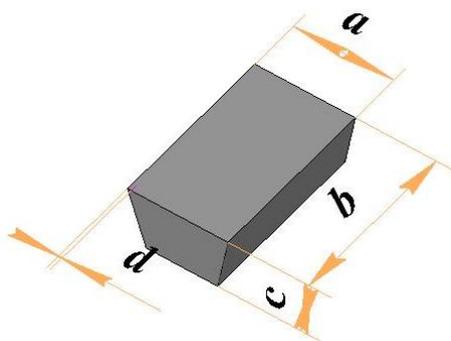


Рисунок 3.24. Условные размеры обрабатываемой пластины

Длина пластины  $b$  зависит от назначения режущего элемента и может варьироваться в пределах от 3 до 21 мм.

Ширина пластины  $a$  определяет ресурс и эксплуатационные характеристики инструмента и, как правило, зависит от конструктивных особенностей режущей части инструмента. Наибольший интерес при формировании режущего элемента инструмента представляет небольшой участок поверхности вдоль режущей кромки, где, как правило, происходит интенсивный контакт стружки с передней поверхностью инструмента в процессе резания материалов. К этому участку по-

верхности предъявляются повышенные требования по качеству обработки при подготовке инструмента. Ширина этого участка  $d$  от режущей кромки вглубь по поверхности достигает до 1 мм.

Высота пластины ( $c$ ) влияет на прочностные характеристики режущего элемента, влияет на ресурс инструмента и изменяется в пределах от 3 до 12 мм.

Практический интерес представляет изучение закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния в элементах режущего инструмента из твердых материалов при затачивании алмазным кругом.

Для исследования формирования напряженно-деформированного состояния в зоне затачивания пластины из сплава высокой твердости была использована вычислительная модель, разработанная в рамках подхода механики повреждаемых сред.

Физико-математическая модель включает уравнения сохранения массы, импульса и энергии, записанные в рамках Лагранжевого подхода континуальной механики. Определяющее уравнение повреждаемой среды сформулировано с использованием модели Джонсона-Холквиста [258].

Определяющее уравнение в повреждаемой среде принимает вид:

$$\sigma_{ij} = (1 - D)[-P\delta_{ij} + S_{ij}], \quad (3.1)$$

где  $\sigma_{ij}$  - компоненты тензора эффективного (усредненного в представительном объеме поврежденной среды) напряжения;  $D$  - параметр поврежденности среды;  $\delta_{ij}$  - символ Кронекера;  $P, S_{ij}$  - давление и девиатор тензора напряжения в конденсированной фазе поврежденной среды.

Параметр поврежденности среды  $D$  вычислялся путем суммирования приращений на дискретных интервалах времени, соответствующих шагу интегрирования [258]:

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{[\Delta \varepsilon_{eq}^P]_i}{\varepsilon_f}, \quad (3.2)$$

где  $\Delta D_i = \frac{[\Delta \varepsilon_{eq}^P]_i}{\varepsilon_f}$  - приращение параметра поврежденности за шаг по времени  $\Delta t$ ;

$\varepsilon_{eq}^P$  - интенсивность неупругой деформации, ;  $\varepsilon_f$  - предельная деформация в момент макроскопического разрушения.

Уравнения состояния для конденсированной фазы сплава ВК6 (*WC-wt 5.7% Co*) в полиномиальной форме Ми – Грюнайзена:

$$P = A_1 + A_2 + A_3 + (B_0 + B_1) \text{ при } \xi = [(\rho / \rho_0) - 1] > 0 \text{ (сжатие)}, \quad (3.3)$$

$$P = T_1 + T_2 + B_0 \rho_0 E_T, \text{ при } \xi < 0 \text{ (растяжение)}, \quad (3.4)$$

где  $P$  – давление;  $A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, T_1, T_2$  – постоянные материала;  $\rho, \rho_0$  - текущая и начальная массовая плотность соответственно;  $E_T$  – тепловая составляющая удельной внутренней энергии.

Для сплава ВК6 принималось допущение о совпадении модулей объемного сжатия в условия сжатия и растяжения  $T_1 = A_1$ .

Параметры  $B_0$  и  $B_1$  определяют изменение параметра Грюнайзена  $\Gamma$  от степени сжатия:  $\Gamma = B_0 / (1 + \xi), B_1 = 0$ .

Девииатор напряжений определяется из решения уравнения [258]:

$$\frac{dS_{ij}}{dt} = 2\mu(\dot{\varepsilon}_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\dot{\varepsilon}_{kk}), \quad (3.5)$$

где  $\mu$  - модуль сдвига;  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  - компоненты тензора скорости деформации;  $\frac{dS_{ij}}{dt}$  - производная Яуманна для компонент тензора девииатора напряжения в конденсированной фазе материальной частицы.

В качестве критерия пластичности использовано условие Мизеса

$$\sigma_{eq} \leq \sigma_S, \quad (3.6)$$

$$\text{где } \sigma_{eq} = [\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}]^{1/2}; \sigma_S = [A + B\varepsilon_P^n][1 - \frac{T - T_r}{T_m - T_r}]^m$$

где  $A, B, n, m$  – постоянные материала;  $T_r, T_m$  – комнатная температура и температура плавления.

$$\dot{\varepsilon}_{eq} = (\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij})^{1/2}; \dot{\varepsilon}_0 = 1c^{-1}; \varepsilon_P = \int_0^t \dot{\varepsilon}_{eq}^P dt$$

В качестве примера, исследуем систему композиционного твердого сплава

марки ВК6, в состав которого входят карбиды вольфрама  $WC$  и кобальт  $Co$  в качестве связующего. Экспериментальные данные о механических характеристиках сплавов  $WC - Co$  широко представлены в литературе [38, 103, 113, 116, 231, 234, 239, 251, 254]. Анализ данных свидетельствует о том, что в сплавах  $WC - Co$  практически отсутствует зависимость прочности от давления. При этом степень деформации до разрушения при сжатии у сплава ВК6 составляет  $\varepsilon_f \sim 4...5\%$ . Критерий локального разрушения частицы матрицы имеет вид  $D = 1$ .

Для твердого композиционного материала ВК6 исходные значения параметров модели следующие:

$$\begin{aligned}A_1 &= 3.62E+8 \text{ кПа}, A_2 = 6.94E+8 \text{ кПа}, A_3 = 0, \\B_0 &= 1, B_1 = 0, T_1 = 3.62 \text{ E}+8 \text{ кПа}, T_2 = 0, \\T &= 300 \text{ К}, T_r = 300 \text{ К}, T_m = 1.768 \text{ E}+3 \text{ К}, \\ \mu &= 2.8E+8 \text{ кПа}, A = 3E+6(\text{кПа}), B = 89E+6(\text{кПа}), \\n &= 0.65, m = 1, \varepsilon_f = 0.04.\end{aligned}$$

Начальные условия были выбраны в предположении об отсутствии во всей исходной области внутренних напряжений и равномерном распределении температуры.

Моделирование проводилось для граничных условий, имитирующих взаимодействие обрабатываемой пластины с алмазным кругом.

Решение вычислительной модели выполнено на примере твердого сплава ВК6 с помощью конечно-разностного метода, реализованного в решателе программного комплекса *AUTODYN<sup>TM</sup> / ANSYS Workbench -13*.

Для этого была построена расчетная область соответствующая обрабатываемой пластине из сплава (Рисунок 3.25).

Габаритные размеры пластины в расчетной модели были приняты равными: высота  $c = 3$  мм, ширина пластины  $a = 21$ мм, длина пластины  $b = 12$ мм, угол заострения  $\beta = 50^\circ$ .

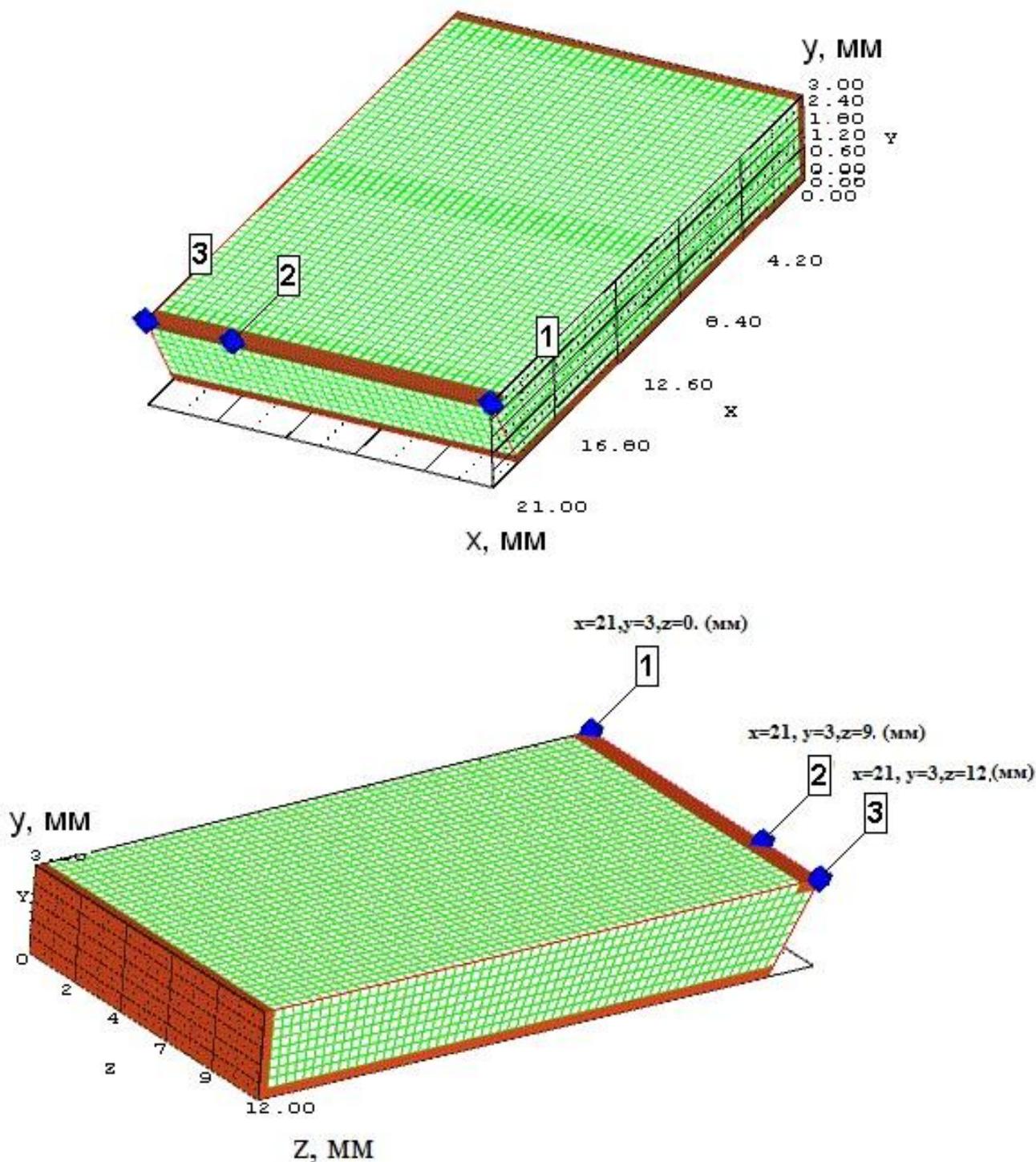


Рисунок 3.25. Расчетная модель затачиваемой твердосплавной пластины

На Рисунке 3.25 показаны граничные условия на поверхностях жесткого закрепления: нижняя базирующая и свободная торцевая (темный фон на Рисунке 3.25). На боковых поверхностях были заданы граничные условия, соответствующие свободной от нагрузки поверхности. На передней поверхности выделена об-

ласть, соответствующая участку  $d$  вдоль режущей кромки инструмента (см. Рисунок 3.24), шириной 1 мм, где были заданы смешанные граничные условия. Кинематические граничные условия имитировали сдвиг поверхностного слоя в результате воздействия алмазного круга на поверхность пластины, а силовые имитировали действие распределенной по поверхности прижимающей силы, возникающие в области контакта.

Выбор шага пространственной дискретизации расчетной области обеспечивал сходимость численного решения задачи. Шаг интегрирования по времени определялся из условия Куранта.

Для оценки закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния и повреждения в зоне шлифования в расчетах были зарегистрированы изменения параметров состояния и повреждения во времени в лагранжевых точках 1, 2, 3 (см. Рисунок 3.25). Расчетные значения интенсивности сдвиговых напряжений, возникающих при шлифовании с заданными комбинациями распределенного по обрабатываемой поверхности прижимающего усилия резания (10 Н, 100 Н, 300 Н), линейной скорости сдвига материала с обрабатываемой поверхности (15 м/с, 33 м/с, 45 м/с), температуры (430 °С, 1000 °С) в зоне шлифования.

*Оценка напряженно-деформированного состояния в затачиваемой пластине при скорости сдвига 15 м/с*

При шлифовании твердосплавной пластины, со значением скорости линейного сдвига 15 м/с, усилиями 10 Н, 100Н, и 300 Н и температурой в зоне обработке 430°С, на модели обрабатываемой пластины наблюдается равномерное распределение давлений в обрабатываемой пластине (Рисунки 3.26...3.28). С увеличением усилий резания давления возрастают и концентрируются вблизи режущего лезвия. На Рисунках 3.26...3.28 также показана эволюция изменения во времени значений давления для точек 1, 2, 3 в обрабатываемом слое твердосплавной пластины.

Интенсивность распределения напряжений в пластине и расчетные значения зависимости сдвиговых напряжений от времени обработки для точек 1, 2, 3 представлены на Рисунках 3.29....3.31.

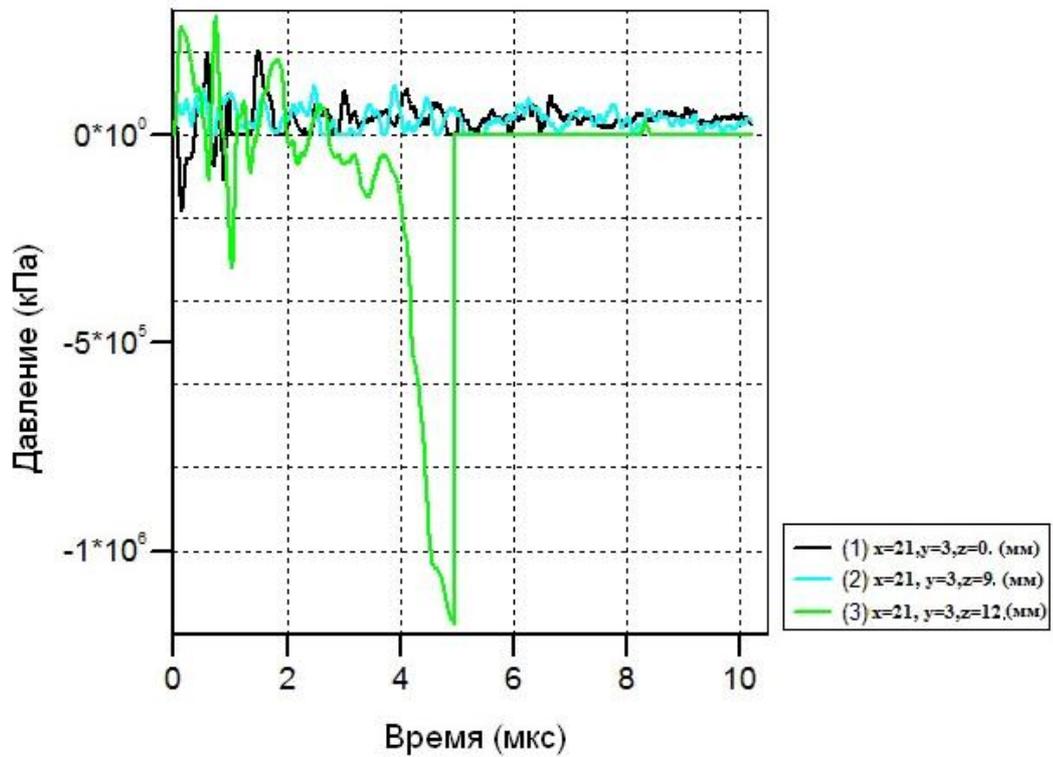
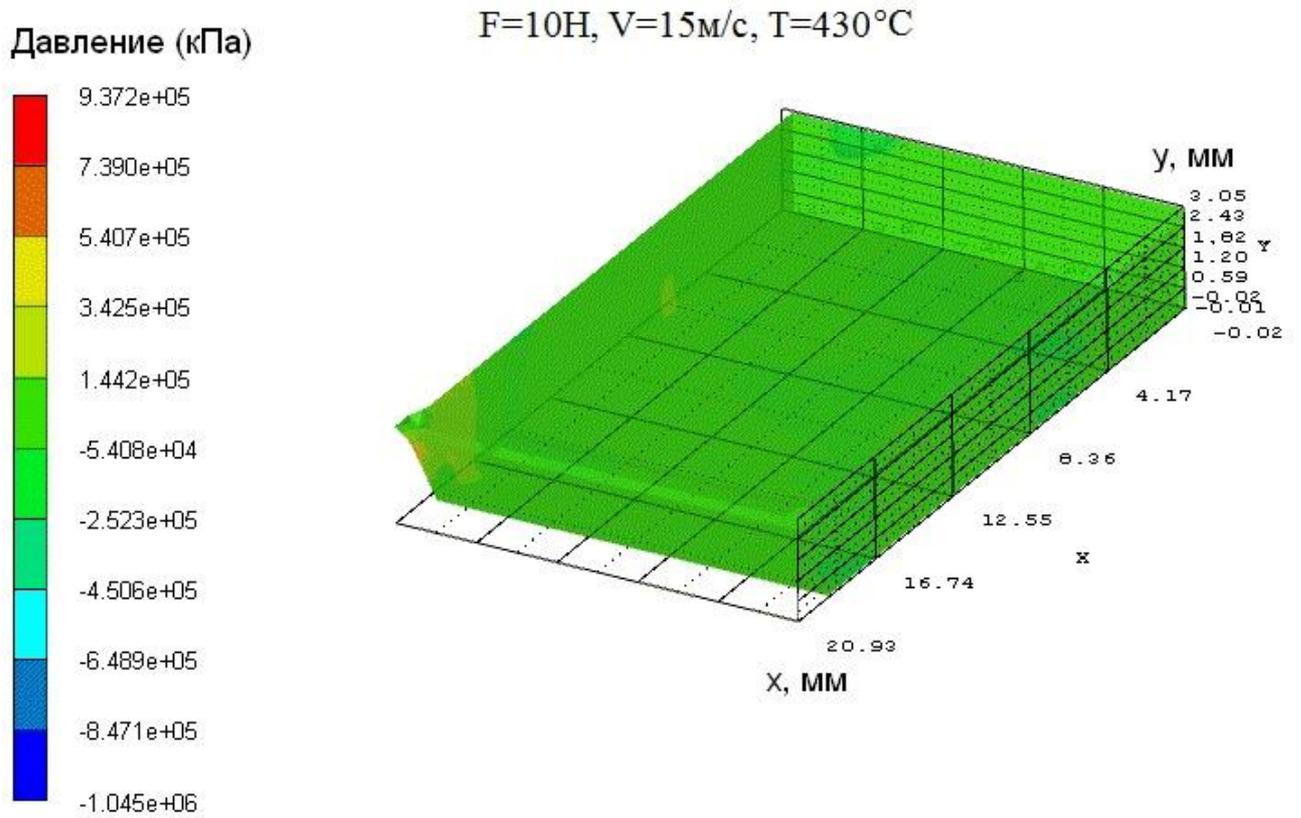


Рисунок 3.26. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 15 \text{ м/с}, T = 430^{\circ}C, F = 10 H$$

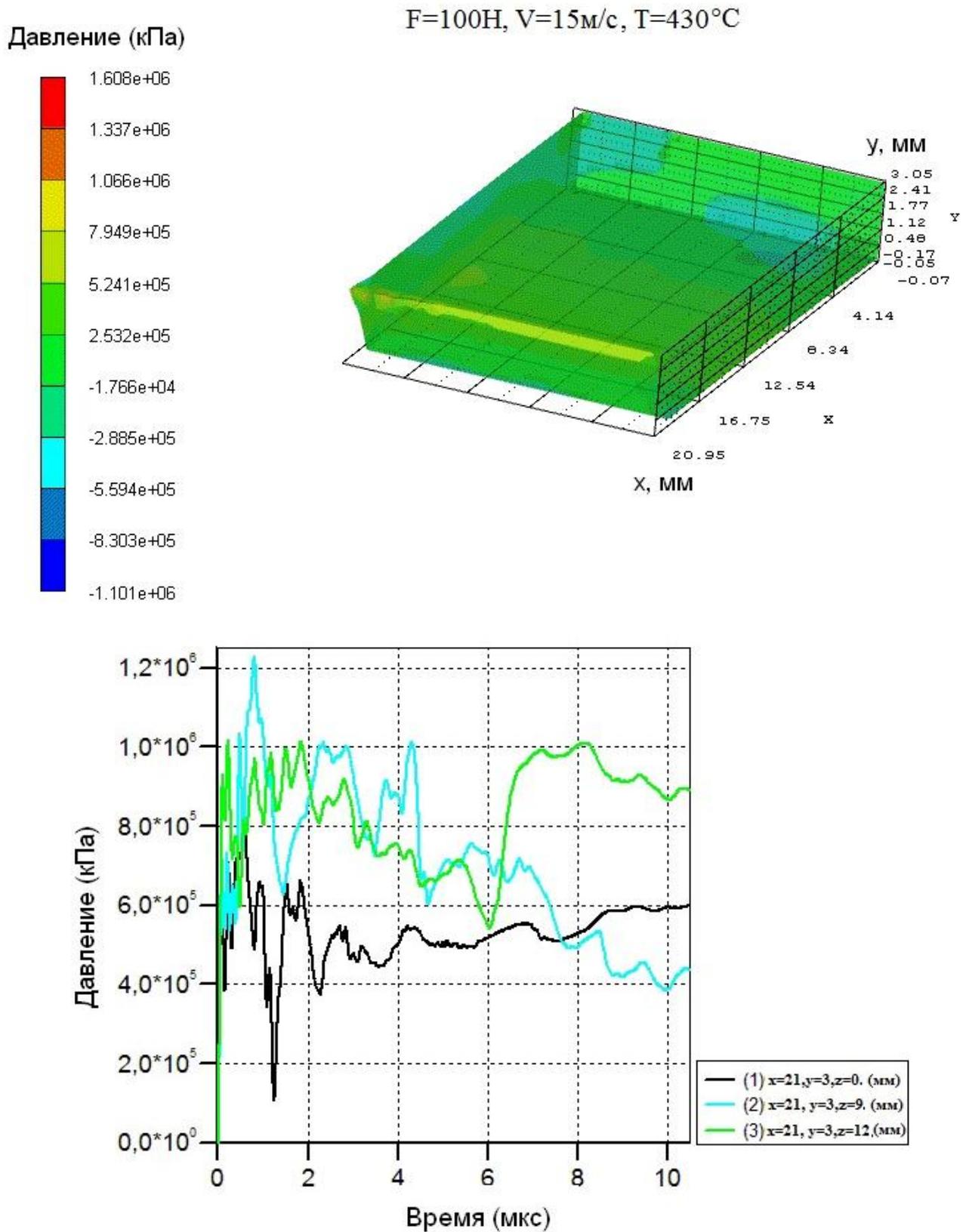
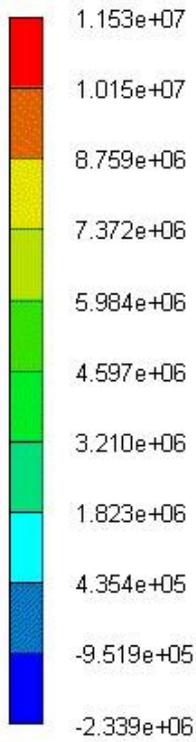


Рисунок 3.27. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 15 \text{ м/с}, T = 430 \text{ }^\circ\text{C}, F = 100 \text{ Н}$$

Давление (кПа)



$F=300\text{H}$ ,  $V=15\text{м/с}$ ,  $T=430^\circ\text{C}$

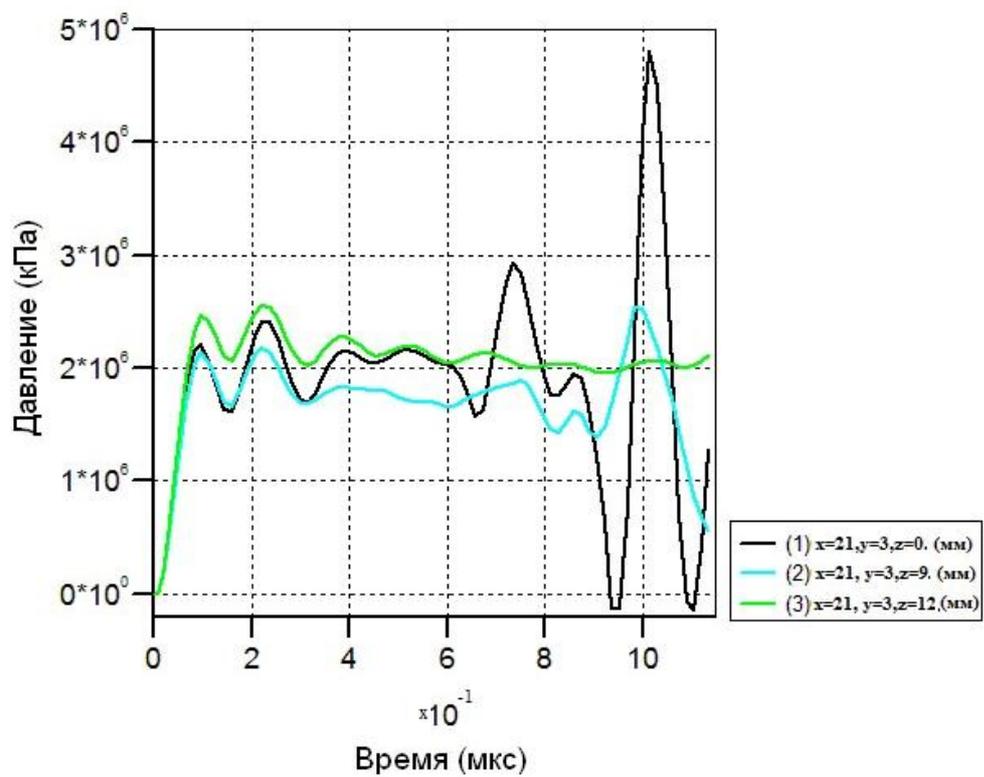
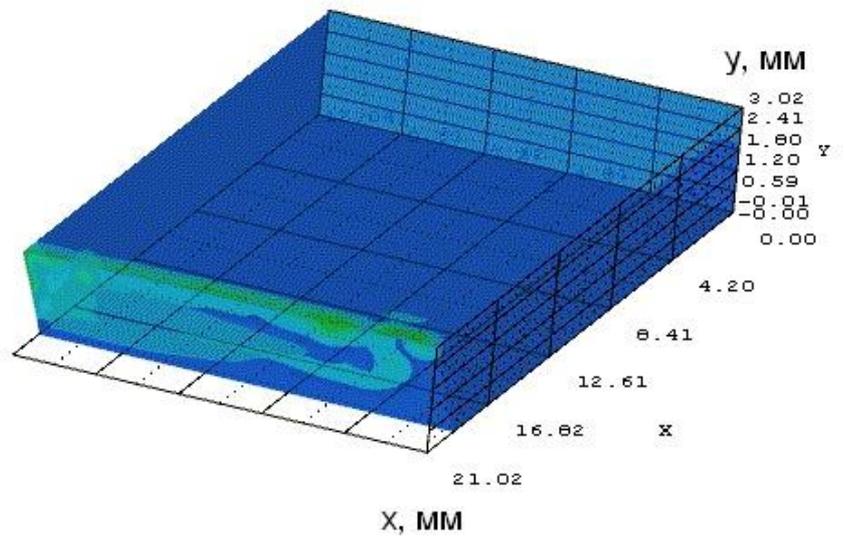


Рисунок 3.28. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 15 \text{ м/с}, T = 430 \text{ }^\circ\text{C}, F = 300 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=10\text{H}$ ,  $V=15\text{м/с}$ ,  $T=430^\circ\text{C}$

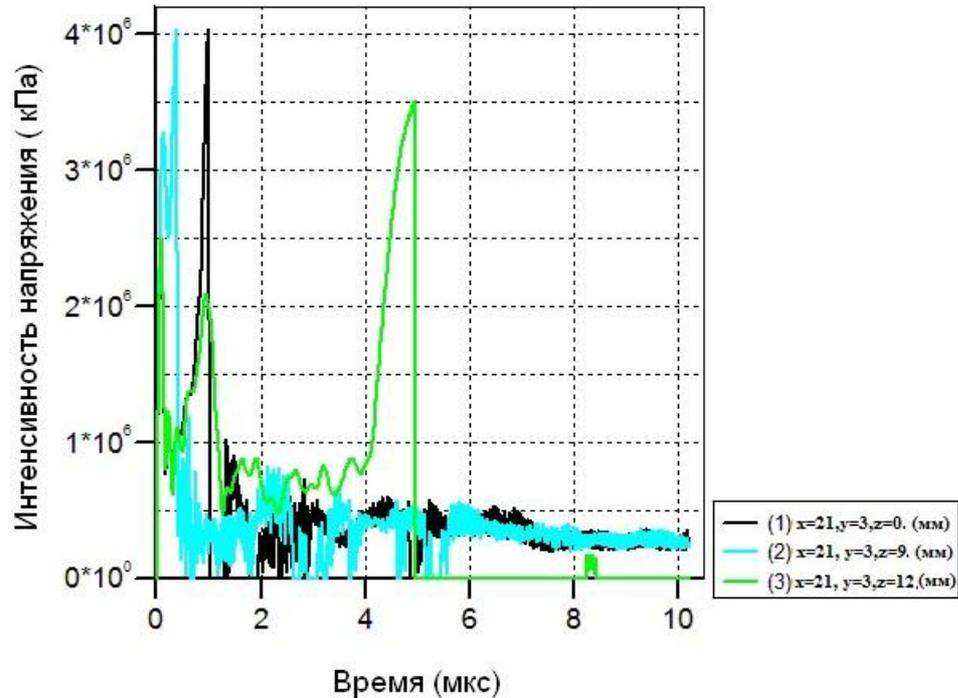
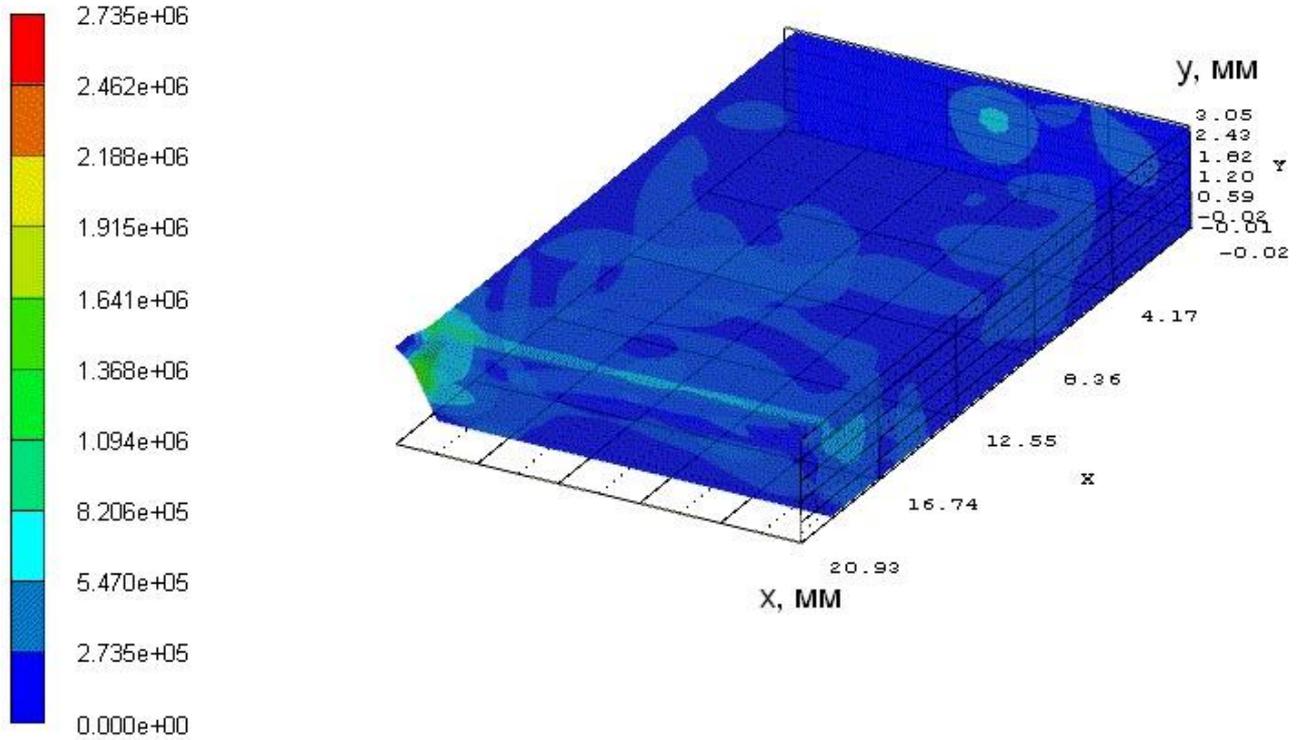


Рисунок 3.29. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 15 \text{ м/с}, T = 430^\circ\text{C}, F = 10 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=100H, V=15m/c, T=430^{\circ}C$

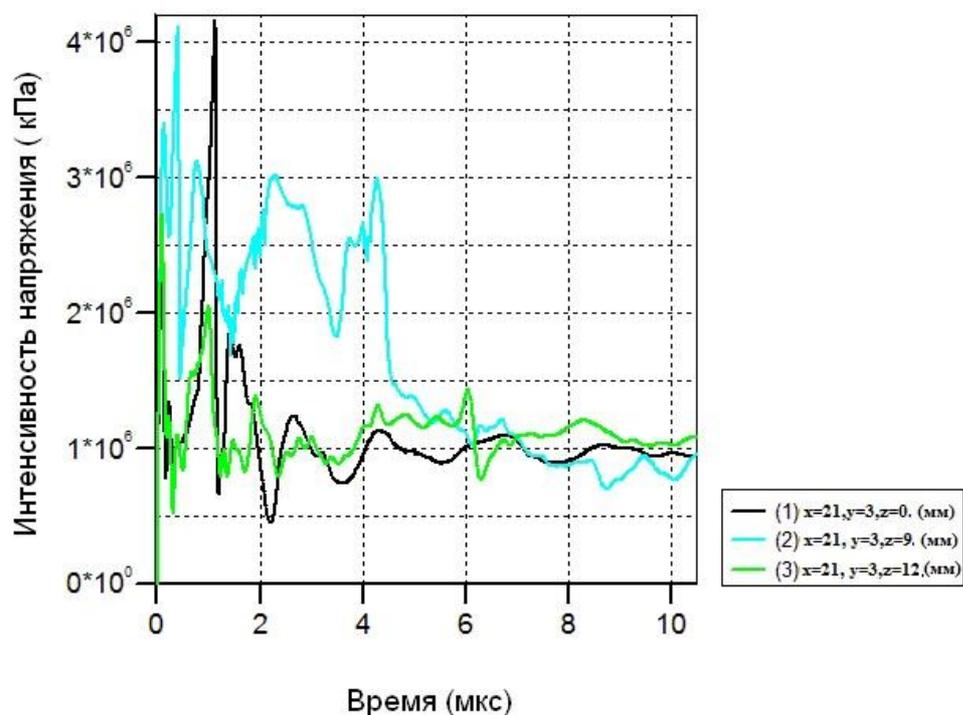
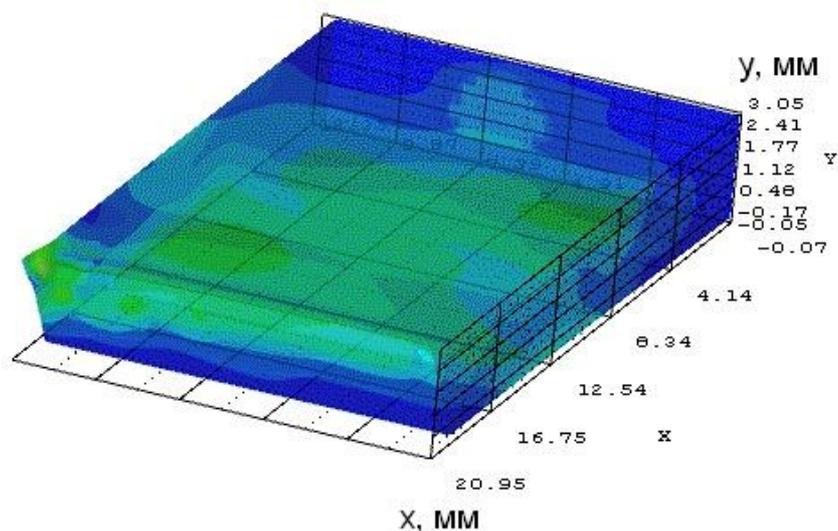
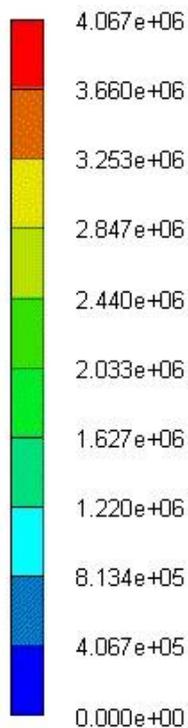


Рисунок 3.30. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 15 \text{ м/с}, T = 430 \text{ }^{\circ}\text{C}, F = 100 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=300\text{H}$ ,  $V=15\text{м/с}$ ,  $T=430^\circ\text{C}$

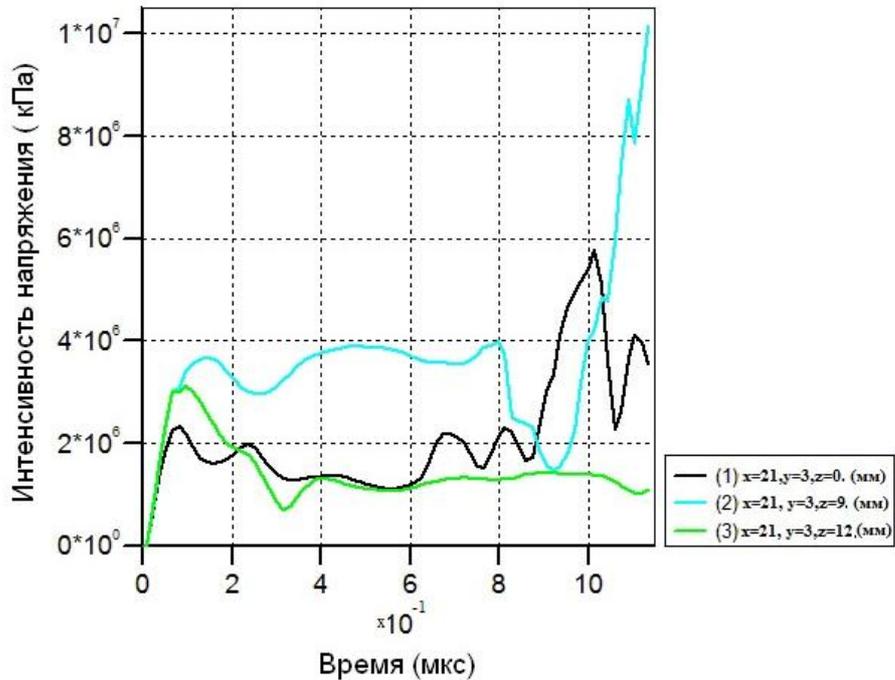
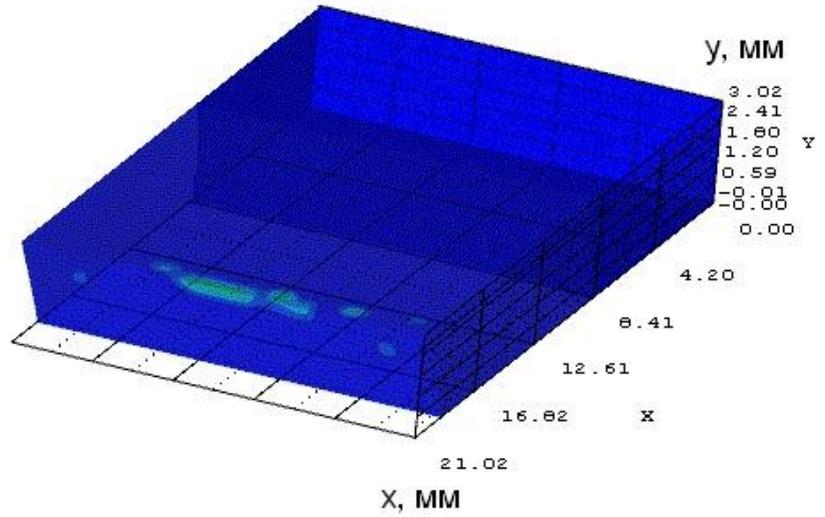
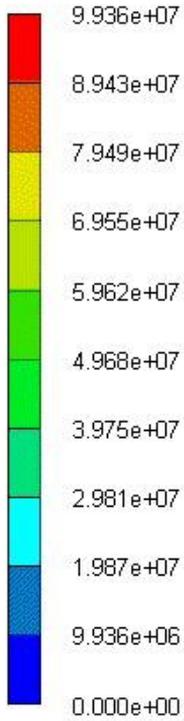


Рисунок 3.31. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 15 \text{ м/с}, T = 430 \text{ }^\circ\text{C}, F = 300 \text{ Н}$$

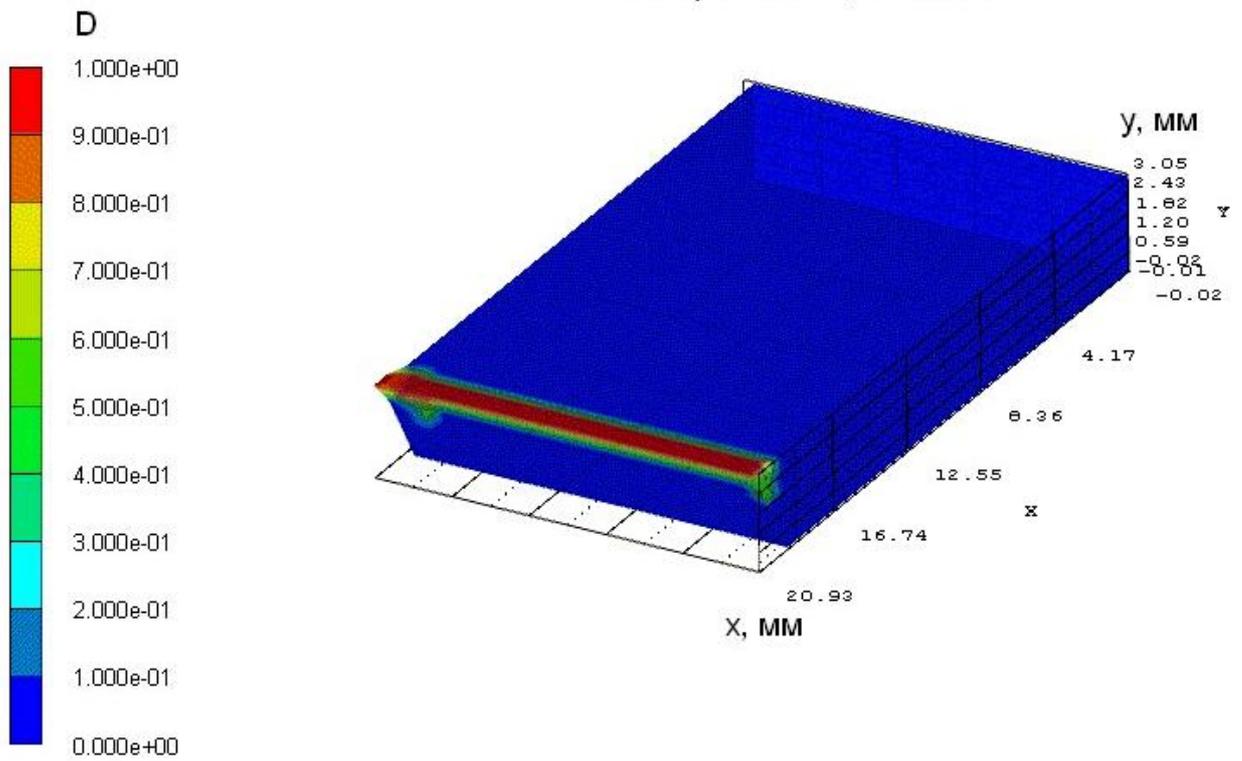


Рисунок 3.32. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 15 \text{ м/с}$ ,  $T = 430 \text{ °C}$ ,  $F = 10 \text{ Н}$ )

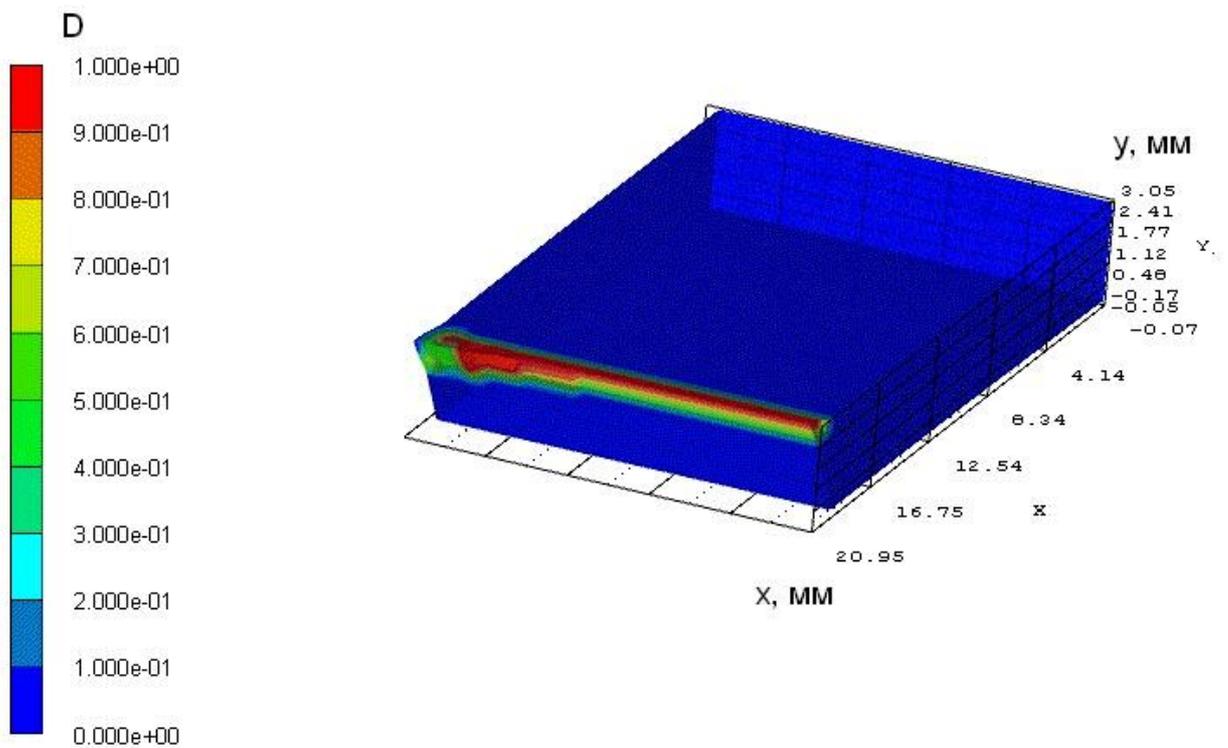


Рисунок 3.33. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 15 \text{ м/с}$ ,  $T = 430 \text{ °C}$ ,  $F = 100 \text{ Н}$ )

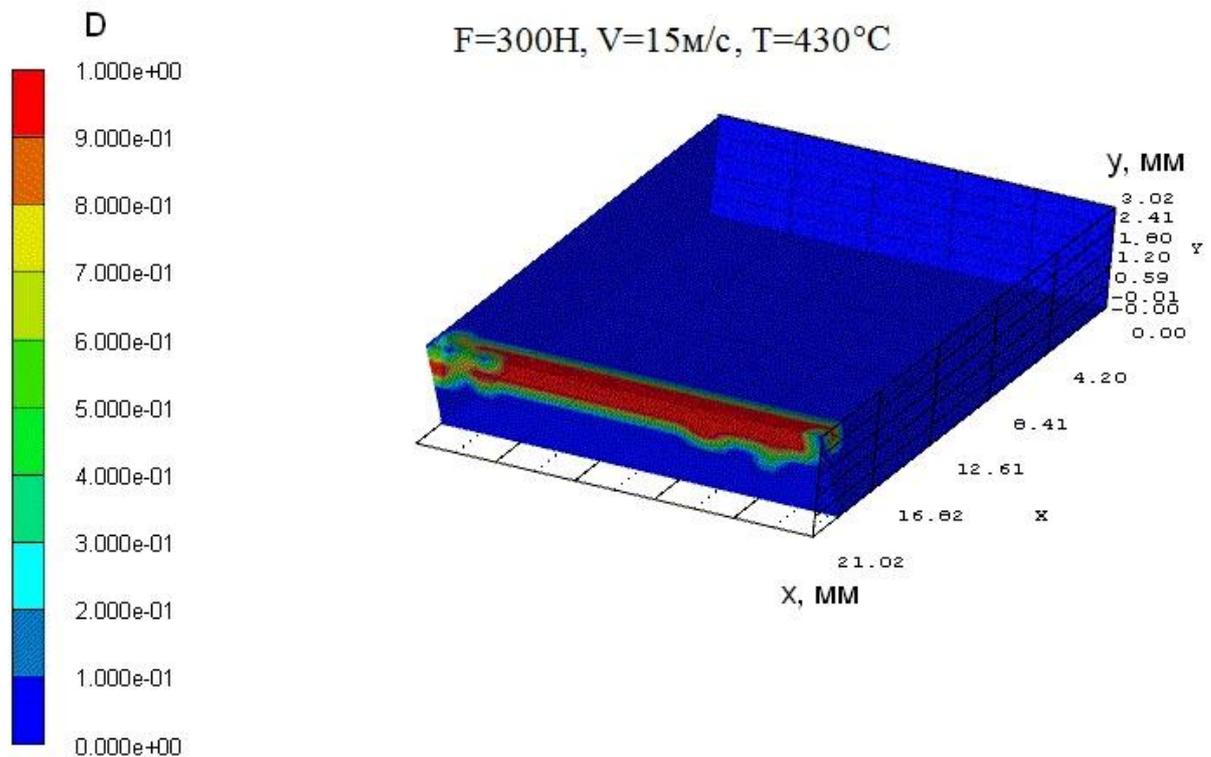


Рисунок 3.34. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 15 \text{ м/с}$ ,  $T = 430 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F = 300 \text{ Н}$ )

Наибольший интерес, с точки зрения качества подготовки режущего лезвия и поверхностей инструмента к работе, имеет распределение значений параметра поврежденности вблизи режущего лезвия. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины представлено на Рисунках 3.32...3.34.

Анализ результатов моделирования позволил выявить, что характер распределения повреждений по ширине и глубине зоны обработки зависит от скорости шлифования и величины усилия резания. При снятии верхнего слоя материала возникающие сдвиговые напряжения возвращаются в состояние равновесия в результате развития повреждений. При увеличении усилия со 100 Н до 300 Н время затухания осцилляций уменьшается на порядок. В рамках использованной модели, этот эффект обусловлен нелинейным увеличением скорости роста параметра поврежденности поверхностного слоя композита с увеличением давления.

Результаты исследования модели в тех же условиях при увеличении температуры в зоне резания до 1000 °С представлены на Рисунках 3.35...3.43.

$F=10\text{H}$ ,  $V=15\text{м/с}$ ,  $T=1000^\circ\text{C}$

Давление (кПа)

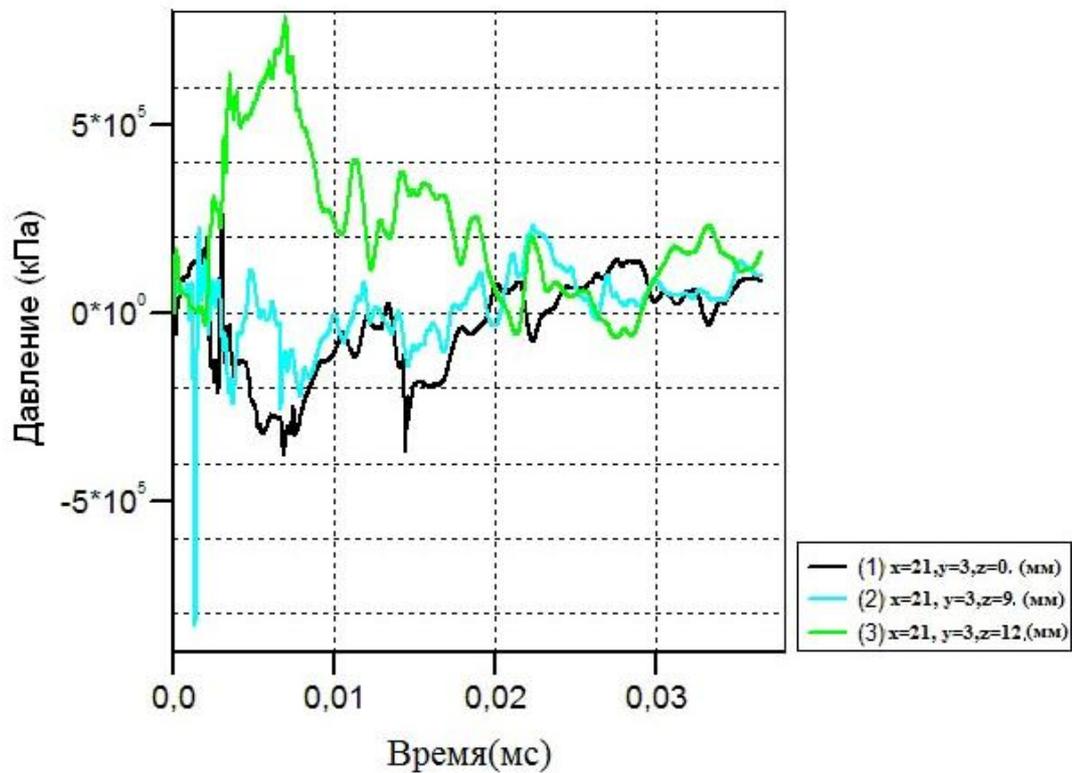
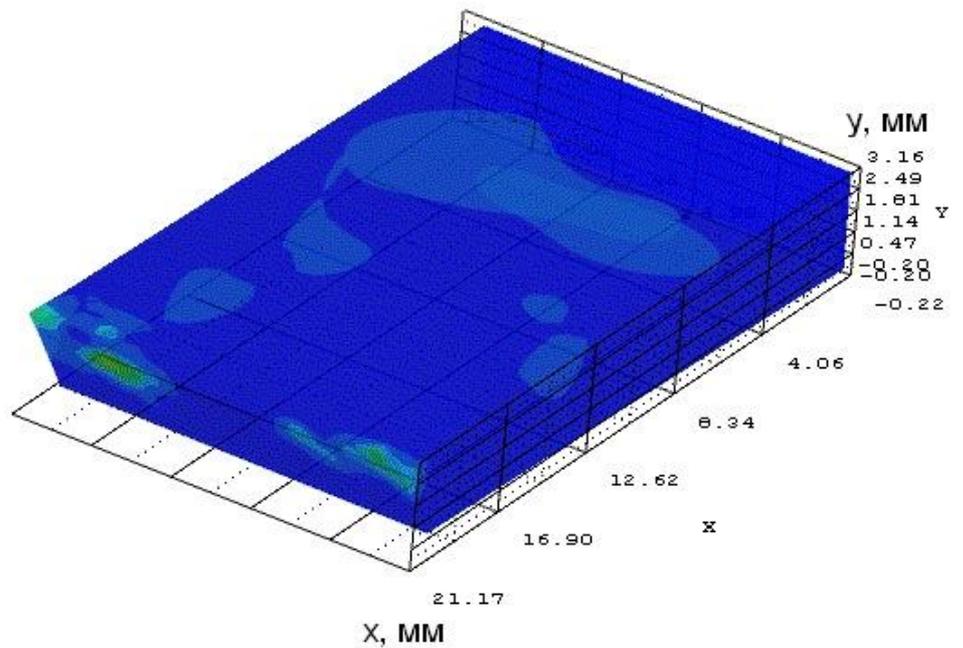
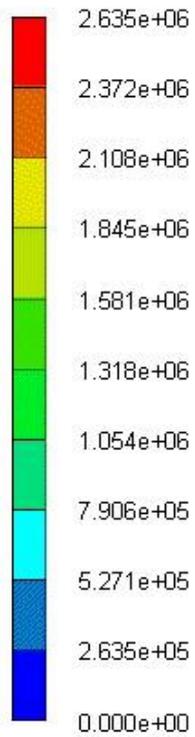


Рисунок 3.35. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 15 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}, F = 10 \text{ Н}$$

Давление (кПа)

$F=100\text{H}$ ,  $V=15\text{м/с}$ ,  $T=1000^\circ\text{C}$

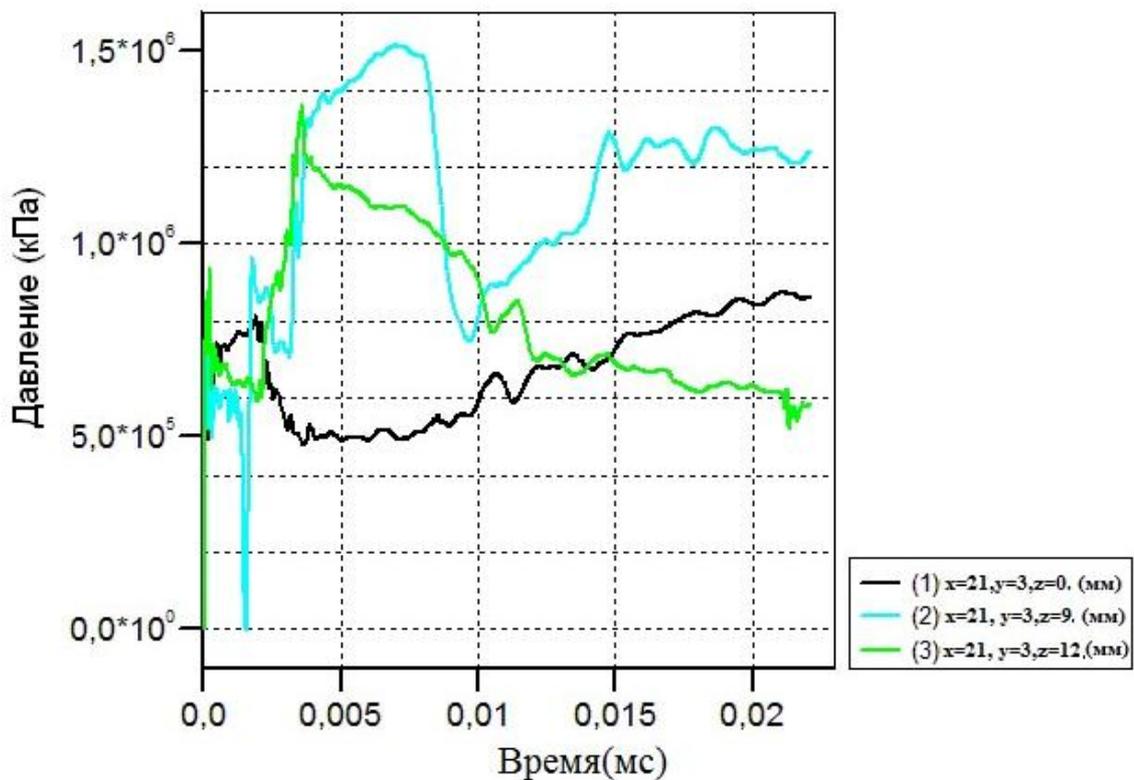
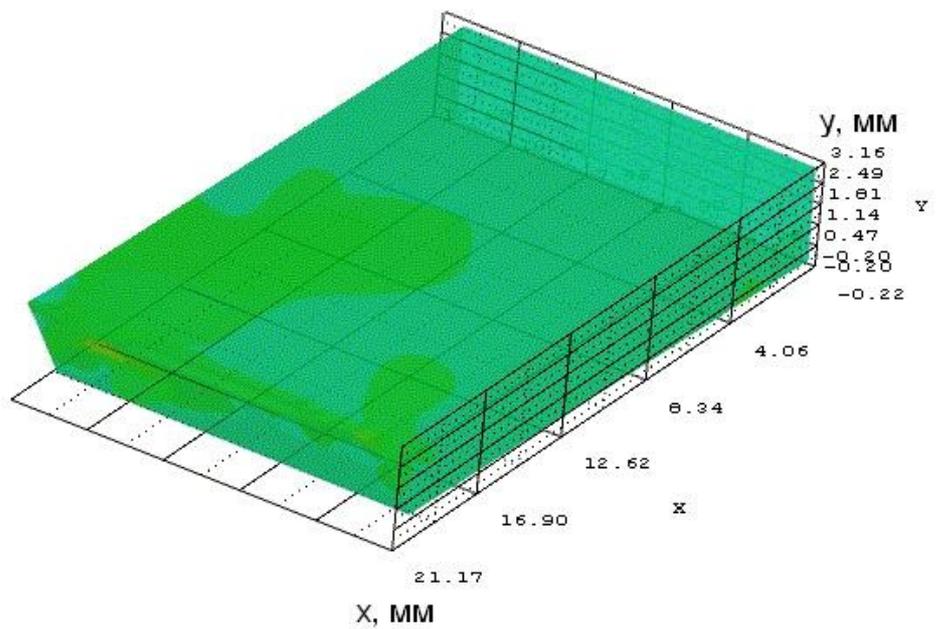
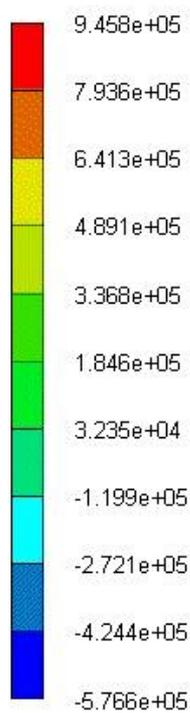


Рисунок 3.36. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 15 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}, F = 100 \text{ Н}$$

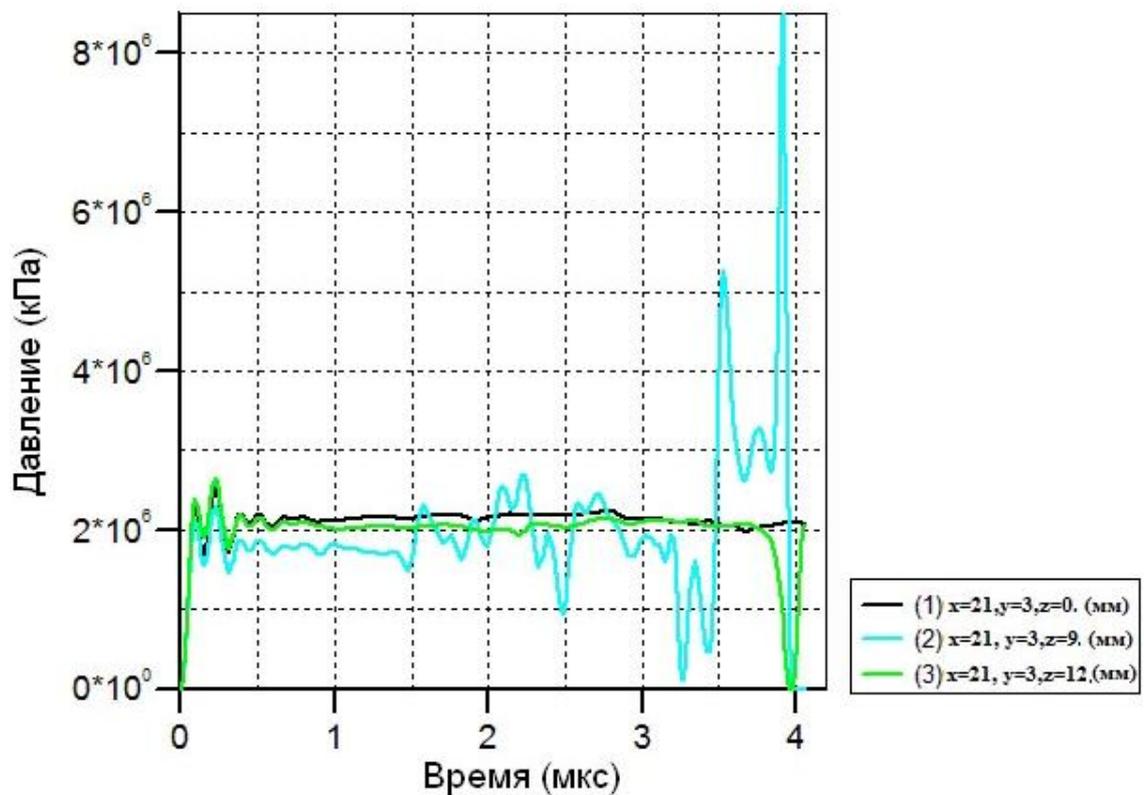
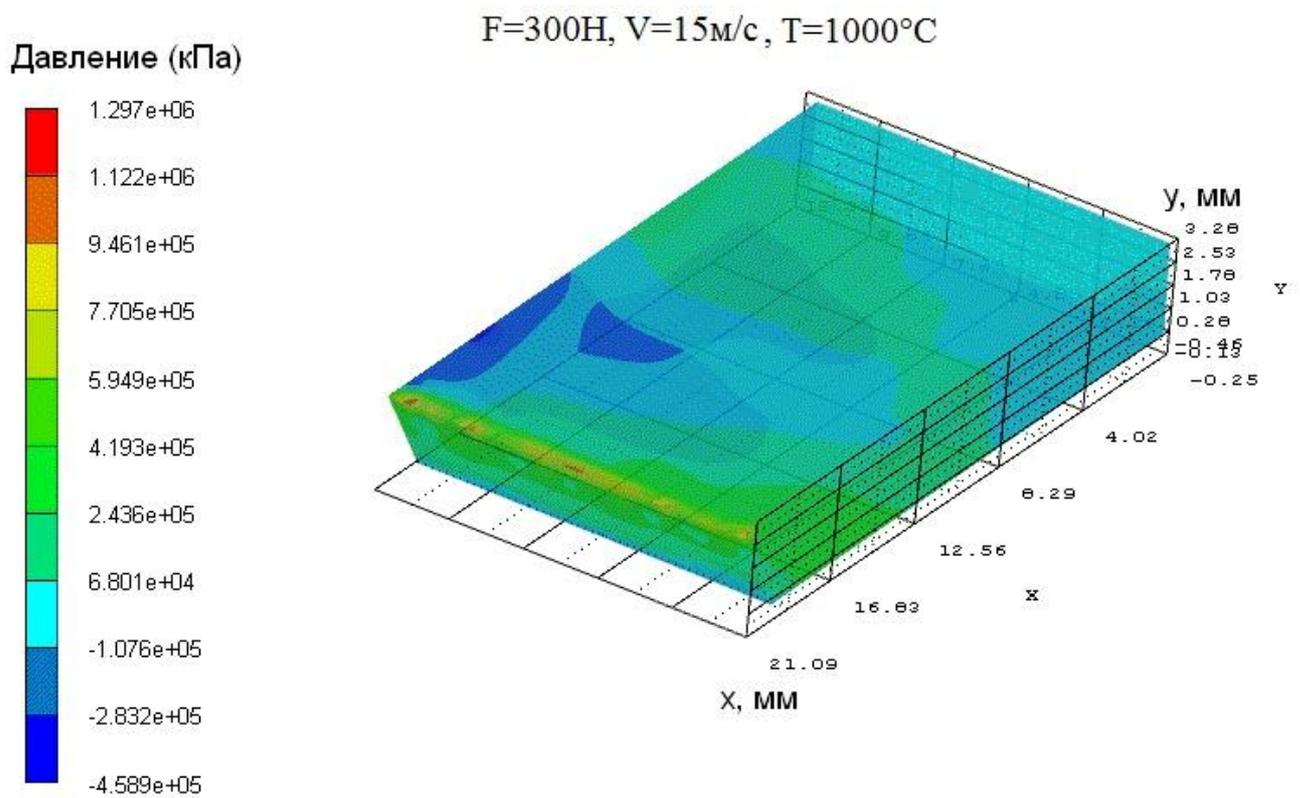


Рисунок 3.37. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 15 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}, F = 300 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=10\text{H}$ ,  $V=15\text{м/с}$ ,  $T=1000^\circ\text{C}$

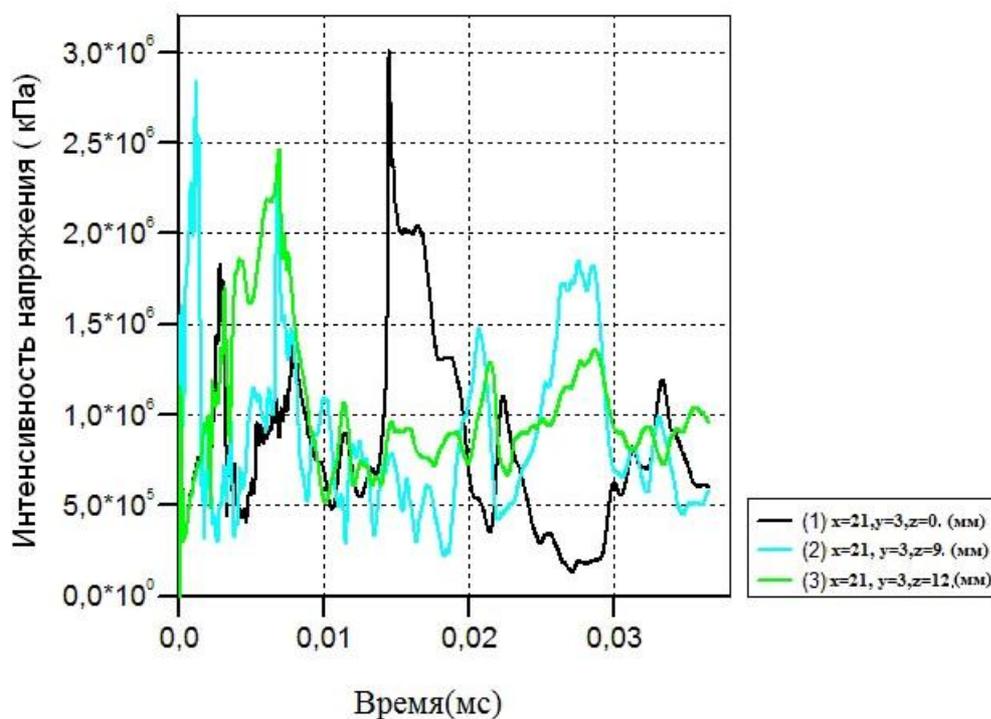
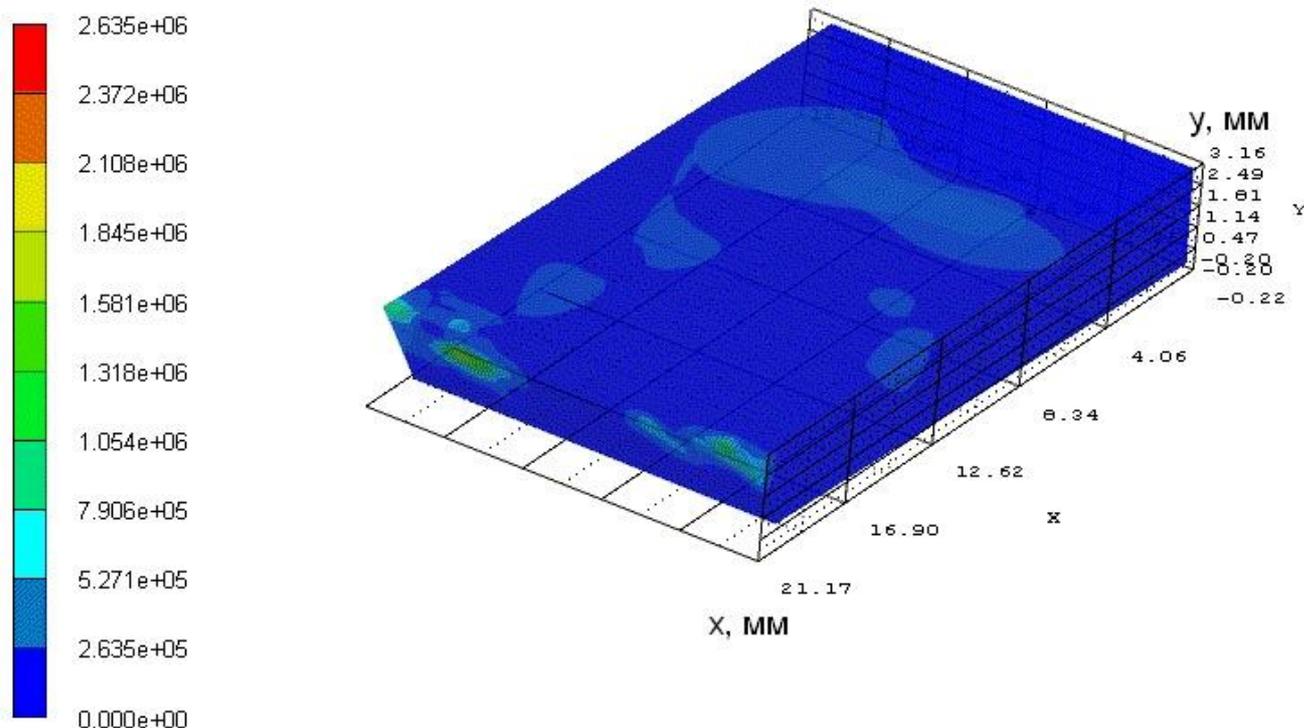


Рисунок 3.38. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 15 \text{ м/с}, T = 1000^\circ\text{C}, F = 10 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=100H, V=15m/c, T=1000^{\circ}C$

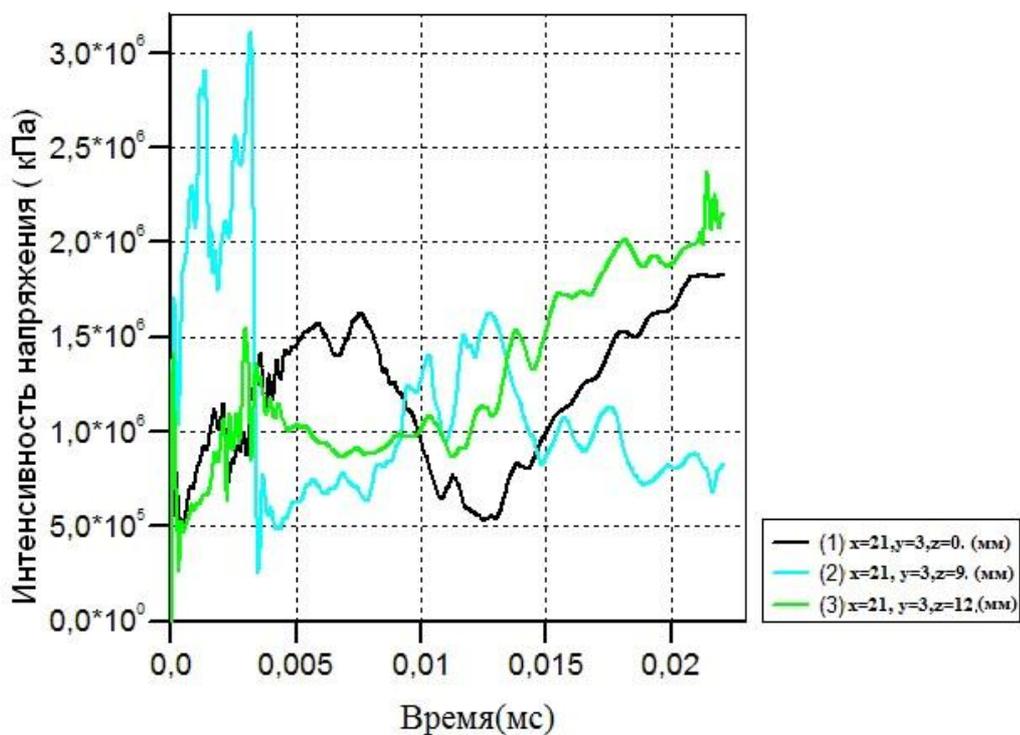
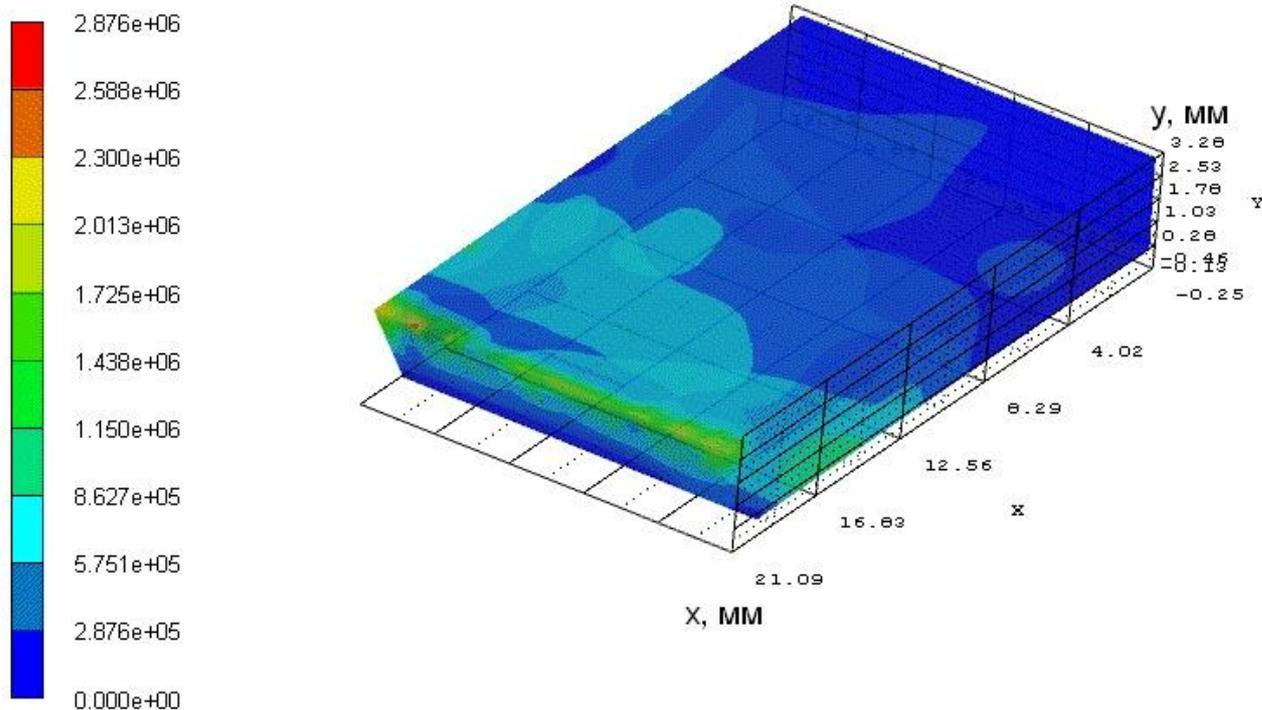


Рисунок 3.39. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 15 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}, F = 100 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=300H, V=15m/c, T=1000^{\circ}C$

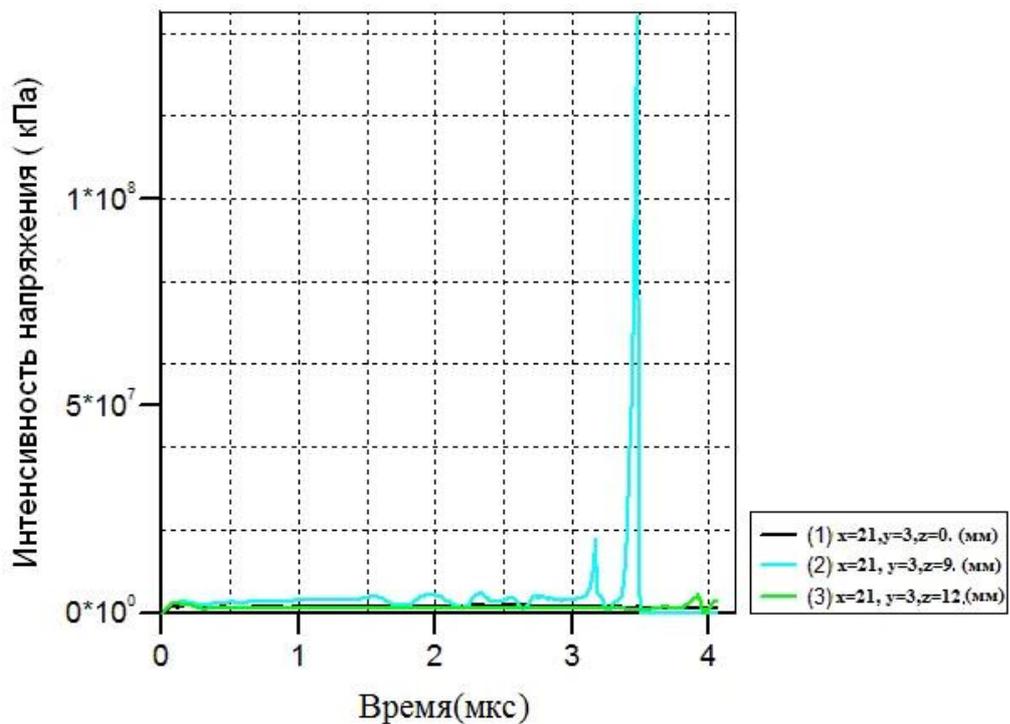
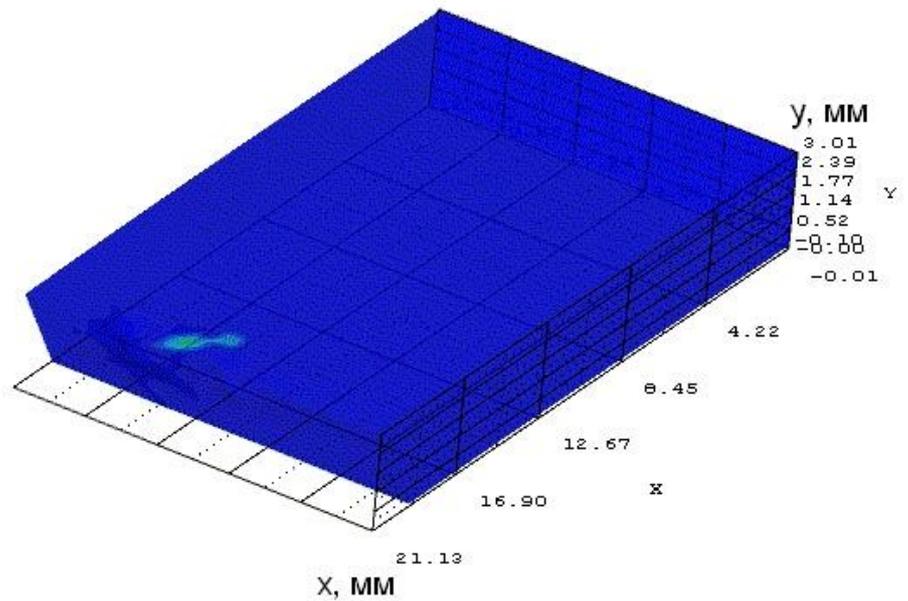
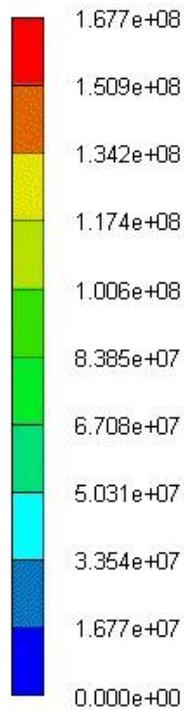


Рисунок 3.40. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 15 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^{\circ}C, F = 300 \text{ Н}$$

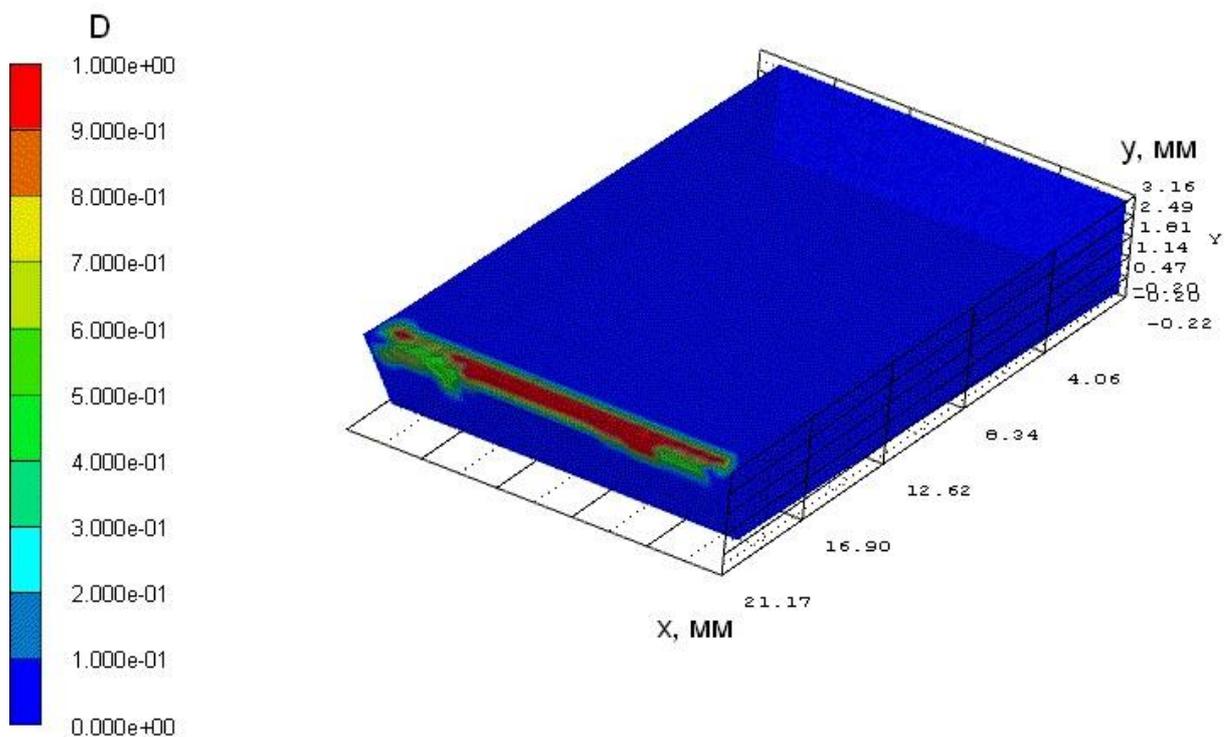


Рисунок 3.41. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 15 \text{ м/с}$ ,  $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F = 10 \text{ Н}$ )

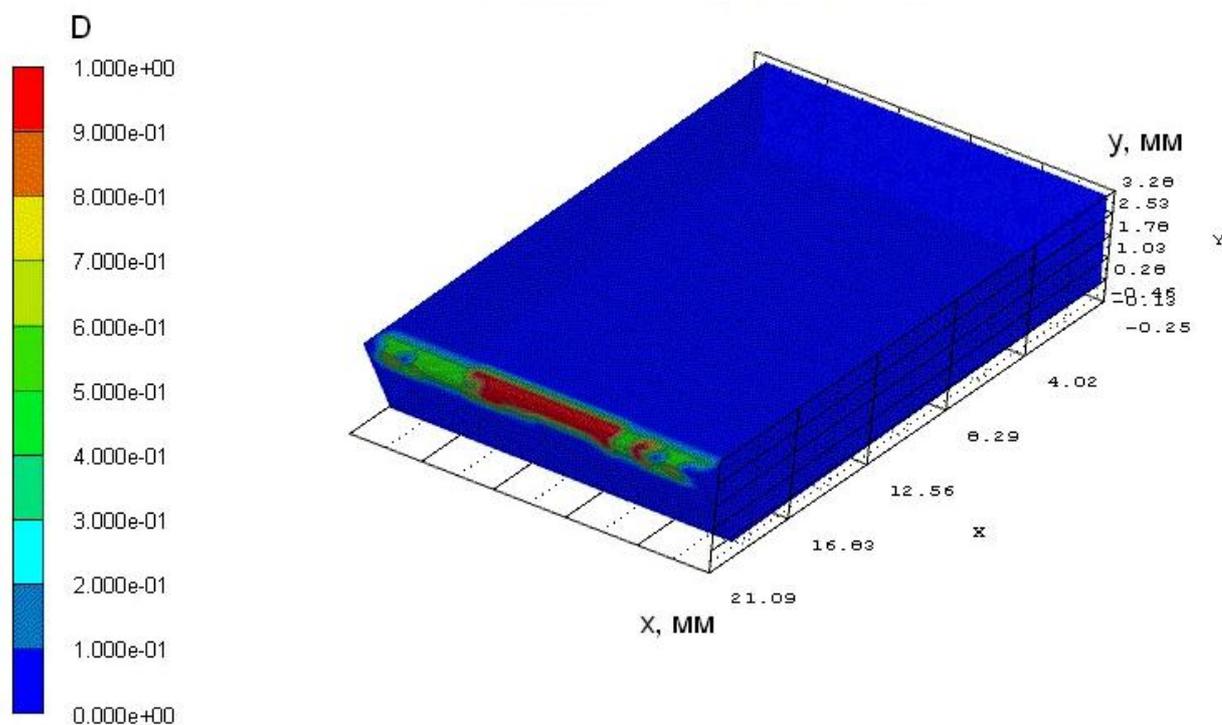


Рисунок 3.42. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 15 \text{ м/с}$ ,  $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F = 100 \text{ Н}$ )

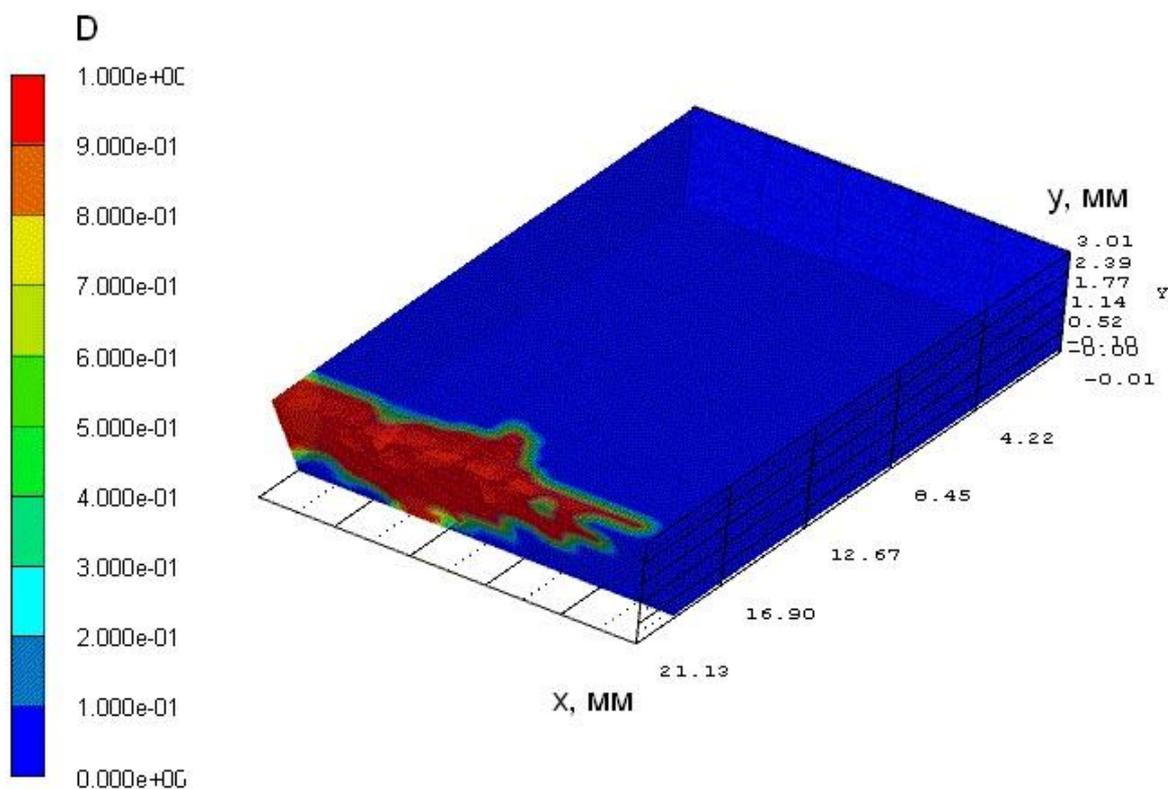


Рисунок 3.43. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 15$  м/с,  $T = 1000$  °С,  $F = 300$  Н)

Анализируя результаты численного моделирования, определили, что осцилляции давления, как и осцилляции интенсивности напряжений обусловлены релаксационными процессами при развитии повреждений образованием микротрещин.

Полученные результаты указывают, что в результате шлифования поверхности пластины в критических условиях материал может повреждаться на глубину, превышающую толщину удаляемого слоя. Размеры области повреждения при температуре  $1000$  °С может превышать характерные размеры обрабатываемого слоя.

Критическими, с точки зрения начала интенсивного развития микроповреждений в приповерхностных слоях и зонах, находящихся вблизи области обработки, являются режимы шлифования со скоростью линейного сдвига в пределах  $15$  м/с с максимальными усилиями около  $300$  Н.

*Оценка напряженно-деформированного состояния в затачиваемой пластине при скорости сдвига 33 м/с*

Увеличение скорости резания ведет к увеличению интенсивности снятия материала абразивными зернами, изменяются и условия формирования напряженно-деформированного состояния в затачиваемой твердосплавной пластине. При повышении скорости круга наблюдается рост температуры в результате увеличения работы возникающих в обрабатываемом слое напряжений на развивающихся пластических деформациях.

Кроме того, с повышением сил резания объем удаляемого с поверхности разогретого материала увеличивается, вследствие чего может происходить нарушение условий передачи тепла в обрабатываемую пластину и, как результат, стабилизация или даже снижение температуры относительно режима с более низкой скоростью.

Так при шлифовании со значением скорости линейного сдвига равной 33 м/с и усилиями 10 Н, 100Н, и 300 Н и температурой в зоне обработки 430°С, на модели обрабатываемой пластины наблюдается возрастание давления в теле пластины и нестабильность изменения во времени значений давления для точек 1, 2, 3 в обрабатываемом слое твердосплавной пластины (Рисунки 3.44...3.46).

Распределение интенсивности напряжений в теле пластины и ее зависимость от времени также отличны от аналогичных значений при меньшей скорости (Рисунки 3.47...3.49).

Распределение параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины при скорости сдвига 33 м/с и температуре в затачиваемой пластине 430 °С представлено на Рисунках 3.50...3.52.

Результаты исследования модели в тех же условиях при увеличении температуры в зоне резания до 1000 °С представлены на Рисунках 3.53...3.61.

Анализируя результаты исследований, следует отметить, что при возрастании сил резания до 300 Н, в локальных зонах пластины, удаленных от поверхности обработки на несколько мм могут возникать отрицательные давления. В указанных локальных объемах могут действовать объемные растягивающие напря-

жения. Их возникновение связано с условиями нагружения и закрепления пластины, имеющей угол заострения.

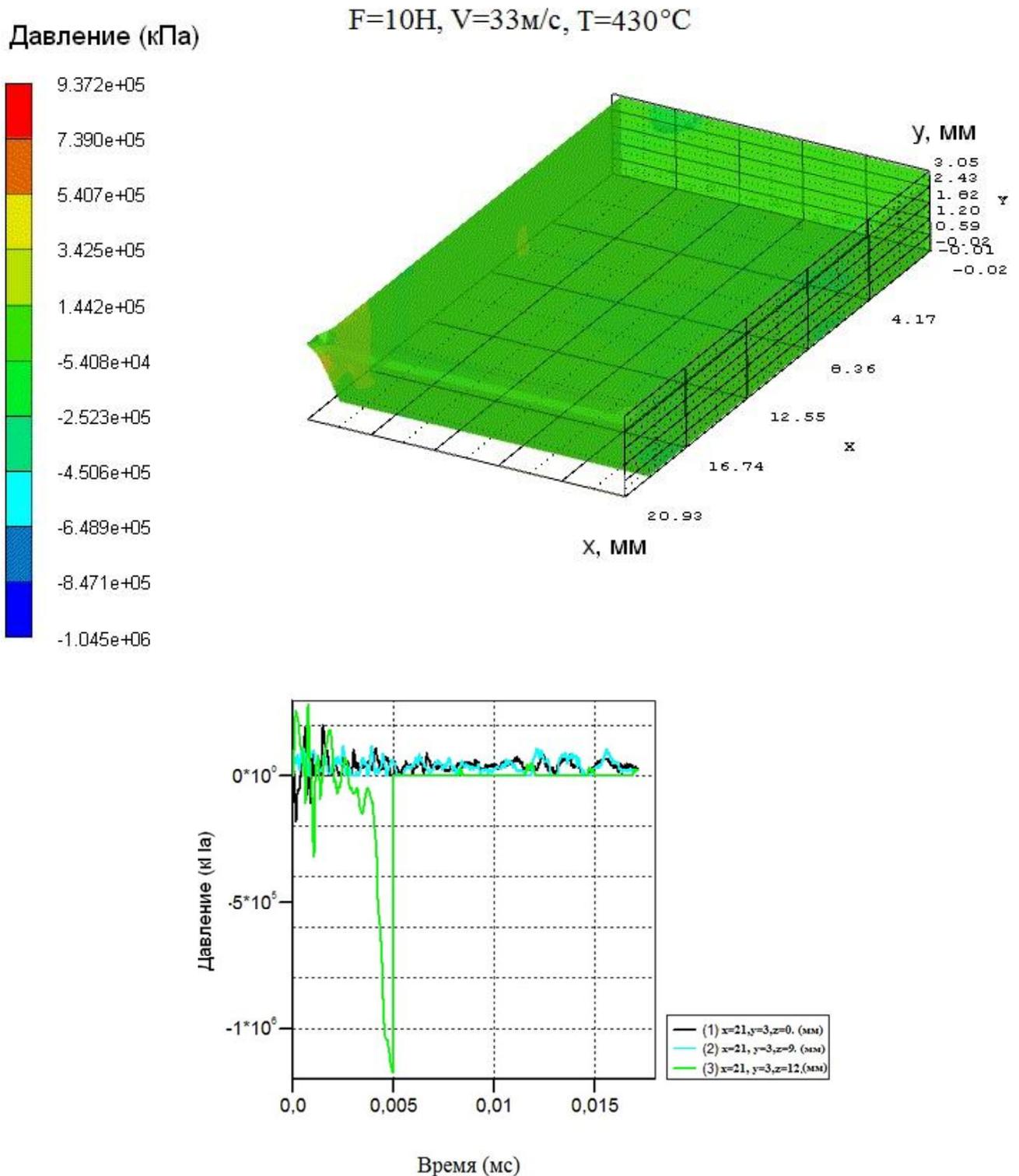


Рисунок 3.44. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 33 \text{ м/с}, T = 430 \text{ }^\circ\text{C}, F = 10 \text{ H}$$

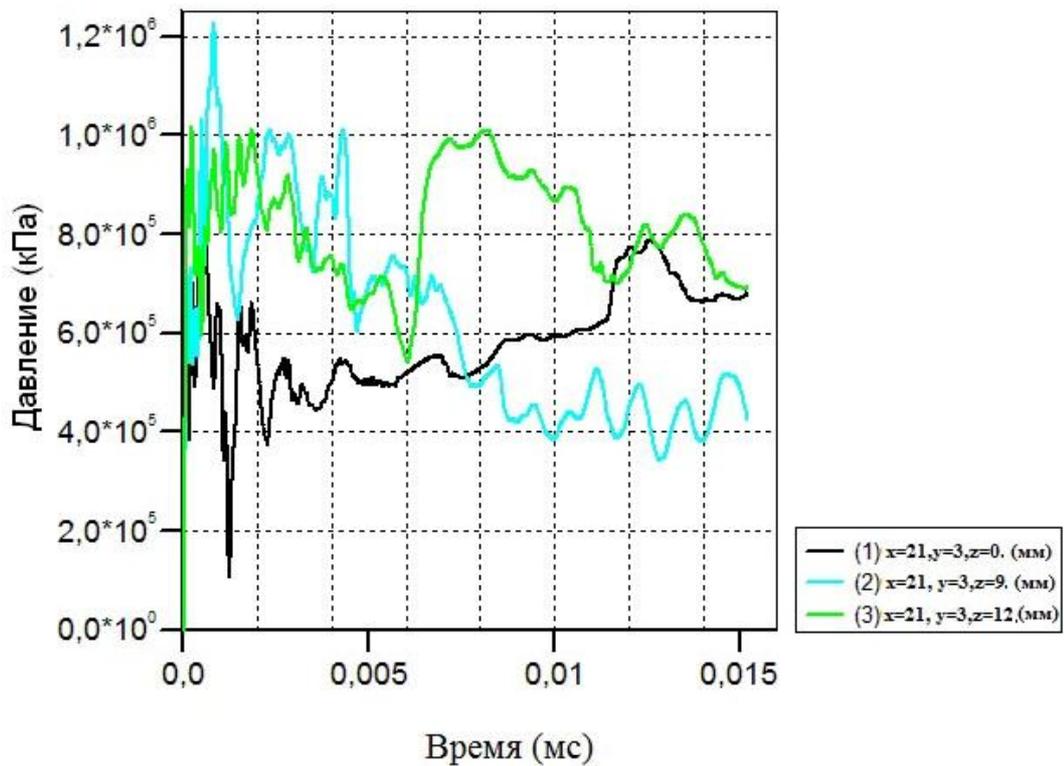
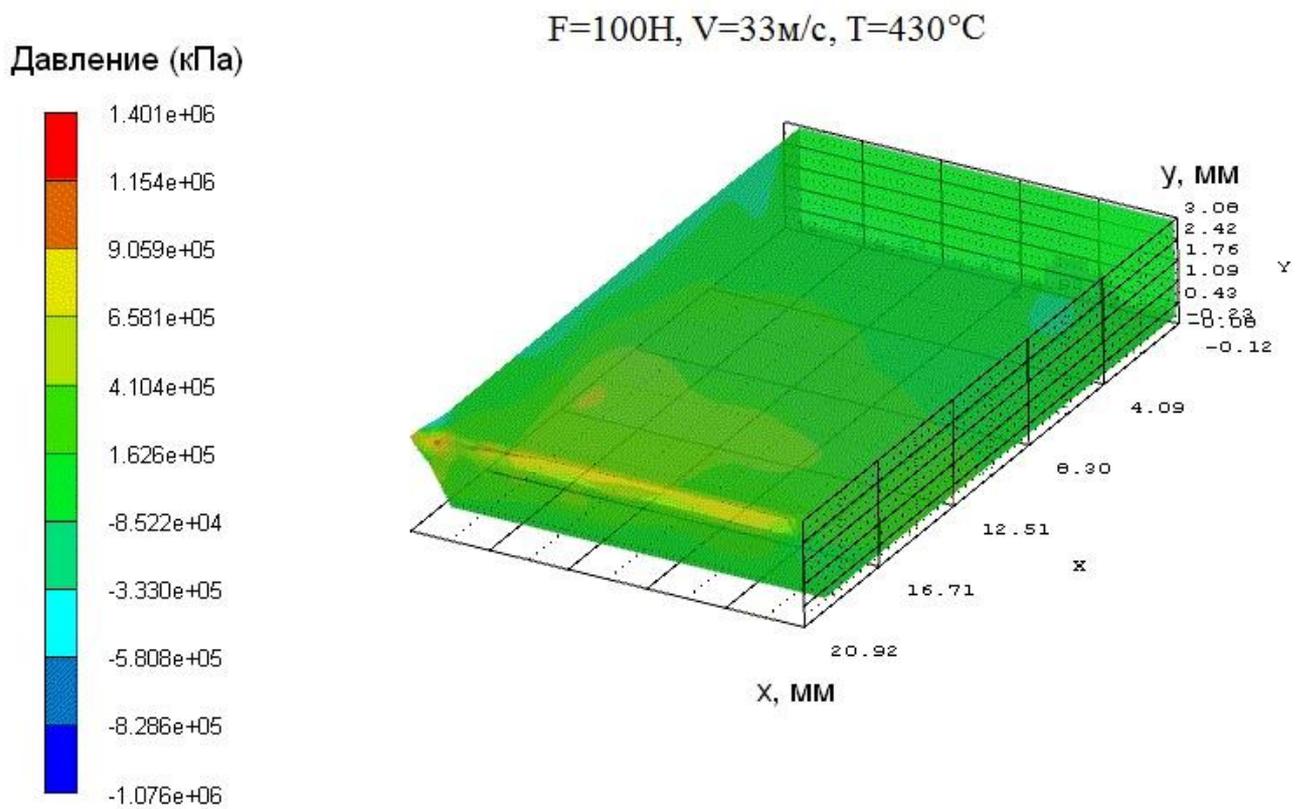


Рисунок 3.45. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 33 \text{ м/с}, T = 430 \text{ }^\circ\text{C}, F = 100 \text{ Н}$$

Давление (кПа)

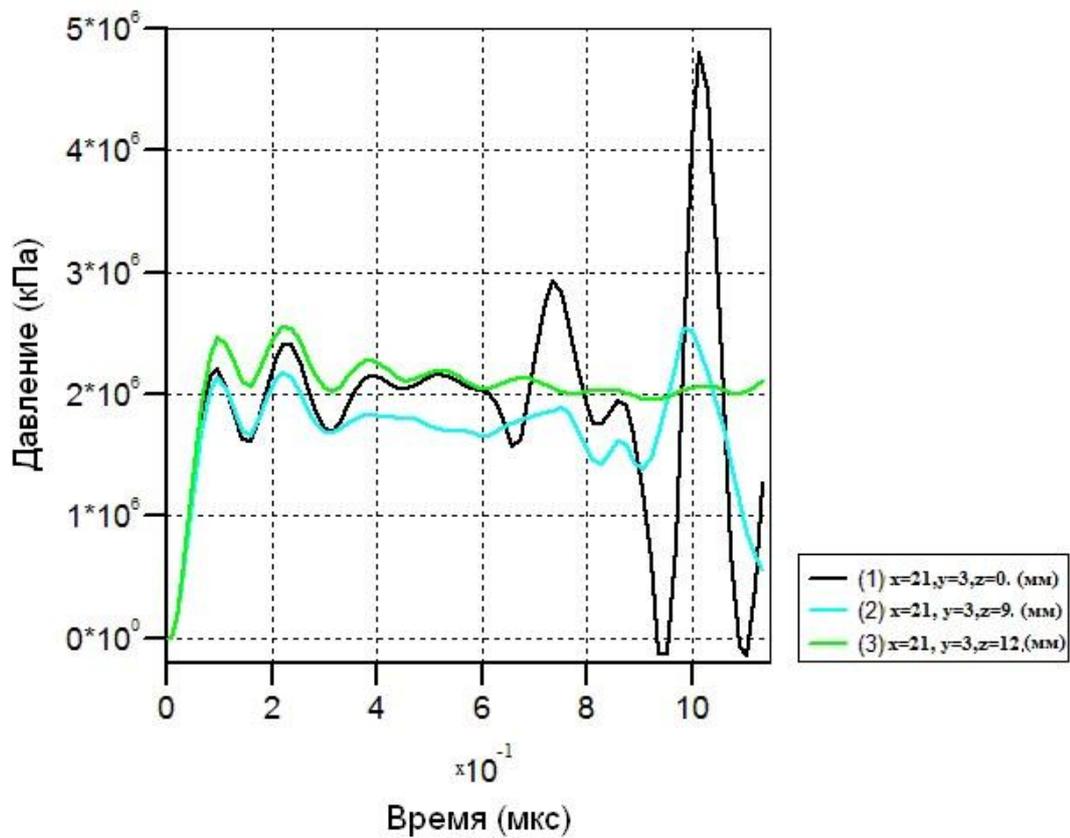
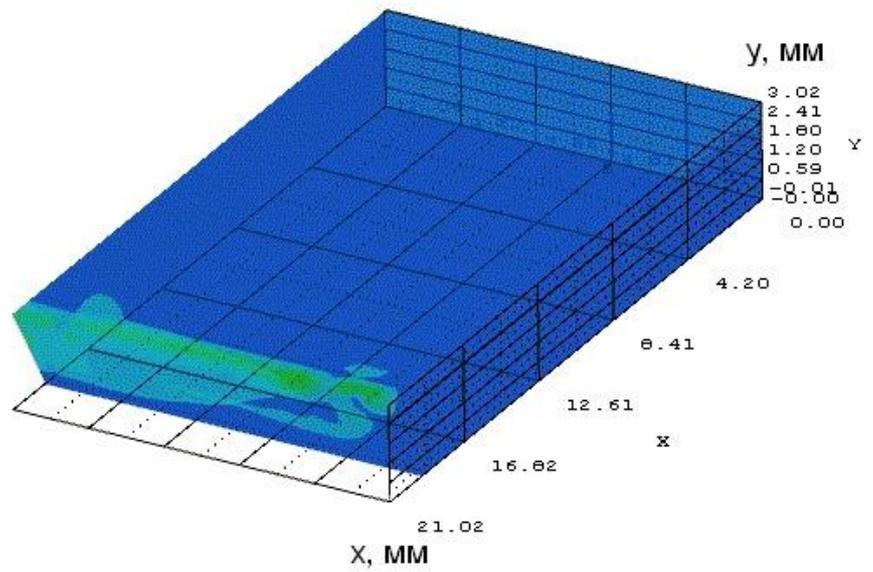
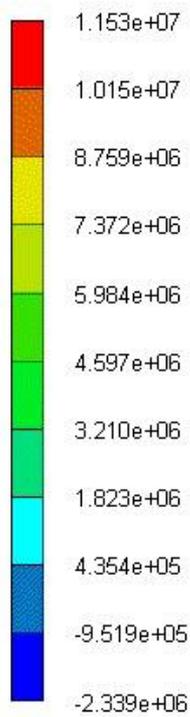


Рисунок 3.46. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 33 \text{ м/с}, T = 430 \text{ }^\circ\text{C}, F = 300 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=10H, V=33m/c, T=430^{\circ}C$

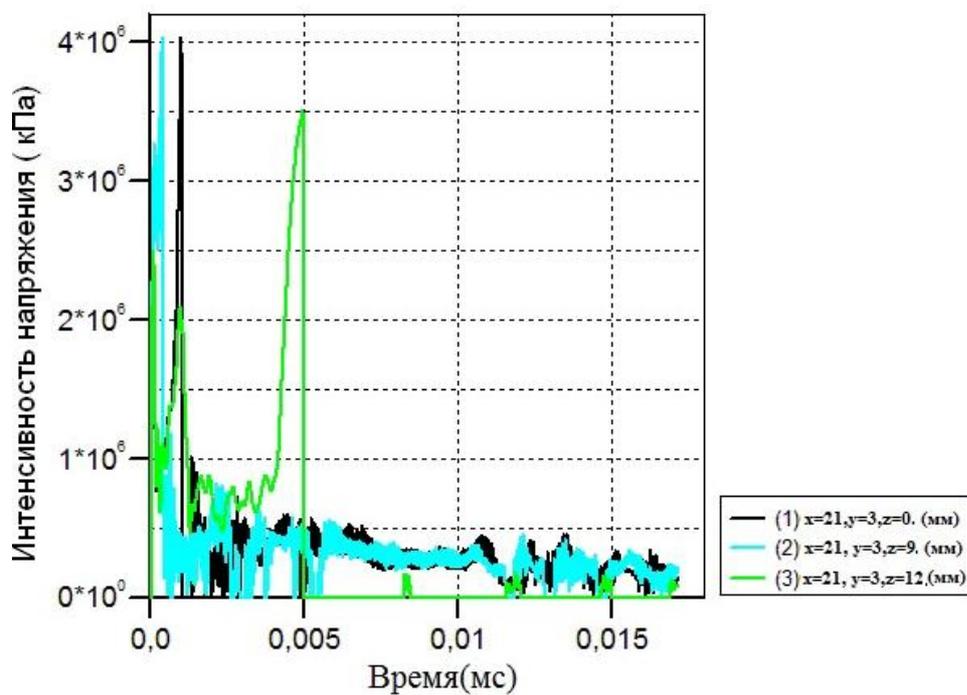
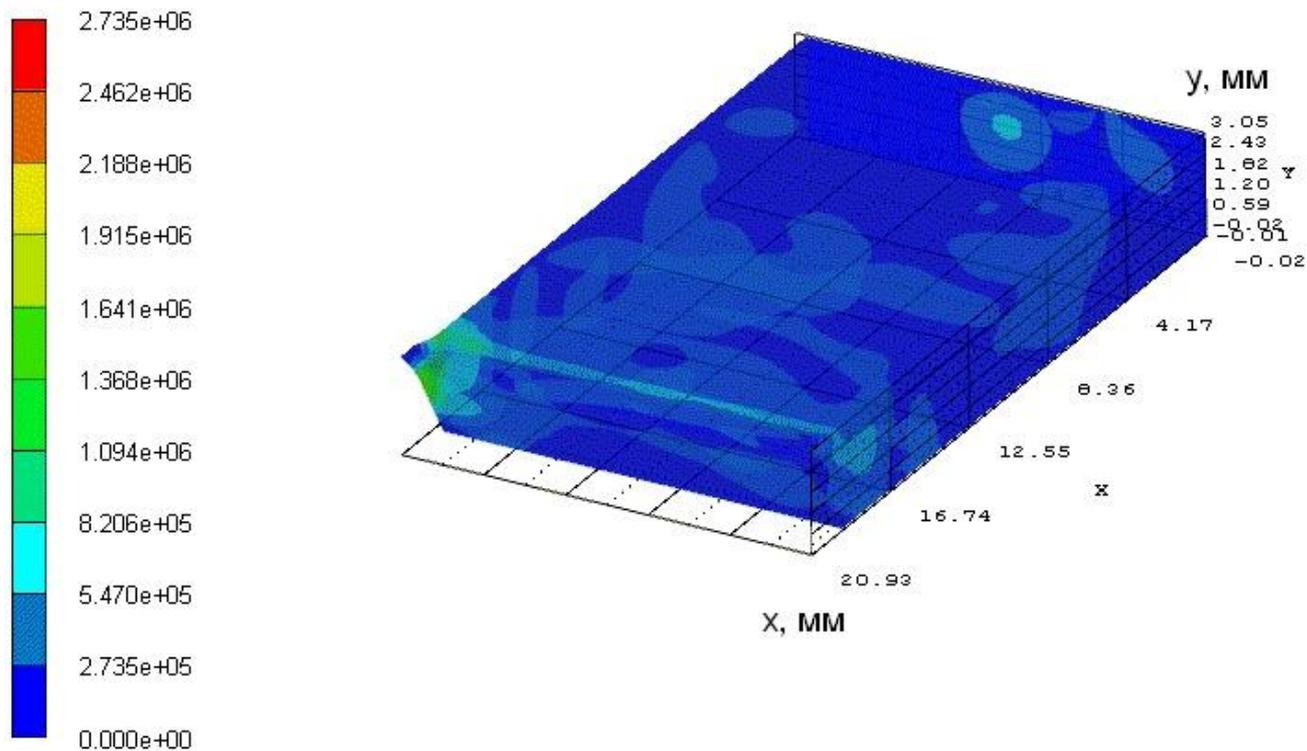


Рисунок 3.47. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 33 \text{ м/с}, T = 430 \text{ }^{\circ}\text{C}, F = 10 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=100\text{Н}$ ,  $V=33\text{м/с}$ ,  $T=430^\circ\text{C}$

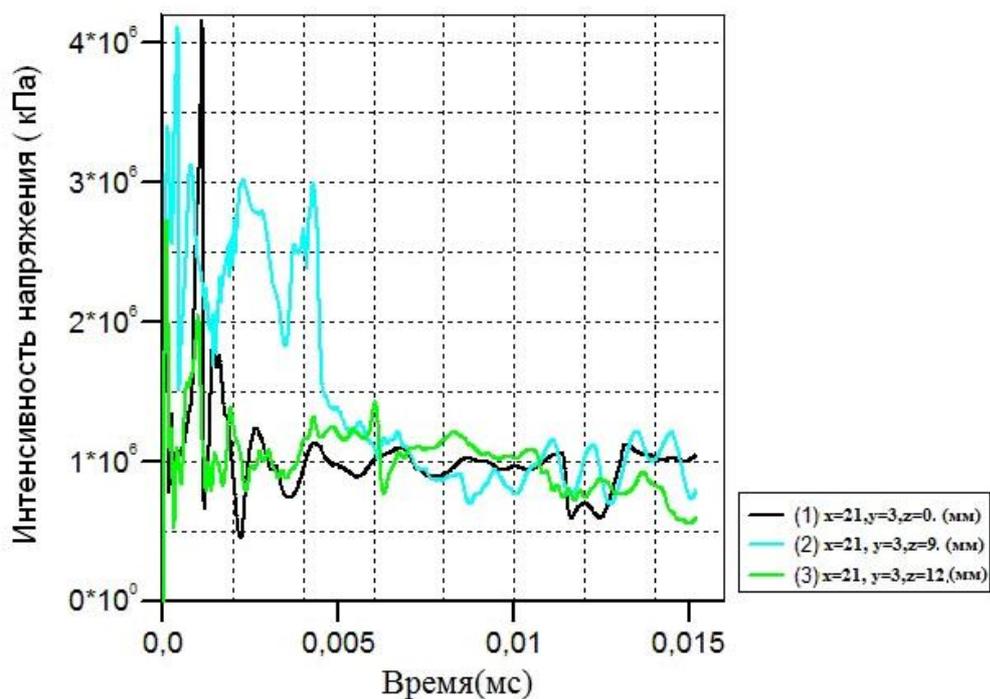
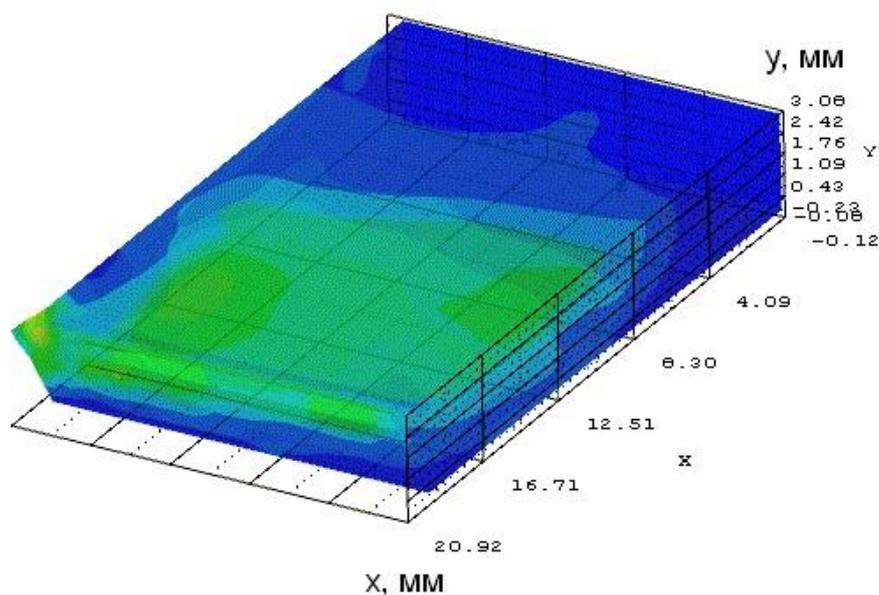
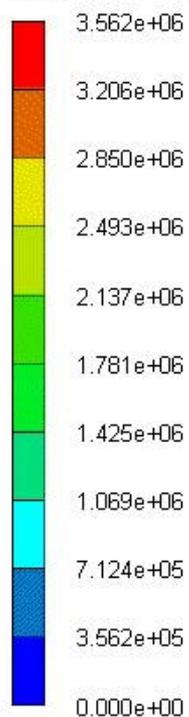


Рисунок 3.48. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 33 \text{ м/с}, T = 430 \text{ }^\circ\text{C}, F = 100 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

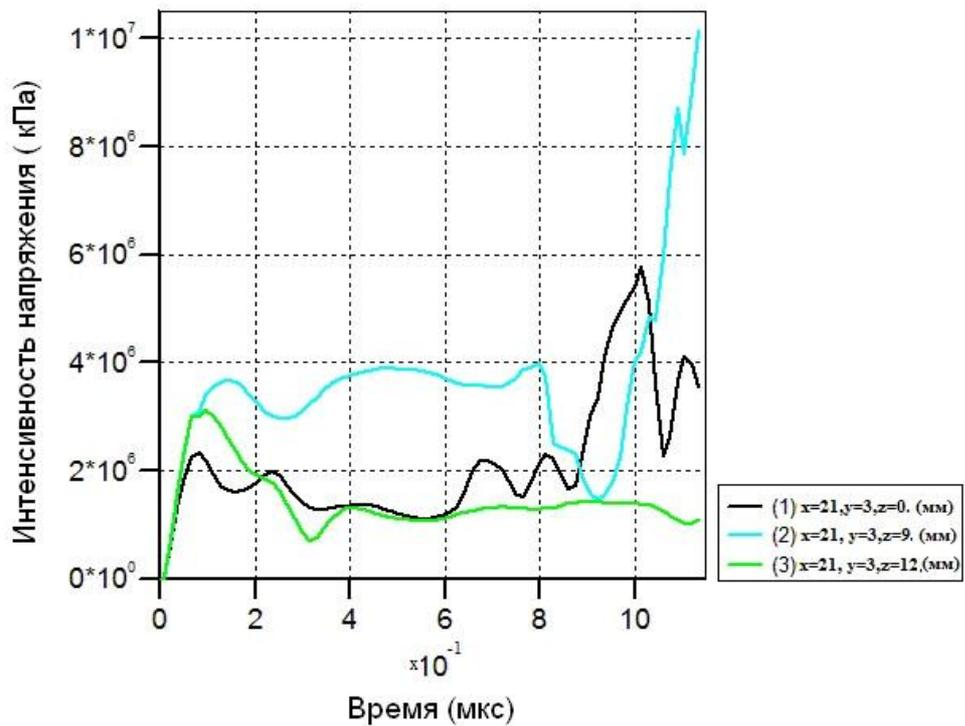
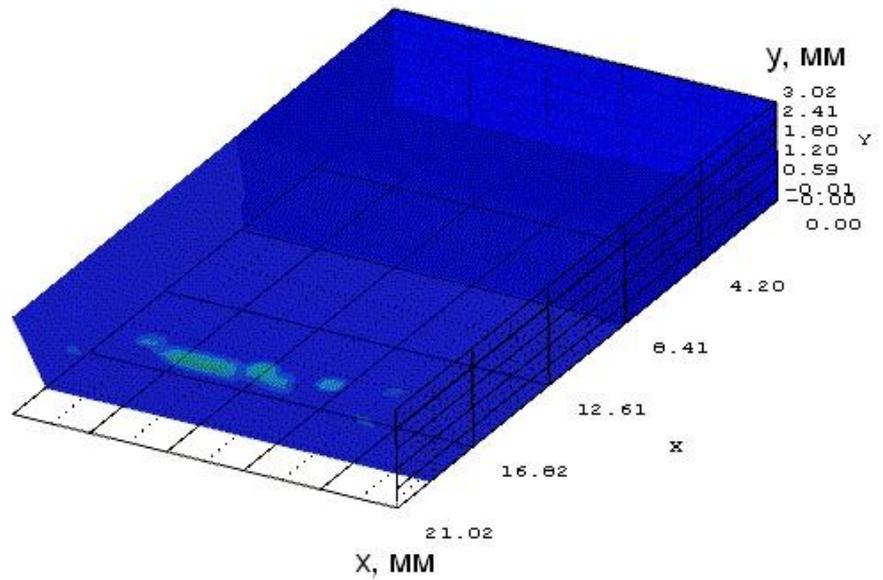
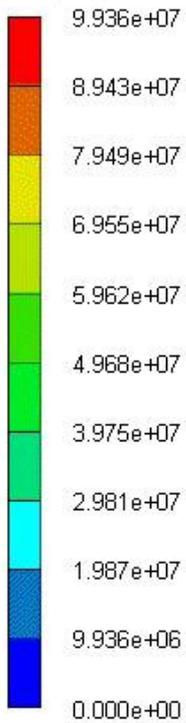


Рисунок 3.49. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 33 \text{ м/с}, T = 430 \text{ }^\circ\text{C}, F = 300 \text{ Н}$$

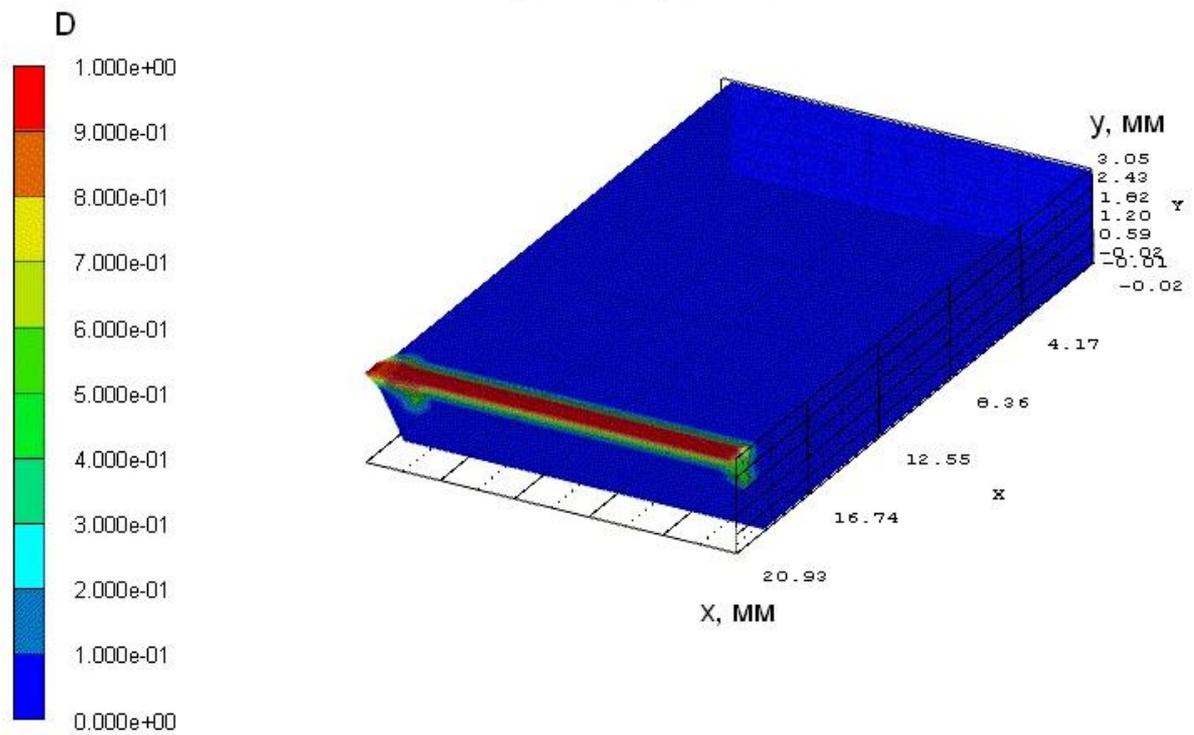


Рисунок 3.50. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 33 \text{ м/с}$ ,  $T = 430 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F = 10 \text{ Н}$ )

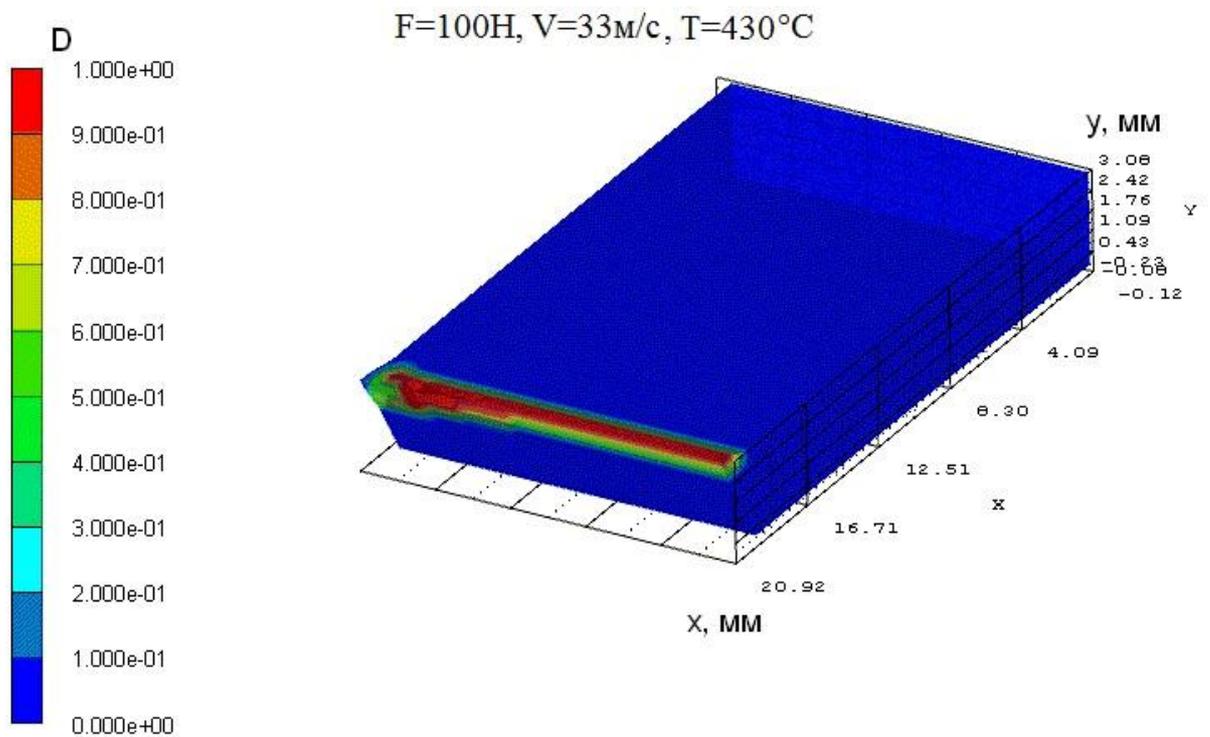


Рисунок 3.51. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 33 \text{ м/с}$ ,  $T = 430 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F = 100 \text{ Н}$ )

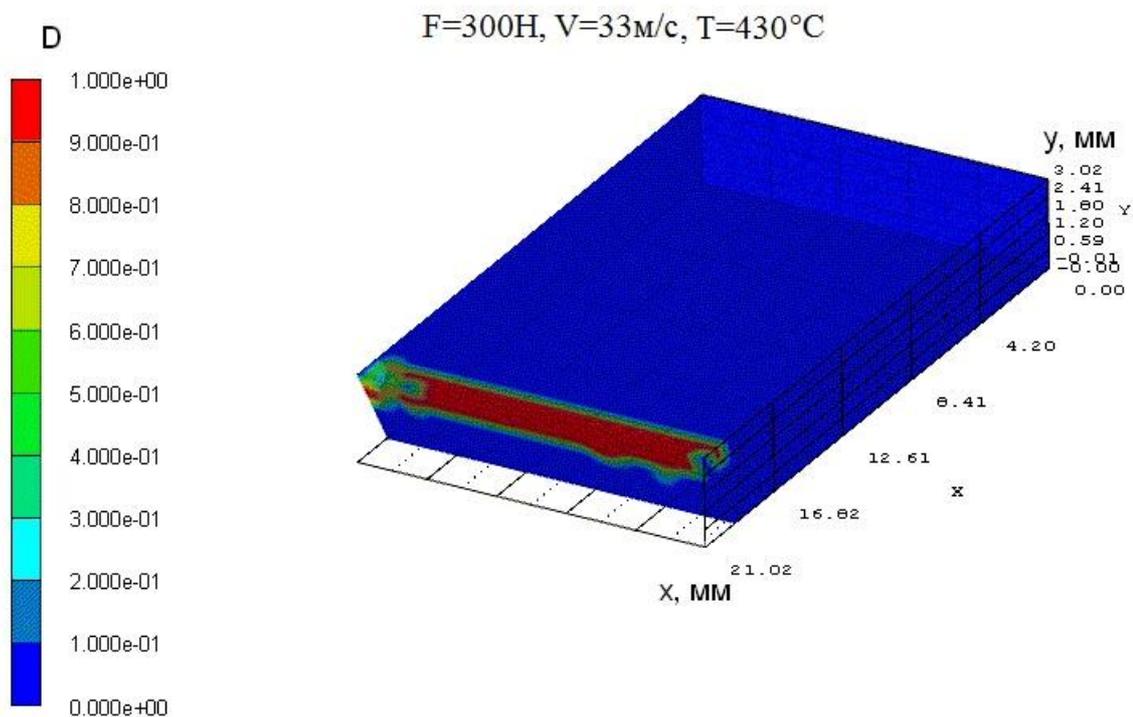


Рисунок 3.52. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 33 \text{ м/с}$ ,  $T = 430 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F = 300 \text{ Н}$ )

При достижении критического значения силы резания осуществляется переход в хрупкий режим локального разрушения материала в удаляемом слое материала. С увеличением скорости вращения, при фиксированном прижимающем усилии, тангенциальная сила, возникающая между зернами круга и обрабатываемой поверхностью увеличивается. Изменение характера локального разрушения сплавов  $WC-Co$  при шлифовании достигается при определенной комбинации величины прижимающего и тангенциального усилия, возникающего в результате взаимодействия вращающегося алмазного круга с обрабатываемой пластиной.

Для прижимающего усилия 10 Н и скорости круга 33 м/с в точке 3 реализуются растягивающие напряжения. Это может быть связано с тем, что в этих условиях материал вблизи точки 3 сохраняет сопротивление сдвигу и не полностью разрушен. С увеличением нормальной нагрузки глубина удаляемого слоя увеличивается, вместе с тем выработка материала принимает локальный характер, на обработанной поверхности и на кромке появляется волнообразная текстура, в свою очередь поперечные края кромки становятся более гладкими.

Давление (кПа)

$F=10\text{H}$ ,  $V=33\text{м/с}$ ,  $T=1000^\circ\text{C}$

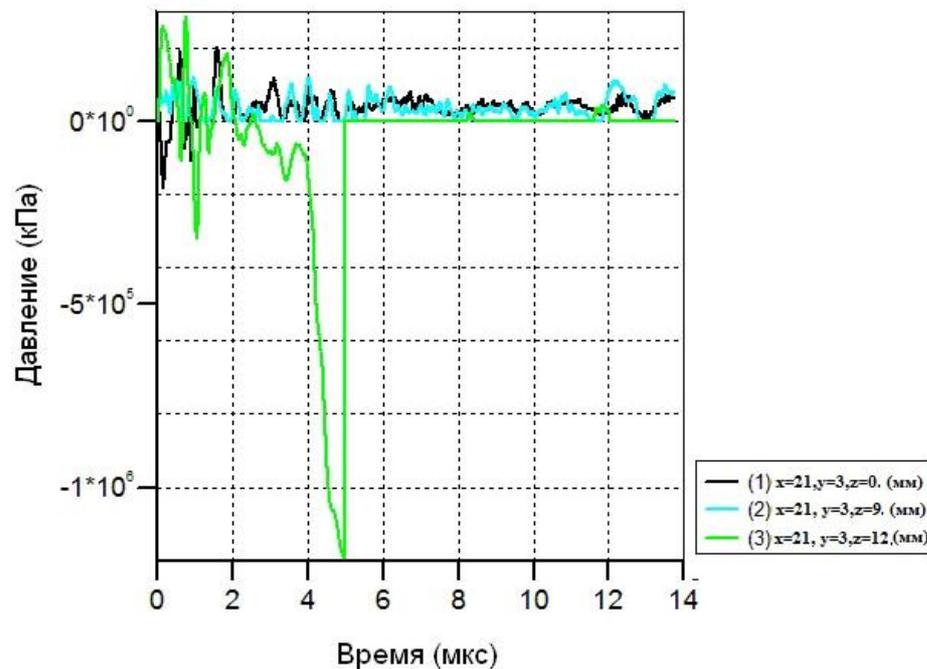
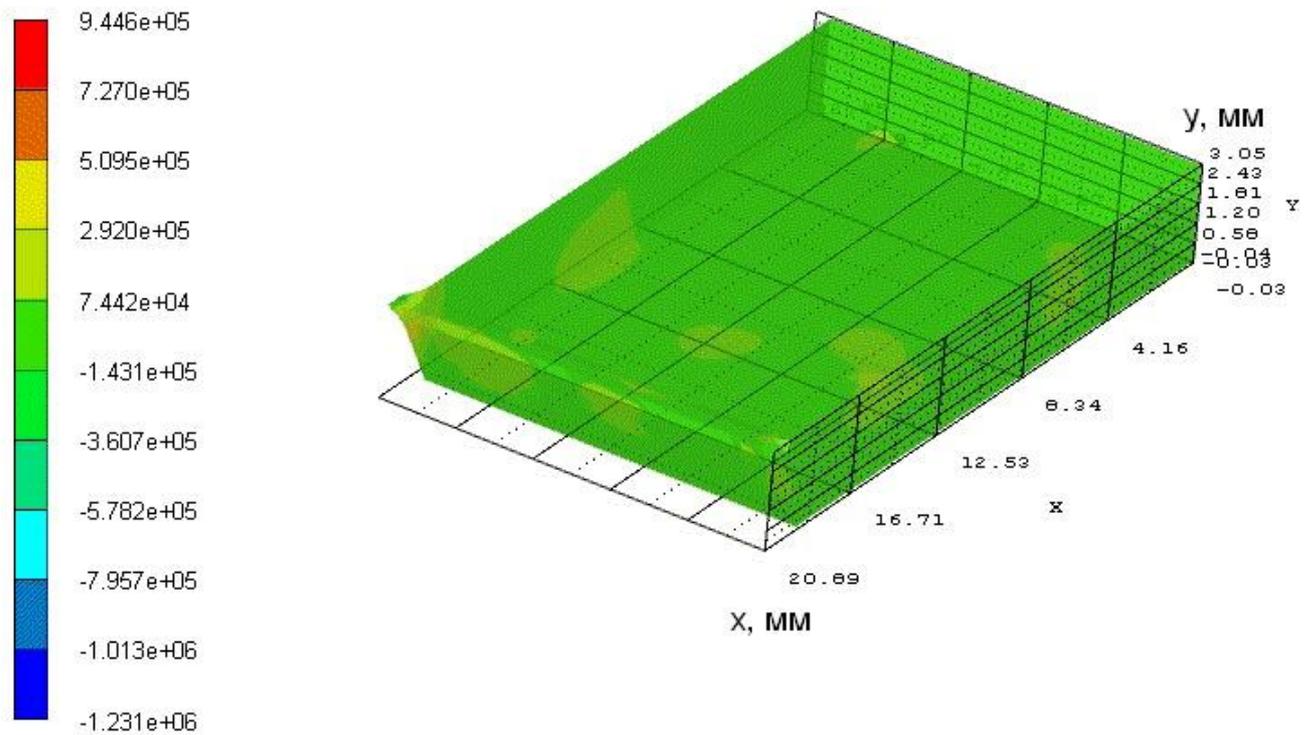


Рисунок 3.53. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 33 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}, F = 10 \text{ Н}$$

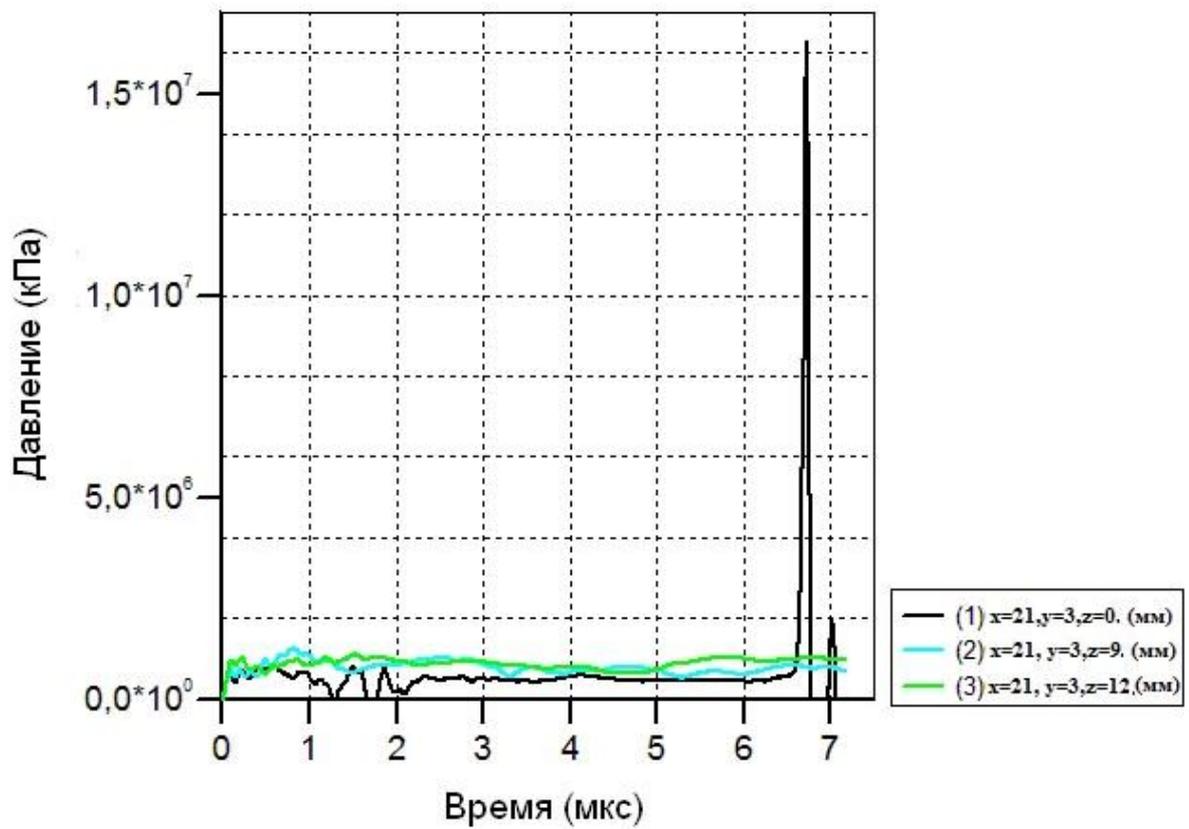
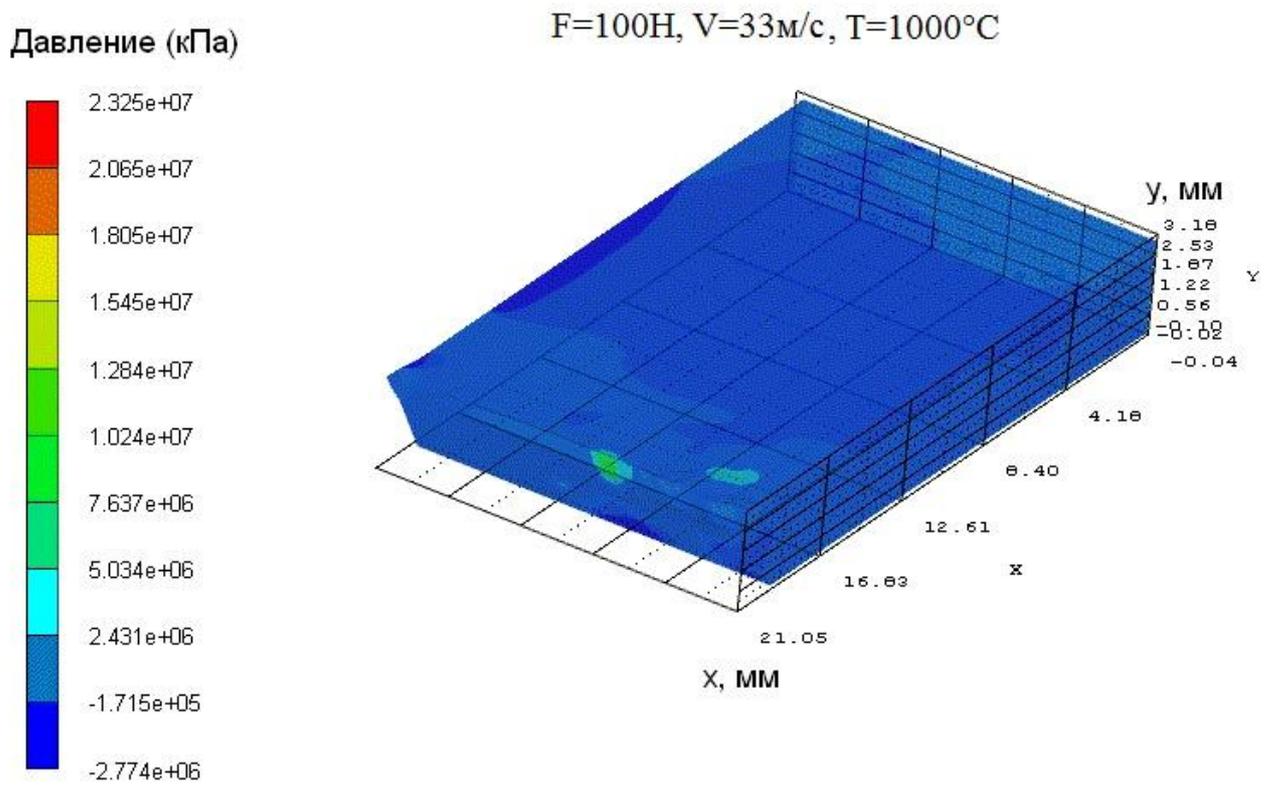


Рисунок 3.54. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 33 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}, F = 100 \text{ Н}$$

Давление (кПа)

$F=300\text{H}$ ,  $V=33\text{м/с}$ ,  $T=1000^\circ\text{C}$

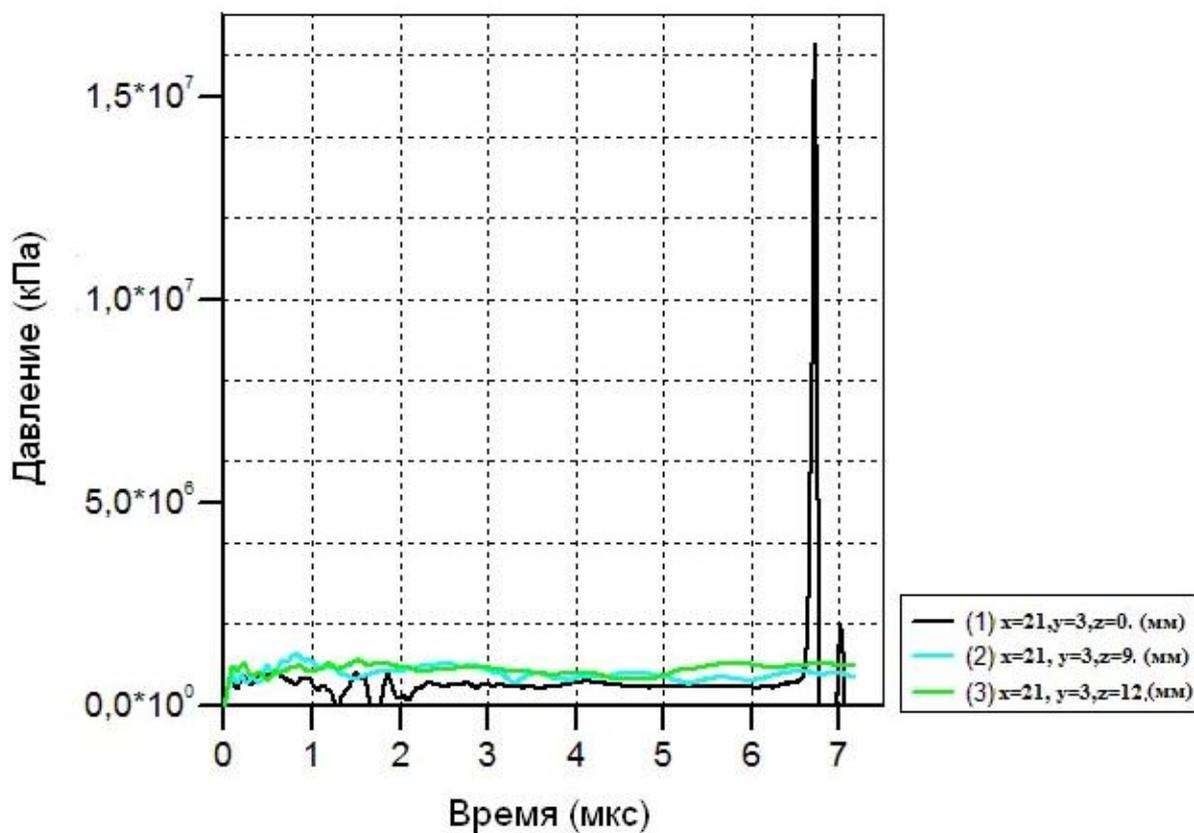
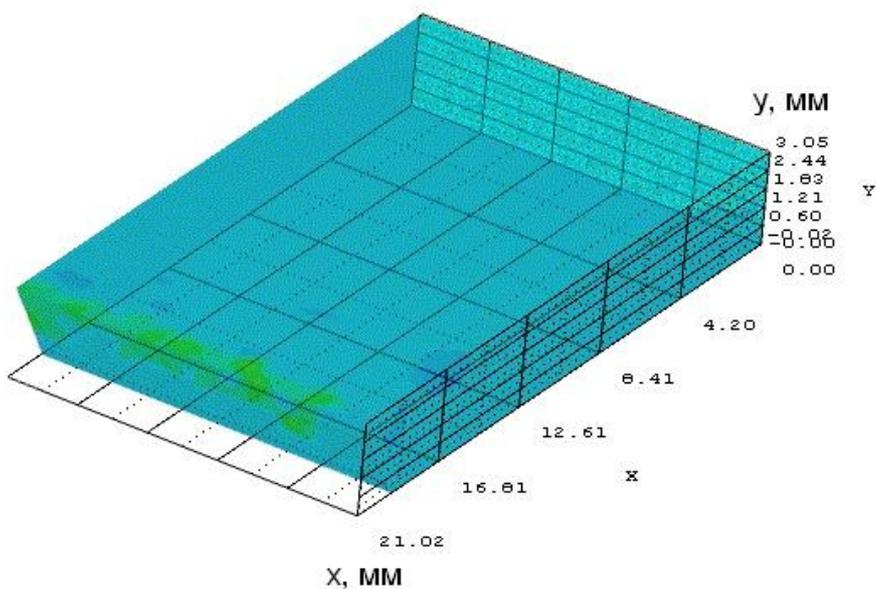
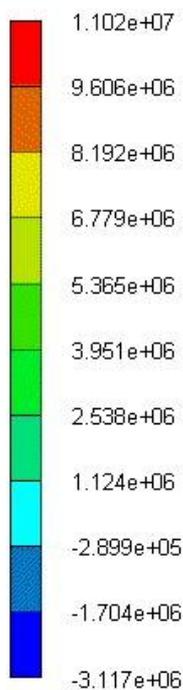


Рисунок 3.55. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 33 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}, F = 300 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=10\text{H}$ ,  $V=33\text{м/с}$ ,  $T=1000^\circ\text{C}$

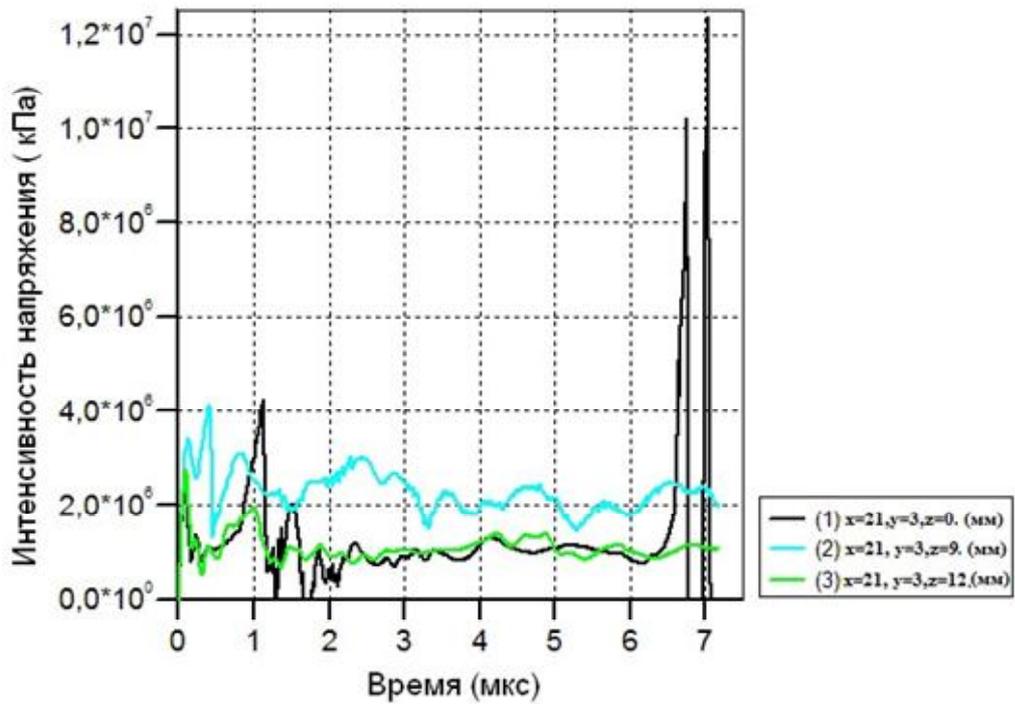
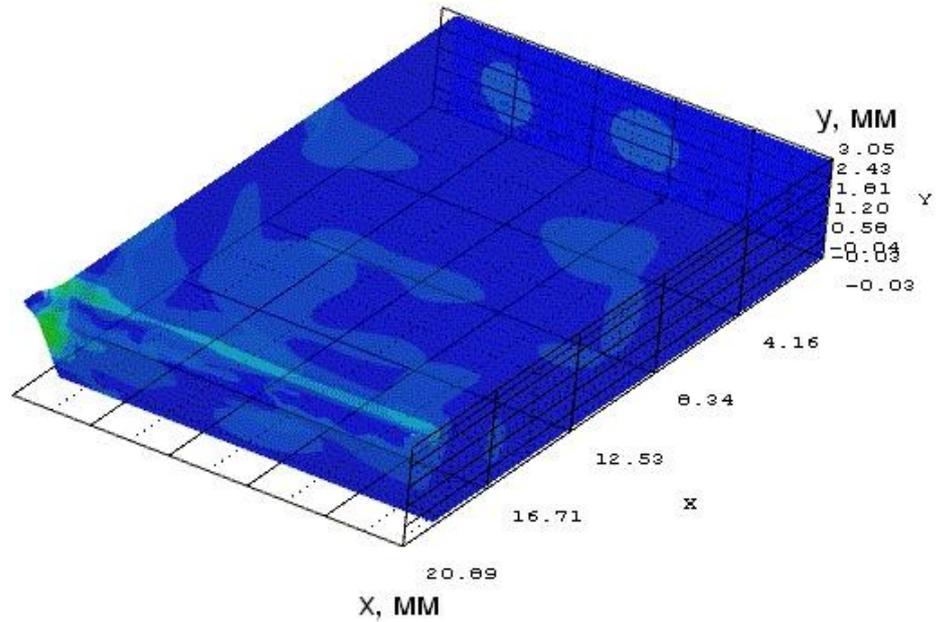
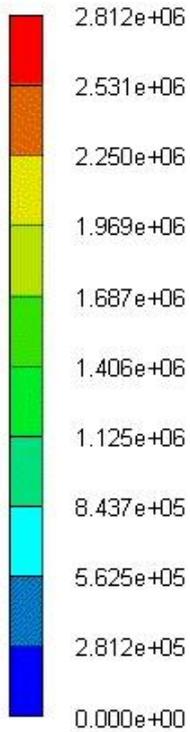


Рисунок 3.56. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 33 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}, F = 10 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=100H, V=33m/c, T=1000^{\circ}C$

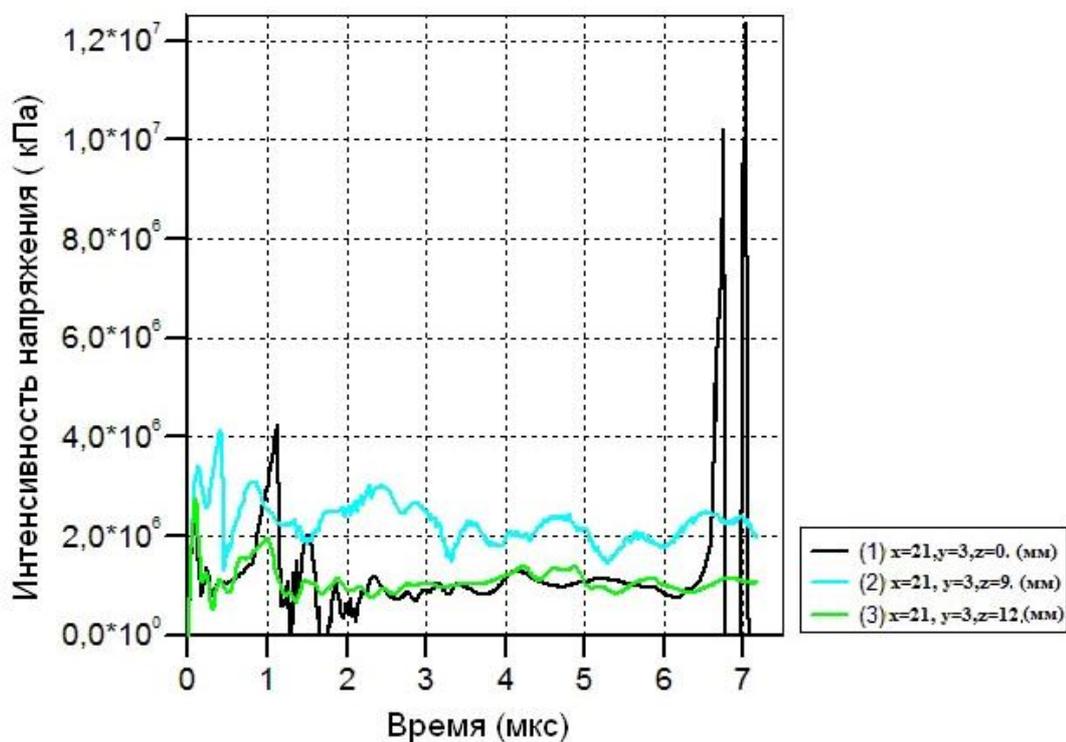
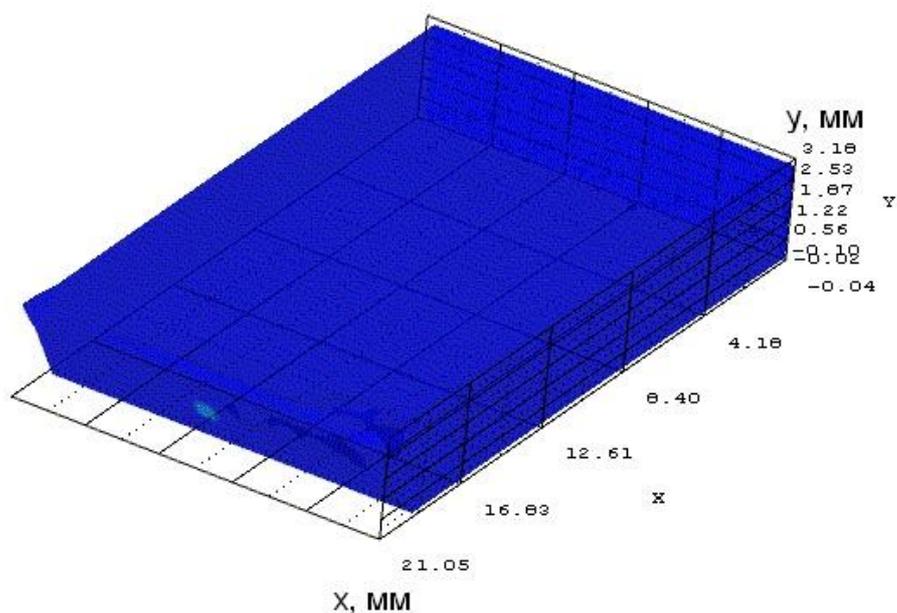
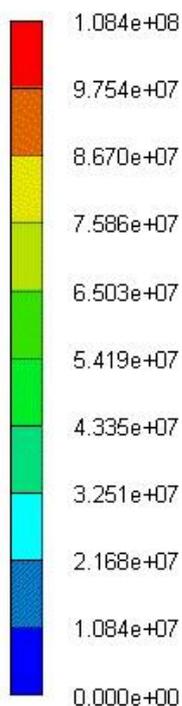


Рисунок 3.57. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 33 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}, F = 100 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=300\text{H}$ ,  $V=33\text{м/с}$ ,  $T=1000^\circ\text{C}$

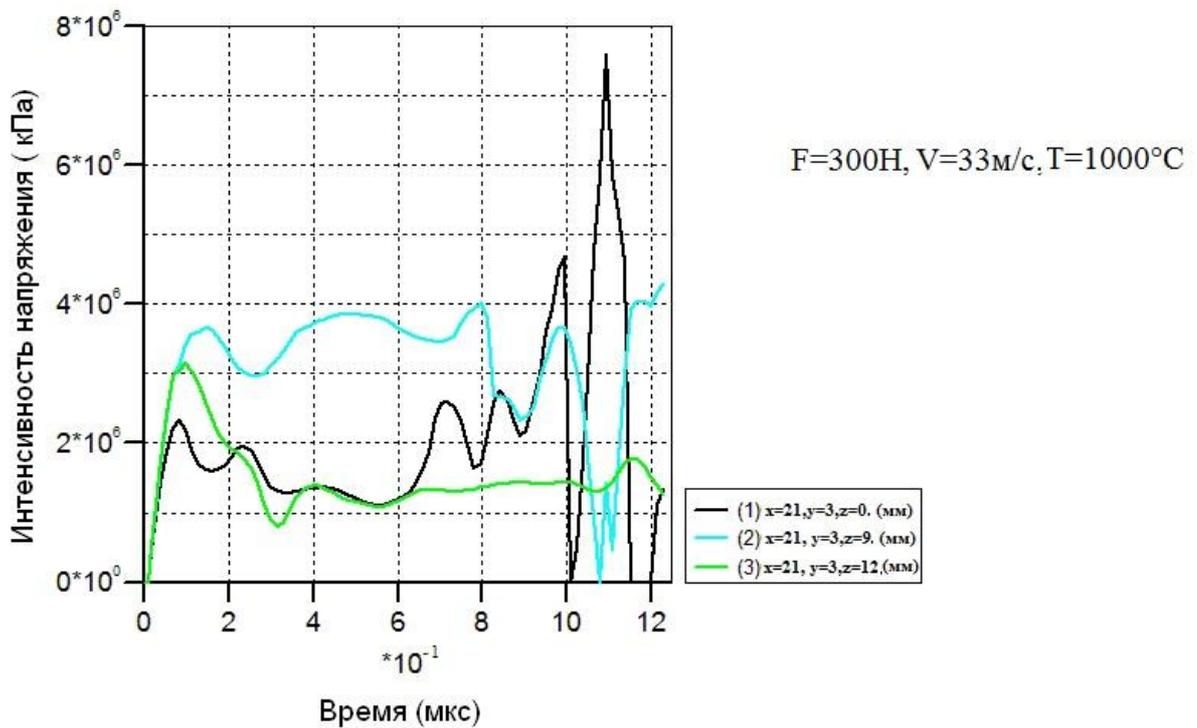
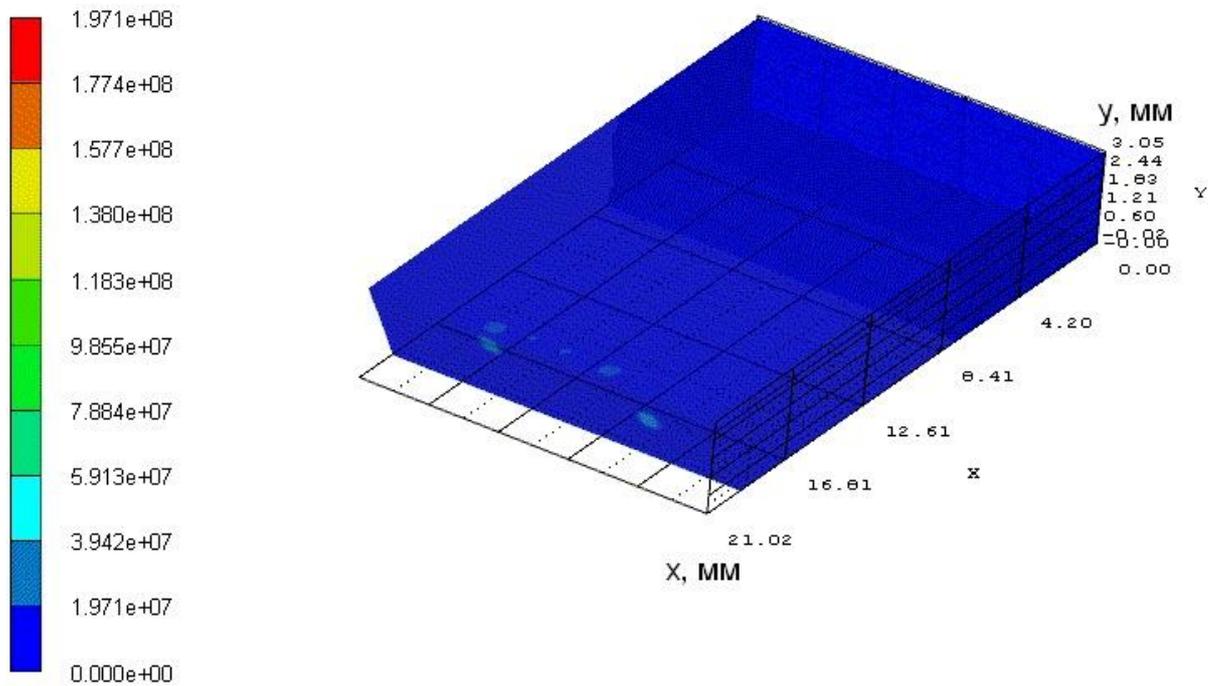


Рисунок 3.58. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 33 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}, F = 300 \text{ Н}$$

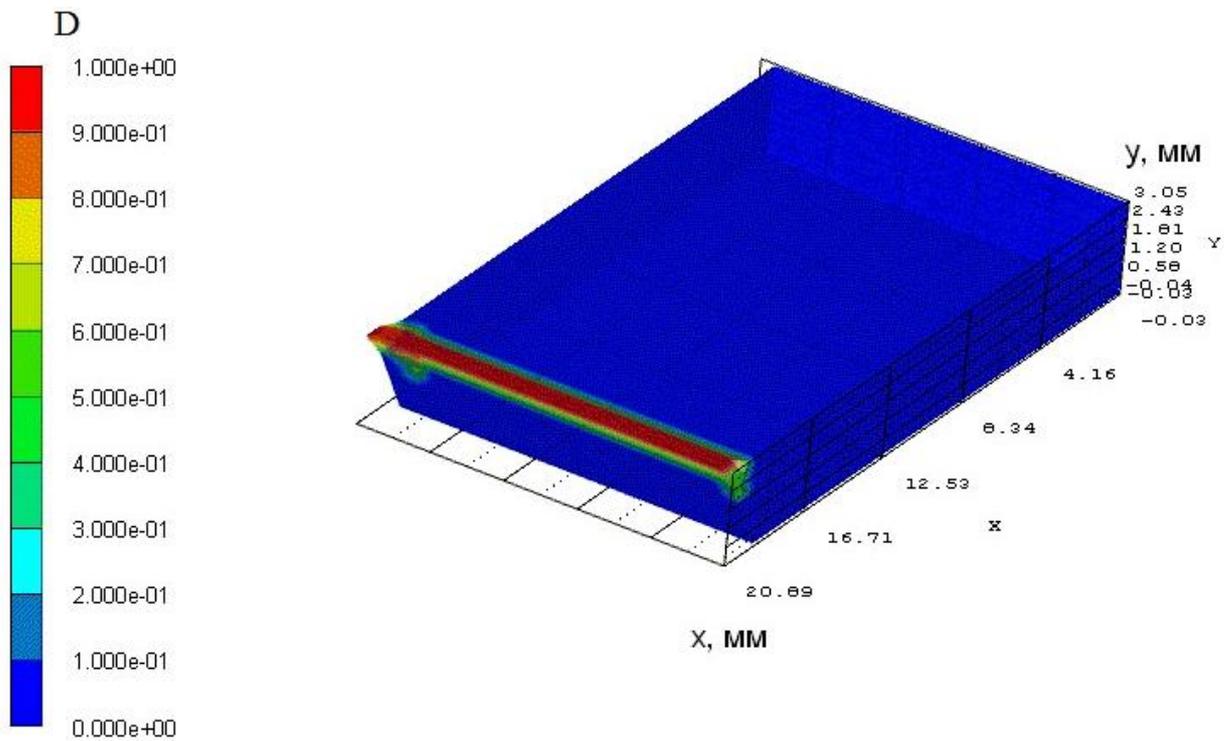


Рисунок 3.59. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 33$  м/с,  $T = 1000$  °C,  $F = 10$  Н)

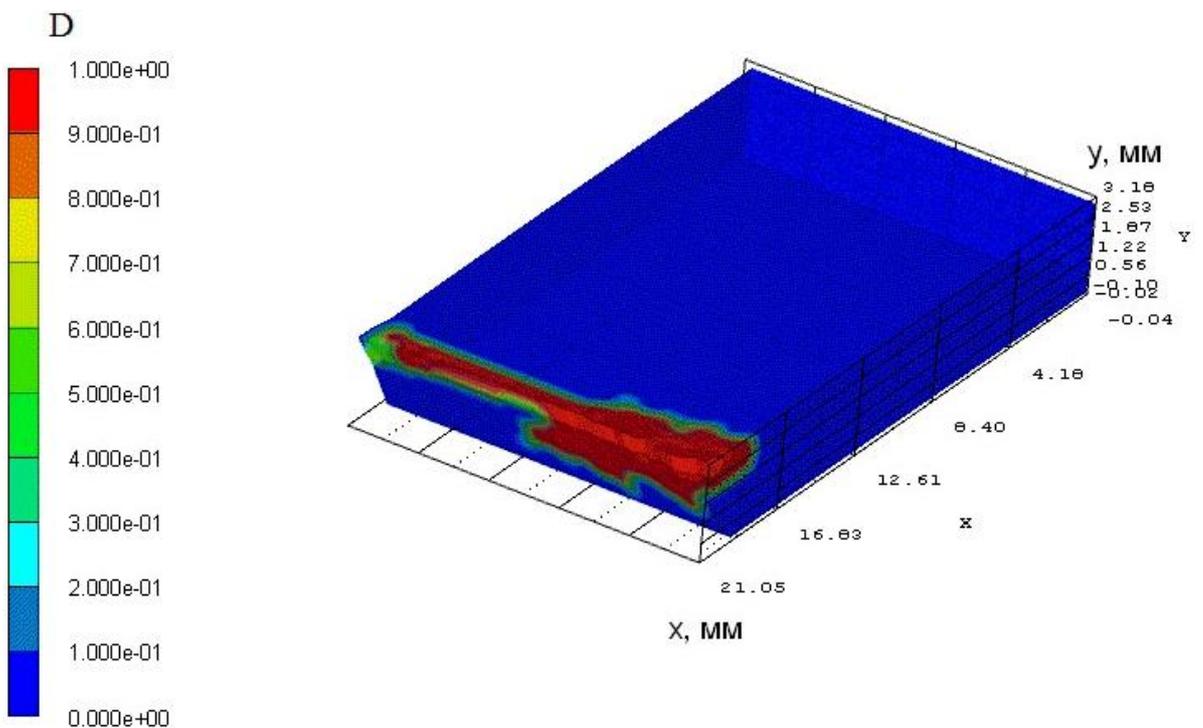


Рисунок 3.60. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 33$  м/с,  $T = 1000$  °C,  $F = 100$  Н)

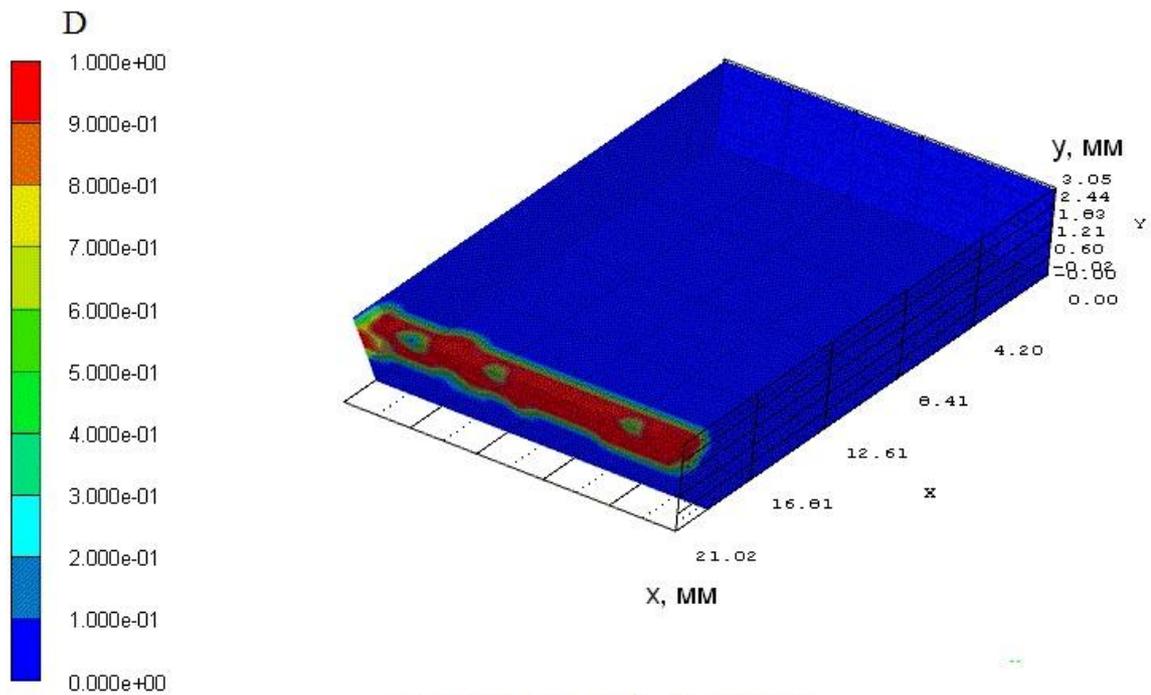


Рисунок 3.61. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 33 \text{ м/с}$ ,  $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F = 300 \text{ Н}$ )

Критическими с точки зрения начала интенсивного развития микроповреждений в приповерхностных слоях и зонах находящимися вблизи области обработки являются режимы шлифования со скоростью сдвига  $33 \text{ м/с}$  с силами резания выше  $100 \text{ Н}$ .

*Оценка напряженно-деформированного состояния в затачиваемой пластине при скорости сдвига  $45 \text{ м/с}$*

Дальнейшее увеличение скорости резания при шлифовании приводит, с одной стороны, к возрастанию напряжений в зоне контакта, с другой стороны, реализуются условия для перехода в пластичный режим шлифования.

Распределение давлений в теле пластины, как и изменения во времени значений давления для точек 1, 2, 3 различны (Рисунки 3.62...3.64). В граничных точках 1 и 3 образца наблюдаются большие значения давлений, чем в точке 2. Это свидетельствует об уязвимости граничных участков режущей кромки твердосплавного инструмента при затачивании, особенно при увеличении сил резания.

Давление (кПа)

$F=10\text{H}$ ,  $V=45\text{м/с}$ ,  $T=430^\circ\text{C}$

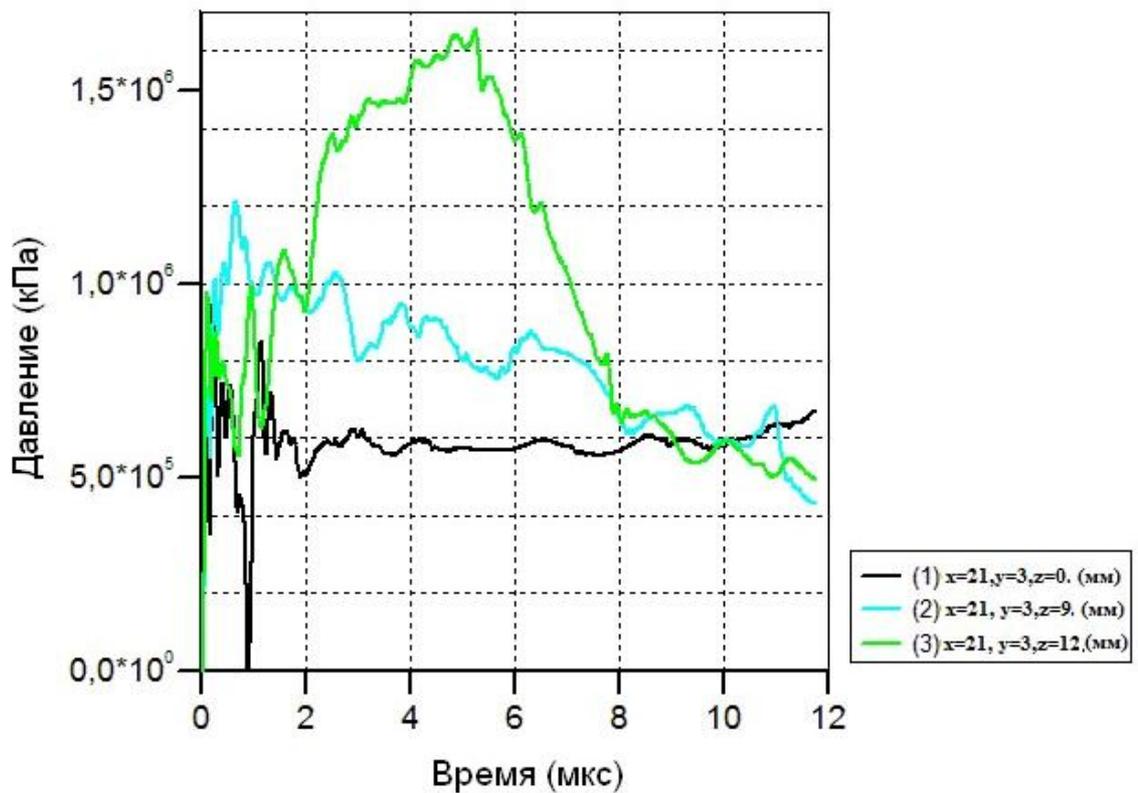
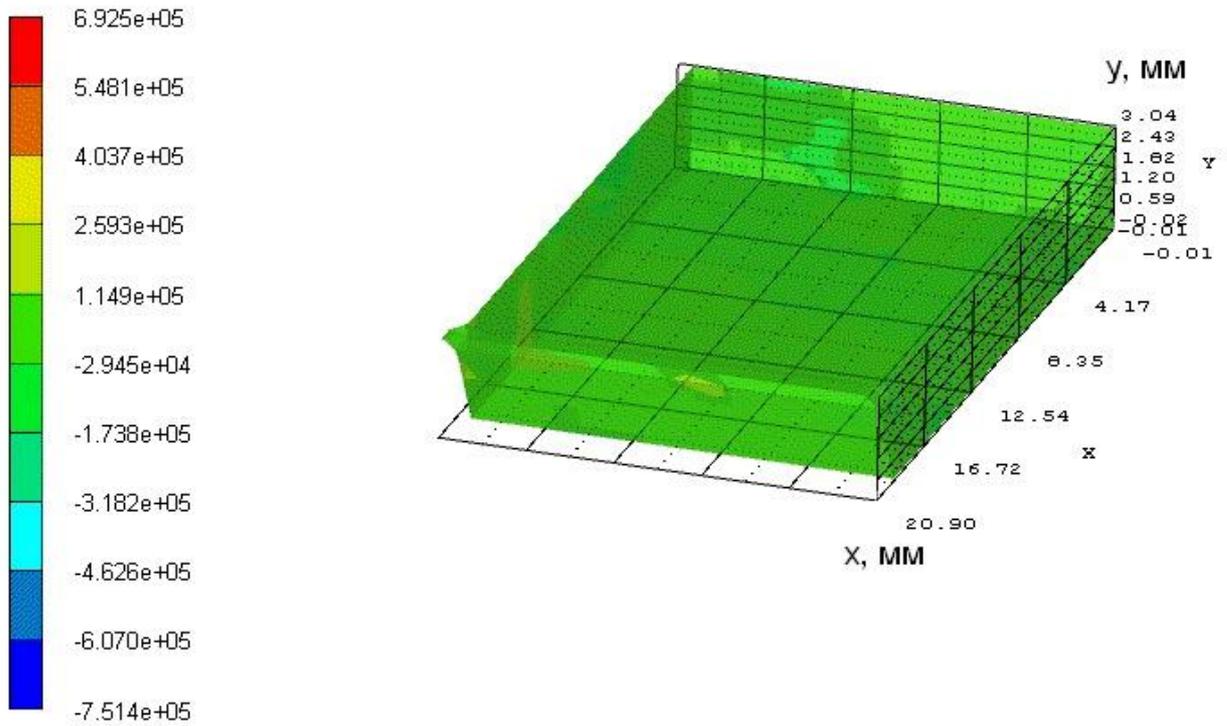


Рисунок 3.62. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 45 \text{ м/с}, T = 430^\circ\text{C}, F = 10 \text{ H}$$

Давление (кПа)

$F=100\text{H}$ ,  $V=45\text{м/с}$ ,  $T=430^\circ\text{C}$

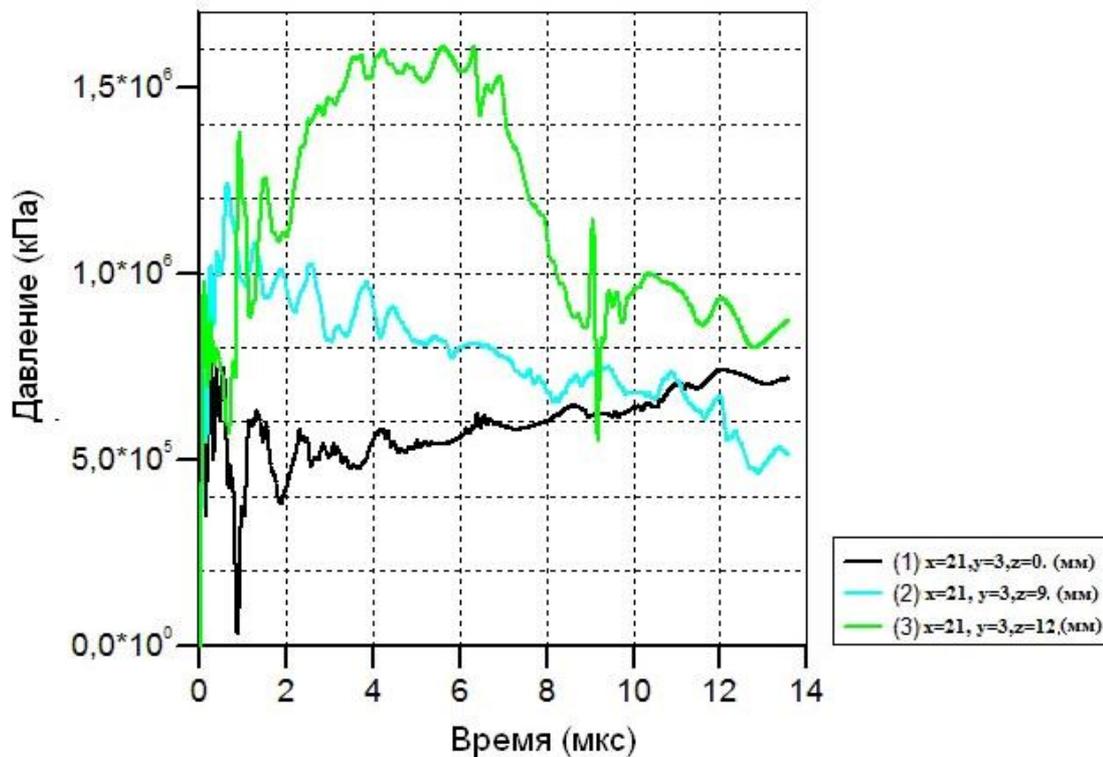
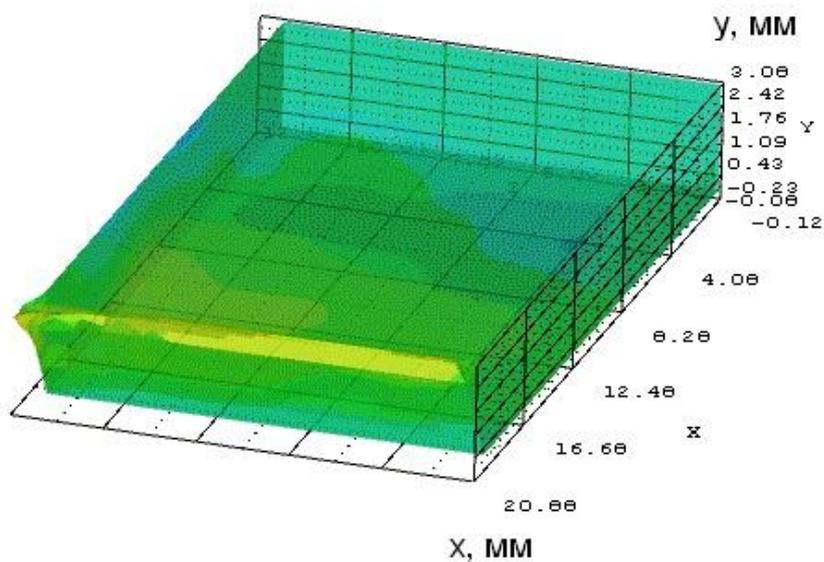
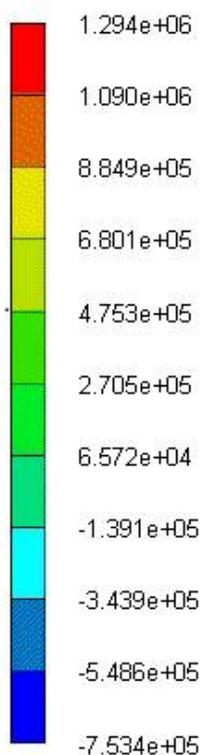


Рисунок 3.63. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 45 \text{ м/с}, T = 430 \text{ }^\circ\text{C}, F = 100 \text{ Н}$$

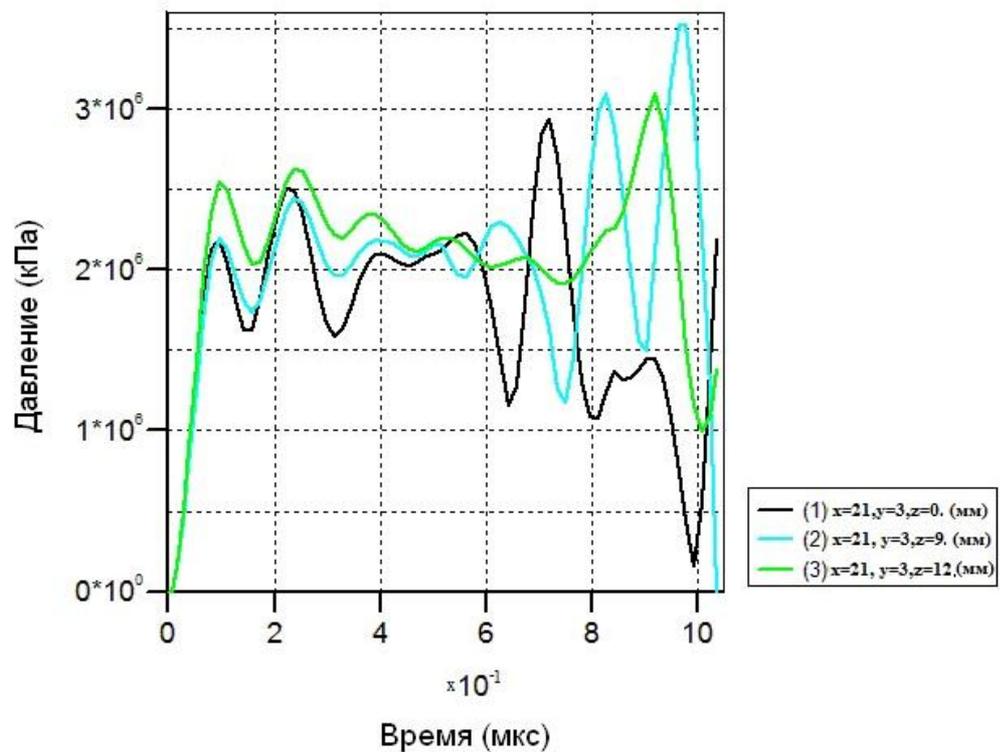
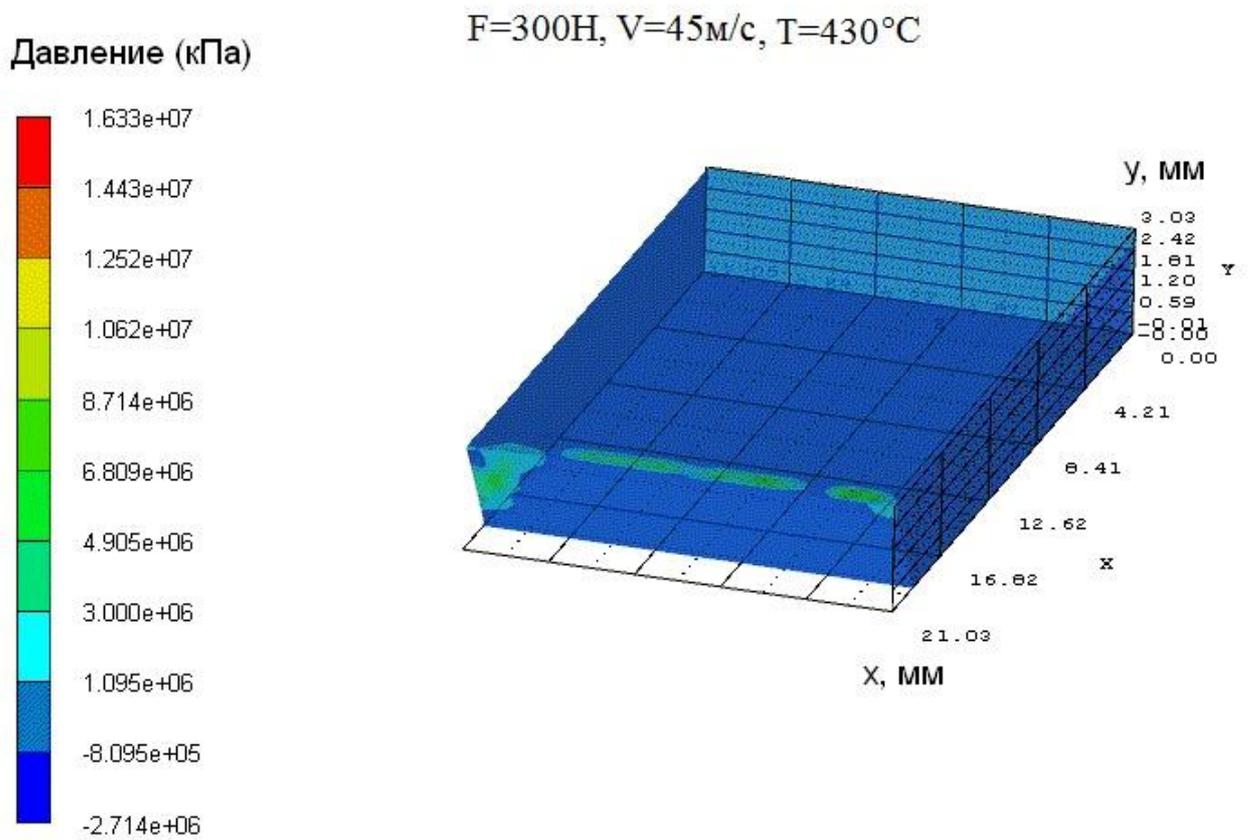


Рисунок 3.64. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 45 \text{ м/с}, T = 430^\circ \text{C}, F = 300 \text{ Н}$$

Интенсивность напряжений в теле пластины в различных точках также не-равномерна (Рисунки 3.65...3.67).

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=10\text{H}$ ,  $V=45\text{м/с}$ ,  $T=430^\circ\text{C}$

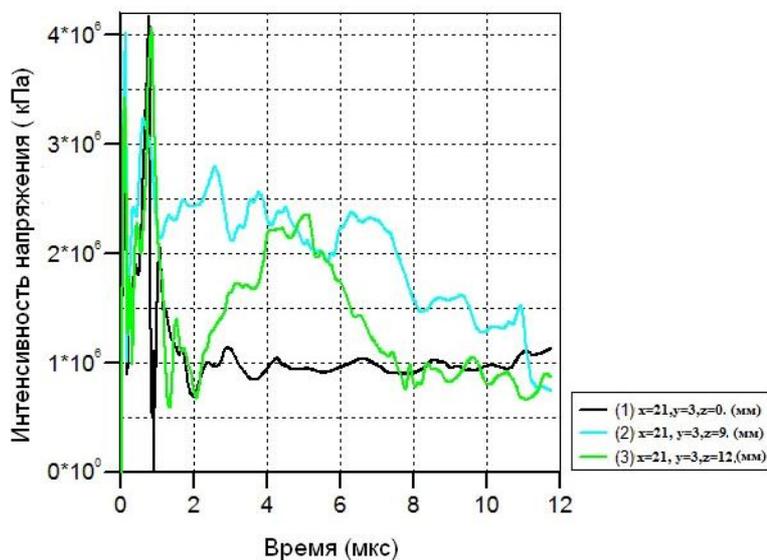
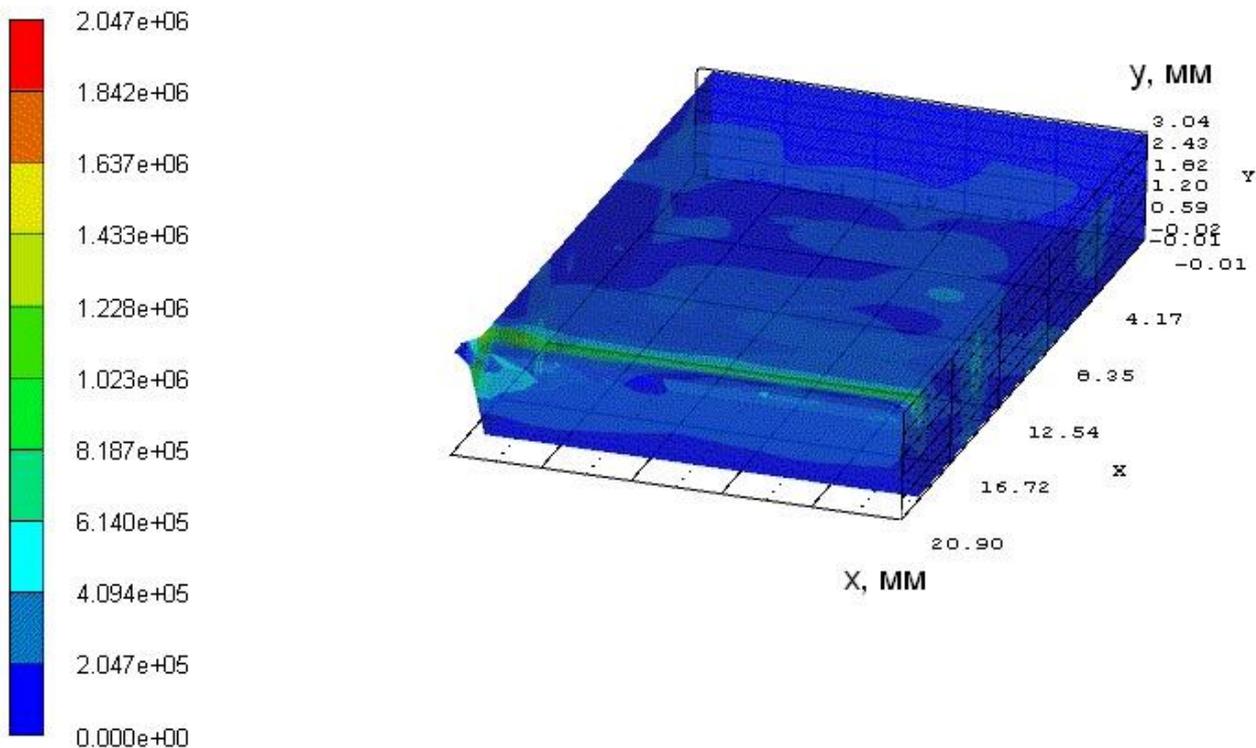


Рисунок 3.65. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 45 \text{ м/с}, T = 430^\circ\text{C}, F = 10 \text{ H}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=100\text{H}$ ,  $V=45\text{м/с}$ ,  $T=430^\circ\text{C}$

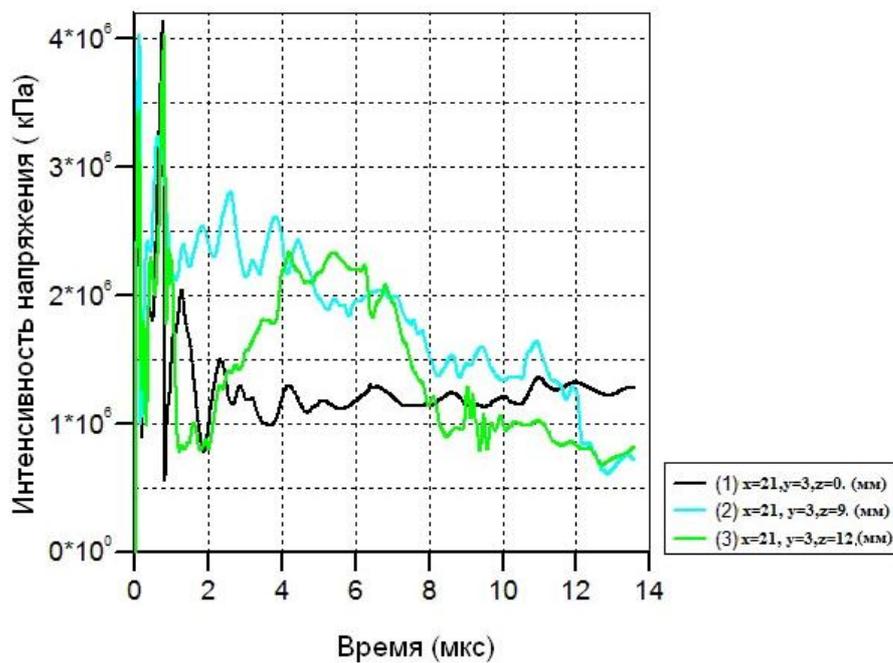
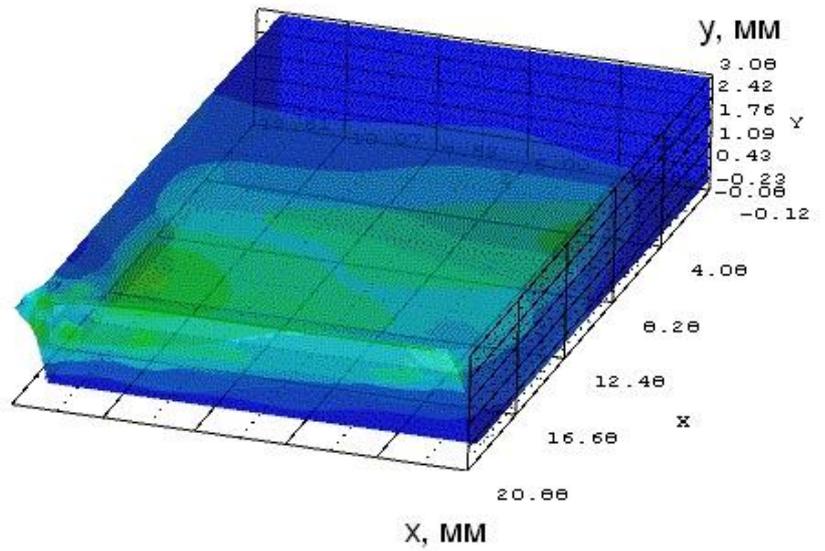
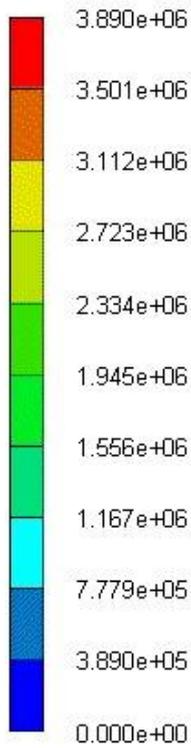


Рисунок 3.66. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 45 \text{ м/с}, T = 430^\circ\text{C}, F = 100 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=300\text{Н}$ ,  $V=45\text{м/с}$ ,  $T=430^\circ\text{C}$

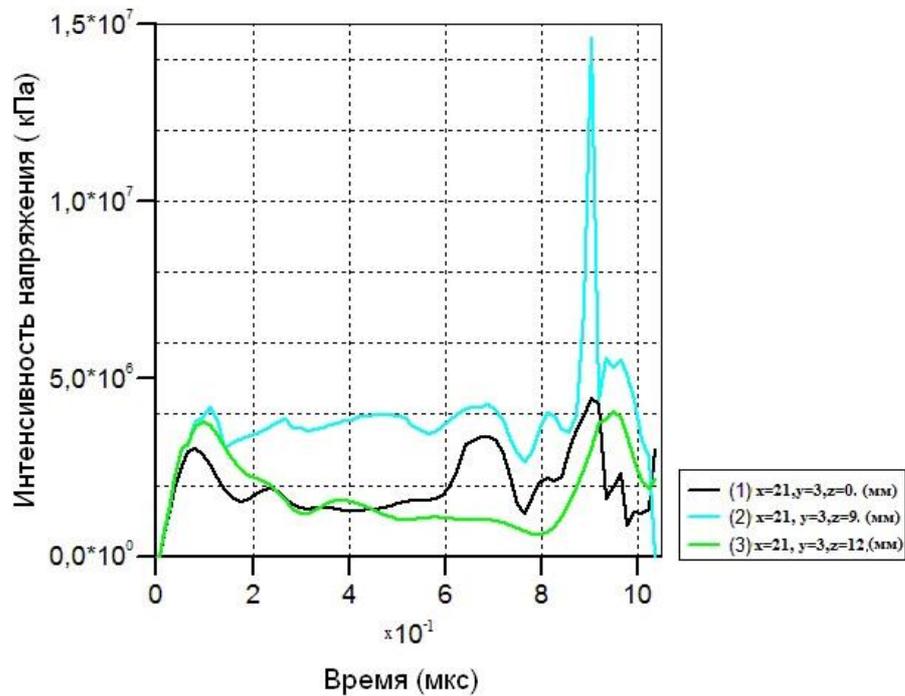
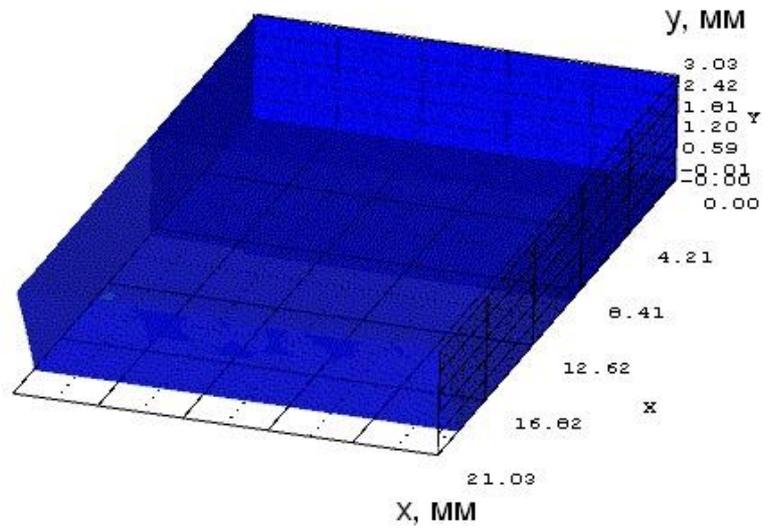
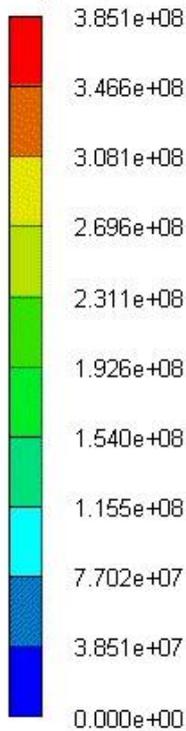


Рисунок 3.67. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 45 \text{ м/с}, T = 430^\circ \text{C}, F = 300 \text{ Н}$$

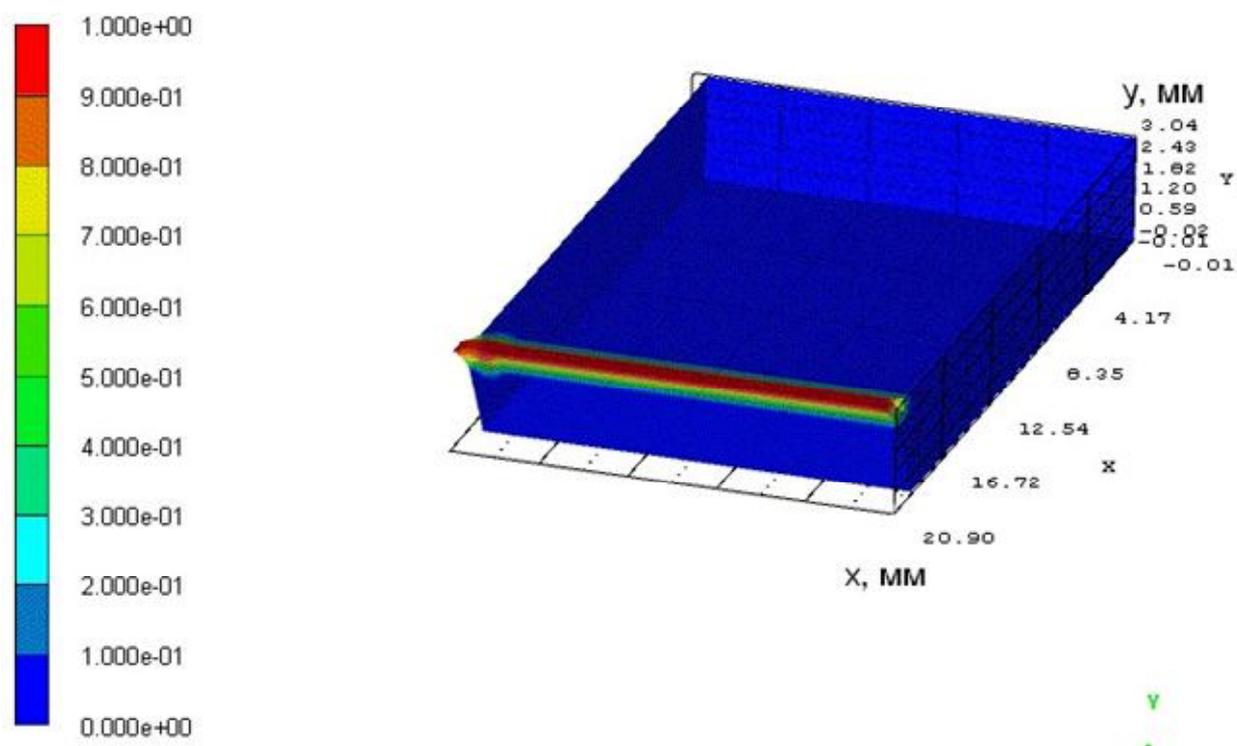


Рисунок 3.68. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 45 \text{ м/с}$ ,  $T = 430 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F = 10 \text{ Н}$ )

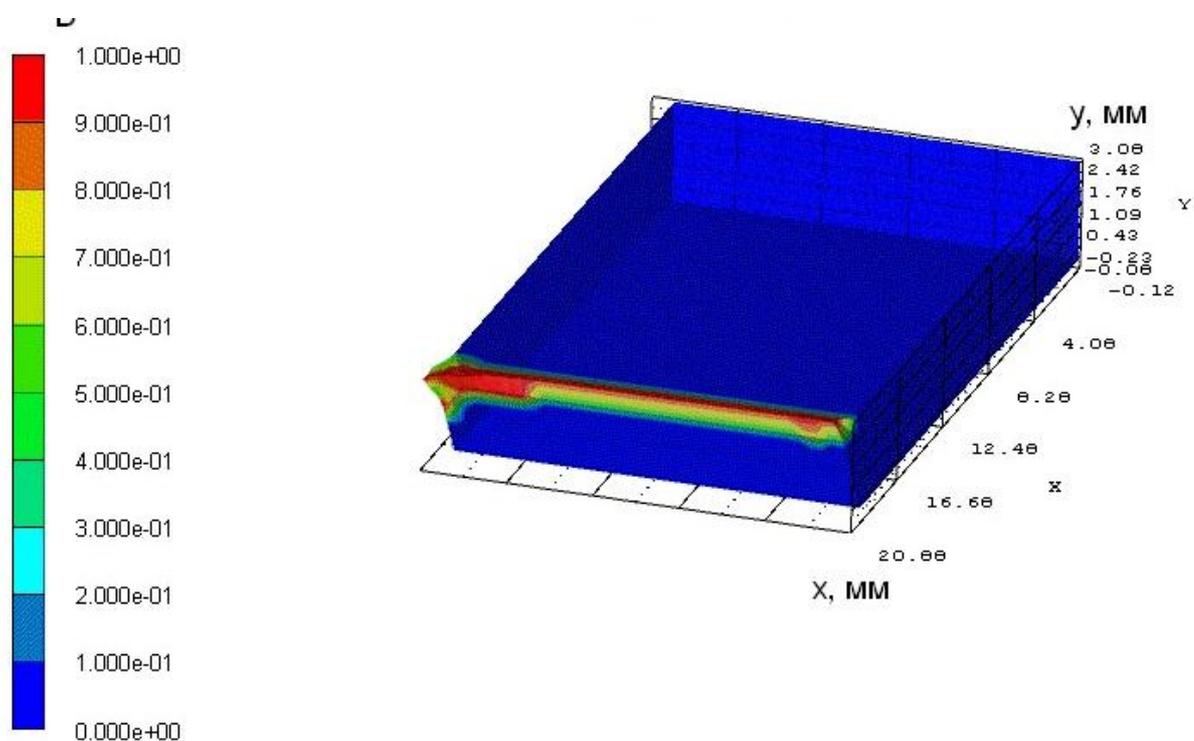


Рисунок 3.69. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 45 \text{ м/с}$ ,  $T = 430 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F = 100 \text{ Н}$ )

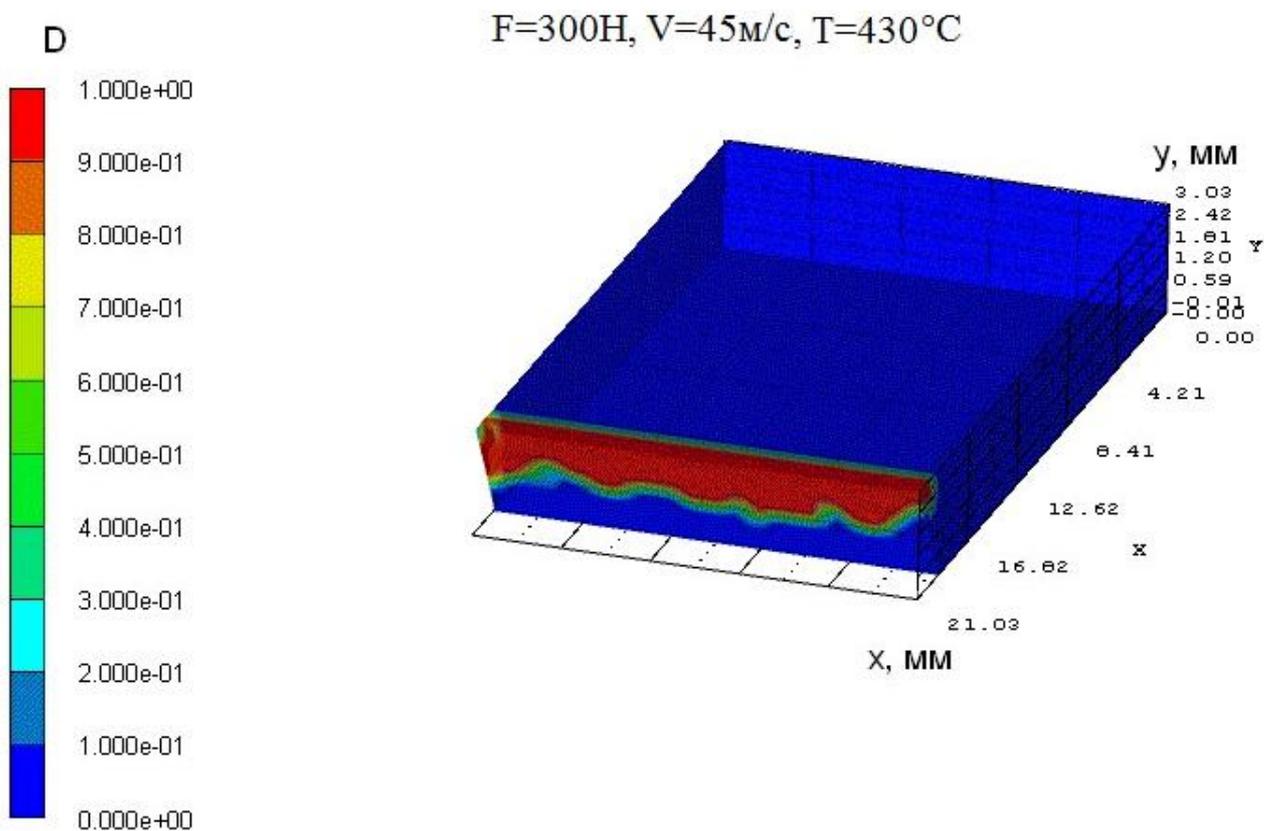


Рисунок 3.70. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 45 \text{ м/с}$ ,  $T = 430 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F = 300 \text{ Н}$ )

Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины (Рисунки 3.68...3.70) определяет удовлетворительное качество режущей кромки на всем ее протяжении только при невысоких силах резания.

Результаты исследования модели в тех же условиях при увеличении температуры в зоне резания до  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  представлены на Рисунках 3.71...3.79.

При невысоких силах резания в точке 3 реализуются растягивающие напряжения. Это может быть связано с тем, что в этих условиях материал вблизи точки 3 сохраняет сопротивление сдвигу и не полностью разрушен.

Критическими с точки зрения начала интенсивного развития микроповреждений в приповерхностных слоях и зонах находящимися вблизи области обработки являются режимы шлифования со скоростью сдвига  $45 \text{ м/с}$  с силами резания порядка  $300 \text{ Н}$ .

Давление (кПа)

$F=10\text{H}$ ,  $V=45\text{м/с}$ ,  $T=1000^\circ\text{C}$

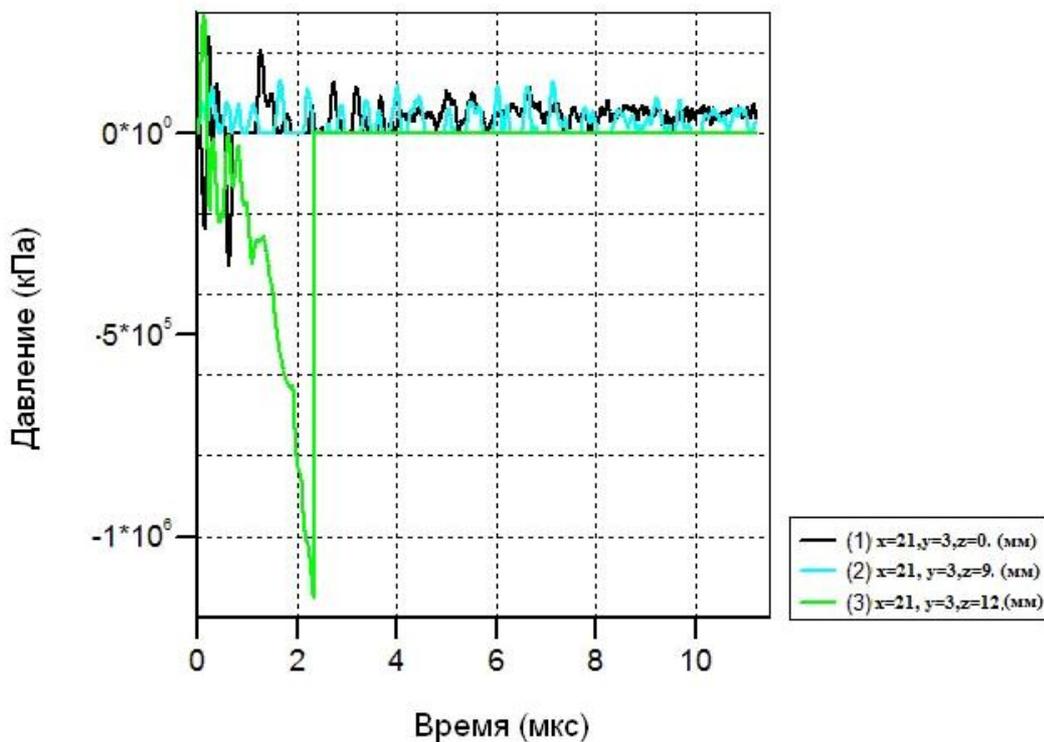
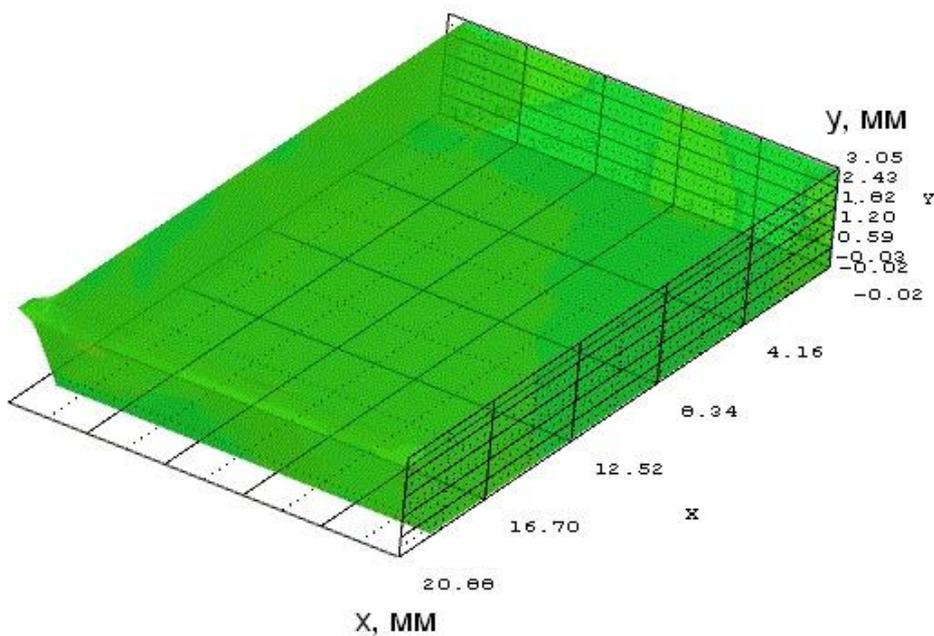
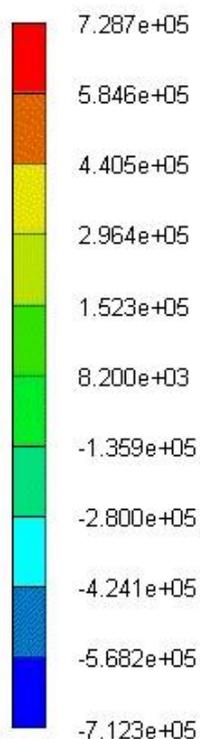


Рисунок 3.71. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 45 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}, F = 10 \text{ Н}$$

Давление (кПа)

$F=100\text{H}$ ,  $V=45\text{м/с}$ ,  $T=1000^\circ\text{C}$

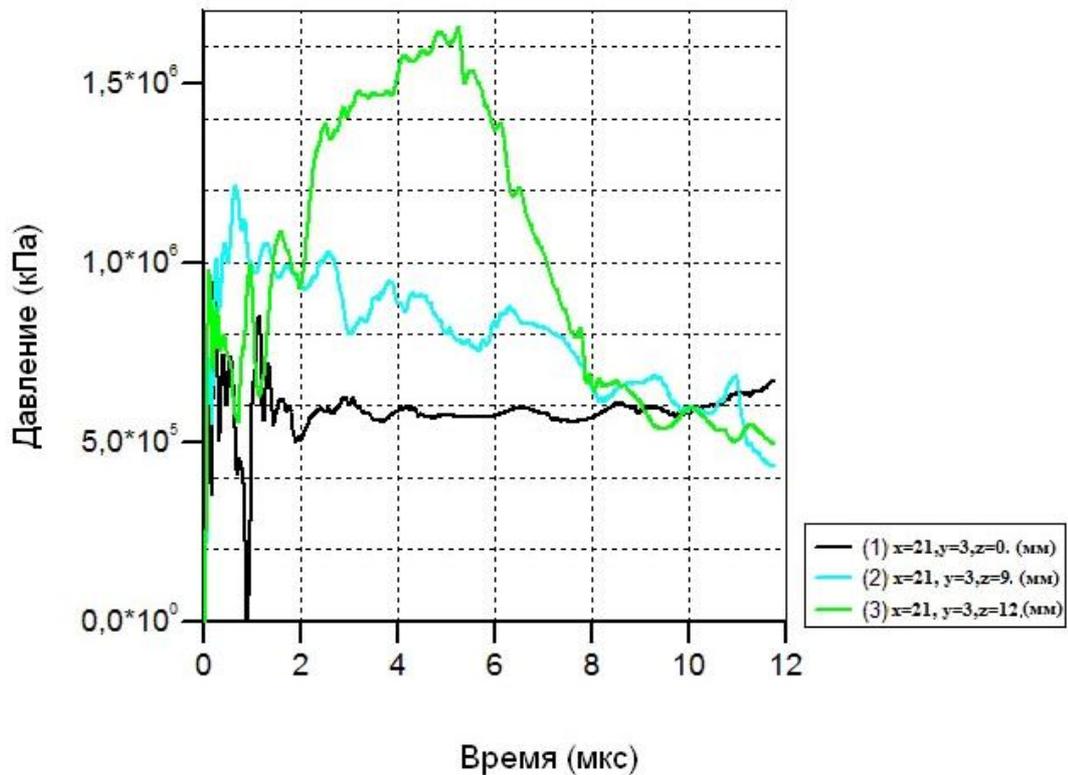
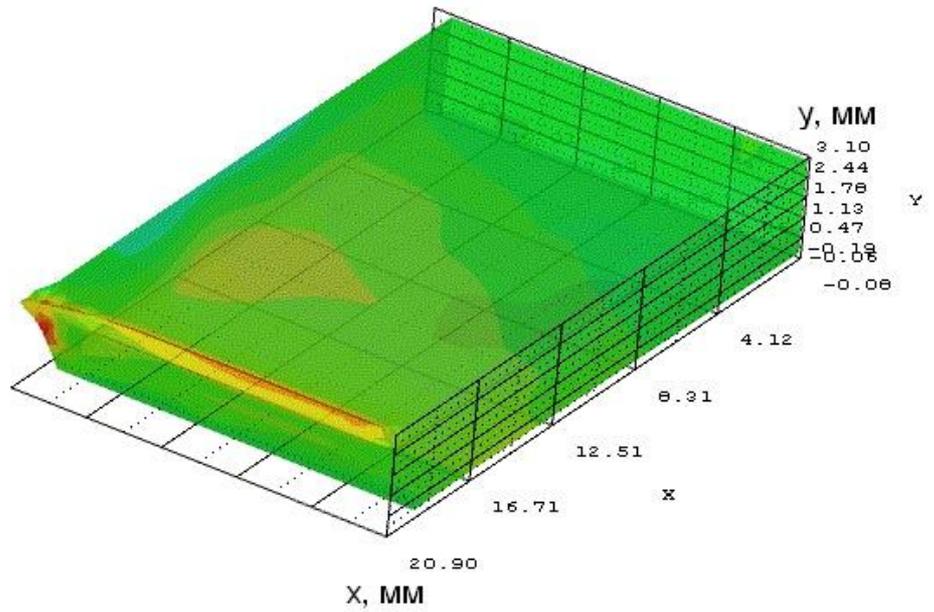
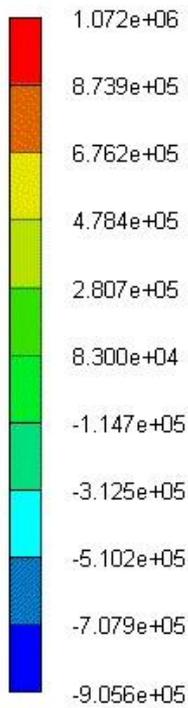


Рисунок 3.72. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 45 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}, F = 100 \text{ Н}$$

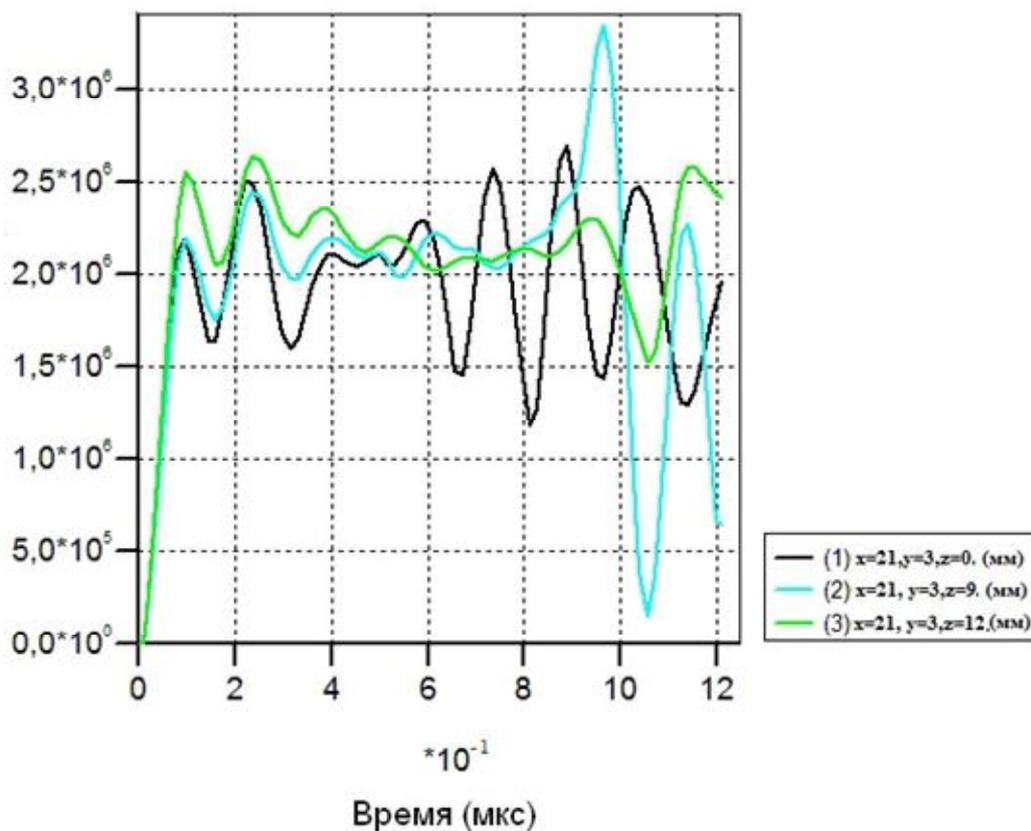
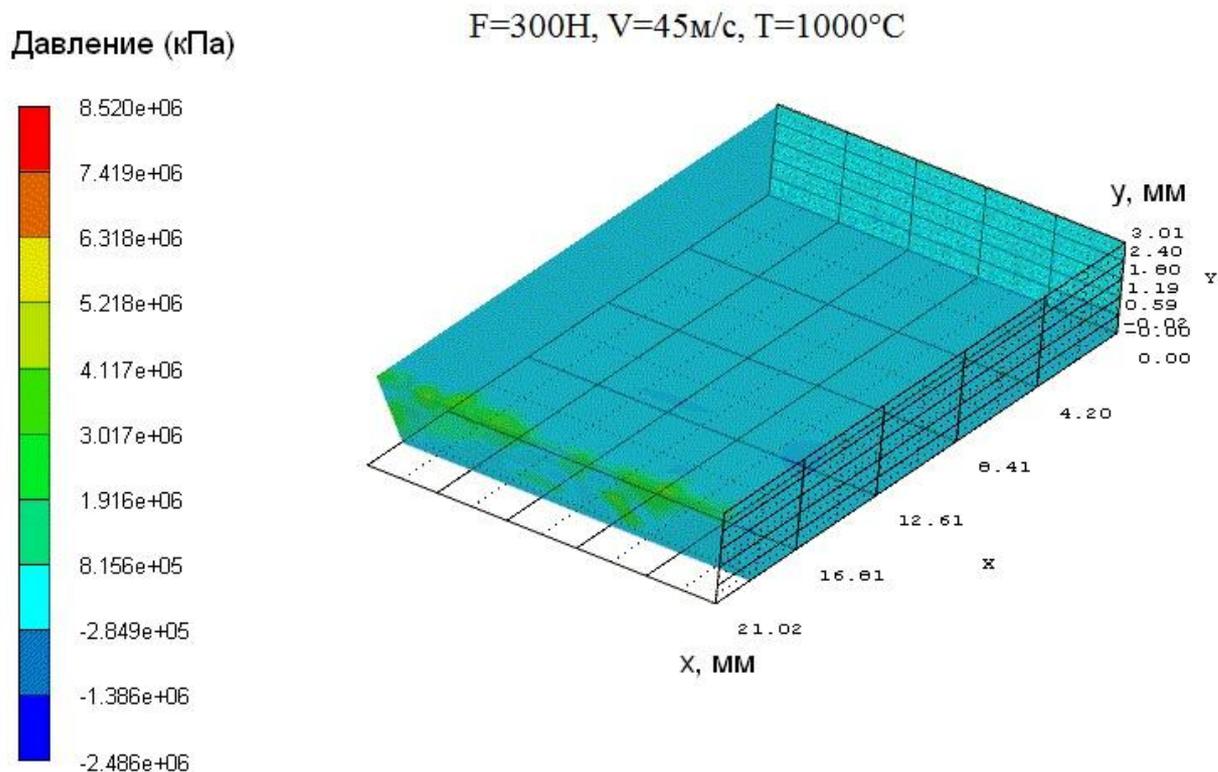


Рисунок 3.73. Распределение давлений в обрабатываемой пластине и расчетные значения давления в зависимости от времени шлифования

$$V = 45 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}, F = 300 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=10\text{H}$ ,  $V=45\text{м/с}$ ,  $T=1000^\circ\text{C}$

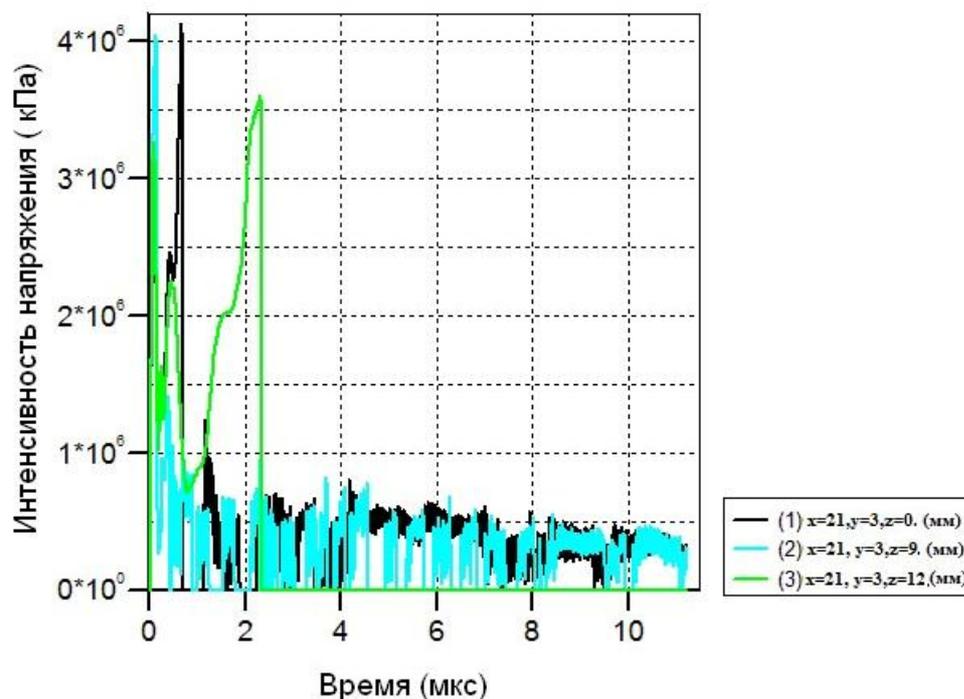
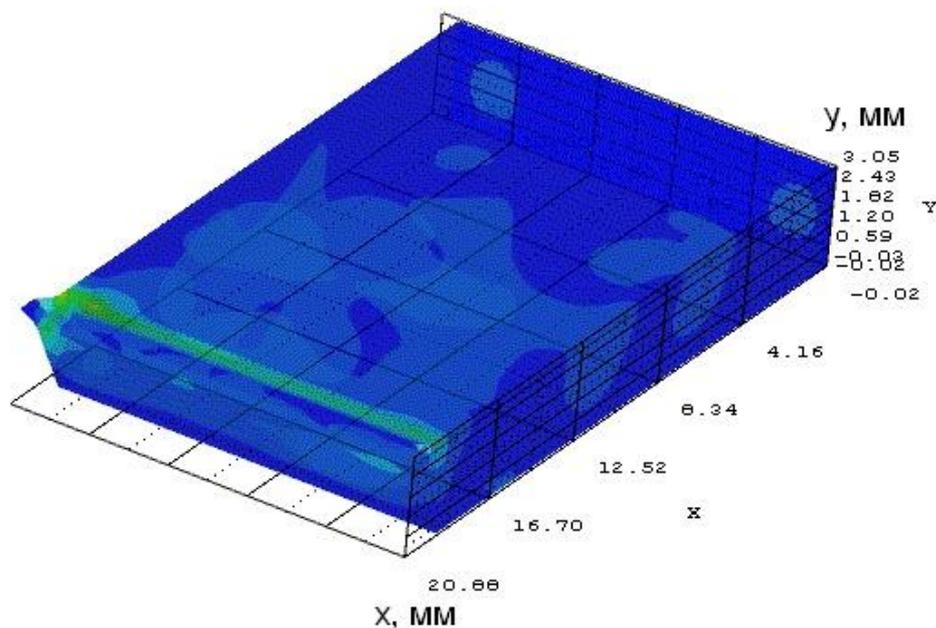
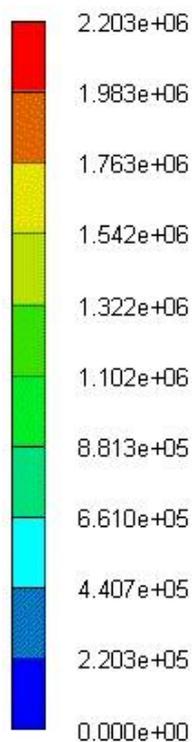


Рисунок 3.74. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 45 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}, F = 10 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=100\text{H}$ ,  $V=45\text{м/с}$ ,  $T=1000^\circ\text{C}$

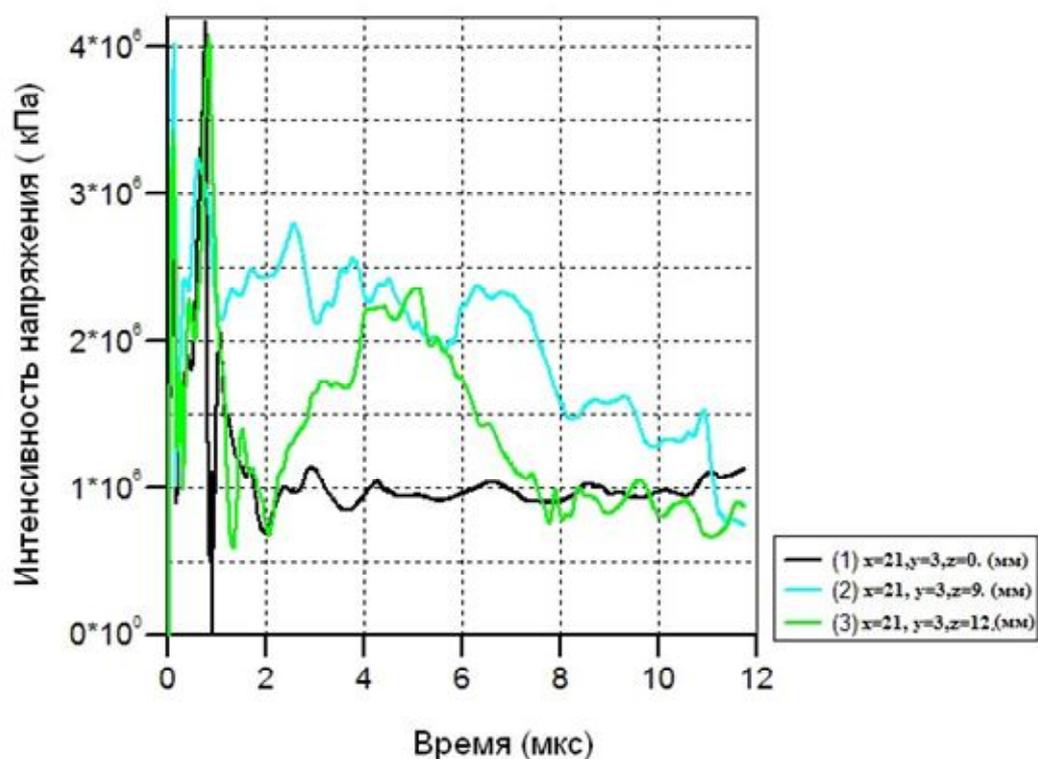
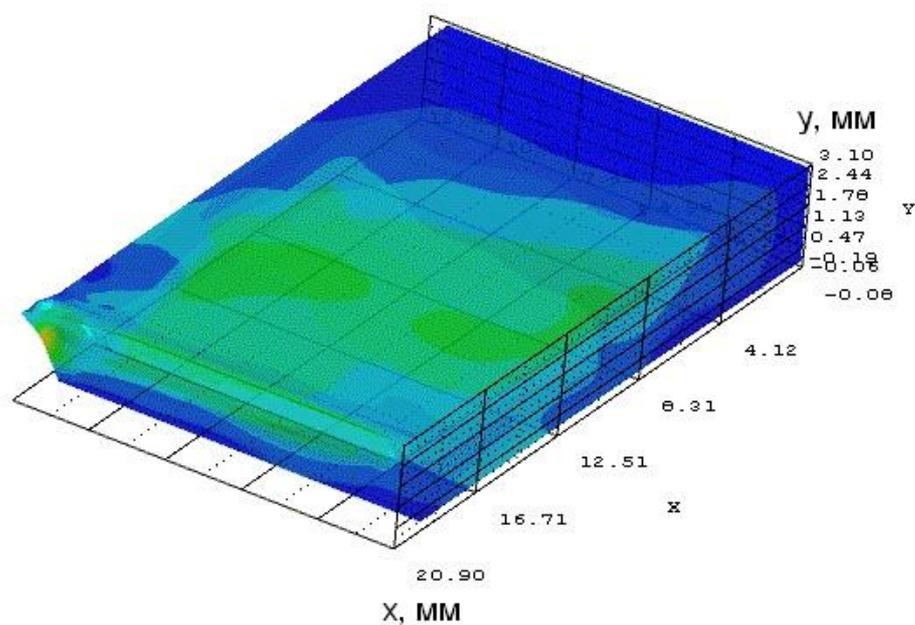
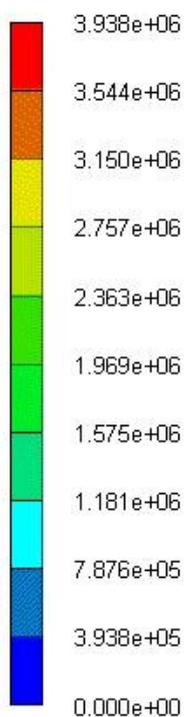


Рисунок 3.75. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 45 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}, F = 100 \text{ Н}$$

Интенсивность  
напряжения (кПа)

$F=300\text{H}$ ,  $V=45\text{м/с}$ ,  $T=1000^\circ\text{C}$

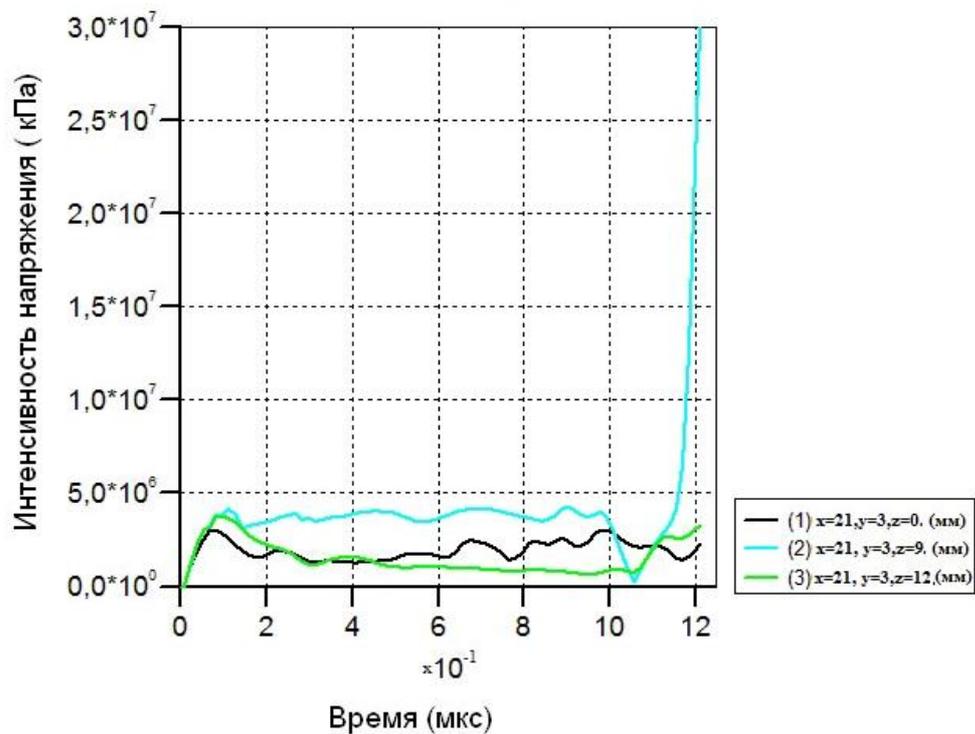
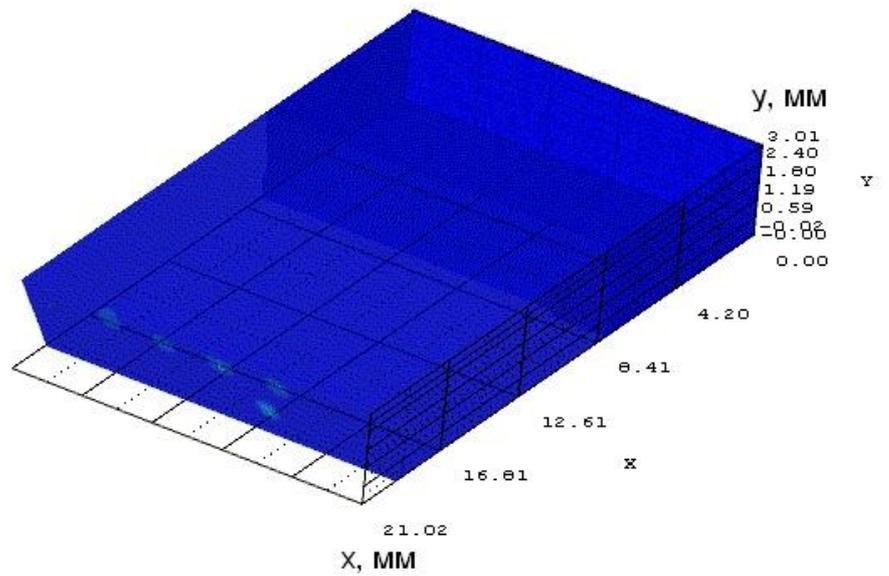
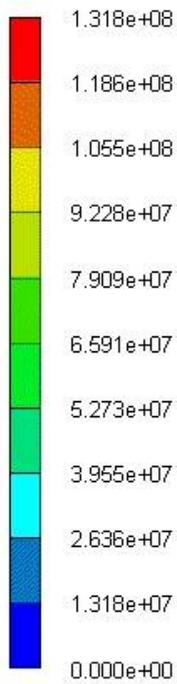


Рисунок 3.76. Распределение интенсивности напряжений в объеме обрабатываемой пластины и расчетные значения зависимости интенсивности сдвиговых напряжений от времени шлифования

$$V = 45 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}, F = 300 \text{ Н}$$

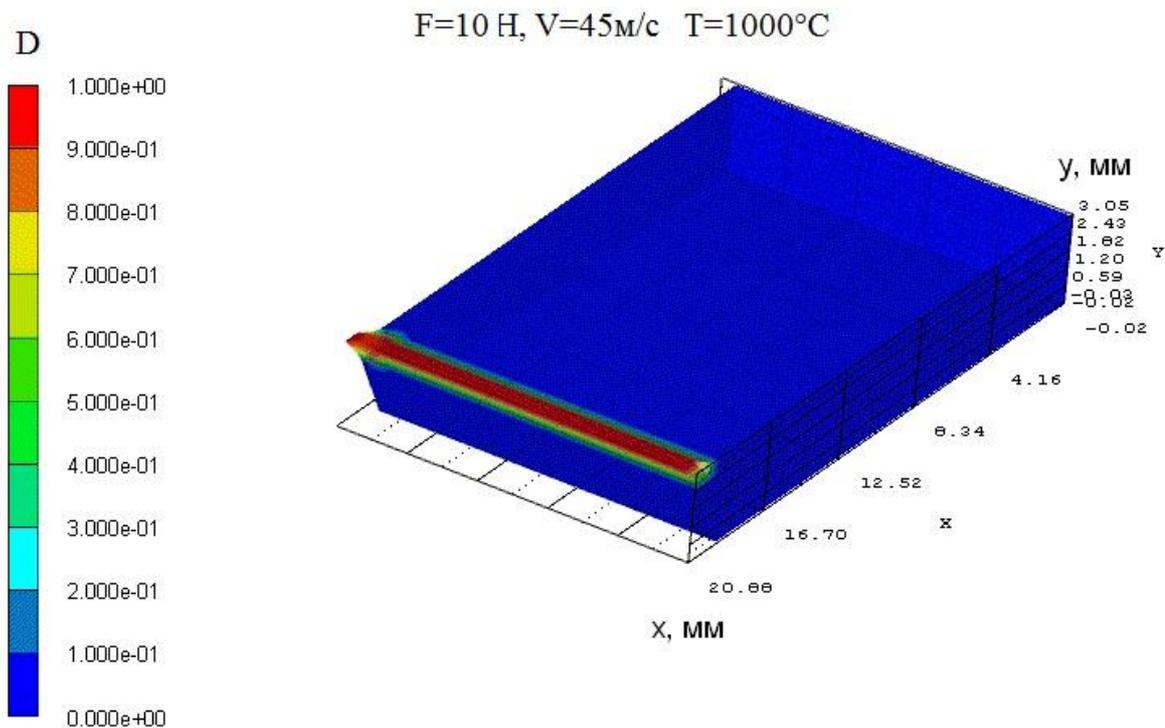


Рисунок 3.77. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 45 \text{ м/с}, T = 1000^\circ\text{C}, F = 10 \text{ H}$ )

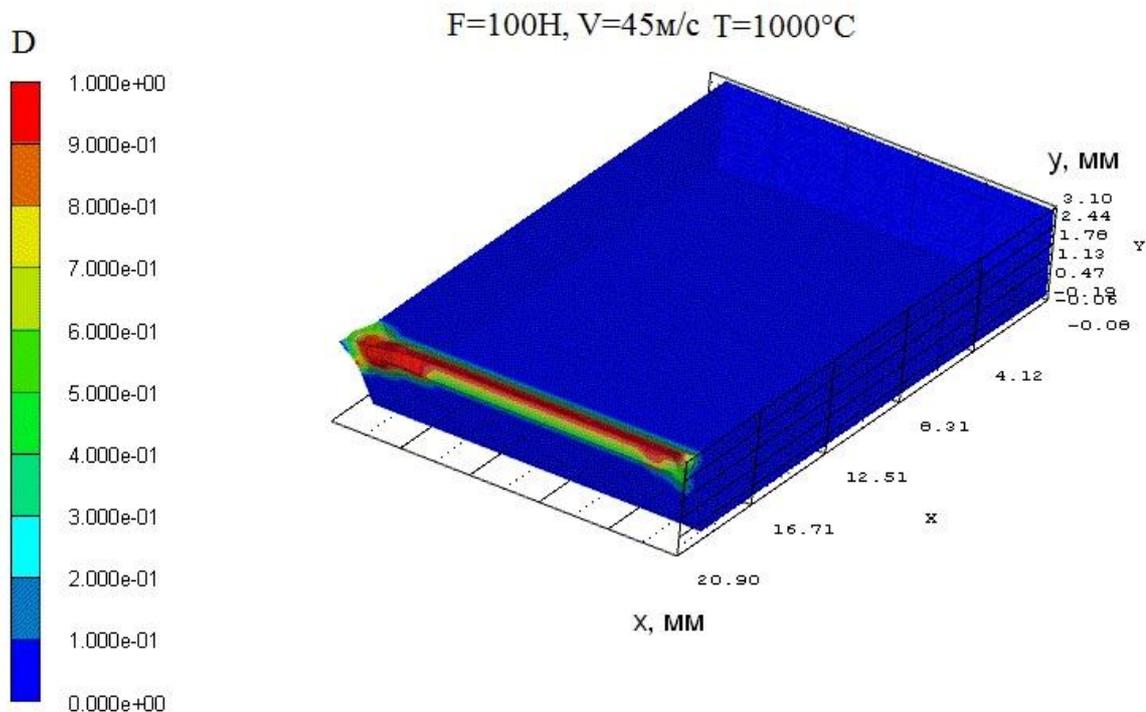


Рисунок 3.78. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 45 \text{ м/с}, T = 1000^\circ\text{C}, F = 100 \text{ H}$ )

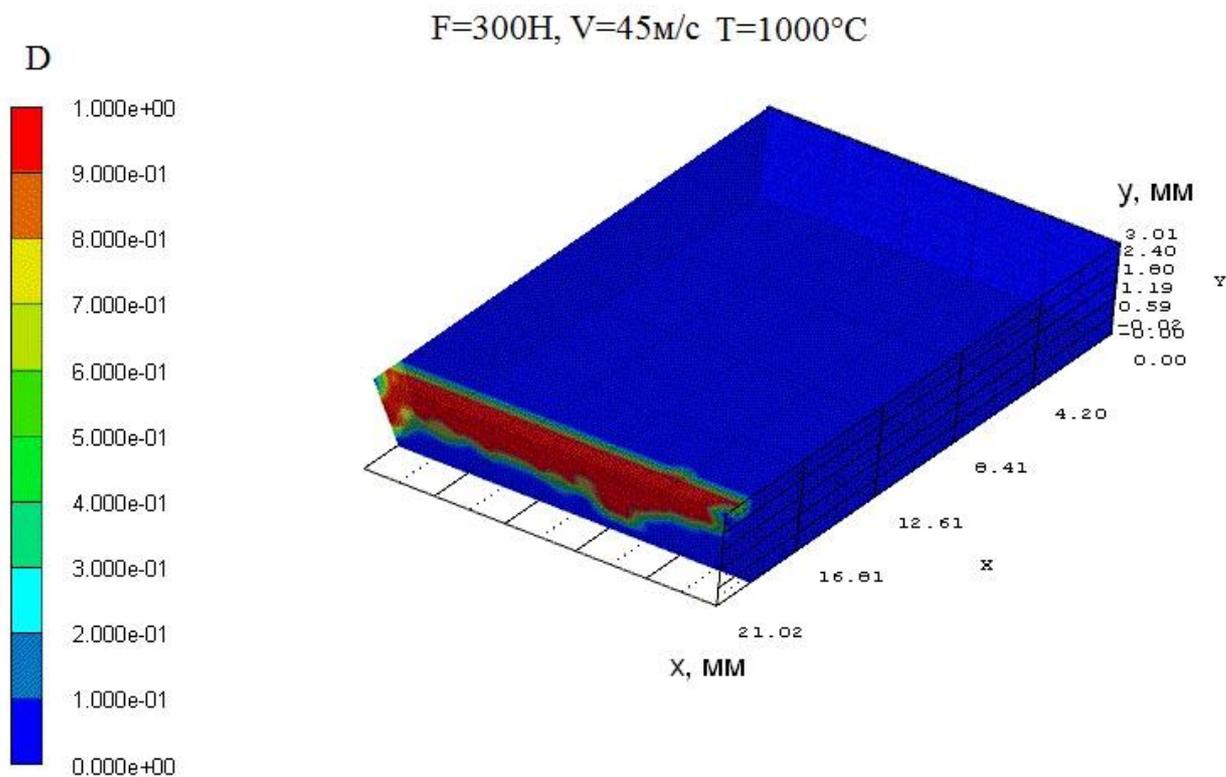


Рисунок 3.79. Распределение значений параметра поврежденности в теле обрабатываемой пластины ( $V = 45 \text{ м/с}, T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}, F = 300 \text{ Н}$ )

*Анализ исследований напряженно-деформированного состояния в затачиваемой пластине твердого сплава*

Анализируя результаты исследований, сформулированы следующие выводы.

Предложена физико-математическая модель процессов деформации, повреждения и разрушения твердых композиционных материалов типа  $WC-Co$  при шлифовании алмазным кругом, позволяющая проводить оценку формирующегося напряженно-деформированного состояния в обрабатываемой пластине. Расчетная модель реализована на примере алмазного затачивания твердосплавной пластины марки ВК6 со специфической геометрией режущих элементов, характерной для инструмента, предназначенного для обработки изделий из композиционных неметаллических материалов. Модель может быть адаптирована и для других композиционных высокопрочных и труднообрабатываемых материалов. Таким образом, появляется возможность оценить напряженно-деформированное состояние при

различных сочетаниях абразивного и инструмента и обрабатываемых композиционных материалов.

Физико-математическая модель позволила выявить, что в результате взаимодействия алмазного круга с поверхностью обрабатываемой пластины в объеме пластины формируется сложное напряженное состояние. Характерные времена формирования квазистационарного напряженного состояния зависят от скорости шлифования, величины силы резания. В композиционном материале ВК6 характерное время стабилизации напряжений составляет от единиц до 50 мкс.

При силах резания до 100 Н – серьезных разрушений режущей кромки не наблюдается. Зонами наибольшей концентрации напряжений являются участки режущей кромки по краям образца режущего элемента, где могут проследиваться частичные разрушения твердого сплава.

При достижении сил резания свыше 100 Н и скоростей резания выше 33 м/с наблюдается разрушение режущей кромки с вырывами отдельных блоков твердого сплава на протяжении всей длины лезвия.

Зоной опасных, с точки зрения разрушений, напряжений является контактная площадка затачиваемой поверхности с абразивным инструментом. С удалением от режущей кромки на величину, превышающую вдвое размер контактирующих поверхностей, напряжения постепенно затухают и не представляют в дальнейшем опасности, с точки зрения возникновения серьезных дефектов.

Критическими, с точки зрения начала интенсивного развития микроповреждений в приповерхностных слоях и зонах, находящихся вблизи области обработки являются условия шлифования (скорость – сила резания): 15 м/с – 300 Н, 33 м/с – 300 Н, 45 м/с – 300 Н.

Результаты моделирования процесса шлифования пластины из сплава ВК6 при линейной скорости  $\sim 45$  м/с и прижимающим усилию 300 Н свидетельствуют о возможности образования повреждений в объеме пластины на глубине свыше мм под обрабатываемой поверхностью.

Анализ данных по распределению параметра поврежденности в обрабатываемой пластине, свидетельствует о том, что при температуре 1000 °С критиче-

ские условия для возникновения микроповреждений в приповерхностных слоях, возникают при более низких силах резания, чем при температуре 430 °С.

Следовательно, для затачивания алмазным абразивным кругом режущих элементов из композиционных инструментальных материалов группы ВК (*WC-Co*), имеющих специфические геометрию и габаритные размеры, присущие для инструмента, обрабатывающего композиционные неметаллические материалы, рекомендуется добиваться линейных скоростей на контактирующих поверхностях в пределах от 33 м/с до 45 м/с. Для достижения удовлетворительного качества подготовленных режущих поверхностей и лезвия инструмента из твердых сплавов необходимо применять методы и условия обработки, гарантирующие силы резания не превышающие 100 Н.

Согласно ранее проведенным исследованиям [187, 199, 207, 221, 212, 214], экспериментально определенные силы резания при различных методах алмазного шлифования твердого сплава составляют:

- традиционное алмазное затачивание без применения электрических процессов  $F = 200$  Н;
- алмазное затачивание с непрерывной электрохимической правкой поверхности алмазного круга  $F = 80$  Н;
- электрохимическое алмазное затачивание  $F = 55$  Н;
- комбинированный метод, сочетающий электрохимическое алмазное затачивание с одновременной непрерывной электрохимической правкой поверхности алмазного круга  $F = 30$  Н.

Следовательно, последние три метода могут быть рекомендованы для качественного формообразования твердосплавных режущих элементов. Однако, требуются комплексное исследование качества затачивания инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов этими методами.

### **Выводы по 3 главе:**

1. При обработке изделий из композиционных материалов, со специфическими требованиями к условиям их обработки, появляется необходимость в изго-

товлении специального режущего инструмента с учетом характерных особенностей геометрии и микрогеометрии режущего лезвия и контактирующих поверхностей режущего элемента. Мероприятия по совершенствованию технологической подготовки инструмента для обработки композиционных материалов направлены на отыскание производительных, эффективных методов изготовления (формообразования) режущих инструментов, в особенности оснащенных труднообрабатываемыми инструментальными материалами.

2. Исследования традиционных методов и условий формообразования режущих элементов твердосплавного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов направлены на выявление негативных факторов, снижающих качество и работоспособность твердосплавного инструмента после его изготовления или восстановления режущей способности после износа.

2. Причины потери режущей способности инструмента при обработке композиционных материалов весьма разнообразны и требуют разработки эффективных мероприятий, способствующих повышению эффективности использования лезвийного инструмента. Наиболее интенсивен при обработке композиционных неметаллических материалов износ режущего лезвия по задней поверхности.

3. Традиционно используемые на производстве методы и способы изготовления и восстановления инструмента для обработки композиционных материалов ведут к снижению качества подготовки инструмента и понижению его работоспособности, что сказывается на качестве выпускаемой продукции. Кроме того, наблюдается значительный расход ресурсов для достижения такими методами необходимого качества обработки.

4. Образование засаленного слоя на поверхности алмазного круга на металлической связке происходит в первые минуты работы и приводит к потере режущей способности абразивного инструмента. Процесс засаливания шлифовальных кругов зависит от структуры, состава связки кругов и обрабатываемого материала, от термодинамических параметров, а также от атомно-молекулярных связей, которые формируют структуру взаимодействующих материалов. Теоретически и экспериментально определена величина засаленного слоя при шлифовании ал-

мазными кругами на металлической связке твердосплавных режущих элементов инструментов для обработки композиционных неметаллических материалов, максимальная величина составляет порядка 30...40 мкм. Определено, что для качественного и производительного шлифования необходимо создать условия в зоне резания, при которых взаимодействие связки и детали не будет сопровождаться образованием засаленного слоя. Такими условиями служит подвод СОТС в зону резания, периодическая правка шлифовального круга и использование комбинированных методов электроалмазного шлифования.

5. Предложена физико-математическая модель процессов деформации, повреждения и разрушения твердосплавных инструментальных материалов группы ВК (*WC-Co*) при шлифовании алмазным кругом, позволяющая проводить оценку формирующегося напряженно-деформированного состояния в обрабатываемой пластине. Расчетная модель реализована на примере алмазного затачивания твердосплавной пластины марки ВК6 со специфической геометрией режущих элементов, характерной для инструмента, предназначенного для обработки изделий из композиционных неметаллических материалов. Модель может быть адаптирована и для других композиционных высокопрочных и труднообрабатываемых материалов. Таким образом, появляется возможность оценить напряженно-деформированное состояние при различных сочетаниях абразивного инструмента и обрабатываемых композиционных материалов.

6. Физико-математическая модель позволила выявить, что в результате взаимодействия алмазного круга с поверхностью обрабатываемой пластины в объеме пластины формируется сложное напряженное состояние. Зоной опасных, с точки зрения разрушений, напряжений является контактная площадка затачиваемой поверхности с абразивным инструментом. Критическими, с точки зрения начала интенсивного развития микрповреждений в приповерхностных слоях, находящихся вблизи зоны резания, при скоростях в диапазоне от 15 м/с до 45 м/с являются силы резания, превышающие 300 Н.

7. По результатам теоретических и экспериментальных исследований выявлено, что для затачивания с гарантированным качеством алмазным абразивным

инструментом режущих элементов из инструментальных твердых сплавов, имеющих специфические геометрию и габаритные размеры, характерные для инструмента, обрабатывающего композиционные неметаллические материалы, рекомендуется использование методов и условий обработки, обеспечивающих силы резания, не превышающие 100 Н, в диапазоне скоростей от 33 м/с до 45 м/с. Согласно предварительно проведенным исследованиям, такие условия обеспечивают комбинированные методы электроалмазной обработки.

## **ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТВЕРДОСПЛАВНОГО РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Анализ традиционных методов затачивания и моделирования напряженно-деформированного состояния при алмазном затачивании твердосплавных режущих элементов инструментов для обработки композиционных неметаллических материалов выявил, имеется необходимость в отыскании производительных, эффективных методов изготовления (формообразования) режущих инструментов, в особенности оснащенных труднообрабатываемыми инструментальными материалами, исследования этих методов, с целью определения рациональной технологии для изготовления прогрессивных конструкций.

Перспективными способами обработки для современной промышленности (и в частности для инструментального производства) являются физико-химические и комбинированные методы размерной обработки [13, 26, 28, 48, 49, 65, 138, 141, 142, 144, 155, 156, 157, 246, 251].

К физико-химическим методам размерной обработки относят методы, обеспечивающие съем обрабатываемого материала в результате физико-химических процессов. По механизму разрушения и съема материала их подразделяют на три группы: электрофизические методы обработки, электрохимические и комбинированные.

К электрофизическим методам относят электроэрозионную обработку, основанную на использовании явления электрической эрозии – разрушения материала электродов при электрическом пробое межэлектродного промежутка.

Размерная электрохимическая обработка заключается в получении деталей требуемой геометрической формы, размеров и качества поверхностей путем снятия с поверхности заготовок слоя металла припуска электрохимическим растворением. Электрохимическая размерная обработка основана на явлении анодного растворения металла, осуществляемого при прохождении тока через электролит,

подаваемый под давлением в зазор между электродами. Скорость растворения металла прямо пропорционально связана с плотностью тока, которая больше там, где меньше зазор. По мере обработки происходит выравнивание плотности тока в зоне обработки, а значит, и межэлектродного зазора [214].

Электрохимический метод обеспечивает сравнительно невысокую производительность (до  $5...7 \text{ мм}^3/\text{мин}$ ) и шероховатость  $R_a = 0,32...2,50 \text{ мкм}$ . При этом обеспечивается отсутствие заусенцев, поверхностных дефектов и напряжений.

Комбинированными называют методы обработки, одновременно совмещающие в одном процессе несколько традиционных методов. Комбинированные методы, использующие подвод в зону резания электрического и механического воздействия, имеют большое число разновидностей [13, 48, 49, 141, 142, 154, 232, 233, 240, 255 и др.].

Например, анодно-абразивная обработка является чистовым высокопроизводительным методом, при котором механическое действие осуществляется абразивным инструментом. Наиболее распространенным видом этой обработки является электрохимическое шлифование, которое выполняют токопроводящим алмазным или абразивным кругом на металлической связке, являющимся катодом.

В то же время, к вопросу выбора видов и режимов комбинированного затачивания твердосплавного инструмента предназначенного для обработки композиционных неметаллических материалов нет единого подхода. Эта проблема требует детального исследования. Необходимо сравнение различных методов с учетом показателей, характеризующих качество и производительность обработки.

#### **4.1. Прогрессивные методы и технологий изготовления (восстановления) твердосплавного инструмента для обработки композиционных материалов**

##### *Методика и условия проведения исследований*

Исходя из вышесказанного, нами проведены исследования качества твердосплавного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов после обработки режущих элементов различными методами комбинированного

алмазного шлифования.

В качестве сравниваемых методов нами выбраны следующие методы алмазного шлифования:

1. Традиционное алмазное затачивание без применения электрофизических и электрохимических процессов для сравнения комбинированных методов обработки с методами, используемыми на сегодняшний день на большинстве предприятий для формообразования твердосплавного инструмента.

2. Алмазно-электрохимическое шлифование, когда затачиваемый инструмент подключается к положительному полюсу источника постоянного тока, а алмазный круг на металлической связке – к отрицательному. В этом случае электрическая цепь замыкается через электролит, подаваемый в зазор, образуемый между алмазными зернами и затачиваемой поверхностью.

3. Алмазное шлифование с непрерывной электрохимической правкой круга. При этом алмазный круг на металлической связке подключается к положительному полюсу источника постоянного тока, специальный катод – к отрицательному, а затачиваемый инструмент является электронейтральным. При подаче электролита в область контакта шлифовального круга с катодом и включении источника постоянного тока образуется замкнутая электрическая цепь, способствующая электрохимическому травлению продуктов засаливания и отчасти связки круга, что обеспечивает освобождение затупившихся алмазных зерен и сохранение чистоты алмазоносного слоя, его высоких и притом постоянных во времени режущих свойств, т.е. работу круга в режиме самозатачивания [29].

4. Для сравнения с представленными выше известными методами предлагается разработанный нами комбинированный метод электрохимического шлифования с одновременной непрерывной правкой шлифовального круга [97, 131, 211, 213]. Схема обработки по данному методу представлена на Рисунке 4.1.

Сущность метода заключается в анодном растворении продуктов засаливания на поверхности шлифовального круга, причем таком, при котором круг работает в режиме самозатачивания, и одновременном травлении рабочей зоны затачиваемого инструмента. В итоге резание осуществляется всегда острыми зернами,

что является гарантией высокого качества заточенного инструмента. С другой стороны, под действием анодно-химических процессов увеличивается удельный сьем материала заготовки, растет производительность и снижается расход алмазных кругов, разумеется, при работе на научно обоснованных рациональных электрических и механических режимах.

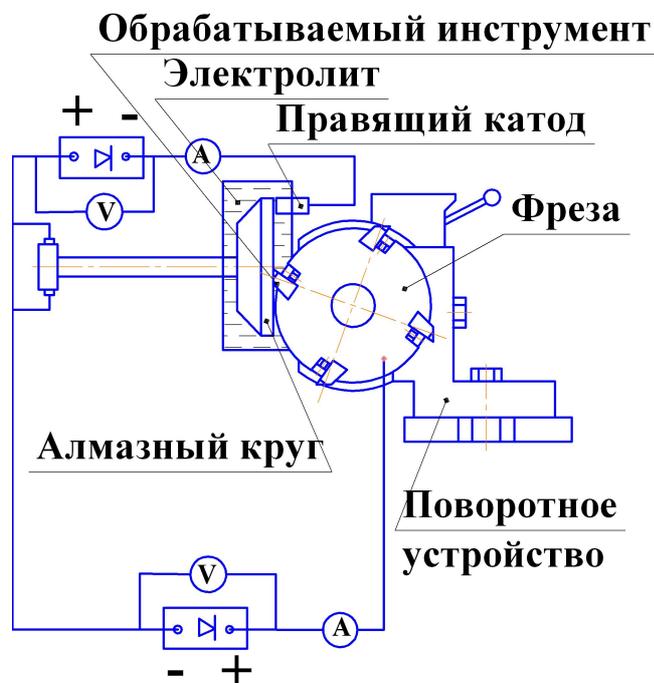


Рисунок 4.1. Схема комбинированной обработки методом электрохимического шлифования с одновременной непрерывной правкой шлифовального алмазного круга на металлической связке

Методы электроалмазного шлифования используются длительное время, поэтому известны и факторы, влияющие на процесс шлифования [187, 214]: плотность тока правки  $i_{np}$  [А/см<sup>2</sup>], плотность тока травления  $i_{mp}$  [А/см<sup>2</sup>], скорость резания  $V$  [м/с], глубина резания  $t$  [мм/дв.х] и подача  $S$  [м/мин]. В условиях одного и того же аппаратного оформления процесса данные факторы достаточно полно отражают технологию электроалмазного шлифования.

В качестве выходных параметров (откликов) процесса исследовались: шероховатость обработанной поверхности  $R_a$  [мкм], мощность резания  $N$  [кВт], микротвердость обработанной поверхности  $HV$  [МПа], расход алмазного круга при обработке (отношение изменения объема алмазного круга к объему обработанно-

го материала заготовки)  $q$  [ $\text{мм}^3/\text{мм}^3$ ].

Кроме того, качество обработки оценивалось по топографии обработанных поверхностей с использованием оптической интерферометрии и сканирующей зондовой микроскопии. Состояние заточенных поверхностей и режущей кромки инструмента контролировалось с использованием оптической и растровой электронной микроскопии.

Инструментальными материалами для проведения исследований выбраны твердые сплавы нескольких марок ВК3М, ВК8, ВК15, ТН20, как показавшие высокие стойкостные свойства при проведенных ранее предварительных испытаниях [179, 211].

При исследованиях использовался алмазный круг на металлической токопроводящей связке марки 12А2 - 45 100/80 М1 - 01 АС6 32×150×40.

В качестве электролита применялся раствор солей: 0,5 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и 1 %  $\text{NaCl}$  в воде. Согласно показаниям кондуктометра КСЛ-101, проводимость электролита составила 26 См/см, содержание солей – 20 г/л.

#### **4.2. Выявление рациональных электрических режимов комбинированной электроалмазной обработки**

Для выявления рациональных электрических режимов комбинированного электроалмазного затачивания был выбран комбинированный метод электроалмазного шлифования, сочетающий в себе цепи анодного растворения обрабатываемого материала и электрохимической правки поверхности алмазного круга.

Для проведения исследований предпринято планирование экспериментов, необходимое, прежде всего, для сведения к минимуму количества опытов в ходе определения математической модели исследуемого процесса с целью сокращения материальных затрат и времени. Наибольшее распространение получили эксперименты, в которых факторы варьируют на двух уровнях, в этом случае необходимо поставить опытов  $2^k$ , где  $k$  – количество факторов [153].

В данном случае проводились исследования изменения условий и парамет-

ров комбинированной обработки от электрических режимов затачивания твердосплавного инструмента: плотности тока правки круга  $i_{пр}$  (А/см<sup>2</sup>) и плотность тока травления детали  $i_{тр}$  (А/см<sup>2</sup>). Таким образом, количество факторов  $k = 2$ , количество опытов – 4.

Режимы затачивания выбирались в соответствии с рекомендациями, гарантирующими высокое качество поверхности, разработанные ранее [187]. Согласно рекомендациям плотность тока правки круга должна быть не более  $i_{пр} < 0,2$  А/см<sup>2</sup>, плотность тока травления детали –  $i_{тр} < 15$  А/см<sup>2</sup>, продольная подача –  $S_{пр} < 2,0$  м/мин, поперечная подача –  $t < 0,04$  мм/дв.ход, скорость –  $V = 19,6$  м/с.

Таким образом, для опытов в данном исследовании принимаются значения плотности тока травления и плотности тока правки круга, представленные в Таблице 4.1. Матрица планирования представлена в Таблице 4.2.

Согласно планированию, эксперимент имеет равномерное дублирование опытов, а число повторений каждого опыта равно трем.

Таблица 4.1

#### Кодирование факторов

Интервал варьирования и уровень факторов	Плотность тока правки круга, $i_{пр}$ , А/см <sup>2</sup>	Плотность тока травления, $i_{тр}$ , А/см <sup>2</sup>
Кодовое обозначение	$X_1$	$X_2$
Верхний уровень $x_i = + 1$	0,6	40
Нижний уровень $x_i = - 1$	0	0
Интервал варьирования $\delta_i$	0,3	20
Нулевой уровень $x_i = 0$	0,3	20

Таблица 4.2

#### Матрица планирования полнофакторного эксперимента

№	Порядок реализации опытов (серии экспериментов)			Порядок варьирования факторов			
	I	II	III	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_1 \times X_2$
1	1	4	3	+	+	+	+
2	2	3	1	+	-	+	-
3	3	2	4	+	+	-	-
4	4	1	2	+	-	-	+

Остальные режимы обработки следующие:  $S_{пр} = 1,5$  м/мин;  $t = 0,02$  мм/дв.ход;  $V = 35$  м/с.

Согласно принятым значениям в цепи правки необходимо обеспечить силу тока равную  $I_{\text{пр}} = i_{\text{пр}} \cdot S_{\text{кат}}$ , где  $S_{\text{кат}}$  - рабочая площадь катода ( $S_{\text{кат}} = 3,5 \text{ см}^2$ ).

Тогда,

$$I_{\text{пр}} = 0,6 \cdot 3,5 = 2,1 \text{ А.}$$

В цепи травления необходимо обеспечить силу тока равную  $I_{\text{тр}} = i_{\text{тр}} \cdot S_{\text{конт}}$ , где  $S_{\text{конт}}$  - площадь контакта круга с деталью.

Поскольку режущие элементы имеют различные размеры, то площадь контакта и ток в цепи травления будут изменяться соответствующим образом (Таблица 4.3).

Таблица 4.3

Параметры при электрохимическом травлении детали

Марка режущих элементов	Плотность тока травления, $i_{\text{тр}}$ , А/см <sup>2</sup>	Площадь контакта круга с деталью, $S_{\text{конт}}$ , см <sup>2</sup>		Ток травления, $I_{\text{тр}}$ , А (по передней/по задней поверхности)
		при обработке		
		по передней поверхности	по задней поверхности	
ВК8	40	2,65	0,71	106/28
ВК15		3,72	0,67	149/27
ВК3М		2,1	0,99	84/40
ТН20		1,69	0,72	67/29

В данном случае использовалось ортогональное планирование первого порядка, которое позволяет получить зависимость вида [153]:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j . \quad (4.1)$$

Для каждой строки матрицы по результатам параллельных опытов определялось среднее значение функции отклика:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_{ju} ; \quad (4.2)$$

где  $u$  – номер параллельного опыта;  $y_{ju}$  – значение функции отклика в  $u$ -том параллельном опыте  $j$ -той строки матрицы;  $n$  – число параллельных опытов.

Оценка отклонений функции отклика от его среднего значения для каждой строки матрицы планирования производилась вычислением дисперсии  $S_j^2$  опыта по данным  $n$  параллельных опытов [153]:

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2 . \quad (4.3)$$

Однородность ряда дисперсий проверялась с помощью  $G$ -критерия Кохрена, представляющего собой отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий:

$$G_p = \frac{S_{\max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} < G_T , \quad (4.4)$$

где  $G_T$  – табличное значение  $G$ -критерия;

Для данного случая  $G_T = 0,7679$  [63, 153].

При однородности дисперсий  $S_j^2$  определялась дисперсия  $S_y^2$  воспроизводимости эксперимента:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S_j^2 , \quad (4.5)$$

где  $N$  – число опытов.

По результатам эксперимента вычислялись коэффициенты модели. Свободный член  $b_0$  определялся по формуле [63, 153]:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{y}_j . \quad (4.6)$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты определялись по выражению:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{y}_j . \quad (4.7)$$

Коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия определялись по формуле:

$$b_{il} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} \bar{y}_j , \quad (4.8)$$

где  $i, l$  – номера факторов;  $x_{ij}, x_{lj}$  - кодированные значения факторов  $i$  и  $l$  в  $j$ -том опыте.

Проверка значимости коэффициентов регрессии определялась с помощью  $t$ -критерия Стьюдента [63, 153]:

$$t_p = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}} > t_T, \quad (4.9)$$

где  $t_p$  – расчетное значение критерия Стьюдента;  $t_T$  – табличное значение критерия Стьюдента при принятом уровне значимости и числе степеней свободы. Принимая уровень значимости 5% при числе степеней свободы 8, получим:  $t_T = 2,3$ ;  $S\{b_i\}$  - ошибка в определении  $i$ -того коэффициента регрессии.

Дисперсия  $i$ -того коэффициента регрессии определялась по формуле:

$$S^2\{b_i\} = \frac{1}{nN} S_y^2. \quad (4.10)$$

После расчета коэффициентов модели и проверки их значимости определялась дисперсия адекватности [63, 153]:

$$S_{ad}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{N - (k + 1)}, \quad (4.11)$$

где  $\bar{y}_j$  - среднее арифметическое значение функции отклика в  $j$ -том опыте;  $y_j$  - среднее значение функции отклика, вычисленное по модели для условий  $j$ -того опыта;  $k$  – число факторов.

Заключительным этапом обработки результатов эксперимента проводилась проверка гипотезы адекватности найденной модели по  $F$ -критерию Фишера:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} < F_T, \quad (4.12)$$

где  $F_T$  – табличное значение критерия Фишера при принятом уровне значимости и числе степеней свободы. Принимая уровень значимости 5% при числе степеней свободы 8, получим:  $F_T = 3,6$ .

После проведения исследований и обработки результатов экспериментов, по представленной выше методике, получены адекватные математические зависимости шероховатости обработанных поверхностей, расхода алмазного круга на металлической связке и изменения мощности резания от электрических режимов

комбинированной электроалмазной обработки.

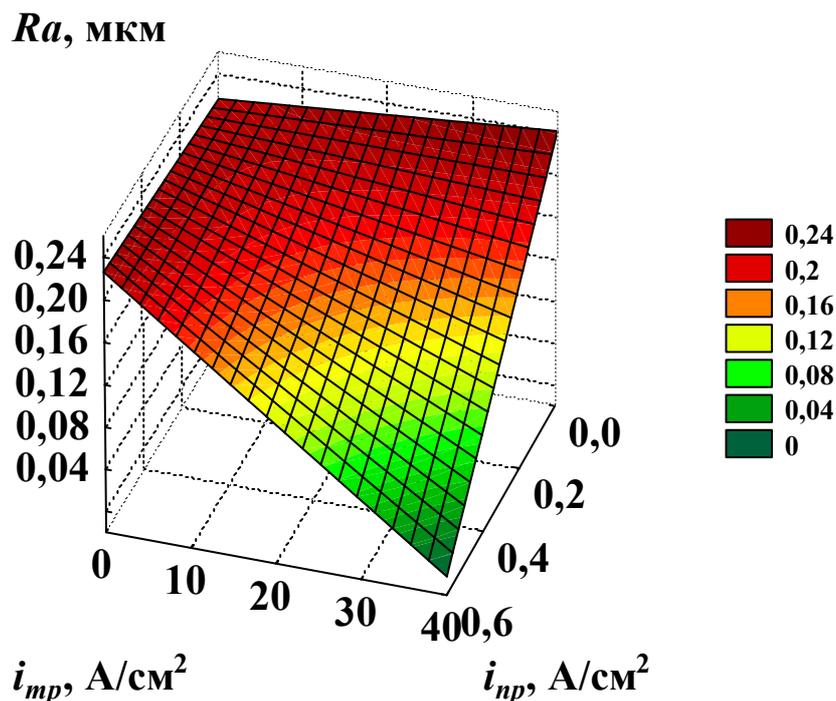


Рисунок 4.2. Зависимость шероховатости поверхности сплава ВКЗМ от электрических режимов комбинированного электроалмазного шлифования

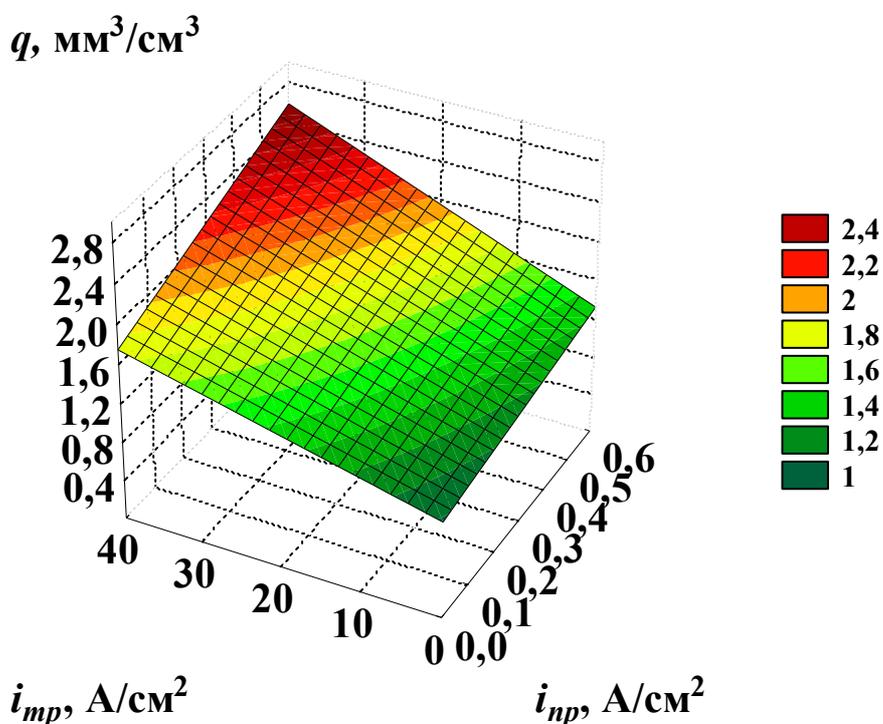


Рисунок 4.3. Зависимость расхода алмазного круга при обработке сплава ВКЗМ от электрических режимов комбинированного электроалмазного шлифования

По результатам исследования сплава ВКЗМ зависимость шероховатости  $R_a$  [мкм] обработанной поверхности от электрических режимов обработки  $i_{np}$  [А/см<sup>2</sup>] и  $i_{mp}$  [А/см<sup>2</sup>] имеет вид:

$$R_a = 0,2157 + 0,0174 \cdot i_{np} - 0,00065 \cdot i_{mp} - 0,0106 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (4.13)$$

Поверхность отклика представлена на Рисунке 4.2.

Зависимость расхода алмазного круга  $q$  [мм<sup>3</sup>/мм<sup>3</sup>] от электрических режимов обработки  $i_{np}$  [А/см<sup>2</sup>] и  $i_{mp}$  [А/см<sup>2</sup>] сплава ВКЗМ имеет вид:

$$q = 0,9875 + 0,5611 \cdot i_{np} + 0,019 \cdot i_{mp} + 0,0207 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (4.14)$$

Поверхность отклика в этом случае представлена на Рисунке 4.3.

Зависимость изменения мощности резания  $N$  [кВт] от электрических режимов обработки  $i_{np}$  [А/см<sup>2</sup>] и  $i_{mp}$  [А/см<sup>2</sup>] сплава ВКЗМ следующая:

$$N = 2,38 - 1,2321 \cdot i_{np} - 0,0122 \cdot i_{mp} + 0,00083 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (4.15)$$

Поверхность отклика в этом случае представлена на Рисунке 4.4.

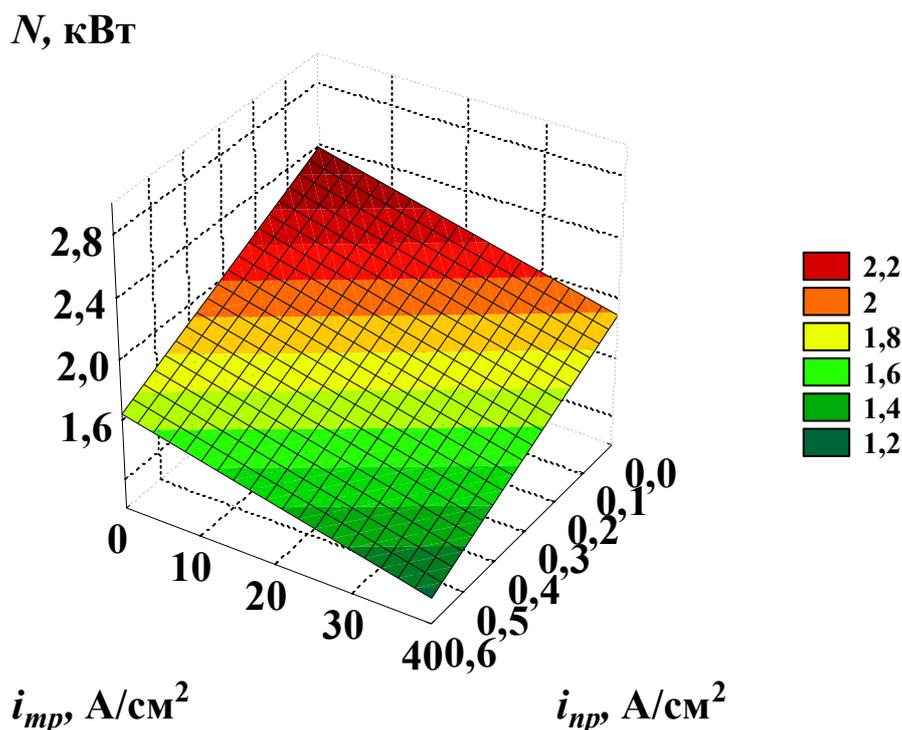


Рисунок 4.4. Зависимость изменения мощности резания при обработке сплава ВКЗМ от электрических режимов комбинированного электроалмазного шлифования

Обработка сплава ВК8 позволила получить зависимость шероховатости  $R_a$  [мкм] обработанной поверхности от электрических режимов обработки  $i_{np}$  [А/см<sup>2</sup>]

и  $i_{mp}$  [А/см<sup>2</sup>] следующего вида:

$$R_a = 0,3286 + 0,1376 \cdot i_{np} - 0,00568 \cdot i_{mp} - 0,0017 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (4.16)$$

Поверхность отклика по результатам экспериментальных исследований представлена на Рисунке 4.5.

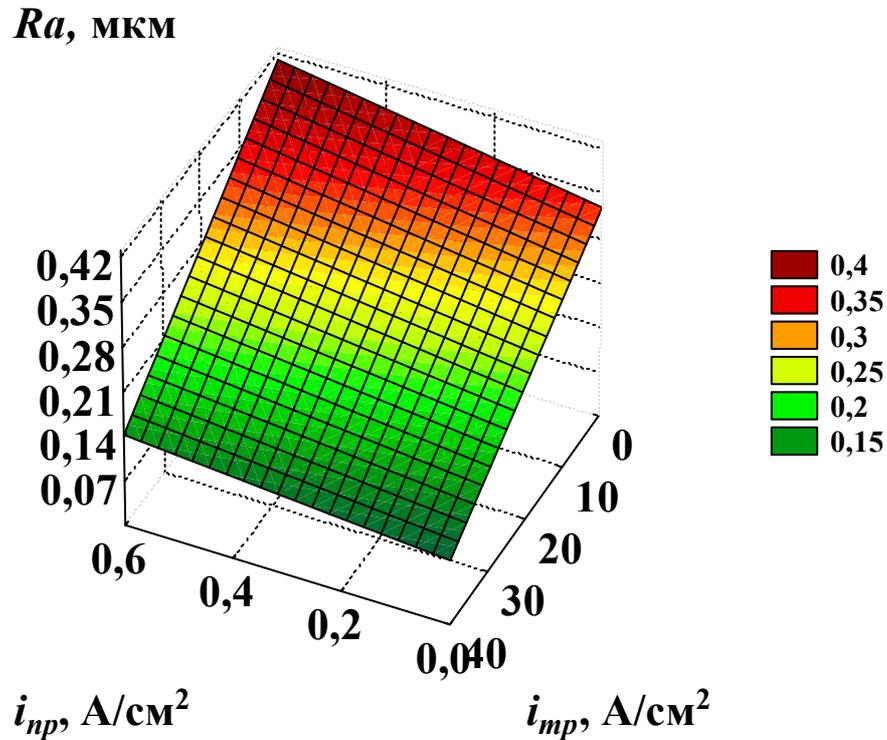


Рисунок 4.5. Зависимость шероховатости поверхности сплава ВК8 от электрических режимов комбинированного электроалмазного шлифования

Полученная зависимость расхода алмазного круга  $q$  [мм<sup>3</sup>/мм<sup>3</sup>] от электрических режимов обработки  $i_{np}$  [А/см<sup>2</sup>] и  $i_{mp}$  [А/см<sup>2</sup>] сплава ВК8 имеет вид:

$$q = 0,723 + 0,8325 \cdot i_{np} - 0,005 \cdot i_{mp} + 0,0206 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (4.17)$$

Поверхность отклика представлена на Рисунке 4.6.

Зависимость изменения мощности резания  $N$  [кВт] от электрических режимов обработки  $i_{np}$  [А/см<sup>2</sup>] и  $i_{mp}$  [А/см<sup>2</sup>] сплава ВК8 следующая:

$$N = 2,325 - 0,2497 \cdot i_{np} - 0,005 \cdot i_{mp} \quad (4.18)$$

Поверхность отклика в этом случае представлена на Рисунке 4.7.

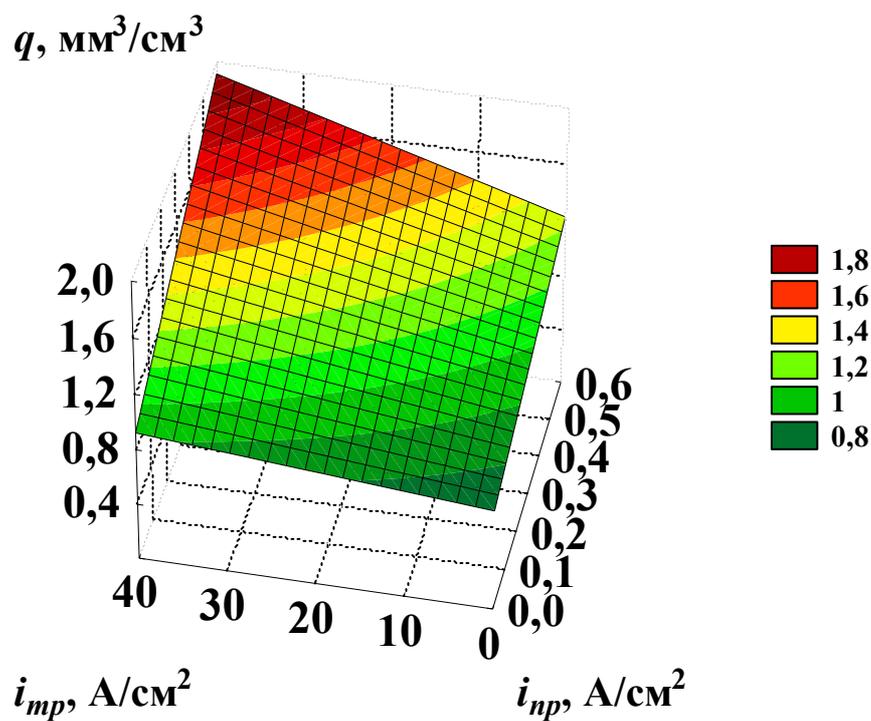


Рисунок 4.6. Зависимость расхода алмазного круга при обработке сплава ВК8 от электрических режимов комбинированного электроалмазного шлифования

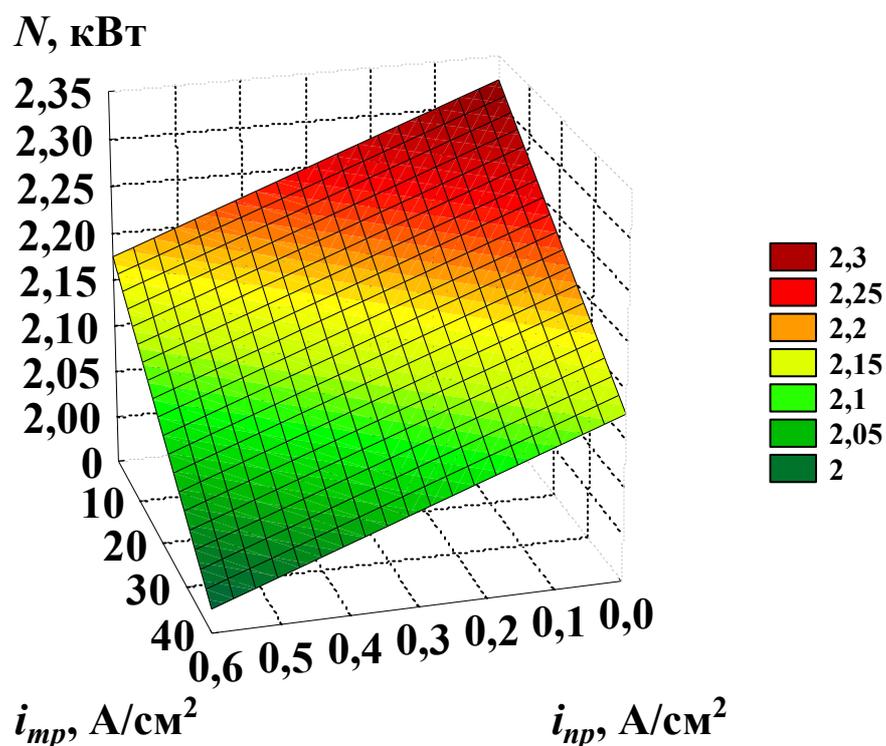


Рисунок 4.7. Зависимость изменения мощности резания при обработке сплава ВК8 от электрических режимов комбинированного электроалмазного шлифования

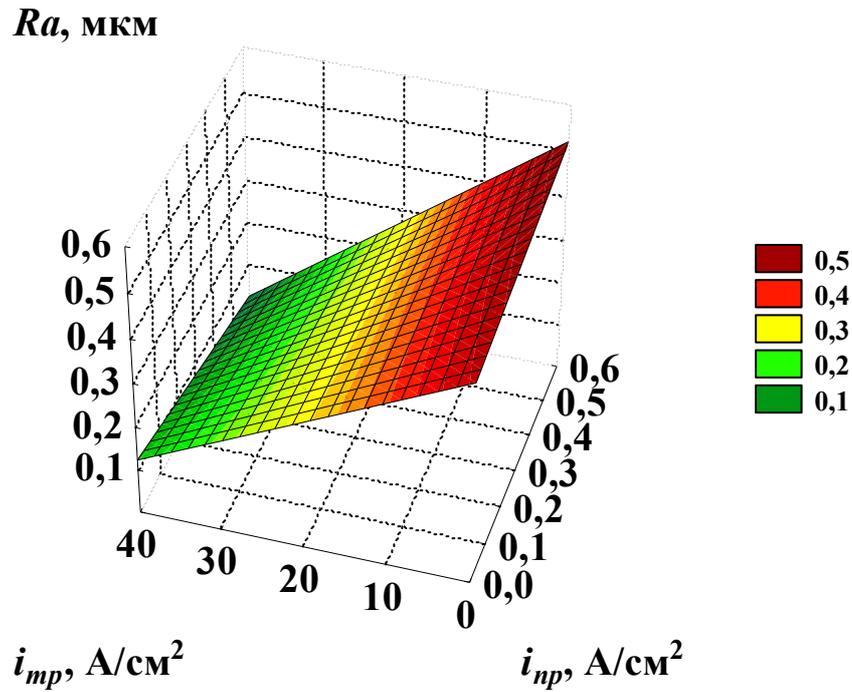


Рисунок 4.8. Зависимость шероховатости поверхности сплава ВК15 от электрических режимов комбинированного электроалмазного шлифования

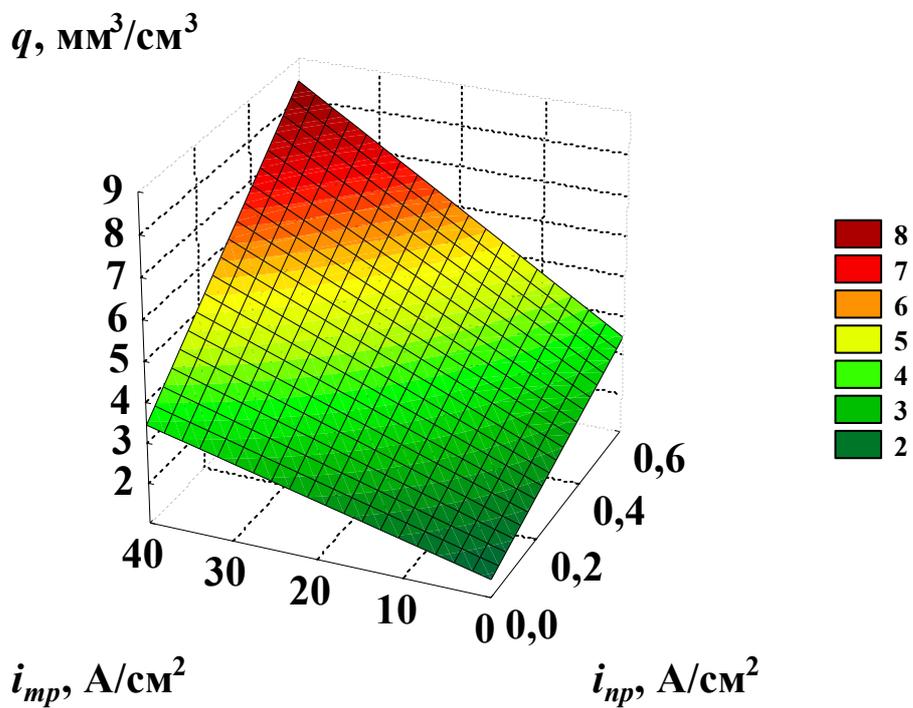


Рисунок 4.9. Зависимость расхода алмазного круга при обработке сплава ВК15 от электрических режимов комбинированного электроалмазного шлифования

По результатам исследования сплава ВК15 зависимость шероховатости  $R_a$

[мкм] обработанной поверхности от электрических режимов обработки  $i_{np}$  [А/см<sup>2</sup>] и  $i_{mp}$  [А/см<sup>2</sup>] имеет вид:

$$R_a = 0,456 + 0,1098 \cdot i_{np} - 0,0083 \cdot i_{mp} - 0,0069 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (4.19)$$

Поверхность отклика представлена на Рисунке 4.8.

Зависимость расхода алмазного круга  $q$  [мм<sup>3</sup>/мм<sup>3</sup>] от электрических режимов обработки  $i_{np}$  [А/см<sup>2</sup>] и  $i_{mp}$  [А/см<sup>2</sup>] сплава ВК15 имеет вид:

$$q = 1,4455 + 3,3383 \cdot i_{np} + 0,05 \cdot i_{mp} + 0,125 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (4.20)$$

Поверхность отклика в этом случае представлена на Рисунке 4.9.

Зависимость изменения мощности резания  $N$  [кВт] от электрических режимов обработки  $i_{np}$  [А/см<sup>2</sup>] и  $i_{mp}$  [А/см<sup>2</sup>] сплава ВК15 следующая:

$$N = 2,5 - 0,333 \cdot i_{np} - 0,0025 \cdot i_{mp} + 0,01665 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (4.21)$$

Поверхность отклика в этом случае представлена на Рисунке 4.10.

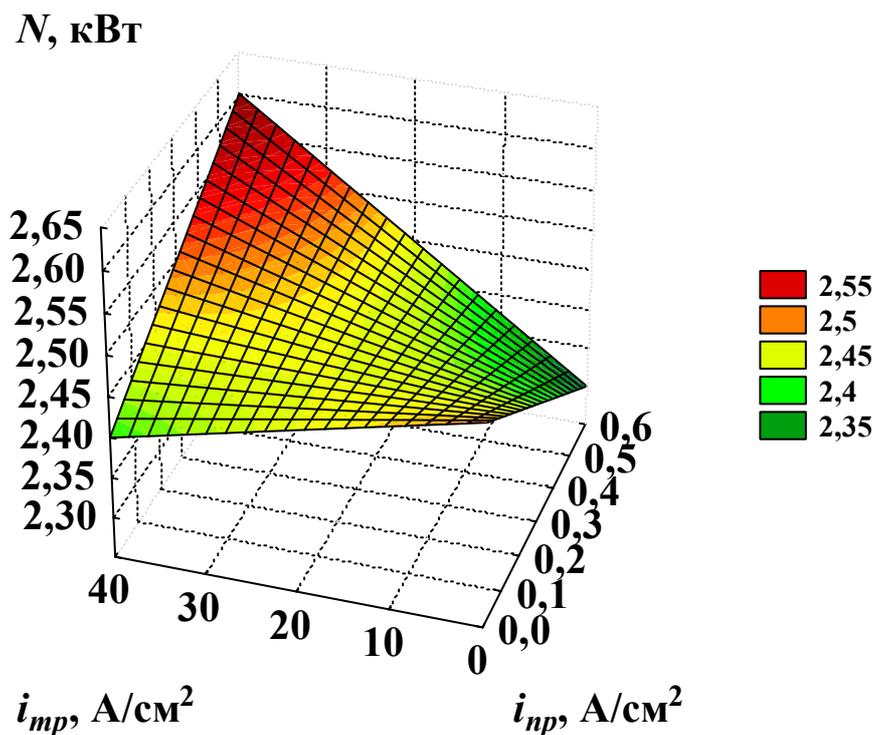


Рисунок 4.10. Зависимость изменения мощности резания при обработке сплава ВК15 от электрических режимов комбинированного электроалмазного шлифования

Обработка сплава ТН20 позволила получить зависимость шероховатости  $R_a$  [мкм] обработанной поверхности от электрических режимов обработки  $i_{np}$  [А/см<sup>2</sup>] и  $i_{mp}$  [А/см<sup>2</sup>] следующего вида:

$$R_a = 0,2685 + 0,0618 \cdot i_{np} - 0,0018 \cdot i_{mp} + 0,0054 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (4.22)$$

Поверхность отклика по результатам экспериментальных исследований представлена на Рисунке 4.11.

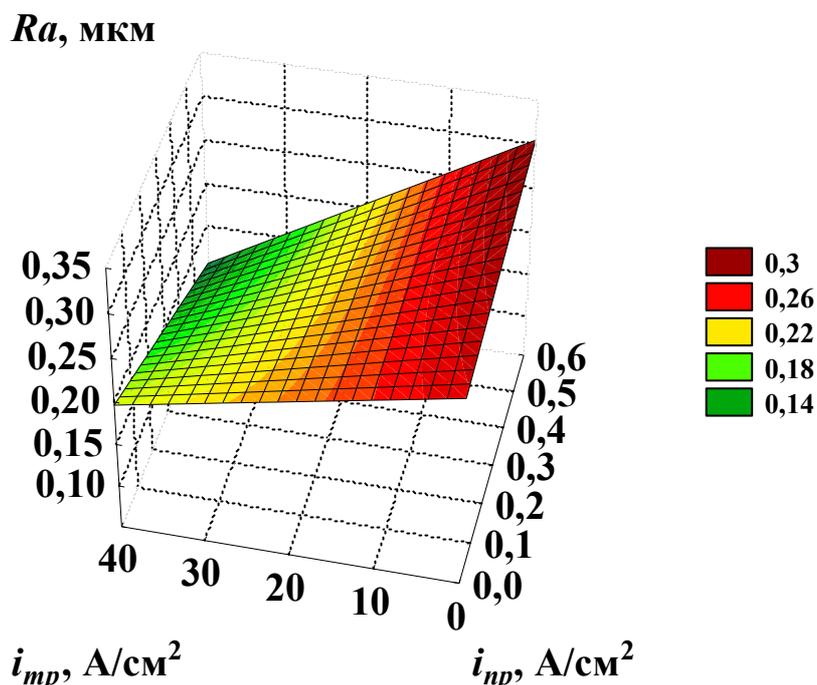


Рисунок 4.11. Зависимость шероховатости поверхности сплава ТН20 от электрических режимов комбинированного электроалмазного шлифования

Полученная зависимость расхода алмазного круга  $q$  [ $mm^3/mm^3$ ] от электрических режимов обработки  $i_{np}$  [ $A/cm^2$ ] и  $i_{mp}$  [ $A/cm^2$ ] сплава ТН20 имеет вид:

$$q = 1,417 + 2,2877 \cdot i_{np} + 0,007 \cdot i_{mp} + 0,0078 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (4.23)$$

Поверхность отклика представлена на Рисунке 4.12.

Зависимость изменения мощности резания  $N$  [кВт] от электрических режимов обработки  $i_{np}$  [ $A/cm^2$ ] и  $i_{mp}$  [ $A/cm^2$ ] сплава ТН20 следующая:

$$N = 2,15 - 0,1665 \cdot i_{np} - 0,005 \cdot i_{mp} \quad (4.24)$$

Поверхность отклика в этом случае представлена на Рисунке 4.13.

Анализ полученных данных позволил определить рациональные электрические режимы комбинированной обработки, обеспечивающие удовлетворительный расход алмазного круга, среднее значение мощности резания при допустимых для чистовой обработки качественных параметрах поверхности твердого сплава:

$$i_{np} = 0,2 \dots 0,3 \text{ A/cm}^2 \text{ и } i_{mp} = 20 \dots 30 \text{ A/cm}^2.$$

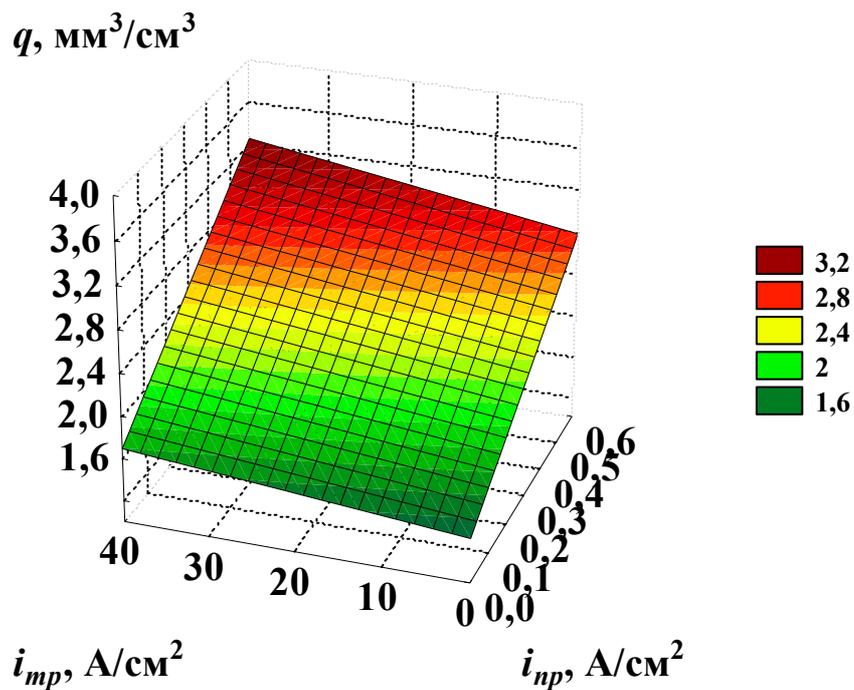


Рисунок 4.12. Зависимость расхода алмазного круга при обработке сплава ТН20 от электрических режимов комбинированного электроалмазного шлифования

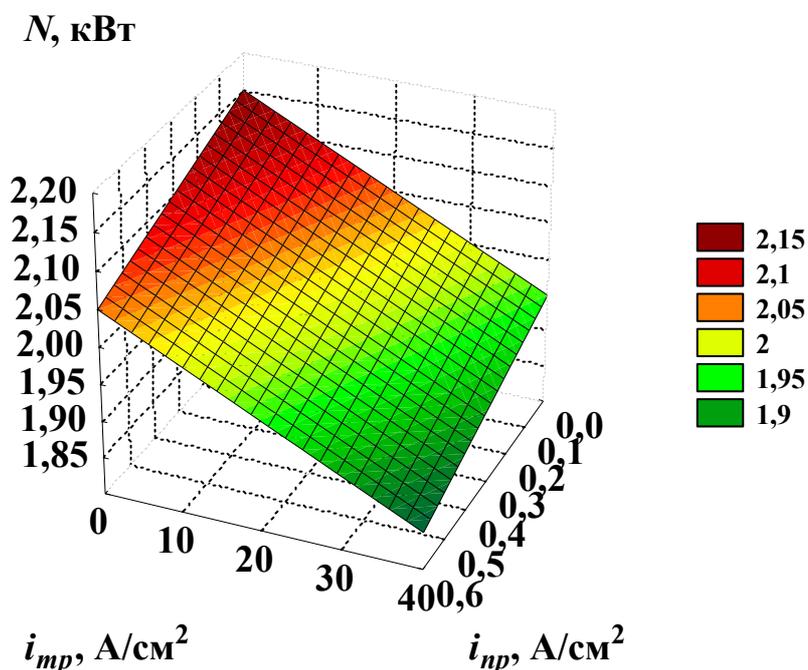


Рисунок 4.13. Зависимость изменения мощности на приводе главного движения при обработке сплава ТН20 от электрических режимов комбинированного электроалмазного шлифования

В качестве рациональных механических режимов обработки приняты ре-

жимы, определенные по результатам ранее проведенных исследований [95]: продольная подача  $S_{np} = 1,5$  м/мин, поперечная подача  $S_{non} = 0,02$  мм/дв.ход, скорость  $V = 35$  м/с.

Данные режимы приняты в дальнейшем для проведения сравнительных исследований различных методов обработки, с целью выявления рационального метода для формообразования режущей части инструмента для обработки композиционных материалов, оснащенного прогрессивными инструментальными материалами.

#### **4.3. Влияние методов электроалмазной обработки на расход алмазного абразивного инструмента**

Как известно, износостойкость алмазного инструмента определяет производительность и стоимость обработки. Шлифование материалов абразивным инструментом сопровождается засаливанием алмазонасного слоя продуктами обработки и, как следствие, потерей режущей способности инструмента, что ведет к ухудшению качества обработки. Процесс правки алмазного круга, с одной стороны, позволяет вести обработку обновленными алмазными зернами, что повышает производительность, с другой стороны, увеличивается и расход абразивного материала, что повышает себестоимость обработки. В связи с этим, одним из важных показателей процесса обработки является износ (расход) алмазного круга.

Были проведены исследования влияния методов затачивания на расход алмазного круга. Для этого инструментальные материалы марок ВК3М, ВК8, ВК15 и ТН20 затачивались алмазными кругами одной марки на одинаковых механических режимах (выбранные ранее рациональные режимы обработки). Обработка каждого вида инструментального материала продолжалась в течение одинакового промежутка времени разными методами электроалмазной обработки. Так как обработка традиционным алмазным затачиванием и алмазно-электрохимическим шлифованием сопровождалась интенсивным засаливанием кругов, то для поддержания работоспособности абразивного инструмента периодически проводи-

лась дополнительная правка жестким многопроходным методом – бруском из карбида кремния зеленого.

После каждого метода обработки круг снимался со станка и с использованием специального приспособления линейным методом замерялся расход круга.

Удельный расход круга определялся методом соотношения объемов абразивного и обрабатываемого материалов по формуле [214]:

$$q = \frac{V_A}{V_M}, \quad (4.25)$$

где  $V_A$  – объём изношенной части абразивного слоя, мм<sup>3</sup>;  $V_M$  – объём снятого материала, мм<sup>3</sup>.

$$V_A = \frac{\pi \cdot H^2}{4} \cdot a, \text{ мм}^3; \quad (4.26)$$

где:  $H$  – ширина алмазоносного слоя круга, мм;  $a$  – глубина износа алмазоносного слоя, мм.

Объём снятого материала  $V_M$  рассчитывался для каждого образца.

Глубина износа алмазоносного слоя  $a$  определялась с помощью специального приспособления. Замеры производились в 6-ти диаметрально-противоположных точках, в качестве мерительного инструмента использовались два индикатора часового типа с ценой деления равной 0,001 мм. Действительная величина принималась как среднеарифметическое значение.

Результаты исследований представлены в виде сравнительных гистограмм по каждому инструментальному материалу (Рисунки 4.14...4.17).

Анализ результатов исследований позволил сформулировать следующие выводы.

Минимальный расход наблюдается при обработке комбинированным методом электроалмазной обработки, сочетающем в себе электрохимическое шлифование с одновременной непрерывной электрохимической правкой поверхности круга.

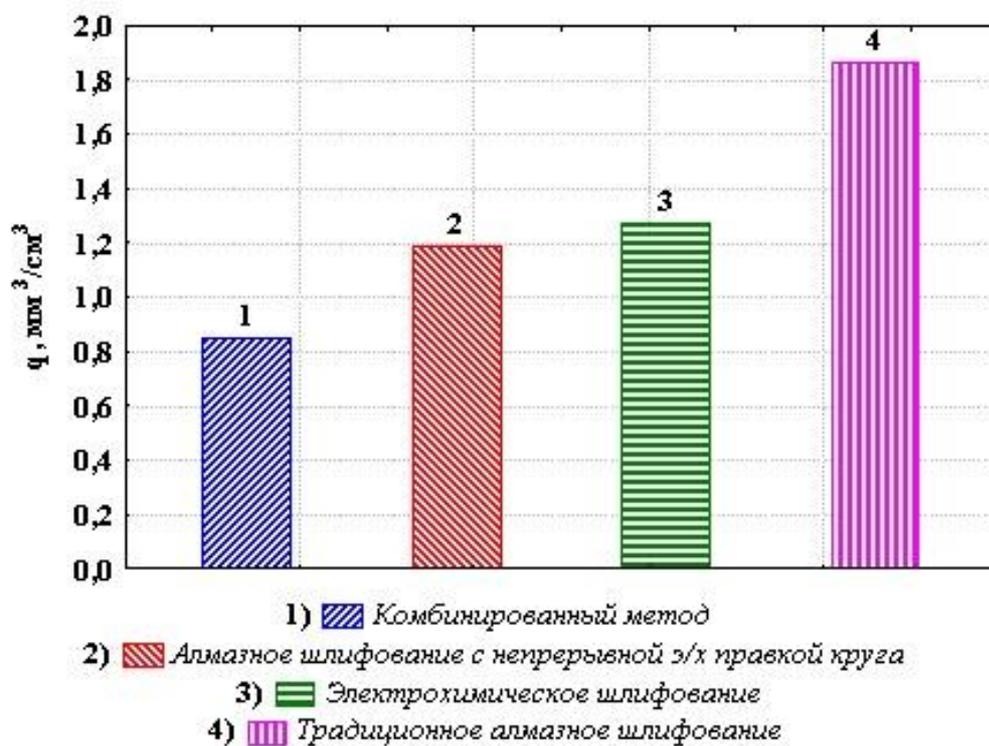


Рисунок 4.14. Расход алмазного круга при обработке сплава ВК3М различными методами электроалмазного шлифования

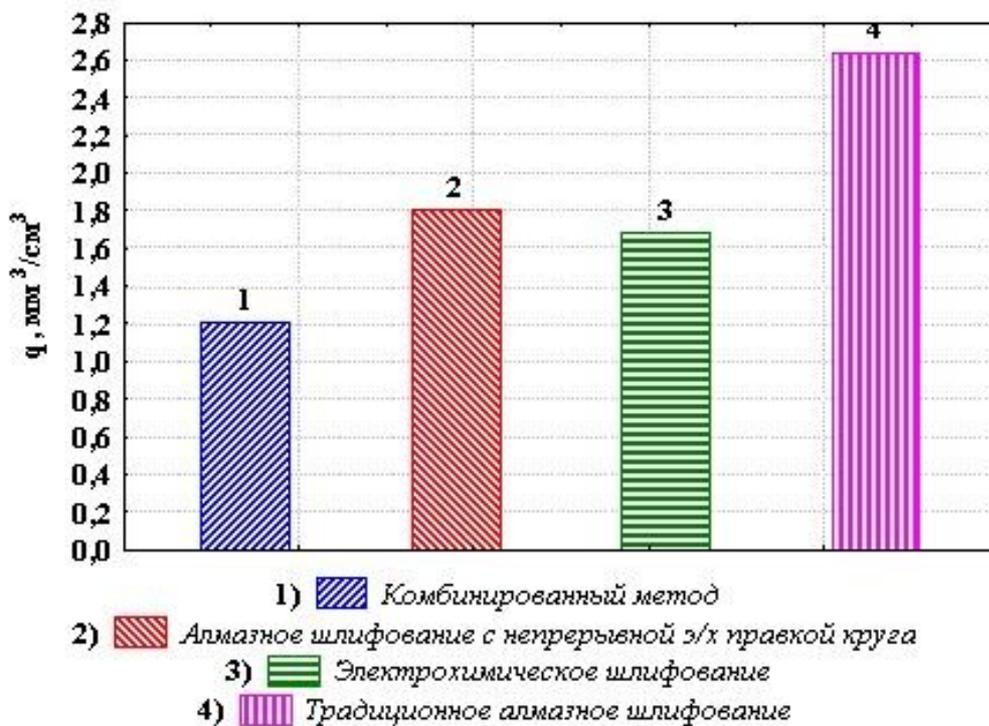


Рисунок 4.15. Расход алмазного круга при обработке сплава ВК8 различными методами электроалмазного шлифования

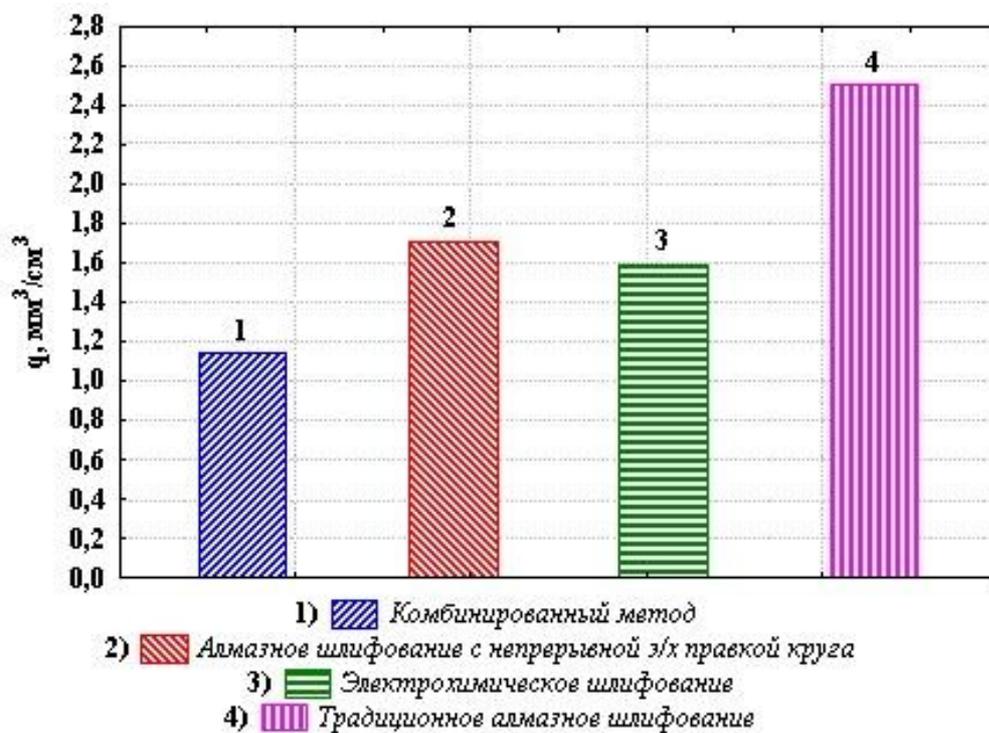


Рисунок 4.16. Расход алмазного круга при обработке сплава BK15 различными методами электроалмазного шлифования

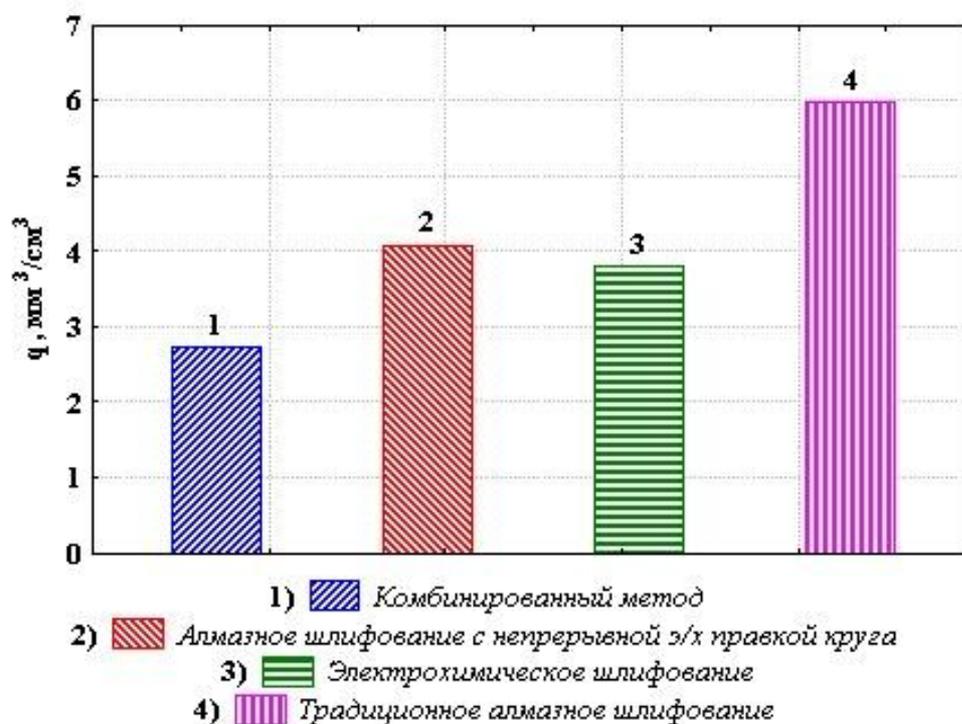


Рисунок 4.17. Расход алмазного круга при обработке сплава TN20 различными методами электроалмазного шлифования

Во время обработки комбинированным методом происходит непрерывный процесс электрохимической правки, что приводит к растравлению засаленного слоя, образующегося на поверхности круга, алмазные зерна длительное время находятся в работоспособном состоянии, так как обрабатывают разупрочненную электрохимическими процессами поверхность. При потере режущих свойств зерна алмаза, под действием возрастающих сил резания, покидают связку.

При обработке твердых сплавов электрохимическим шлифованием расход алмазного круга в среднем на 20 % выше, чем при обработке комбинированным методом. Это можно объяснить тем, что, в процессе обработки разупрочненного электрохимическими процессами материала, поверхность круга засаливается и для восстановления режущих свойств требуется дополнительная механическая правка круга, что и увеличивает расход алмаза.

Обработка алмазным шлифованием с непрерывной электрохимической правкой круга показала, что расход круга в среднем на 30 % больше, чем при обработке комбинированным методом. Это характерно для процесса, при котором ведется шлифование материала исходной твердости, а алмазные зерна постоянно обновляются в процессе электрохимического растворения материала связки. Однако необходимо иметь в виду, что процесс правки требует управления, которое позволило бы производить электрохимическое разупрочнение связки круга только в том случае, когда зерна полностью потеряли режущую способность. Нами разработана схема управления процессом правки алмазного круга во время комбинированной электроалмазной обработки, позволяющая автоматически блокировать правку круга, когда в ней отпадает необходимость и включать цепь правки, когда алмазный инструмент теряет режущую способность.

Максимальный расход алмазного круга (в среднем в 2,2 раз больше, чем при обработке комбинированным методом) наблюдается при обработке твердых сплавов традиционным алмазным шлифованием без применения электрических процессов. Это объясняется интенсивным засаливанием поверхности алмазного круга уже в первые минуты работы. Круг быстро теряет режущую способность, что увеличивает частоту применения дополнительной механической правки, а следо-

вательно и расход алмазов.

#### **4.4. Влияние методов электроалмазной обработки на изменение мощности резания при шлифовании**

При обработке материалов различными методами электроалмазного шлифования условия резания различны. Каждый из методов формирует различные силы резания, возникающие при обработке, разную режущую способность круга, расходы электроэнергии в процессе обработки. Отсюда следует, что одним из важных технико-экономических показателей, устанавливающих эффективность применения того или иного метода электроалмазного шлифования твердого сплава, является полная мощность при осуществлении обработки определенным методом. Следует отметить, что в данном случае под полной мощностью при резании ( $N$ ) следует понимать изменение суммарной мощности при обработке, потребляемой заточным оборудованием с учетом всех задействованных вспомогательных узлов и агрегатов (привод главного движения шпинделя, привод движения подачи, привод подвода СОТС и др.). Этот учет суммарной потребляемой мощности при обработке необходим для сравнительного анализа и расчета технико-экономических показателей.

В связи с этим были проведены исследования влияния методов затачивания на изменение полной мощности при резании. Твердые сплавы марок ВК3М, ВК8, ВК15 и ТН20 затачивались алмазными кругами одной марки на идентичных механических режимах (выбранные ранее рациональные режимы обработки). Обработка каждого вида инструментального материала продолжалась в течение одинакового промежутка времени разными методами электроалмазной обработки.

Измерение полной мощности при резании осуществлялось комплектом измерительным К-506, имеющим предел допускаемой основной погрешности:  $\pm 1\%$ . Прибор подключался к двигателям приводов главного движения, подачи, подвода СОТС станка. Мощность от приводов суммировалась.

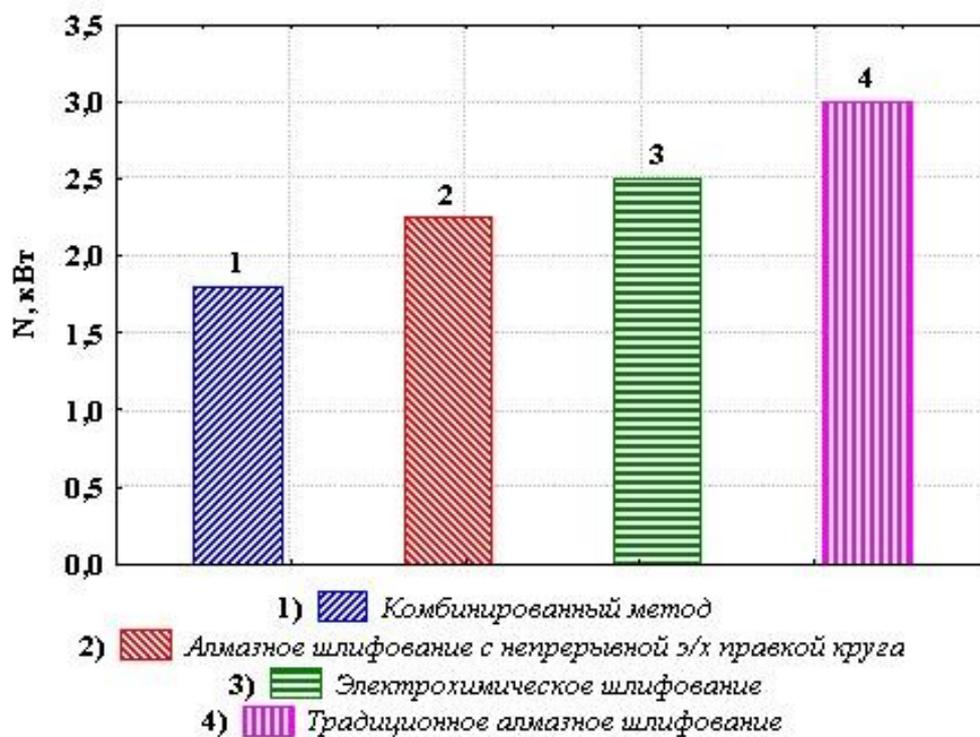


Рисунок 4.18. Полная мощность при обработке сплава BK3M различными методами электроалмазного шлифования

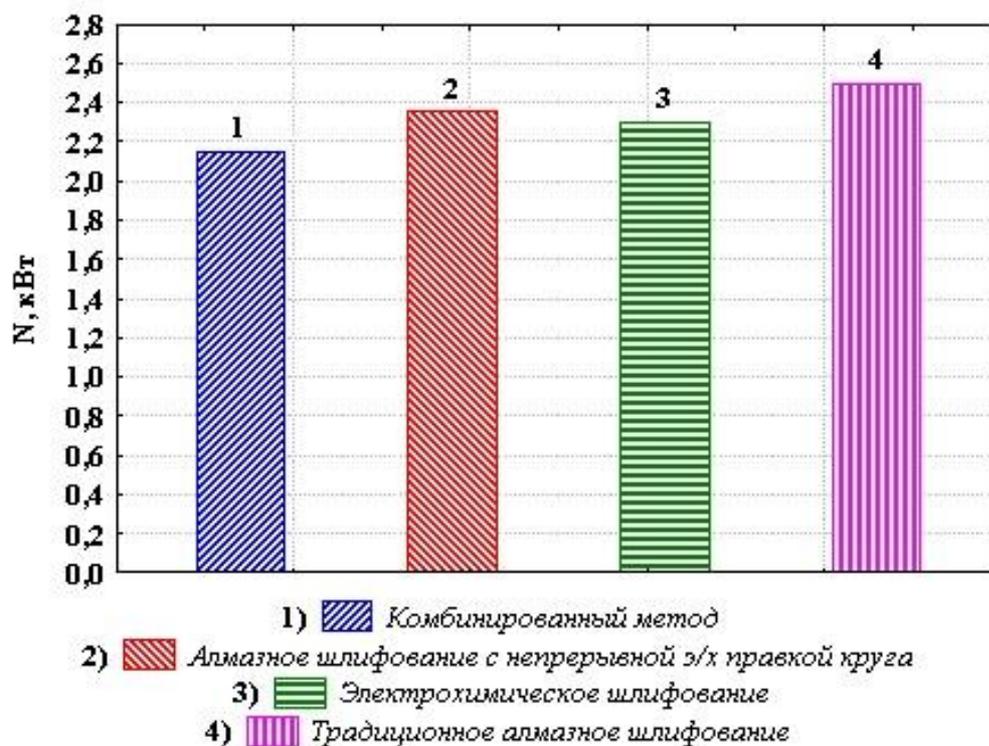


Рисунок 4.19. Полная мощность при обработке сплава BK8 различными методами электроалмазного шлифования

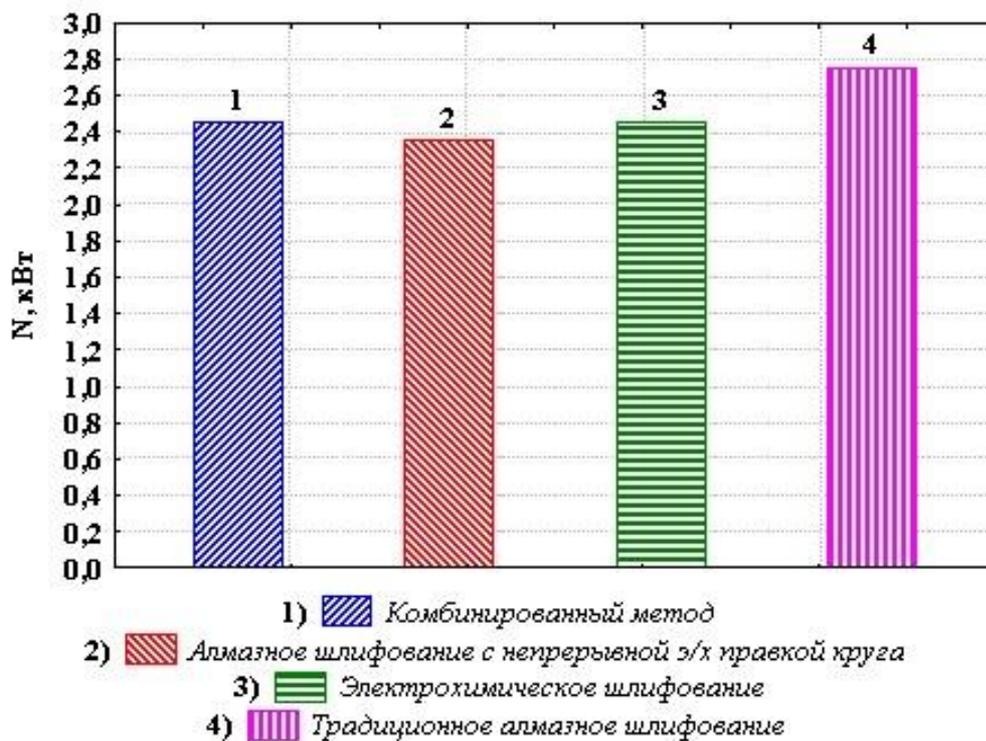


Рисунок 4.20. Полная мощность при обработке сплава BK15 различными методами электроалмазного шлифования

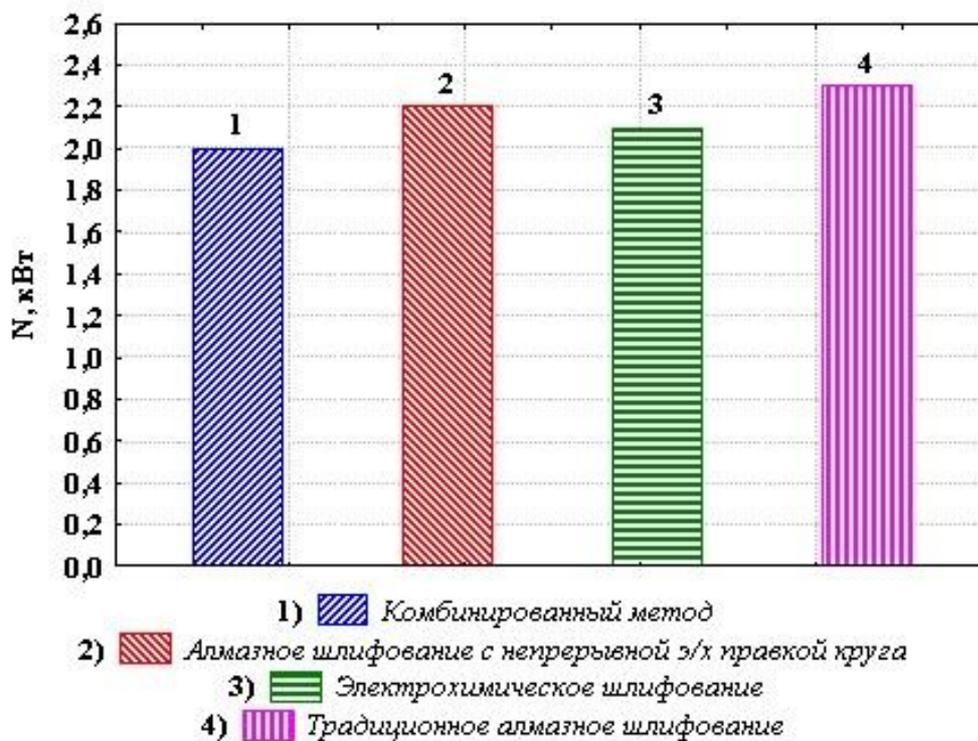


Рисунок 4.21. Полная мощность при обработке сплава TN20 различными методами электроалмазного шлифования

Параллельные показания с ваттметра снимались в течение эксперимента, в количестве 3 записей. Действительная величина принималась как среднеарифметическое значение.

Результаты исследований представлены в виде сравнительных гистограмм по каждому инструментальному материалу (Рисунки 4.18...4.21).

Анализ результатов исследования показал, что максимальная мощность резания прослеживается при обработке твердых сплавов традиционным алмазным шлифованием без применения электрических процессов. Это объясняется невысокой режущей способностью алмазного круга в процессе резания, причиной которой является интенсивное засаливание инструмента, что ведет к возрастанию сил резания и увеличению мощности резания, необходимой для осуществления процесса обработки.

При обработке твердых сплавов электрохимическим шлифованием мощность резания в среднем на 12 % меньше по сравнению с традиционным алмазным шлифованием. Электрохимическое растворение поверхностного слоя обрабатываемой поверхности значительно снижает сопротивление резанию, а, следовательно, и мощность резания.

Обработка методом алмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой круга снизила мощность резания в среднем на 14 % в сравнении с традиционным алмазным шлифованием. Наличие процесса правки алмазного круга повышает режущую способность круга. Однако обработка высокопрочных инструментальных материалов без электрохимического растворения обрабатываемой поверхности не дает возможности значительно снизить силы резания и мощность.

Комбинированный метод электроалмазной обработки, сочетающий электрохимическое шлифование с одновременной непрерывной электрохимической правкой поверхности круга показал мощность резания в среднем на 14 % в сравнении с традиционным алмазным шлифованием. Комбинированное использование процессов электрохимического растворения обрабатываемой поверхности твердого сплава и электрохимической правки поверхности круга позволяет вести

механическое резание с высокой режущей способностью и невысокими усилиями, что приводит к значительному снижению мощности резания по сравнению с другими методами.

#### **4.5. Микротвердость обработанной поверхности после различных методов электроалмазной обработки**

Износостойкость инструмента во многом зависит от прочностных показателей контактирующих поверхностей инструмента. Одним из таких показателей является микротвердость поверхности, определяющая способность инструментального материала сопротивляться разрушению и истиранию в процессе работы. Процесс абразивной обработки, как правило, приводит к частичному упрочнению поверхности инструментального материала за счет пластического деформирования. Электрохимические и электрофизические процессы, напротив, как правило, разупрочняют обработанную поверхность. Комбинированные методы обработки оказывают неоднозначное влияние на состояние обработанной поверхности.

Проведены исследования влияния методов алмазного затачивания на изменение микротвердости обрабатываемой поверхности в следующих условиях. До обработки на образцах твердых сплавов марок ВК3М, ВК8, ВК15 и ТН20 определялись исходные значения микротвердости, затем образцы затачивались алмазными кругами одинаковой маркировки на идентичных режимах резания (выбранные ранее рациональные режимы обработки) четырьмя методами обработки.

Определение микротвердости осуществлялось с использованием автоматического микротвердомера DURAMIN 5 для проведения испытаний по Виккерсу с диапазоном нагрузок от 10 г до 2 кг. Оптическое исследование образцов проводилось с использованием микроскопа с диапазоном увеличений 10×, 40× и 100×, фотокамерой: 2 мегапикселя, расчет числа микротвердости осуществляется автоматически.

Время нагружения составляло 12 секунд, нагрузка 4,91 Н. Проводилось 10 замеров в различных зонах заточенных поверхностей, за конечный результат при-

нималось среднее арифметическое значение микротвердости по всем повторным замерам.

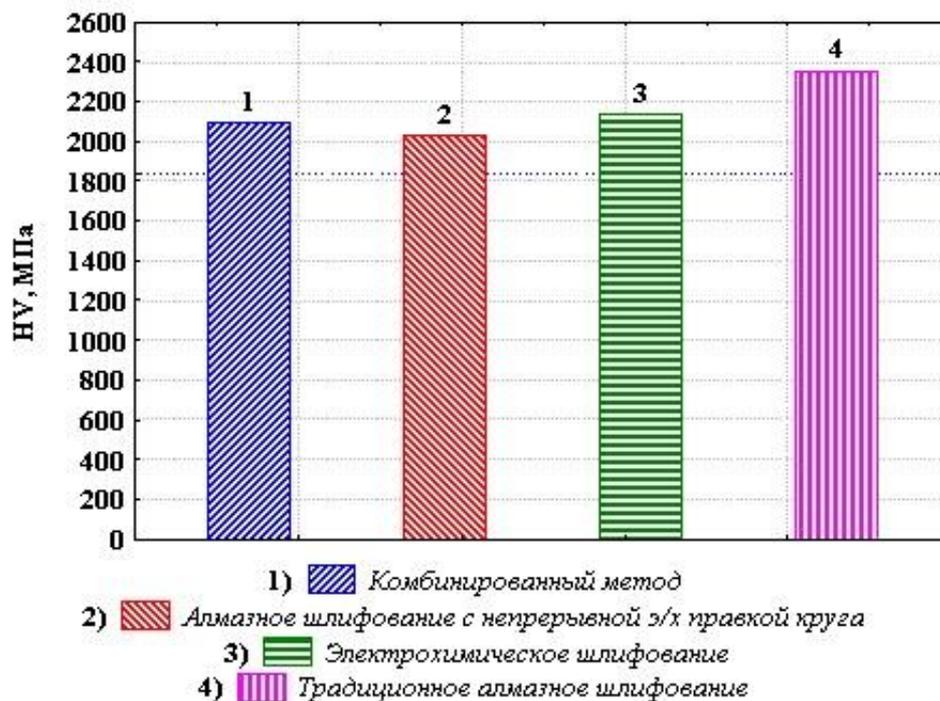


Рисунок 4.22. Микротвердость поверхности после обработки сплава ВК3М различными методами электроалмазного шлифования

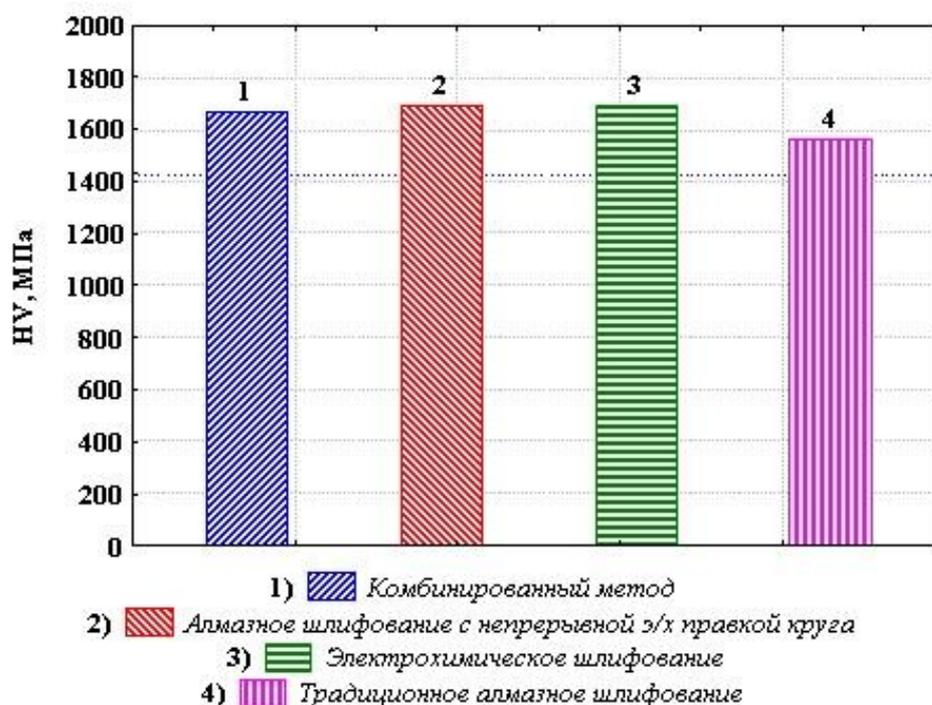


Рисунок 4.23. Микротвердость поверхности после обработки сплава ВК8 различными методами электроалмазного шлифования

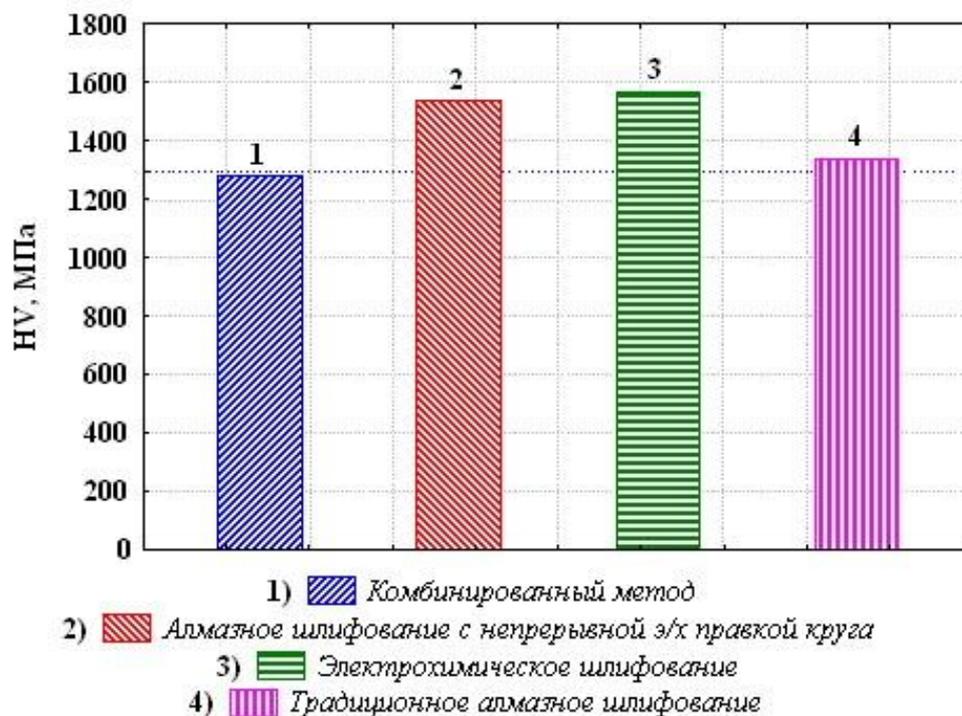


Рисунок 4.24. Микротвердость поверхности после обработки сплава BK15 различными методами электроалмазного шлифования

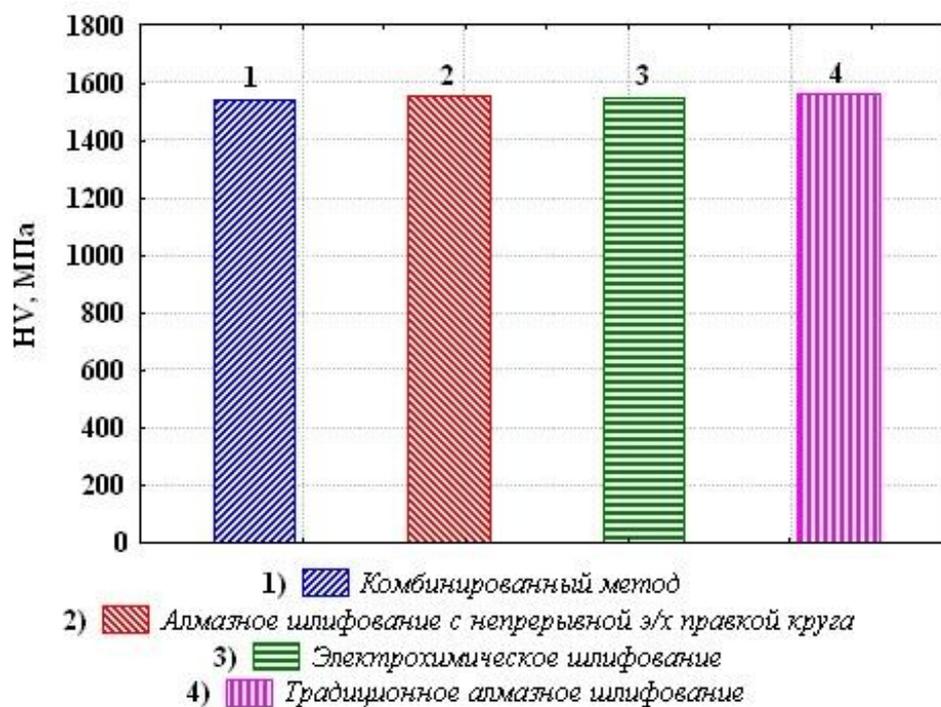


Рисунок 4.25. Микротвердость поверхности после обработки сплава TN20 различными методами электроалмазного шлифования

Результаты исследований представлены в виде сравнительных гистограмм по каждому инструментальному материалу (Рисунки 4.22...4.25).

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы.

Твердые сплавы, обработанные традиционным электроалмазным затачиванием, имеют относительно высокую микротвердость, что объясняется отсутствием в зоне резания электрохимических процессов, ослабляющих место обработки. Кроме того, при обработке алмазным кругом, частично потерявшим режущую способность, наблюдается незначительное повышение микротвердости по сравнению с исходной.

Обработка твердых сплавов электрохимическим шлифованием с одной стороны ослабляет затачиваемые поверхности, с другой – наблюдается постепенное засаливание поверхности алмазного круга, который со временем начинает не резать, а уплотнять материал, вызывая постепенное повышение микротвердости.

При обработке с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга преобладает механическое резание обновленными зернами алмазов, которое не ведет к ослаблению микротвердости сплава. В связи с этим, метод занимает промежуточное значение по уровню микротвердости обработанной поверхности.

Микротвердость поверхностей твердых сплавов после комбинированного метода электроалмазной обработки, сочетающего электрохимическое шлифование с одновременной непрерывной электрохимической правкой поверхности круга, близка к исходной. При обработке поверхность твердого сплава, ослабленная электрохимическими процессами, срезается обновленными в результате непрерывной правки круга алмазными зернами.

#### **4.6. Влияние методов электроалмазной обработки на шероховатость обработанной поверхности**

Одной из качественных характеристик обработанной поверхности является шероховатость, характеризующаяся высотой микронеровностей профиля. Шероховатость режущих поверхностей инструмента оказывает влияние на интенсивность

его износа и качество обработанных изделий [95].

В связи с этим проведены исследования влияния методов электроалмазной обработки на шероховатость обработанной поверхности твердых сплавов марок ВК3М, ВК8, ВК15 и ТН20, которые затачивались алмазными кругами одной марки на идентичных режимах резания (выбранные ранее рациональные режимы обработки) четырьмя методами обработки. Замеры шероховатости проводились с использованием профилографа-профилометра "Абрис-ПМ7" с возможностью визуального и графического отображения результатов измерений, статистической обработки результатов измерений с помощью компьютера через интерфейс RS-232.

Результаты исследований представлены в виде сравнительных гистограмм по каждому инструментальному материалу (Рисунки 4.26...4.29).

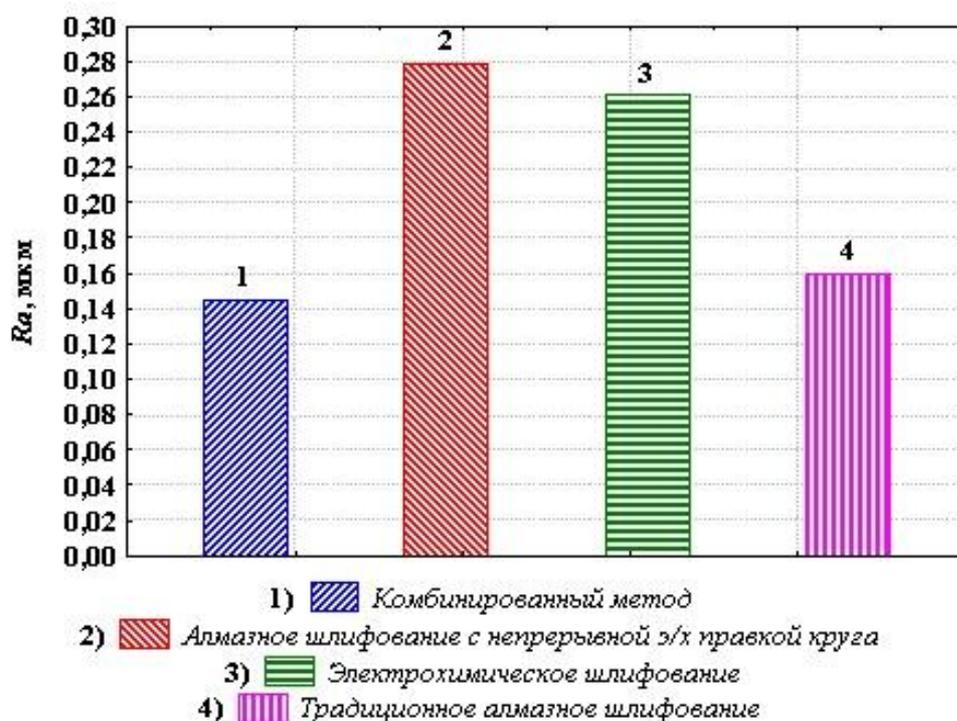


Рисунок 4.26. Шероховатость поверхности после обработки сплава ВК3М различными методами электроалмазного шлифования

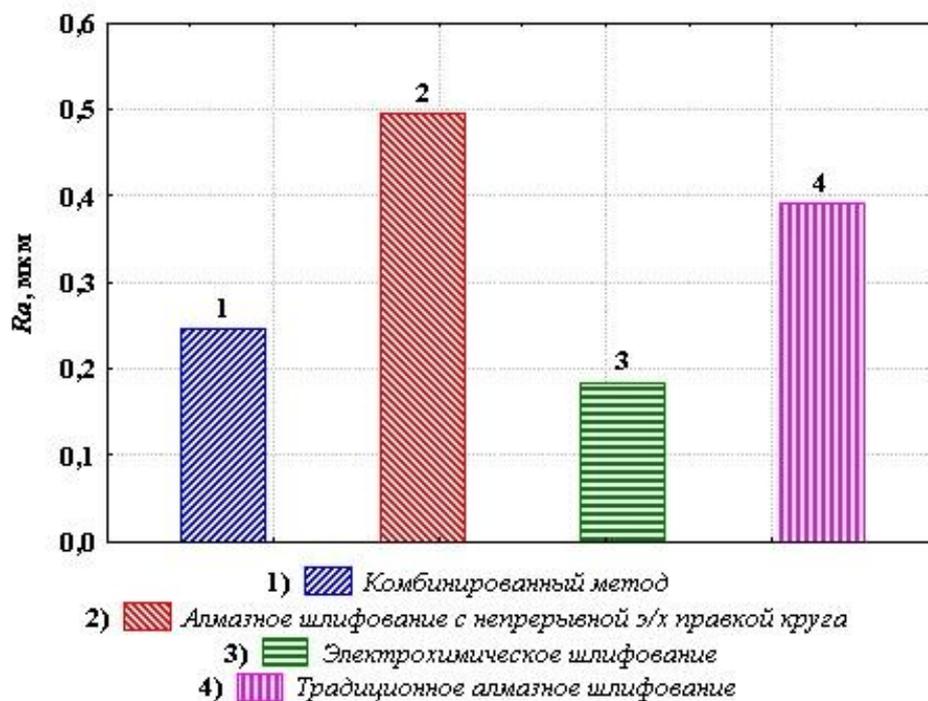


Рисунок 4.27. Шероховатость поверхности после обработки сплава BK8 различными методами электроалмазного шлифования

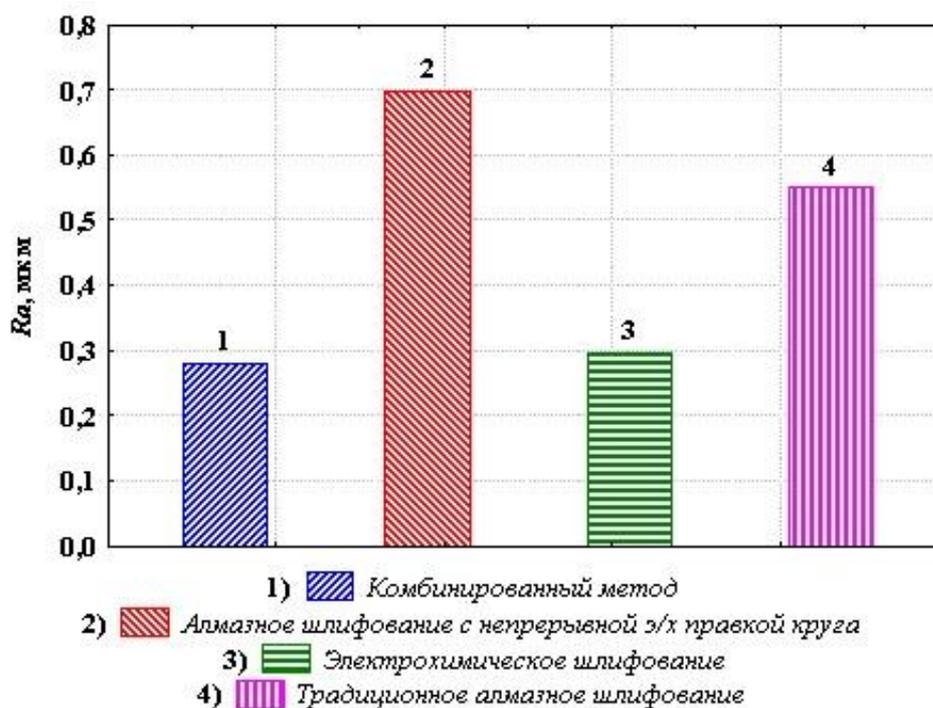


Рисунок 4.28. Шероховатость поверхности после обработки сплава BK15 различными методами электроалмазного шлифования

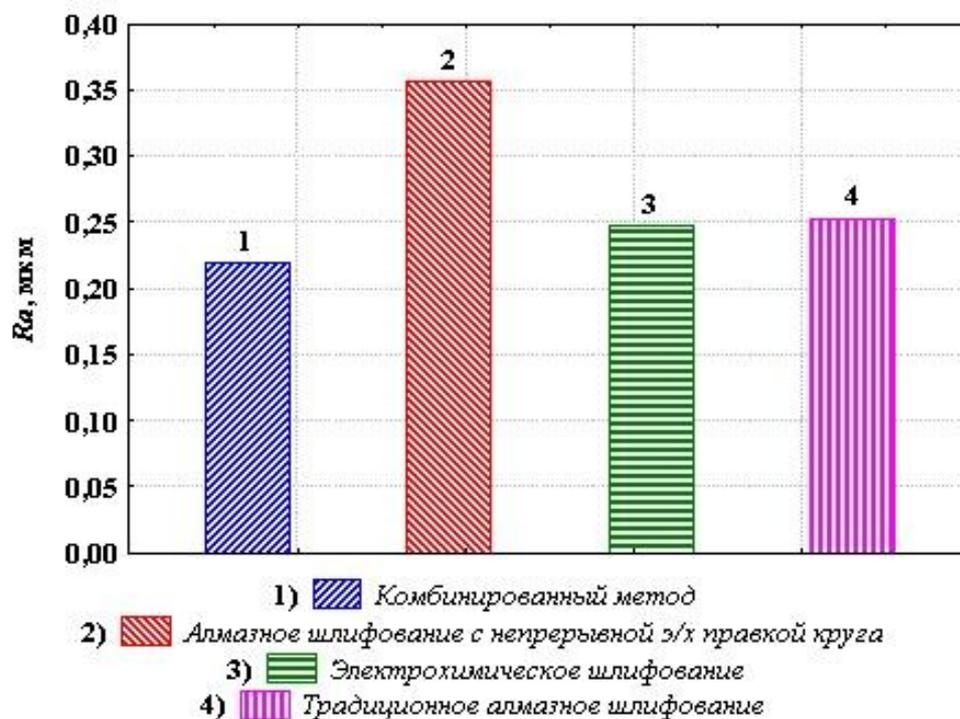


Рисунок 4.29. Шероховатость поверхности после обработки сплава TiN20 различными методами электроалмазного шлифования

Анализ результатов исследований позволил сформулировать следующие выводы.

Наибольшая шероховатость обработанных поверхностей твердых сплавов наблюдается при алмазном шлифовании с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга. Так как обработка ведется постоянно обновляемыми алмазными зернами, они оставляют на поверхности твердого сплава достаточно глубокие борозды, что и определяет высокий уровень микронеровностей профиля.

Шероховатость при традиционном алмазном затачивании меньше в среднем на 27 %, что объясняется потерей режущей способности круга в процессе обработки. Алмазные зерна постепенно скрываются продуктами засаливания, наблюдается частичное сглаживание выступов неровностей, снижающее уровень шероховатости.

Электрохимическое шлифование твердых сплавов позволило получить шероховатость в среднем на 46 % меньше в сравнении с алмазным шлифованием с

непрерывной электрохимической правкой поверхности круга. Электрохимические процессы в зоне резания частично растравливают выступы неровностей, образованных механическим резанием алмазными зернами, кроме того, наблюдается постепенная потеря режущей способности алмазного круга, приводящая к сглаживанию неровностей профиля обрабатываемой поверхности потерявшими остроту (вследствие засаливания) алмазными зернами.

Минимальная шероховатость поверхностей твердых сплавов (в среднем на 62 % меньше, чем при алмазном шлифовании с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга) достигнута при обработке комбинированным методом электроалмазной обработки, сочетающим электрохимическое шлифование с одновременной непрерывной электрохимической правкой поверхности круга. Сочетание обработки обновленными в результате правки алмазными зернами с электрохимическими процессами между контактирующими поверхностями круга и твердого сплава позволило значительно уменьшить шероховатость.

#### **4.7. Исследование состояния твердосплавных режущих инструментов для обработки композиционных материалов, заточенных различными методами электроалмазной обработки**

Качество обработанных поверхностей твердосплавного инструмента – комплексное понятие, характеризующее совокупностью физико-механических свойств обработанного материала, макро- и микрогеометрией поверхностей, состоянием режущей кромки и рабочих поверхностей инструмента. Наличие макро- и микро-неровностей, микротрещин на заточенных поверхностях может в дальнейшем привести к уменьшению работоспособности инструмента, снизить его период стойкости, что негативно сказывается на качестве изделий, получаемых этим инструментом.

В связи с этим проведены исследования состояния рабочих поверхностей и режущей кромки твердосплавных инструментов, заточенных различными методами электроалмазной обработки [182].

Для проведения исследований была задействована широкая гамма методик и научного оборудования. Подготовка образцов осуществлялась с использованием пресса для заливки образцов для оптической микроскопии *SimpliMet 1000* (*Buehler*) и автоматического полировального станка *LaboPol-5* (*Struers*). Оптическое исследование образцов проводилось с использованием микроскопа *Carl Zeiss AxioObserver A1m* с диапазоном увеличений 25...1500, фотокамерой *AxioCam MRc5*: 5 Мп и модулями для автоматического определения размера зерна и содержания второй фазы. Кроме того, использовался оптический металлографический микроскоп *Olympus GX-7,1* оснащенный цифровой камерой *DP70* и предназначенный для получения в отражённом свете светлопольных и темнопольных изображений, изображений дифференциального интерференционного контраста, изображений в поляризованном свете. Предельное увеличение микроскопа  $\times 2000$  (сменные объективы  $\times 5$ ,  $\times 10$ ,  $\times 20$ ,  $\times 50$ ,  $\times 100$ ). Более детальное исследование образцов проводилось с применением растровой электронной микроскопии. Использовались микроскопы *Carl Zeiss EVO50* с ускоряющим напряжением 0,2...30 кВ, максимальным разрешением 3 нм и *Philips SEM 515* с ускоряющим напряжением 3...30 кВ, максимальным разрешением до 8 нм. Приборы оснащены микроанализаторами и предназначены для топографического и качественного фазового анализа поверхностей металлических и полупроводниковых материалов, полуквантитативного элементного анализа. Исследования топографии поверхности образцов проводились с использованием сканирующего зондового микроскопа *NanoEducator* модели СЗМУ Л5 и комплекса изучения топографии поверхности (оптический интерферометр) *Zygo NewView™ 7300*.

Использование различных методик при исследовании качества затачивания твердосплавного инструмента позволило провести разносторонний анализ состояния рабочих поверхностей и режущих элементов инструментов для обработки композиционных материалов, имеющих специфические требования к геометрическим параметрам, микрогеометрии и качеству полученных в процессе формообразования поверхностей.

#### 4.7.1. Состояние поверхностей и режущей кромки твердосплавных инструментов, заточенных традиционным алмазным шлифованием

Анализ состояния заточенных твердосплавных поверхностей инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после традиционного алмазного затачивания кругом на металлической связке указывает на то, что они имеют ряд серьезных дефектов.

Заточенные традиционным алмазным шлифованием поверхности твердых сплавов несут на себе следы пластической деформации; характерные для адгезивно-абразивного взаимодействия (Рисунки 4.30...4.33).

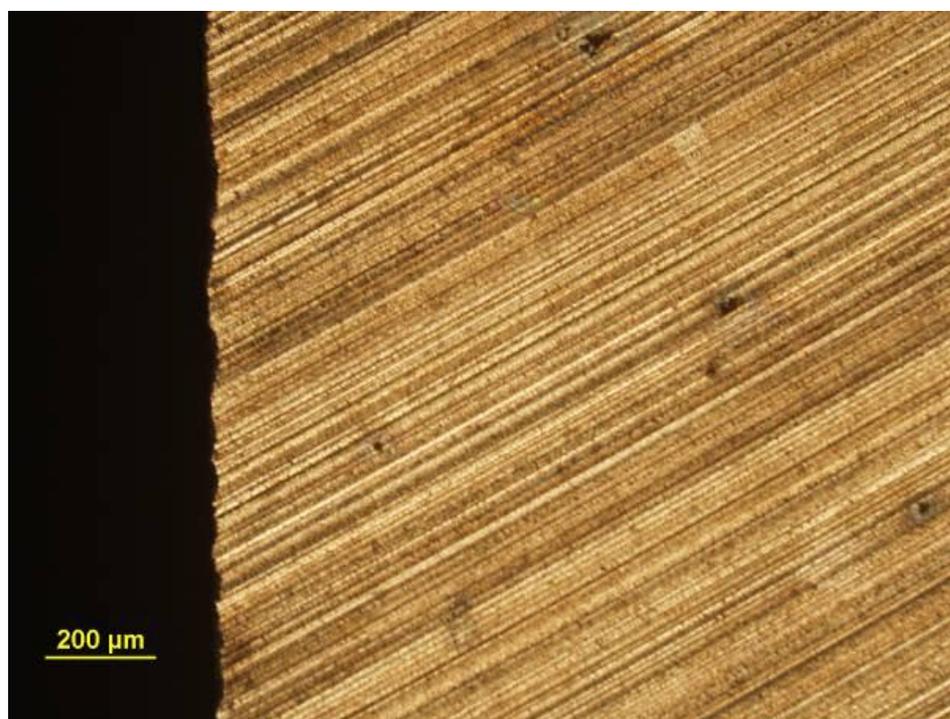


Рисунок 4.30. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после традиционного алмазного шлифования (сплав ВК3М)

Вдоль режущей кромки инструмента наблюдаются систематические сколы и вырывы блоков твердого сплава. Размеры этих дефектов доходят до нескольких десятков микрометров.

Режущий клин инструмента на внешний вид также имеет дефекты, радиус скругления режущей кромки составляет более 10 мкм (Рисунки 4.34...4.37).

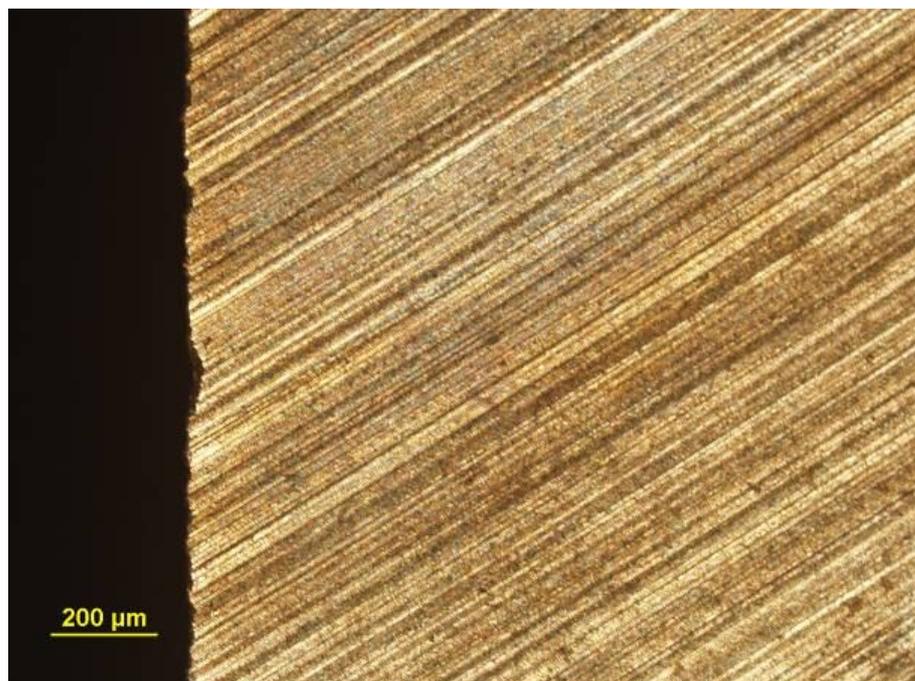


Рисунок 4.31. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после традиционного алмазного шлифования (сплав BK8)

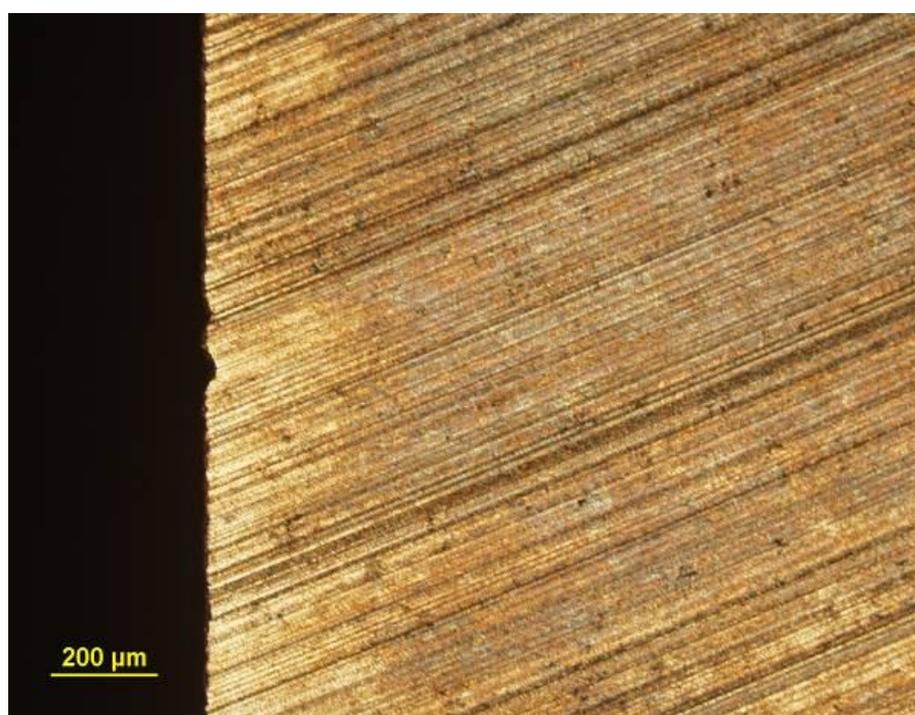


Рисунок 4.32. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после традиционного алмазного шлифования (сплав BK15)

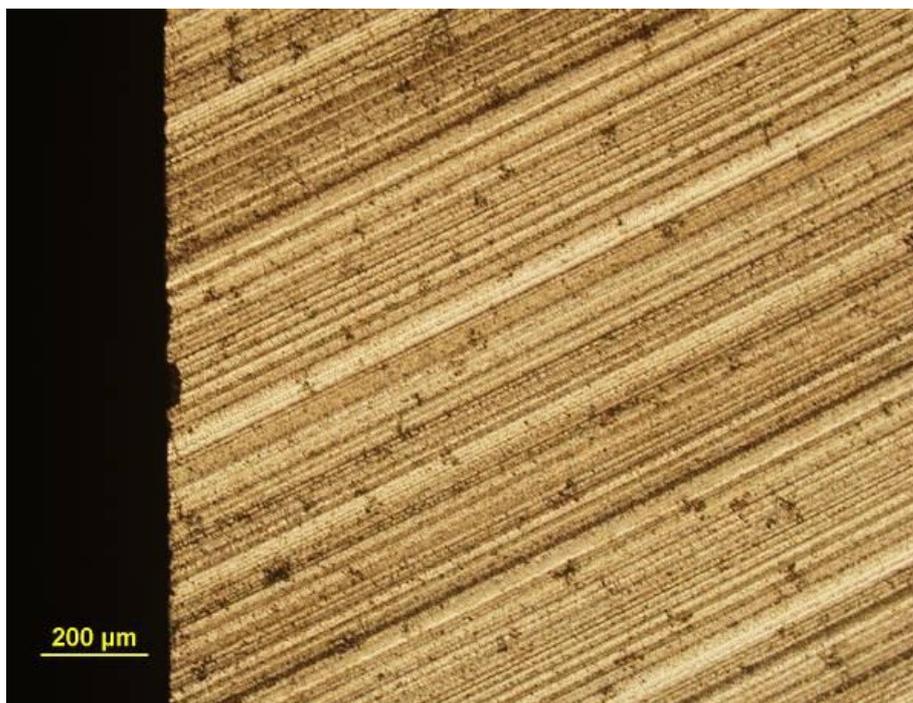


Рисунок. 4.33. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после традиционного алмазного шлифования (сплав ТН20)

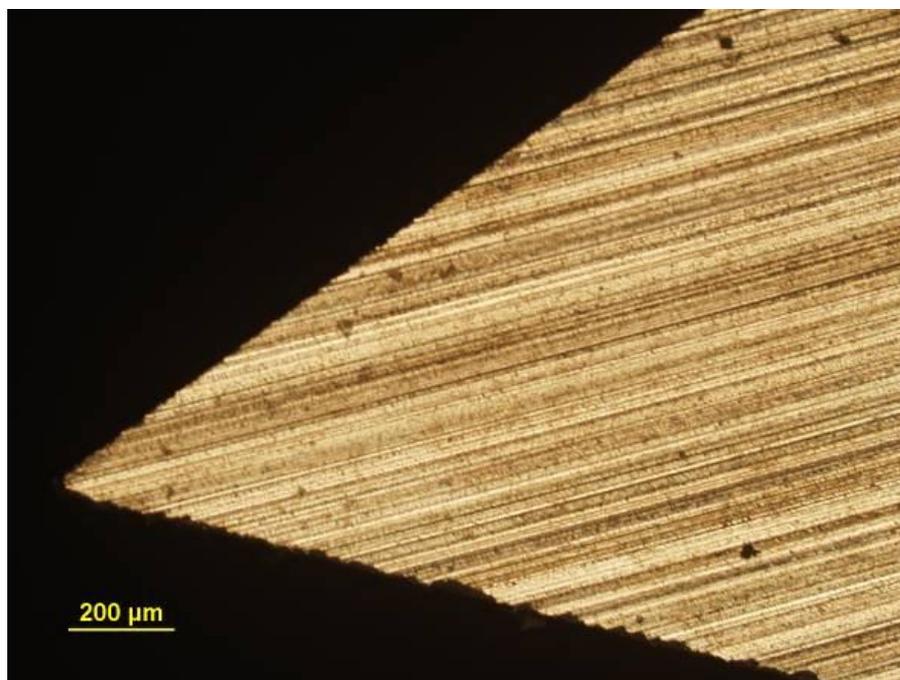


Рисунок 4.34. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после традиционного алмазного шлифования (сплав ВК3М)

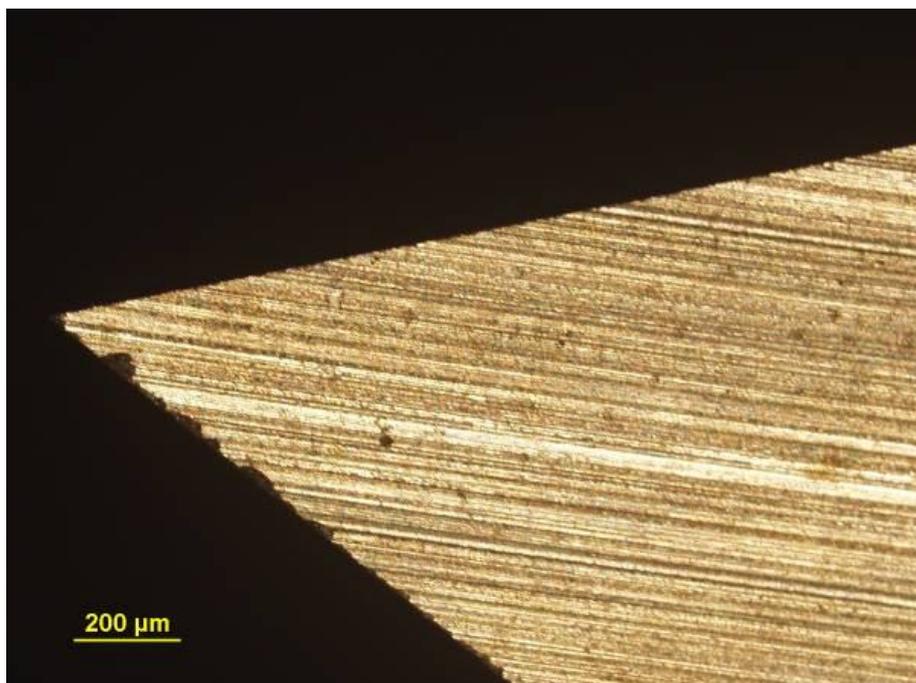


Рисунок 4.35. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после традиционного алмазного шлифования (сплав ВК8)

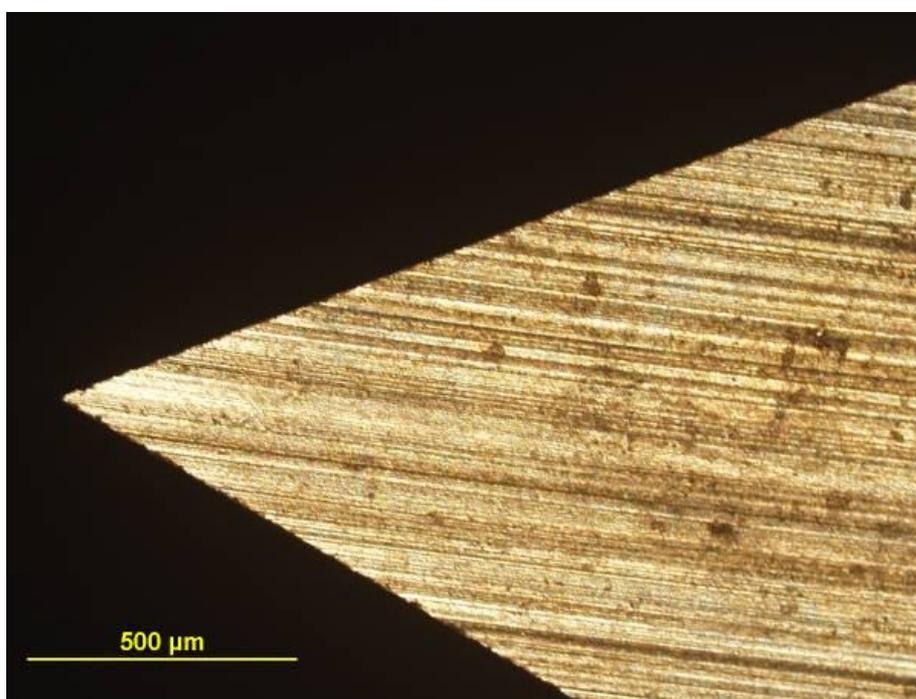


Рисунок 4.36. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после традиционного алмазного шлифования (сплав ВК15)

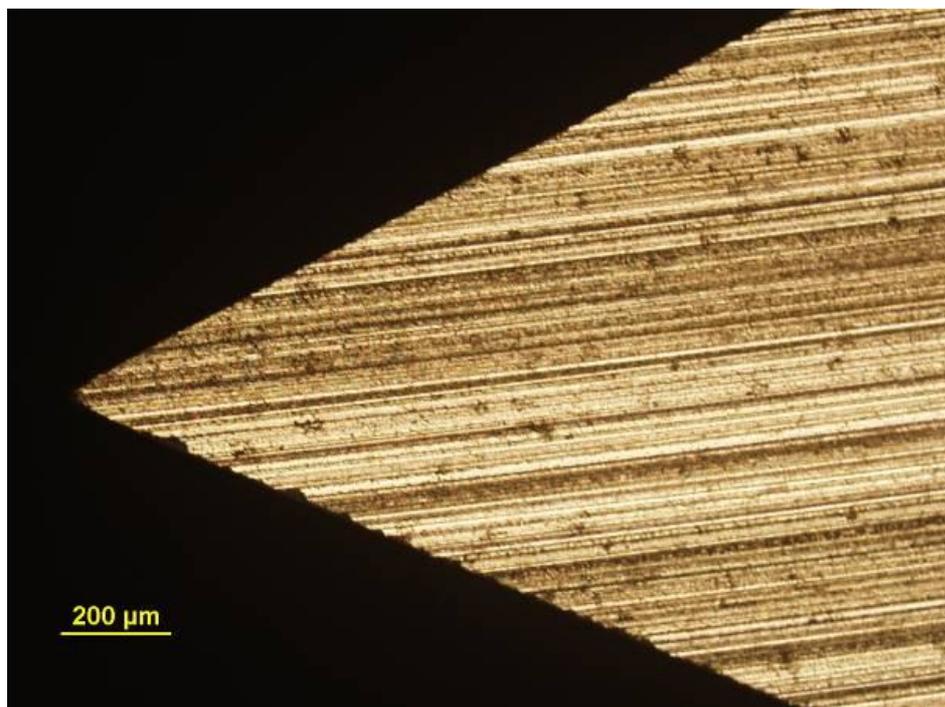


Рисунок 4.37. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после традиционного алмазного шлифования (сплав ВК15)

Топография заточенных поверхностей исследовалась на сплаве марки ТН20. По результатам сканирования зондовым сканирующим микроскопом получена трехмерная модель участка передней поверхности после обработки традиционным алмазным шлифованием, представленная на Рисунке 4.38.

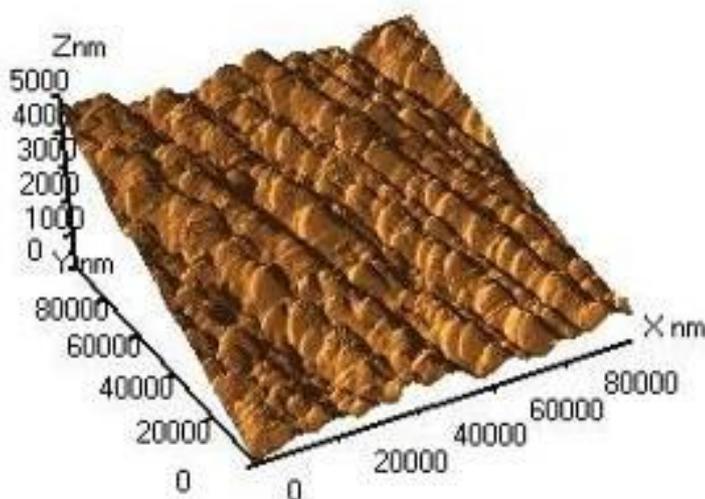


Рисунок 4.38. Модель поверхности твердого сплава ТН20 после традиционного алмазного шлифования (сканирующая зондовая микроскопия)

Относительно невысокий уровень микронеровностей на поверхности объ-

ясняется наличием явления засаливания алмазного круга, вследствие чего увеличивается нагрузка на затачиваемые поверхности, увеличиваются температуры в зоне резания, заметна пластическая деформация выступов неровностей поверхности алмазными зернами, частично потерявшими режущую способность.

#### **4.7.2. Состояние поверхностей и режущей кромки твердосплавных инструментов, заточенных электрохимическим алмазным шлифованием**

Поверхности и режущая кромка твердосплавного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов, заточенные электрохимическим шлифованием, по внешнему виду дефектны, с сильно растравленными участками (Рисунки 4.39...4.42).

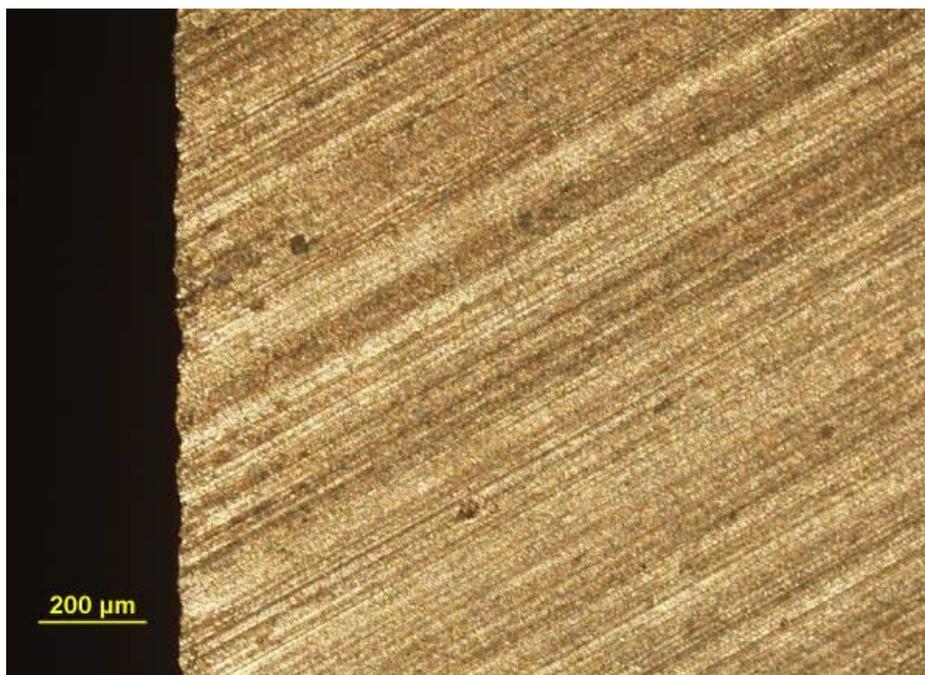


Рисунок 4.39. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после электрохимического алмазного шлифования (сплав ВК3М)

На участках поверхностей прослеживаются отдельные кратеры, образованные действием локальных эрозионных процессов.

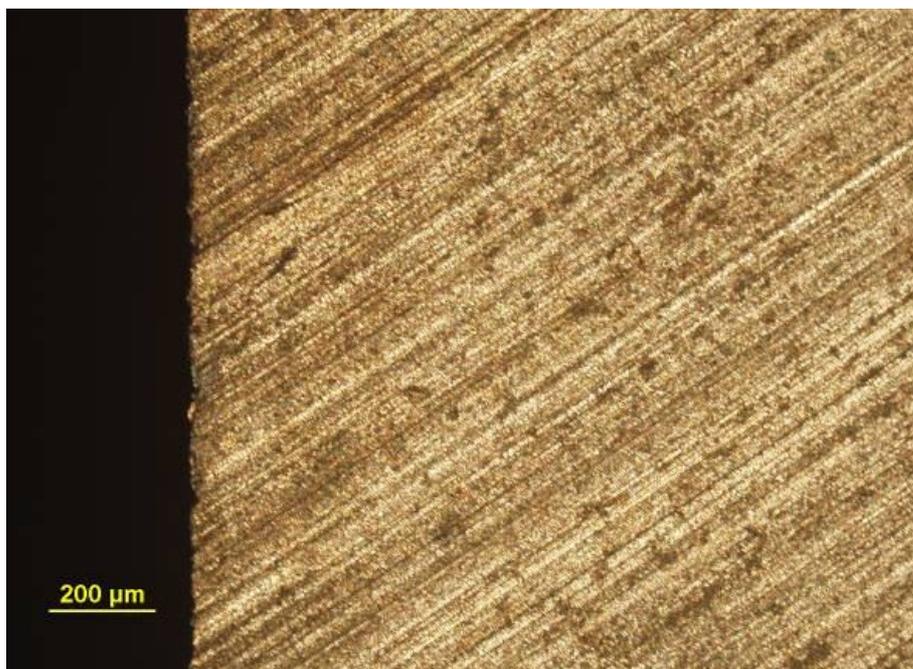


Рисунок 4.40. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после электрохимического алмазного шлифования (сплав ВК8)

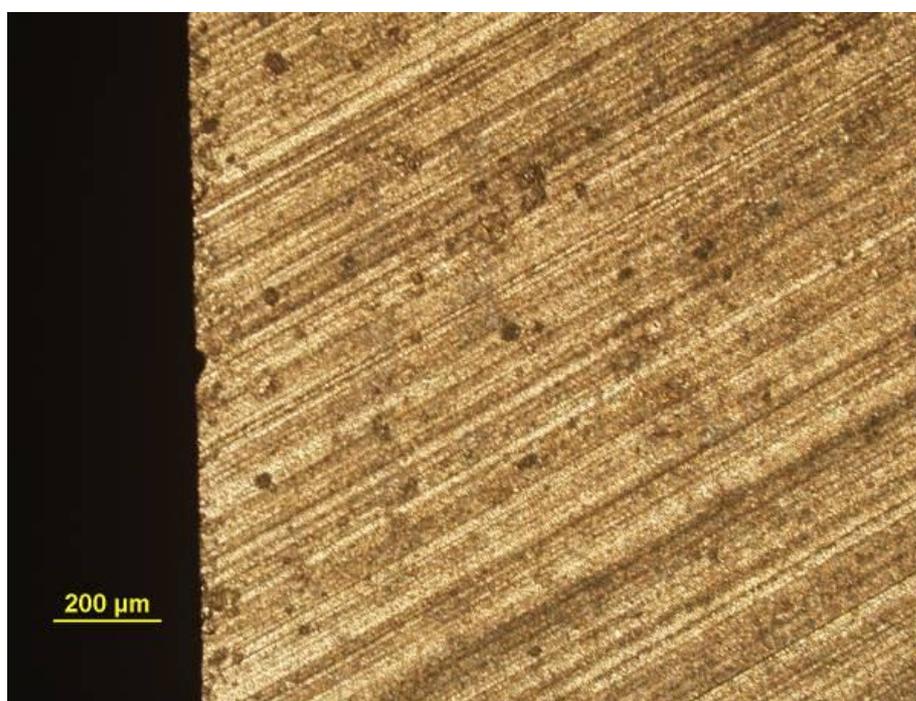


Рисунок 4.41. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после электрохимического алмазного шлифования (сплав ВК15)

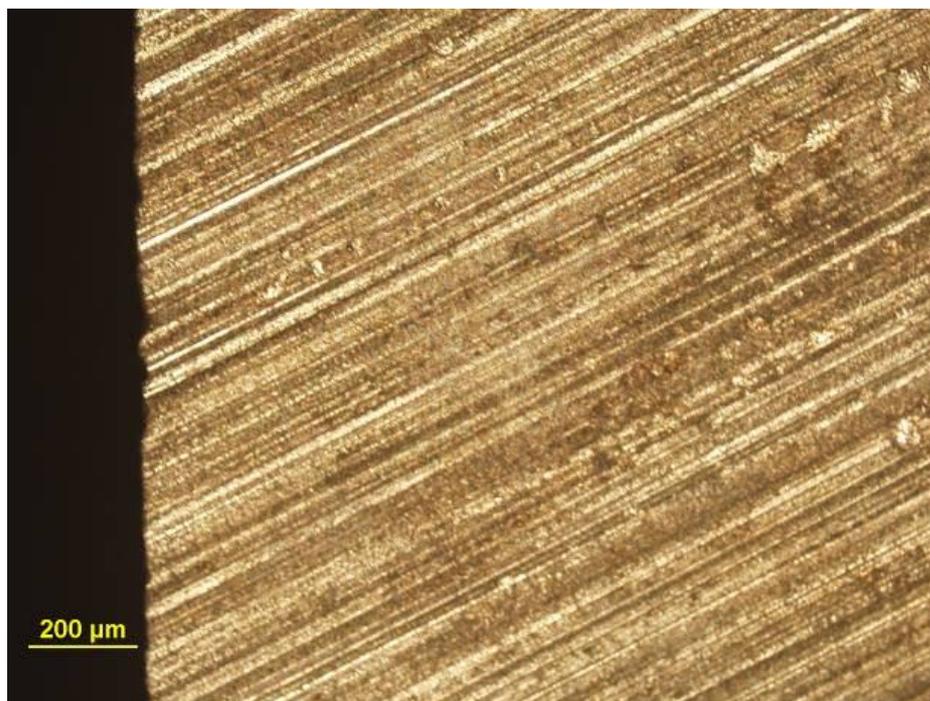


Рисунок 4.42. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после электрохимического алмазного шлифования (сплав ТН20)

Кроме того, со временем наблюдается потеря режущей способности алмазного инструмента вследствие вырыва алмазных зерен, ослабленных действием электрохимических процессов и образованием поверхности круга, состоящей только из связки алмазного круга.

Режущий инструмент после такой обработки имеет невысокий период стойкости и не способен длительно сохранить исходный профиль режущих кромок.

Режущий клин инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов вследствие электрохимических процессов, протекающих в зоне резания, имеет увеличенный радиус скругления режущей кромки на некоторых марках твердого сплава местами размером до 20 мкм (Рисунки 4.43...4.46).

Топография заточенных поверхностей после электрохимического алмазного шлифования исследовалась на сплаве марки ТН20. По результатам сканирования зондовым сканирующим микроскопом получена трехмерная модель участка передней поверхности представленная на Рисунке 4.47.

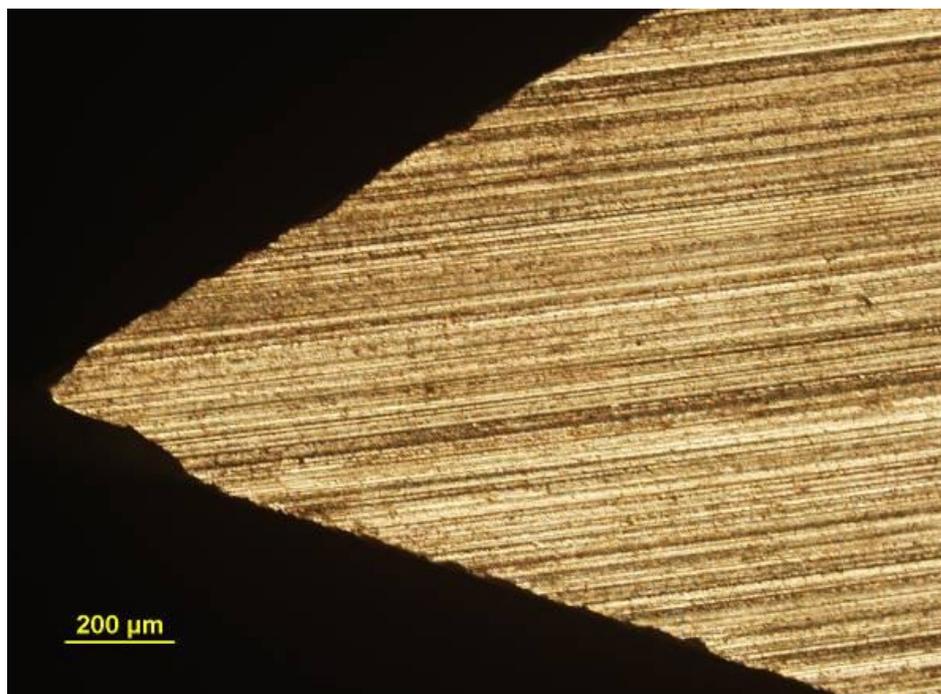


Рисунок 4.43. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после электрохимического алмазного шлифования (сплав ВК3М)

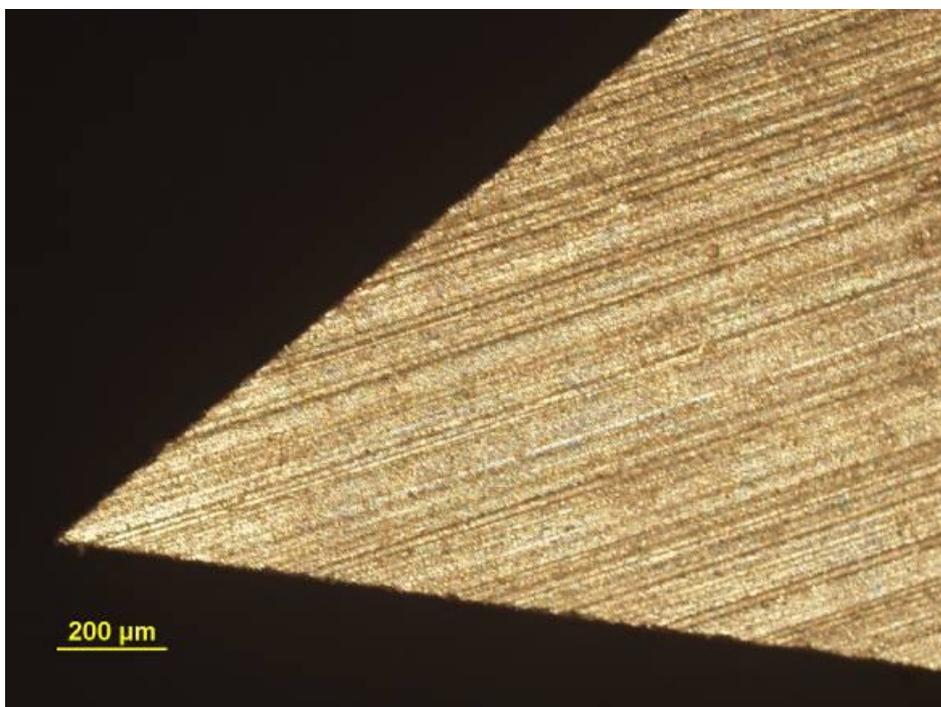


Рисунок 4.44. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после электрохимического алмазного шлифования (сплав ВК8)

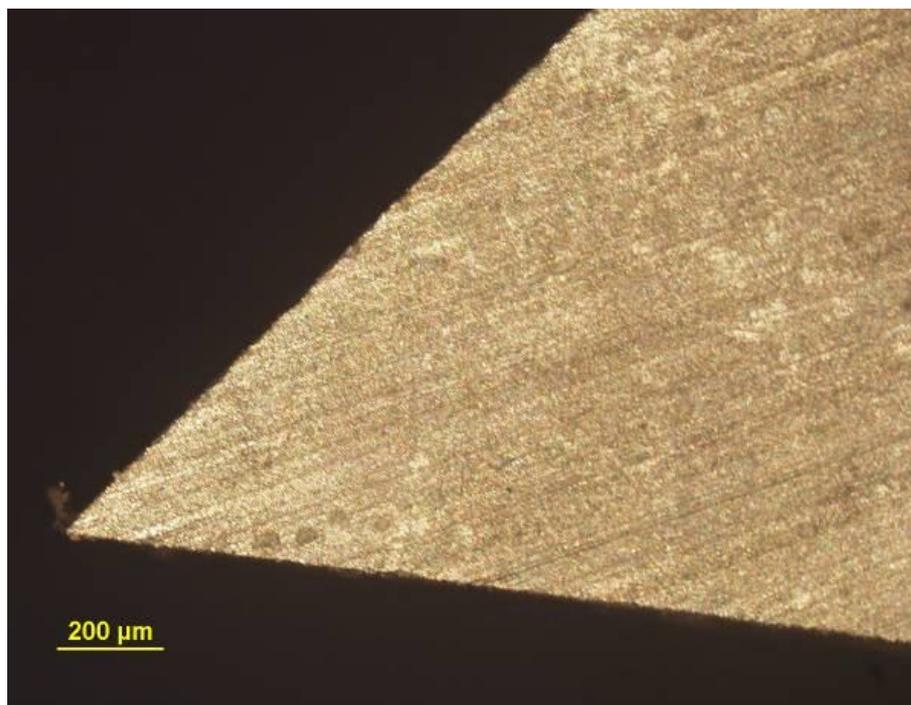


Рисунок 4.45. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после электрохимического алмазного шлифования (сплав ВК15)

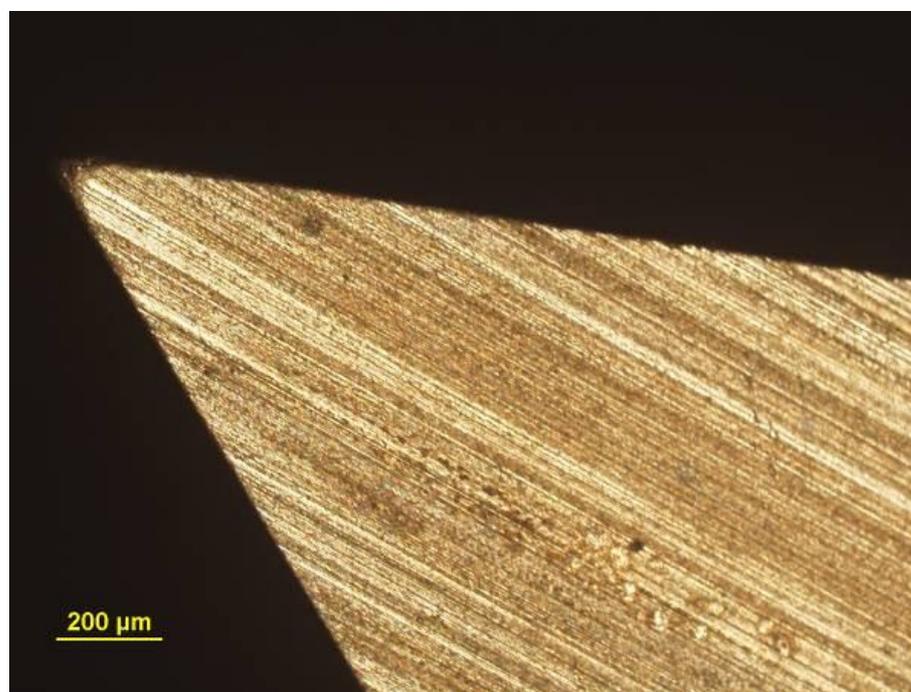


Рисунок 4.46. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после электрохимического алмазного шлифования (сплав ТН20)

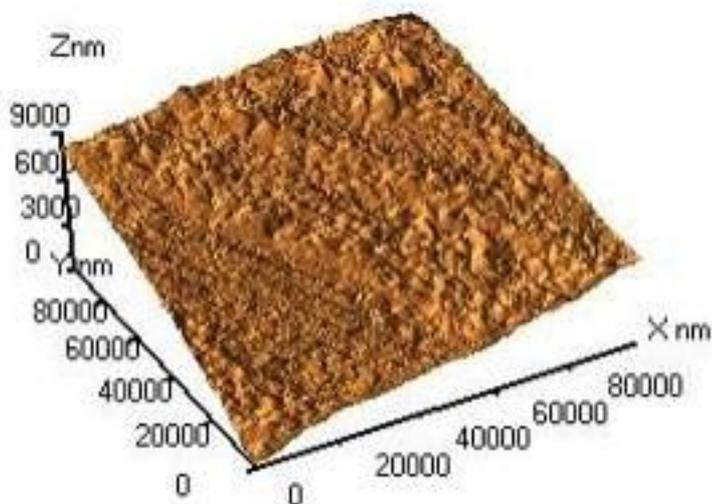


Рисунок 4.47. Модель поверхности твердого сплава ТН20 после электрохимического алмазного шлифования (сканирующая зондовая микроскопия)

Наблюдается удовлетворительный уровень шероховатости, что объясняется электрохимическим растравливанием выступов микронеровностей. Следствие действия электрохимических процессов просматривается на всем рассматриваемом участке поверхности.

#### **4.7.3. Состояние поверхностей и режущей кромки твердосплавных инструментов, заточенных алмазным шлифованием с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга**

Хотя при затачивании твердосплавного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов с непрерывной электрохимической правкой круга условия резания неизмеримо благоприятнее, чем при затачивании традиционным алмазным шлифованием, все же заточенный инструмент имеет дефекты (Рисунки 4.48...4.51).

На режущей кромке видны сколы, вырывы блоков твердого сплава, размеры которых составляют 10...15 мкм, стойкость инструмента также невысока.

На режущем клине инструмента, вследствие резания постоянно обновляемыми зернами алмазного круга, также наблюдаются вырывы элементов твердого сплава, что увеличивает радиус скругления режущей кромки и влияет на стойкость инструмента (Рисунки 4.52...4.55).

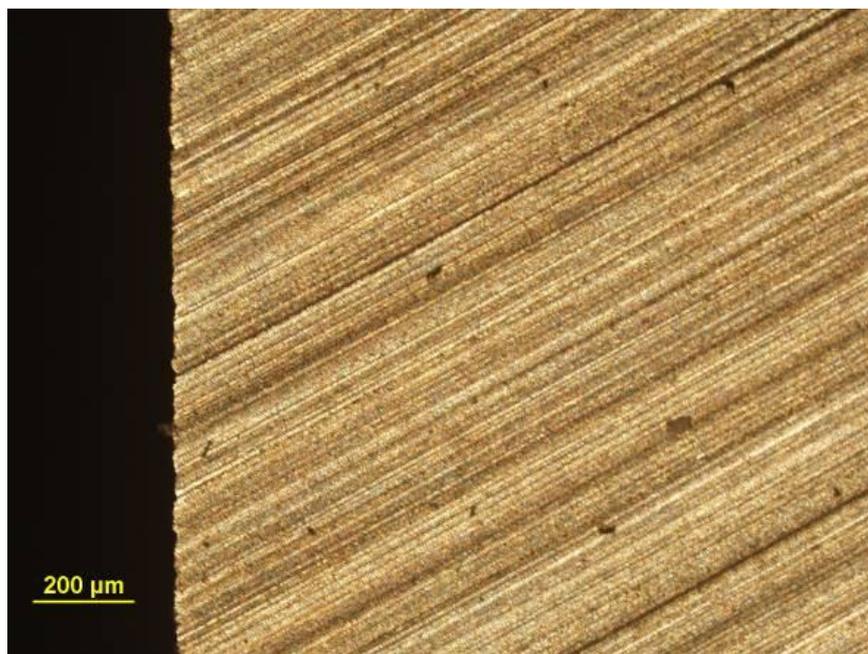


Рисунок 4.48. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после алмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга (сплав ВК3М)

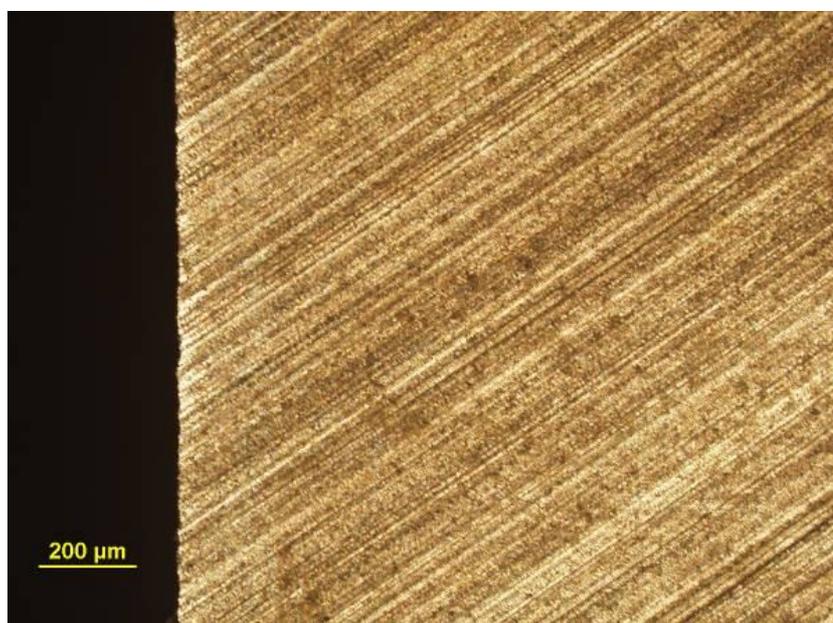


Рисунок 4.49. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после алмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга (сплав ВК8)

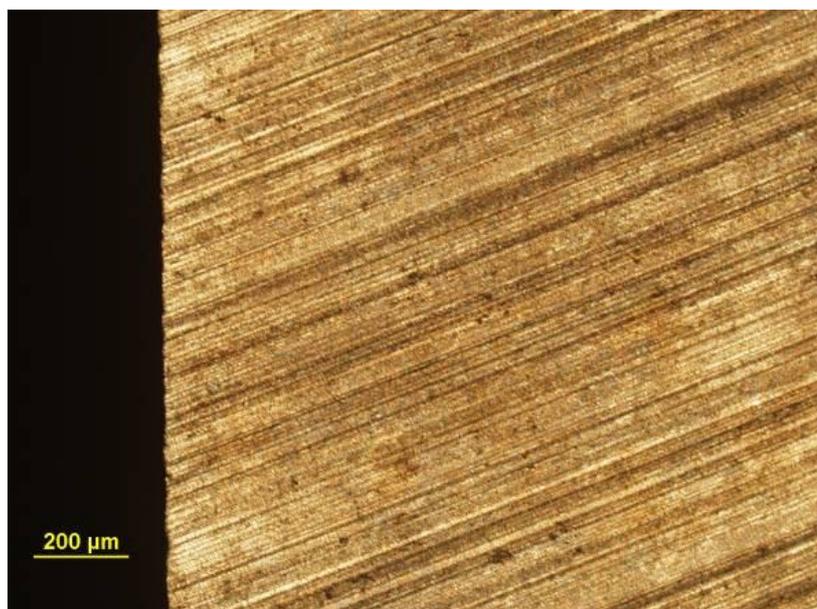


Рисунок 4.50. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после алмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга (сплав ВК15)

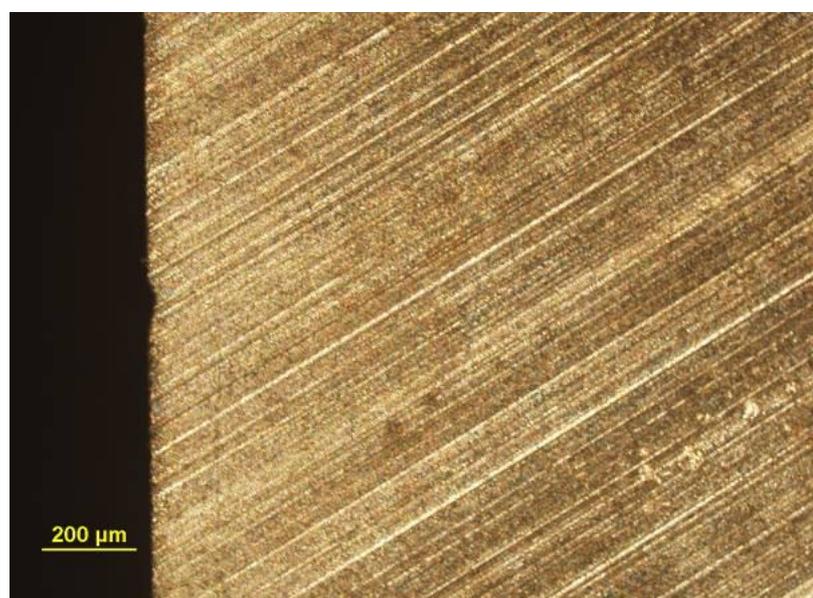


Рисунок 4.51. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после алмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга (сплав ТН20)

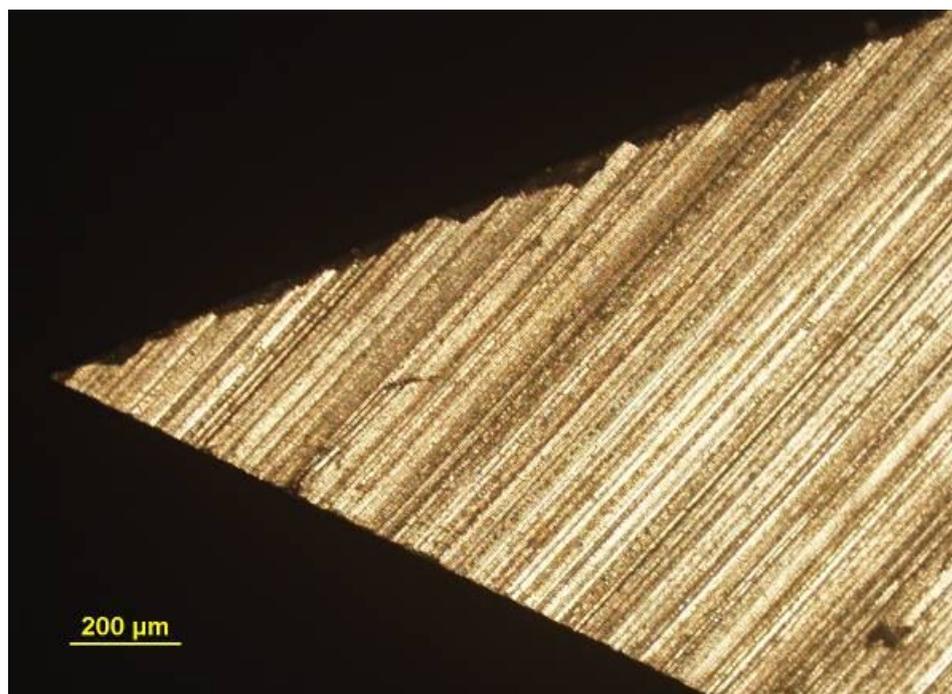


Рисунок 4.52. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после алмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга (сплав ВК3М)

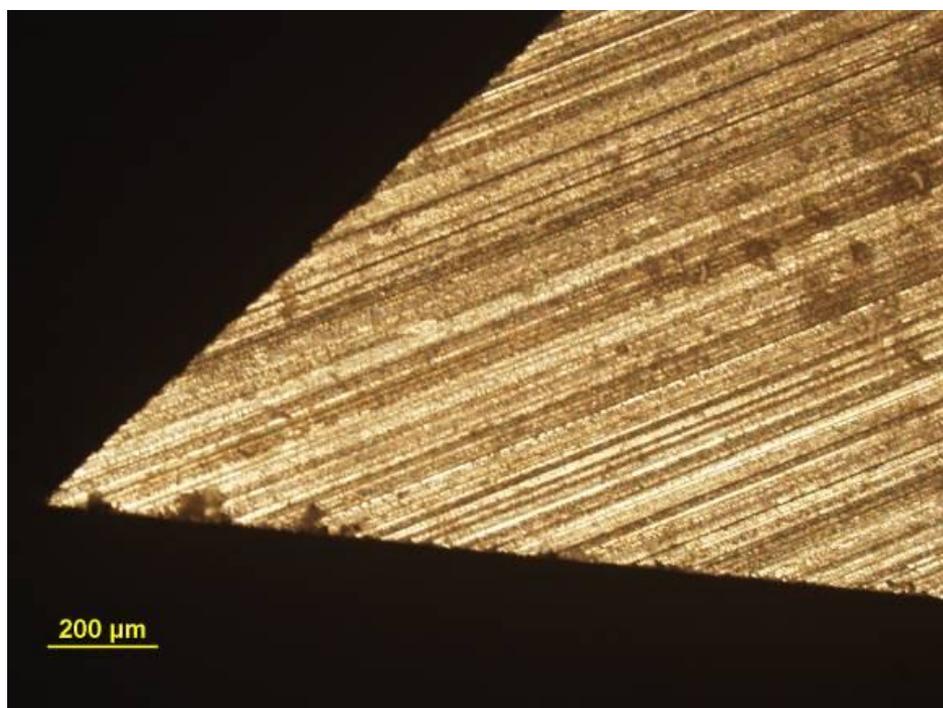


Рисунок 4.53. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после алмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга (сплав ВК8)

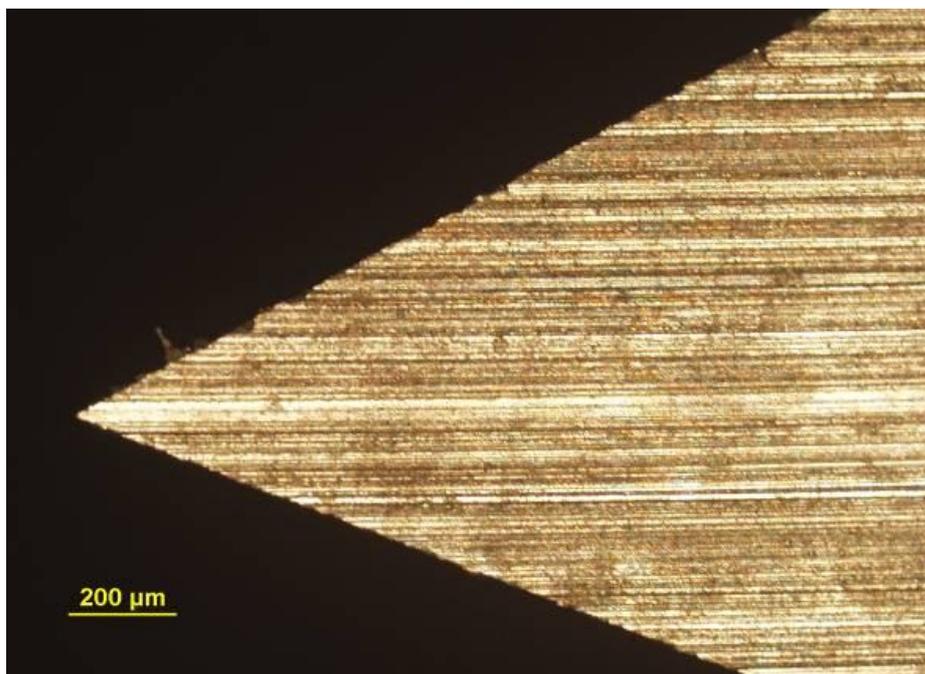


Рисунок 4.54. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после алмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга (сплав ВК15)

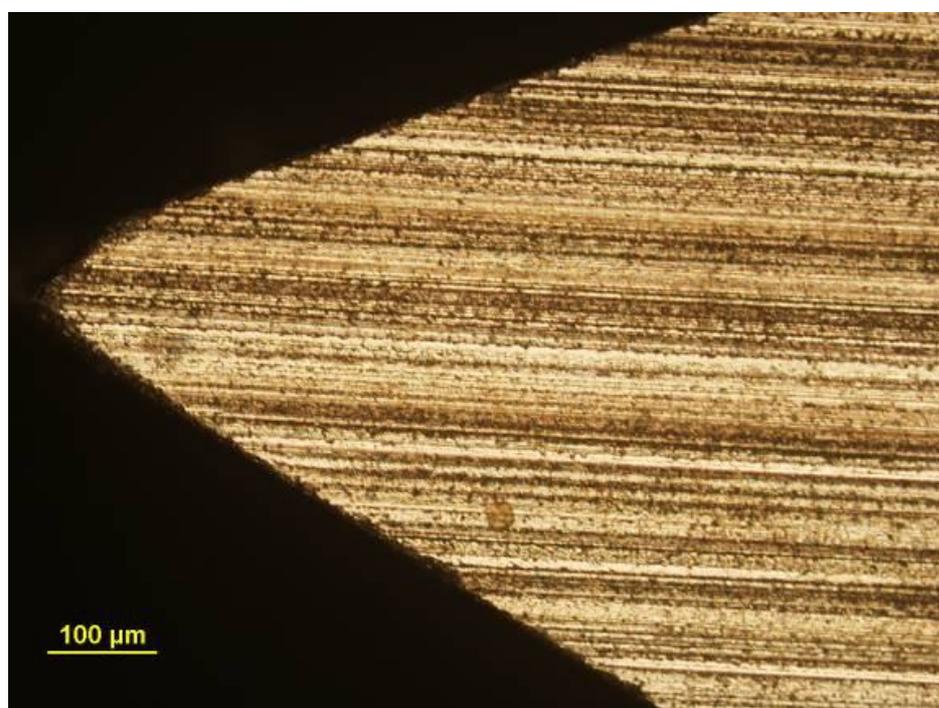


Рисунок 4.55. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после алмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга (сплав ТН20)

Топография заточенных поверхностей после алмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга исследовалась на сплаве марки ТН20. По результатам сканирования зондовым сканирующим микроскопом получена трехмерная модель участка передней поверхности представленная на Рисунке 4.56.

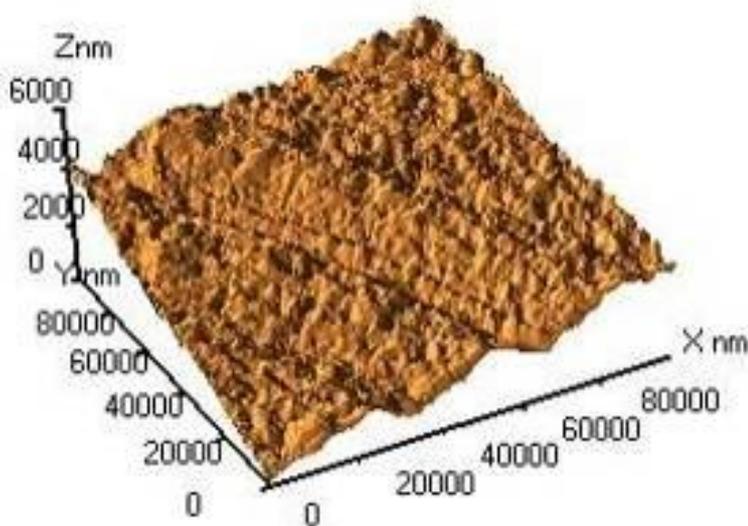


Рисунок 4.56. Модель поверхности твердого сплава ТН20 после алмазного шлифования с непрерывной электрохимической правкой круга (сканирующая зондовая микроскопия)

Неудовлетворительный уровень шероховатости заточенной поверхности образуется за счет достаточно глубоких следов, оставленных в результате резания обновленными после правки круга зернами алмазов, обладающими высокой режущей способностью.

#### **4.7.4. Состояние поверхностей и режущей кромки твердосплавных инструментов, заточенных комбинированным методом электроалмазной обработки**

После затачивания твердосплавного инструмента с применением комбинированного метода электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной правкой поверхности круга режущая кромка имеет неглубокие зазубрины и сколы. Дефекты обработанных поверхностей после затачивания таким методом имеют значительно меньшие размеры, чем у инструментов, заточенных другими методами. Размеры этих дефектов составляют не более 2 мкм (Рисунки 4.57...4.60).

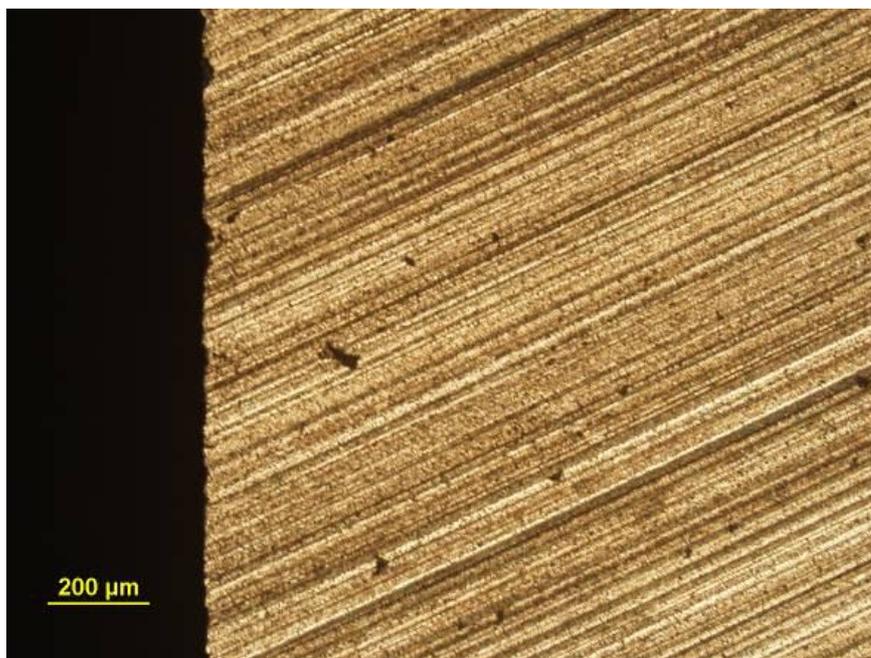


Рисунок 4.57. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после комбинированного метода электроалмазного шлифования (сплав ВК3М)

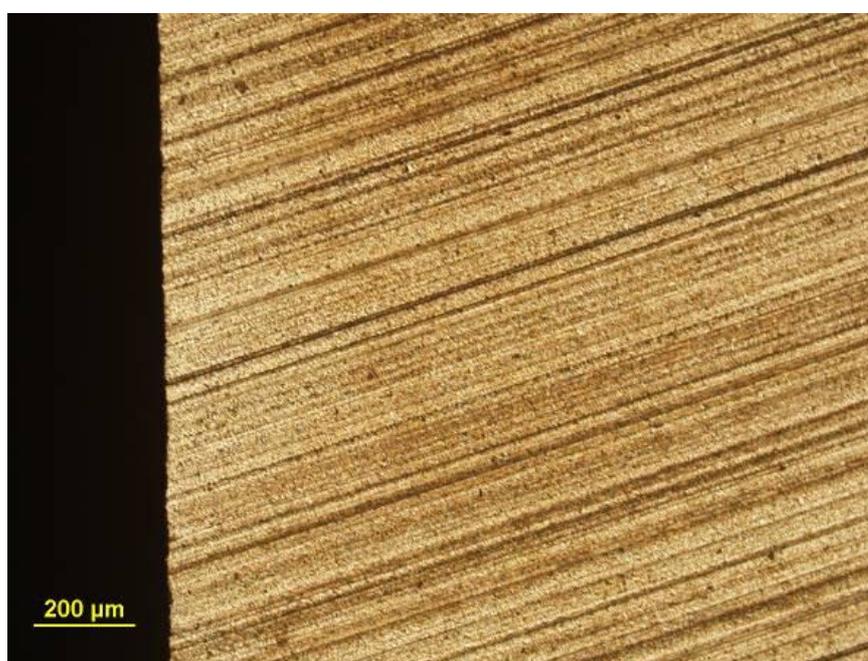


Рисунок 4.58. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после комбинированного метода электроалмазного шлифования (сплав ВК8)

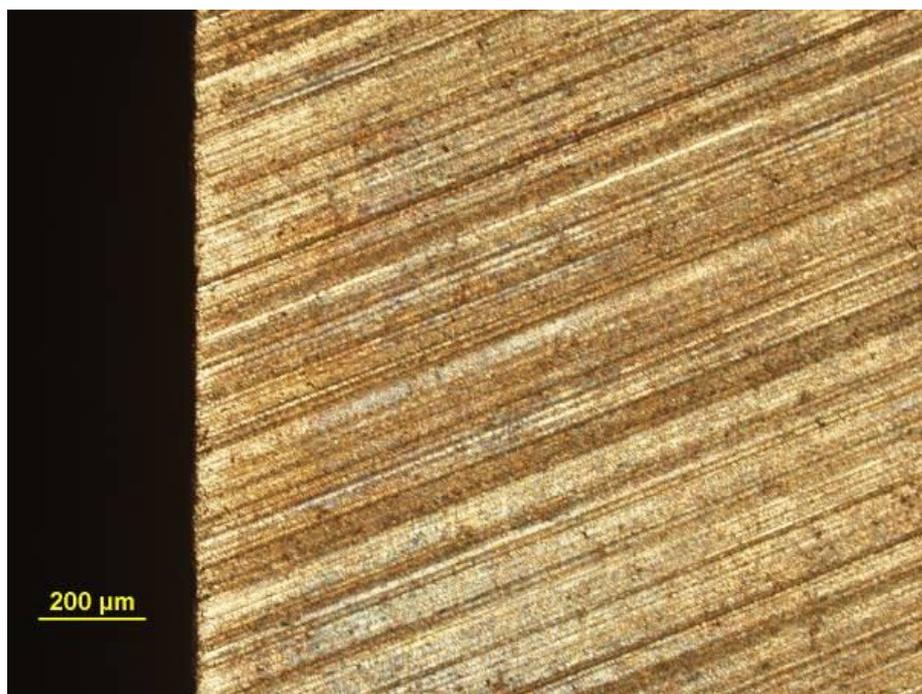


Рисунок 4.59. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после комбинированного метода электроалмазного шлифования (сплав ВК15)

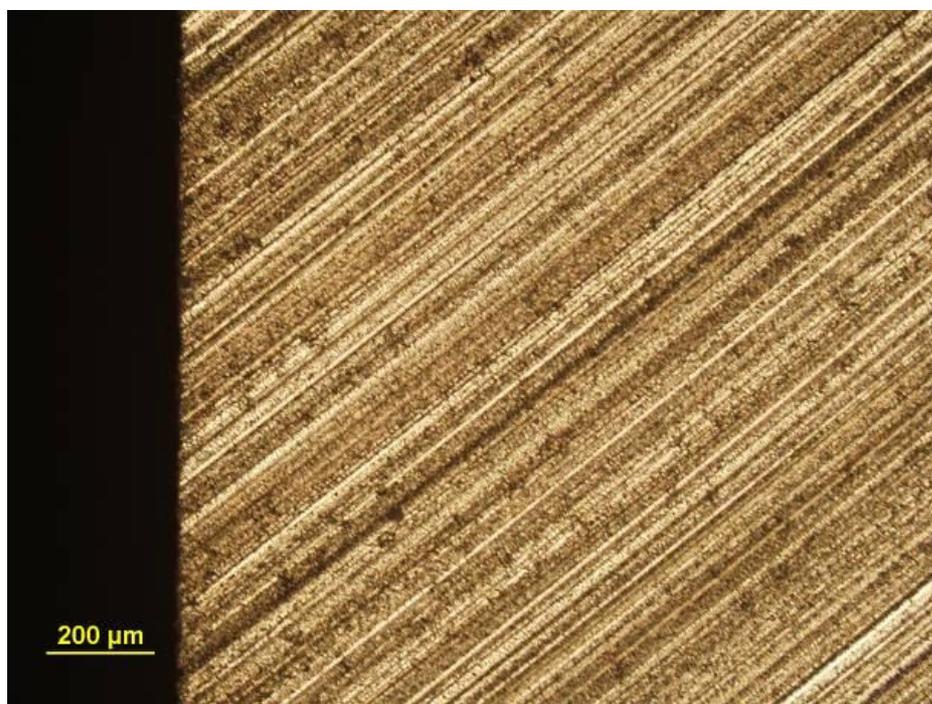


Рисунок 4.60. Состояние заточенной передней поверхности и режущей кромки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после комбинированного метода электроалмазного шлифования (сплав ТН20)

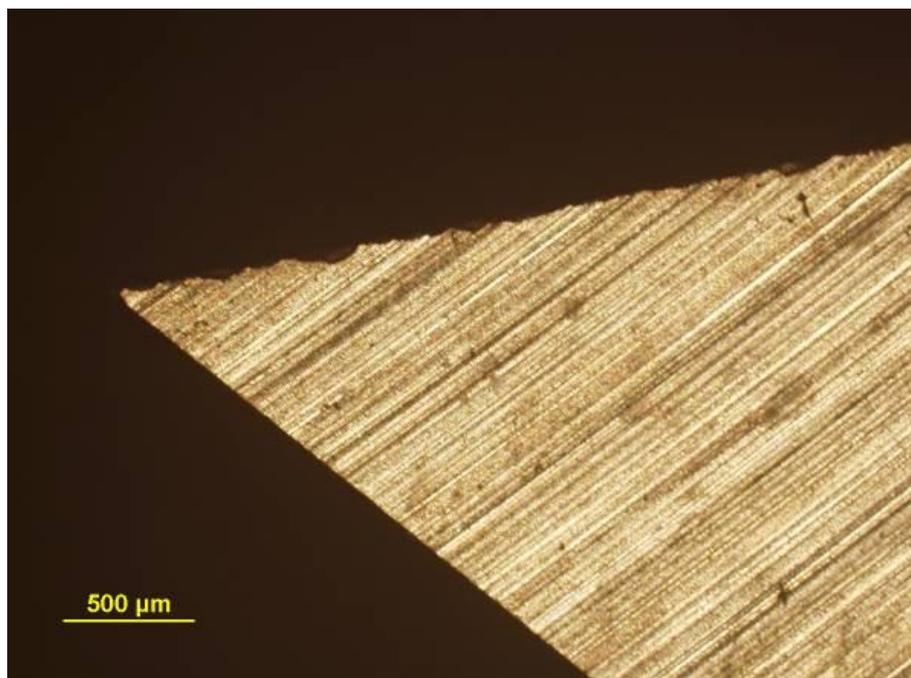


Рисунок 4.61. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после затачивания комбинированным методом электроалмазного шлифования (сплав ВК3М)

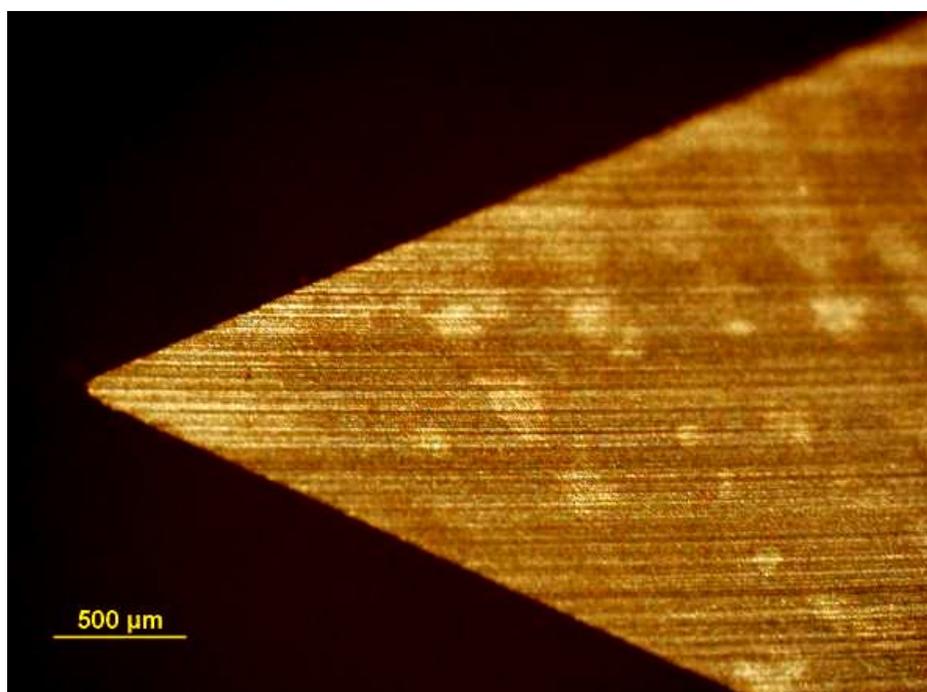


Рисунок 4.62. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после затачивания комбинированным методом электроалмазного шлифования (сплав ВК8)

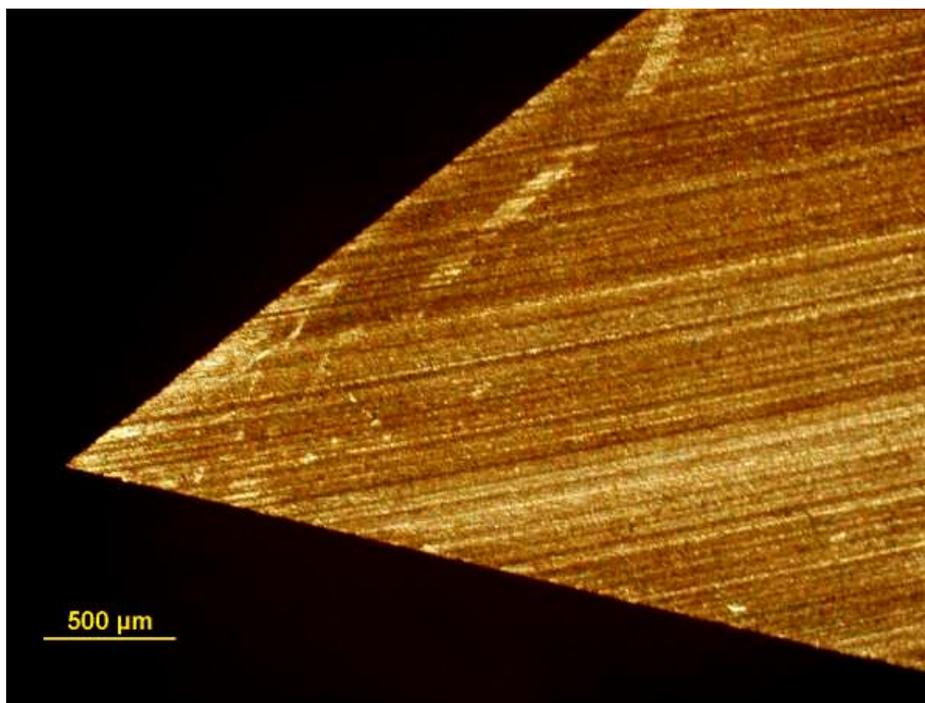


Рисунок 4.63. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после затачивания комбинированным методом электроалмазного шлифования (сплав ВК15)

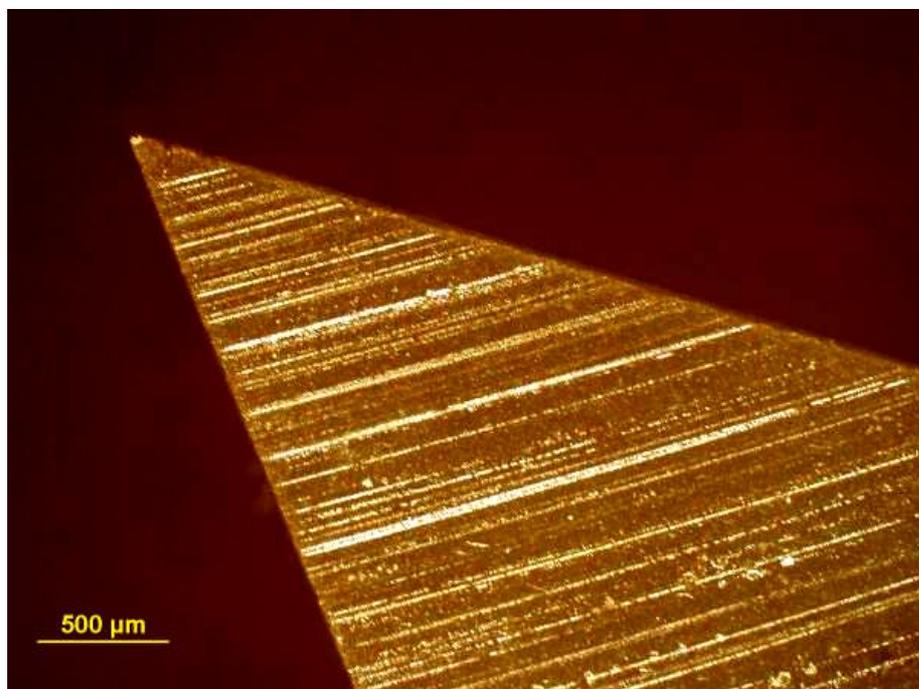


Рисунок 4.64. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после затачивания комбинированным методом электроалмазного шлифования (сплав ТН20)

Режущий клин инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов, вследствие сочетания при комбинированной обработке электрохимического растворения поверхности твердого сплава с механическим резанием обновленными после правки зернами алмазного круга, имеет небольшой радиус скругления режущей кромки величиной не более 5 мкм (Рисунки 4.61...4.64).

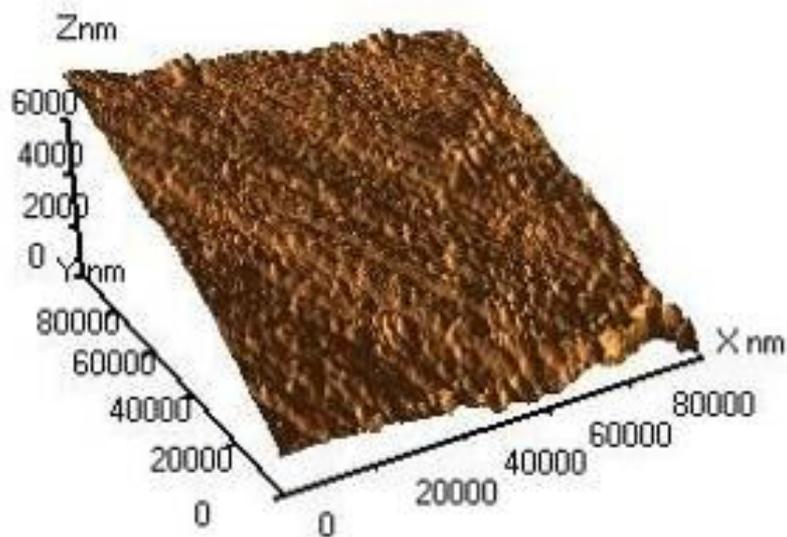


Рисунок 4.65. Модель поверхности твердого сплава TN20 после затачивания комбинированным методом электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной правкой поверхности круга (сканирующая зондовая микроскопия)

Топография заточенных поверхностей твердосплавного (сплав TN20) инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов после комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной электрохимической правкой поверхности круга исследовалась по результатам сканирования зондовым сканирующим микроскопом участка поверхности твердого сплава. Получена трехмерная модель участка передней поверхности представленная на Рисунке 4.65.

Данный метод обеспечивает высокую производительность, низкие силы и температуры резания. В результате этого отсутствуют сколы, микро- и макротрещины, прижоги, обеспечивается высокое качество режущей кромки инструмента и низкая шероховатость обработанной поверхности.

#### 4.8. Разработка инженерной методики сравнительного анализа методов комбинированной электроалмазной обработки по экономическим и качественным параметрам

Анализ экспериментальных данных показал неоднозначность результатов по каждому из методов комбинированного алмазного шлифования. В связи с этим, для рационального выбора метода комбинированной обработки для затачивания твердосплавного инструмента необходим оценочный параметр, включающий в себя все полученные в результате исследований данные и позволяющий провести рациональный выбор метода комбинированной обработки (в частном случае затачивания инструментов, оснащенных различными марками инструментальных материалов).

Для этого разработана методика, позволившая учесть как качество обработки, так и частичную стоимость операций затачивания. Приняв частное допущение, что обработка всеми методами осуществляется на аналогичном оборудовании, с использованием однотипных оснастки, инструментов, режимов и времени обработки, работниками сходной квалификации, обрабатываются твердосплавные пластины сходной конфигурации и размеров, возьмем за оценочный параметр величину затрат на изменение исходного качества после обработки комбинированным методом:

$$Z_{\text{кач}i} = \frac{Z_{oi}}{K_{\text{кач}i}}, \quad (4.27)$$

где  $Z_{\text{кач}i}$  – затраты на изменение исходного качества (затраты на качество) по  $i$ -ому методу обработки, руб,  $Z_{oi}$  – частичные затраты на обработку по  $i$ -ому методу обработки, руб,  $K_{\text{кач}i}$  - коэффициент, учитывающий качественные параметры обработки по  $i$ -ому методу.

Частичные затраты на обработку складываются из затрат на электрическую энергию и затрат на расходуемый инструмент и определяются:

$$Z_{oi} = Z_{\text{эл.энер}i} + Z_{\text{инстр}i}, \quad (4.28)$$

где  $Z_{\text{эл.энер}i}$  – затраты на электрическую энергию по  $i$ -ому методу обработки,

руб;  $Z_{инстр.i}$  – затраты на расходуемый инструмент по  $i$ -ому методу обработки, руб.

Затраты на электрическую энергию по  $i$ -ому методу обработки находим по формуле:

$$Z_{эл.энер i} = N_i \cdot T_{oi} \cdot C_{эл.энер}, \quad (4.29)$$

где  $N_i$  – общая затраченная мощность при затачивании пластины твердого сплава одним из  $i$ -ых методов, кВт;  $T_{oi}$  – основное время, затраченное на обработку пластины твердого сплава  $i$ -ым методом, ч;  $C_{эл.энер}$  – стоимости единицы электрической энергии, руб/кВт·ч.

Затраты на расходуемый инструмент по  $i$ -ому методу обработки определяем по формуле:

$$Z_{инстр.i} = C_{инстр} \cdot q_i \cdot V_{матi} \quad (4.30)$$

где  $C_{инстр}$  – стоимость инструмента (алмазного круга), принимаемая как отношение общей стоимости алмазного круга к объему алмазоносного слоя, руб/мм<sup>3</sup>;  $q_i$  – удельный расход алмазного круга, принимаемый как отношение объема износившейся части круга к объему снятого материала по  $i$ -ому методу обработки, мм<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>;  $V_{матi}$  – объем снятого обрабатываемого материала при  $i$ -ом методе обработки, см<sup>3</sup>.

Подставив (4.29) и (4.30) в выражение (4.28) получим:

$$Z_{oi} = N_i \cdot T_{oi} \cdot C_{эл.энер} + C_{инстр} \cdot q_i \cdot V_{матi} \quad (4.31)$$

Коэффициент, учитывающий качественные параметры обработки по  $i$ -ому методу определяем по формуле:

$$K_{кач.обрi} = K_{Ra i} \cdot K_{HV i} \quad (4.32)$$

где  $K_{Ra i}$  – коэффициент изменения шероховатости после  $i$ -ого метода обработки;  $K_{HV i}$  – коэффициент изменения микротвердости после  $i$ -ого метода обработки.

Коэффициент изменения шероховатости после  $i$ -ого метода обработки определяем по формуле:

$$K_{Ra i} = \frac{Ra_{исхi}}{Ra_{обрi}} \quad (4.33)$$

где  $Ra_{исх i}$  – исходная шероховатость поверхности, мкм;  $Ra_{обр i}$  – шерохова-

тость, полученная после обработки  $i$ -ым методом, мкм.

Коэффициент изменения микротвердости после  $i$ -ого метода обработки определяем по формуле:

$$K_{HV_i} = \frac{HV_{обр\ i}}{HV_{исх\ i}} \quad (4.34)$$

где  $HV_{обр\ i}$  – микротвердость поверхности, полученная после обработки  $i$ -ым методом, МПа;  $HV_{исх\ i}$  - исходная микротвердость поверхности, МПа.

Подставив (4.33) и (4.34) в выражение (4.32) получим:

$$K_{кач.обр.i} = \frac{Ra_{исх\ i}}{Ra_{обр\ i}} \cdot \frac{HV_{обр\ i}}{HV_{исх\ i}} \quad (4.35)$$

Подставив (4.31) и (4.35) в выражение (4.27) получим:

$$Z_{кач\ i} = \frac{\left( N_i \cdot T_{oi} \cdot C_{эл.энер} + C_{инстр} \cdot q_i \cdot V_{мат\ i} \right) \cdot Ra_{обр\ i} \cdot HV_{исх\ i}}{Ra_{исх\ i} \cdot HV_{обр\ i}} \quad (4.36)$$

Данное соотношение отражает не только стоимостные, но и качественные параметры метода комбинированной обработки инструментальных материалов. Получаемая величина затрат на изменение качества после обработки комбинированным методом электроалмазной обработки позволяет определить какой из методов является предпочтительным для шлифования инструментальных материалов в условиях принятых допущений.

При возникновении необходимости данная методика может быть адаптирована под любые другие сравниваемые методы обработки.

По представленной методике произведен анализ ранее полученных экспериментальных данных. Исходные данные для проведения анализа приведены в Таблице 4.4.

Подставив исходные данные в выражение (4.36), провели расчет затрат на качество при обработке комбинированными методами четырех представленных марок твердого сплава. Результаты сравнительного анализа комбинированных методов электроалмазной обработки по показателю затрат на качество приведены в Таблице 4.5.

Таблица 4.4.

Исходные данные для анализа методов комбинированной обработки

Инструментальный материал	$N_i$ , кВт	$T_o$ , час	$C_{эл.энер}$ , руб/кВт·час	$q$ , мм <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	$V_{mat}$ , см <sup>3</sup>	$C_{штр}$ , руб/мм <sup>3</sup>	$Ra_{исх}$ , мкм	$Ra_{обр}$ , мкм	$HV_{исх}$	$HV_{обр}$
<b>Традиционное алмазное затачивание</b>										
<b>ВК8</b>	2,50	0,1	0,68	2,640	0,02	0,091	0,9	0,390	1428	1562
<b>ВК15</b>	2,75			2,503				0,549	1296	1340
<b>ВК3М</b>	3,00			1,859				0,160	1831	2354
<b>ТН20</b>	2,30			5,971				0,219	1590	1559
<b>Алмазное шлифование с непрерывной э/х правкой круга</b>										
<b>ВК8</b>	2,35	0,1	0,68	1,800	0,02	0,091	0,9	0,494	1428	1691
<b>ВК15</b>	2,35			1,706				0,698	1296	1536
<b>ВК3М</b>	2,25			1,183				0,297	1831	2027
<b>ТН20</b>	2,20			4,071				0,247	1590	1554
<b>Электрохимическое шлифование</b>										
<b>ВК8</b>	2,30	0,1	0,68	1,680	0,02	0,091	0,9	0,184	1428	1688
<b>ВК15</b>	2,45			1,592				0,297	1296	1571
<b>ВК3М</b>	2,50			1,267				0,261	1831	2134
<b>ТН20</b>	2,10			3,800				0,253	1590	1550
<b>Комбинированный метод</b>										
<b>ВК8</b>	2,15	0,1	0,68	1,200	0,02	0,091	0,9	0,246	1428	1665
<b>ВК15</b>	2,45			1,137				0,280	1296	1281
<b>ВК3М</b>	1,80			0,845				0,145	1831	2089
<b>ТН20</b>	2,00			2,714				0,356	1590	1541

Таблица 4.5.

Затраты на качество при различных методах  
комбинированной электроалмазной обработки

	<b>ВК15</b>	<b>ВК8</b>	<b>ВК3М</b>	<b>ТН20</b>
<b>Традиционное алмазное затачивание</b>	2,798	1,971	0,496	2,736
<b>Алмазное шлифование с непрерывной э/х правкой круга</b>	2,136	1,593	0,687	2,123
<b>Электрохимическое шлифование</b>	0,834	0,556	0,616	2,036
<b>Комбинированный метод</b>	0,704	0,546	0,234	2,071

Сравнительный анализ методов комбинированной обработки проведенный по представленной методике подтвердил преимущества комбинированного метода электрохимического шлифования с одновременной непрерывной правкой шлифовального круга. Следовательно, метод может быть рекомендован для эффективного формообразования режущих элементов инструмента для обработки композиционных материалов, оснащенного высокопрочными труднообрабатываемыми материалами.

Минимальные значения затрат на качество получены при обработке твердого сплава марки ВК3М. Максимальные значения наблюдались при обработке твердого сплава ТН20.

#### **Выводы по 4 главе:**

1. Комбинированные методы алмазного шлифования способны повысить эффективность формообразования режущих элементов инструментов для обработки композиционных материалов. В особенности они актуальны при затачивании инструментов, оснащенных высокопрочными и труднообрабатываемыми материалами. Однако, к вопросу выбора видов и режимов затачивания инструмента для обработки композиционных материалов со специфическими требованиями к геометрии и качеству подготовки режущих поверхностей инструмента нет единого подхода. Эта проблема требует детального исследования. Необходимо сравнение различных методов с учетом показателей, характеризующих качество и производительность обработки режущих элементов инструментов для обработки композиционных неметаллических материалов.

2. Проведены исследования, направленные на выявление рациональных электрических режимов комбинированной электроалмазной обработки режущих элементов твердосплавного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов. По результатам экспериментальных исследований получены теоретические модели зависимости шероховатости обработанной поверхно-

сти, расхода алмазного инструмента и мощности резания от электрических режимов комбинированной обработки инструментов для обработки композитов, оснащенных твердыми сплавами марок ВК3М, ВК8, ВК15 и ТН20. Анализ полученных данных позволил выявить диапазон рациональных электрических режимов комбинированной обработки, обеспечивающих удовлетворительный расход алмазного круга, среднее значение мощности резания при гарантированных качественных параметрах поверхности инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов:  $i_{np} = 0,2 \dots 0,3 \text{ А/см}^2$  и  $i_{mp} = 20 \dots 30 \text{ А/см}^2$ .

3. Установлено влияние методов электроалмазной обработки на расход алмазных кругов на металлической связке, изменение мощности резания и микротвердости обработанных поверхностей, а также на шероховатость заточенных поверхностей твердосплавного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов:

- при затачивании инструмента традиционным алмазным шлифованием без применения электрических процессов наблюдается максимальный расход алмазного круга (в среднем в 2,2 раз больше, чем при обработке комбинированным методом); максимальное значение мощности резания; обработанные поверхности имеют микротвердость близкую к исходной;

- при обработке электрохимическим шлифованием расход алмазного круга в среднем на 20 % выше, чем при обработке комбинированным методом; мощность резания в среднем на 12 % меньше по сравнению с традиционным алмазным шлифованием; электрохимическая обработка ослабляет затачиваемые поверхности, частично уменьшая их микротвердость;

- обработка алмазным шлифованием с непрерывной электрохимической правкой круга ведет к увеличению расхода абразивного инструмента в среднем на 30 %, в сравнении с обработкой комбинированным методом; мощность резания в среднем на 14 % меньше по отношению к традиционному алмазному шлифованием; уровень микротвердости обработанной поверхности близок к исходному;

- при затачивании твердосплавного инструмента для обработки композиционных материалов комбинированным методом электроалмазной обработки, соче-

тающем в себе электрохимическое шлифование с одновременной непрерывной электрохимической правкой поверхности круга наблюдается минимальный расход алмазного инструмента; мощность резания в среднем на 14 % меньше в сравнении с традиционным алмазным шлифованием; микротвердость поверхностей твердых сплавов близка к исходной.

4. С использованием оптической, растровой электронной, сканирующей зондовой микроскопии, оптической интерферометрии исследовано состояние поверхностей и режущей кромки твердосплавных инструментов, заточенных различными методами электроалмазной обработки:

- наибольшая шероховатость обработанных поверхностей твердых сплавов наблюдается при алмазном шлифовании с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга. На режущей кромке видны сколы, вырывы блоков твердого сплава, размеры которых составляют 10...15 мкм. На режущем клине инструмента наблюдаются разрушения твердого сплава, что увеличивает радиус скругления режущей кромки;

- шероховатость при традиционном алмазном затачивании меньше в среднем на 27 % в сравнении с обработкой с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга. Заточенные поверхности инструмента несут на себе следы пластической деформации. Вдоль режущей кромки инструмента наблюдаются систематические сколы и вырывы блоков твердого сплава. Размеры этих дефектов доходят до нескольких десятков микрометров. Режущий клин инструмента также имеет дефекты, радиус скругления режущей кромки составляет более 10 мкм;

- электрохимическое шлифование твердых сплавов позволило получить шероховатость в среднем на 46 % меньше в сравнении с алмазным шлифованием с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга. Поверхности инструмента по внешнему виду дефектны, с сильно растравленными участками. На поверхностях видны отдельные глубокие кратеры, образованные действием локальных эрозионных процессов. Режущий клин инструмента имеет увеличенный радиус скругления режущей кромки на некоторых марках твердого сплава местами размером до 20 мкм;

- минимальная шероховатость поверхностей твердых сплавов (в среднем на 62 % меньше, чем при алмазном шлифовании с непрерывной электрохимической правкой поверхности круга) достигнута при обработке комбинированным методом электроалмазной обработки, сочетающим электрохимическое шлифование с одновременной непрерывной электрохимической правкой поверхности круга. Дефекты обработанных поверхностей составляют не более 2 мкм. Наблюдается малый радиус скругления режущей кромки величиной не более 5 мкм.

5. Использование различных методик позволило провести разносторонний анализ состояния рабочих поверхностей и режущих элементов инструментов для обработки композиционных материалов, имеющих специфические требования к геометрическим параметрам, микрогеометрии и качеству полученных в процессе формообразования поверхностей. В результате выявлено преимущество комбинированного метода электрохимического шлифования с одновременной непрерывной правкой шлифовального круга.

6. Разработана инженерная методика, позволившая учесть при сравнительном анализе методов комбинированной электроалмазной обработки, как частные качественные параметры обработки, так и частичную стоимость операций затачивания. Обработка по представленной методике полученных экспериментальных данных позволила сравнить методы по затратам на изменение качества. Сравнительный анализ подтвердил преимущества комбинированного метода электрохимического шлифования с одновременной непрерывной правкой шлифовального круга.

7. Комбинированный метод электрохимического шлифования с одновременной непрерывной правкой шлифовального круга рекомендован для рациональной технологической подготовки инструмента для обработки композиционных материалов. Эффективность применения метода повышается для инструментов, оснащенных высокопрочными труднообрабатываемыми материалами.

## **ГЛАВА 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ ФРЕЗЕРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ**

Целью дальнейших исследований было определение работоспособности инструмента, для оценки возможности использования в конструкциях инструмента различных марок инструментальных высокопрочных материалов. Кроме того, имелась необходимость определения рациональных характеристик процесса резания, геометрических параметров инструмента, гарантирующих высокое качество обработанной поверхности. Также требовалось оценить работоспособность инструмента и качество обработки на различных видах композиционных материалов, для реализации результатов исследований в различных областях промышленности.

В качестве исследуемых композиционных материалов были выбраны ДСтП марки П-А и стеклотекстолит марки СТЭФ-1, свойства которых представлены в Главе 1.

### **5.1. Работоспособность фрезерного инструмента, оснащенного твердыми сплавами при обработке композиционных материалов на древесной основе**

На сегодняшний день широкое распространение получили композиционные материалы на древесной основе, в силу невысокой стоимости и доступности исходного сырья. Такие материалы, как правило, используются в различных отраслях промышленности (в строительстве, в изделиях мебели, на транспорте, в горнодобывающей, легкой промышленности и др.) для получения окончательных размеров их обычно фрезеруют по торцу, для получения требуемой точности и низкой шероховатости, необходимой под облицовку готовых изделий. Как было отмечено ранее, их обработка приводит к повышенному износу режущего инструмента. Таким образом, одним из видов композиционных материалов для проведения исследований выбраны древесно-стружечные плиты.

*Условия проведения исследований процесса обработки композиционных материалов на древесной основе фрезерным инструментом, оснащенным твердыми сплавами*

Для исследования процесса обработки композиционных материалов спроектирован экспериментальный стенд на базе универсально-заточного станка модели 3Д642Е (Рисунок 5.1) [97].

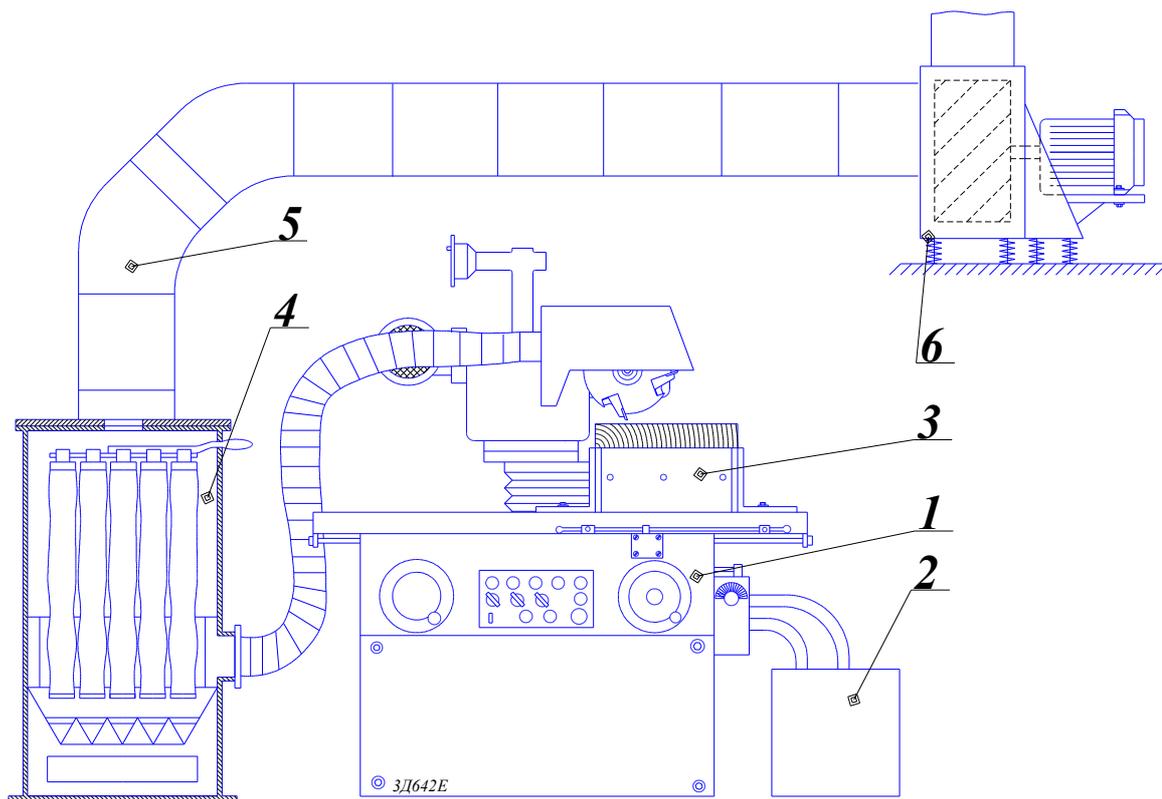


Рисунок 5.1. Схема экспериментального стенда для исследования процесса обработки композиционных материалов

*1 – станок 3Д642Е; 2 – гидропривод станка; 3 – приспособление для крепления заготовки; 4 – фильтрующий агрегат; 5 – воздухопровод; 6 – вентилятор вытяжной*

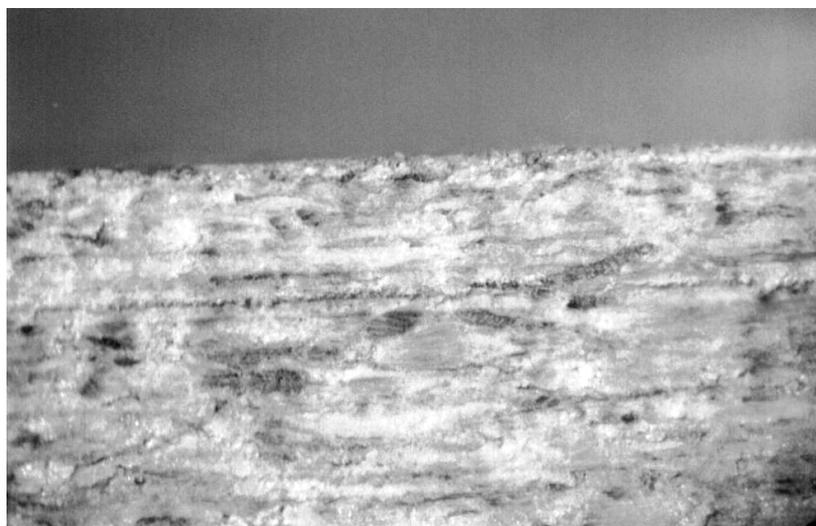
Данная модель станка выбрана исходя из условий, что фрезерование композиционных материалов происходит, как правило, при больших скоростях резания, а станок 3Д642Е позволяет установить скорости вращения шпинделя от 2000 до 6000 и более оборотов в минуту.

Для удаления пыли и стружки из зоны резания использовался агрегат на ба-

зе стандартного циклона модели ЗИЛ-900 с незначительной модернизацией, заключающейся в том, что электродвигатель и вентилятор демонтированы, а агрегат подключен к системе вытяжной вентиляции.

Экспериментальная установка прошла метрологическое обследование по геометрической, параметрической и технологической точности.

Качество фрезерованной поверхности ДСтП характеризуется глубиной неровностей разрушения и ворсистостью. Абсолютные значения высоты неровностей зависят от угла резания, плотности плит, количества связующего, степени затупления инструмента и толщины срезаемых слоев (подачи на резец).



*a) ×10*



*б) ×10*

Рисунок 5.2. Фрагмент поверхности ДСтП после фрезерования:

*a – при величине фаски износа по задней поверхности  $h_3 = 0,05$  мм;  
б – при величине фаски износа по задней поверхности  $h_3 = 0,35$  мм*

Критерием технологической стойкости инструмента являлось качество обработанной поверхности. Согласно предварительным опытам по достижении величины фаски износа по задней поверхности  $h_3 = 0,3$  мм качество обработанной поверхности значительно ухудшается (Рисунок 5.2) и не отвечает требованиям к фрезерованной поверхности изделия. Следовательно, эта величина и выбрана в качестве критерия технологической стойкости инструмента, по достижении которого наблюдения прекращаются, инструмент затачивается.

Наряду с величиной линейного износа  $h_3$  при оценке степени заострения режущего клина инструмента используют и величину радиуса при вершине режущего лезвия  $\rho$ .

На практике величину радиуса  $\rho$  определяют с помощью слепков, снимаемых с режущего лезвия. Однако процесс этот долгий и трудоемкий, и потому нами предложена методика определения степени заострения режущего лезвия и величины радиуса  $\rho$  при известном значении  $h_3$ .

Используя данные замера и зная величину угла при вершине заточенного инструмента  $\beta$ , по формуле, выведенной из схемы геометрии лезвия инструмента [178, 189], вычисляем величину радиуса  $\rho$ :

$$\rho = \frac{\left(\frac{h_3}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}{1 - \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}. \quad (5.1)$$

Так, после затачивания твердосплавного инструмента для обработки композиционных материалов комбинированным методом электроалмазного шлифования с одновременной непрерывной правкой поверхности круга максимальный размер фаски лезвия составляет 5 мкм; радиус  $\rho$  – 4,6 мкм.

Интенсивность изнашивания (отношения величины износа к времени изнашивания) и текущее значение линейного износа в количественном выражении зависят не только от продолжительности времени резания, но и от ряда других факторов, к которым относятся скорость резания, подача, геометрия инструмента, физико-механические свойства инструментального и обрабатываемого материалов.

Измерение размера износа по задней поверхности ( $h_3$ ) проводилось с использованием оптической микроскопии. По результатам измерений строились кривые износа, выражающие функциональную зависимость величины фаски износа по задней поверхности от продолжительности периода технологической стойкости инструмента ( $T$ ).

При достижении критерия стойкости, режущий инструмент подвергался затачиванию по задней поверхности, фиксировалось время обработки до переточки  $T$ , а также шероховатость обработанной поверхности  $R_{max}$ .

Замеры шероховатости производились с использованием профилографа-профилометра "Абрис-ПМ7" с возможностью визуального и графического отображения результатов измерений, статистической обработки результатов измерений с помощью высокопроизводительного компьютера через интерфейс RS-232.

Выбор величины подачи на зуб  $S_z$  и глубины резания  $t$ , а также остальных режимов обработки основан на существующих рекомендациях по обработке неметаллических материалов [8, 159] и результатах предварительных исследований. Согласно рекомендациям наилучшее качество поверхности при фрезеровании ДСтП марки П-А достигается при следующих режимах:  $V = 2826$  м/мин,  $S_0 = 1,5$  м/мин,  $t = 1$  мм.

### **5.1.1. Влияние марки твердого сплава на работоспособность фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов на древесной основе**

Инструментом, заточенным комбинированным методом, были выполнены исследования стойкости твёрдых сплавов групп ВК (вольфрамкобальтовые) и ТК (титановольфрамкобальтовые) при обработке торца ДСтП. Такие группы инструментальных твердых сплавов обычно рекомендуются в справочной литературе для обработки резанием труднообрабатываемых неметаллических материалов. Проведена серия опытов с инструментальными материалами Т5К10, Т15К6,

Т30К4 и ВК3М, ВК6, ВК8, ВК15 при одинаковых режимах резания: число оборотов шпинделя  $n = 6000 \text{ мин}^{-1}$ ; глубина фрезерования  $t = 1 \text{ мм}$ ; продольная подача  $S_{np} = 1,5 \text{ м/мин}$ ; фрезерование встречное.

Известно, что уравнение зависимости величины износа инструмента от продолжительности периода технологической стойкости инструмента имеет вид степенной функции [31, 44, 101]. Используя метод наименьших квадратов для каждой марки исследуемого инструментального материала, определим коэффициенты степенного уравнения вида:

$$h_z(T) = k_0 \cdot T^{k_1} + k_2 \quad (5.2)$$

После проведения стойкостных испытаний инструмента со сплавами группы ТК, взяв за основу средние значения износа инструмента по задней поверхности по каждому интервалу периода технологической стойкости, проведем расчеты коэффициентов степенного уравнения (5.2) для средних значений. Получим уравнения зависимости величины фаски износа по задней поверхности от продолжительности технологического периода стойкости инструмента для каждой марки твердого сплава (Таблица 5.1).

Таблица 5.1

Вид уравнений зависимости износа инструмента от продолжительности периода технологической стойкости инструмента для разных марок сплавов группы ТК при обработке ДСтП марки П-А

Марка сплава	Уравнение зависимости износа от времени
Т5К10	$h_z(T) = 0,039 \cdot T^{0,382} - 8,67 \cdot 10^{-3}$ (5.3)
Т15К6	$h_z(T) = 0,017 \cdot T^{0,516} - 0,014$ (5.4)
Т30К4	$h_z(T) = 0,022 \cdot T^{0,446} - 6,954 \cdot 10^{-3}$ (5.5)

По результатам исследования работоспособности инструмента, оснащенного титановольфрамкобальтовыми твердыми сплавами марок Т5К10, Т15К6, Т30К4 построены графики зависимостей величины фаски износа по задней поверхности инструмента от времени обработки композиционного материала (Рисунок 5.3).

Исходя из результатов исследования, установлено, что при фрезеровании ДСтП марки П-А средний технологический период стойкости сплава Т5К10 составляет 228 минут, сплава Т15К6 – 300 мин, сплава Т30К4 – 382 мин.

Лучшей технологической стойкостью при заданных условиях обладает твердый сплав марки Т30К4: его стойкость выше стойкости сплава Т5К10 на 40 % и сплава Т15К6 на 21 %.

Анализ результатов исследования стойкости инструмента, оснащенного твердыми сплавами группы ТК при фрезеровании ДСтП марки П-А, показал, что стойкость инструмента увеличивается с уменьшением содержания связки ( $Co$ ) и увеличением содержания карбидов ( $TiC$ ).

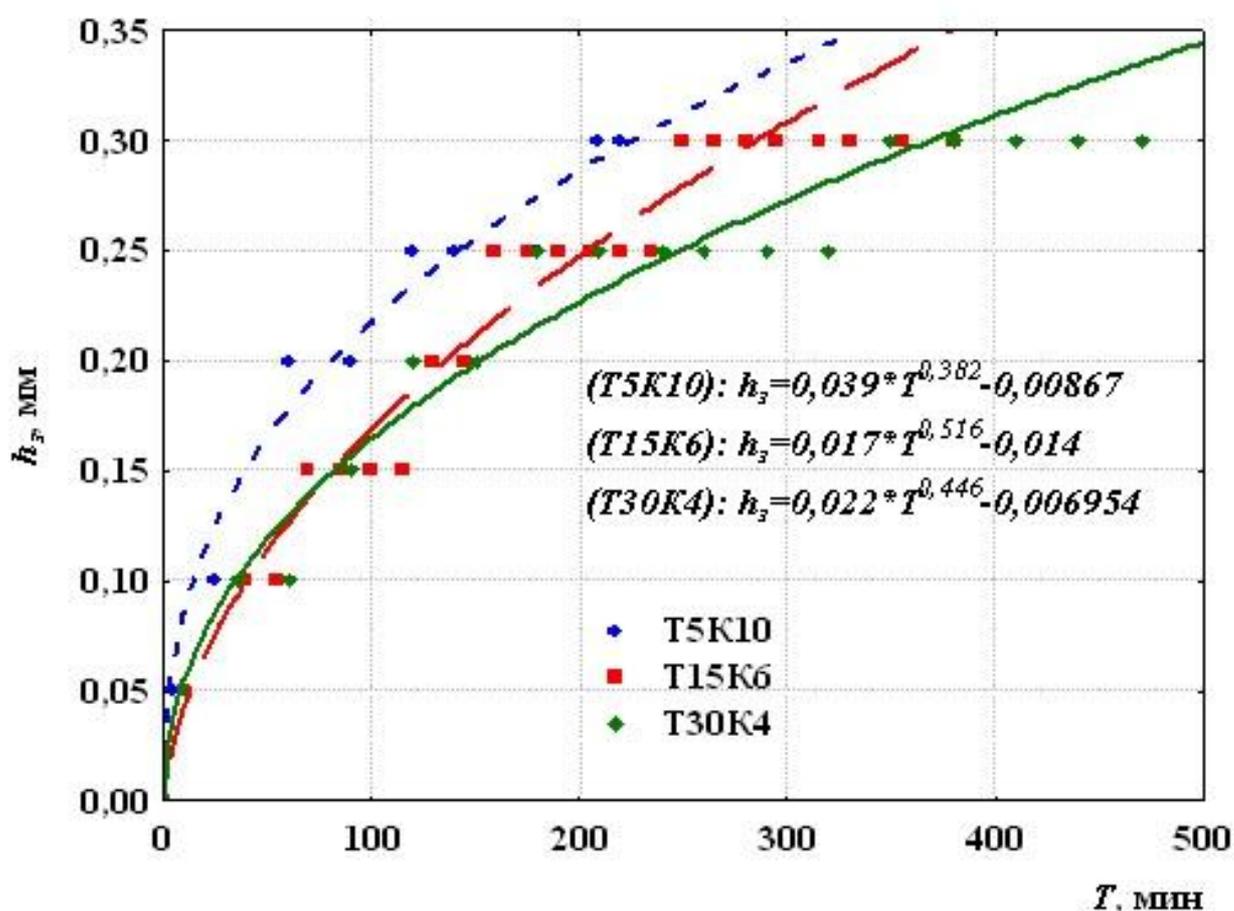


Рисунок 5.3. Зависимости величины фаски износа по задней поверхности от продолжительности периода технологической стойкости инструмента при обработке ДСтП для твердых сплавов группы ТК

Представляет интерес выявление функциональной зависимости износа ин-

струмента, оснащенного различными марками твердого сплава группы ТК, не только от времени обработки композиционного материала, но и от процентного содержания кобальтовой связки в инструментальном твердом сплаве, т.е. получить зависимость вида  $h_3 = f(Co, T)$ .

Обработав экспериментальные данные, построим поверхность отклика, характеризующую зависимость размера фаски износа по задней поверхности инструмента, оснащенного твердым сплавом группы ТК, от времени работы и изменения процентного содержания связки ( $Co$ ) в твердом сплаве (Рисунок 5.4).

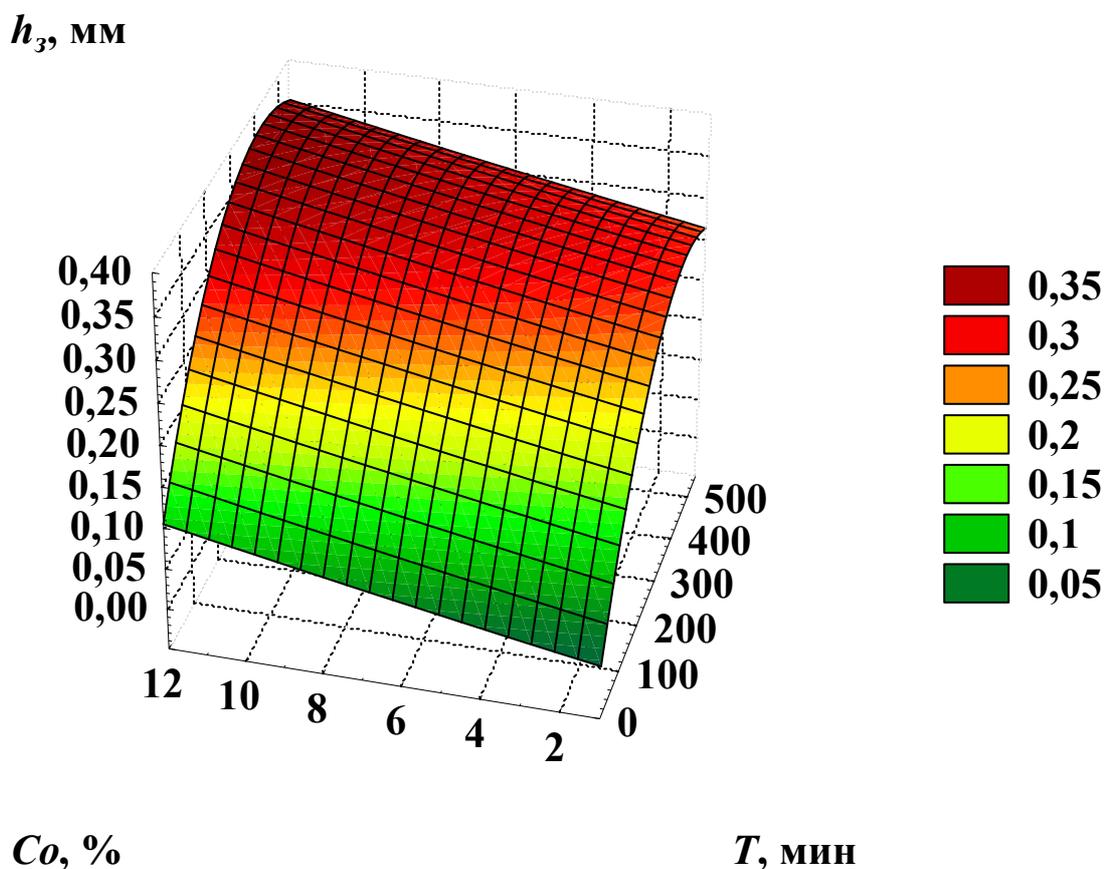


Рисунок 5.4. Поверхность отклика величины фаски износа по задней поверхности инструмента, оснащенного твердым сплавом группы ТК, от изменения процентного содержания связки ( $Co$ ) в твердом сплаве и продолжительности периода технологической стойкости инструмента

Полученная теоретическая модель позволяет прогнозировать технологическую стойкость инструмента, оснащенного твердыми сплавами группы ТК с раз-

личным процентным содержанием связки, при обработке композиционных материалов на древесной основе.

По результатам исследования стойкости инструмента, оснащенного вольфрамкобальтовыми твердыми сплавами марок ВК15, ВК8, ВК3М, взяв за основу средние значения износа инструмента по задней поверхности по каждому интервалу периода технологической стойкости инструмента, проведем расчеты коэффициентов степенного уравнения (5.2) для средних значений, используя метод наименьших квадратов.

В результате получены уравнения зависимости величины фаски износа по задней поверхности от продолжительности периода технологической стойкости инструмента при обработке композиционного материала для каждой марки твердого сплава (Таблица 5.2).

Таблица 5.2

Вид уравнений зависимости износа инструментального материала от времени обработки при различном содержании связующего в сплаве группы ВК при обработке ДСтП марки П-А

Марка сплава	Уравнение зависимости износа от времени
ВК15	$h_z(T) = 7,541 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0,612} + 1,609 \cdot 10^{-3}$ (5.6)
ВК8	$h_z(T) = 4,668 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0,677} - 6,013 \cdot 10^{-4}$ (5.7)
ВК6	$h_z(T) = 1,4 \cdot 10^{-2} \cdot T^{0,464} - 1,719 \cdot 10^{-4}$ (5.8)
ВК3М	$h_z(T) = 5,925 \cdot 10^{-4} \cdot T^{0,817} - 6,654 \cdot 10^{-3}$ (5.9)

По результатам исследования стойкости инструмента, оснащенного вольфрамкобальтовыми твердыми сплавами марок ВК15, ВК8, ВК6, ВК3М построены графики зависимостей величины фаски износа по задней поверхности от продолжительности периода технологической стойкости инструмента при обработке композиционного материала (Рисунок 5.5).

На основании результатов стойкостных испытаний твердых сплавов группы ВК установлено, что при фрезеровании ДСтП марки П-А технологический период стойкости сплава ВК15 составляет 407 мин, сплава ВК8 – 467 мин, сплава ВК6 –

700 мин, сплава ВК3М – 2092 мин.

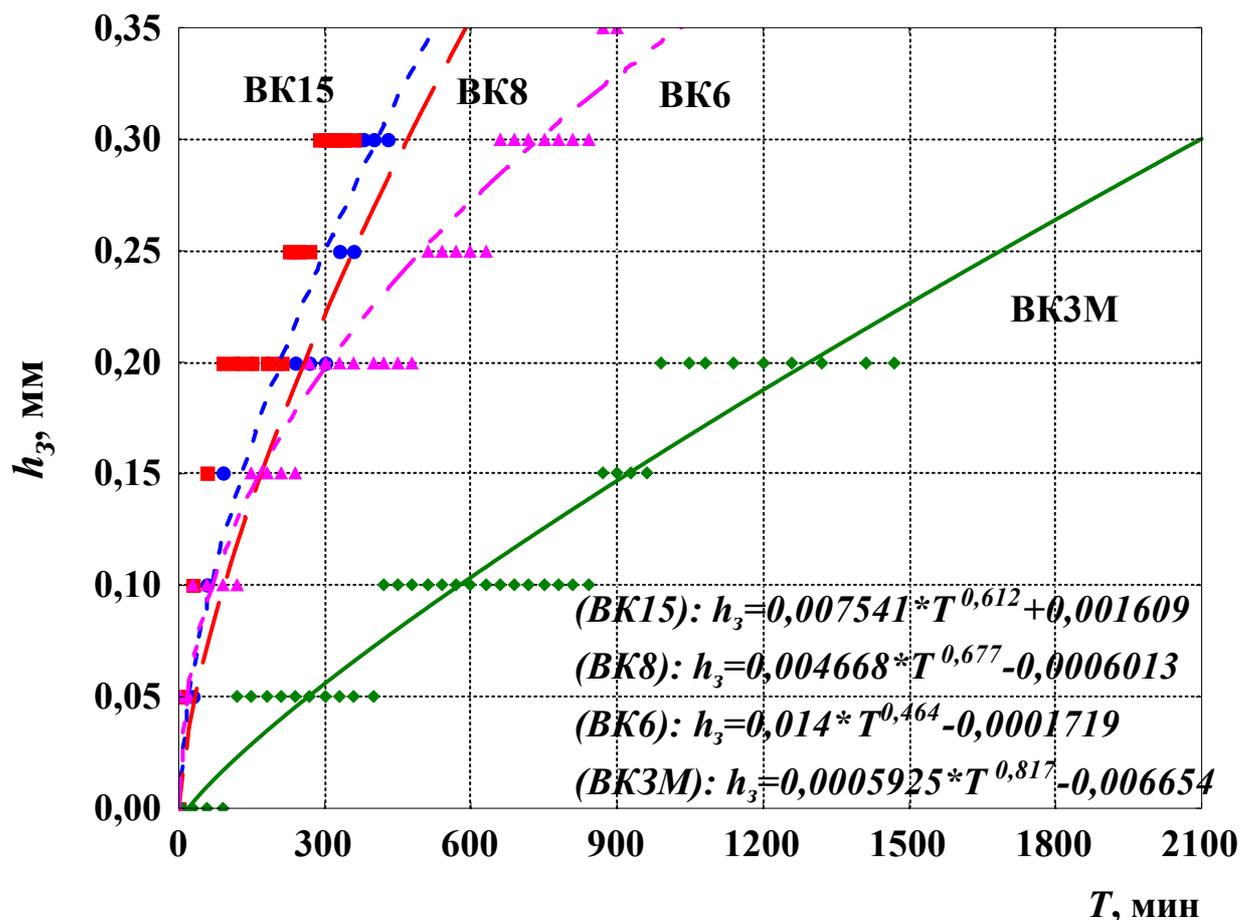
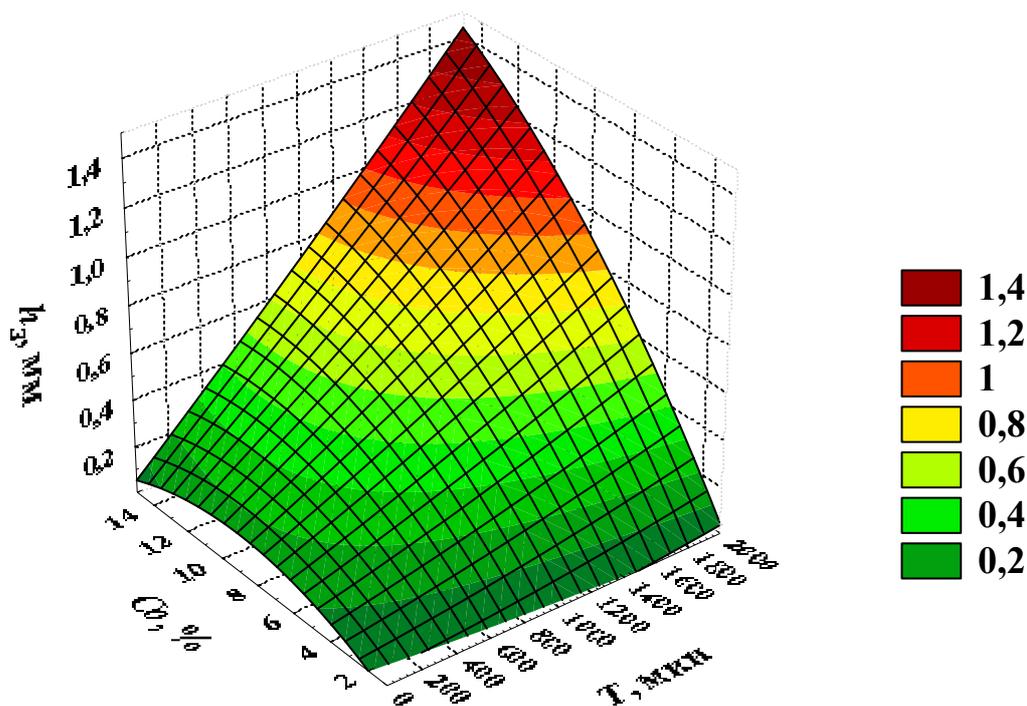


Рисунок 5.5. Зависимости величины фаски износа по задней поверхности от продолжительности периода технологической стойкости инструмента при обработке ДСтП для твердых сплавов группы ВК

Анализ результатов исследования показал, что стойкость инструментальных материалов в группе ВК увеличивается с уменьшением содержания связки ( $Co$ ) и увеличением содержания карбидов ( $WC$ ).

Представляет интерес выявление функциональной зависимости износа инструмента, оснащенного различными марками твердого сплава группы ВК, не только от продолжительности периода технологической стойкости инструмента, но и от процентного содержания кобальтовой связки в инструментальном твердом сплаве, т.е. получить зависимость вида  $h_3 = f(Co, T)$ .



$$h_3 = -0,1021 - 4,5649E-5T + 0,0577Co + 2,0936E-8T^2 + 4,6408E-5TCo - 0,0032Co^2$$

Рисунок 5.6. Поверхность отклика величины фаски износа по задней поверхности инструмента, оснащенного твердым сплавом группы ВК, от изменения процентного содержания связки (Co) в твердом сплаве и продолжительности периода технологической стойкости инструмента при обработке композиционного материала

Обработав экспериментальные данные, построим поверхность отклика, характеризующую зависимость размера фаски износа по задней поверхности инструмента, оснащенного твердым сплавом группы ВК, от продолжительности периода технологической стойкости инструмента и изменения процентного содержания связки (Co) в твердом сплаве (Рисунок 5.6).

Полученные в результате исследований поверхности откликов для твердых сплавов групп ВК и ТК могут быть использованы для сравнительного анализа конструкций инструмента для обработки композиционных материалов на древесной основе и выявления рационального конструктивного решения по приведен-

ной в Главе 2 методике.

Анализ результатов проведенных исследований стойкости инструментов для обработки композиционных неметаллических материалов, оснащенных твердыми сплавами марок Т5К10, Т15К6, Т30К4, ВК3М, ВК6, ВК8, ВК15 при обработке ДСтП марки П-А позволил сформулировать следующие выводы:

1. Установлено, что в процессе фрезерования торца ДСтП марки П-А инструментом, оснащенный инструментальными материалами марок Т5К10, Т15К6, Т30К4, ВК3М, ВК6, ВК8, ВК15, наиболее интенсивен износ лезвия по задней поверхности. Стойкость инструмента, оснащенного твердыми сплавами, возрастает с уменьшением содержания в сплаве связующего (*Co*).

2. При фрезеровании ДСтП инструментом, оснащенный твердыми сплавами группы ТК, средний технологический период стойкости сплава Т5К10 составил 228 мин, сплава Т15К6 – 300 мин и сплава Т30К4 – 382 мин. Лучшую технологическую стойкость при заданных условиях эксплуатации показал твердый сплав марки Т30К4, его стойкость выше стойкости сплава Т5К10 на 40 %, сплава Т15К6 на 21 %.

3. При фрезеровании ДСтП инструментом, оснащенный твердыми сплавами группы ВК, технологический период стойкости сплава ВК15 составил 407 мин, сплава ВК8 – 467 мин, сплава ВК6 – 700 мин и сплава ВК3М – 2092 мин. Лучшую технологическую стойкость при заданных условиях эксплуатации показал твердый сплав марки ВК3М, его стойкость выше стойкости сплава ВК15 в 5 раз, сплава ВК8 в 4 раза, сплава ВК6 в 3 раза.

4. Среди твердых сплавов вольфрамкобальтовой группы (ВК) и титановольфрамкобальтовой группы (ТК) лучшие результаты по стойкости у сплава марки ВК3М. Эти результаты позволяют рекомендовать сплав ВК3М для обработки композиционных материалов с целью повышения производительности и экономии инструментальных материалов.

### 5.1.2. Влияние режимов резания и геометрии режущего элемента на работоспособность инструмента при обработке композиционных материалов на древесной основе

Для осуществления эффективной обработки композиционных материалов на древесной основе инструментом, оснащенным рекомендованным инструментальным материалом (ВКЗМ), важно найти геометрические параметры инструмента и режимы резания, обеспечивающие наибольшую производительность обработки.

Одним из важных показателей производительности обработки композиционных материалов твердосплавным инструментом можно считать технологическую стойкость инструмента ( $T$ , мин), характеризующую его работоспособность, а значит, и производительность процесса обработки. За критерий технологической стойкости, как ранее описывалось, выбрана величина фаски износа по задней поверхности  $h_3 = 0,3$  мм.

Для дальнейшего исследования эффективности обработки композиционных материалов прогрессивным инструментом была проведена серия опытов по выявлению влияния режимов резания и геометрии режущего элемента на технологическую стойкость инструмента.

Предварительная серия опытов показала, что для получения адекватной модели необходимо проведение экспериментов с использованием матрицы планирования второго порядка. В качестве факторов, влияющих на технологическую стойкость инструмента  $T$ , были выбраны скорость резания  $V$  (число оборотов шпинделя станка  $n$ ), продольная подача  $S$ , глубина резания  $t$  и угол заострения режущего элемента  $\beta$  (при постоянном значении угла  $\gamma$ ).

Для проведения опытов моделировались условия чистовой обработки торца ДСтП приближенные к производственным условиям. При планировании экспериментов факторы варьировались следующим образом: число оборотов шпинделя станка  $n$ : 2000 мин<sup>-1</sup>, 4000 мин<sup>-1</sup> и 6000 мин<sup>-1</sup>; продольная подача  $S$ : 4 м/мин; 6 м/мин и 8 м/мин; глубина резания  $t$ : 1 мм; 2 мм и 3 мм; угол заострения режущего

элемента  $\beta$ : 50°, 55° и 60°.

В ходе экспериментальных исследований определялись значения стойкости инструмента в зависимости от изменения скорости резания, продольной подачи, глубины резания и угла заострения режущего элемента. С использованием стандартных методик теории планирования экспериментов и обработки экспериментальных данных проведен расчет коэффициентов регрессии и их доверительных интервалов; построена квадратичная модель в кодированном и натуральном виде; проверена адекватность модели.

Таблица 5.3

Результаты исследования стойкости при фрезеровании ДСтП инструментом, оснащенным твёрдым сплавом марки ВК3М

№ опыта	$T_1$ , мин	$T_2$ , мин	$T_3$ , мин	$T_{cp}$ , мин
1	1854	1995	1935	1928
2	1478	1365	1441	1428
3	1715	1659	1468	1614
4	1232	1098	1255	1195
5	1578	1545	1518	1547
6	1356	1272	927	1185
7	1412	1399	1206	1339
8	1015	970	991	992
9	2565	2495	2350	2470
10	1915	1835	1740	1830
11	2134	1950	2117	2067
12	1545	1490	1258	1431
13	1950	2110	2090	2050
14	1645	1515	1397	1519
15	1867	1634	1647	1716
16	1320	1250	1243	1271
17	1825	1934	1620	1793
18	1230	1345	1283	1286
19	1790	1679	1733	1734
20	1358	1210	1320	1296
21	1970	1845	1810	1875
22	1540	1360	1384	1428
23	1490	1530	1321	1447
24	1900	2035	1819	1918
25	1745	1615	1569	1643

Результаты экспериментов при трехкратном повторении опытов представлены в Таблице 5.3.

В результате получена математическая модель второго порядка, адекватно описывающая влияние скорости резания, подачи, глубины резания и угла заострения на стойкость режущего инструмента при обработке композиционных материалов на древесной основе [195]  $T = f(S, n, t, \beta)$ :

$$\begin{aligned}
 T = & 3247,429 + 0,115 \cdot n + 176,44 \cdot S - 278,128 \cdot t - 97,35 \cdot \beta + \\
 & + 0,002 \cdot n \cdot S + 0,015 \cdot n \cdot t - 0,003 \cdot n \cdot \beta + 11,437 \cdot S \cdot t - \\
 & - 2,725 \cdot S \cdot \beta - 1,75 \cdot t \cdot \beta - 8,175 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 - 11,237 \cdot S^2 + \\
 & + 23,3 \cdot t^2 + 1,552 \cdot \beta^2.
 \end{aligned} \tag{5.10}$$

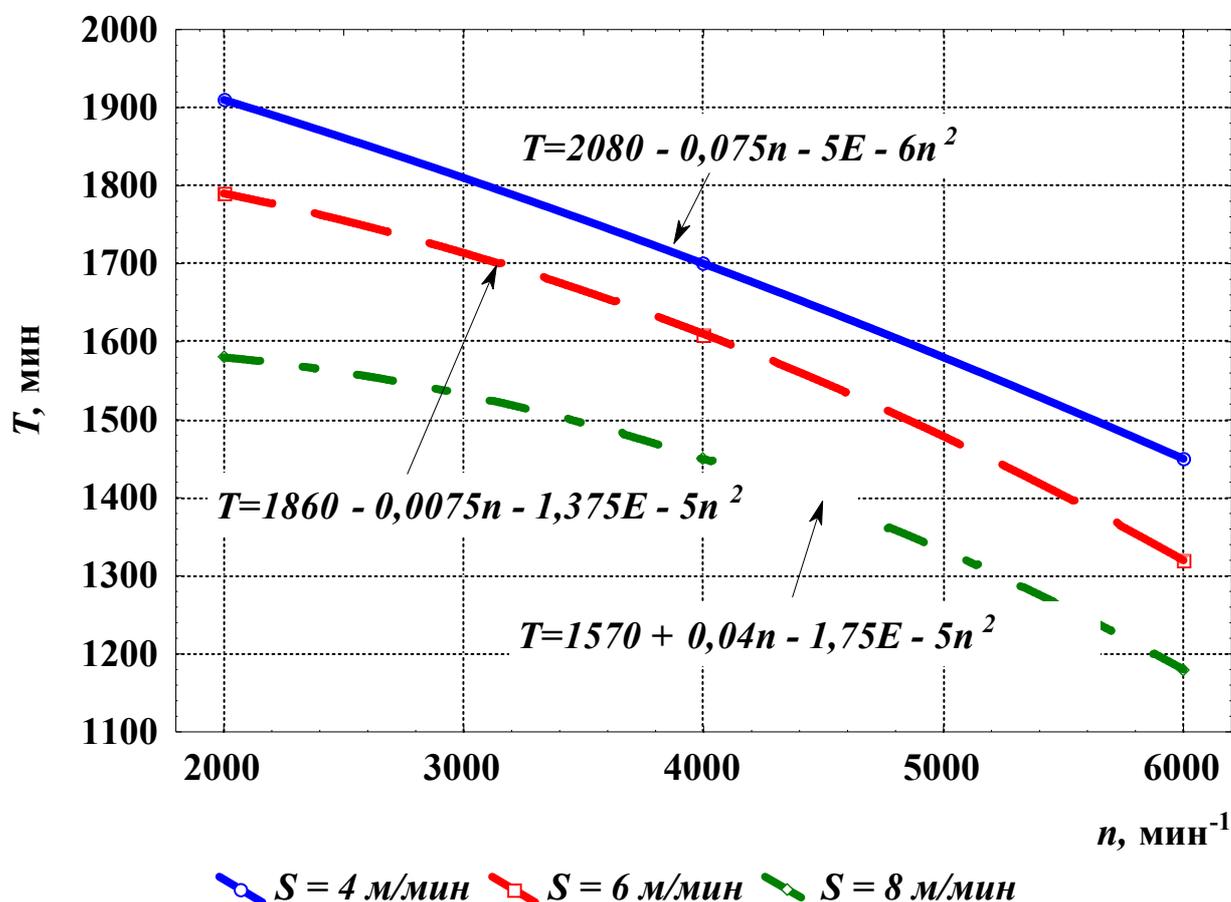


Рисунок 5.7. Графики зависимости технологической стойкости инструмента, оснащённого твёрдым сплавом марки ВКЗМ, от частоты вращения шпинделя при обработке ДСтП марки П-А при различных значениях продольной подачи (угол  $\beta = 55^\circ$ , глубина резания  $t = 2$  мм)

Для выявления степени влияния переменных факторов процесса резания на технологическую стойкость инструмента, рассмотрим частные случаи, когда два фактора остаются постоянными, а два варьируются. По результатам частных серий опытов построим графические зависимости.

Результаты серии опытов, когда постоянными являются угол  $\beta = 55^\circ$  и глубина резания  $t = 2$  мм, а варьируются скорость и продольная подача, представлены на Рисунке 5.7.

Так, эксперименты показывают, что увеличение скорости резания (числа оборотов шпинделя от  $2000 \text{ мин}^{-1}$  до  $6000 \text{ мин}^{-1}$ ) приводит к снижению периода стойкости на 40...50 %. Кроме того, из графиков на Рисунке 5.7 видно, что при неизменном угле заострения режущего элемента увеличение продольной подачи ведет к снижению периода стойкости инструмента.

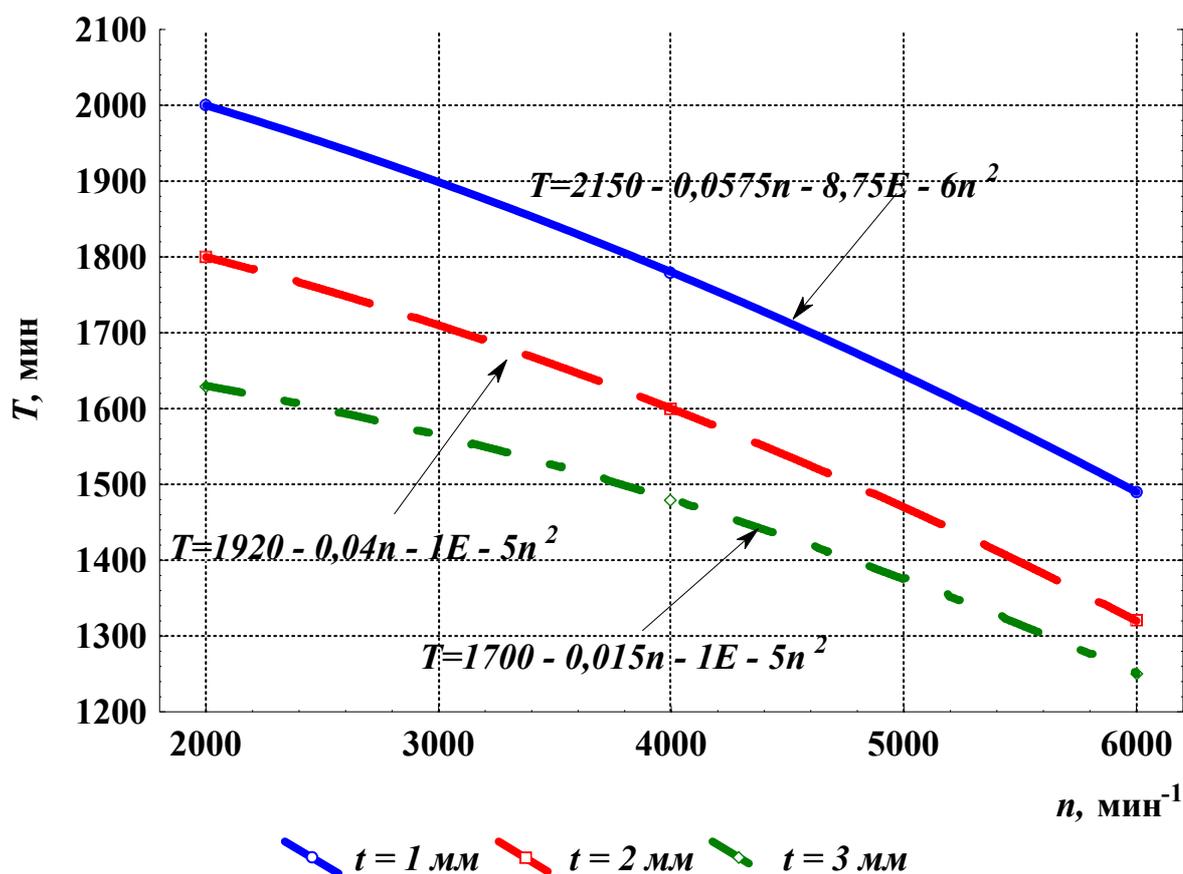


Рисунок 5.8. Графики зависимости технологической стойкости инструмента, оснащённого твёрдым сплавом марки ВК3М, от частоты вращения шпинделя при обработке ДСтП марки П-А при различных значениях глубины резания (продольная подача  $S = 6 \text{ м/мин}$ , угол  $\beta = 55^\circ$ )

На Рисунке 5.8 отражены результаты исследований, когда постоянными приняты угол  $\beta = 55^\circ$  и продольная подача  $S = 6$  м/мин, а варьируются скорость и глубина резания.

В данном случае увеличение скорости и глубины резания при неизменном угле заострения режущего элемента ведет к снижению технологического периода стойкости инструмента. Так, эксперименты показывают, что увеличение глубины резания от 1 мм до 3 мм приводит к снижению периода стойкости на 25...30 %.

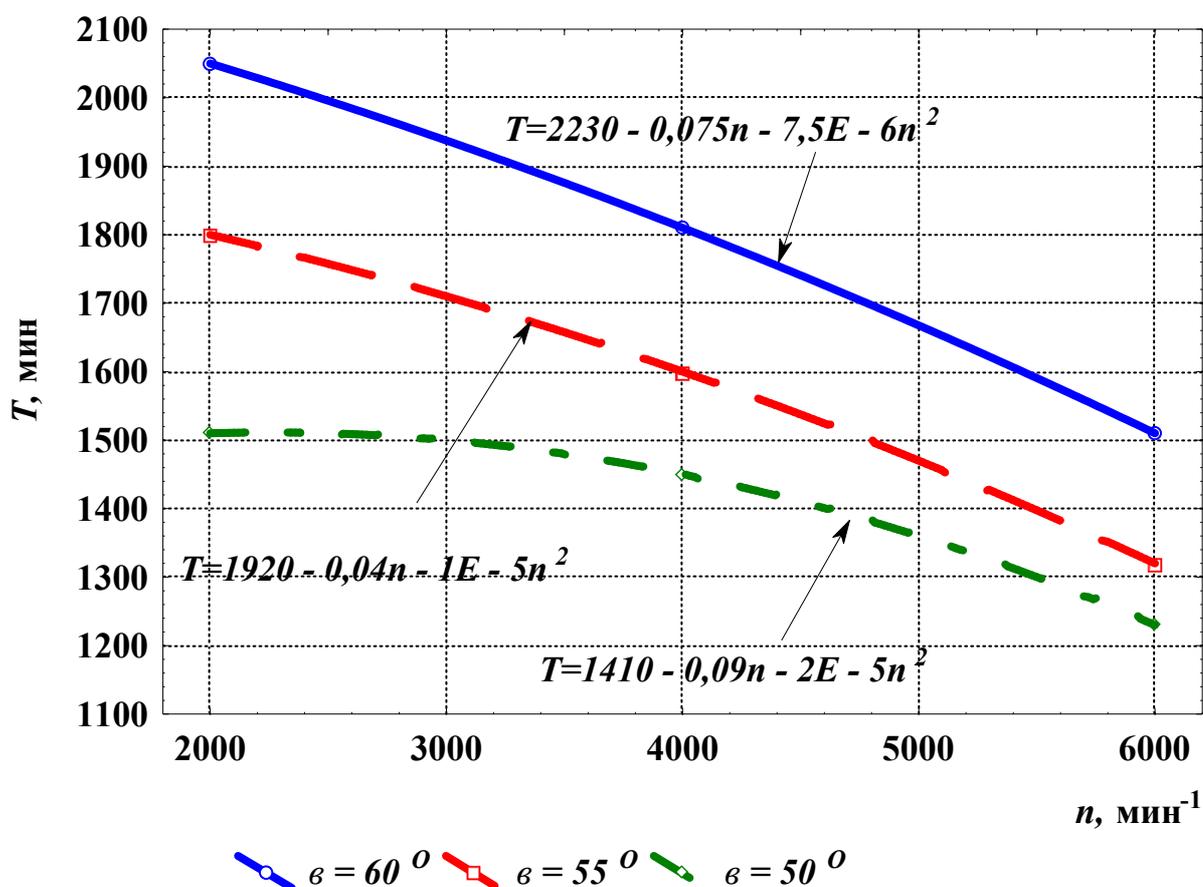


Рисунок 5.9. Графики зависимости технологической стойкости инструмента, оснащённого твёрдым сплавом марки ВК3М, от частоты вращения шпинделя при обработке ДСтП марки П-А при различных значениях угла заострения режущего элемента (продольная подача  $S = 6$  м/мин, глубина резания  $t = 2$  мм)

На Рисунке 5.9 представлены результаты серии опытов с постоянными продольной подачей  $S = 6$  м/мин и глубиной резания  $t = 2$  мм, а переменными – скоростью резания и углом заострения режущего элемента. В этом случае увеличе-

ние скорости резания приводит к снижению технологического периода стойкости, а рост угла заострения режущего элемента ведет к его увеличению.

На Рисунке 5.10 отражены результаты экспериментов при постоянных  $\beta = 55^\circ$  и скорости резания (частоте вращения шпинделя  $n$ ) и переменных глубине резания и подаче. Очевидно, что и в этом случае увеличение продольной подачи и глубины резания при неизменном угле заострения режущего элемента ведет к снижению технологического периода стойкости инструмента.

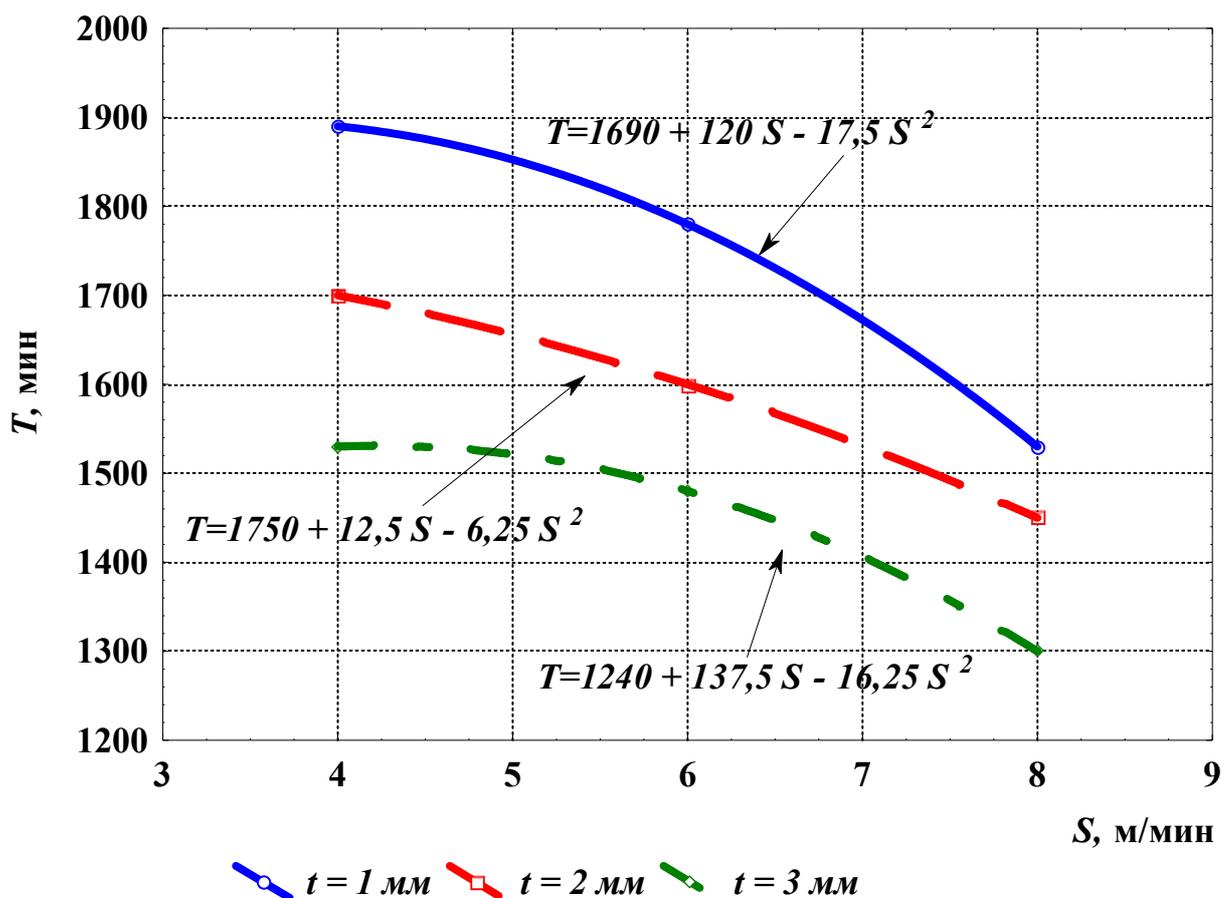


Рисунок 5.10. Графики зависимости технологической стойкости инструмента, оснащённого твёрдым сплавом марки ВК3М, от продольной подачи при обработке ДСтП марки П-А при различных значениях глубины резания (частота вращения шпинделя станка  $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ , угол  $\beta = 55^\circ$ )

Результаты серии опытов, когда неизменны скорость резания (частота вращения шпинделя станка  $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ ) и глубина резания  $t = 2 \text{ мм}$ , а переменными являются продольная подача и угол заострения режущего элемента, представ-

лены на Рисунке 5.11.

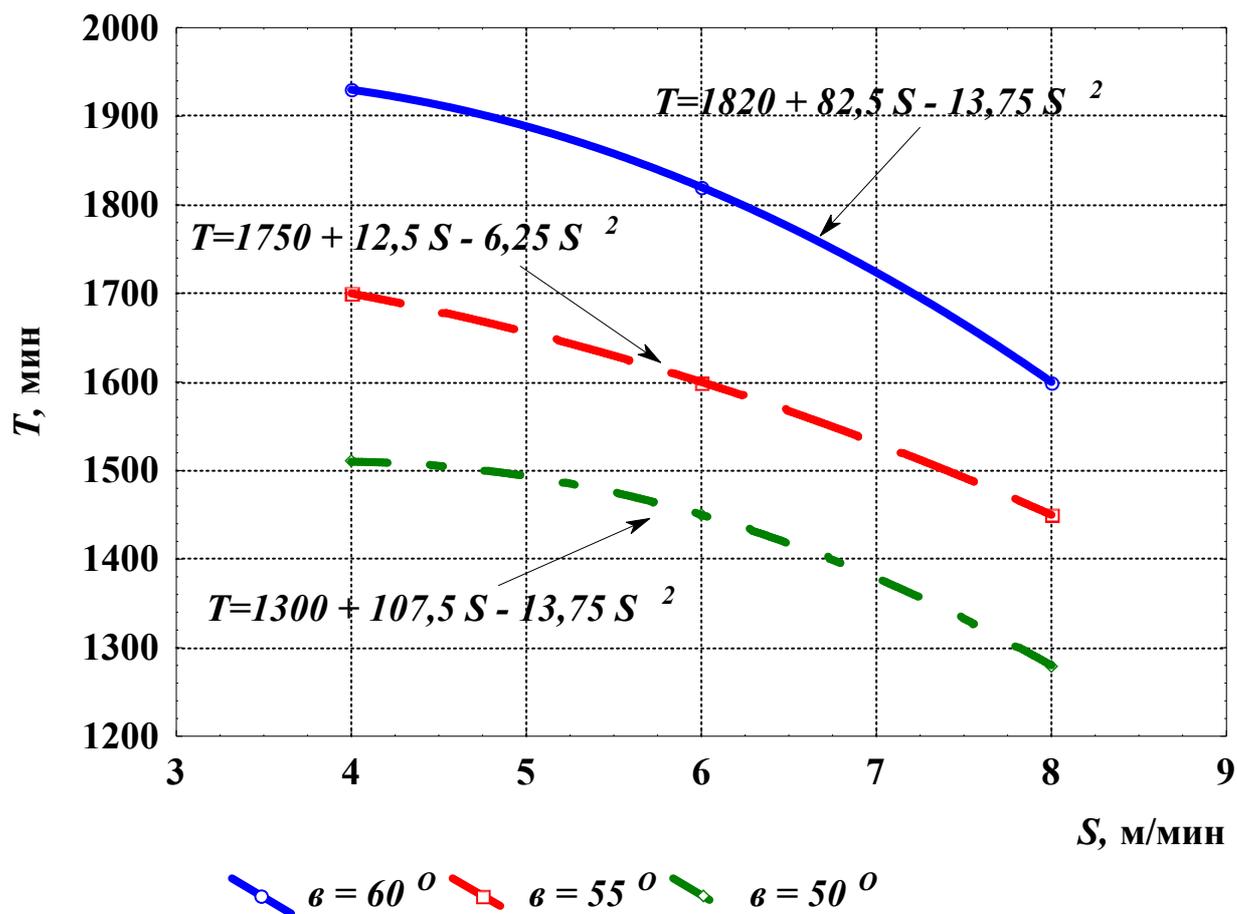


Рисунок 5.11. Графики зависимости технологической стойкости инструмента, оснащённого твёрдым сплавом марки ВКЗМ, от продольной подачи при обработке ДСтП марки П-А при различных значениях угла заострения (*частота вращения шпинделя  $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ , глубина резания  $t = 2 \text{ мм}$* )

Увеличение продольной подачи приводит к снижению технологического периода стойкости, а рост угла заострения режущего элемента ведет к его увеличению. Так, эксперименты показывают, что увеличение скорости продольной подачи от 4 м/мин до 8 м/мин приводит к снижению периода стойкости на 15...20 %.

Результаты серии экспериментов при постоянной частоте вращения шпинделя станка  $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$  и продольной подаче  $S = 6 \text{ м/мин}$ , переменных глубине резания и угле заострения режущего элемента представлены на Рисунке 5.12.

С повышением глубины резания, при неизменных скорости резания и подаче, уменьшается технологическая стойкость режущего инструмента. Так, экспе-

рименты показывают, что увеличение угла заострения режущего элемента  $\beta$  от  $50^\circ$  до  $60^\circ$  приводит к повышению периода стойкости на 15...20 %.

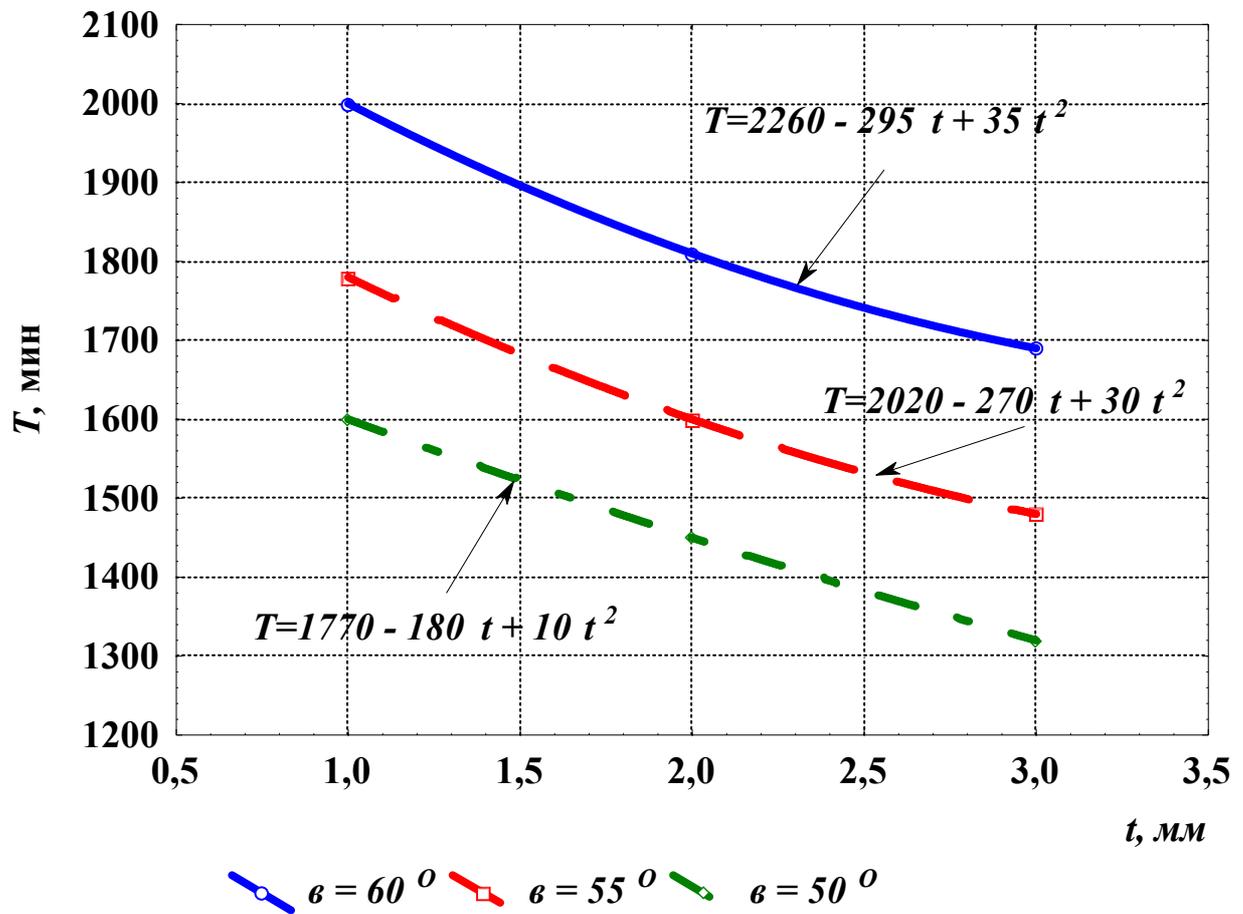


Рисунок 5.12. Графики зависимости технологической стойкости инструмента, оснащённого твёрдым сплавом марки ВКЗМ, от глубины резания при обработке ДСтП марки П-А при различных значениях угла заострения (частота вращения шпинделя станка  $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ , продольная подача  $S = 6 \text{ м/мин}$ )

Анализ результатов исследований позволяет определить, что с возрастанием скорости резания технологический период стойкости инструмента снижается. Это обусловлено тем, что по мере увеличения скорости повышаются силы и температуры в зоне резания, что приводит к увеличению интенсивности износа режущего элемента. По мере увеличения глубины резания увеличивается зона контакта обрабатываемого материала с режущим элементом, возрастают силы резания и износ инструмента становится интенсивней. По мере увеличения скорости продольной подачи повышается подача на зуб и, как следствие, увеличивается пятно кон-

такта, что вызывает повышение сил резания. Рост угла заострения режущего элемента ведет к увеличению технологического периода стойкости, поскольку по мере роста данного геометрического параметра увеличивается прочность режущего элемента и его сопротивляемость износу.

Рассмотренные результаты исследований влияния представленных факторов на технологическую стойкость фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов на древесной основе позволили сформулировать следующие рекомендации.

При фрезеровании ДСтП марки П-А инструментом, оснащенным твердым сплавом марки ВКЗМ максимальный технологический период стойкости  $T = 2437$  мин наблюдается при следующих условиях: частота вращения шпинделя  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup>; продольная подача  $S = 4$  м/мин; глубина резания  $t = 1$  мм; угол заострения режущего элемента  $\beta = 60^\circ$  (при постоянном значении угла  $\gamma$ ).

### **5.1.3. Влияние режимов резания и геометрии режущего элемента на качество обработанной поверхности композиционных материалов на древесной основе**

Производительность, обычно зависящая от работоспособности инструмента, не является единственным параметром, определяющим эффективную обработку композиционных материалов. Зачастую этот параметр учитывается в совокупности с показателями качества поверхностей изделий из композиционных материалов после обработки резанием. Одним из определяющих показателей является шероховатость обработанных поверхностей.

С целью выявления влияния режимов резания и геометрических параметров режущего инструмента на качество обработанных поверхностей изделий из композиционных материалов на древесной основе была проведена предварительная серия опытов, которая показала, что для получения адекватной модели необходимо проведение экспериментов по матрице планирования второго порядка.

В качестве факторов, влияющих на шероховатость обработанной поверхности  $R_{max}$ , были выбраны скорость резания  $V$  (число оборотов шпинделя станка  $n$ ),

продольная подача  $S$ , глубина резания  $t$  и угол заострения режущего элемента  $\beta$  (при постоянном значении угла  $\gamma$ ).

Для проведения опытов моделировались условия чистовой обработки торца ДСтП. При планировании экспериментов факторы варьировались следующим образом: число оборотов шпинделя станка  $n$ : 2000 мин<sup>-1</sup>, 4000 мин<sup>-1</sup> и 6000 мин<sup>-1</sup>; продольная подача  $S$ : 4 м/мин; 6 м/мин и 8 м/мин; глубина резания  $t$ : 1 мм; 2 мм и 3 мм; угол заострения режущего элемента  $\beta$ : 50°, 55° и 60°.

Результаты исследований представлены в Таблице 5.4.

Таблица 5.4

Результаты исследования качества обработанной поверхности при фрезеровании ДСтП инструментом, оснащённым твёрдым сплавом марки ВК3М

№ опыта	$R_{\max 1}$	$R_{\max 2}$	$R_{\max 3}$	$R_{\max \text{ ср}}$
1	61	71	63	65
2	30	36	30	32
3	80	74	77	77
4	39	42	48	43
5	72	75	69	72
6	38	40	41	33
7	87	89	81	91
8	80	81	76	83
9	89	84	87	96
10	73	70	75	74
11	98	93	100	101
12	70	69	73	68
13	97	93	95	103
14	64	65	68	59
15	109	104	107	116
16	76	71	78	79
17	93	97	95	95
18	46	44	45	45
19	59	61	63	61
20	76	81	83	80
21	61	58	67	62
22	76	78	65	73
23	54	55	50	53
24	76	75	83	78
25	75	69	69	71

По итогам проведения экспериментов получены значения шероховатости

обработанной поверхности в зависимости от изменения скорости резания, продольной подачи, глубины резания и угла заострения режущего элемента.

После обработки результатов испытаний получена математическая модель второго порядка, адекватно описывающая влияние скорости резания, подачи, глубины резания и угла заострения на шероховатость поверхности при обработке композиционных материалов  $R_{max} = f(S, n, t, \beta)$ :

$$\begin{aligned}
 R_{max} = & -32,913 - 0,012 \cdot n + 8,384 \cdot S + 19,777 \cdot t + 4,318 \cdot \beta + \\
 & + 0,0002 \cdot n \cdot S + 0,0001 \cdot n \cdot t - 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot \beta + 1,625 \cdot S \cdot t - \\
 & - 0,312 \cdot S \cdot \beta - 0,55 \cdot t \cdot \beta + 6,125 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + 0,675 \cdot S^2 + \\
 & + 1,2 \cdot t^2 + 0,008 \cdot \beta^2.
 \end{aligned}
 \tag{5.11}$$

Для выявления степени влияния переменных факторов процесса резания на шероховатость обработанной поверхности, рассмотрим частные случаи, когда два фактора остаются постоянными, а два варьируются. По результатам частных серий опытов построим графические зависимости.

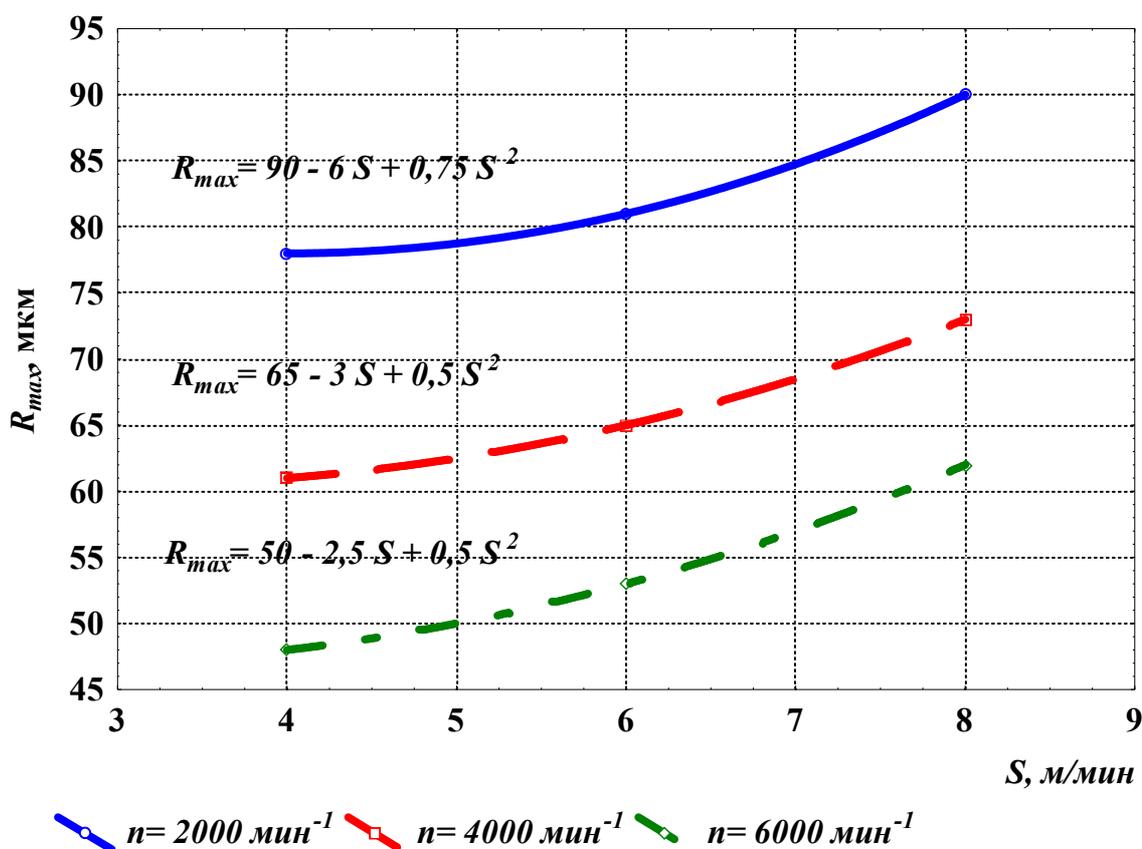


Рисунок 5.13. Графики зависимости шероховатости обработанной поверхности от продольной подачи при обработке ДСтП марки П-А при различных значениях частоты вращения шпинделя станка (угол  $\beta = 55^\circ$ , глубина резания  $t = 2 \text{ мм}$ )

Результаты серии опытов, когда постоянными являются угол  $\beta = 55^\circ$  и глубина резания  $t = 2$  мм, а переменными – скорость и продольная подача, представлены на Рисунке 5.13.

Из графиков следует, что с увеличением скорости резания шероховатость обработанной поверхности снижается. Так, эксперименты показывают, что увеличение числа оборотов шпинделя (скорости резания) от  $2000 \text{ мин}^{-1}$  до  $6000 \text{ мин}^{-1}$  приводит к повышению качества обработанной поверхности на 40...45 %.

Кроме того, при неизменном угле заострения режущего элемента и глубине резания увеличение продольной подачи ведет к ухудшению качества обработанной поверхности. Увеличение продольной подачи от 4 м/мин до 8 м/мин приводит к снижению шероховатости обработанной поверхности на 10...20 %.

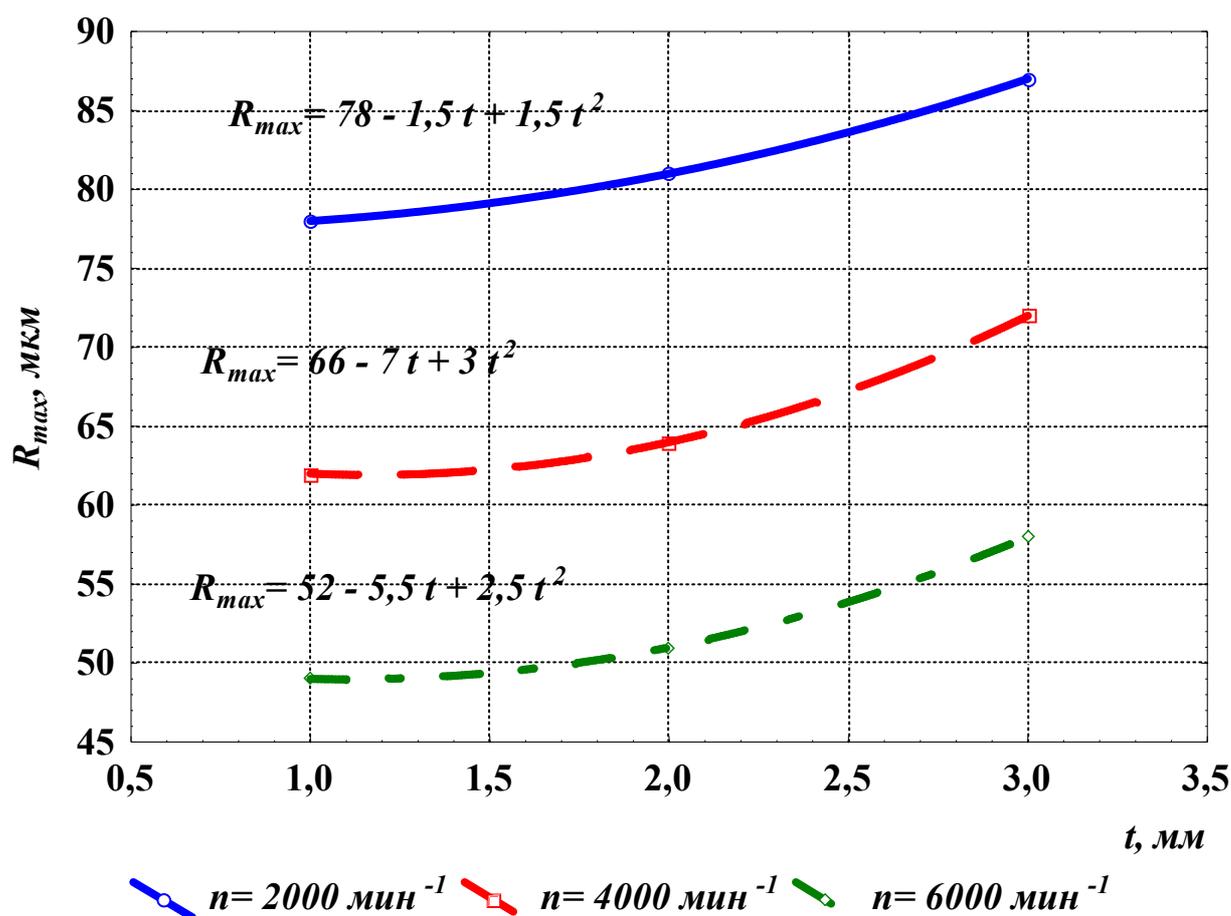


Рисунок 5.14. Графики зависимости шероховатости обработанной поверхности от глубины резания при обработке ДСтП марки П-А при различных значениях частоты вращения шпинделя станка (продольная подача  $S = 6$  м/мин, угол  $\beta = 55^\circ$ )

На Рисунке 5.14 представлены результаты экспериментов с постоянными углом  $\beta = 55^\circ$  и продольной подачей  $S = 6$  м/мин, скорость и глубина резания варьировались. Увеличение скорости и глубины резания при неизменном угле заострения режущего элемента и продольной подаче ведет к снижению качества обработанной поверхности. Увеличение глубины резания от 1 мм до 3 мм приводит к снижению качества обработанной поверхности на 25...30 %.

Результаты серии опытов при постоянных факторах: продольной подаче  $S = 6$  м/мин и глубине резания  $t = 2$  мм, переменных – скорости и угле заострения режущего элемента представлены на Рисунке 5.15.

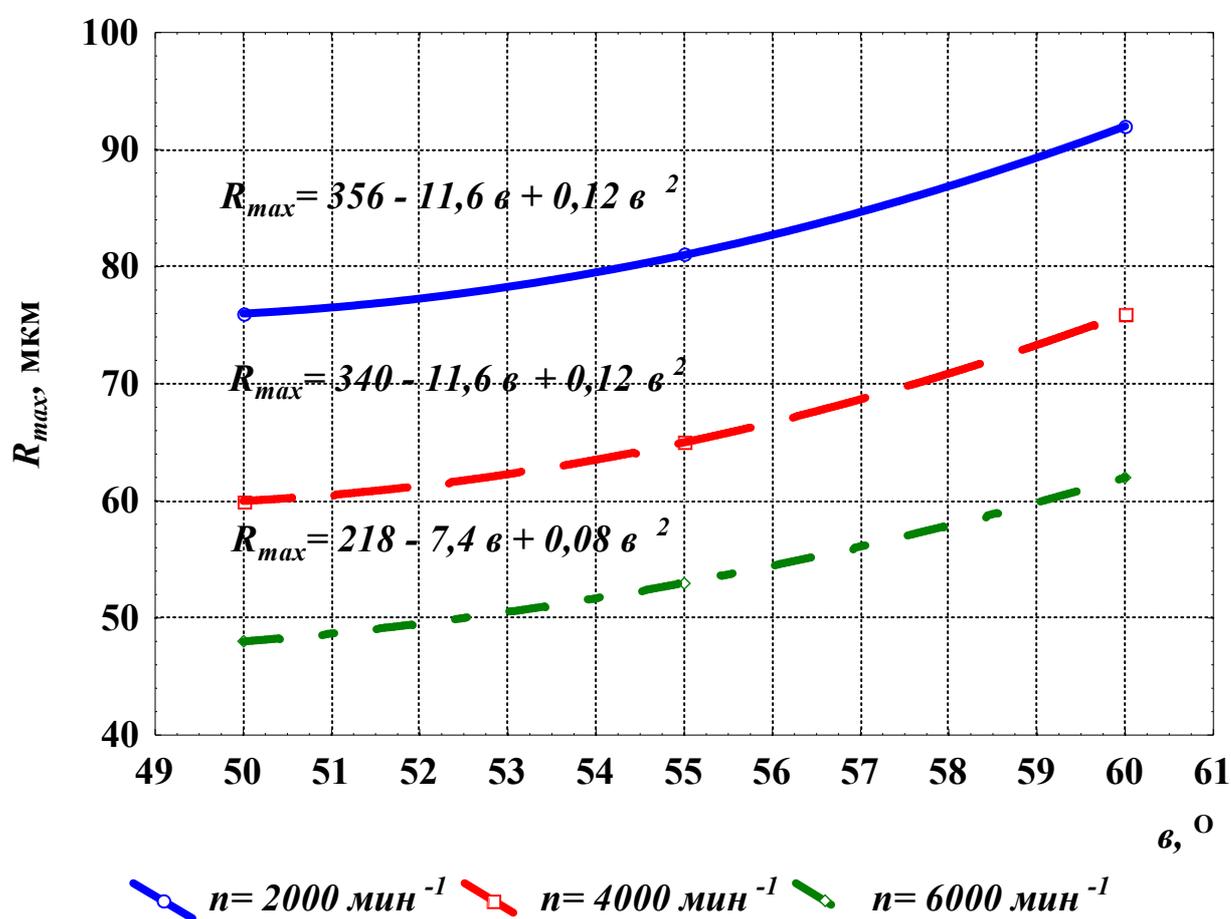


Рисунок 5.15. Графики зависимости шероховатости обработанной поверхности от величины угла заострения режущего элемента при обработке ДСтП марки П-А при различных значениях частоты вращения шпинделя станка (продольная подача  $S = 6$  м/мин, глубина резания  $t = 2$  мм)

В случае, когда продольная подача и глубина резания неизменны, увеличение скорости резания приводит к снижению качества обработанной поверхности. Рост угла заострения режущего элемента также ведет к ухудшению ее качества. Увеличение угла заострения режущего элемента от  $50$  до  $60^\circ$  приводит к ухудшению шероховатости на  $15 \dots 20 \%$ .

Результаты серии экспериментов, когда неизменны угол  $\beta = 55^\circ$  и скорость резания, а варьируются глубина резания и подача, представлены на Рисунке 5.16. Совместное увеличение продольной подачи и глубины резания, при неизменном угле заострения режущего элемента и скорости резания, ведет к ухудшению качества обработанной поверхности. Отсюда следует, что для уменьшения шероховатости обработанной поверхности следует стремиться к уменьшению подачи и глубины резания.

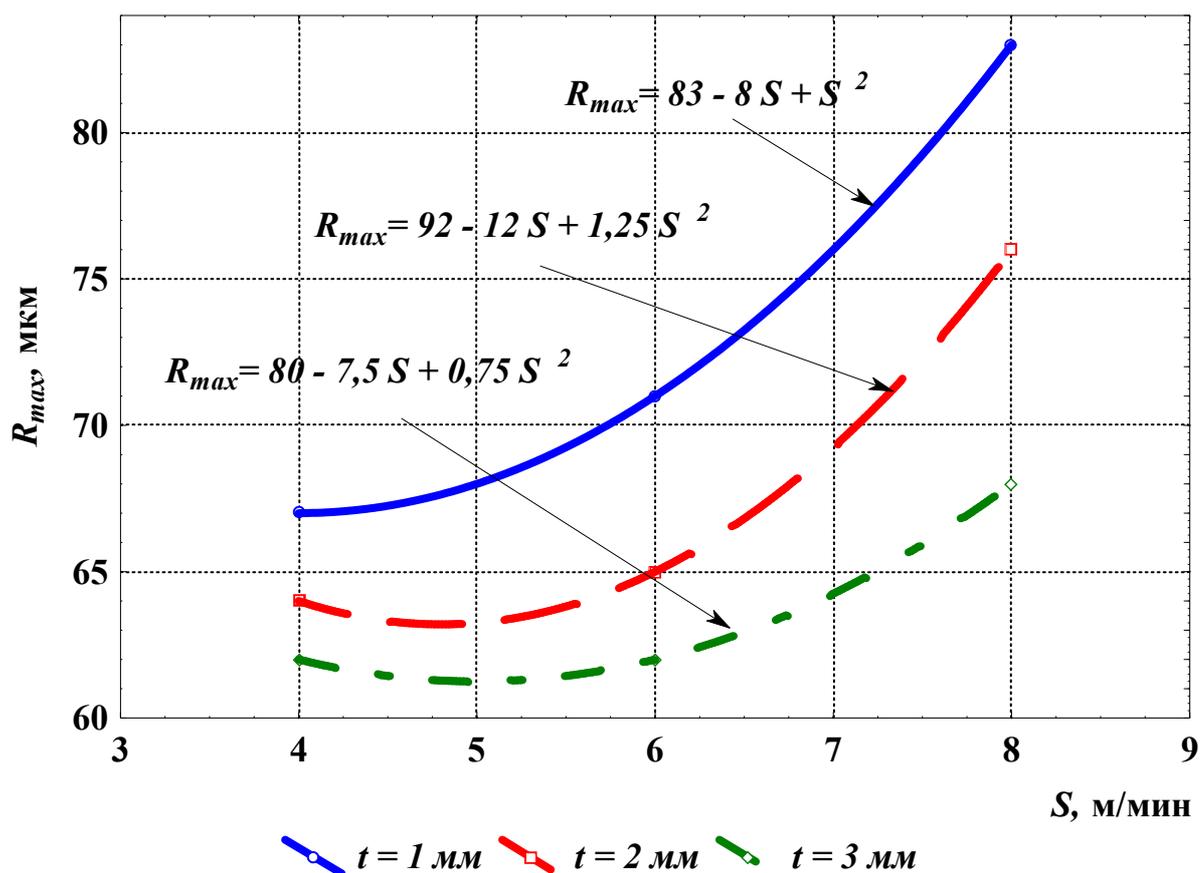


Рисунок 5.16. Графики зависимости шероховатости обработанной поверхности от продольной подачи при обработке ДСтП марки П-А при различных значениях глубины резания

(частота вращения шпинделя станка  $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ , угол  $\beta = 55^\circ$ )

На Рисунке 5.17 представлены результаты опытов с постоянной частотой вращения шпинделя станка  $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$  и глубиной резания  $t = 2 \text{ мм}$ , а подача и угол заострения режущего элемента варьируются. Совместное увеличение продольной подачи и угла заострения режущего элемента, при неизменной скорости и глубине резания, ведет к ухудшению качества обработанной поверхности.

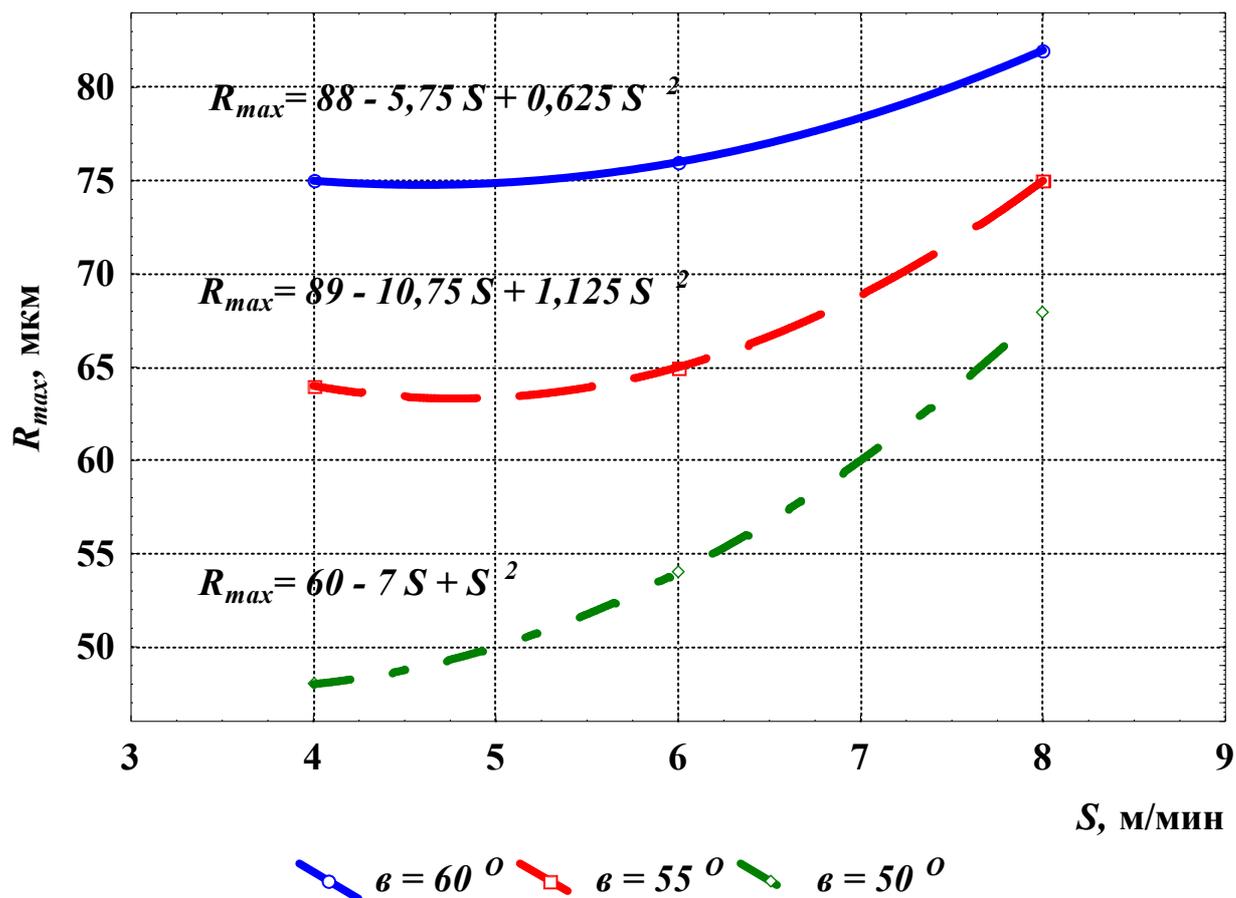


Рисунок 5.17. Графики зависимости шероховатости обработанной поверхности от продольной подачи при обработке ДСтП марки П-А при различных значениях угла заострения (частота вращения шпинделя станка  $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ , глубина резания  $t = 2 \text{ мм}$ )

Графики на Рисунке 5.18 отображают результаты экспериментов при постоянной частоте вращения шпинделя станка  $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$  и продольной подаче  $S = 6 \text{ м/мин}$  и переменных глубине резания и угле заострения режущего элемента. Совместное увеличение угла заострения режущего элемента и глубины резания,

при неизменной скорости резания и продольной подаче, ведет к ухудшению качества обработанной поверхности.

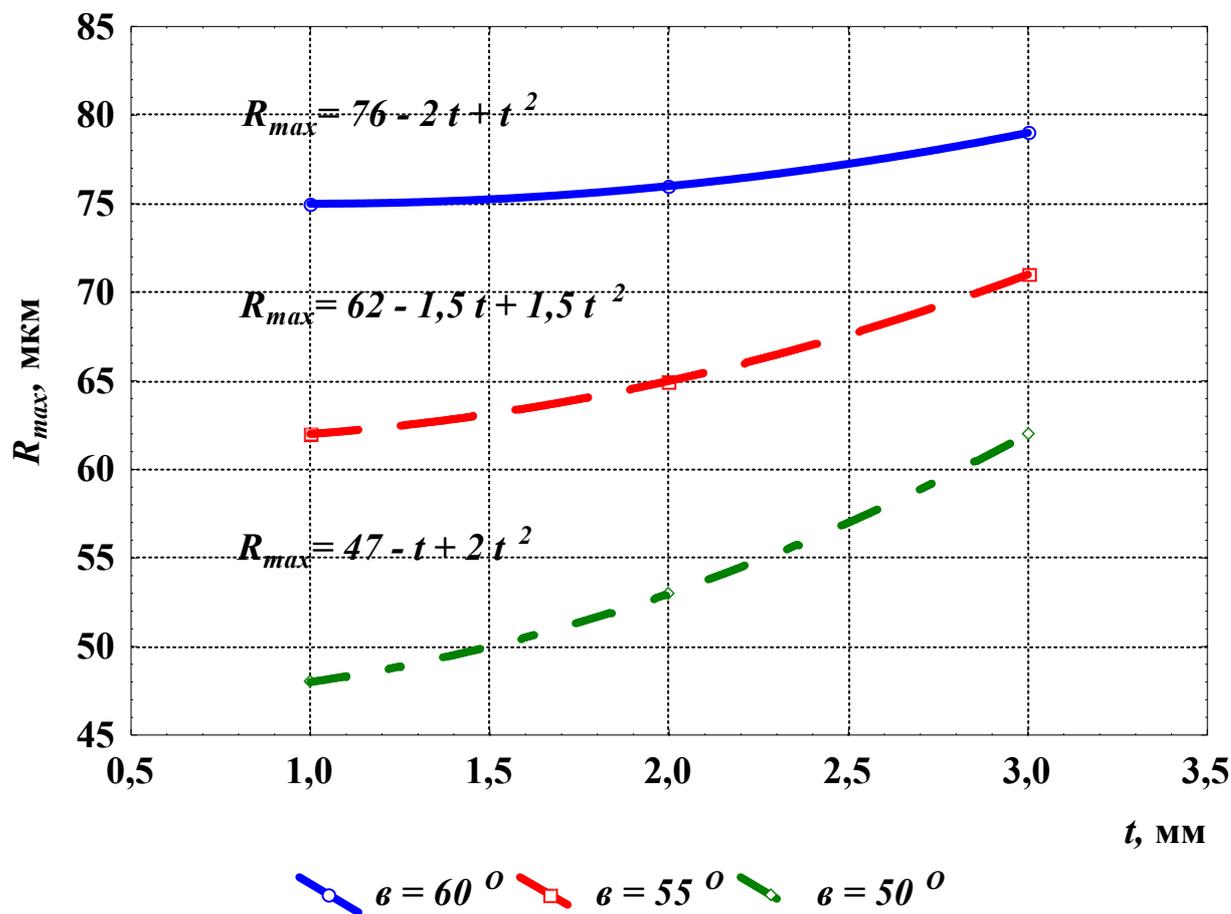


Рисунок 5.18. Графики зависимости шероховатости обработанной поверхности от глубины резания при обработке ДСтП марки П-А при различных значениях угла заострения (частота вращения шпинделя станка  $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ , продольная подача  $S = 6 \text{ м/мин}$ )

Анализ результатов исследований показал, что для уменьшения шероховатости следует стремиться к уменьшению угла заострения режущего элемента, если снижение подачи не эффективно по соображениям уменьшения производительности обработки. Кроме того, следует стремиться к уменьшению угла заострения режущего элемента, если снижение глубины резания не целесообразно по технологическим причинам.

Таким образом, выполненные исследования позволили установить, что значительное влияние на качество обработанной поверхности оказывает скорость ре-

зания. При фрезеровании торца ДСтП марки П-А инструментом, оснащенным инструментальным твердым сплавом марки ВК3М лучшее качество обработанной поверхности  $R_{max} = 31$  мкм наблюдается при следующих условиях: частота вращения шпинделя  $n = 6000$  мин<sup>-1</sup>; продольная подача  $S = 4$  м/мин; глубина резания  $t = 1$  мм; угол заострения режущего элемента  $\beta = 50^\circ$  (при  $\gamma = 25^\circ$ ).

Резюмируя результаты исследований процесса фрезерования композиционных материалов на древесной основе, можно сделать следующие выводы:

1. Достижение эффективной обработки композиционных материалов прогрессивным инструментом возможно лишь при совместном рациональном выборе инструментального материала, геометрических параметров инструмента и режимов обработки.

2. Для достижения высоких качественных показателей обработанных поверхностей из композиционных материалов необходимо стремиться к повышению скорости резания и уменьшению величины угла при вершине режущего элемента. Варьирование глубиной резания и подачей позволит управлять, в этом случае, производительностью обработки.

3. Выбор рациональных режимов обработки композиционных материалов фрезерным инструментом, оснащенным прогрессивными инструментальными материалами, может быть достигнут на этапе организационной подготовки инструмента к работе. Для этого необходимо использование полученных в результате исследований экспериментальных данных в методике, представленной в Главе 2.

## **5.2. Работоспособность фрезерного инструмента, оснащенного твердыми сплавами при обработке полимерных композиционных материалов**

Другим распространенным видом композиционных материалов для изготовления изделий в различных областях промышленности (металлургии, приборостроения и станкостроения, нефтехимическом и химическом производствах, авиа- и судостроении, в космической технике, автомобилестроении и т.д.) являются полимерные композиционные материалы. Из них выпускаются различные виды изделий,

используемых, в том числе, и в сопрягаемых элементах конструкций, следовательно, к ним предъявляются более высокие требования к качеству обработанных поверхностей. Для механической обработки наиболее пригоден стеклотекстолит марки СТЭФ-1, который изготавливается из стеклоткани с более мелкой внутренней и поверхностной структурой (ГОСТ 12652-74 и ГОСТ 25500-82), что дает возможность производить более мелкие детали и изделия. Такие материалы относят к разряду труднообрабатываемых и требуют специального режущего инструмента, ввиду специфики условий их обработки.

*Условия проведения экспериментов при обработке полимерных композиционных материалов фрезерным инструментом*

Исследование процесса обработки полимерных композиционных материалов инструментом, оснащенным инструментальными твердыми сплавами проводилось на экспериментальном стенде, представленном в разделе 5.1.

Для проведения исследований работоспособности фрезерного инструмента при обработке полимерных композиционных материалов выбраны вольфрамокобальтовые и безвольфрамовые твердые сплавы следующих марок: ВК8, ВК3М, ВК15, ТН20. Безвольфрамовый твердый сплав марки ТН20 выбран для исследований в связи с тем, что в специальной литературе данную марку сплава рекомендуют взамен сплавов группы ВК при обработке неметаллических материалов. Однако, уже на стадии предварительных испытаний, сплав ТН20 даже на щадящих режимах обработки показал критически низкую работоспособность, период стойкости при этом составил менее 1 минуты, величина фаски износа по задней поверхности после 2 минут фрезерования достигла 0,7 мм, что значительно превышает установленный критерий технологической стойкости. В связи с этим, сплав ТН20 в дальнейших исследованиях не рассматривался.

Как отмечено выше, одним из видов перспективных и высокопрочных композиционных полимерных материалов являются стеклотекстолиты, среди которых можно выделить некоторые марки: СТЭФ, СТЭФ-1, СТЭФ-У, СТЭБ, СТТ, СТ-ЭТФ и др.

Для исследования работоспособности режущего инструмента был выбран

материал марки СТЭФ-1, исходя из следующих соображений:

1. По сравнению с другими марками стеклотекстолита, отличительной особенностью СТЭФ-1 является то, что для его изготовления в производстве используется более мелкаячеистая стеклоткань (ГОСТ 12652-74). Это улучшает качество обработанной поверхности, уменьшает ворсистость и позволяет получать детали мелких размеров.

2. Возможность применения стеклотекстолита в качестве конструкционного материала при изготовлении деталей электротехнического оборудования, машиностроения и авиастроения за счет наличия малой плотности и высокой прочности.

3. Стоимость СТЭФ-1 ниже, чем у аналогичных марок стеклотекстолита при тех же значениях прочностных характеристик.

Выбор величины подачи на зуб  $S_z$  и глубины резания  $t$ , а также остальных режимов обработки основан на существующих рекомендациях по обработке специальных материалов в машиностроении и результатах предварительных исследований, полученных ранее на других композиционных материалах. С учетом того, что СТЭФ-1 имеет более высокую прочность, чем ДСтП марки П-А, режимы обработки были скорректированы, а их варьирование осуществлялось в следующих пределах: скорость резания  $V = 2826$  м/мин,  $S_0 = 1,0 \dots 2,0$  м/мин (при количестве рабочих зубьев фрезы  $z = 1$  при данной скорости получим подачу на зуб  $S_z = 0,167 \dots 0,33$  мм/зуб); глубина резания  $t = 0,5 \dots 1,5$  мм. Передний угол  $\gamma = 25^\circ$  и задний угол  $\alpha = 10^\circ$ .

При обработке СТЭФ-1 исследовалась зависимость периода стойкости сборного фрезерного инструмента, оснащенного различными инструментальными материалами, от подачи на зуб  $S_z$  и глубины резания  $t$ . В качестве критерия технологической стойкости принят размер фаски износа по задней поверхности  $h_3$ , увеличение которого ведет к ухудшению качества обработанной поверхности и росту мощности резания. Предварительные исследования показали, что по достижении величины фаски износа  $h_3 = 0,3$  мм качество обработанной поверхности значительно ухудшается и не отвечает требованиям к поверхностям сопрягаемых изде-

лий.

Величина фаски износа контролировалось через промежутки времени, равные 2 мин с помощью микроскопа МБС-10, позволяющего увеличивать изображение в пределах 1...200 крат.

При достижении критерия технологической стойкости, режущий инструмент подвергался затачиванию по задней поверхности, фиксировалось время обработки до переточки  $T$ , мощность  $N$ , а также шероховатость обработанной поверхности  $R_{max}$ .

Замеры шероховатости проводились с использованием профилографа-профилометра "Абрис-ПМ7" с возможностью визуального и графического отображения результатов измерений, статистической обработки результатов измерений с помощью компьютера через интерфейс RS-232.

### **5.2.1. Зависимость работоспособности инструмента от режимов обработки при фрезеровании полимерных композиционных материалов**

Для определения влияния режимов резания на технологическую стойкость инструмента при обработке полимерных композиционных материалов был проведен полный факторный эксперимент. Однако, гипотеза адекватности линейной модели не подтвердилась. Экспериментальные исследования с использованием центрального композиционного ротатабельного планирования второго порядка показывают, что модель не может быть описана полиномом второй степени. Выдвинуто предположение, что зависимость периода стойкости от исследуемых факторов можно представить уравнением регрессии степенного вида [44, 153]:

$$T = c \cdot S_z^m \cdot t^n \quad (5.12)$$

После логарифмирования это уравнение примет вид:

$$\ln T = \ln c + m \ln S_z + n \ln t \quad , \quad (5.13)$$

где  $T$  – период стойкости режущего инструмента;  $m$ ,  $n$  – постоянные величины.

Полином второй степени в таком случае выглядит следующим образом:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2, \quad (5.14)$$

где  $y = \ln T$ ;  $x_1, x_2$  – кодированные значения факторов  $S_z$  и  $t$  соответственно.

Принятые в исследовании уровни факторов представлены в Таблице 5.5

Таблица 5.5

Кодирование факторов

Интервал варьирования и уровень факторов	Подача, $S_z$ , мм/зуб	Глубина резания, $t$ , мм
Кодовое обозначение	$x_1$	$x_2$
Верхний уровень $x_i = +1$	0,33	1,5
Нижний уровень $x_i = -1$	0,167	0,5
Интервал варьирования $\delta_i$	0,08	0,5
Нулевой уровень $x_i = 0$	0,25	1,0

Формулы преобразования натуральных значений факторов в кодированные в данном случае имеют вид:

$$x_1 = \frac{2(\ln S_z - \ln 0,33)}{\ln 0,33 - \ln 0,167} + 1; \quad (5.15)$$

$$x_2 = \frac{2(\ln t - \ln 1,5)}{\ln 1,5 - \ln 0,5} + 1. \quad (5.16)$$

Ротатабельность центрального композиционного плана достигается выбором величины «звездного» плеча  $a = 2^{\frac{k}{4}}$ . Для данного планирования важное значение имеет выбор числа опытов в центре плана, так как это число определяет характер распределения получаемой информации о поверхности отклика. Число опытов в центре плана выбрано таким, чтобы обеспечивалось так называемое равномерное планирование, которое возможно, если некоторая константа  $\lambda$  не превышает единицы:

$$\lambda = \frac{k(n_c + n_0)}{(k+2)n_c}, \quad (5.17)$$

где  $n_0$  – число опытов в центре плана (число нулевых точек);  $n_c = N - n_0$ ;  $N$  – общее число опытов;  $k$  – число факторов;  $n_0 = 5$ ;  $N = 13$  [153].

Матрица ротатабельного равномерного планирования экспериментов для  $k = 2$  приведена в Таблице 5.6.

**Матрица ротатабельного униформ-планирования**

№	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1 \times x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$
1	+	+	+	+	+	+
2	+	-	+	-	+	+
3	+	+	-	-	+	+
4	+	-	-	+	+	+
5	+	+1,414	0	0	2	0
6	+	-1,414	0	0	2	0
7	+	0	+1,414	0	0	2
8	+	0	-1,414	0	0	2
9	+	0	0	0	0	0
10		0	0	0	0	0
11		0	0	0	0	0
12		0	0	0	0	0
13		0	0	0	0	0

Коэффициенты уравнения регрессии определялись по формулам [44, 153]:

$$b_0 = \frac{A}{N} \left[ 2\lambda^2(k+2) \sum_{j=1}^N y_j - 2\lambda c \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j \right]; \quad (5.18)$$

$$b_i = \frac{c}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j; \quad (5.19)$$

$$b_{ii} = \frac{c^2}{N\lambda} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{ij} y_j; \quad (5.20)$$

$$b_{ii} = \frac{A}{N} \left[ c^2((k+2)\lambda - k) \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j + c^2(1-\lambda) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j - 2\lambda c \sum_{j=1}^N y_j \right], \quad (5.21)$$

где  $A = \frac{1}{2\lambda[(k+2)\lambda - k]}$ ;  $c = \frac{N}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}$ .

Дисперсии коэффициентов уравнения регрессии в представленном случае определялись по формулам [44, 153]:

$$S^2\{b_0\} = \frac{2A\lambda^2(k+2)}{N} S_y^2; \quad (5.22)$$

$$S^2\{b_i\} = \frac{c}{N} S_y^2; \quad (5.23)$$

$$S^2 \{b_{il}\} = \frac{c^2}{\lambda N} S_y^2; \quad (5.24)$$

$$S^2 \{b_{ii}\} = \frac{Ac^2[(k+1)\lambda - (k-1)]}{N} S_y^2. \quad (5.25)$$

После вычисления коэффициентов уравнения регрессии определены их доверительные интервалы:

$$\Delta b_0 = \pm t \cdot S\{b_0\}; \quad \Delta b_i = \pm t \cdot S\{b_i\}; \quad \Delta b_{il} = \pm t \cdot S\{b_{il}\}; \quad \Delta b_{ii} = \pm t \cdot S\{b_{ii}\}.$$

где  $t$  – табличное значение критерия Стьюдента при принятом уровне значимости и числе степеней свободы; принимая уровень значимости 5% при числе степеней свободы 8, получим:  $t = 2,3$ .

Адекватность полученной модели проверена с помощью критерия Фишера:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2} < F_T, \quad (5.26)$$

где  $F_T$  – табличное значение критерия Фишера.

Дисперсия параметра оптимизации определялась по результатам опытов в центре плана:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2}{n_0 - 1}, \quad (5.27)$$

где  $y_u$  – значение параметра оптимизации в  $u$ -том опыте;  $\bar{y}$  – среднее арифметическое значение параметра оптимизации в  $n_0$  опытах.

Для определения  $S_{ад}^2$  вычислена сумма  $S_R$  квадратов отклонений расчетных  $y_j$  значений функций отклика от экспериментальных  $y_j$ :

$$S_R = \sum_{j=1}^N (y_j - \bar{y}_j)^2. \quad (5.28)$$

Из полученной суммы  $S_R$  вычиталась сумма  $S_E$ , использованная для определения дисперсии параметра оптимизации по результатам опытов в центре плана:

$$S_E = \sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2. \quad (5.29)$$

Таким образом,  $S_{ад}^2 = \frac{S_R - S_E}{f}$ , где  $f$  – число степеней свободы. (5.30)

Результаты экспериментов по определению технологического периода стойкости инструмента при обработке полимерных композиционных материалов и вычисление коэффициентов регрессии, их дисперсии, а также проверка полученных математических моделей по представленной методике позволили получить следующие степенные модели зависимости периода технологической стойкости от режимов обработки инструментом, оснащенным различными марками инструментальных твердых сплавов группы ВК.

Для ВК8:  $T = 0,82 \cdot S_z^{4,75+2,94 \ln S_z + 2,38 \ln t} \cdot t^{0,46+1,13 \ln t}$ , мин. (5.31)

Для ВК15:  $T = 2,6 \cdot S_z^{2,08+1,11 \ln S_z + 3,02 \ln t} \cdot t^{2,54+0,65 \ln t}$ , мин. (5.32)

Для ВК3М:  $T = 0,64 \cdot S_z^{3,49+2,42 \ln S_z + 3,44 \ln t} \cdot t^{2,05+1,04 \ln t}$  мин. (5.33)

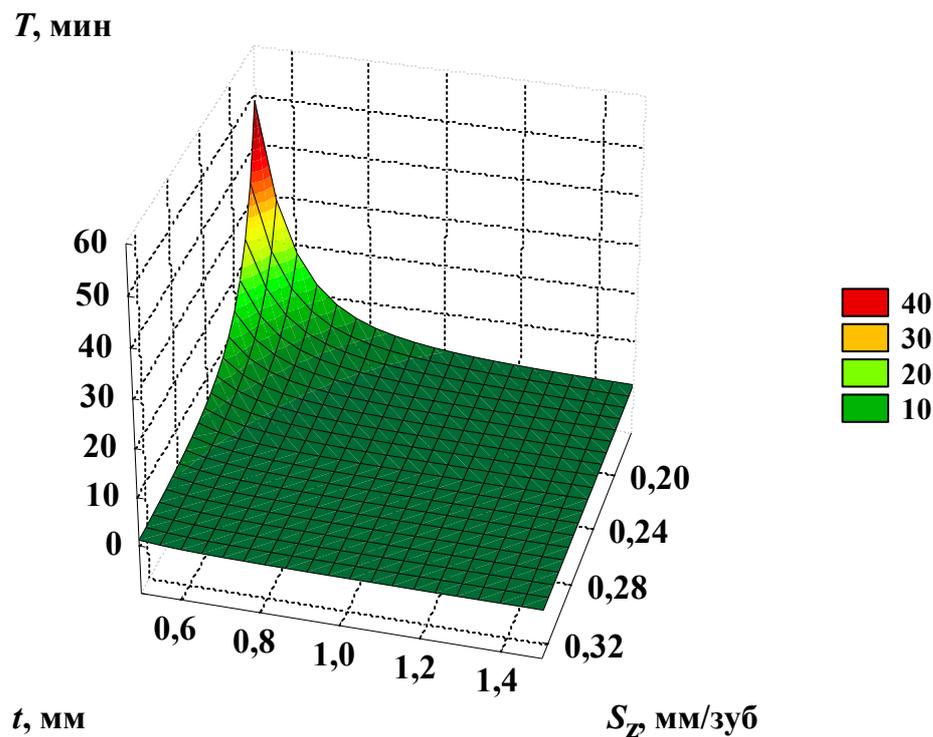


Рисунок 5.19. Поверхность отклика, выражающая зависимость стойкости инструмента, оснащенного твердым сплавом марки ВК8, от подачи на зуб и глубины резания

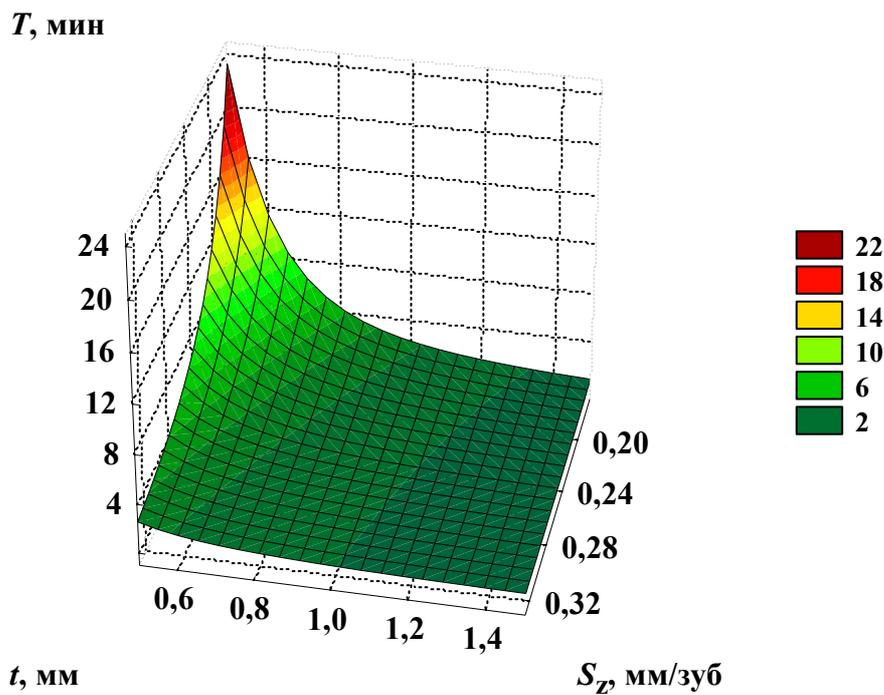


Рисунок 5.20. Поверхность отклика, выражающая зависимость стойкости инструмента, оснащенного твердым сплавом марки ВК15, от подачи на зуб и глубины резания

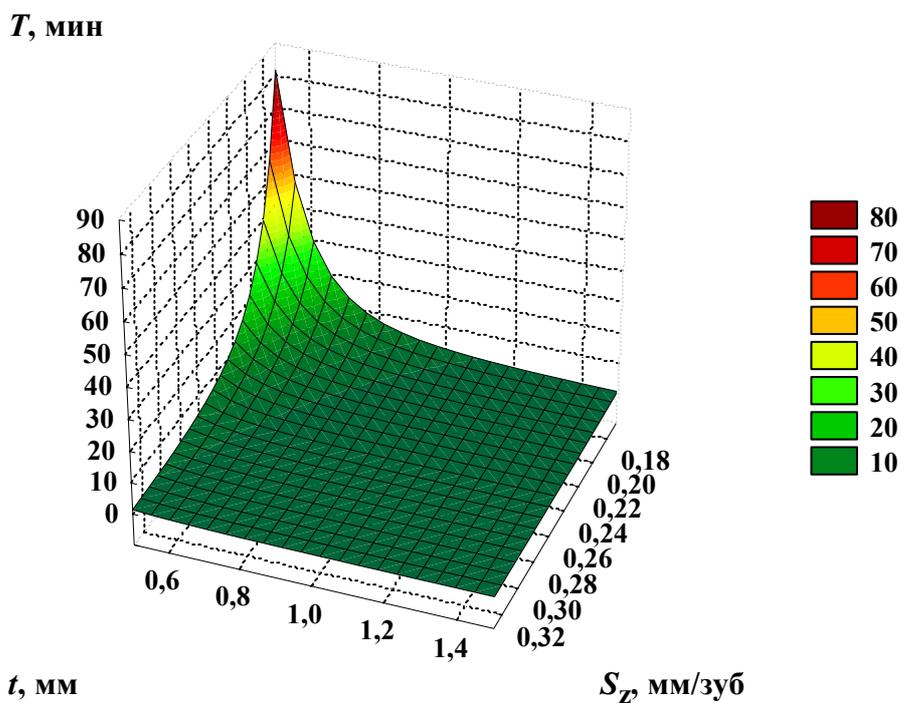


Рисунок 5.21. Поверхность отклика, выражающая зависимость стойкости инструмента, оснащенного твердым сплавом марки ВК3М, от подачи на зуб и глубины резания

По представленным моделям построены поверхности отклика, выражающие зависимость стойкости инструмента, оснащенного различными марками твердых сплавов, от подачи на зуб и глубины резания (Рисунки 5.19...5.21).

Экспериментальные исследования периода стойкости при фрезеровании стеклотекстолита СТЭФ-1 позволяют сделать следующие выводы.

Наиболее высокую работоспособность имеет режущий инструмент, оснащенный твердым сплавом ВК3М, период стойкости которого составил 76 минут при  $S_z = 0,167$  мм/зуб,  $t = 0,5$  мм и  $V = 2826$  м/мин. Сплав ВК8 показывает средний результат и при тех же условиях имеет период стойкости, равный 48 минутам, тогда как данный параметр для сплава ВК15 составляет около 20 минут.

Увеличение подачи и глубины резания негативно влияет на работоспособность режущего инструмента и приводит к уменьшению периода стойкости.

### **5.2.2. Зависимость качества обработанной поверхности и мощности резания от режимов обработки при фрезеровании полимерных композиционных материалов**

Исследование качественных параметров обработанной поверхности сводится к определению шероховатости, а также дефектов, возникающих при фрезеровании полимерных композиционных материалов.

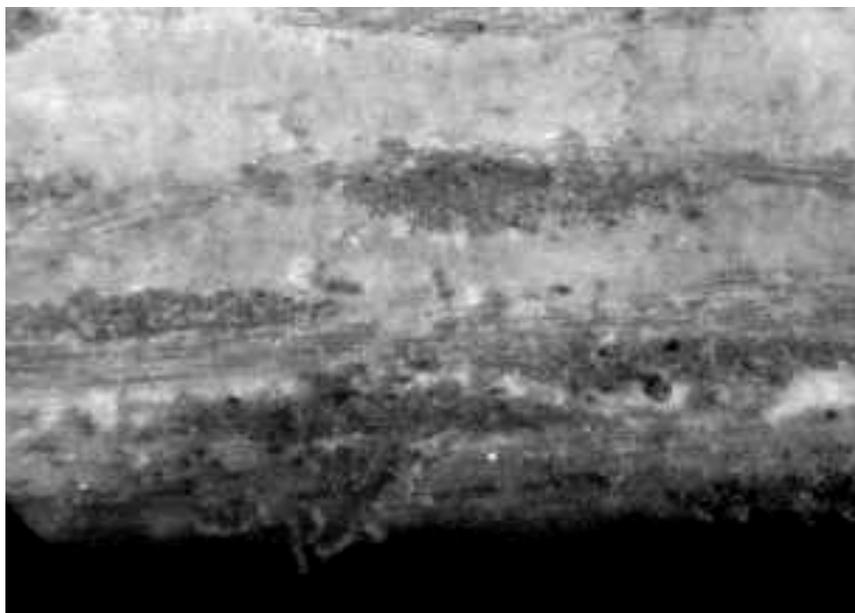
Согласно технологии изготовления применяемого стеклотекстолита, матрица укладывается послойно с пропиткой связующим, в результате чего, материал приобретает слоистую структуру. Матрицей в данном случае является стеклоткань, прочностные свойства которой во многом превосходят свойства связки – эпоксифенольной смолы по таким параметрам, как твердость и предел прочности на сжатие. Таким образом, при обработке композита СТЭФ-1 режущая кромка взаимодействует с двумя материалами, оказывающими различное влияние на стойкость режущего инструмента, что приводит к неравномерному износу.

Качественное состояние обработанной поверхности стеклотекстолита в за-

висимости от изменения режимов резания оценено с помощью выявления дефектов, возникающих при фрезеровании данного композиционного материала инструментом, оснащенным твердым сплавом ВКЗМ и заточенным комбинированным методом электроалмазного шлифования (Рисунки 5.22, 5.23).



*a)* ×20



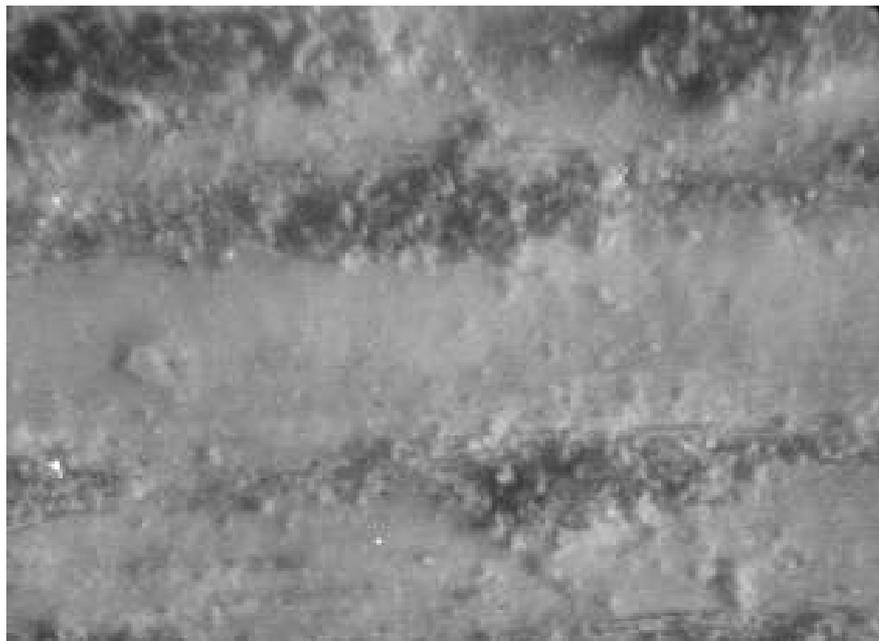
*б)* ×20

Рисунок 5.22. Дефекты на поверхности композита СТЭФ-1 после 2 минут обработки с различными режимами резания:

*a)*  $S_z = 0,167$  мм/зуб;  $t = 0,5$  мм; *б)*  $S_z = 0,33$  мм/зуб;  $t = 0,5$  мм



*a)* ×20



*б)* ×20

Рисунок 5.23. Дефекты на поверхности композиционного материала марки СТЭФ-1 после обработки с различными режимами резания:

*a)*  $S_z = 0,33$  мм/зуб;  $t = 2,0$  мм; *б)*  $S_z = 0,25$  мм/зуб;  $t = 0,5$  мм

При подаче  $S_z = 0,167$  мм/зуб и глубине резания  $t = 0,5$  мм обработанная поверхность не имеет видимых дефектов, а граница раздела между связующим и

матрицей имеет четкие контуры (Рисунок 5.22, а).

С увеличением подачи до 0,33 мм/зуб при той же глубине резания появляются следы разрушения по крайним слоям материала, свойства которых отличаются от свойств средних слоев, вследствие неравномерного распределения плотности при прессовании (Рисунок 5.22, б).

При увеличении подачи до  $S_z = 0,33$  мм/зуб и глубины резания до  $t = 2,0$  мм начинается интенсивное расслоение материала, разрушается связка, и волокна уплотнителя вырываются с поверхности под действием высоких нагрузок, возникающих при встречном фрезеровании (Рисунок 5.23, а). Положение так же ухудшается тем, что к моменту времени, равному 2 мин при данных режимах обработки режущая кромка оказывается сильно изношенной, а фаска износа по задней поверхности превышает 0,35 мм.

При уменьшении подачи до 0,25 мм/зуб при глубине резания равной 0,5 мм (Рисунок 5.23, б) наблюдается значительное улучшение качества поверхности по сравнению с предыдущим случаем, однако граница раздела «матрица-волокно» размыта, а часть волокон стеклоткани вытянута из матрицы или разрушена, что недопустимо при обработке таких материалов.

Шероховатость обработанной поверхности полимерного композиционного материала также определяет качество обработанной поверхности, она исследовалась по параметру  $R_{max}$ , величина которого характеризуется средним значением максимальной высоты микронеровностей в 5 различных точках. При экспериментальных исследованиях шероховатость обработанной поверхности и величина фаски износа по задней поверхности оценивались через определенный интервал времени обработки.

По результатам серии опытов построены зависимости шероховатости обработанной поверхности композиционного материала от изменения величины фаски износа по задней поверхности инструмента, оснащенного различными марками твердого сплава.

В первые минуты обработки полимерного композиционного материала ин-

струментом, оснащенным различными марками твердого сплава, с величиной подачи  $S_z = 0,167$  мм/зуб, глубиной резания  $t = 0,5$  мм и  $V = 2826$  м/мин шероховатость поверхности стеклотекстолита СТЭФ-1 составила порядка 8...10 мкм при величине фаски износа  $h_3$  по задней поверхности режущего инструмента, не превышающей 0,05 мм. С увеличением величины фаски износа по задней поверхности  $h_3$ , шероховатость обработанной поверхности растет и, при достижении  $h_3 = 0,35$  мм, составляет порядка 20...40 мкм (Рисунок 5.24).

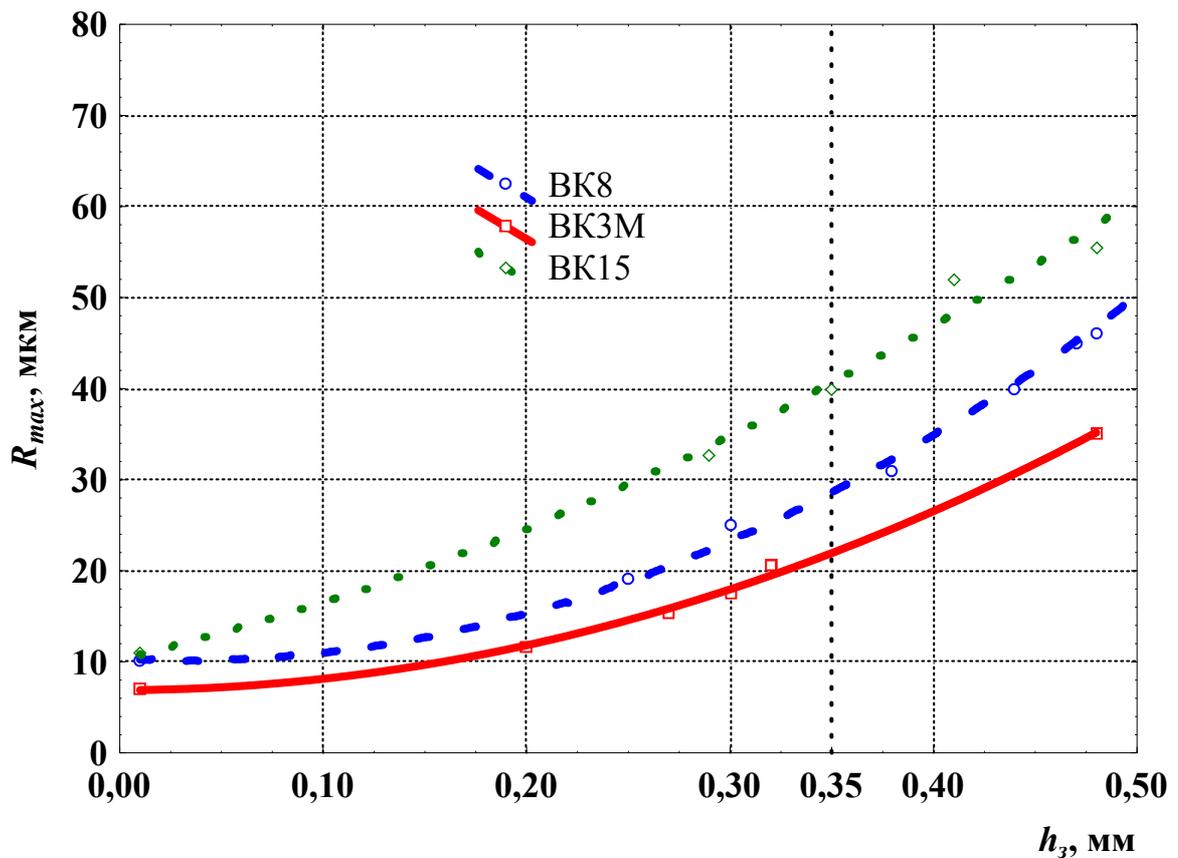


Рисунок 5.24. Зависимость шероховатости поверхности стеклотекстолита от изменения величины фаски износа по задней поверхности при обработке инструментом, оснащенным различными марками твердого сплава

$$(S_z = 0,167 \text{ мм/зуб}, t = 0,5 \text{ мм}, V = 2826 \text{ м/мин})$$

Различия в интенсивности изменения уровня шероховатости  $R_{max}$  в зависимости от марки инструментального материала объясняется характером износа режущей кромки при фрезеровании композита различными инструментальными ма-

териалами. Исследуемые твердые сплавы в своем составе имеют различную концентрацию карбидов и отличающиеся размеры зерен карбидов, а обрабатываемый материал, в свою очередь, имеет неоднородную структуру в микромасштабе (см. Рисунок 5.22).

К примеру, при обработке композита СТЭФ-1 режущим инструментом, оснащенным твердым сплавом марки ВК15 (85% карбида вольфрама, размер зерен карбидов 3...5 мкм) шероховатость поверхности, при достижении критерия технологической стойкости, почти в 2 раза превышает шероховатость, полученную при обработке того же материала твердым сплавом марки ВК3М (97% карбида вольфрама, размер зерен карбидов 1...1,5 мкм).

Изменение общей мощности при фрезеровании полимерных композиционных материалов указывает на изменение сил резания, вызванное увеличением размера фаски износа по задней поверхности инструмента во время обработки, либо изменение режимов обработки. Кроме того, повышение мощности ведет к возрастанию энергетических затрат при обработке, что также не желательно. В связи с этим проведена серия опытов по определению влияния режимов резания, времени обработки и величины фаски износа по задней поверхности на изменение общей мощности при фрезеровании стеклотекстолита марки СТЭФ-1 инструментом, оснащенным твердым сплавом марки ВК3М и заточенным комбинированным методом электроалмазной обработки. Общая мощность при фрезеровании стеклотекстолита определялась суммарно от приводов, задействованных при обработке (главного движения, подачи, удаление пыли), через определенные промежутки времени, в зависимости от изменения исследуемых параметров.

Серия опытов, направленная на выявление зависимости общей мощности при резании от времени обработки и величины фаски износа по задней поверхности инструмента проводилась с величиной подачи  $S_z = 0,167$  мм/зуб, глубиной резания  $t = 0,5$  мм и  $V = 2826$  м/мин. По результатам исследований построены графики зависимостей, представленные на Рисунках 5.25 и 5.26.

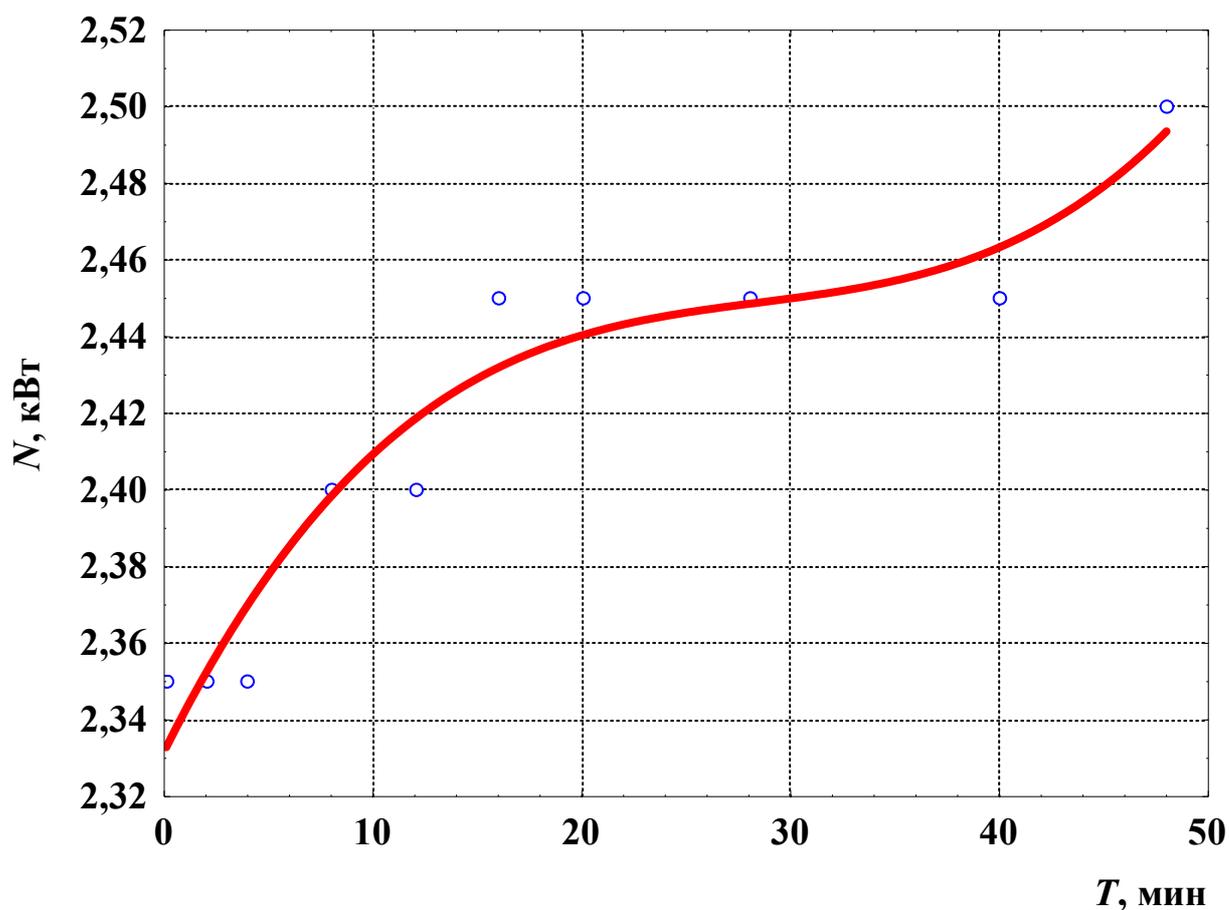


Рисунок 5.25. Зависимость общей мощности при резании от времени обработки полимерного композиционного материала ( $S_z = 0,167$  мм/зуб,  $t = 0,5$  мм,  $V = 2826$  м/мин)

Анализируя график, представленный на Рисунке 5.25 видим, что можно выделить три основные стадии изменения общей мощности при резании от времени обработки: период приработки режущего инструмента, период равномерного износа и период катастрофического износа.

Общая мощность до момента достижения режущим инструментом критерия технологической стойкости, увеличивается в среднем на 0,15...0,18 кВт, что свидетельствует о возрастании сил резания (Рисунок 5.26). Это объясняется увеличением размера фаски износа по задней поверхности, что приводит к возрастанию сил трения, препятствующих срезанию припуска на обработку и вызывает дополнительные затраты энергии для преодоления этих сил.

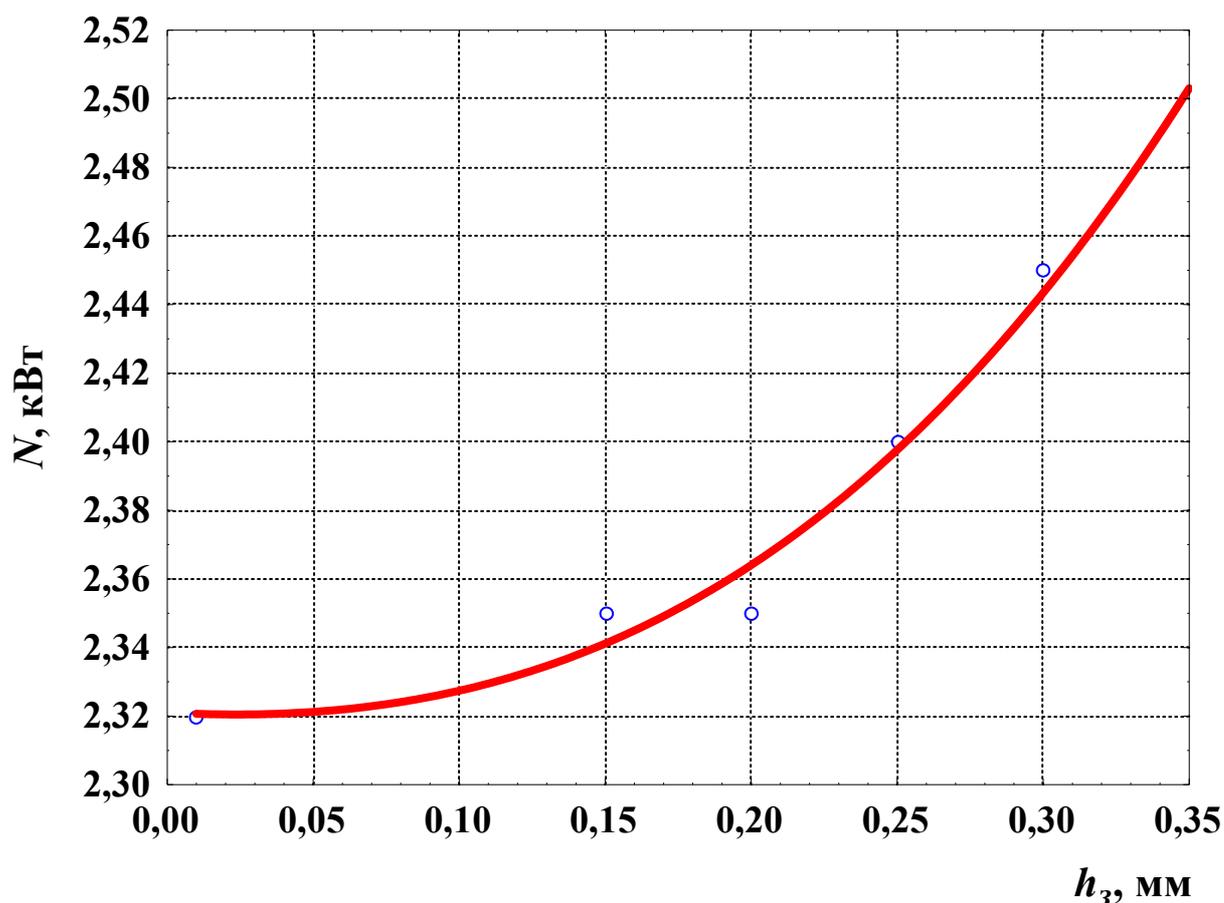


Рисунок 5.26. Зависимость мощности резания от изменения величины фаски износа по задней поверхности инструмента  
 $(S_z = 0,167 \text{ мм/зуб}, t = 0,5 \text{ мм}, V = 2826 \text{ м/мин})$

Другая серия опытов проведена с целью выявления влияния режимов резания на изменение мощности резания при обработке полимерного композиционного материала марки СТЭФ-1 инструментом, оснащенный твердым сплавом марки ВКЗМ и заточенным комбинированным методом электроалмазной обработки. Величина подачи на зуб  $S_z$  варьировалась в пределах от 0,167 до 1,5 мм/зуб, глубина резания  $t$  варьировалась в пределах от 0,5 до 2 мм, скорость в серии опытов выбрана постоянной  $V = 2826 \text{ м/мин}$ .

По результатам исследований построена поверхность отклика, характеризующая зависимость общей мощности при обработке от глубины резания и подачи на зуб (Рисунок 5.27).

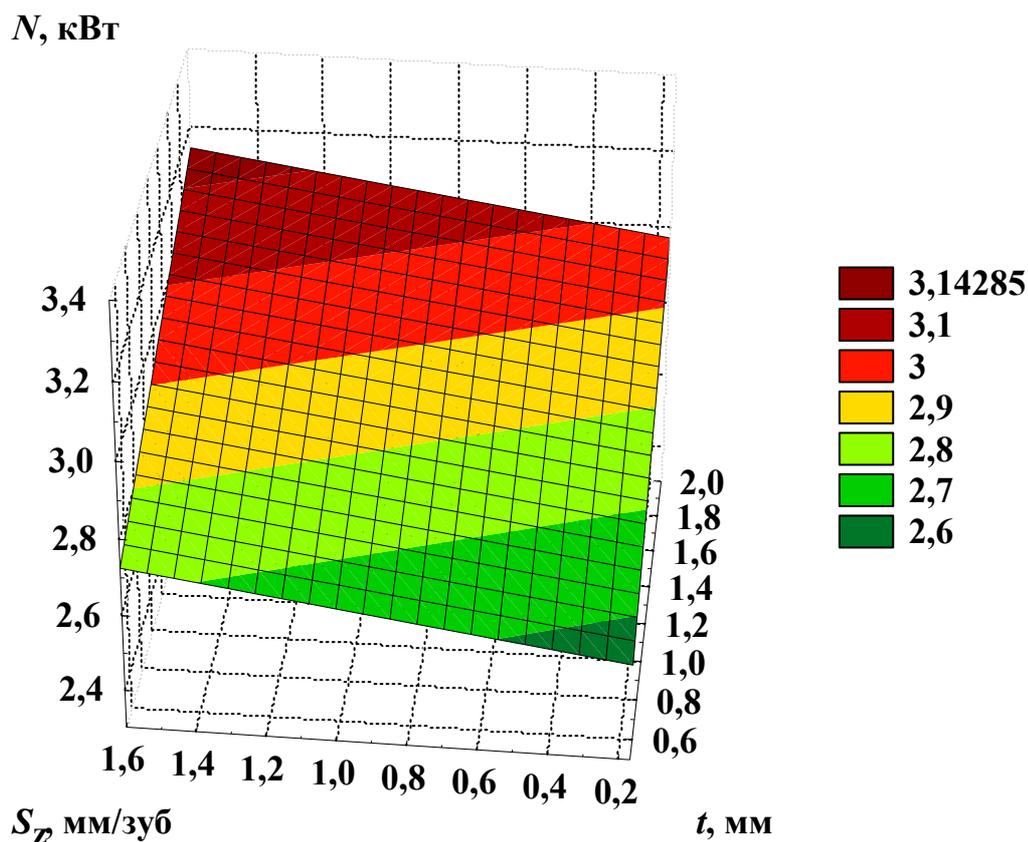


Рисунок 5.27. Поверхность отклика, характеризующая зависимость общей мощности резания от глубины резания и подачи на зуб

Из анализа экспериментальных данных следует, что с увеличением подачи и глубины резания, мощность возрастает, в связи с увеличением толщины срезаемого слоя обрабатываемого материала и нагрузки на режущий клин инструмента.

Таким образом, при обработке полимерных композиционных материалов твердосплавным инструментом, имеющим специфическую для обработки такого вида материалов геометрию режущих элементов, для обеспечения повышенной работоспособности инструмента и обеспечения высоких качественных характеристик обработанной поверхности, необходимо назначать минимальную подачу и глубину резания, несмотря на потерю производительности обработки.

## Выводы по 5 главе:

1. Достижение эффективной обработки композиционных материалов прогрессивным инструментом возможно лишь при совместном рациональном выборе инструментального материала, геометрических параметров инструмента и режимов обработки.

2. Выбор рациональных режимов обработки композиционных материалов фрезерным инструментом, оснащенным прогрессивными инструментальными материалами, рекомендуется достигать на этапе технологической подготовки инструмента к работе. Для этого необходимо использование полученных в результате исследований экспериментальных данных по работоспособности инструмента и качеству обработанной поверхности в методике, представленной во 2 главе.

3. Среди инструментов для обработки композиционных материалов на древесной основе, режущая часть которых оснащена сплавами вольфрамокобальтовой группы (ВК) и титановольфрамокобальтовой группы (ТК) лучшие результаты по стойкости у сплава марки ВК3М. Стойкость инструмента, оснащенного возрастает с уменьшением содержания в сплаве связующего (С<sub>о</sub>). Результаты исследования качества обработки и работоспособности твердосплавного инструмента при фрезеровании композиционных материалов на древесной основе позволяют рекомендовать сплав ВК3М с целью повышения производительности и экономии инструментальных материалов.

4. При фрезеровании композиционных материалов на древесной основе инструментом, оснащенным твердым сплавом марки ВК3М максимальный технологический период стойкости  $T = 2437$  мин наблюдается при следующих условиях: частота вращения шпинделя  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup>; продольная подача  $S = 4$  м/мин; глубина резания  $t = 1$  мм; угол заострения режущего элемента  $\beta = 60^\circ$  ( $\gamma = 25^\circ$ ).

5. Максимальную работоспособность при обработке полимерных композиционных материалов имеет режущий инструмент, оснащенный твердым сплавом ВК3М, период стойкости которого составил 76 минут при  $S_z = 0,167$  мм/зуб,  $t = 0,5$  мм и  $V = 2826$  м/мин.

6. Для достижения высоких качественных показателей обработанных поверхностей из композиционных материалов необходимо стремиться к повышению скорости резания и уменьшению величины угла при вершине режущего элемента. Варьирование глубиной резания и подачей позволит управлять, в этом случае, производительностью обработки.

## **ГЛАВА 6. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФРЕЗЕРНОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Повышение эффективности обработки резанием композиционных материалов зависит от целенаправленной реализации мероприятий направленных на разработку методов и способов увеличения работоспособности режущего и критериального анализа конструктивных решений. В связи с этим, необходимо сформулировать ряд рекомендаций, которые следует выполнять для повышения эффективности использования фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов.

### **6.1. Рекомендации по конструктивным решениям сборного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов**

Анализируя результаты исследований, можно сформулировать следующие рекомендации, касающиеся новых конструктивных решений специального сборного режущего инструмента для обработки неметаллических композиционных материалов, опубликованные нами в открытой печати в период с 2001 по 2012 гг.

Сборные конструкции инструмента, как ранее отмечалось, обладают рядом преимуществ по сравнению с цельным инструментом. Созданные в настоящее время конструкции сборного инструмента [119...125, 127...129] обладают рядом недостатков: вероятность смещения режущих элементов в осевом и радиальном направлениях, что нежелательно при обработке профильных поверхностей; небольшой ресурс режущих элементов; сложность и малая надежность крепления режущих элементов; отсутствие единой схемы базирования режущих элементов [185, 203].

Для эффективного использования инструментальных материалов целесообразны прогрессивные сборные конструкции инструмента [130, 132, 133, 185, 186, 210]. Это позволит увеличить его технологические возможности и повысить адап-

тивность при изменяющихся условиях обработки; снизить расход инструментальных материалов и простои, связанные с переналадкой инструмента и его заменой при потере режущей способности. Кроме того, такие конструкции обладают большей надежностью и точностью, что положительно сказывается на качестве выпускаемой продукции.

Нами спроектированы различные конструктивные решения сборных конструкций фрез для обработки композиционных материалов. Так, например, на Рисунке 6.1 представлена фреза, содержащая единый универсальный корпус с пазами, в которых возможно размещение вставок различного технологического назначения, с прижимными клиньями, болтами для крепления вставок [130].

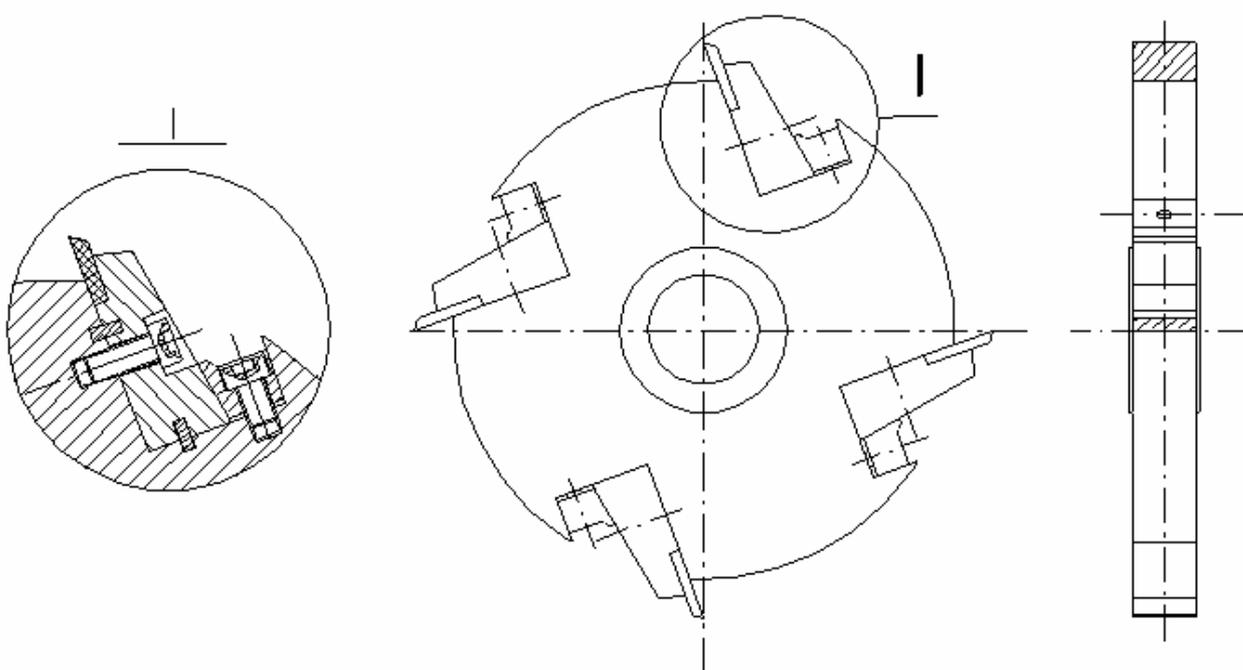


Рисунок 6.1. Фреза сборная (Патент РФ № 2002117387/02)

Режущие элементы имеют напаянные пластины с необходимым профилем резания. Вставки зафиксированы в корпусе штифтами, расположенными во взаимно перпендикулярных плоскостях, и дополнительно закреплены в корпусе болтами.

Однако, недостатком конструкции с неподвижными штифтами является сложность процесса сборки инструмента из-за необходимости дополнительной подгонки сопрягаемых деталей.

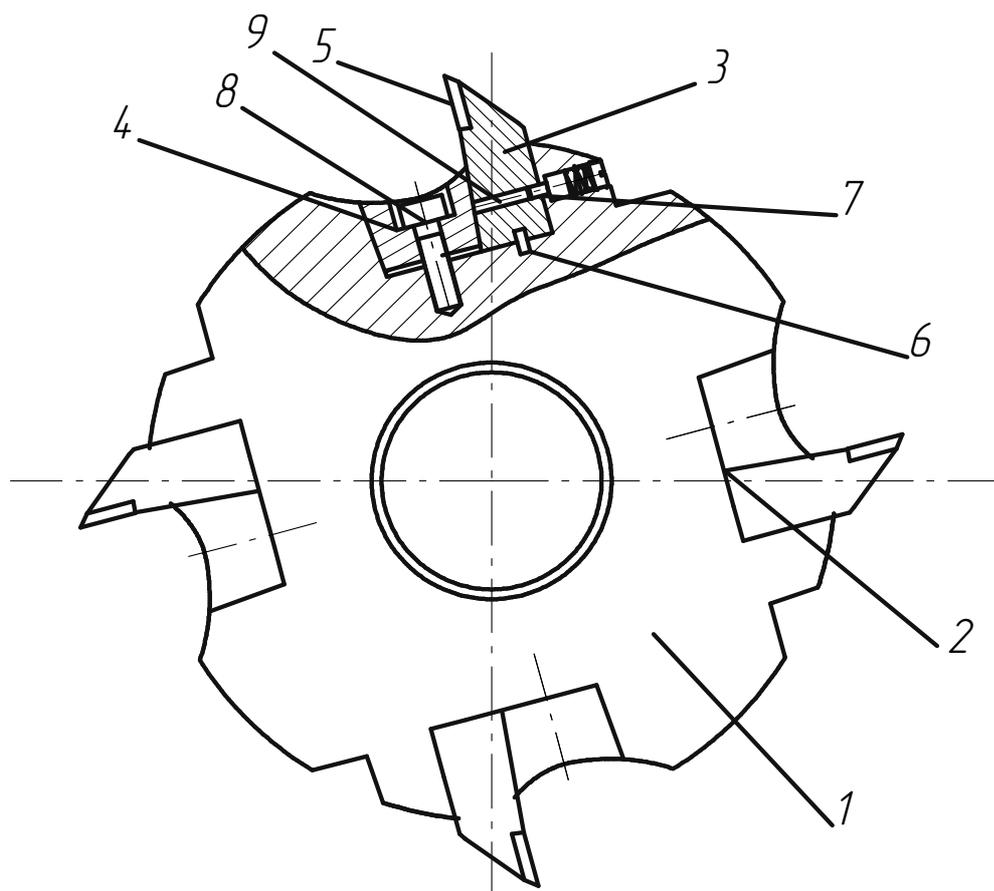


Рисунок 6.2. Фреза сборная с креплением режущих элементов на штифты в двух перпендикулярных плоскостях (Патент РФ № 2004109804/02)

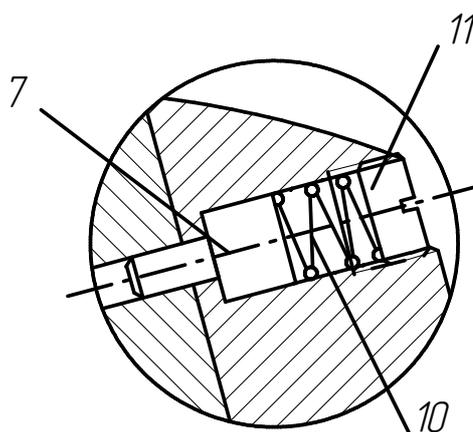


Рисунок 6.3. Конструкция подпружиненного штифта, обеспечивающего установку резцовой вставки

Как один из вариантов, для облегчения сборки, нами предложена конструкция фрезы (Рисунок 6.2) [132], оснащенная штифтами, один из которых выполня-

ется подпружиненным и выполняет роль фиксатора. Конструкции и расположение штифтов выполняются в зависимости от назначения и конструктивного исполнения фрезерного инструмента.

Подпружинивание штифта 7 достигается за счет пружины 10, расположенной в корпусе 1 и закрепленной с помощью винта 11 (Рисунок 6.3).

Сборка фрезы выполняется следующим образом. Вставки 3 с режущими элементами 5 устанавливаются в пазы 2 корпуса 1. С помощью штифтов 6 и 7, расположенных во взаимно-перпендикулярных плоскостях, вставки 3 устанавливаются в необходимом положении в корпусе 1. Во время сборки штифт 7 смещается в корпус фрезы и фиксируется в отверстии вставки с помощью пружины 10. Зафиксированные таким образом, вставки 3 дополнительно крепятся к базовой поверхности паза 2 посредством прижимных клиньев 4 болтами 8.

Для разборки фрезы предусмотрено технологическое отверстие 9, через которое производится перемещение подпружиненного штифта из резцовой вставки.

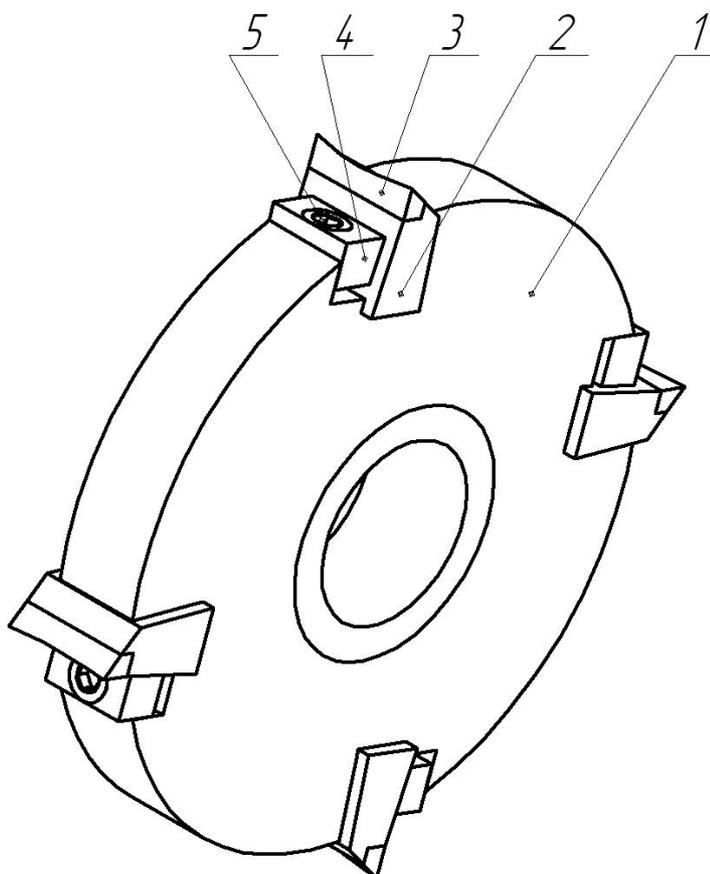


Рисунок 6.4. Фреза сборная для обработки композиционных материалов

Другим конструктивным решением, направленным на упрощение процесса сборки-разборки инструмента, повышение надежности и точности базирования вставок в корпусе фрезы, улучшение качества обрабатываемых изделий является фреза представленная на Рисунке 6.4.

Конструкция содержит корпус 1, который имеет посадочное отверстие и пазы, боковые поверхности которых выполнены под углом для размещения вставок 2, имеющих напаянные режущие элементы 3 с необходимым профилем резания. Вставки 2, выполненные в форме клина и имеющие в основании пазы, ширина которых равна ширине корпуса фрезы, зафиксированы прижимным клином 4 при помощи винта 5, что исключает смещение вставок в осевом и радиальном направлении.

Сборка конструкции осуществляется следующим образом (Рисунок 6.5.). Вставки 2 размещаются в пазах до совпадения поверхностей таким образом, чтобы задняя поверхность вставки была прижата к боковой поверхности паза. Фиксация вставок осуществляется прижимным клином 4 с помощью винта 5.

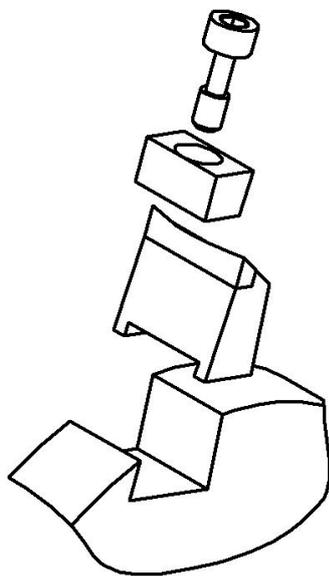


Рисунок 6.5. Порядок сборки фрезы

Вставки выполнены в форме клиньев, имеющих пазы в основании, ширина которых равна ширине корпуса фрезы, что позволяет произвести точное базирование клиньев относительно установочной поверхности, которые зафиксированы при помощи прижимного клина и винта

Достоинствами представленных сборных конструкций являются:

1. Экономия конструкционных и инструментальных материалов. Корпус, вставки, клинья, болты – стальные и используются многократно. Режущие элементы меняются по мере потери работоспособности.

2. Возможность (в случае поломки или аварийного износа одного или нескольких резцов) замены только дефектных вставок комплекта.

3. Возможность, используя один корпус и разные комплекты вставок, обрабатывать поверхности различной конфигурации, варьируя, по мере надобности, марками инструментальных материалов, геометрическими и размерными параметрами инструмента.

4. Осуществление единой схемы базирования вставок.

5. Увеличение точности, жесткости и надежности фрезы.

## **6.2. Выбор инструментальных материалов, геометрии инструмента и режимов для обработки композиционных неметаллических материалов**

Экономическая эффективность производства для современного предприятия является одним из важных показателей при проектировании технологического процесса. При применении механической обработки изделий на этот параметр в значительной степени оказывает влияние режущий инструмент, поскольку себестоимость продукции зависит от его стоимости, работоспособности и производительности обработки, которые изменяются в соответствии с конструктивными особенностями инструмента. Применение сборных конструкций режущего инструмента позволяет повысить его универсальность и снизить затраты производства за счет возможности варьирования технологическими и конструктивными параметрами. В связи с этим, номенклатура такого рода инструментов на предприятиях значительно возрастает.

Появляется необходимость выбора марки инструментального материала для заданного вида обработки [89]. Нами предлагается методика рационального выбора марки инструментального материала для оснащения сборной конструкции

инструмента при обработке композиционных материалов [190, 191, 204].

Годовой экономический эффект от применения инструмента, оснащенного прогрессивными инструментальными материалами, определяется по методике, представленной далее.

В условиях, когда сравниваются инструменты, не отличающиеся по конструкции и размерам, работающие в одинаковых условиях (тип производства, операция, оборудование и режимы резания), экономический эффект от применения сборного инструмента, оснащенного различными марками инструментальных материалов можно получить при сравнении рекомендованных марок с исходными.

Экономический годовой эффект  $\mathcal{E}_{год}$  от применения режущего инструмента определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_{год} = \frac{C_{исх} \cdot T_{год}}{T_{исх}(n_{исх} + 1) + T_{кан.исх} \cdot i} - \frac{C_{срав} \cdot T_{год}}{T_{срав}(n_{срав} + 1) + T_{кан.срав} \cdot i}, \text{ руб}, \quad (6.1)$$

где:  $C_{исх}$  и  $C_{срав}$  – полная стоимость исходного и сравниваемого инструмента соответственно, руб;  $T_{год}$  – рабочее время на выполнение годовой программы, мин;  $T_{год} = 119220$  мин (при работе в одну смену);  $T_{исх}$  и  $T_{срав}$  – период стойкости исходного и сравниваемого инструмента соответственно, мин;  $n_{исх}$  и  $n_{срав}$  – допустимое число переточек исходного и сравниваемого инструмента соответственно;  $T_{кан.исх}$  и  $T_{кан.срав}$  – период стойкости между ремонтами исходного и сравниваемого инструмента соответственно, мин;  $i$  – допустимое число ремонтов.

В качестве примера приведено сравнение сборных фрез, которые имеют одинаковые конструкции, размеры и условия эксплуатации, отличающиеся инструментальными материалами (Р6М5, ВК15, ВК8 и ВК3М). В качестве базового материала при сравнении выбрана быстрорежущая сталь марки Р6М5. Результаты анализа экономической эффективности от применения инструментальных материалов представлены в Таблице 6.1.

При этом, в сравнении с быстрорежущей сталью Р6М5, годовой экономический эффект от применения инструмента, оснащенного сплавом ВК15 составил

7795 рублей, при использовании сплава ВК8 – 11200 рублей, а сплав ВК3М обеспечил эффект в 21914 рублей.

Таблица 6.1

Результаты анализа экономической эффективности от применения различных инструментальных материалов

Материал	$C$ , руб	$T$ , мин	$T_{\text{кан}}$ , мин	$i$	$n$ , шт	$T_{\text{год}}$ , мин	$\mathcal{E}_{\text{год}}$ , руб
Р6М5	9787	430	4300	8	10	119220	-
ВК15	11557	460	6900	8	15	119220	7795
ВК8	12106	570	8550	8	15	119220	11200
ВК3М	13255	1470	22050	8	15	119220	21914

Таким образом, применение твердых сплавов в качестве режущих вставок в сборных фрезах позволяет снизить затраты производства и себестоимость продукции. Наибольший экономический эффект достигается при применении твердого сплава марки ВК3М.

Согласно результатам ранее проведенных исследований, для улучшения условий и уменьшения сроков технологической подготовки режущего инструмента, достижения рациональной работоспособности инструмента и высокого качества обработанной поверхности без значительных потерь производительности рекомендуется [145, 214]:

1. Применять высокопрочные инструментальные материалы для оснащения режущей части инструмента. В частности, применять твердый сплав марки ВК3М, являющийся более предпочтительным.

2. Геометрические характеристики инструмента необходимо устанавливать в пределах:

Для обработки композиционных материалов на древесной основе

- передний угол  $\gamma = 20 \dots 25^\circ$ ;
- задний угол  $\alpha = 10 \dots 15^\circ$ ;
- угол заострения  $\beta = 55 \dots 60^\circ$ .

Для обработки полимерных композиционных материалов

- передний угол  $\gamma = 15 \dots 20^\circ$ ;
- задний угол  $\alpha = 10 \dots 15^\circ$ ;
- угол заострения  $\beta = 55 \dots 60^\circ$ .

3. Режимы чистовой обработки композиционных материалов при макси-

мально возможном (допускаемом возможностями технологического оборудования) повышении скорости резания необходимо устанавливать:

Для обработки композиционных материалов на древесной основе

- подача на зуб

$S_z = 0,10 \dots 0,15$  мм/зуб;

- глубина резания  $t = 0,5 \dots 1$  мм.

Для обработки полимерных

композиционных материалов

- подача на зуб

$S_z = 0,15 \dots 0,17$  мм/зуб;

- глубина резания  $t = 0,5 \dots 0,6$  мм.

### 6.3. Рекомендации по реализации методик моделирования и сравнительного анализа режущего инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов

Для принятия обоснованных конструктивных и технологических решения по используемым на производстве конструкциям режущих инструментов, целесообразно использовать методику моделирования сборного фрезерного инструмента, описанную выше. Это позволит математически описать конструктивные решения инструментов, имеющих в распоряжении предприятия, что послужит основой для создания их базы данных на предприятии и сравнительного анализа их конструкций для варьируемых условий производства [88].

Согласно методике моделирования сборного фрезерного инструмента, представленной в Главе 2 реализуем построение графовой структуры на примере двух конструктивных решений сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов (Рисунки 6.1 и 6.2.).

Графовая модель представленной конструкции, изображенной на Рисунке 6.1. имеет структуру, представленную на Рисунке 6.6.

Полученная графовая модель описывается в виде упрощенной матрицы  $B_1$ :

$$B_1 = \begin{array}{c|cccccccc} & X_{112} & X_{1351} & X_{143} & X_{12} & X_{21} & X_{2311} & X_{24} & X_{31} & X_{33} \\ \hline X_1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ X_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array}$$

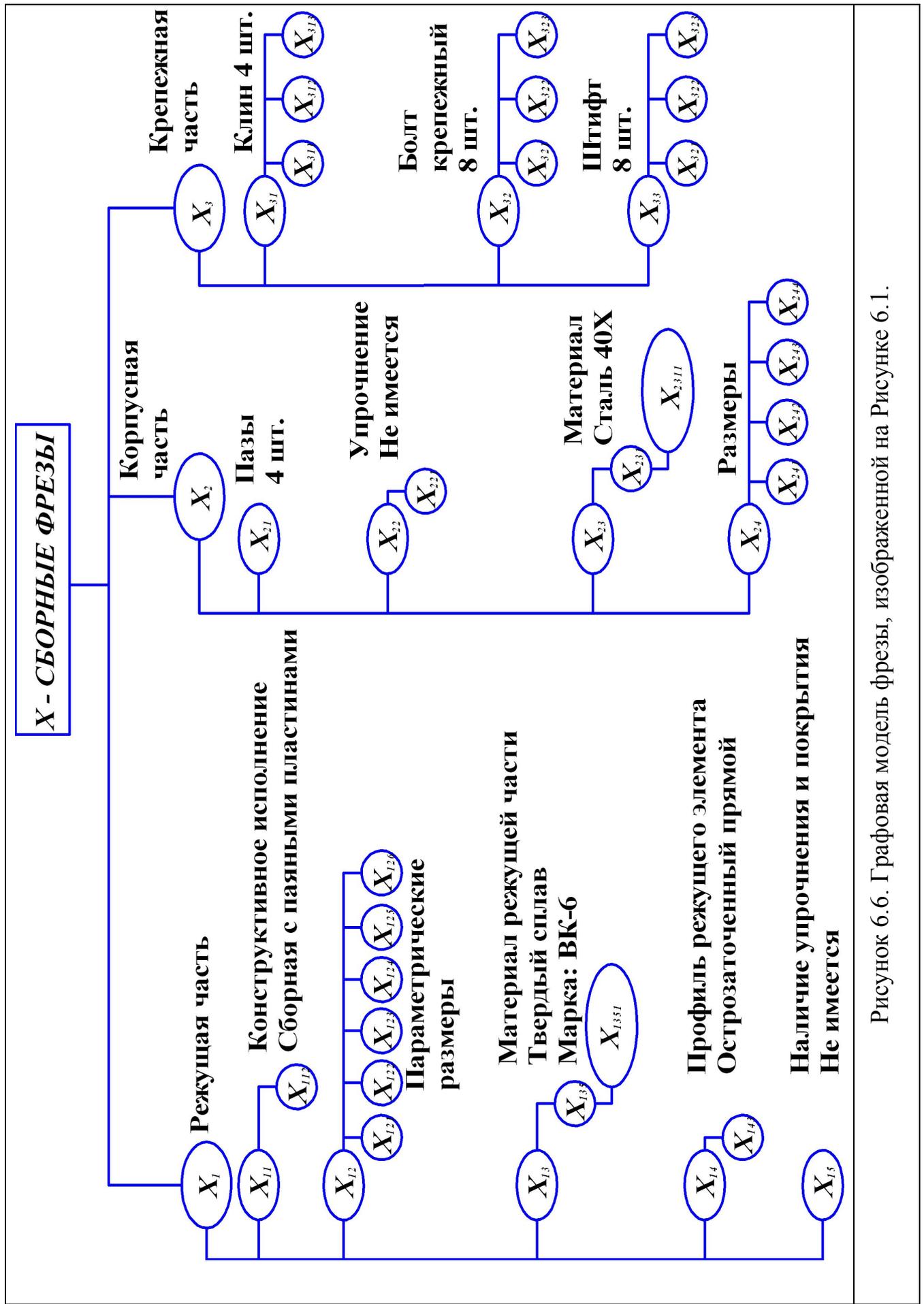


Рисунок 6.6. Графовая модель фрезы, изображенной на Рисунке 6.1.

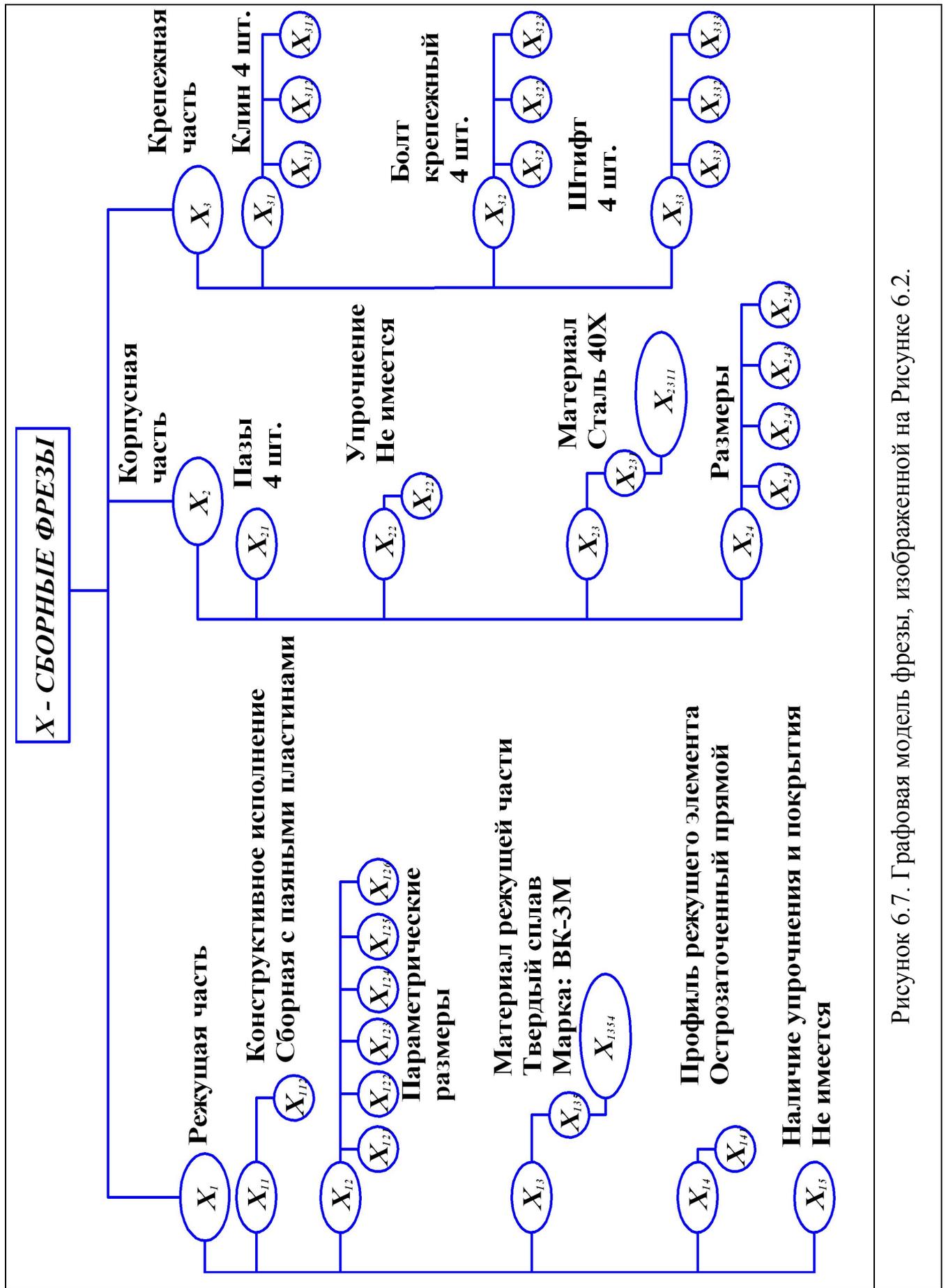


Рисунок 6.7. Графовая модель фрезы, изображенной на Рисунке 6.2.

Конструкция другой сравниваемой конструкции сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов (Рисунок 6.2.) представлена графовой моделью изображенной на Рисунке 6.7.

Переведем полученную графовую модель в матричную форму и представим результаты в виде упрощенной матрицы  $B_2$ :

$$B_2 = \begin{array}{c|cccccccc} & X_{112} & X_{1354} & X_{141} & X_{12} & X_{21} & X_{2311} & X_{31} & X_{32} & X_{33} \\ \hline X_1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ X_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{array}$$

Представление результатов структурного графового моделирования в виде матриц позволяет вносить описанные конструктивные решения в базу данных режущих инструментов, повышать эффективность проектирования и анализа новых конструкций, а также сокращать сроки технологической подготовки производства.

Автоматизировать процесс систематизации инструментального оснащения предприятия возможно путем рационального применения программного обеспечения для создания базы данных сборного фрезерного инструмента [82...86, 94, 148]. Автоматизация труда технологов и конструкторов нового инструмента, с использованием разработанных программных продуктов, позволит снизить временные затраты, связанные с хранением и обработкой информации о конструкциях сборного инструмента и поиском рационального конструктивного решения для заданных условий производства.

Для осуществления рационального выбора инструмента при варьируемых условиях обработки композиционных материалов рекомендуется использовать методики сравнительного анализа, представленные в главе 2. Это позволит принимать обоснованные технико-экономические решения по выбору конструкции инструмента для осуществления технологического процесса обработки композиционных материалов [90, 174, 176, 177, 188, 192].

В качестве примера проведем сравнительный анализ нескольких конструкций фрез при обработке стеклотекстолита СТЭФ-1. Обозначим все критерии оценки как значимые, т.е. работоспособность инструмента, производительность

обработки, качество поверхности и экономичность необходимо учитывать при расчетах.

Таблица 6.2

Конструктивные параметры сравниваемых фрез и результаты расчета критериев

Параметр	Значение параметра для различных конструкций фрез			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
Исходные данные				
Материал режущей части	ВК3М	ВК8	ВК15	ТН20
Передний угол, $\gamma$ , °	25	25	25	25
Задний угол, $\alpha$ , °	10	10	10	10
Диаметр резания, $D_{фр}$ , м	0,15	0,15	0,15	0,15
Ширина резания, $b$ , м	0,01	0,01	0,01	0,01
Предел прочности на сжатие, $\sigma_{сж}$ , МПа	4700	3910	3400	3500
Количество зубьев, $z$	4	4	4	4
Твердость, HRA	91	87,5	80	86
Стоимость фрезы, $C_{фр}$ , руб	4450	4330	4310	4470
Число перестановок или ремонта режущих элементов $N_{рем}$	60	60	60	60
Цена ремонта режущих элементов $C_{рем}$ , руб	400	400	400	-
Цена одного комплекта ножей $C_{ок}$ , руб	180	134	124	189
Время на заточку или поворот пластин $t_{зп}$ , час	0,33	0,33	0,33	0,033
Время на установку и настройку $t_{уст}$ , час	0,03	0,03	0,03	0,03
Часовая ставка рабочего $C_ч$ , руб/ч	55	55	55	55
Допустимое число переточек, $i$	20	20	20	5
Расчетные значения				
Период стойкости, $T$ , мин	76	36,5	22,7	12,4
Производительность, $P \times 10^{-5}$ , м <sup>3</sup> /мин	1,84	1,43	1,01	1,38
Высота микронеровностей, $h$ , мкм	0,417	0,417	0,417	0,417
Приведенные затраты, $PЗ$ , руб/мин	19,10	39,54	63,60	75,45

Рассматриваемые конструктивные решения сборного фрезерного инструмента оснащены режущими элементами из разных марок инструментальных ма-

териалов, конструкция  $X_3$  имеет вставки в виде сменных пятигранных неперетачиваемых пластин, остальные – перетачиваемые элементы. В качестве исходной примем конструкцию  $X_1$ , для которой известен период стойкости и оптимальные режимы обработки.

Конструктивные параметры инструментов и результаты расчета приведены в Таблице 6.2.

Режимы резания для всех конструкций одинаковы и составляют:

$$S_0 = 1,0 \text{ м/мин}; t = 0,5 \text{ мм}; n = 6000 \text{ мин}^{-1}.$$

Выбор режимов резания обусловлен возможностями производственного оборудования и рекомендациями по обработке специальных материалов в машиностроении [8, 80].

Результаты расчетов сводим в результирующую матрицу смежности, принимая во внимание, что приведенные затраты и шероховатость поверхности имеют в матрице обратный приоритет:

$$M(a_{ij}) = \begin{pmatrix} & T & П & R_a & ПЗ \\ X_1 & 76 & 1,84 \times 10^{-5} & 2,4 & 0,052 \\ X_2 & 36,5 & 1,43 \times 10^{-5} & 2,4 & 0,025 \\ X_3 & 22,7 & 1,01 \times 10^{-5} & 2,4 & 0,016 \\ X_4 & 12,4 & 0,58 \times 10^{-5} & 2,4 & 0,013 \end{pmatrix}.$$

Определяем итерированную значимость первого порядка для каждой конструкции, результат представим в виде результирующего вектора:

$$Q'_i = \begin{pmatrix} X_1 & 17,45 \times 10^{-5} \\ X_2 & 3,13 \times 10^{-5} \\ X_3 & 0,88 \times 10^{-5} \\ X_4 & 0,22 \times 10^{-5} \end{pmatrix}.$$

Находим весовой критериальный коэффициент для каждой конструкции, результат представим в виде результирующего вектора:

$$q_i = \begin{pmatrix} X_1 & 0,8 \\ X_2 & 0,14 \\ X_3 & 0,04 \\ X_4 & 0,01 \end{pmatrix}.$$

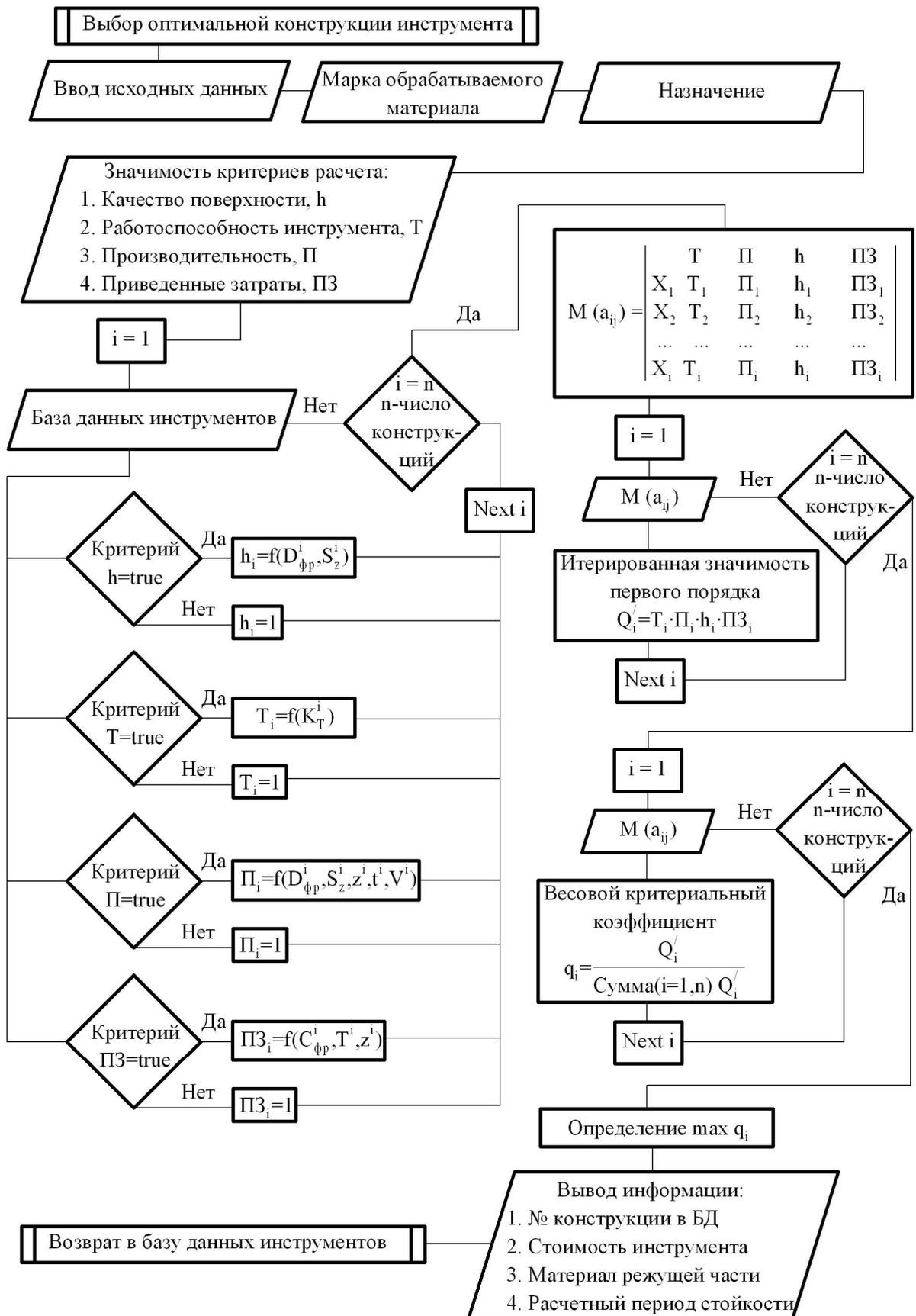


Рисунок 6.8. Алгоритм расчета при работе программного модуля для определения оптимальной конструкции инструмента

По результатам сравнительного анализа максимальное значение весового критериального коэффициента соответствует конструкции  $X_1$ , оснащенной инструментальным материалом марки ВКЗМ и составляет 0,8.

Можно сделать вывод, что наиболее рационально при данных условиях сопоставимости применение конструкции инструмента обозначенной как  $X_1$ , поскольку она имеет наибольшее значение весового критериального коэффициента  $q$ , кроме того, матрица смежности позволяет сделать вывод, что фреза №1, оснащенная сплавом ВКЗМ, превосходит аналоги практически по всем критериям. Наиболее близко к конструкции №1 можно отнести фрезу обозначенную как  $X_2$ , имеющую режущие вставки из твердого сплава ВК8.

Следовательно, в принятых условиях сопоставимости, конструкция  $X_1$  может быть рекомендована для обработки композиционного полимерного материала стеклотекстолит марки СТЭФ-1, вторым по значимости вариантом замены может служить конструктивное решение режущего инструмента  $X_2$ .

Алгоритм расчета коэффициентов, характеризующих инструмент, при работе программного модуля для выявления рационального конструктивного решения инструмента по методике, приведенной во 2 Главе работы, представлен на рис. 6.8.

Для сокращения затрат на составление и хранения базы данных инструмента и проведения сравнительного анализа большего числа конструктивных решений, хранящихся в базе данных, может быть рекомендовано программное обеспечение, включающее функциональные блоки предназначенные для расчета и выбора рациональной конструкции фрезерного сборного инструмента для задаваемых условий производства, описанное подробно в Главе 2.

Применение представленного программного обеспечения на предприятиях, занимающихся обработкой композиционных материалов резанием, позволит снизить время на организационную подготовку режущего инструмента, систематизацию информации и предварительное проектирование новых конструкций, с помощью которого можно оценить рациональность использования инструмента с точки зрения экономичности, работоспособности, производительности и качества

обработки при заданных условиях производства.

#### **6.4. Реализация комбинированной технологии изготовления (восстановления) твердосплавного режущего инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов**

Обеспечение оптимальных рабочих параметров инструмента при минимальных трудозатратах входит в задачи технологической подготовки инструмента для обработки композиционных труднообрабатываемых неметаллических материалов.

Проблемы, возникающие при формообразовании рекомендованных в результате исследований геометрических и параметров инструмента, оснащенного прогрессивными инструментальными материалами, во многом вызваны наличием высокой прочности и хрупкости, которыми обладают твердые сплавы. Однако, в данном случае, дополнительные трудности вызывает обеспечение специфических геометрических параметров инструмента для обработки композиционных материалов (относительно малый, в сравнении с обработкой металлических материалов, угол заострения  $\beta$ ; повышенные требования к остроте режущего лезвия). В результате исследований установлено, что затачивание твердых сплавов традиционными методами не позволяет получить требуемое качество технологической подготовки инструмента. Как отмечалось ранее, основная причина неудовлетворительного качества шлифованной поверхности заключается в потере работоспособности абразивного инструмента вследствие его засаливания [207].

Рациональными методами для качественного формообразования рабочих поверхностей и требуемой геометрии инструмента для обработки композиционных материалов, оснащенного прогрессивными инструментальными материалами являются комбинированные методы электроалмазной обработки [91, 205].

Сравнительный анализ различных методов комбинированной обработки выявил преимущества комбинированного метода электрохимического шлифования с одновременной непрерывной правкой шлифовального круга. Предложена

технология, согласно которой шлифование производится алмазным кругом на металлической связке в среде электролита при одновременном растворении под действием электрического тока, подаваемого на контактные поверхности, наружного слоя обрабатываемой детали и связки круга, обеспечивающая наилучшие показатели качества поверхности и производительности обработки по сравнению с традиционными методами.

Для реализации технологии рекомендуется модернизировать имеющееся на предприятиях заточное оборудование под процессы комбинированной электроалмазной обработки [118].

К примеру, затачивание режущего инструмента рекомендуется проводить на станке модели 3Д642Е, модернизированном под процессы электроалмазного шлифования и отвечающем метрологическим требованиям на проверку показателей, формирующих качество изделий. Модернизация 3Д642Е сводится к следующим мероприятиям:

1. Для создания возможности установления регламентируемой подачи станок снабжён гидроприводом.

2. Для передачи электрической энергии на подвижные части станка производится установка токосъемника на шпиндель заточного станка. Для исключения короткого замыкания шпиндельный узел изолируется от станка посредством установки изолирующих прокладок и втулок.

3. Конструкция источника технологического тока представляет собой типовую компоновку электротехнических устройств.

Конструкция источника технологического тока собрана исходя из следующих требований:

- обеспечение безопасных условий работы;
- удобство эксплуатации и обслуживания;
- минимально занимаемая площадь;
- максимальное использование стандартных и широко используемых комплектующих изделий;
- минимальная стоимость изготовления;

- максимальная технологическая и экономическая эффективность.

Технические характеристики источника технологического тока:

- ток травления (технологический ток) –  $I_{mp} = 0 \dots 20$  А;  $U_{mp} = 0 \dots 12$  В;

- ток правки –  $I_{np} = 0 \dots 50$  А;  $U_{np} = 0 \dots 12$  В;

- ток постоянный.

4. Согласно функциональной схеме затачивания (Рисунок 4.1), технология обработки предусматривает наличие специального устройства правящего катода, конструкция которого должна обеспечить заданную величину зазора между поверхностями круга и катода с возможностью регулировки, подачу электролита в зону правки и безопасность работы.

Предложена конструкция устройства для правки круга при комбинированной электроалмазной обработке, содержащее корпус с катодом, имеющим возможность перемещаться в осевом направлении, согласно устройству, катод выполнен из токопроводящего материала с отверстиями, расположенными в шахматном порядке для равномерной подачи электролита в зону правки алмазного круга, подключенный к источнику постоянного электрического тока с возможностью регулирования положения катода относительно круга регулировочной гайкой и его перемещения за счет давления, создаваемого электролитом [134].

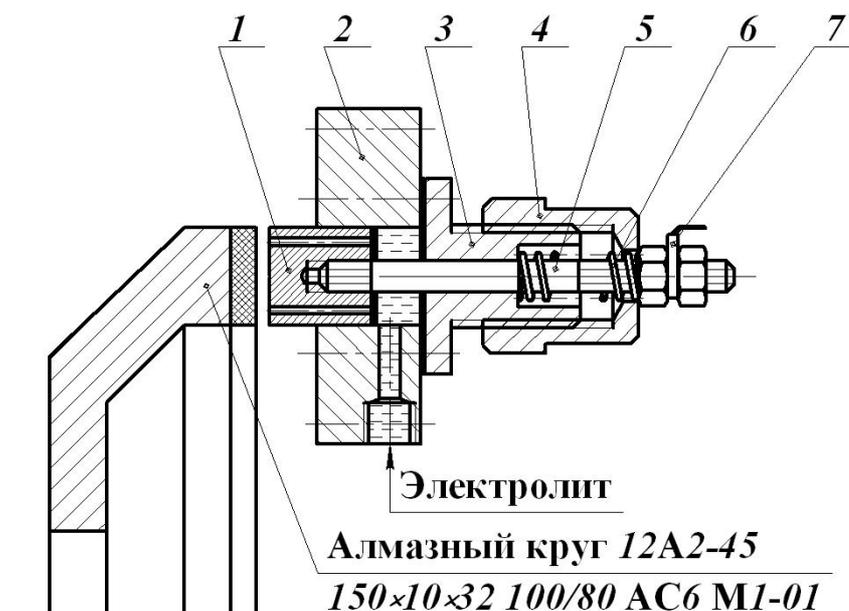


Рисунок 6.9. Конструкция катода для осуществления правки круга

Конструктивное исполнение устройства представлено на Рисунке 6.9. Конструкция содержит катод 1 из токопроводящего материала, поперечное сечение которого имеет форму трапеции. Катод размещен в корпусе 2, не проводящем электрический ток, который имеет отверстия для крепления его на станок, отверстие для подачи электролита и отверстия для крепления направляющей втулки 3, имеющей наружную резьбу для перемещения регулировочной гайки 4 и отверстие для размещения пружины 6.

Для передачи электрического тока катод находится в соединении со штоком 5, который фиксируется пружиной, позволяющей возвращать катод в исходное положение. Подвод электрического тока на шток осуществляется через клемму 7. Рабочее положение катода задается посредством давления, создаваемого электролитом, который подается через отверстие, расположенное в корпусе. При этом электролит проникает через отверстия в катоде и попадает в зону правки алмазного круга.

При подаче электролита создается давление на поверхность катода, перемещающая его в рабочее положение, при этом электролит проникает через отверстия в катоде и попадает в зону правки круга. Электрический ток подается через шток с помощью клеммы. Когда подача электролита прекращается шток вместе с катодом перемещается в исходное положение за счет пружины и процесс правки круга останавливается. Достоинство разработанного катода заключается в том, что он обеспечивает равномерное вскрытие алмазных зерен, поддерживает поверхность круга в рабочем состоянии до конца срока службы. Для исключения разбрызгивания электролита, правящий катод вмонтирован в специальный кожух, который обеспечивает безопасность работы.

5. Для реализации технологии предложено устройство для комбинированной электроалмазной обработки с непрерывной правкой круга [131], содержащее правящий электрод, установленный вне зоны обработки и электрически изолированный от круга и обрабатываемой детали, подключенный совместно с кругом к источнику тока. Устройство содержит дополнительный электрод осаждаемого материала, токосъёмник и регулируемые выпрямители.

Такая конструкция позволяет значительно расширить технологические возможности оборудования, т.к. имеется возможность независимой работы цепей непрерывной правки круга, цепи анодного растворения обрабатываемой поверхности детали и катодного осаждения пленок и твердых смазок на поверхность круга.

По результатам экспериментальных исследований качества формообразования поверхностей инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов, оснащенного прогрессивными инструментальными материалами, сформулированы следующие рекомендации:

1. Затачивание твердых сплавов рекомендуется производить комбинированным методом электроалмазной обработки, устанавливая следующие технологические режимы:

- плотность тока травления детали  $i_{\text{тр}} = 20 \dots 30 \text{ А/см}^2$ ;
- плотность тока правки алмазного круга  $i_{\text{пр}} = 0,2 \dots 0,3 \text{ А/см}^2$ ;
- скорость круга  $V = 25 \dots 35 \text{ м/с}$ ;
- продольная подача  $S_{\text{пр}} = 1,5 \dots 2,0 \text{ м/мин}$ ;
- поперечная подача  $S_{\text{поп}} = 0,02 \dots 0,04 \text{ мм/дв.ход}$ .

2. Для осуществления рекомендуемой технологии затачивания необходимо применять алмазные круги на металлической связке.

Ширина алмазного слоя может колебаться от 10 до 20 мм, а толщина – от 3 до 5 мм. Однако с целью повышения производительности труда и увеличения стойкости каждого круга рекомендуется применять алмазные круги с возможно большими значениями ширины и толщины алмазоносного слоя.

Предпочтительная марка алмазного порошка в круге – АС4, АС6 (старое обозначение АСР, АСВ).

В зависимости от требуемой шероховатости затачиваемой поверхности могут применяться алмазные круги следующих зернистостей:

$$R_a = 0,8 \dots 0,6 \quad 200/160$$

$$R_a = 0,6 \dots 0,5 \quad 160/125$$

$$R_a = 0,5 \dots 0,3 \quad 125/100$$

$$R_a = 0,3 \dots 0,2 \quad 100/80$$

$$R_a = 0,2 \dots 0,1 \quad 80/63; 63/40$$

Оптимальную концентрацию алмазов в шлифовальном круге следует принять 100 % (в обозначении круга может стоять также цифра 4). В предполагаемом технологическом процессе используются только круги на металлических токопроводящих связках. Все они делятся на связки повышенной производительности и повышенной стойкости.

Связки повышенной стойкости используются при необходимости длительного сохранения определенной формы поверхности алмазного круга, например, при профильном шлифовании. Производительность кругов на этих связках, как правило, невелика.

Связки повышенной производительности применяются, когда нет особых требований к точности формы круга. Алмазные круги на этих связках могут работать с высокой производительностью, однако у них наблюдается также и повышенный удельный расход алмазов.

Затачивание твердосплавного инструмента может осуществляться при соблюдении соответствующих режимов металлическими связками обоих типов.

Введение в металлическую связку абразивного наполнителя несколько улучшает режущую способность круга.

Исходя из вышесказанного при работе рекомендуемым методом комбинированной электроалмазной обработки для широкого диапазона обрабатываемых изделий могут применяться алмазные круги типа 12A2-45 150×10×3×40×32 AC6 M1-01 100/80, а также на других видах металлических связок (MO4, MO16, MO13 и др.).

3. Для рациональной реализации технологии в качестве оснастки рекомендуется применять специально спроектированные устройства.

4. Технология предусматривает протекание электрохимических и электрофизических процессов в среде электролита.

Необходимо отметить, что наиболее важными показателями для электролитов являются:

– удельная электропроводность, которая зависит от температуры и концентрации растворенных в нем компонентов. С увеличением концентрации этих компонентов и температуры электропроводность возрастает, а растворение металлов и сплавов ускоряется;

– водородный показатель, характеризующий концентрацию ионов водорода в данном электролите. При электрохимических процессах превышение значения  $pH$  относительно установленного уровня замедляет электролиз и уменьшает производительность. Для растворов солей  $pH = 6 \dots 7$ .

Для составления электролита следует применять следующие химикаты:

- натрий азотнокислый ( $NaNO_3$ );
- натрий азотистокислый ( $NaNO_2$ );
- натрий углекислый ( $Na_2CO_3$ );
- глицерин технический.

Рабочая плотность электролита  $1,03 \dots 1,06 \text{ кг/м}^3$ . При завышенной плотности добавить воды, при заниженной – азотнокислый натрий.

Температура электролита –  $15 \dots 25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

В качестве рабочей жидкости в предлагаемом технологическом процессе рекомендуются стандартные электролиты следующих составов:

1.	2.	3.
$NaNO_3 - 3 \dots 5 \%$	$NaNO_3 - 6 \dots 10 \%$	$NaNO_3 - 7 \%$
$NaNO_2 - 2 \%$	$NaNO_2 - 0,6 \dots 0,8 \%$	$NaNO_2 - 1 \%$
$Na_2CO_3 - 1 \%$	$Na_2CO_3 - 0,4 \dots 0,5 \%$	$H_2O - \text{остальное}$
$H_2O - \text{остальное}$	Глицерин – $0,8 \dots 2,0 \%$	
	$H_2O - \text{остальное}$	

Растворение солей производить последовательно, как указано выше:  $NaNO_3$ ,  $NaNO_2$ ,  $Na_2CO_3$ , глицерин. При растворении азотнокислого натрия температура может понизиться до  $2 \dots 4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Поэтому электролит необходимо либо нагреть, либо выдержать сутки до достижения рабочей температуры.

При работе в электролите происходит накопление шлама в виде гидроокиси железа. Допустимая концентрация шлама  $16 \dots 18 \text{ г/м}^3$ .

После длительного использования электролит вырабатывается и теряет свою работоспособность. Поэтому периодически необходимо восстанавливать концентрацию компонентов в электролите, а через 100...150 часов работы производить его смену.

Кроме рекомендуемых составов электролитов могут быть применены и другие рабочие жидкости, в частности эмульсия Э-3 с 5 %-ной добавкой кальцинированной соды или водный раствор 0,5 %  $Na_2CO_3$  и 1 %  $NaCl$  с добавлением 0,5 %  $NaNO_2$  в качестве ингибитора коррозии. Однако использование этих жидкостей влечет за собой определенное снижение производительности и качества затачивания режущего инструмента.

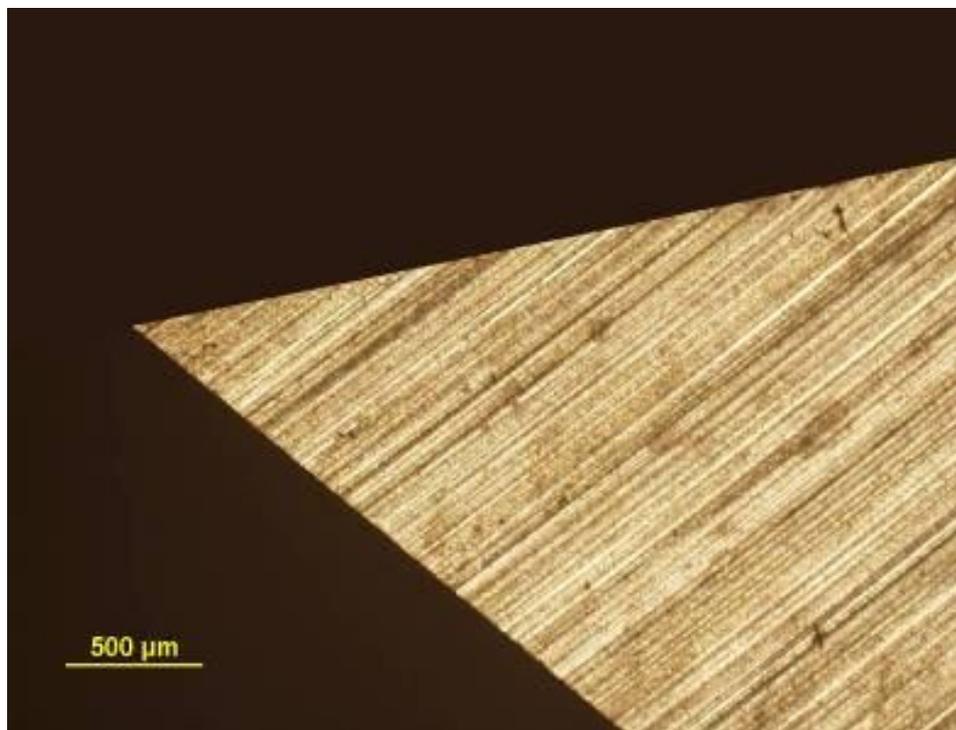


Рисунок 6.10. Состояние режущего клина инструмента для обработки композиционных материалов, оснащенного твердым сплавом марки ВКЗМ после комбинированного электроалмазного затачивания

При подготовке твердосплавного инструмента для обработки композиционных материалов с использованием представленной технологии комбинированного электроалмазного шлифования возможно формирование режущих элементов, имеющих относительно небольшой угол при вершине, с высоким качеством ре-

жущего лезвия и рабочих поверхностей (Рисунки 6.10...6.12).

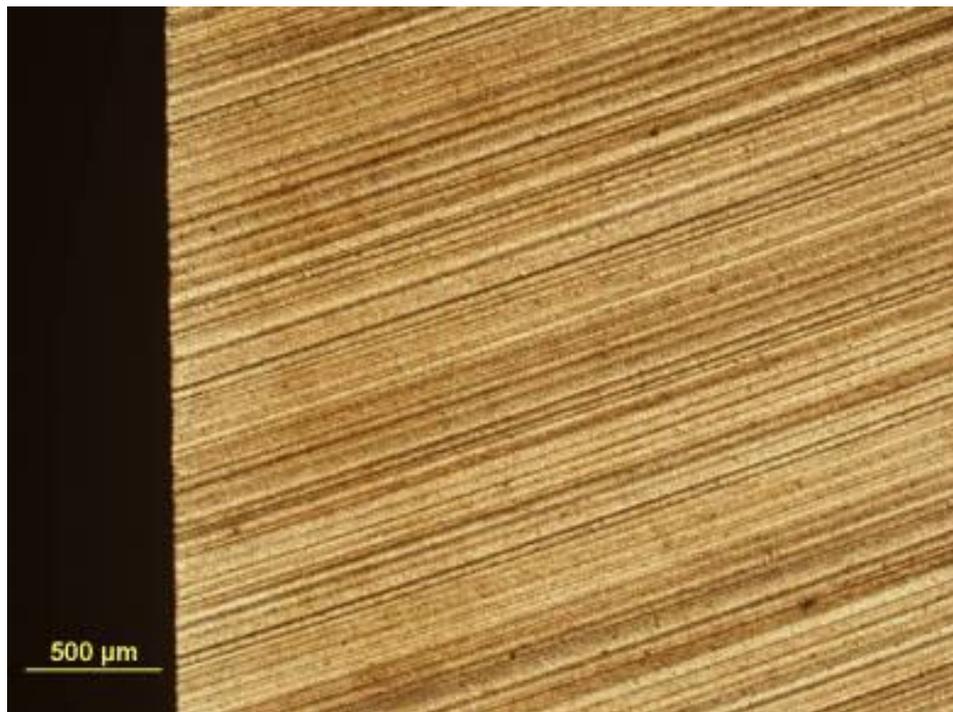


Рисунок 6.11. Передняя поверхность и режущая кромка инструмента (BK3M) после комбинированного электроалмазного затачивания

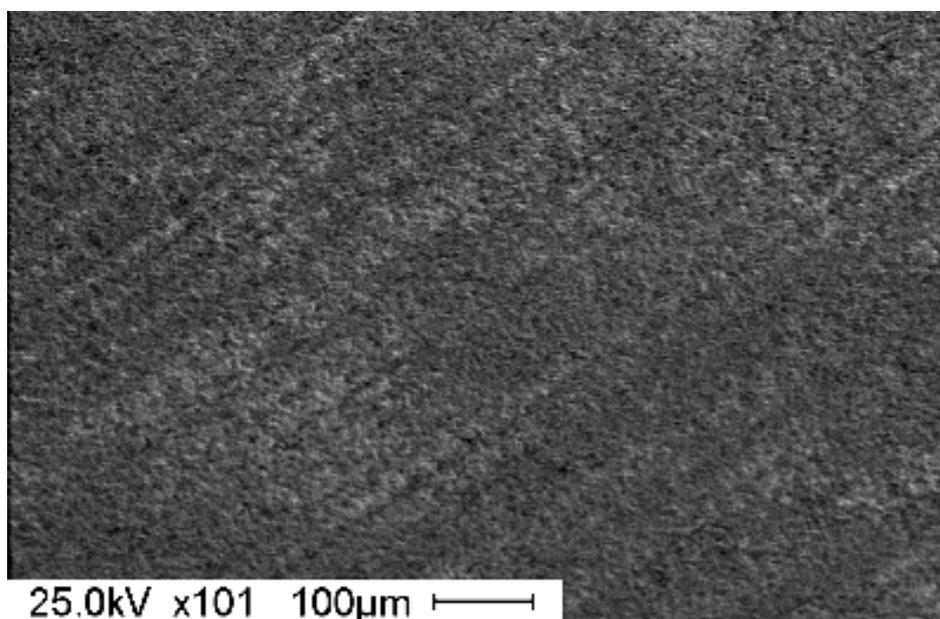


Рисунок 6.12. Состояние передней поверхности инструмента (BK3M) после комбинированного электроалмазного затачивания

Инструмент, подготовленный с учетом представленных рекомендаций, обладает повышенной работоспособностью, улучшает процесс резания, снижая си-

лы и температуру при резании, повышает производительность и качество изготовления изделий из труднообрабатываемых композиционных неметаллических материалов, что позволяет значительно расширить область применения таких материалов в различных отраслях промышленности [93].

### **6.5. Перспективы дальнейшего развития тематики исследования**

Интенсивное развитие индустрии композиционных материалов ведет к созданию новых и совершенствованию существующих видов композитов, не уступающих по своим качествам современным конструкционным материалам, а в каких-то аспектах и значительно превышая их.

В таких отраслях как авиастроение, аэрокосмическая промышленность, судостроение, машиностроение, строительство и мебельная промышленность, нефтегазовая промышленность, энергетика уже используются композиционные материалы, но доля изделий из них мала и, как правило, это детали с минимумом поверхностей, подвергнутых механической обработке резанием. Это связано с проблемами обработки таких материалов лезвийным инструментом. В связи с этим, на наш взгляд, область применения изделий из композиционных материалов с заданным качеством поверхностей, высокой размерной точностью (обеспечение которых возможно на операциях механической обработки) ограничена.

Дальнейшее развитие тематики исследования предполагает изучение обрабатываемости резанием и расширения области использования изделий из широкой гаммы современных российских и зарубежных композиционных материалов: полимерных, древесных, углерод-углеродных, керамических и металлических.

Для эффективной обработки таких материалов потребуются режущий инструмент, обладающий еще более высокими эксплуатационными свойствами. В дальнейших исследованиях планируется изучить особенности, производительность и качество обработки изделий из композиционных материалов инструментом, оснащенным широкой гаммой высокопрочных, износостойких инструментальных материалов, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленно-

стью: твердые сплавы неисследованных марок, металлокерамика, сверхтвердые материалы. Это позволит повысить эксплуатационные свойства инструмента и увеличить эффективность лезвийной обработки композитов.

Формирование режущих элементов из перспективных инструментальных материалов повышенной прочности и износостойкости, со специфическими для обработки композиционных материалов геометрией и микрогеометрией поверхностей, с лезвием высокого качества и остроты, возможно в условиях интенсификации использования современных, постоянно развивающихся комбинированных методов электроалмазной обработки. Потребуется научно – обоснованные рациональные электрические и механические режимы обработки таких инструментальных материалов, совершенствование технологических сред и оснастки для эффективной обработки такими методами. Реализация научных исследований в этой области актуальная и перспективная задача в условиях развития современного машиностроения.

Исследования условий получения качественных режущих элементов комбинированными методами электроалмазной обработки ведут к необходимости создания модели режущего клина инструмента, как в процессе его формирования, так и в процессе обработки им композиционных материалов с учетом всех влияющих факторов, что тоже является перспективой развития тематики исследования. Предложенная в работе физико-математическая модель процессов деформации, повреждения и разрушения твердых композиционных материалов при шлифовании алмазным инструментом, может быть адаптирована для других, в том числе и новых, композиционных высокопрочных и труднообрабатываемых материалов. Появляется возможность оценить напряженно-деформированное состояние при различных сочетаниях абразивного инструмента (вид инструмента, состав, структура, условия эксплуатации и т.д.) и обрабатываемых композиционных материалов (состав, размеры карбидов, виды и процентное содержание связующего).

Для получения изделий из композиционных материалов с гарантированным качеством и размерной точностью изготовленных поверхностей необходим инст-

румент, обладающий высокой размерной стабильностью, повышенной надежностью в сочетании с возможностью варьировать геометрические параметры инструмента и менять инструментальный материал в зависимости от вида обрабатываемого материала. Таким запросам в полной мере отвечают сборные конструкции инструмента, новые конструктивные решения которого, с учетом возрастающих требований к инструменту и новейших достижений в области их создания, могут быть созданы в рамках дальнейших исследований.

Методика моделирования сборного инструмента для обработки композиционных материалов, представленная в работе на примере одного из видов инструмента – фрезерного, в результате дальнейших исследований может быть адаптирована под любые другие виды сборных инструментов. Такой подход позволит оценить и систематизировать все виды сборного режущего инструмента, имеющегося в распоряжении предприятий, занимающихся обработкой изделий из композиционных материалов. Эти шаги послужат расширению возможностей методик, представленных в работе, и созданного на их основе программного обеспечения для формирования, хранения и использования информационных баз данных по всем видам сборного инструмента на подобных предприятиях. Кроме того, такие мероприятия значительно автоматизируют работу инструментальных складов на предприятиях любой отрасли промышленности, где реализована лезвийная обработка изделий сборным инструментом.

Для более детальной оценки конструкции режущего инструмента и выявления рационального для задаваемых условий производства инструмента целесообразно введение в представленную в работе методику большего числа факторов и характеристик, влияющих на выбор. Это позволит реагировать на вероятностные изменения в условиях и методах обработки, легче и быстрее переходить на изготовление изделий разной номенклатуры и типоразмеров на любом виде технологического оборудования. Такое совершенствование методик приведет и к переработке уже имеющегося (представленного в работе) единого программного комплекса для составления, хранения базы данных сборного инструмента, имеющегося в распоряжении предприятий с дополнительной возможностью выбора инст-

румента для различных операций механической обработки изделий из композиционных материалов. Подобный подход в дальнейшем позволит значительно автоматизировать работу технологов на предприятиях и повысить гибкость производства и, как следствие, значительно сократить сроки освоения новой продукции.

Кроме того, становится актуальной задача исследования помимо плоского и фасонного фрезерования композиционных материалов, отмеченных в работе, и других операций механической обработки: сверление, зенкерование, развертывание, внутреннее и наружное точение и т.д. Это даст возможность оптимизировать процессы получения изделий любой конфигурации с плоскими, цилиндрическими, коническими, фасонными поверхностями, что значительно расширит область применения изделий из композиционных материалов. Появится необходимость определения рациональных научно - обоснованных режимов обработки, гарантирующих необходимое качество изделий из композитов, на различных операциях механической обработки, создания математических моделей, характеризующих эти процессы, для возможности прогнозирования параметров, характеризующих обработку в различных условиях.

Схематичное представление перспектив дальнейших исследований изображено на рис. 6.13.

Таким образом, система предполагаемых дальнейших научных изысканий в области подготовки инструментального обеспечения на предприятиях, занимающихся изготовлением продукции из композиционных материалов, дает возможность повысить производительность, рентабельность производства, качество и конкурентоспособность продукции, создать новые рабочие места на предприятиях, поднять на ступень выше научный уровень отечественной промышленности.

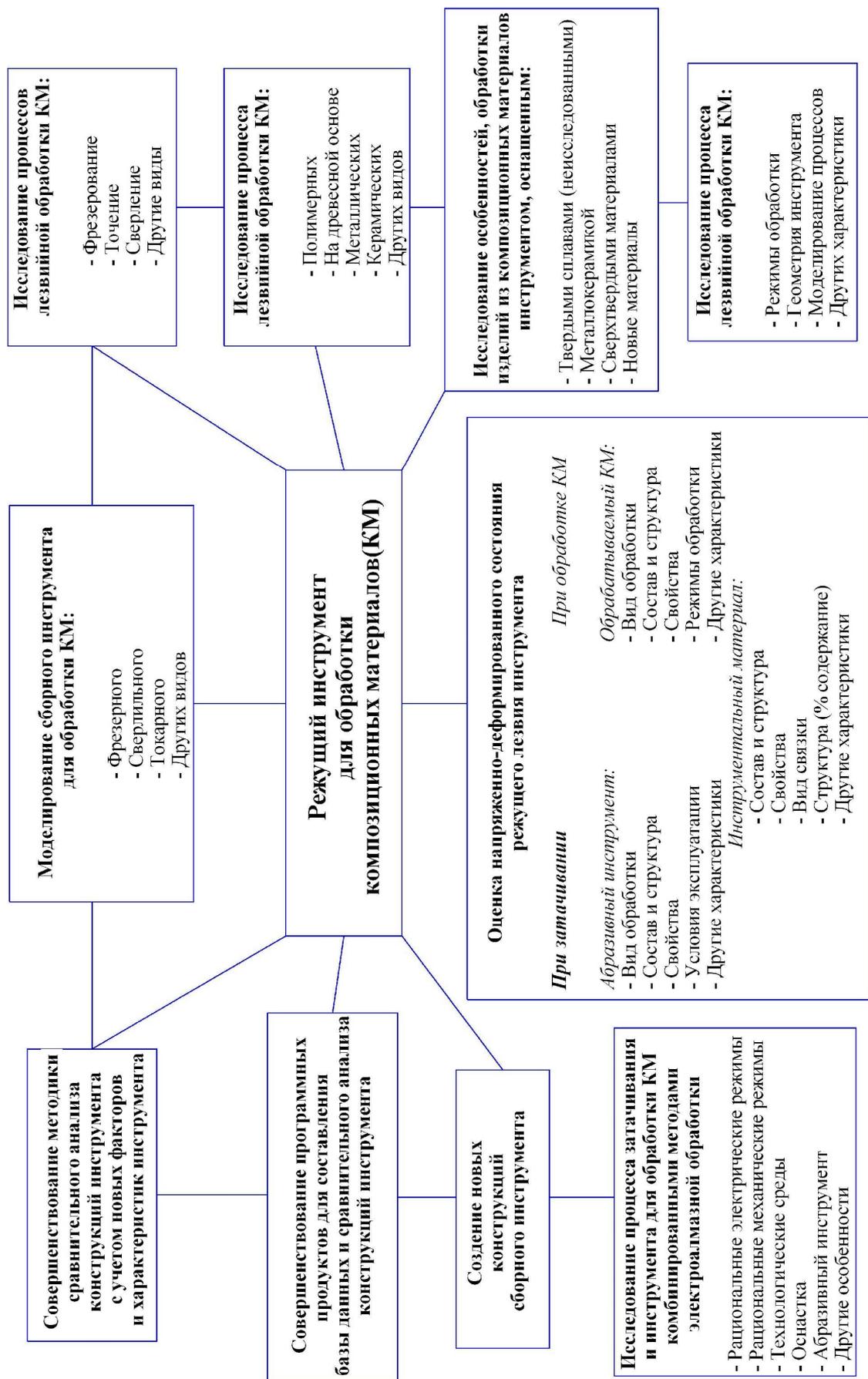


Рисунок 6.13. Перспективы развития тематики исследований

## Выводы по 6 главе:

С целью повышения эффективности фрезерной обработки композиционных материалов предлагается комплекс мероприятий направленный на повышение работоспособности режущего инструмента и критериального анализа конструктивных решений, включающий в себя:

1. Для обработки композиционных неметаллических материалов рекомендуется использовать сборные конструкции инструмента, позволяющие увеличить его технологические возможности и повысить адаптивность при изменяющихся условиях обработки; снизить расход инструментальных материалов и простои, связанные с переналадкой инструмента и его заменой при потере режущей способности. В качестве примеров предложены новые конструктивные решения инструментов, обладающие большей надежностью и точностью в сравнении с известными конструкциями, что положительно сказывается на качестве выпускаемой продукции.

2. С целью повышения эффективности механической обработки композиционных неметаллических материалов необходимо оснащать режущий инструмент прогрессивными инструментальными материалами. В частности, по результатам исследований эффективности применения различных марок инструментальных материалов в конструкциях инструмента для обработки композиционных материалов, наибольший экономический эффект достигается при применении твердого сплава марки ВКЗМ.

3. Для принятия обоснованных конструктивных и технологических решения по используемым на производстве конструкциям режущих инструментов, целесообразно использовать методику моделирования сборного фрезерного инструмента, пример применения которой представлен в главе. Это позволит математически описать конструктивные решения инструментов, что послужит основой для создания базы данных и систематизации сборного режущего инструмента, а также даст возможность использовать внесенные в базу данные для сравнительного анализа конструкций при варьируемых условиях сопоставимости.

3. Для автоматизации подготовки инструмента для обработки композиционных материалов рекомендуется рациональное применение специализированного программного обеспечения для создания базы данных сборного инструмента и его обоснованного выбора при варьируемых производственных условиях. Программные продукты реализуют методики моделирования инструмента и выбора инструмента, представленные ранее.

4. Для получения рациональной работоспособности инструмента и удовлетворительного качества обработанной поверхности без значительных потерь производительности рекомендуется устанавливать геометрические характеристики инструмента, режимы обработки композиционных материалов и марки инструментальных материалов для оснащения инструмента согласно представленным в работе рекомендациям.

5. Для реализации технологии комбинированного электрохимического шлифования с одновременной непрерывной правкой шлифовального круга, рекомендованной для формообразования режущей части инструментов для обработки композиционных материалов, рекомендуется модернизировать имеющееся на предприятиях заточное оборудование под процессы комбинированной электроалмазной обработки.

6. Рациональная реализация предложенной технологии, ориентированная на обеспечение высокого качества режущих элементов инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов, оснащенного прогрессивными инструментальными материалами, возможна при соблюдении представленных в работе рекомендаций по выбору технологических режимов обработки, абразивного инструмента, специальной оснастки, технологических сред.

7. Научно-обоснованные теоретические изыскания и практические разработки, представленные в работе, имеют перспективы для дальнейшего расширения тематики исследований:

- изучение обрабатываемости резанием и расширения области использования изделий из широкой гаммы современных российских и зарубежных композиционных материалов;

- исследование процессов лезвийной обработки композиционных материалов на различных операциях: фрезерование, сверление, зенкерование, развертывание, внутреннее и наружное точение и т.д.;

- совершенствование методики моделирования сборного инструмента с учетом особенностей других видов режущего инструмента для обработки композиционных материалов;

- проектирование новых конструктивных решений сборного инструмента для обработки композиционных материалов;

- исследование особенностей обработки изделий из композиционных материалов инструментом, оснащенным широкой гаммой высокопрочных, износостойких инструментальных материалов, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью;

- исследование и разработка комбинированных методов электроалмазной обработки, определение научно – обоснованных рациональных электрических и механических режимов обработки таких современных инструментальных материалов, совершенствование технологических сред и оснастки для эффективной обработки такими методами;

- создание физических и математических моделей режущего лезвия инструмента, как в процессе его формирования, так и в процессе обработки им композиционных материалов с учетом всех влияющих факторов;

- совершенствование методики оценки конструкции режущего инструмента и выявления рационального для варьируемых условий сопоставления с учетом большего числа факторов и характеристик, влияющих на выбор;

- разработка новых программных продуктов для автоматизации инструментального обеспечения обработки композиционных материалов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В представленной научно-квалификационной работе изложен комплекс научно обоснованных технических и технологических решений, позволяющих повысить эффективность механической обработки композиционных материалов и расширить область применения изделий из них, за счет повышения работоспособности режущего инструмента. Внедрение предложенных мероприятий вносит значительный вклад в развитие экономики страны.

2. Теоретические положения и научно-обоснованная методология моделирования сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов и систематизации режущего инструмента определили характер структурных связей в системе инструмента и дали возможность математически описать его конструктивные и геометрические особенности. Разработанные программные продукты для систематизации номенклатуры сборного фрезерного инструмента для обработки изделий из композиционных материалов, значительно сократили время на поиск и обработку информации по конструктивным решениям инструмента, упростили процесс составления, редактирования и хранения базы данных инструментов, автоматизировали работу конструкторов и технологов.

3. Предложена методика многокритериального сравнительного анализа конструктивных решений инструмента для выбора рациональной конструкции при варьируемых условиях сопоставимости. Создан программный комплекс для формирования базы данных сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов и выбора рациональной конструкции в одном программном приложении. Программное обеспечение направлено на систематизацию инструмента и выявление оптимальной конструкции режущего инструмента с учетом физико-механических свойств инструментального и обрабатываемого материалов, а также накопленной в результате научных исследований базы знаний, характеризующей процессы обработки лезвийным инструментом различных видов композиционных неметаллических материалов.

4. Спроектированы новые конструкции сборного фрезерного инструмен-

та, увеличивающие его технологические возможности, снижающие расход инструментальных материалов, простои, связанные с переналадкой инструмента и его заменой при потере режущей способности и отличающиеся повышенной точностью, надежностью и эффективностью при обработке композиционных материалов. По результатам исследований эффективности применения различных марок инструментальных материалов в конструкциях режущего инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов установлено, что наибольший экономический эффект достигается при применении твердого сплава марки ВКЗМ. Эффективность в сравнении с другими исследованными марками инструментальных твердых сплавов выше в 1,5...2 раза.

5. На основе экспериментального исследования применяемых на сегодняшний день методов и условий изготовления (восстановления) твердосплавного инструмента для обработки композиционных материалов выявлены недостатки традиционных методов формообразования режущего лезвия инструмента. В рамках подхода механики повреждаемых сред разработана физико-математическая модель процессов деформации, повреждения и разрушения инструментальных материалов типа *WC-Co* при алмазном затачивании. Модель без затруднений адаптируется и для других высокопрочных и труднообрабатываемых инструментальных материалов. Реализована возможность оценки формирующегося при алмазном затачивании напряженно-деформированного состояния в обрабатываемой твердосплавной пластине с характерными для обработки композиционных неметаллических материалов размерными и геометрическими параметрами; при различных сочетаниях абразивного инструмента и обрабатываемых инструментальных материалов; разных скоростях и силах резания; в условиях изменения температур в зоне резания. Анализ численного моделирования выявил, что для эффективного затачивания твердосплавного режущего инструмента при обработке композиционных материалов рекомендованы комбинированные методы электроалмазного шлифования.

6. С использованием оптической, растровой электронной, сканирующей зондовой микроскопии, оптической интерферометрии исследовано качество по-

верхностей и режущей кромки твердосплавных инструментов, заточенных различными методами электроалмазной обработки. Установлены закономерности влияния комбинированных методов электроалмазной обработки на экономические и качественные параметры обработки. Выявлены преимущества комбинированного метода электрохимического шлифования с одновременной непрерывной правкой шлифовального круга при изготовлении (восстановлении) твердосплавного режущего инструмента для обработки композиционных материалов. Комбинированное воздействие абразивного резания и анодного растворения обработанной поверхности позволяет улучшить качество обработанных поверхностей и режущей кромки в среднем на 40...60 %, добиться снижения мощности резания в 1,5...2 раза и удельного расхода алмазного круга до 30 %. С целью реализации предлагаемой технологии разработаны новые конструктивные решения оснастки, рекомендации по модернизации технологического оборудования под процессы комбинированной электроалмазной обработки, выбору абразивного инструмента и технологических сред для повышения эффективности изготовления (восстановления) твердосплавного инструмента для обработки композиционных материалов на предприятиях различных отраслей. Рациональные технологические режимы, позволяющие эффективно, с гарантированным качеством производить затачивание твердосплавных режущих инструментов для обработки композиционных материалов комбинированным методом электроалмазной обработки следующие: плотность тока травления заготовки  $i_{mp} = 20...30 \text{ А/см}^2$ ; плотность тока правки алмазного круга  $i_{np} = 0,2...0,3 \text{ А/см}^2$ ; скорость круга  $V = 25...35 \text{ м/с}$ ; продольная подача  $S_{np} = 1,5...2,0 \text{ м/мин}$ ; поперечная подача  $S_{non} = 0,02...0,04 \text{ мм/дв.ход}$ .

7. Установлено, что для достижения высоких качественных показателей обработанных поверхностей из композиционных неметаллических материалов необходимо стремиться к повышению скорости резания и уменьшению величины угла при вершине режущего элемента. Геометрические характеристики инструмента рекомендовано устанавливать в пределах: для обработки композиционных материалов на древесной основе (передний угол  $\gamma = 20...25^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 10...15^\circ$ ; угол заострения  $\beta = 55...60^\circ$ ); для обработки полимерных композицион-

ных материалов (передний угол  $\gamma = 15 \dots 20^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 10 \dots 15^\circ$ ; угол заострения  $\beta = 55 \dots 60^\circ$ ). Для достижения высоких качественных показателей обработанных поверхностей изделий из композиционных неметаллических материалов рекомендованы следующие режимы резания: для обработки композиционных материалов на древесной основе (подача на зуб  $S_z = 0,10 \dots 0,15$  мм/зуб; глубина резания  $t = 0,5 \dots 1$  мм); для обработки полимерных композиционных материалов (подача на зуб  $S_z = 0,15 \dots 0,17$  мм/зуб; глубина резания  $t = 0,5 \dots 0,6$  мм) при максимально позволяемых технологическим оборудованием скоростях резания.

8. Техническая новизна разработанных на основе результатов проведенных исследований конструкций инструментов, оснастки и технологических процессов подтверждена 8 патентами РФ и свидетельствами на регистрацию программ для ЭВМ. Результаты работы прошли апробацию на промышленных предприятиях в различных регионах Российской Федерации. Экономический эффект от внедрения результатов исследований составляет более 1,5 млн. руб.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразумов, В.В. Износостойкость режущего инструмента при обработке композиционных материалов на древесной основе: автореф. ... д-ра техн. наук. – М., 2009. – 34 с.
2. Абрамов, Ю.А. Применение информационно-поисковой системы САПР для изготовления специального режущего инструмента / Ю.А. Абрамов, Ю.Б. Сажин // Известия вузов. – М.: Машиностроение. – 1985. – № 8. – С. 111–114.
3. Амалицкий, В.В. Исследование режущих свойств керамики при фрезеровании ЦСП / В.В. Амалицкий, В.В. Абразумов, Т.Д. Квачадзе. Процессы резания, оборудование и автоматизация в деревообработке: сб. науч. тр. Вып. 236. – М.: МЛТИ, 1991. – С. 5–10.
4. Артамонов, Е.В. Напряженно-деформированное состояние и прочность режущих элементов инструментов / Е.В. Артамонов, И.А. Ефимович, Н.И. Смолин, М.Х. Утешев / Под ред. М.Х. Утешева. – М.: ООО «Недра:Бизнесцентр», 2001. – 199 с.: ил.
5. Артамонов, Е.В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – 192 с.
6. Артамонов, Е.В. Расчет и проектирование сменных режущих пластин и сборных инструментов / Е.В. Артамонов, Т.Е. Помигалова, М.Х. Утешев; под общей ред. М.Х. Утешева. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2011. – 152 с.
7. Андреев, В.Н. Совершенствование режущего инструмента/ В.Н. Андреев. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.
8. Баранчиков, В.И. Обработка специальных материалов в машиностроении: Справочник. Библиотека технолога / В.И. Баранчиков, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов. – М.: Машиностроение, 2002. – 264 с.
9. Баранчиков, В.И. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания материалов: справочник / В.И. Баранчиков. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.: ил.

10. Башков, В.М. Испытания режущего инструмента на стойкость / В.М. Башков, П.Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1985. – 136 с.
11. Бекташов, Д.А. Повышение надежности и работоспособности минералокерамического режущего инструмента путем совершенствования износостойких покрытий: автореф. ... канд. техн. наук / Д.А. Бекташов. – Иваново, 2002.
12. Белых, А.В. Визуальный метод разработки объектно-ориентированных баз данных для систем автоматизированного проектирования: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Ростов на Дону, 2010. – 23 с.
13. Бердник, В.В. Электроабразивное шлифование / В.В. Бердник, А.В. Мамай. – Киев: Техника, 1981. – 64 с.
14. Бирюков, В.И. Новый импульс к развитию российского производства древесных плит / В.И. Бирюков *Деревообрабатывающая промышленность: научно-технический экономический и производственный журнал*, под ред. В.Д. Соломонова, №6, 2008. – 110 с., С. 2 – 8.
15. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
16. Булгаев, А.М. Совершенствование конструктивно-технологических методов повышения износостойкости инструментов для обработки неметаллических материалов: автореф. ... канд. техн. наук. – М., 2002.
17. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов / И.М. Буланов, В.В. Воробей. – М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.
18. Варданян, Г.С. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности / Г.С. Варданян, В.И. Андреев, Н.М. Атаров, А.А. Горшков; Под ред. Г.С. Варданяна. – М.: АСВ, 1995. – 568с.
19. Васильев, В.В. Композиционные материалы: справочник / под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.
20. Васин, С.А. Резание материалов: термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер – М.:

Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 448 с.: ил.

21. Веселов, А.И. Повышение эффективности проектирования сборных фрез для обработки поверхностей сложного профиля на основе математического моделирования: дис. ... канд. техн. наук / А.И. Веселов. – М., 2000. – 243 с.
22. Вигдорович, А.И. Древесные композиционные материалы в машиностроении: Справочник / А.И. Вигдорович, Г.В. Сагалаев, А.А. Поздняков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1991. – 233с.
23. Гаевой, А.П. Разработка метода компьютерного проектирования рабочей части инструментов с винтовыми стружечными канавками: дис. ... канд. техн. наук / А.П. Гаевой. – М., 2000.
24. Гапонкин, В.А. Обработка резанием. Металлорежущий инструмент и станки / В.А. Гапонкин. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.
25. Гладкий, Я.Н. Научно-прикладные основы повышения износостойкости инструментальных материалов путем использования прогрессивных технологий: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук - Хмельницкий, 1998 - 37 с.
26. Голоденко, Б.А. Организация целенаправленного формирования новых методов комбинированной обработки / Б.А. Голоденко, В.П. Смоленцев // Вестник машиностроения. – 1994. – № 4. – С. 25–28.
27. Горбачев, Д.В. Оптимизация параметров системы инструментального обеспечения автоматизированных станочных систем в единичном и мелкосерийном производстве: Дисс. ... канд. техн. наук. – Москва, 2005. – 167 с.
28. Гордон, М.Б. Роль физико-химических процессов при резании материалов / М.Б. Гордон // Теория трения, смазки и обрабатываемости металлов. Чув. ун-т. – Чебоксары, 1981. – С. 3–11.
29. Гордон, М.Б. Непрерывная электрохимическая правка алмазных кругов на металлической связке / М.Б. Гордон, В.И. Федяров, А.С. Янющкин и др. // Технология автомобилестроения. – 1976. – №4 (39). – С. 27–29.
30. Горохов, А.А. Методика проектирования и изготовления сборных дисковых фрез на основе математического моделирования: дис. ... канд. техн. наук /А.А. Горохов. – Курск, 2000. – 198 с.

31. Грановский, Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
32. Гречишников, В.А. Проектирование режущих инструментов / В.А. Гречишников, С.Н. Григорьев, И.А. Коротков, А.Г. Схиртладзе. – 2-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: ТНТ, 2010. – 300 с.
33. Григорьев, С.Н. Повышение надежности режущего инструмента путем комплексной ионно-плазменной поверхностной обработки: Дисс. ... доктора технических наук. - Москва, 1995. - 497 с. ил.
34. Гроссман, Ф. Разработка композиций на основе ПВХ / Под ред. Ф. Гроссмана; Пер. с англ. В.В. Гузеева – М.: Машиностроение, 2009. – 608 с.
35. Грубе, А.Э. Дереворежущие инструменты / А.Э. Грубе. – М.: Лесная промышленность, 2001. – 472 с.
36. Дальский, А.М. Технология конструкционных материалов / А.М. Дальский, Т.М. Барсукова, А.Ф. Вязов и др. – М.: Машиностроение, 2005. – 592 с.
37. Деренговский, А.Г. Напряженно-деформированное состояние линейно-упругого материала в окрестности вершины остроугольного концентратора напряжений: Дисс. ... канд. техн. наук. – Орел, 2007. – 196 с.
38. Дибнер, Л.Г. Справочник молодого заточника металлорежущего инструмента. – М., 1990. – 208 с.
39. Долгов, Д.В. Повышение качества управления инструментальным обеспечением машиностроительного производства: Дисс. ... канд. техн. наук - Тула, 2002 - 171 с.
40. Домбрачев, А.Н. Разработка автоматизированной системы определения сложности и прогнозной трудоемкости изготовления деталей инструментального производства: Дисс. ... канд. техн. наук. – Ижевск, 2005. – 128 с.
41. Древаль, А.Е. Повышение эффективности эксплуатации инструментов на основе исследований и разработки методов оценки их надежности: дис. ... д-ра техн. наук / А.Е. Древаль. – М., 1994. – 435 с.
42. Дубов, Ю.А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем / Ю.А. Дубов. – М.: Наука, 1986. – 294 с.

43. Дубовый, В.К. Свойства листовых композиционных материалов на основе стеклянных волокон / В.К. Дубовый, Л.Ю. Фокина, А.Д. Иваненко, В.В. Богданов *Деревообрабатывающая промышленность: научно-технический экономический и производственный журнал*, под ред. В.Д. Соломонова, № 2, 2008. – 110 с., С. 96 – 99.
44. Евдокимов, Ю.А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесников, А.И. Тетерин. – М.: Наука, 1980. – 228 с.
45. Елисеев, О.Н. Повышение эффективности гибких производственных систем путем определения рациональной структуры подсистемы инструментального обеспечения: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук - Москва, 1992 - 24 с.
46. Емельянов, С.Г. Графовые модели конструирования и изготовления сборных дисковых фрез / С.Г. Емельянов, В.В. Куй // *СТИН*. – 1999. – №5. – С. 20–22.
47. Ереско, С.П. Математическое моделирование, автоматизация проектирования и конструирование уплотнений подвижных соединений механических систем: монография. – М.: Изд-во ИАП РАН, 2003. – 156 с.
48. Захаренко, И.П. Алмазная заточка твердосплавного инструмента / И.П. Захаренко, А.А. Шмелев. – Киев: Наукова думка, 1978. – 218 с.
49. Захаренко, И.П. Исследование различных способов алмазно-электрохимического совместного шлифования твердого сплава и стали / И.П. Захаренко, Ю.Я. Савченко // *Электрофизические и электрохимические методы обработки*. – 1973. – № 3. – С. 5–7.
50. Зотов, Г.А. Повышение стойкости дереворежущего инструмента / Г.А. Зотов, Е.А. Памфилов. – М.: Экология, 1991. – 295 с.
51. Зотов, Г.А. Станочный дереворежущий инструмент (практические рекомендации) / Г.А. Зотов. – М.: Лесная промышленность, 2005. – 312 с.
52. Зыков, А.А. Основы теории графов / А.А. Зыков. – М.: Наука, 1987. – 384 с.
53. Иванов, В.В. Программный комплекс T-FLEX Технология 10 / САПР и графика. 2006. №9. С. 44 – 47.

54. Илясов, В.В. Физико-химические основы создания новых твердых и сверхтвердых инструментальных материалов: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук - Ростов-на-Дону, 2000 - 52 с.
55. Ипполитов, Г.М. Абразивно-алмазная обработка/ Г.М. Ипполитов. – М.: Машиностроение, 1969. – 334 с.
56. Кабалдин, Ю.Г. Принципы конструирования композиционных и инструментальных материалов с повышенной работоспособностью / Ю.Г. Кабалдин. – Владивосток: Изд-во института машиноведения и металлургии, 1990. – 58 с.
57. Каменев, Е.М. Система автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства АДЕМ-VX / САПР и графика. 2007. №12. С. 14 – 19.
58. Капустин, Н.М. Комплексная автоматизация в машиностроении / Н.М. Капустин, П.М. Кузнецов, Н.П. Дьяконова; Под ред. Н.М. Капустина. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 368 с.
59. Касперчик, А.Н. Разработка и исследование централизованного функционального контроля инструментального обеспечения многономенклатурного производства: Дисс. ... канд. техн. наук. – Москва, 2002. – 187 с.
60. Квачадзе, Т.Д. Оптимизация процесса фрезерования цементостружечных плит: дис. ... канд. техн. наук / Т.Д. Квачадзе. – М., 1991. – 192 с.
61. Киров, В.А. Рациональная начальная микрогеометрия лезвий дереворежущих фрез и ее технологическое обеспечение: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Киров. – М., 1984. – 198 с.
62. Киселев, Е.С. Теплофизика правки шлифовальных кругов с применением СОЖ / Е.С. Киселев. – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – 171 с.
63. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М. ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.
64. Ковалевский, С.В. Исследование технологических возможностей применения прогрессивного режущего инструмента / С.В. Ковалевский, Д.В. Лобанов, А.Ф. Покидько // Нейросетевые технологии и их применение: сб. тр.

- VII Междунар. науч. конф. – Краматорск: ДГМА, 2009. – 208. – С. 72–77.
65. Ковалевский, С.В. Применение ANSYS для моделирования тепловых полей при электроимпульсной обработке резанием / С.В. Ковалевский, В.И. Тулупов, С.Л. Миранцов, В.С. Доценко, Д.В. Лобанов // Нейросетевые технологии и их применение: сборник трудов VII международной научной конференции. – Краматорск: ДГМА, 2009. – С.37-40.
66. Кожевников, Д.В. Режущий инструмент / Д.В. Кожевников, В.А. Гречишников, С.В. Кирсанов, В.И. Кокарев, А.Г. Схиртладзе. – М.: Машиностроение, 2005. – 528 с.
67. Кожин, П.Б. Разработка программного обеспечения САПР средств управления проектом на основе теории графов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Москва, 2009. – 24 с.
68. Кондаков, А.И. САПР технологических процессов – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 272 с.
69. Коневцов, Л.А. Повышение работоспособности режущего инструмента из вольфрамсодержащих твёрдых сплавов электроискровым легированием металлами и боридами: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук - Комсомольск-на-Амуре, 2009 - 23 с.
70. Коняшкин, В.И. Фрезерование древесностружечных плит и древесины с применением ножей с поверхностным покрытием из нитрида титана: дис. ... канд. техн. наук / В.И. Коняшкин. – М., 1989. – 212 с.
71. Коротовских, В.К. Повышение производительности и качества заточки твердосплавного напайного инструмента за счет оснащения операции высокоэффективными алмазными кругами: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук - Курган, 1996 - 20 с.
72. Корчак, С.Н. Системы автоматизированного проектирования технологических процессов, приспособлений и режущих инструментов / С.Н. Корчак, А.А. Кошин, А.Г. Ракович, Б.И. Сеницын; Под общ. ред. С.Н. Корчака. – М.: Машиностроение, 1988. – 352 с.
73. Корытов, В.Н. Повышение эффективности механообрабатывающего произ-

- водства на основе комплексного анализа технологических и организационных факторов: Автореф. дисс. ... канд. Техн. наук. - Рыбинск, 2004 – 24 с.
74. Косилова, А.Г. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерикова. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.
75. Костецкий, Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, А.К. Караулов и др. Под ред. д-ра техн. наук Костецкого Б.И. – Киев: «Техніка», 1976. – 296с.
76. Костюк, И.В. Интеллектуальная поддержка автоматизированной системы управления инструментообеспечением на машиностроительном предприятии: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Набережные Челны, 2009. – 17 с.
77. Кравченко, Ю.А. Разработка и исследование алгоритмов функционирования подсистем САПР оптимизации выбора конструкционных композиционных материалов по критериям прочности: Дисс. ... канд. техн. наук. – Таганрог, 2001. – 142 с.
78. Кранощеков, П.С. Принципы построения моделей / П.С. Кранощеков, А.А. Петров. – М.: МГУ, 1983. – 264 с.
79. Кугультинов, С.Д. Технология обработки конструкционных материалов / С.Д. Кугультинов, А.К. Ковальчук, И.И. Портнов – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э Баумана, 2008. – 672 с.
80. Кузнецов, А.М. Повышение эффективности фрезерования композиционных древесных материалов мелкозернистым твёрдосплавным инструментом: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2009. – 20 с.
81. Кунву Ли. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) (Principles of CAD/CAM/CAE Systems) – СПб.: Издательство «Питер», 2004. – 560 с.
82. Лобанов, Д.В. Автоматизация процесса создания баз данных сборного фрезерного инструмента / Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков: Механики XXI века. VI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. – 338 с., С. 327 – 331.
83. Лобанов, Д.В. Автоматизация процесса создания баз данных сборного фре-

- зерного инструмента / Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Механики – XXI века. VI Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. – С. 327-331.
84. Лобанов, Д.В. Автоматизация процесса создания баз данных сборного фрезерного инструмента / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков // Наука. Технологии. Инновации // Материалы Всерос. науч. конф. молодых ученых в 7 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – Ч. 3. – С. 33–36.
85. Лобанов, Д.В. Автоматизированная система создания баз данных и многокритериального сравнительного анализа конструкций сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков // САПР и графика. 2011 - № 3 – С. 71 – 73.
86. Лобанов, Д.В. Анализ конструктивных решений фрезерного сборного инструмента для обработки композиционных материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин // Технология машиностроения. 2011 - № 5 – С. 20 – 25.
87. Лобанов, Д.В. Влияние методов затачивания на качество твердосплавного инструмента используемого для обработки композиционных неметаллических материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин // Вестник машиностроения. 2011 - № 3 – С. 50 – 53.
88. Лобанов, Д.В. Использование метода графов при моделировании конструкций сборного дереворежущего инструмента / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, И.Н. Самусев // Труды Братского гос. техн. ун-та. – Т. 2. – Братск: ГОУ ВПО «БрГТУ», 2003. – (Естественные и инженерные науки – развитию регионов). – С. 91–95.
89. Лобанов, Д.В. Керамические нанокompозиты на основе диборида циркония / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Е.Г. Скрипняк, В.В. Скрипняк, В.А. Скрипняк, Д.А. Рычков // Системы. Методы. Технологии. 2011. - № 2 (10). – С. 95 – 98.
90. Лобанов, Д.В. Методика выбора оптимальной конструкции инструмента для заданных условий производства / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, К.В. Сопин // Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. / под ред.

- Е.А.Памфилова. – Вып. 3. – Брянск: БГИТА, 2004. – 120 с.
91. Лобанов, Д.В. Недостатки традиционных методов затачивания твердосплавного инструмента и пути их совершенствования / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, А.М. Кузнецов // Труды Братского гос. техн. ун-та. – Т. 2. – Братск: ГОУВПО «БрГТУ», 2004. – 380 с. – (Естественные и инженерные науки – развитию регионов). – С. 95–98.
92. Лобанов, Д.В. Организация инструментального хозяйства при обработке композиционных материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Петров Н.П.// СТИН 2010. - № 11. – С. 2-4.
93. Лобанов, Д.В. Перспективы использования композиционных материалов в нефтегазовой промышленности / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков // Проблемы инновационного развития нефтегазовой индустрии: Сб. тр. междунар. науч.-практ. конф.: (Алматы, 23-24 февр. 2012 г.): в 2-х т. - Алматы: КБТУ, 2012. Т.1. – С.351 - 356.
94. Лобанов, Д.В. Повышение производительности фрезерования на основе автоматизации проектирования сборного инструмента / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков // Системы. Методы. Технологии. 2011. - № 2 (10). – С. 91 – 94.
95. Лобанов, Д.В. Подготовка режущего инструмента для обработки композиционных материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин: монография. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2011. – 192 с.
96. Лобанов, Д.В. Технологическая подготовка инструментального обеспечения при обработке композиционных материалов сборным фрезерным инструментом / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сборник научных трудов. – Краматорск, вып. № 27, 2010. – С. 112-118.
97. Лобанов, Д.В. Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин // Тонкие наукоемкие технологии. Старый Оскол. - 2012. - 296 с.

98. Лобанов, Н.В. Методы оптимизации и оценка качества дереворежущих фрез при стандовом и математическом моделировании / Н.В. Лобанов *Деревообрабатывающая промышленность: научно-технический экономический и производственный журнал*, под ред. В.Д. Соломонова, №2, 2008. – 110 с., С. 61 – 69.
99. Лобанов, Н.В. Повышение эффективности эксплуатации сборного режущего инструмента путем обеспечения его прочностной надежности на стадии проектирования: дис. ... канд. техн. наук / Н.В. Лобанов. – М., 1999. – 193 с.
100. Логанин, П.В. Повышение эффективности профильного алмазного шлифования путем совершенствования технологии правки круга: Автореф. дис. ... канд. техн. наук - Пенза, 2008 - 19 с.
101. Лоладзе, Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
102. Лукина, С.В. Повышение эффективности проектирования сборного режущего инструмента на базе установленных взаимосвязей конструкторско-технологических и экономических решений: дис. ... д-ра техн. наук – М., 1999. – 448 с.
103. Любин, Д.Ж. Справочник по композиционным материалам: В 2 т. / под ред. Д.Ж. Любина. – М.: Машиностроение, 1988. – 584 с.
104. Лялин, В.Е. Математические модели и интеллектуальные информационные технологии для повышения эффективности организации производства: Автореф. дисс. ... д-ра экономич. наук - Москва, 2006 - 48 с.
105. Майснер, Д.А. Повышение износостойкости твердосплавного дереворежущего инструмента методом конденсации вещества с ионной бомбардировкой: автореф. ... канд. техн. наук / Д.А. Майснер. – Красноярск, 2003.
106. Маркеев, А.П. Теоретическая механика – 2е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1999. – 569 с.
107. Михайлов, А.Н. Основы проектирования и автоматизации производственных процессов на базе технологий непрерывного действия / А.Н. Михайлов – Донецк: ДонНТУ, 2006. – 421 с.

108. Михеев, Р.С. Разработка износостойких дисперсно-наполненных композиционных материалов и покрытий из них: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Москва, 2010. – 26 с.
109. Морозов, В.Г. Дереворежущий инструмент: Справочник / В.Г. Морозов. – М.: Лесная промышленность, 2005. – 344 с.
110. Моисеев, А.В. Износостойкость дереворежущего инструмента / А.В. Моисеев. – М.: Лесн. пром-сть, 1981. – 112 с.
111. Некрасов, Ю.И. Лазерная нанометрия деформирования режущего инструмента: монография / Ю.И. Некрасов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2008. – 156 с.
112. Никифоров, В.М. Технология металлов и других конструкционных материалов. СПб., «Политехника», 2003. – 382 с.
113. Ординарцев, И.А. Справочник инструментальщика / И.А. Ординарцев. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 848 с.: ил.
114. Панков, В.А. Функционально-стоимостной анализ технических и организационно-экономических систем (ФСА/ФСУ) / В.А. Панков, С.В. Ковалевский, А.П. Бывшев – Донецк: Новый мир, 2005. – 257 с.
115. Памфилов, Е.А. Новые древесно-металлические материалы для узлов трения деревообрабатывающей техники / Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина, Б.Н. Прусс, Е.В. Алексеева - Деревообрабатывающая промышленность: научно-технический экономический и производственный журнал, под ред. В.Д. Соломонова, №2, 2008. –110 с., С. 24 – 25.
116. Панов, В.С. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них / В.С. Панов, А.М. Чувилин. – М.: «МИСИС», 2001. – 428 с.
117. Полетика, М.Ф. Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента. – М.: Машиностроение, 1969. – 148 с.: ил.
118. А.с. 956033 (СССР). Турбоциклон / Дмитриев А.В., Никитин А.И., Янюшкин А.С. – заявлено 143.02.80, № 3248490/23-26; опубл. в Б.И., 1982, № 33; МКИ В 04 с 9/00.
119. Пат. RU 2076789 / МПК С1 В23С5/22. Устройство для крепления режущих пластин различных типоразмеров или кассет, их содержащих, в сборном

- режущем инструменте / Аслибекян С.Ф., Прокофьев В.К., Филин М.М., Ветров С.И. – № 95110853/08; Заявлено 11.07.95; Оpubл. 10.04.97.
120. Пат. RU 2066600 / МПК С1 В23С5/22. Устройство для крепления режущей пластины или кассеты, ее содержащей, в сборном режущем инструменте / Аслибекян С.Ф., Прокофьев В.К., Баринов В.Н., Филин М.М. – № 95102961/08;. Заявлено 13.03.95; Оpubл. 20.09.96.
121. Пат. RU 2063308 / МПК С1 В23С5/06. Многозубый режущий инструмент / Малыгин В.И., Перфильев П.В., Лобанов Н.В., Кремлева Л.В., Староверов В.А. – № 93032114/08; Заявлено 18.06.93; Оpubл. 10.07.96.
122. Пат. RU 2126741 / МПК С1 В27G13/02. Фреза Черкасова-5 / Черкасов П.И. – № 94008274/13; Заявлено 10.03.94; Оpubл. 27.02.99.
123. Пат. RU 2080249 / МПК С1 В27В33/08. Сборная дисковая фреза / Гусаков О.В., Спецаков С.С., Колосков С.М. – № 94043958/13; Заявлено 14.12.94; Оpubл. 27.05.97.
124. Пат. RU 2053873 / МПК С1 В27G13/08. Фреза / Акпанбетов С.Б. – № 93045370/15; Заявлено 21.09.93; Оpubл. 10.02.96.
125. Пат. RU 2041806 / МПК С1 В27G13/02. Фреза / Иванов А.В. – № 93000750/15; Заявлено 06.01.93; Оpubл. 20.08.95.
126. Пат. RU 2140346 / МПК С1 В22D19/06. Способ восстановления рабочих поверхностей ножей сложного профиля сборных фасонных фрез для обточки колесных пар / Разудалов Ю.И., Светлов П.И. – № 98119051/02; Заявлено 19.10.98; Оpubл. 27.10.99.
127. Пат. RU 2132767 / МПК С1 В27G13/02. Сборная дереворежущая фреза / Вурсол А.В., Назаров В.Е., Серегин Н.Г. – № 98101529/13; Заявлено 30.01.98; Оpubл. 10.07.99.
128. Пат. RU 2128103 / МПК С1 В23С5/22. Сборная фреза / Бурочкин Ю.П., Зайцев С.К., Илларионов С.И., Андреев А.В. – № 97120272/02; Заявлено 08.12.97; Оpubл. 27.03.99.
129. Пат. RU 2092307 / МПК С1 В27G13/02. Сборная фреза / Серегин Н.Г. – № 94033856/13; Заявлено 15.09.94; Оpubл. 10.10.97.

130. Патент RU 2228621 / МПК С2 В27 G13/12. Сборная фреза для деревообработки. № 2002117387/02 // А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов. 10.05.2004.
131. Патент RU 2239525 / МПК С1 В23 Н5/00, В24 В53/00. Устройство для комбинированной электроалмазной обработки с непрерывной правкой круга. № 2003105413 // А.С. Янюшкин, С.П. Ереско, А.А. Сурьев, Д.В. Лобанов, А.М. Кузнецов. 10.11.2004.
132. Патент RU 2257289 / МПК В27 G13/12. Сборная фреза для деревообработки. № 2004109804/02 // А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, А.М. Кузнецов. 2005.07.27.
133. Патент RU 2325272 С2 / МПК В27 G13/00. Сборная фреза для деревообработки. № 2006124008/03 // А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, А.А. Сурьев, А.М. Кузнецов, М.В. Сталидзан. 27.05.2008.
134. Патент RU Конструкция катода для правки круга при комбинированной электроалмазной обработке. № 2010111574/02 // А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков, В.Ю. Попов, А.А. Сурьев, П.В. Архипов, Е.Д. Лосев, А.В. Яковец, А.С. Черемных. 25.03.2010.
135. Передерий, А.В. Повышение эффективности технологической подготовки производства за счет автоматизации выбора дисковых фрез в информационно-поисковой системе: Дисс. ... канд. техн. наук. – Набережные Челны, 2003. – 182 с.
136. Петрушин, С.И. Проектирование режущей части инструментов из композиционных материалов / С.И. Петрушин // СТИН. – 1997. – № 2. – С. 26–29.
137. Петрушин, С.И. Теоретические основы оптимизации режущей части лезвийных инструментов: дис. ... д-ра техн. наук / С.И. Петрушин. – М., 1998. – 307 с.
138. Подураев, В.Н. Технология физико-химических методов обработки / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
139. Пол, Д. Полимерные смеси: рецептура и свойства / Д. Пол, К. Бакнелл; Пер. с англ. В.Н. Кулезнева – М.: Машиностроение, 2009. – 1224 с.
140. Положение об организации инструментального хозяйства на лесопильно-

- деревообрабатывающих, мебельных, фанерных и лыжных предприятиях. Архангельск, 2007.
141. Полтавцев, В.В. Обоснование режимов шлифования труднообрабатываемых материалов при электроэрозионном воздействии на рабочую поверхность круга: автореф. ... канд. техн. наук / В.В. Полтавцев. – Донецк, 2001.
142. Попов, В.Ю. Повышение качества изделий из инструментальных сталей при электроалмазном шлифовании: Дисс. ... канд. техн. наук. – Братск, 2002. – 159 с.
143. Попов, С.А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С.А. Попов, Н.П. Малевский, Л.М. Терещенко. М., Машиностроение, 1977. – 263 с.
144. Рахимьянов, Х.М. Электрохимическая обработка безвольфрамовых твердых сплавов / Х.М. Рахимьянов, Б.А. Красильников, В.В. Янпольский, Д.Б. Красильников // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2010 - №3 – С. 3-7.
145. Рычков, Д.А. Исследование работоспособности режущего инструмента на примере фрез / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, С.В. Ковалевский, Е.В. Мишура // Научный вестник ДГМА. 2010 - № 1 (6Е) – С. 203 – 208.
146. Саттер Герб. Стандарты программирования на С++ / Герб Саттер, Андрей Александреску.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 224 с.
147. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Определение оптимальной конструкции инструмента. (Optim tool v.1.0). № 2004612489 // А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, К.В. Сопин, А.М. Кузнецов. 2004.11.11.
148. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Формирование базы данных фрезерного сборного инструмента. (DB Tools v.1.0). № 2007613694 // А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков. 08.29.2007.
149. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Форми-

- рование базы данных инструментов с возможностью выбора оптимальной конструкции фрезерного инструмента для заданных условий производства (DB Tools v.2.0). № 2010615966 // А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков. 13.09.2010.
150. Сирота, И.М. Разработка методов и средств поддержки визуального концептуального моделирования проектно-конструкторских задач при создании САПР машиностроительного назначения: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Москва, 1999. – 30 с.
151. Сисюков, А.Н. Разработка и применение специализированных экспертных систем для САПР технологических процессов механической обработки заготовок: Дисс. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 2007. – 151 с.
152. Соколов, В.П. Комплексная автоматизация технологического проектирования в гибких производствах: Дисс. ... доктора техн. наук. – Москва, 1995. – 369 с.
153. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
154. Сурьев, А.А. Повышение качества поверхностного слоя деталей за счет совершенствования процесса комбинированного электроалмазного шлифования: Дисс. ... канд. техн. наук. – Братск, 2005. – 146 с.
155. Суслов, А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 684 с.
156. Суслов, А.Г. Технология машиностроения – М.: Машиностроение, 2007. – 430 с.
157. Суслов, А.Г. Электромеханическая обработка деталей машин: справочник / А.Г. Суслов, А.О. Горленко, С.О. Сухарев // Инженерный журнал. – 1998. – № 1 (10). – С. 15–18.
158. Талантов, Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н.В. Талантов. – М.: Машиностроение, 1991. – 240 с.
159. Тарапанов, А.С. Технология обработки специальных материалов /

- А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов, С.Е. Шишков. – М.: Машиностроение, 2000. – 168 с.
160. Таратынов, О.В. Проектирование и расчет металлорежущего инструмента на ЭВМ / О.В. Таратынов, Г.Г. Земсков, Ю.П. Тарамыкин и др.; Под ред. О.В. Таратынова, Ю.П. Тарамыкина. – М.: Высш. шк., 1991. – 423 с.
161. Тахман, С.И. Повышение эффективности лезвийной обработки пластичных материалов на основе моделирования термомеханических закономерностей изнашивания твердосплавного инструмента: автореф. ... канд. техн. наук. – Иваново, 2002.
162. Тишенин, Е.Ю. Повышение эффективности использования станков с ЧПУ при автоматизированной подготовке инструментального производства: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 1994. – 20 с.
163. Утешев, М.Х. Разработка научных основ расчета прочности режущей части инструмента по контактным напряжениям с целью повышения его работоспособности: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук - Томск, 1996. - 36 с.
164. Фатхутдинов, Р.А. Организация производства / Р.А. Фатхутдинов. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 528 с.
165. ХаеТ, Г.Л. Сборный твердосплавный инструмент / Г.Л. ХаеТ, В.М. Гах, К.Г. Громаков и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
166. Хараева, М.И. Абразивный инструмент. Выбор и применение / М.И. Хараева. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГТУ, 2003. – 140 с.
167. Хомоненко, А.Д. Работа с базами данных в С++ Builder / А.Д. Хомоненко, С.Е. Ададунов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 496 с.
168. Худобин, Л.В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л.В. Худобин, А.Н. Унянин. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с.
169. Чилингаров, К.А. Учет использования номерного инструмента в производстве с применением системы TechnologiCS / САПР и графика. 2007. №11. С. 26 – 31.
170. Швырев, Ф.А. Подготовка и эксплуатация дереворежущего инструмента / Ф.А. Швырев, Г.А. Зотов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Лесн.

- пром-сть, 1979. – 240 с.
171. Щегольков, Н.Н. Разработка методов компьютерного профилирования фасонных режущих инструментов на основе метода итераций: дис. ... д-ра техн. наук / Н.Н. Щегольков. – М.: МГТУ Станкин, 1997. – 435 с.
172. Щербаков, А.С. Технология композиционных древесных материалов / А.С. Щербаков и др. – М.: Экология, 1992. – 190 с.
173. Энгельке, У.Д. Как интегрировать САПР и АСТПП: Управление и технология / У.Д. Энгельке – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
174. Янюшкин, А.С. Автоматизация процесса выбора конструкции режущего инструмента / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Механики XXI века. VII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – С. 161-164.
175. Янюшкин, А.С. Автоматизация процесса создания управляющих программ для станков с ЧПУ / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, М.М. Ильин // Механики XXI века. IX Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – С. 96-98.
176. Янюшкин, А.С. Автоматизация технологии подготовки сборного инструмента для обработки композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Технологические методы повышения качества продукции в машиностроении. Воронеж: ВГТУ, 2010. – С. 173-177.
177. Янюшкин, А.С. Анализ данных при выборе оптимальной конструкции фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков, К.Б. Тюменцев, А.С. Дудин // Решетневские чтения: материалы XIII Междунар. науч. конф., посвящ. 50-летию Сиб. Гос. Аэрокосмич. ун-та имени академика М.Ф. Решетнева (10-12 нояб. 2009, г. Красноярск): в 2 ч.; под общ. ред. Ю.Ю. Логинова / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. - Красноярск, 2009. – Ч. 2 - С. 480-481.
178. Янюшкин, А.С. Анализ методов определения радиуса округления режущей

- кромки / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, А.М. Кузнецов, М.В. Стлидзан // Труды Братского гос. ун-та: Серия Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. – Т. 2. – Братск: БрГУ, 2006. – С. 256–260.
179. Янюшкин, А.С. Анализ стойкости титановольфрамокобальтовых твердых сплавов при обработке древесностружечных плит / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Е.А. Слепенко // Актуальные проблемы лесного комплекса: сб. науч. тр. по итогам 5-й Междунар. науч.-техн. конф. – Брянск, БГИТА, 2004. – 267 с.
180. Янюшкин, А.С. Исследование обработанной поверхности и износостойкости твердосплавного дереворежущего инструмента при обработке ДСтП / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, А.М. Кузнецов // Труды Братского гос. ун-та. Юбилейный выпуск к 50-летию высшего образования в г. Братске. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. – С. 46–52.
181. Янюшкин, А.С. Исследование работоспособности алмазных кругов при обработке композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, В.А. Батаев, П.В. Архипов, О.И. Медведева // Системы. Методы. Технологии. 2010. – № 3 (7). – С. 87-91.
182. Янюшкин, А.С. Качественные показатели поверхностей и состояние режущей кромки твердосплавного дереворежущего инструмента, заточенного различными методами электроалмазной обработки / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, А.М. Кузнецов // Труды Братского гос. ун-та. – Т. 2. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2005. – 285 с. – (Естественные и инженерные науки – развитию регионов).
183. Янюшкин, А.С. Комплексная автоматизация проектирования, подготовки и управления инструментальным производством / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков. Современные проблемы механики: материалы Международной научно-технической конференции. – Ташкент, 2009. – 416 с.
184. Янюшкин, А.С. Компьютерная поддержка инструментального производства / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-21: сб. тр. XXI Междунар. науч. конф. – Са-

- ратов: Саратовский гос. техн. ун-т, 2008. – С. 49–51.
185. Янюшкин, А.С. Конструктивные решения при создании сложнопрофильного инструмента // Механики – XXI веку. III Межрегион. с междунар. участием науч.-техн. конф.: сб. докл. / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, А.М. Кузнецов – Братск: ГОУ ВПО «БрГТУ», 2004. – С. 123–127.
186. Янюшкин, А.С. Конструкция крепления режущих элементов сборных фрез с базированием на штифты в двух перпендикулярных плоскостях/ А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // Труды Братского гос. техн. ун-та. – Т. 2. – Братск: БрГТУ, 2002. – С. 151–153.
187. Янюшкин, А.С. Контактное взаимодействие при комбинированном электроалмазном затачивании твердосплавных инструментов: Дисс. ... доктора техн. наук. – Братск, 2004. – 397 с.
188. Янюшкин, А.С. Критериальная оценка конструкции режущего инструмента на примере сборной фрезы для обработки композиционных материалов / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // Главный механик. 2011 - № 5 – С. 48 – 54.
189. Янюшкин, А.С. Методика определения качества режущего лезвия твердосплавного дереворежущего инструмента / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Е.Д. Лосев // Механики – XXI веку. IV Межрегион. науч.-техн. конф. с междунар. участием: сб. докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2005. – 316 с.
190. Янюшкин, А.С. Методика расчета экономической эффективности при использовании инструментальных твердых сплавов при фрезеровании композиционно древесных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, О.Г. Боловина // Механики XXI веку. IX Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – С. 93-96.
191. Янюшкин, А.С. Методика расчета эффективности применения инструмента, оснащенного прогрессивными инструментальными материалами / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, О.Г. Боловина // Механики XXI веку. IX Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием:

- сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – С. 39-41.
192. Янюшкин, А.С. Методика сравнительного анализа конструкций сборного режущего инструмента / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Механики XXI века. VIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – С. 120-123.
193. Янюшкин, А.С. Моделирование режущего инструмента для обработки композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Вестник Иркутского регионального отделения академии наук высшей школы России. – 2009. - №2 (15). - С. 159-162.
194. Янюшкин, А.С. Моделирование сборного инструмента для автоматизации его проектирования и управления подготовкой производства / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Проблемы механики современных машин: Материалы четвертой международной конференции / ВСГТУ. - Улан-Удэ, 2009. – Т.3. – С. 274-278.
195. Янюшкин, А.С. Определение рациональных режимов обработки и геометрии инструмента при фрезеровании композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, А.М. Кузнецов, С.Х. Мажитов // Механики XXI века. VII Всероссийская науч.-техн. конф. с междунар. участием: сб. докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – С. 203–205.
196. Янюшкин, А.С. Оптимизация выбора режущего инструмента на основе методов сравнительного анализа / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. - № 5-2 (283). – С. 23-31.
197. Янюшкин, А.С. Перспективные инструментальные материалы для деревообрабатывающего инструмента / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, А.М. Кузнецов // 2-я междунар. науч.-техн. интернет-конференция «Новые материалы и технологии в машиностроении»: сб. науч. тр. – Вып. 2. – Брянск, 2003. – С. 105–107.
198. Янюшкин, А.С. Повышение качества затачивания инструмента для обра-

- ботки композиционных материалов, оснащенного твердым сплавом / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // Mechanics development issues: collection of papers international conference. Dedicated to the 50-th Anniversary of the Mongolian University of Science and Technology. 18-20 June, 2009., Ulaanbaatar, Mongolia, - P. 276-279.
199. Янюшкин, А.С. Повышение качества подготовки твердосплавного инструмента / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, С.В. Ковалевский // Системы. Методы. Технологии: научный периодический журнал. – № 1. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – 162 с.
200. Янюшкин, А.С. Преимущества комбинированного электроалмазного шлифования в сравнении с традиционными методами затачивания твердосплавного инструмента / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, С.А. Якимов // Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-техн. конф. – Вып. 5. – Брянск: БГИТА, 2006. – С. 181–184.
201. Янюшкин, А.С. Применение комбинированных методов шлифования при затачивании режущих инструментов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков, // Решетневские чтения: материалы XI Междунар. науч. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2007. – С. 185–186.
202. Янюшкин, А.С. Программные продукты для автоматизации подготовки инструментального производства на предприятиях / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Науч.-техн. творчество молодых. Ползуновский альманах. – Барнаул: Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – 2008. – № 4. – С. 214–216.
203. Янюшкин, А.С. Пути повышения стойкости и работоспособности дерево-режущего инструмента / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // Труды Братского гос. техн. ун-та. – Т.2. – Братск: БрГТУ, 2001. – С. 111–114.
204. Янюшкин, А.С. Пути совершенствования технологии подготовки к работе сборного инструмента для обработки древесины и композиционных древесных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // сб. выстав-

- ки-сессии инновационных проектов. – Ижевск: КнигоГрад, 2008. – С. 28–34.
205. Янюшкин, А.С. Разработка комплексной методики обработки материалов прогрессивными электроалмазными методами / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, А.С. Дудин // Механики XXI века. IX Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – С. 98-101.
206. Янюшкин, А.С. Разработка программного обеспечения для оптимального выбора конструкции режущего инструмента / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: матер. II Всероссийской науч.-техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. – Кн. 2. – 248 с.
207. Янюшкин, А.С. Расчет напряжений, возникающих при затачивании твердосплавного инструмента с малым углом заострения / А.С. Янюшкин, С.А. Якимов, А.М. Кузнецов, Д.В. Лобанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. - №2 (22) – С. 25 - 29.
208. Янюшкин, А.С. Рационализация процесса фрезерования труднообрабатываемых композиционных материалов твердосплавным инструментом / А.С. Янюшкин, А.М. Кузнецов, Д.В. Лобанов, Е.А. Слепенко, Д.А. Рычков // Механики XXI века. VII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – С. 196-200.
209. Янюшкин, А.С. Совершенствование организации инструментального производства на предприятиях, занимающихся обработкой композиционных материалов / Д.А. Рычков, Д.В. Лобанов // Молодые исследователи – регионам: Материалы всероссийской научной конференции. В 2-х т. – Вологда: ВоГТУ, 2010. Т.1. – С. 229-231.
210. Янюшкин, А.С. Совершенствование конструкций фрезерного деревообрабатывающего инструмента / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, А.М. Кузнецов // 2-я междун. науч.-техн. интернет-конференция «Новые материалы и технологии в машиностроении»: сб. науч. тр. – Вып. 2. – Брянск, 2003. – С. 102–105.

211. Янюшкин, А.С. Совершенствование технологических процессов машиностроительных производств: /А.С. Янюшкин, С.О. Сафонов, В.А. Торопов, Д.В. Лобанов и др.: монография. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2006. – 302 с.
212. Янюшкин, А.С. Состояние твердосплавного инструмента, заточенного различными методами электроалмазной обработки / А.С. Янюшкин, С.А. Якимов, Д.В. Лобанов // Вестник Иркутского регионального отделения АН ВШ России, №2 (9), 2006. – С. 100-104.
213. Янюшкин, А.С. Сравнительный анализ конструкций фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Системы. Методы. Технологии. - 2009. - №3. – с. 83 – 85.
214. Янюшкин, А.С. Технология комбинированного электроалмазного затачивания твердосплавных инструментов. – М.: Машиностроение – 1, 2003. – 242 с.
215. Янюшкин, А.С. Технология подготовки к работе фрезерного сборного дереворежущего инструмента / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // Машиностроение и техносфера XXI века // сб. тр. XIV междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе 17–22 сентября 2007 г. В 5 т. – Донецк: ДонНТУ, 2007. – Т.2 – С. 262–267.
216. Янюшкин, А.С. Эффективное использование лесных ресурсов путем совершенствования дереворежущего инструмента / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-13-2007): Доклады (материалы) 13-й Междунар. науч.-практ. конф. Кемерово, 1-3 окт. 2007 г./Отв. Ред. В.Н. Масленников. – Томск: САН ВШ; В-Спектр, 2007. – С. 113-116.
217. Ahmad, M.M. A photoclastis analysis of the stresses in double rake cutting tools/ Ahmad M.M., Derrikot R.T., Draper W.A. // Int. J.Maccch. Tool Manufact. – 1989. – v. 29 / № 2. – p. 1185–195.
218. Ahmad, M.M. An application of finit method to prediction of cutting tool per fomans/ Ahmad M.M., Derrikot R.T., Draper W.A. // Int. J.Mach. Tool Manufact. – 1989. – v. 29 / № 3. – p. 197–206.

219. Ali Oral. Automated cutting tool selection and cutting tool sequence optimisation for rotational parts/ Ali Oral, M. Cemal Cakir // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* - 20 (2004) – p. 127–141
220. Aronson, R. Современные материалы в машиностроении: их особенности и области применения // *Manufacturing Engineering*. – 2001. – v. 127 / № 3. – p. 123, 124, 126, 128, 132, 134, 136.
221. Arezoo, B. Selection of cutting tools and conditions of machining operations using an expert system / Arezoo B., Ridgway K., Al-Ahmari A.M.A. // *Computers in Industry* - 42 \_2000 – p. 43–58
222. Badger, J. Критерии выбора сверхтвердых шлифовальных кругов // *Cutting Tool Engineering*. – 2002. – v. 54 / № 6. – p. 32, 34–36.
223. Boyles, Ch. Некоторые способы обработки композиционных материалов, применяемых в авиакосмической промышленности // *Cutting Tool Engineering*. – 2002. – v. 54 / № 3. – p. 46, 48, 50.
224. Caceres, P.G. Effect of microstructures on the abrasive wear properties of infiltrated tungsten alloys / P.G. Caceres. - *Mater. Characterisation* 2002.–49, 1–9.
225. Carpenter, I.D. A flexible tool selection decision support system for milling operations/ Carpenter I.D., Maropoulos P.G. // *Journal of Materials Processing Technology* - 107 (2000) – p.143-152.
226. Chen, H. Abrasive wear resistance of plasma-sprayed tungsten carbide–cobalt coatings / H. Chen, I.M. Hutchings. – *Surf. Coat. Technol.* 107 (1998) 106–114.
227. Chen, X. Precision grinding using CBN wheels / Chen X., Rowe W.B., Cai R. // *International Journal of Machine Tools & Manufacture* - 42 (2002) – p. 585–593.
228. Composite materials. Fatigue and fracture / Erian A. Armanios, editor. Printed in Ann Arbor, MI, 1997. – 573.
229. Deborah, D.L. Chang Composite materials: science and applications. Functional materials for modern technologies. Printed in Great Britain, 2004. – 293.
230. Dr. Amin, A. Mokbel. Monitoring of the condition of diamond grinding wheels using acoustic emission technique / Dr. Amin A. Mokbel, Dr. T.M.A. Maksoud // *Journal of Materials Processing Technology* - 101 (2000) – p. 292-297.

231. F.A. da Costa. Structure and hardness of a hard metal alloy prepared with a WC powder synthesized at low temperature / F.A. da Costa, F.F.P. de Medeiros, A.G.P. da Silva, Gomes U.U., Filgueira M., C.P. de Souza // *Materials Science and Engineering - A* 485 (2008) – p. 638–642.
232. Fathima, K. A study on wear mechanism and wear reduction strategies in grinding wheels used for ELID grinding / Fathima K., Senthil Kumar A., Rahman M., Lim H.S. // *Wear* - 254 (2003) – p. 1247–1255
233. Fengguo Cao. Neural network modelling and parameters optimization of increased explosive electrical discharge grinding (IEEDG) process for large area polycrystalline diamond / Fengguo Cao, Qinjian Zhang // *Journal of Materials Processing Technology* - 149 (2004) – p. 106–111.
234. Hegeman, J.B.J.W. Grinding of WC–Co hardmetals / J.B.J.W. Hegeman, J.Th.M. De Hosson, G. de With // *Wear* - 248 (2001) – p. 187–196.
235. Goswami, R. Diamond synthesis by high-velocity thermal spray: the laboratory analogue of a meteorite impact / R. Goswami, H. Herman, S. Sampath, J.B. Parise. – *J. Mater. Res.* 15 (1) (2000).
236. Krupińska, B. The automation of analysis of technological process effectiveness / B. Krupińska, D. Szewieczek. *Jornal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, volume 24, 2007. – C. 199 – 202.
237. Lobanov, D.V. Influence of Sharpening on the Quality of Hard Alloy Tools for the Cutting of Composites / D.V. Lobanov, A.S. Yankyushkin // *Russian Engineering Research*, 2011, Vol. 31, No. 3, pp. 236–239 [Влияние затачивания на качество твердосплавного инструмента для обработки композиционных материалов].
238. Lobanov, D.V. Optimal Organization of Tools for Machining Composites / D.V. Lobanov, A.S. Yankyushkin, D.A. Rychkov, N.P. Petrov // *Russian Engineering Research*, 2011, Vol. 31, No. 2, pp. 156-157 [Оптимальная организация инструментов для обработки композиционных материалов].
239. Louu, D. Interactions between tungsten carbide (WC) particulates and metal matrix in WC reinforced composites / D. Louu, J. Hellman, D. Luhulima, J. Liima-

- tainen, V.K. Lindroos. – Mater. Sci. Eng. A00 (2002) 1–8.
240. Mamalis, A.G. Diamond grinding of super-hard materials / Mamalis A.G., Horvath M., Grabchenko A.I. // Journal of Materials Processing Technology - 97 (2000) – p. 120-125.
241. Mason, W. Специальные фрезы фирмы Sandvik Coromant // Manufacturing Engineering. – 2002. – v. 128 / № 2 – p. 85, 86, 88.
242. Matthews, F.L. Composite materials: engineering and science / F. L. Matthews, Rees D. Rawlings. Printed by The Alden Press, Oxford, England, 1999. – 470.
243. Redington, P. Применение шлифовальных кругов фирмы Norton из КНБ на керамической связке: экономика определяет технологию // Tooling & Production. – 2001. – v. 66 / № 12. – p. 64–65.
244. Selim Akturk, M. Dynamic lot sizing and tool management in automated manufacturing systems / Selim Akturk M., Siraceddin Onen // Computers & Operations Research - 29 (2002) – p. 1059-1079.
245. Shakeri, M. Implementation of an automated operation planning and optimum operation sequencing and tool selection algorithms // Computers in Industry - 54 (2004) – p. 223–236.
246. Schöpf, M. ECDM (Electro Chemical Discharge Machining), a New Method for Trueing and Dressing of Metal Bonded Diamond Grinding Tools / Schöpf, M., Beltrami, I., Boccadoro, M., Kramer, D. // CIRP Annals – Manufacturing Technology - 50(1), (2001) – p. 125–128.
247. Statnikov, R.B., Matisov J.B. Multicriteria Optimization and Engineering, N.Y.: Chfpmann and Hall, 1995, 236 p.
248. Statnikov, R.B. Multicriteria Design. Optimization and Identificatin. Dordrecht. Boston, London: Kluwer Acad. Publisers. – 1999. – 203 p.
249. Sullivan, Joe. Choosing the right crinding wheel // Mod. Mach. Shop. – 2002. – v. 73 / № 7, p. 92–98.
250. Thomas, H. Hahn Composite Materials: Fatigue and Fracture / H. Thomas Hahn, Paul A. Lagace, T. Kevin O'Brien. Printed in Ann Arbor, MI, 1991. – 830.
251. Walther, B. Electrochemical dissolution of hard metal alloys / Walther

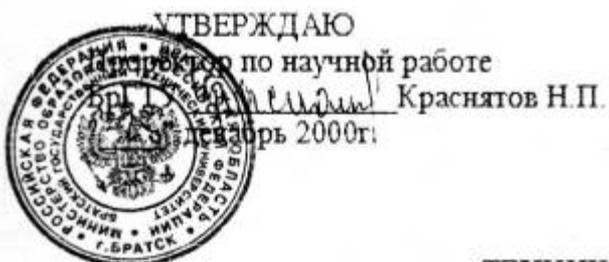
- B., Schilm J., Michaelis A., Lohrengel M.M. // *Electrochimica Acta* - 52 (2007) – p. 7732–7737.
252. Wang, X. Performance-Based Predictive Models and Optimization Methods for Turning Operations and Applications: Part 3—Optimum Cutting Conditions and Selection of Cutting Tools / Wang X., Da Z.J., Balaji A.K., Jawahir I.S.// *Journal of Manufacturing Processes* - Vol. 9/No. 1 – 2007 – p. 61-74.
253. Whitney, J.M. Composite materials: testing and design (seventh conference). Printed in Baltimore, MD, 1986 – 457.
254. Yajiang, Li. A study on microstructure in the brazing interface of WC–TiC–Co hard alloys / Yajiang Li, Zou Zengda, Holly Xiao, Feng Tao, Wang Xinghong // *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials* - 20 (2002) – p. 169–173.
255. Zaborski, S. Wear of cathode in abrasive electrochemical grinding of hardly machined materials / Zaborski S., Łupak M., Poros D. // *Journal of Materials Processing Technology* - 149 (2004) – p. 414–418.
256. Zhao, Y. Integration of CAD and a cutting tool selection system/ Zhao Y., Ridgway K., Al-Ahmari A.M.A. // *Cimputers & Industrial Engineering* - 42 (2002) – p. 17-34.
257. Zuperl, U. Tool cutting force modeling in ball-end milling using multilevel perceptron / Zuperl U., Cus F.// *Journal of Materials Processing Technology* - 153–154 (2004) – p. 268–275.
258. Johnson GR, Holmquist TJ. An improved computational constitutive model for brittle materials.// *High pressure science and technology—1993*, New York, 1994.

# Приложения

**Акты внедрения в производство**

**Акты производственных испытаний**

**Акты внедрения в учебный процесс**



ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ  
по приёмке сдачи НИР

Мы, нижеподписавшиеся, представители заказчика зам. главного инженера Малькевич А.В., главный технолог Вьюшкова О.В., ведущий экономист по планированию Каримова Л.А. с одной стороны и представители вуза – исполнителя научного руководителя темы профессора БрГТУ Янюшкина А.С., отв. исполнителя Попова В.Ю., инженера Лобанова Д.В. с другой, составили настоящий акт о том, что научно-исследовательская работа "Разработка рекомендаций, повышающих стойкость и рациональное использование (эксплуатацию) инструмента на Братском заводе столярных изделий выполнена в соответствии с заданием в полном объеме.

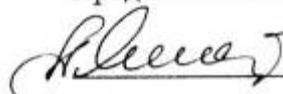
В результате исследований разработана новая технология обработки инструментальных материалов, в том числе затачивания режущих инструментов из инструментальных сталей, включающая разработку источника технологического тока, модернизацию универсально-заточного станка, проектирование технологической оснастки, подбор рациональных режимов обработки, выбор и назначение алмазных кругов, метода и состава применяемой СОТС.

Полученные результаты НИР позволяют повысить качество обработки, увеличить стойкость инструмента, уменьшить расход абразивных кругов, снизить шероховатость обрабатываемых изделий.

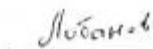
Перспективы внедрения и ожидаемая эффективность заключается в возможности затачивания различных инструментов из инструментальных, твердосплавных и композиционных материалов. При дополнительной разработке приспособлений – затачивание различных типоразмеров и видов режущих инструментов.

Годовой экономический эффект при двухсменной работе на поточной линии срачивания древесины и последующей обработке составляет 42 тысячи рублей.

Представители исполнителя:

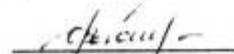
 А.С. Янюшкин

 В.Ю. Попов

 Д.В. Лобанов

Представители заказчика:

 А.В. Малькевич

 О.В. Вьюшкова

 Л.А. Каримова



УТВЕРЖДАЮ

Директор по учебной работе БрГТУ

С.В. Белокобыльский

2001 г.

АКТ

### внедрения результатов НИР в учебный процесс

Результаты выполненной работы по госбюджетной теме "Совершенствование технологических процессов обработки с целью повышения качества и надёжности деталей машин и инструмента", включающие разделы: "Проектирование и изготовление инструментальной головки" – автор к.т.н., доцент Стебеньков Ю.Н., "Исследование обрабатываемости БРС" – авторы к.т.н., профессор БрГТУ Янющкин А.С., аспирант Попов В.Ю., "Проектирование сборного инструмента для деревообработки" – авторы к.т.н., доцент Денисов С.В., асс. Лобанов Д.В., "Определение выбора способа заготовок с помощью методов системного анализа" – автор к.т.н., доцент Сафонов С.О., "Отработка расчётных режимов резания при работе на станках с ЧПУ" – автор доцент Фёдоров Б.В.

Выполненные исследования на кафедре "Технология машиностроения" на основании решения кафедры внедрены в учебный процесс в 2001 году при изучении дисциплин "Технология машиностроения", "Теория резания металлов", "Режущий инструмент", "Технологические процессы литья и сварки", "Прогрессивные методы обработки материалов"; также полученные результаты частично использованы при дипломном проектировании в 2001 году и планируются использовать при дипломном проектировании в 2002 году.

Декан МФ

Г.В. Голованов

Зав. кафедрой ТМ  
19 октября 2001 г.  
протокол №5

А.С. Янющкин

Учебно-методический  
Совет МФ  
"29" октября 2001 г.  
протокол № 2

Л.А. Рогова

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

ТОУ «БрГТУ», д.т.н

П.М.Огар

24 августа 2004 г.



УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

ЗАО «БДЗ»

А.В. Одинцов

24 августа 2004 г.



### АКТ

проведения производственных испытаний  
фрез для деревообработки

Мы, нижеподписавшиеся представители Братского государственного технического университета, в лице профессора кафедры «Технология машиностроения» Янюшкина А.С., старшего преподавателя, аспиранта кафедры «Технология машиностроения» Лобанова Д.В., инженера Кузнецова А.М., и представители Братского деревообрабатывающего завода, в лице зам. главного инженера по оборудованию Туркова А.В., главного технолога Жаровой Н.В., начальника цеха клееных изделий Черкасовой Н.В. составили настоящий акт о том, что в период с 15 июня по 20 августа 2004 г. на Братском деревообрабатывающем заводе были проведены производственные испытания фрез для деревообработки, изготовленных по разработкам, выполненным в диссертационной работе Лобанова Д.В. (руководитель работы А.С. Янюшкин)

При проведении производственных испытаний определялась и анализировалась стойкость сборных деревообрабатывающих фрез, оснащённых инструментальными твёрдыми сплавами марок ВК15 и ВК3М. Фрезы испытывались в одинаковых производственных условиях (оборудование, режим обработки, обрабатываемый материал). За критерий технологической стойкости выбрана величина фаски износа задней поверхности равная 0,3 мм, определённая посредством анализа качества обработанной поверхности. Величина фаски износа определялась с помощью лупы Бринелля МЛБ-2.

Испытания проведены в цехе клеёных изделий. Оборудование: 4-х сторонний строгальный станок Unimat-23 фирмы Wining. Обрабатываемый материал – ламель хвойных пород древесины. Режимы обработки : подача 8 м/мин, число оборотов шпинделя 6000 мин<sup>-1</sup>, число проходов – 1, припуск на обработку 1 мм.

По результатам производственных испытаний технологическая стойкость инструмента, оснащённого твёрдым сплавом марки ВК3М, превысила технологическую стойкость инструмента, оснащённого твёрдым сплавом марки ВК15 в 4,2 раза.

Представители БрГТУ

А.С. Янюшкин  
  
Д.В. Лобанов  
  
А.М. Кузнецов

Представители ЗАО «БДЗ»

А.В. Турков  
  
Н.В. Жарова  
  
Н.В. Черкасова



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе  
ФГУП «ВНИИТПИ», д.т.н  
П.М. Огар  
27 августа 2004 г.



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
«Сибирская Лесная Компания»  
О.Ю. Сорокин  
27 августа 2004 г.

Об эффективности внедрения на ООО «Сибирская Лесная Компания» результатов диссертационной работы Лобанова Д.В. «Совершенствование конструкций инструмента для обработки древесных материалов»

Мы, нижеподписавшиеся, представители Братского государственного технического университета, в лице профессора кафедры «Технология машиностроения» Янюшкина А.С., старшего преподавателя, аспиранта кафедры «Технология машиностроения» Лобанова Д.В., инженера Кузнецова А.М., и представители ООО «Сибирская Лесная Компания» в лице главного технолога Шелеметьевой В.А., главного инженера Чернова В.В. и главного механика Шмидта Н.В., составили настоящий акт о том, что, разработанные в результате диссертационных исследований Лобанова Д.В. (научный руководитель Янюшкин А.С.) рекомендации:

- применения программного комплекса по определению составляющих конструкции сборного фрезерного деревообрабатывающего инструмента, описанию параметров её характеризующих и сравнительной оценки различных конструкторских решений при заданных условиях сопоставимости;
- использования комбинированного метода затачивания твердосплавного деревообрабатывающего инструмента;
- совершенствования конструкций фрезерного дереворежущего инструмента, увеличению его стойкости повышению качества инструмента и изготовленных изделий;
- по созданию прогрессивных конструкций сборного фрезерного деревообрабатывающего инструмента, внедрены на ООО «Сибирская Лесная Компания».

Результаты испытаний показали, что внедрение предложенных рекомендаций позволило повысить стойкость фрез в 1,8 раза, существенно улучшить качество обработанных изделий, увеличить срок эксплуатации инструмента.

Использование рекомендаций на ООО «Сибирская Лесная Компания» позволило получить экономический эффект более 64 тыс. рублей.

Представители БрГТУ

А.С. Янюшкин  
  
Д.В. Лобанов  
  
А.М. Кузнецов

Представители

ООО «Сибирская Лесная Компания»  
  
В.А. Шелеметьева  
  
В.В. Чернов  
  
Н.В. Шмидт



**Российская Федерация**  
**ОАО «СибНИИСтройдормаш»**  
**им. А.Б. Суховского**

Юридический адрес: 660079 Красноярск  
ул. 60 лет Октября, д. 105  
Для писем: 660079, 60 лет Октября, д. 105  
Телефон: (8-3912)36-33-06, факс (8-3912)36-41-56  
e-mail: Sibniisdm@mail.ru

ИНН: 24640594195  
Р/с 40702810200600004288 в Красноярском филиале  
ОКБ «Банк Москвы», г. Красноярск  
к/с 30101810900000000967, БИК 040407967 ОКПО  
00240980 ОКОНХ 95130,14511,14512,14941

Исх. № \_\_\_\_\_

г. Красноярск

“УТВЕРЖДАЮ”



Генеральный директор  
ОАО «СибНИИСтройдормаш»  
В.Л. Шустов  
2005 г.

**Акт внедрения**

результатов научно-исследовательской работы кафедры «Технология  
машиностроения» ГОУВПО «Братский государственный университет»

Настоящим актом подтверждается, что результаты научно-исследовательской работы  
а именно:

- Технологический процесс комбинированного электроалмазного шлифования различных материалов, предложенный аспирантом А.А. Сурьевым;
- Модель контактного процесса взаимодействия инструментальных и обрабатываемых материалов при электроалмазной обработке с применением различных технологических сред, разработанная в диссертационной работе А.Б. Лосева;
- Комплекс программ для расчета параметров адгезионно-диффузионного взаимодействия для процесса электроалмазного шлифования инструментальных материалов, а также устройство для электроалмазной обработки деталей с непрерывной правкой круга (Патент РФ № 2239525) авторов д.т.н., проф. А.С. Янюшкина, д.т.н., проф. С.П. Ереско, к.т.н., доц. Лобанова Д.В., аспирантов А.А. Сурьева и А.М. Кузнецова, используются в производственном процессе ОАО «СибНИИСтройдормаш» имени А.Б. Суховского.

Применение перечисленных выше научных и технических результатов позволяет на 20% сократить сроки проектирования специального инструмента, на 25% повысить производительность технологического процесса операции шлифования и до 30% сократить расход алмазных кругов.

Зам. директора по научной работе,  
к.т.н., доцент

В.Г. Жубрин

Научно-исследовательское и  
производственное объединение  
электронной техники и  
машиноведения  
(Республика Монголия)



«Утверждаю»  
Директор Б.Уурцайх  
2009 г

### Акт внедрения

Научно исследовательских результатов, полученных при работе над диссертацией на соискание ученой степени доктора технических наук

Настоящим актом подтверждается, что результаты научно-исследовательской работы к.т.н., доцента Лобанова Д.В. используются при проектировании и изготовлении опытных образцов сборного фрезерного инструмента.

При этом практическое применение нашли следующие научные результаты, полученные Лобановым Д.В.:

1. Методика моделирования сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов.
2. Методика сравнительного анализа конструкций сборного инструмента для выбора оптимальной конструкции для варьируемых условий производства изделий из композиционных материалов.
3. Программное обеспечение для создания базы данных номенклатуры сборных инструментов, имеющихся в распоряжении предприятия, и сравнительного анализа конструкций сборного инструмента для выбора оптимальной конструкции для варьируемых условий производства.

Применение перечисленных выше научных результатов позволяет автоматизировать работу технологов и конструкторов при принятии синтезированных решений, связанных с выбором конструкции инструмента для задаваемых условий производства, что на 15...20 % сокращает время подготовки инструментального производства.



Научный секретарь

Доктор (Ph.D) профессор  
Д. Ёндонсурэн



«Утверждаю»  
Проректор по учебной работе МГУНТ  
Доктор (Ph.D), профессор Я.Наранцэцэг  
«20» \_\_\_\_\_ 2009 г

**АКТ**

О внедрении результатов научных исследований в учебный процесс

Результаты научных исследований к.т.н., доцента Лобанова Д.В., а именно:

1. Методика моделирования сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов.
2. Методика сравнительного анализа конструкций сборного инструмента для выбора оптимальной конструкции для варьируемых условий производства изделий из композиционных материалов.
3. Математическая модель выбора рациональных параметров обработки композиционных труднообрабатываемых материалов.

Используются в учебном процессе курса «Режущий инструмент и инструментальное обеспечение» при изложении теоретического материала, в лабораторном практикуме, а также в курсовом и дипломном проектировании студентов по специальности «Технология машиностроения»

Заведующий кафедрой ТМ  
Инженерно-механического института  
МГУНТ

Доктор (Ph.D)  
М.Дэлгэрмаа



УТВЕРЖДАЮ  
Ректор ГОУ ВПО

«Братский государственный университет»

С. В. Белокобыльский

\_\_\_\_\_ 2009 г.

АКТ  
внедрения НИР в учебный процесс

Результаты выполненной работы в рамках диссертационного исследования И.А. Гариной «Математическое моделирование вертикальной составляющей напряженности квазистационарного электрического поля приземного слоя атмосферы» коллективом авторов (И.А. Гарина, Д.В. Лобанов, П.В. Архипов, Д.А. Рычков) была разработана методика получения функции отклика с учетом влияния переменных факторов, реализованная в виде алгоритмов, которые могут быть использованы в различных системах программирования.

На сегодняшний день полученные результаты включены в учебный процесс при подготовке студентов и магистрантов по курсам дисциплин «Математические модели и обработка экспериментальных данных», «Планирование экспериментов и обработка экспериментальных данных» читаемых в ГОУ ВПО «БрГУ» на специальностях механического факультета.

Достоверность и универсальность разработанных методики и алгоритмов не вызывает сомнения, они могут быть использованы как при планировании численных и натуральных испытаний, так и для обработки экспериментальных данных с целью выявления поведения функции отклика, оптимизации процессов.

Проректор по научной работе, д.т.н.

П. М. Огар

Проректор по учебной работе, д.т.н.

Л. А. Мамаев



Федеральное космическое агентство  
Федеральное государственное унитарное  
предприятие

Центральное конструкторское бюро

**"ГЕОФИЗИКА"**

660041, Россия, г. Красноярск, ул. Ак. Киренского, 89

Телефон/Факс (391-2) 56-03-32

E-mail: geofizika@kras.ru

В диссертационный совет

Дата \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### Акт внедрения

результатов научно-исследовательской работы кафедры «Технология машиностроения» ГОУВПО «Братский государственный университет»

Настоящим актом подтверждается, что результаты научно-исследовательской работы, а именно:

- Технологический процесс комбинированного электроалмазного шлифования различных материалов, предложенный аспирантом А.А. Сурьевым;
- Модель контактного процесса взаимодействия инструментальных и обрабатываемых материалов при электроалмазной обработке с применением различных технологических сред, разработанная в диссертационной работе А.Б. Лосева;
- Комплекс программ для расчета параметров адгезионно-диффузионного взаимодействия для процесса электроалмазного шлифования инструментальных материалов;
- Способ электроабразивной обработки токопроводящим кругом с его одновременной правкой (Патент по заявке № 2004118239/02(019541) устройство для электроалмазной обработки деталей с непрерывной правкой круга, авторов д.т.н., проф. А.С. Янюшкина, д.т.н., проф. С.П. Ереско, аспиранта А.А. Сурьева, студента В.С. Ереско, аспиранта А.М. Кузнецова, а также устройство для электроалмазной обработки деталей с непрерывной правкой круга (Патент РФ № 2239525) авторов д.т.н., проф. А.С. Янюшкина, д.т.н., проф. С.П. Ереско, к.т.н., доц. Лобанова Д.В., аспирантов А.А. Сурьева и А.М. Кузнецова, используются в производственно-технологическом процессе ЦКБ «Геофизика» Федерального космического агентства.

Применение перечисленных выше научных и технических результатов позволяет на 20% сократить сроки проектирования специального инструмента, на 25% повысить производительность технологического процесса операции шлифования и до 30% сократить расход алмазных кругов.

Генеральный директор-Главный конструктор,  
кандидат технических наук

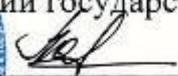


А.С. Дегтерев

УТВЕРЖДАЮ  
Ректор ГОУ ВПО



«Братский государственный университет»

 С.В. Белокобыльский

"\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2010г.

**АКТ**  
внедрения результатов НИР в учебный процесс

Результаты выполненной работы в рамках диссертационного исследования П.В. Архиповым по теме «Повышение работоспособности алмазных кругов на металлической связке за счет решения проблемы их засаливания» использованы в учебном процессе для подготовки студентов и магистрантов по курсам дисциплин специальности «Технология машиностроения», читаемых в ГОУ ВПО «БрГУ» на механическом факультете.

Коллективом авторов (П.В. Архипов, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков, Е.Д. Лосев) проведена модернизация плоскошлифовального станка модели 3E711 для реализации комбинированного метода электроалмазного шлифования твердых сплавов, включающая разработку специальной технологической оснастки, источника технологического тока, устройства для автоматического управления процессом непрерывной электрохимической правки круга, подбор рациональных режимов обработки, выбор состава применяемой СОТС, теоретические основы повышения работоспособности алмазных и твердосплавного инструмента.

Проректор по учебной работе,  
д.т.н., профессор



Л.А. Мамаев

Проректор по научной работе,  
д.т.н., профессор



П.М. Огар

Зав. каф. «Технология машиностроения»  
д.т.н., профессор



А.С. Янюшкин

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по научной работе  
ФГБОУ ВПО «БрГУ» д.т.н., профессор  
И.М. Огар



«    » 2011 г.

УТВЕРЖДАЮ  
Директор  
ООО Фирма «Сава Сервис»  
А.В. Одинцов



«15 июня» 2011 г.

### АКТ внедрения

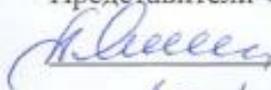
Представители ООО Фирма «Сава Сервис» в лице директора А.В.Одинцова, главного инженера Извольского Э.Г. и начальника ПДО Вьюшковой О.В. настоящим актом подтверждают, что комплекс мероприятий по подготовке режущего инструмента для обработки композиционных материалов, разработанный и предложенный представителями кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО «БрГУ» в лице руководителя д.т.н., профессора А.С. Янюшкина и авторов: Д.В. Лобанова, Д.А. Рычкова, А.В. Яковца и А.С. Черемных используется в технологическом процессе подготовки сборного твердосплавного инструмента при фрезеровании следующих видов композиционных материалов: ЛДСП, ДВП, КСМ, СМЛ и стеклотекстолит марки СТЭФ-1.

Предложенные рекомендации по затачиванию режущего инструмента позволили повысить качество режущей кромки инструмента в 1,5...2 раза.

Предложенные рекомендации по геометрии фрезерного инструмента и режимам обработки композиционных материалов позволили увеличить период стойкости режущего инструмента в 1,5 раза и увеличить качество обработанной поверхности в 2 раза.

Ожидаемый годовой экономический эффект составляет 380 тыс. рублей.

Представители ФГБОУ ВПО «БрГУ»

 А.С. Янюшкин  
 Д.В. Лобанов  
 Д.А. Рычков

Представители

ООО Фирма «Сава Сервис»  
 Э.Г. Извольский  
 О.В. Вьюшкова



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе

Л.А. Мамаев

«    »    20    г.

## АКТ

### о внедрении результатов НИР в учебный процесс

Результаты рентгеноструктурных и оптических исследований поверхности композиционных материалов, а также ее фазового и элементного составов научно-исследовательской работы:

**«Совершенствование технологии формообразования высокопрочных стекловолоконистых композиционных материалов на полимерной основе»**

выполненной коллективом авторов (Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Архипов П.В., Сурьев А.А., Лосев Е.Д.) в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, направление 1 «Стимулирование закрепления молодёжи в сфере науки, образования и высоких технологий», мероприятие 1.4 «Развитие внутрироссийской мобильности научных и научно-педагогических кадров путем выполнения научных исследований молодыми учеными и преподавателями в научно-образовательных центрах» в 2009 – 2012 гг. внедрены в учебный процесс на основании решения кафедры «Технологии машиностроения», протокол № 2 от 17 сентября 2012 г.

Указанные результаты включены в дисциплину «Технология композиционных материалов» в качестве учебного пособия.

Зав. кафедрой «Технология машиностроения» Янюшкин А.С.

«20» ноября 2012 г.

Начальник учебно-методического управления Нежевец Г.П.

«11» ноября 2012 г.



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе

Л.А. Мамаев

« 20 г.

### АКТ

#### о внедрении результатов НИР в учебный процесс

Результаты научно-исследовательской работы по теме «Повышение эффективности обработки высокопрочных и наноструктурированных материалов» выполненной коллективом авторов (А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, П.В. Архипов, Д.А. Рычков, В.Ю. Попов, А.А. Сурьев, А.М. Кузнецов, Е.Д. Лосев), включающие:

- методики моделирования процесса комбинированной электроалмазной обработки высокопрочных и наноструктурированных материалов; моделирования и многофакторного сравнительного анализа конструктивных решений режущего инструмента; определения критериев работоспособности алмазного абразивного инструмента; моделирования процессов механической обработки композиционных неметаллических материалов сборным фрезерным инструментом;

- теоретические основы положения и принципы в области обработки высокопрочных материалов современными комбинированными методами алмазного шлифования; подготовки к работе фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов; автоматизации технологической подготовки режущего инструмента.

Указанные результаты внедрены в 2012 г. в учебный процесс на основании решения кафедры «Технология машиностроения», протокол №2 от 17 сентября 2012 г. при изучении дисциплин «Технология машиностроения», «Теория резания металлов», «Режущий инструмент», «Прогрессивные методы обработки материалов» в качестве материала для самостоятельного изучения; также частично использованы при курсовом и дипломном проектировании.

Зав. кафедрой ТМ

А.С. Янюшкин

Начальник

учебно-методического управления

Г.П. Нежевец

**Справки об участии разработок в конкурсах и выставках**

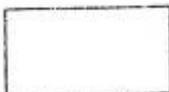
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

"БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"

665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, БрГТУ  
http://www.brstu.ru

Тел.: (395-3) 33-20-08 Факс: (3953) 33-20-08  
E-Mail: rektor@brstu.ru

№ \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



СПРАВКА

Разработки по теме диссертации Лобанова Дмитрия Владимировича (руководитель А.С.Янюшкин) «Совершенствование конструкций инструмента для обработки древесных материалов» представлялись в составе экспозиций Братского государственного технического университета на следующих выставках с международным участием:

1. «Сиблесопользование-2000» (Иркутск, 17.10-20.10 2000г.);
2. «Наука, образование, новые технологии, инвестиционные проекты-2001» (Иркутск, 6.02-8.02 2001г.);
3. «Сиблесопользование-2001» (Иркутск, 30.10-02.11.2001г.);
4. «Наука, образование. Новые технологии, инновационные проекты» (Иркутск, 05-07.02.2002г.);
5. «Сиблесопользование. Деревообработка, инструмент, оснастка» (Иркутск, 29.10-01.11.2002г.);
6. «Инновации для экономики и социальной сферы» (Иркутск, 04.02-07.02.2003г.);
7. «Сиблесопользование. Деревообработка» (Иркутск, 28-31.10.2003г.);
8. «Инновации: экономика, социальная сфера, наука, образование» (Иркутск, 03-05.02.2004г.);
9. «Сиблес. Деревообработка. Мебель» (Новосибирск, 17-20.03.2004г.);
10. Международная выставка в Шеньяне (КНР, Шеньян, июнь 2004г.)

Экспозиции указанных выше Иркутских выставок были отмечены восемью дипломами и двумя медалями.

Участие БрГТУ в Новосибирской выставке «Сиблес. Деревообработка. Мебель» было отмечено благодарственным письмом Выставочного общества «Сибирская ярмарка».

По результатам международной выставки подписан протокол сотрудничества между Шеньянским и Братским университетами.

Проректор по научной работе

П.М.Огар

Инженер УНИД по НТИ

С.Н.Кузмичев

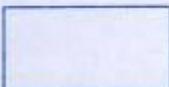


**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**  
**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ**  
**ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**  
**«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, ГОУ ВПО «БрГУ»  
http://www.brstu.ru

Тел.: (395-3) 33-20-08 Факс: (3953) 33-20-08  
E-Mail: rector@brstu.ru

26.10.2004 № От-2211  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_



**СПРАВКА**

Разработки кафедры «Технология машиностроения» (ГОУ ВПО «БрГУ») по теме «Совершенствование технологических процессов обработки с целью повышения качества деталей машин и инструмента», авторов д.т.н., А.С. Янюшкина, к.т.н., Д.В. Лобанова и А.М. Кузнецова представлялась в составе экспозиций Братского государственного университета на следующих выставках с международным участием:

1. «Инновации: экономика, социальная сфера, наука, образование». (Иркутск, 03.02.2004 - 05.02.2004, диплом выставки).
2. «Сиблесопользование. Деревообработка». (Иркутск, 04.09.2004 – 08.09.2004, медаль выставки)
3. «Инновации для экономики и социальной сферы». (Иркутск, 02.02.2005 - 04.02.2005, медаль выставки).
4. «Сиблесопользование. Деревообработка». (Иркутск, 06.09.2005 – 09.09.2005, диплом выставки).
5. «Инновации для экономики и социальной сферы». (Иркутск, 06.02.2006 - 08.02.2006, медаль выставки).
6. «Лес. Деревообработка. Мебель». (Томск, 31.05.2006 – 02.06.2006, медаль конкурса «Сибирские Афины»).
7. «Сиблесопользование. Деревообработка». (Иркутск, 05.09.2006 – 08.09.2006, медаль выставки).
8. «Лес. Деревообработка. Мебель». (Томск, 13.06.2007 – 15.06.2007, медаль конкурса «Сибирские Афины»).
9. «Сиблесопользование. Деревообработка». (Иркутск, 04.09.2007 – 07.09.2007, гран-при выставки).

Проректор по научной работе

Инженер УИИД и НТИ



П.М. Огар

С.Н. Кузьмичев

## СПРАВКА

Разработки кафедры «Технология машиностроения» (ГОУ ВПО «БрГУ»), авторов д.т.н., профессора А.С. Янюшкина, к.т.н., доцента Д.В. Лобанова, аспиранта А.М. Кузнецова и магистранта Д.А. Рычкова по теме «Технология подготовки к работе сборного фрезерного инструмента», а именно:

- Моделирование сборного инструмента;
  - Прогрессивные конструкции сборного фрезерного инструмента;
  - Программное обеспечение для создания баз данных сборного инструмента;
  - Программное обеспечение для выбора рациональной конструкции инструмента для заданных условий производства;
  - Рекомендации по выбору инструментального материала;
  - Рекомендации по реализации комбинированного электроалмазного метода обработки для формообразования режущей части инструмента;
- представлялись в составе экспозиций ГОУ ВПО «Братский государственный университет» на Международной выставке-ярмарке «Сиблес. Деревообработка - 2008» (г. Новосибирск, 19-21 марта 2008 г.) и были отмечены серебряной медалью выставки.

Директор выставки



И.П. Курусканова





## Международный конкурс «КАЧЕСТВО ТОВАРОВ И УСЛУГ - ЕВРАЗИЯ»

ООО «МЕЖРЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ДЕЛОВЫХ ИНИЦИАТИВ - ЕВРАЗИЯ»

РОССИЯ, 634029, г. Томск, пр. Фрунзе, 20-418

тел./факс: +7 3822 530077, +73822 535109

e-mail: eurasia@post.tomica.ru

http://www.eurasia-center.com

### СПРАВКА

Дана в том, что в период с 2007 по 2010 годы разработки коллектива кафедры «Технология машиностроения» ГОУ ВПО «БрГУ», выполненные под руководством д.т.н., профессора Янюшкина А.С., связанные с применением технологии комбинированной электроалмазной обработки высокопрочных и труднообрабатываемых материалов по результатам независимой конкурсной комиссии удостоивались призовых мест. При этом отмечалась экономическая целесообразность использования данных разработок в различных отраслях народного хозяйства, (в машиностроительной, деревообрабатывающей промышленности и инструментальных производствах).

• в 2007 году по теме: «Технология изготовления прогрессивных режущих инструментов для деревообработки». Золотая медаль Межрегионального конкурса «Лучшие товары и услуги Сибири «ГЕММА - 2007». (Авторы: Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Лосев Е.Д., Архипов П.В., Рычков Д.А.).

• в 2008 году по теме: «Технология изготовления изделий из высокопрочных материалов электроалмазным шлифованием». Золотая медаль в отборочном туре и Гран-при на заключительном этапе Межрегионального конкурса «Лучшие товары и услуги Сибири «ГЕММА - 2008». (Авторы: Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Якимов С.А.).

• в 2008 году по теме: «Инструментальное обеспечение деревообрабатывающих производств». Золотая медаль Межрегионального конкурса «Лучшие товары и услуги Сибири «ГЕММА - 2008». (Авторы: Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Лосев Е.Д., Рычков Д.А., Петров Н.П.).

• в 2009 году по теме: «Технология изготовления изделий из композиционных нанопропроченных материалов электроалмазными методами шлифования». Золотая медаль Международного конкурса «Качество товаров и услуг «ЕВРАЗИЯ - 2009».

(Авторы: Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Рычков Д.А., Якимов С.А.).

• в 2009 году по теме: «Автоматизированное проектирование фрезерного инструмента для обработки композиционных древесных материалов». Золотая медаль Международного конкурса «Качество товаров и услуг «ЕВРАЗИЯ - 2009».

(Авторы: Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Лосев Е.Д., Петров Н.П.).

• в 2010 году по теме: «Технология изготовления изделий из композиционных нанопропроченных материалов комбинированными электроалмазными методами». Золотая медаль Международного конкурса «Качество товаров и услуг «ЕВРАЗИЯ - 2010». (Авторы: Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Рычков Д.А., Петров Н.П.).

Председатель оргкомитета конкурса,  
Генеральный директор ООО «МЦДИ - ЕВРАЗИЯ»,  
канд. техн. наук, член-корреспондент АПК



В.М.Прошутин



## Международный конкурс «КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ И УСЛУГ - ЕВРАЗИЯ»

ООО «МЕЖРЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ДЕЛОВЫХ ИНИЦИАТИВ - ЕВРАЗИЯ»

РОССИЯ, 634029, г. Томск, пр. Фрунзе, 20-418

тел./факс: (3822) 530077, (3822) 535109

e-mail: mcdi.eurasia@gmail.com

<http://www.eurasia-center.com>

### СПРАВКА

Разработки к.т.н., доцента кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО «БрГУ» Д.В. Лобанова (руководитель д.т.н., профессор А.С. Янюшкин), представленные на Международный конкурс «Качество товаров и услуг «ЕВРАЗИЯ», связанные с совершенствованием технологической подготовки инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов удостоивались высокой оценки независимой экспертной комиссии, в том числе:

- 2009 год - «Автоматизированное проектирование фрезерного инструмента для обработки композиционных древесных материалов». Золотая медаль Международного конкурса «Качество товаров и услуг «ЕВРАЗИЯ - 2009».
- 2010 год - «Технология изготовления изделий из композиционных нанопропроченных материалов комбинированными электроалмазными методами». Золотая медаль Международного конкурса «Качество товаров и услуг «ЕВРАЗИЯ - 2010».
- 2010 год - «Управление процессами и создание комплекса программ при комбинированной алмазной обработке изделий из новых металлокерамических материалов». Золотая медаль Международного конкурса «Качество товаров и услуг «ЕВРАЗИЯ - 2010».
- 2011 год - «Комплексная организационно-технологическая подготовка сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов». Золотая медаль Международного конкурса «Качество товаров и услуг «ЕВРАЗИЯ - 2011».
- 2012 год - «Режущий инструмент для обработки композиционных материалов: проектирование, систематизация и выбор рациональной конструкции». Золотая медаль Международного конкурса «Качество продукции и услуг «ЕВРАЗИЯ - 2012».

В представленных разработках экспертами конкурса отмечена ценность полученных результатов для различных отраслей народного хозяйства, экономичность новых научно-обоснованных решений, целесообразность реализации их на предприятиях занимающихся подготовкой режущего инструмента для обработки современных композиционных неметаллических материалов.

Председатель Оргкомитета Конкурса «ЕВРАЗИЯ»,  
Генеральный директор ООО «МЦДИ - ЕВРАЗИЯ»,  
Член – корреспондент Академии проблем качества,  
Кандидат технических наук



В.М. Прошутин

**Патенты**

**Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2228261

**СБОРНАЯ ФРЕЗА ДЛЯ ДЕРЕВООБРАБОТКИ**

Патентообладатель(ли): *Братский государственный  
технический университет*

Автор(ы): *Янюшкин Александр Сергеевич,  
Лобанов Дмитрий Владимирович*

Заявка № 2002117387

Приоритет изобретения 28 июня 2002 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре  
изобретений Российской Федерации 10 мая 2004 г.

Срок действия патента истекает 28 июня 2022 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной  
собственности, патентам и товарным знакам*



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2325272

**СБОРНАЯ ФРЕЗА ДЛЯ ДЕРЕВООБРАБОТКИ**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Братский государственный университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2006124008

Приоритет изобретения 04 июля 2006 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 мая 2008 г.

Срок действия патента истекает 04 июля 2026 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам*



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2257289

**СБОРНАЯ ФРЕЗА ДЛЯ ДЕРЕВООБРАБОТКИ**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Братский государственный технический университет" (RU)*

Автор(ы): *с.м. на обороте*

Заявка № 2004109804

Приоритет изобретения 30 марта 2004 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 июля 2005 г.

Срок действия патента истекает 30 марта 2024 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.Н. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2239525

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОМБИНИРОВАННОЙ  
ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОЙ ОБРАБОТКИ  
С НЕПРЕРЫВНОЙ ПРАВКОЙ КРУГА**

Патентообладатель(ли): **Братский государственный  
технический университет (RU)**

Автор(ы): **с.м. на обороте**

Заявка № 2003105413

Приоритет изобретения 25 февраля 2003 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре  
изобретений Российской Федерации 10 ноября 2004 г.

Срок действия патента истекает 25 февраля 2023 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной  
собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2446039

**КОНСТРУКЦИЯ КАТОДА ДЛЯ ПРАВКИ КРУГА ПРИ  
КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОАЛМАЗНОЙ  
ОБРАБОТКЕ**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
"Братский государственный университет" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2010111574

Приоритет изобретения 25 марта 2010 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре  
изобретений Российской Федерации 27 марта 2012 г.

Срок действия патента истекает 25 марта 2030 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



АВТОРСКИЙ  
ЭКЗЕМПЛЯР

## СВИДЕТЕЛЬСТВО

об официальной регистрации программы для ЭВМ

№ 2004612489

Определение оптимальной конструкции инструмента  
(Optim Tool v. 1.0)

Правообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Братский государственный технический университет" (ГОУВПО "БрГТУ") (RU)*

Автор(ы): *Янюшкин Александр Сергеевич, Лобанов Дмитрий Владимирович, Сопин Константин Викторович, Кузнецов Алексей Михайлович (RU)*

Заявка № 2004611936

Дата поступления 14 сентября 2004 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ  
11 ноября 2004 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.И. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

об официальной регистрации программы для ЭВМ

№ 2007613694

**Формирование базы данных фрезерного сборного инструмента  
(DB Tools 1.0)**

Правообладатель(ли): *Государственное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Братский государственный университет» (ГОУ ВПО «БрГУ») (RU)*

Автор(ы): *Янюшкин Александр Сергеевич, Лобанов Дмитрий  
Владимирович, Рычков Даниил Александрович (RU)*

Заявка № 2007612942

Дата поступления 17 июля 2007 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ  
29 августа 2007 г.



*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной  
собственности, патентам и товарным знакам*

*Б.П. Симонов*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2010615966

**Формирование базы данных инструментов с возможностью выбора оптимальной конструкции фрезерного инструмента для заданных условий производства (DB Tools v.2.0)**

Правообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Братский государственный университет» (ГОУ ВПО «БрГУ») (RU)*

Автор(ы): *Янюшкин Александр Сергеевич, Лобанов Дмитрий Владимирович, Рычков Даниил Александрович (RU)*

Заявка № 2010614155

Дата поступления 13 июля 2010 г.

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ  
13 сентября 2010 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам*



Б.П. Симонов