

На правах рукописи

*Лобанов*

**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»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Братский государственный университет» и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный консультант: **Янюшкин Александр Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор;

Официальные оппоненты:

**Леонов Сергей Леонидович**

доктор технических наук, доцент, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, профессор кафедры «Технология автоматизированных производств»

**Попов Андрей Юрьевич**

доктор технических наук, профессор, Омский государственный технический университет, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты»

**Некрасов Юрий Иннокентьевич**

доктор технических наук, доцент, Тюменский государственный нефтегазовый университет, заведующий кафедрой «Технология машиностроения»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева», г. Красноярск.

Защита состоится «22» января 2014 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.07 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета

Автореферат разослан «   » октября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



Никитин Юрий Вадимович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Развитие современной промышленности неразрывно связано с использованием в качестве конструкционных материалов неметаллических композитов, обладающих высокими физико-механическими характеристиками в сочетании с уменьшением массы и стоимости в сравнении с традиционными металлическими материалами. Наполнители и связующие в неметаллических композиционных материалах зачастую более доступны и не требуют использования дорогостоящего сырья, что позволяет рационально использовать природные ресурсы. Широко развивается индустрия создания новых композиционных неметаллических материалов с широкой гаммой свойств, отвечающих требованиям, предъявляемым к готовым изделиям и конструкциям в разных отраслях промышленности (машиностроение, авиастроение, судостроение, вагоностроение, строительство, автомобильная промышленность, мебельная промышленность и т.д.).

Обработка резанием композиционных неметаллических материалов обладает рядом особенностей, отличающих ее от аналогичной обработки металлов: относительная сложность получения высокого качества поверхности вследствие характерных особенностей составов композиционных материалов, а также из-за их слоистой структуры; высокая твердость некоторых видов наполнителя; низкая теплопроводность композиционных материалов и, как следствие, слабый отвод тепла со стружкой и в обрабатываемое изделие; наличие в зоне резания твердых составляющих связующего и наполнителей, приводящих к абразивному износу инструмента; высокие упругие свойства композиционных материалов, что приводит к повышению нагрузки со стороны задней поверхности; образование при обработке композиционных материалов характерных дефектов поверхности (сколы, расслоения, прижоги), в связи с этим, при определении допустимого износа преобладает технологический фактор; низкая теплостойкость композиционных материалов, что требует более низкого уровня температур в зоне резания; в большинстве случаев при обработке не допускается применение смазывающе-охлаждающих технологических сред, т.к. многие материалы обладают таким свойством, как влагопоглощение.

Эти особенности объясняются характерными свойствами и структурой обрабатываемых материалов, следовательно, прямой перенос закономерностей процесса резания металлов на эти материалы недопустим. Такие специфические свойства композиционных неметаллических материалов вызывают трудности при изготовлении изделий из них с применением режущего инструмента, возрастают требования к износостойкости и качеству подготовки инструмента. Применяемые в настоящее время инструменты и режимы обработки не позволяют обеспечить требуемого качества изделий. Режущий инструмент интенсивно изнашивается, теряет свою работоспособность, в результате чего возрастают затраты на его эксплуатацию. Такие трудности значительно снижают долю механической обработки при изготовлении деталей из современных композиционных материалов, что ограничивает область их применения.

Известные исследования режущих инструментов для обработки компози-

тов носят фрагментарный характер и не сведены к формированию четких рекомендаций по выбору инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов. Требуется создание эффективного инструмента, обладающего высокой работоспособностью, расширенными технологическими возможностями, с учетом специфических геометрических особенностей инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов. Таким требованиям могли бы отвечать сборные конструкции инструментов, оснащенные современными инструментальными материалами, однако и их использованию при обработке композиционных неметаллических материалов также не уделено должное внимание. В то же время, такой инструмент обладает множеством вариантов конструктивных исполнений, что повышает его адаптивность. В связи с этим, актуальными становятся проблемы моделирования и математического описания конструкций сборных режущих инструментов, многокритериального выбора конструктивных решений для варьируемых производственных условий, автоматизации труда конструкторов и технологов на предприятиях, занимающихся обработкой изделий из композиционных неметаллических материалов.

Применение в конструкциях режущего инструмента современных инструментальных материалов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, затруднено в связи с трудностями, связанными с эффективным формообразованием режущего лезвия и рабочих поверхностей со специфическими для обработки композиционных неметаллических материалов геометрией и повышенными требованиями к качеству их формирования. Качественно сформированное лезвие может значительно повысить ресурс инструмента в процессе резания. Традиционные способы обработки высокопрочных и труднообрабатываемых материалов малоэффективны и не позволяют достигнуть гарантированного качества режущих лезвий инструмента. Требуется исследование способов и создание технологий, позволяющих повысить эффективность операций формообразования режущих элементов инструментов для обработки композиционных неметаллических материалов.

**Степень разработанности темы исследования.** Дальнейшее совершенствование технологии обработки композиционных неметаллических материалов лезвийным инструментом сдерживается недостаточной изученностью перечисленных проблем. Появляется необходимость в исследовании методов и способов повышения эффективности использования режущего инструмента на операциях механической обработки, создания 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 до 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.

**Цель работы:** Повышение эффективности фрезерной обработки композиционных неметаллических материалов за счет разработки и реализации технологических методов создания, изготовления и выбора режущего инструмента.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Провести моделирование фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов для выявления характера структурных связей в системе сборного инструмента и математического описания конструктивных и геометрических особенностей. 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 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.

**Научная новизна:**

1. Разработаны теоретические положения и научно обоснована система мероприятий, методов и технологий, направленных на повышение эффективно-

сти 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.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Созданы программные продукты для систематизации сборного инструмента и анализа конструктивных решений на основе значимых варьируемых критериальных показателей, 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 простой, 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. Результаты не противоречат ранее полученным данным. Экспериментальные исследования проводились с использованием оптической, растровой, скани-

рующей зондовой микроскопии, оптической интерферометрии, спектрального и рентгеноструктурного анализа.

**На защиту выносятся:**

- решение научной проблемы повышения работоспособности фрезерного инструмента, качества и экономичности обработки композиционных неметаллических 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», ФГБОУ ВПО «НГТУ», Россия) и Инженерно-механического института (МГУНТ, Монголия).

**Связь с научно-техническими программами:** работа над диссертацией выполнялась в соответствии с тематикой следующих госбюджетных 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 обра-

ботки», 2011 г. (г. Томск). 4. Тема 05-У-0619 «Повышение эффективности обработки высокопрочных и наноструктурированных материалов» 2008-2012, ФГБОУ ВПО «БрГУ» (г. Братск). 5. Проект, выполненный в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ в 2013 г. и плановом периоде в 2013...2014 годах. (г. Новосибирск).

**Степень достоверности и апробация работы:** основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались: *на международных научно-технических конференциях:* «Новые материалы и технологии в машиностроении», Брянск, БГИТА, 2003, 2004, 2006 г.г.; «Актуальные проблемы лесного комплекса», Брянск, БГИТА, 2004 г.; «Машиностроение и техносфера XXI века», Украина, Донецк, ДонНТУ, 2007 г.; «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири», Томск, САН ВШ, 2007 г.; «Решетневские чтения», Красноярск, СибГАУ, 2007, 2009, 2012 г.; «Математические методы в технике и технологиях», Саратов, Сарат.ГТУ, 2008 г.г.; «Нейросетевые технологии и их применение», Краматорск, Украина, ДГМА, 2009, 2012 г.; «Mechanics development issues», Mongolia, Ulaanbaatar, MUST, 2009 г.; «Современные проблемы механики», Узбекистан, Ташкент, 2009 г.; «Проблемы механики современных машин», Улан-Удэ, ВСГТУ, 2009, 2012 г.; «Технологические методы повышения качества продукции в машиностроении», Воронеж, ВГТУ, 2010 г.; «Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения», Орел, Орел-ГТУ, 2010, 2012 г.; «Надежность инструмента и оптимизация технологических систем», Краматорск (Украина), ДГМА, 2010 г, «Современные вопросы науки - XXI век», Тамбов, 2011 г.; «Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения», Брянск, БГТУ, 2011 г., «Проблемы инновационного развития нефтегазовой индустрии», Алматы, 2012, «Молодая наука XXI века», г. Краматорск (Украина), ДГМА, 2012 г, «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии», Липецк, ЛГТУ, 2012 г., ; *на всероссийских научно-технических конференциях:* «Механики – XXI веку», Братск, БрГУ, 2004 – 2013 г.г.; «Наука. Технологии. Инновации», Новосибирск, НГТУ, 2007 г.; «Россия молодая», Омск, ОмГТУ, 2009 г.; «Молодые исследователи – регионам», Вологда, ВоГТУ, 2010 г; *на ежегодных научных конференциях преподавателей и сотрудников Братского государственного университета в 2001-2013 г, а также научно-методических семинарах ФГБОУ ВПО «Братский государственный университет», ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск, ФГБОУ ВПО «Госуниверситет УНПК», г. Орел и Института авиационного машиностроения и транспорта ФГБОУ ВПО «НИ ИрГТУ», г. Иркутск.*

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 93 печатных работы, в том числе 3 монографии, 13 статей в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора технических наук, 5 патентов РФ на изобретение и 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ, в автореферате указаны 59 основных публикаций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения,



шести глав, основных выводов и результатов работы, списка использованной литературы из 258 наименований и приложений. Работа представлена на 411 страницах и содержит 191 рисунок, 21 таблицу.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность работы и представлена общая характеристика диссертации. Сформулированы цель, задачи исследования, научная новизна и практическая ценность работы.

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

Композиционные материалы обладают широкой гаммой положительных свойств благодаря рациональному сочетанию свойств матрицы и наполнителя. В связи с этим они занимают достойное место в списке прогрессивных материалов и уверенно завоевывают общемировой рынок. Их использование во многих отраслях промышленности отвечает актуальным требованиям современного производства. Наиболее часто применяемыми на сегодняшний день являются различные виды композиционных материалов на древесной основе и полимерных композиционных материалов.

Расширение области применения композиционных материалов в первую очередь требует исследования процесса их 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 относятся к труднообрабатываемым, что приводит к повышенной потере работоспособности режущего инструмента.

Проблемам обработки композиционных материалов посвящены работы В.В. Амалицкого, В.И. Баранчикова, А.М. Булгаева, А.И. Вигдоровича, В.И. Коняшина, Н.А. Кряжева, А.М. Маркова, Е.А. Памфилова, А.А. Позднякова, Г.В. Сагалаева, А.С. Тарапанова, Г.А. Харламова и др. Отмечено, что режущая часть инструментов для обработки таких материалов должна обладать высокой износостойкостью, что достигается применением высокопрочных инструментальных материалов, которые, в свою очередь, плохо поддаются обработке при получении высокого качества режущей части инструментов. Следовательно, для оптимизации процесса резания композиционных материалов, достижения максимальной производительности и требуемого качества обработанной поверхности необходим инструмент, отвечающий специфическим требованиям к качеству формирования режущих элементов, остроте режущего лезвия, оснащенный современными инструментальными материалами с повышенными физико-механическими свойствами, характеризующийся высокими технологическими показателями.

Вопросам подготовки и проектирования режущего инструмента для обработки композиционных и неметаллических материалов посвящены работы В.В. Амалицкого, В.А. Гречишникова, А.Э. Грубе, С.В. Кирсанова, Г.А. Зотова, Г.М. Ипполитова, Д.В. Кожевникова, В.Г. Морозова и др. Авторы отмечают преимущества применения сборных конструкций инструментов, их особенно-

сти, характерные при обработке композиционных материалов. Установлено, что режущая часть таких инструментов должна иметь более высокие значения переднего и заднего углов. Однако исследования носили фрагментарный характер и не привели к формированию четких рекомендаций по подготовке инструмента для обработки композиционных материалов.

Вопросам автоматизации инструментального обеспечения на предприятиях посвящены работы С.В. Лукиной, В.П. Соколова, А.Н. Касперчика, С.Н. Корчака, В.И. Гузеева, Ю.А. Абрамова, А.А. Горохова, А.Н. Домбрачева, В.Е. Лялина и др. Отмечены аспекты моделирования конструкций инструментов, критериального выбора конструктивных решений для производственных потребностей. Однако слабо отражены вопросы моделирования инструмента для обработки изделий из композиционных неметаллических материалов с учетом его конструктивных и геометрических особенностей.

Сборный инструмент, оснащенный высокопрочными инструментальными материалами, не находит должного применения при обработке композиционных неметаллических материалов из-за сложностей, связанных с невысокой работоспособностью такого вида инструментов и объясняемых спецификой взаимодействия режущего инструмента и обрабатываемых композиционных материалов.

Исследованию путей решения проблемы обеспечения эффективности использования режущего инструмента посвятили работы российские и зарубежные ученые: И.Д. Армарего, Б.М. Базров, Б.С., Балакшин, В.И. Баранчиков, В.Ф. Безъязычный, В.Ф. Бобров, Р.Х. Браун, А.С. Верещака, Г.И. Грановский, С.В. Грубый, М.Б. Гордон, Л.Г. Дибнер, А.Е. Древаль, И.П. Захаренко, Э. Зиммерс, Г.М. Ипполитов, Ю.Г. Кабалдин, А.Н. Коротков, Б.А. Красильников, В.С. Кушнер, Т.Н. Лоладзе, В.В. Любимов, И.А. Ординарцев, С.И. Петрушин, В.Н. Подураев, А.Ю. Попов, А.И. Промптов, Х.М. Рахимьянов, Ю.Я. Савченко, В.П. Смоленцев, Ю.М. Соломенцев, Н.М. Султан-Заде, А.Г. Суслов, Е.М. Трент, В.Г. Шаламов, А.С. Янюшкин и др.

Вопросам исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и работоспособности инструмента при эксплуатации посвящены работы Е.В. Артамонова, Ю.И. Некрасова, М.Ф. Полетики, А.И. Промптова, В.А. Скрипняка, С.И. Тахмана, М.Х. Утешева, Г.Л. Хаета, В.С. Шоркина и др. Анализ литературных данных показывает, что на сегодняшний день установлены основные закономерности деформационных процессов в инструментальных материалах при резании. Вместе с тем, в работах слабо отражены аспекты формирования напряженно-деформированного состояния режущей части при заточивании твердосплавных инструментов со специфическими для обработки композиционных материалов особенностями и характеристиками.

Повышение работоспособности твердосплавных инструментов видится в формировании научно-обоснованного комплекса мероприятий, направленных на повышение эффективности применения фрезерного инструмента при обработке композиционных неметаллических материалов:

- создание методики моделирования режущего инструмента;
- проектирование новых конструктивных решений режущего инструмен-

та, отвечающих возрастающим требованиям производства;

- создание методики многокритериального сравнительного анализа конструктивных решений режущего инструмента для рациональной реализации технологического процесса обработки композиционных материалов;
- автоматизация процесса систематизации сборного режущего инструмента и выбора оптимальной конструкции для реализации технологического процесса обработки композиционных неметаллических материалов;
- выбор рациональных методов, способов, условий и режимов формообразования режущей части инструмента, оснащенного современными высокопрочными инструментальными материалами;
- формирование рекомендаций по выбору геометрических параметров режущего инструмента, режимов и условий обработки композиционных неметаллических материалов.

Таким образом, повышение эффективности обработки композиционных неметаллических материалов режущим инструментом требует создания системы мероприятий, направленных на обеспечение требуемых технологических параметров инструмента, гарантирующих его работу с максимальной работоспособностью и качеством обработанных изделий.

**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.

На основе теории графов предложена методика моделирования и систематизации сборного режущего инструмента для обработки композиционных материалов (на примере фрез), позволяющая проводить анализ и синтез конструктивных решений инструмента в процессе подготовки инструмента.

В модели сборная фреза рассматривается как система отдельных конструктивных элементов (вершин), имеющих функциональные связи (ребра). Укрупнённо конструкция сборных фрез представлена в виде объединения режущей (вершина  $X_1$ ), корпусной (вершина  $X_2$ ), крепёжной (вершина  $X_3$ ) и других частей (вершины  $X_4, \dots, X_n$ ),

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

Кроме того, представленные вершины графа также имеют ветвления в виде вершин, раскрывающих более детальное содержание конструктивных особенностей инструмента. 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, кроме того, доступно дополнение модели при появлении новых составляющих.

Задавшись определением вершин графа, любую конструкцию инструмента, по обобщённой графовой модели, можно представить в виде матрицы  $B$ , тем самым определить ее математическое описание.

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1j} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{i1} & b_{i2} & \dots & b_{ij} \end{pmatrix} \quad (2), \quad \text{где } b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } l_{ij} \in l_n, \\ 0, & \text{если } l_{ij} \notin l_n. \end{cases}$$

Методика моделирования конструкций сборного инструмента является основой созданной автоматизированной программы для формирования базы данных инструмента. Она позволяет в диалоговом режиме описать составляющие и параметры конструктивных решений инструмента. Созданная база данных сохраняется в файл и используется, изменяется и дополняется по требованию пользователя. 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.

Для рационального выбора конструктивного решения инструмента при подготовке технологического процесса механической обработки изделий из композиционных неметаллических материалов разработана методика сравнительного многофакторного анализа конструкций инструмента при варьируемых условиях сопоставимости инструмента, позволяющая оптимизировать и компьютеризировать процесс выбора 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. Обозначим эти критерии через  $K_i$ , а конструкции, для которых они оцениваются, через  $X_i$ .

Выделим множество критериев через  $K_1, K_2, K_3 \dots K_k$ , где  $k$  – количество критериев, по которым производится анализ конструкции режущего инструмента. Каждый из критериев имеет ряд параметров  $t_1, t_2, t_3 \dots t_m$ , влияющих на его значение. Это влияние выражается в виде математических моделей:

$$K = f(t_1, t_2, t_3, \dots, t_m) \quad (3)$$

Множество сравниваемых конструктивных решений фрезерного инструмента представим в виде  $X_1, X_2, X_3, \dots X_n$ , где  $n$  – количество режущего инструмента, имеющегося в распоряжении предприятия.

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

$$C(a_{ij}) = \begin{pmatrix} & K_1 & K_2 & K_3 & \dots & K_k \\ X_1 & a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1k} \\ X_2 & a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2k} \\ X_3 & a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_n & a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nk} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Элементы матрицы принимают количественные прямые или обратные (в зависимости приоритета большей или меньшей величины показателя) значения, по которым оценивается соответствующий критерий.

Далее по матрицам смежности рассчитываем итерированную значимость и весовой критериальный коэффициент для каждой конструкции. Результаты расчета весового критериального коэффициента сведены в результирующий вектор:

$$q(n) = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_n \end{pmatrix}, \quad (5) \quad \text{где } n - \text{ количество сравниваемых конструкций.}$$

Наибольшее значение весового критериального коэффициента свидетельствует о большей рациональности применения конструкции.

Методика реализована в автоматизированной программе для определения рациональной конструкции инструмента при задаваемых значениях параметров сравниваемых конструкций инструмента.

Для учета при выборе инструмента физико-механических свойств инструментального и обрабатываемого материалов, а также использования накопленной в результате научных исследований базы знаний, характеризующей процессы обработки лезвийным инструментом различных видов композиционных неметаллических материалов, разработана методика, позволяющая вести многокритериальный сравнительный анализ конструктивных решений инструмента с учетом полученных экспериментальных данных и факторов, оказывающих влияние на процесс резания. В качестве критериев для сравнительного анализа выбраны: работоспособность инструмента, качество обработанной поверхности, производительность обработки и экономичность конструкции.

Работоспособность режущего инструмента оценивается расчетным периодом стойкости при любом сочетании инструментального и обрабатываемого материалов:

$$T = T_{\text{э}} \cdot K_T, \text{ мин} \quad (6)$$

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.

$$K_T = K_y \cdot K_{mv} \cdot K_{np} \cdot K_{изг} \cdot K_{сж} \quad (7)$$

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;  $K_{изг}$  - коэффициент, учитывающий сопротивление расчетного инструментального материала изгибающим усилиям при резании;  $K_{сж}$  - коэффициент, учитывающий сопротивление расчетного инструментального материала сжимающим усилиям при резании.

Детальный вывод величин коэффициентов представлен в диссертации.

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

$$P = S_z \cdot z \cdot t \cdot b \cdot \frac{V}{\pi \cdot D_{\text{фр}}}, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (8)$$

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.

Для определения и выбора режимов резания для каждого конкретного случая в работе в формулу вводятся поправочные коэффициенты, определяющие изменение режимов резания и производительности в зависимости от применяемых инструментальных и обрабатываемых материалов.

Качество обработанной поверхности при расчете, оценивается усредненной условной высотой микронеровностей, образующихся на поверхности обрабатываемого изделия в результате фрезерной обработки:

$$h = \frac{D_{\text{фр}}}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D_{\text{фр}}^2 - S_z^2}, \text{ м} \quad (9)$$

где  $D_{\text{фр}}$  – диаметр резания фрезы, м;  $S_z$  – величина подачи при фрезеровании, м/зуб.

Экономичность конструктивных решений оценена по величине приведенных затрат по каждой конструкции фрезерного инструмента:

$$ПЗ = \frac{C_{\text{фр}} + N_{\text{рем}} \cdot C_{\text{рем}} + C_{\text{ок}} + (t_{\text{з.н.}} + t_{\text{уст}}) \cdot C_{\text{ч}} \cdot i}{T \cdot z \cdot i}, \text{ руб/мин} \quad (10)$$

где  $C_{\text{фр}}$  – стоимость фрезы, руб.;  $N_{\text{рем}}$  – число перестановок или ремонта режущих элементов;  $C_{\text{рем}}$  – цена ремонта режущих элементов, руб.;  $C_{\text{ок}}$  – цена одного комплекта режущих элементов, руб.;  $t_{\text{з.н.}}$  – время на заточку одной фрезы или поворот и замену пластин;  $t_{\text{уст}}$  – время на установку фрез и настройку станка, ч;  $C_{\text{ч}}$  – 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.

Приведенные затраты рассчитываются с допущением, что тип производства и годовая программа выпуска изменяют конечный результат пропорционально для всех конструкций и в расчет не принимаются.

Методики моделирования инструмента, формирования базы данных инструментов и сравнительного анализа реализованы в виде автоматизированных программных модулей, интерфейс которых позволяет работать с базой данных, а также производить расчет и определение оптимальной конструкции режущего инструмента при заданных условиях производства. Создание единого приложения, способного хранить базу данных и производить выбор рациональной конструкции режущего инструмента, позволило устранить недостатки, связанные с использованием нескольких видов программного обеспечения в процессе технологической подготовки и производить обоснованный поиск конструктивных решений инструмента для варьируемых условий сопоставимости в одном программном продукте.

**В третьей главе** представлены результаты исследований методов и условий формообразования режущих элементов твердосплавного инструмента для обра-

ботки композиционных неметаллических материалов.

При получении 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. Мероприятия по повышению эффективности фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов направлены на определение производительных методов изготовления (формообразования) режущих инструментов, в особенности оснащенных высокопрочными инструментальными материалами, исследование этих технологий, с целью выявления рационального метода для изготовления прогрессивных конструкций.

Исследованы традиционные методы и условия формообразования режущих элементов твердосплавного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов с целью выявления негативных факторов, снижающих работоспособность твердосплавного инструмента после его изготовления или восстановления режущей способности после износа. По результатам проведенного с использованием оптической, растровой микроскопии, оптической интерферометрии, спектрального и рентгеноструктурного анализа исследованы качество затачивания твердосплавного инструмента и процесс потери режущей способности абразивного инструмента на металлической связке. Выявлено, что используемые на производстве методы и способы изготовления и восстановления инструмента для обработки композиционных материалов ведут к снижению эксплуатационных характеристик инструмента, что отрицательно сказывается на качестве выпускаемой продукции. Кроме того, наблюдается значительный расход абразивного инструмента на органической и керамической связках. Рекомендуемое чистовое и отделочное затачивание лезвийного инструмента для обработки композиционных материалов алмазным абразивным инструментом на металлической связке также малоэффективно. Экспериментально подтверждено, что образование засаленного слоя на поверхности алмазного круга с металлической связкой происходит в первые минуты работы и приводит к потере режущей способности абразивного инструмента. На процесс засаливания шлифовальных кругов влияет структура, состав абразивного инструмента и обрабатываемого материала, потеря работоспособности кругов зависит не только от термодинамических параметров, но и от атомно-молекулярных связей, которые формируют структуру взаимодействующих материалов. Теоретически и экспериментально определена величина засаленного слоя при шлифовании алмазными кругами на металлической связке твердых сплавов. При затачивании необходимо создать условия в зоне резания, при которых взаимодействие связки и детали не будет сопровождаться образованием засаленного слоя. Таким условиям отвечают некоторые из комбинированных методов электроалмазного шлифования.

При подготовке к работе режущего инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов важное значение имеет качество формирования режущего лезвия, сведение к минимуму дефектов, особенно вблизи ре-

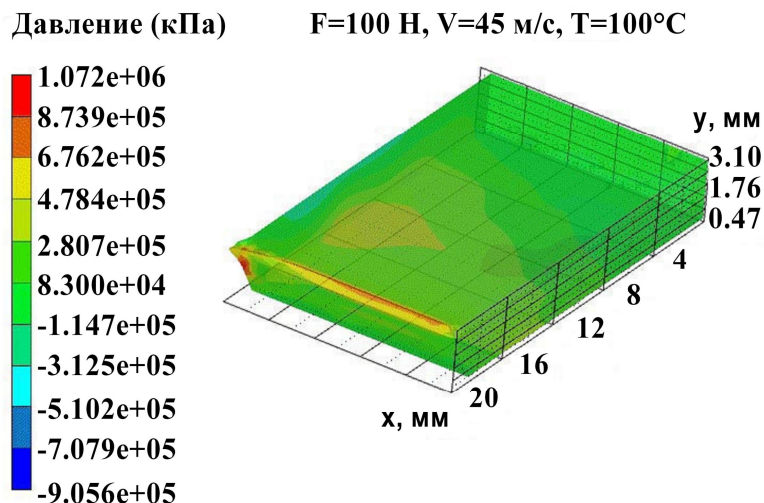
жущей кромки. Кроме того, существенным фактором, влияющим на износостойкость инструмента, является уровень остаточных напряжений на поверхностях инструмента и в приповерхностных слоях. Проблема актуальна при формообразовании режущих элементов из инструментальных материалов с повышенными эксплуатационными свойствами, где, как правило, наблюдается хрупкое разрушение материала под действием сил резания.

Практический интерес представляет изучение закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния в элементах режущего инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов, оснащенного высокопрочными инструментальными материалами, при затачивании алмазным кругом. Для исследования формирования напряженно-деформированного состояния в зоне затачивания пластины из твердого сплава создана вычислительная модель, разработанная в рамках подхода механики повреждаемых сред.

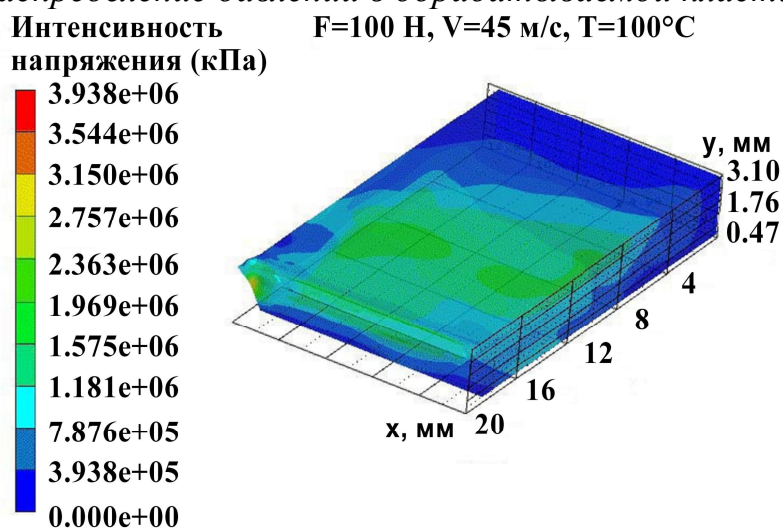
Разработана физико-математическая модель, включающая уравнения сохранения массы, импульса и энергии, записанные в рамках Лагранжевого подхода континуальной механики. Определяющее уравнение повреждаемой среды сформулировано с использованием модели Джонсона-Холквиста. Параметр поврежденности среды вычислялся путем суммирования приращений на дискретных интервалах времени, соответствующих шагу интегрирования. В качестве критерия пластичности использовано условие Мизеса.

Модель позволяет проводить оценку формирующегося при затачивании напряженно-деформированного состояния в обрабатываемой пластине и может быть адаптирована, при необходимости, для других композиционных высокопрочных и труднообрабатываемых материалов. Таким образом, имеется возможность оценить напряженно-деформированное состояние при различных сочетаниях абразивного инструмента и обрабатываемых композиционных материалов. Модель численно реализована на примере затачивания твердосплавной пластины из сплава марки ВК6 с углом при вершине  $60^\circ$ . Примеры численных исследований параметров пластины из сплава ВК6 в процессе алмазного затачивания представлены на Рисунке 1. Анализ численных исследований режущего элемента из сплава ВК6, выполненных на основе модели, позволил выявить следующее. 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. При силах резания до 100 Н серьезных разрушений режущей кромки не наблюдается. Зонами наибольшей концентрации напряжений являются участки по краям режущей кромки, где могут проследиваться частичные разрушения твердого сплава. При достижении сил резания свыше 100 Н наблюдается разрушение режущей кромки на протяжении всей длины лезвия. Для затачивания алмазным абразивным инструментом режущих элементов из инструментальных материалов (*WC-Co*), имеющих специфические геометрию и габаритные размеры, присущие для инструмента, обрабатывающего композиционные неметаллические материалы, рекомендуется устанавливать скорости резания в пределах от 33 м/с до 45 м/с.

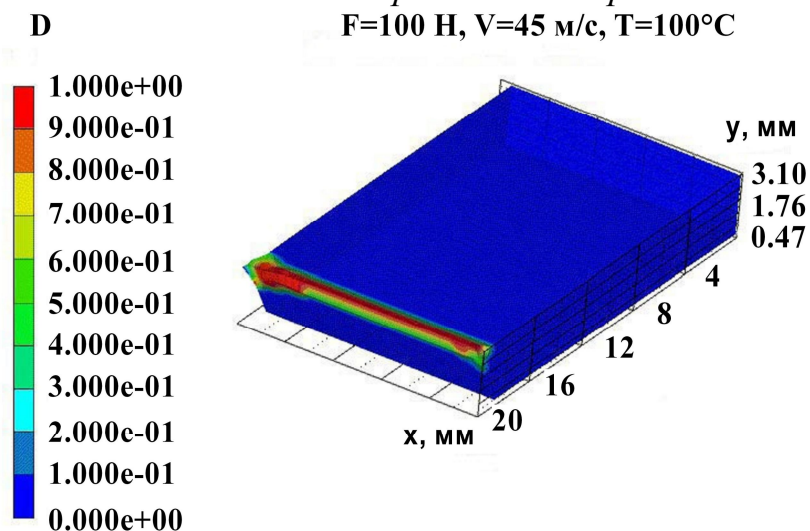




*а) распределение давлений в обрабатываемой пластине;*



*б) распределение интенсивности напряжений в обрабатываемой пластине;*



*в) распределение значений параметра поврежденности в пластине*

Рисунок 1. Примеры численных исследований параметров пластины инструмента для обработки композиционных материалов (сплав ВК6) в процессе алмазного затачивания

Анализ данных по распределению параметра поврежденности в обрабатываемой пластине, свидетельствует о том, что при температуре 1000 °С критические условия для возникновения микроповреждений в приповерхностных слоях, возникают при более низких силах резания, чем при температуре 430 °С.

Для достижения удовлетворительного качества подготовленных режущих поверхностей и лезвия инструмента для обработки композиционных материалов из твердых сплавов необходимо применять методы и условия обработки, гарантирующие силы резания, не превышающие 100 Н. Согласно результатам предварительных исследований сил резания при различных методах затачивания твердосплавного инструмента, таким требованиям отвечают современные комбинированные методы электроалмазной обработки. Такие методы шлифования способны повысить эффективность формообразования режущих элементов инструментов для обработки композиционных материалов за счет сочетания механического резания с электрохимическими и электрофизическими процессами.

Однако, к вопросу выбора видов и режимов комбинированного затачивания твердосплавного инструмента 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.

**В четвертой главе** представлены результаты исследования и разработки комбинированных методов изготовления и восстановления твердосплавного режущего инструмента для обработки композиционных материалов.

В качестве сравниваемых методов формообразования режущих элементов твердосплавного режущего инструмента, предназначенного для обработки композиционных неметаллических материалов, нами выбраны следующие способы алмазного шлифования:

1. Традиционное алмазное затачивание кругами на металлической связке без применения электрофизических и электрохимических процессов для сравнения комбинированных методов обработки с методами, используемыми на сегодняшний день на предприятиях 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.

3. Алмазное шлифование с непрерывной электрохимической правкой круга. Алмазный круг на металлической связке подключается к положительному полюсу источника постоянного тока, специальный катод – к отрицательному, а затачиваемый инструмент является электронейтральным.

4. Для сравнения с представленными выше известными методами предлагается разработанный нами комбинированный метод электрохимического шлифования с одновременной непрерывной правкой шлифовального круга. Сущность метода заключается в анодном растворении продуктов засаливания поверхности шлифовального круга на металлической связке, при котором круг работает в режиме самозатачивания, и одновременном разупрочнении рабочей

зоны затачиваемого твердосплавного инструмента под действием анодно-химических процессов.

Проведен ряд исследований, направленных на выявление рациональных электрических режимов комбинированной электроалмазной обработки. По результатам экспериментальных исследований получены теоретические модели зависимости от электрических режимов комбинированной обработки твердых сплавов марок ВК3М, ВК8, ВК15 и ТН20: шероховатости обработанной поверхности  $R_a = f(i_{np}, i_{mp})$ , расхода алмазного инструмента  $q = f(i_{np}, i_{mp})$  и мощности резания  $N = f(i_{np}, i_{mp})$ .

Для инструмента, оснащенного сплавом ВК3М зависимости имеют вид:

$$R_a = 0,2157 + 0,0174 \cdot i_{np} - 0,00065 \cdot i_{mp} - 0,0106 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (11)$$

$$q = 0,9875 + 0,5611 \cdot i_{np} + 0,019 \cdot i_{mp} + 0,0207 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (12)$$

$$N = 2,38 - 1,2321 \cdot i_{np} - 0,0122 \cdot i_{mp} + 0,00083 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (13)$$

Для инструмента, оснащенного сплавом ВК8 зависимости имеют вид:

$$R_a = 0,3286 + 0,1376 \cdot i_{np} - 0,00568 \cdot i_{mp} - 0,0017 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (14)$$

$$q = 0,723 + 0,8325 \cdot i_{np} - 0,005 \cdot i_{mp} + 0,0206 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (15)$$

$$N = 2,325 - 0,2497 \cdot i_{np} - 0,005 \cdot i_{mp} \quad (16)$$

Для инструмента, оснащенного сплавом ВК15 зависимости имеют вид:

$$R_a = 0,456 + 0,1098 \cdot i_{np} - 0,0083 \cdot i_{mp} - 0,0069 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (17)$$

$$q = 1,4455 + 3,3383 \cdot i_{np} + 0,05 \cdot i_{mp} + 0,125 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (18)$$

$$N = 2,5 - 0,333 \cdot i_{np} - 0,0025 \cdot i_{mp} + 0,01665 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (19)$$

Для инструмента, оснащенного сплавом ТН20 зависимости имеют вид:

$$R_a = 0,2685 + 0,0618 \cdot i_{np} - 0,0018 \cdot i_{mp} + 0,0054 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (20)$$

$$q = 1,417 + 2,2877 \cdot i_{np} + 0,007 \cdot i_{mp} + 0,0078 \cdot i_{np} \cdot i_{mp} \quad (21)$$

$$N = 2,15 - 0,1665 \cdot i_{np} - 0,005 \cdot i_{mp} \quad (22)$$

Анализ полученных данных позволил определить диапазон рациональных электрических режимов комбинированной обработки, обеспечивающих удовлетворительный расход алмазного круга, допустимое значение мощности резания при приемлемых для чистовой обработки качественных параметрах поверхности твердого сплава:  $i_{np} = 0,2 \dots 0,3$  А/см<sup>2</sup> и  $i_{mp} = 20 \dots 30$  А/см<sup>2</sup>.

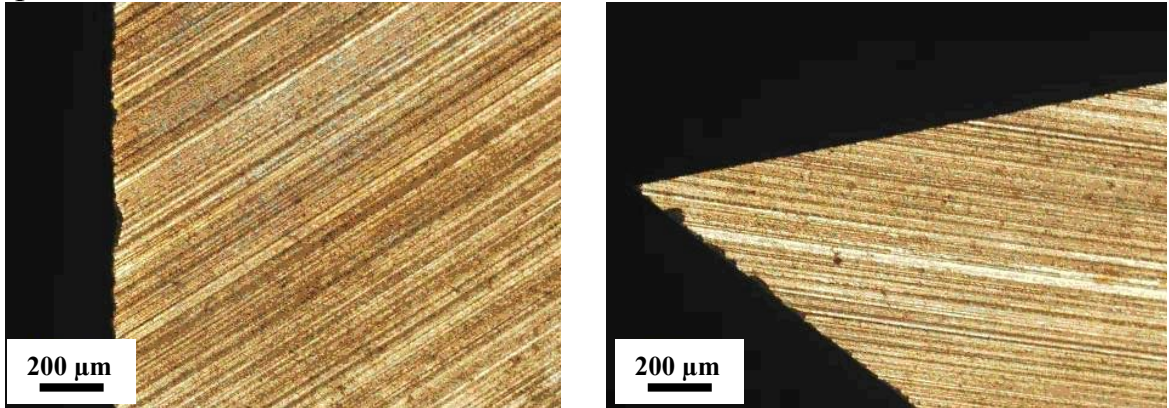
В качестве рациональных механических режимов обработки приняты режимы, определенные по результатам ранее проведенных исследований: продольная подача  $S_{пр} = 1,5$  м/мин, поперечная подача  $t = 0,02$  мм/дв.ход, скорость  $V = 35$  м/с. Данные режимы приняты в дальнейшем для проведения сравнительных исследований различных методов обработки, с целью выявления рационального метода формообразования режущей части инструмента для обработки композиционных материалов. При исследованиях использовался алмазный круг на металлической токопроводящей связке марки 12А2 - 45 100/80 М1 - 01 АС6 150×10×3×40×32. В качестве рабочей среды применялся электролит:  $NaNO_3 - 3 \dots 5 \%$ ,  $NaNO_2 - 2 \%$ ,  $Na_2CO_3 - 1 \%$ ,  $H_2O$  – остальное.

В представленных условиях выполнены исследования по выявлению влияния методов электроалмазной обработки на качество обработанных поверхностей и режущей кромки, расход алмазных кругов на металлической связке, изменение полной мощности резания и микротвердости обработанных поверхностей.

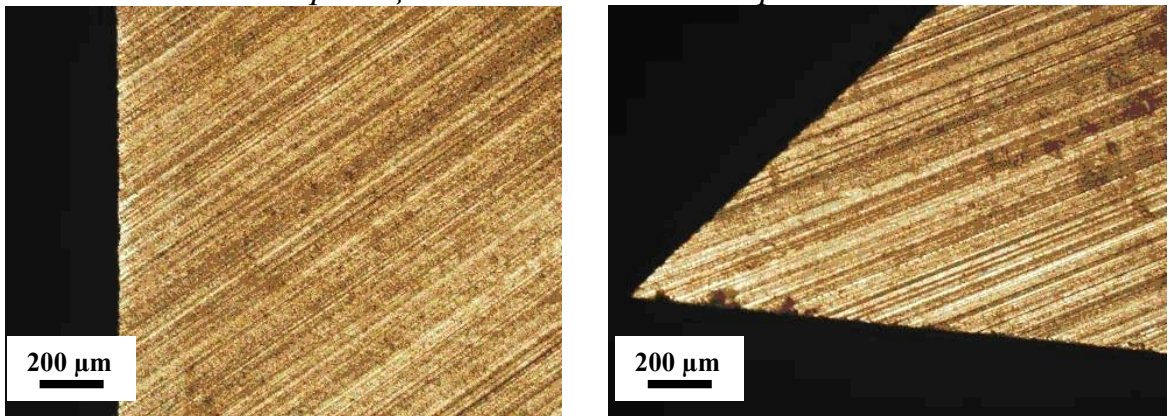
С использованием оптической, растровой электронной, сканирующей



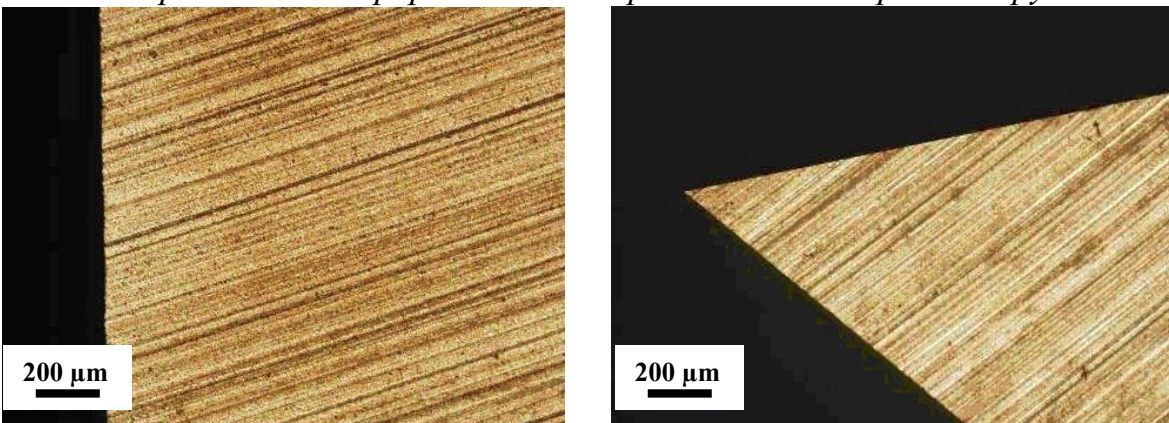
зондовой микроскопии, оптической интерферометрии исследовано состояние поверхностей и режущей кромки твердосплавных инструментов, заточенных различными методами электроалмазной обработки. Использование различных методик позволило провести разносторонний анализ состояния рабочих поверхностей и режущих элементов инструментов для обработки композиционных материалов, имеющих специфические требования к геометрическим параметрам, микрогеометрии и качеству полученных в процессе формообразования поверхностей.



*традиционное алмазное шлифование*



*шлифование с непрерывной электрохимической правкой круга*



*комбинированное алмазное шлифование*

Рисунок 2. Пример состояния передней поверхности, режущей кромки и режущего клина инструмента для обработки композиционных материалов, оснащенного сплавом ВК8, после затачивания различными методами электроалмазного шлифования

На Рисунке 2 представлены примеры результатов исследования состояния передней поверхности, режущей кромки и режущего клина инструмента для обработки композиционных материалов, оснащенного сплавом ВК8, после затачивания различными методами электроалмазного шлифования.

С применением сканирующей зондовой микроскопии получены модели участков поверхностей твердосплавного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов, позволяющие оценить качество заточенных поверхностей после обработки различными методами электроалмазного шлифования. Пример сравнительного анализа моделей заточенных поверхностей инструмента, оснащенного твердым сплавом ТН20, показан на Рисунке 3.

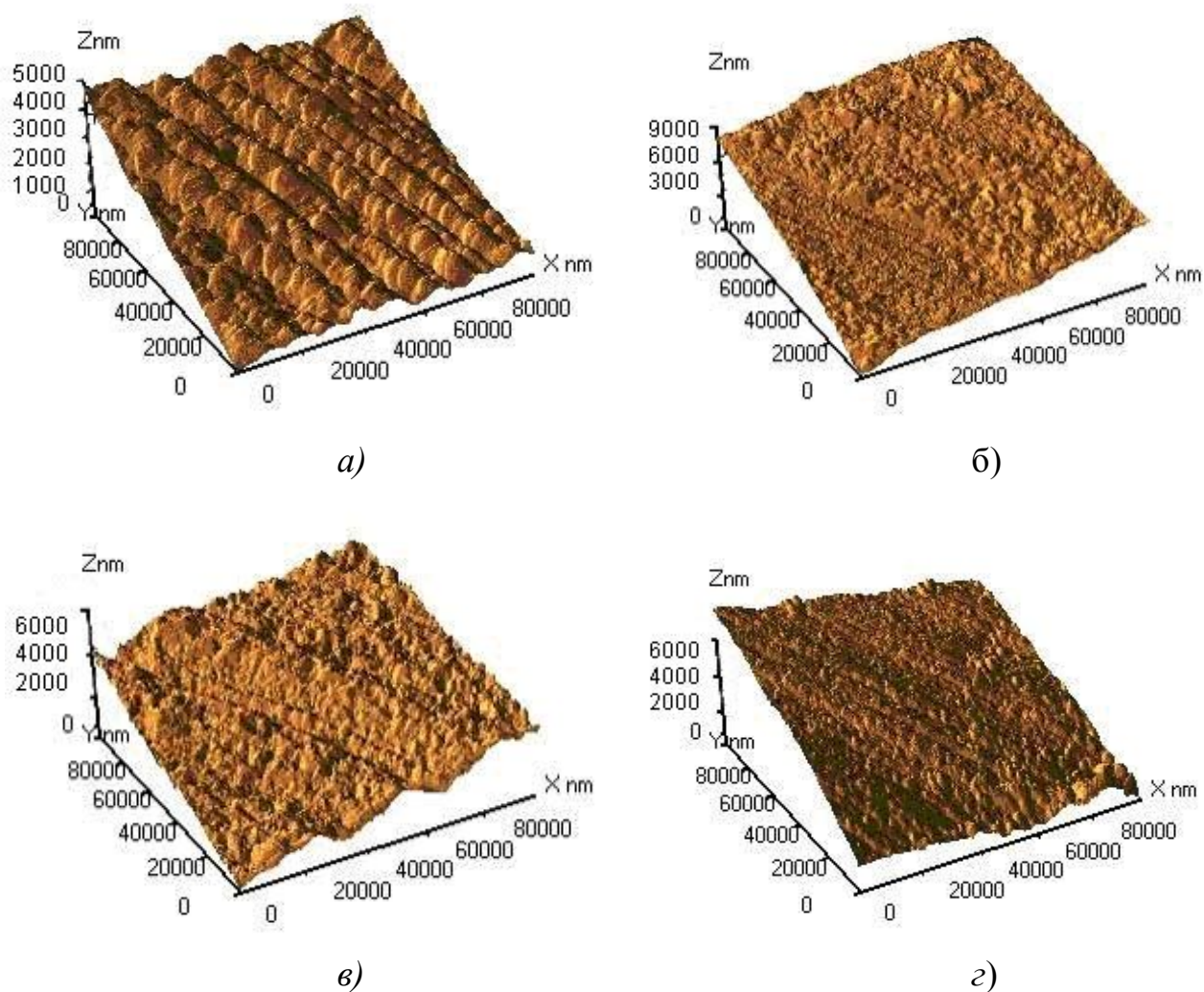


Рисунок 3. Модели участка поверхности твердого сплава ТН20 после обработки различными методами электроалмазного шлифования

- а) традиционное алмазное шлифование, б) электрохимическое шлифование  
 в) алмазное шлифование с непрерывной электрохимической правкой круга;  
 г) комбинированный метод

На Рисунке 4 представлены экономические и качественные показатели обработки сплава ВК3М различными методами электроалмазного шлифования.



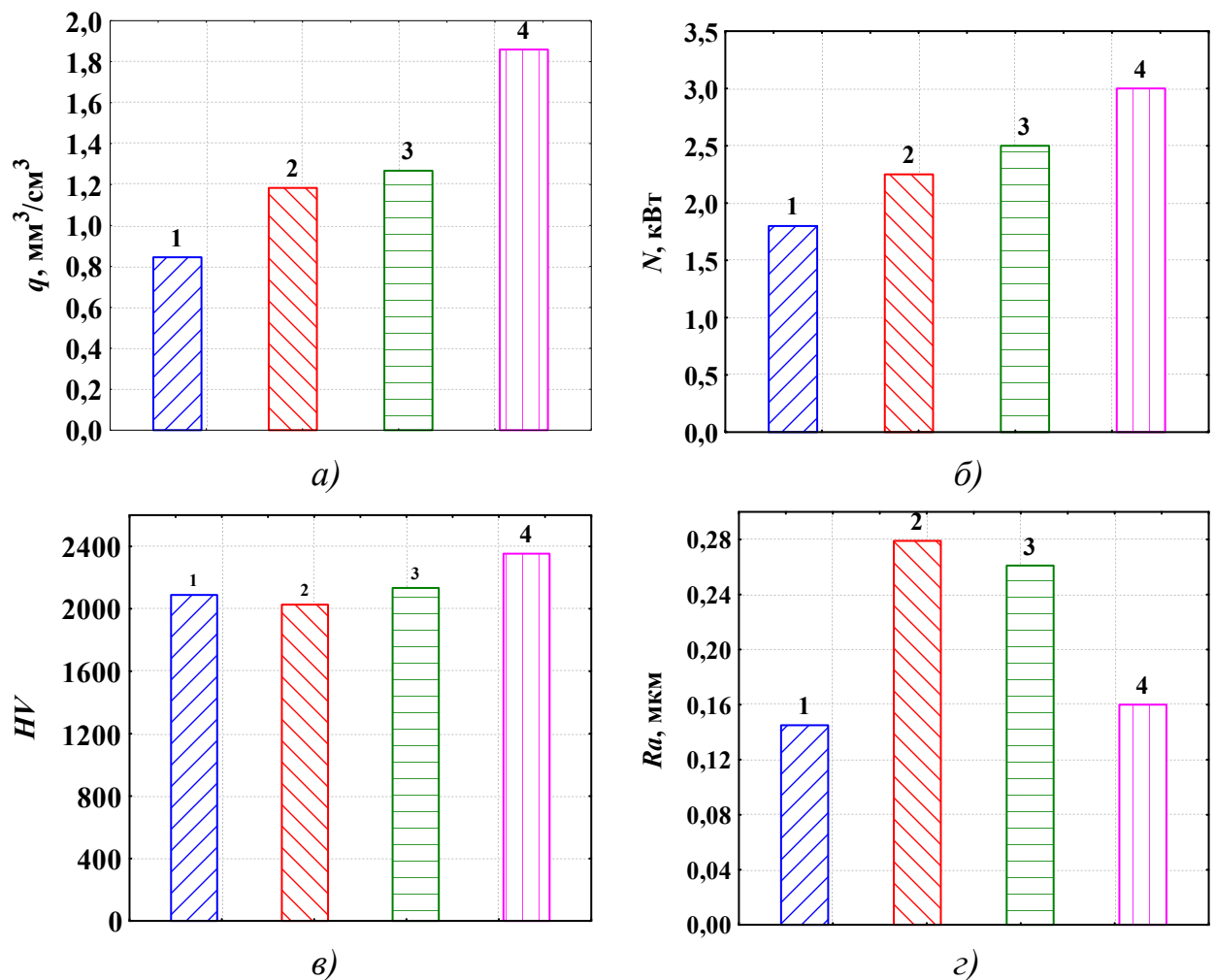


Рисунок 4. Экономические и качественные показатели обработки сплава ВКЗМ различными методами электроалмазного шлифования

а) расход круга, б) полная мощность, в) микротвердость обработанной поверхности, г) шероховатость обработанной поверхности

1) комбинированный метод; 2) алмазное шлифование с непрерывной электрохимической правкой круга; 3) электрохимическое шлифование; 4) традиционное алмазное шлифование

Анализ экспериментальных данных выявил неоднозначность результатов по каждому из методов комбинированного алмазного шлифования. В связи с этим, для рационального выбора метода комбинированной обработки при затачивании 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). Разработана методика, позволившая учесть как качество обработки, так и частичную стоимость операций затачивания режущего инструмента. 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 конфигура-

ции и размеров, взята за оценочный параметр величина затрат на изменение исходного качества после обработки комбинированным методом.

$$Z_{\text{кач}i} = \frac{(N_i \cdot T_{oi} \cdot C_{\text{эл.энер}} + C_{\text{инстр}} \cdot q_i \cdot V_{\text{мат}i}) \cdot Ra_{\text{обр}i} \cdot HV_{\text{исх}i}}{Ra_{\text{исх}i} \cdot HV_{\text{обр}i}} \quad (23)$$

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;  $C_{\text{эл.энер}}$  – стоимость единицы электрической энергии, руб/кВт·ч;  $C_{\text{инстр}}$  – 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>;  $V_{\text{мат}i}$  – объем снятого обрабатываемого материала при  $i$ -ом методе обработки, см<sup>3</sup>;  $Ra_{\text{обр}i}$  – шероховатость, полученная после обработки  $i$ -ым методом, мкм;  $HV_{\text{исх}i}$  – исходная микротвердость поверхности;  $Ra_{\text{исх}i}$  – исходная шероховатость поверхности, мкм;  $HV_{\text{обр}i}$  – микротвердость поверхности, полученная после обработки  $i$ -ым методом.

Разносторонний сравнительный анализ подтвердил преимущества комбинированного метода электрохимического шлифования с одновременной непрерывной правкой шлифовального круга. Эффективность применения метода повышается при формообразовании инструментов для обработки композиционных материалов, оснащенных высокопрочными труднообрабатываемыми материалами.

**В пятой главе** представлены результаты экспериментальных исследований процесса обработки композиционных неметаллических материалов твердосплавным фрезерным инструментом.

Исследования проводились с целью оценки возможности использования в конструкциях инструмента различных марок инструментальных высокопрочных материалов, а также для определения рациональных характеристик процесса резания, геометрических параметров инструмента, гарантирующих высокое качество обработанной поверхности. Другой целью проводимых исследований являлась оценка работоспособности подготовленного инструмента и качества обработки на различных видах композиционных материалов, для реализации результатов исследований в различных областях промышленности

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. Для исследования процесса обработки композиционных материалов фрезерным инструментом выбраны представители групп материалов, чаще всего на сегодняшний день подвергаемых обработке резанием: древесно-стружечные плиты марки П-А и стеклотекстолит марки СТЭФ-1.

Определены параметры, характеризующие качество обработки таких материалов и характеристики инструмента, определяющие технологический период стойкости, гарантирующий требуемые качественные показатели обрабо-

танной поверхности изделий из композиционных материалов. Согласно предварительным опытам по достижении величины фаски износа по задней поверхности  $h_3 = 0,3$  мм качество обработанной поверхности значительно ухудшается 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.

Проведена серия опытов по определению технологической стойкости инструмента, оснащенного инструментальными материалами Т5К10, Т15К6, Т30К4, ВК3М, ВК8, ВК6, ВК15, при обработке древесно-стружечные плиты марки П-А. Инструментом, предварительно заточенным комбинированным методом электроалмазной обработки, фрезеровался композиционный материал со следующими режимами резания: число оборотов шпинделя  $n = 6000$  мин<sup>-1</sup>; глубина фрезерования  $t = 1$  мм; продольная подача  $S_{np} = 1,5$  м/мин.

Результаты проведенных исследований позволили получить аналитические зависимости величины фаски износа по задней поверхности инструмента от времени обработки композиционного материала инструментом, оснащенным различными марками твердого сплава.

$$\text{Т5К10} \quad h_3(T) = 0,039 \cdot T^{0,382} - 8,67 \cdot 10^{-3} \quad (24)$$

$$\text{Т15К6} \quad h_3(T) = 0,017 \cdot T^{0,516} - 0,014 \quad (25)$$

$$\text{Т30К4} \quad h_3(T) = 0,022 \cdot T^{0,446} - 6,954 \cdot 10^{-3} \quad (26)$$

$$\text{ВК15} \quad h_3(T) = 7,541 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0,612} + 1,609 \cdot 10^{-3} \quad (27)$$

$$\text{ВК8} \quad h_3(T) = 4,668 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0,677} - 6,013 \cdot 10^{-4} \quad (28)$$

$$\text{ВК6} \quad h_3(T) = 1,4 \cdot 10^{-2} \cdot T^{0,464} - 1,719 \cdot 10^{-4} \quad (29)$$

$$\text{ВК3М} \quad h_3(T) = 5,925 \cdot 10^{-4} \cdot T^{0,817} - 6,654 \cdot 10^{-3} \quad (30)$$

Анализ зависимостей выявил, что среди сплавов вольфрамокобальтовой группы (ВК) и титановольфрамокобальтовой группы (ТК) лучшая работоспособность у инструмента, оснащенного сплавом марки ВК3М. Это позволяет рекомендовать сплав для оснащения режущего инструмента для фрезерования композиционных материалов с целью повышения эффективности обработки.

Представляет интерес установления функциональной зависимости износа инструмента, оснащенного различными марками твердого сплава группы, не только от времени обработки композиционного материала, но и от процентного содержания кобальтовой связки в инструментальном твердом сплаве, т.е. получить зависимость вида  $h_3 = f(Co, T)$ .

По результатам исследований получены поверхности отклика, характеризующие зависимость величины фаски износа по задней поверхности инструмента, оснащенного твердым сплавом групп ТК и ВК, от продолжительности периода технологической стойкости инструмента и изменения процентного со-



держания связки ( $Co$ ) в твердом сплаве. Полученные поверхности откликов стойкости твердых сплавов групп ВК и ТК использованы в качестве базы знаний для сравнительного анализа конструкций инструмента при обработке композиционных материалов на древесной основе и выявления рационального конструктивного решения.

Достижение эффективной обработки композиционных материалов прогрессивным инструментом возможно лишь при совместном рациональном выборе инструментального материала, геометрических параметров инструмента и режимов обработки.

Для исследования эффективности обработки композиционных материалов фрезерным инструментом была проведена серия опытов по определению влияния режимов резания и геометрии режущего элемента на технологическую стойкость инструмента.

В результате обработки экспериментальных данных получена математическая модель второго порядка, адекватно описывающая влияние частоты вращения шпинделя станка, подачи, глубины резания и угла заострения (при постоянном значении переднего угла) на стойкость режущего инструмента при обработке композиционных материалов на древесной основе  $T = f(S, n, t, \beta)$ .

$$T = 3247,429 + 0,115 \cdot n + 176,44 \cdot S - 278,128 \cdot t - 97,35 \cdot \beta + \\ + 0,002 \cdot n \cdot S + 0,015 \cdot n \cdot t - 0,003 \cdot n \cdot \beta + 11,437 \cdot S \cdot t - \\ - 2,725 \cdot S \cdot \beta - 1,75 \cdot t \cdot \beta - 8,175 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 - 11,237 \cdot S^2 + \\ + 23,3 \cdot t^2 + 1,552 \cdot \beta^2. \quad (31)$$

Производительность, обычно зависящая от работоспособности инструмента, не является единственным параметром, определяющим эффективную обработку композиционных материалов. 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 установления влияния режимов резания и геометрических параметров режущего инструмента на качество обработанных поверхностей изделий из композиционных материалов на древесной основе проведена серия опытов, обработка результатов которых позволила получить математическую модель, адекватно описывающую влияние скорости резания, подачи, глубины резания и угла заострения на шероховатость поверхности  $R_{max} = f(S, n, t, \beta)$ .

$$R_{max} = -32,913 - 0,012 \cdot n + 8,384 \cdot S + 19,777 \cdot t + 4,318 \cdot \beta + \\ + 0,0002 \cdot n \cdot S + 0,0001 \cdot n \cdot t - 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot n \cdot \beta + 1,625 \cdot S \cdot t - \\ - 0,312 \cdot S \cdot \beta - 0,55 \cdot t \cdot \beta + 6,125 \cdot 10^{-7} \cdot n^2 + 0,675 \cdot S^2 + \\ + 1,2 \cdot t^2 + 0,008 \cdot \beta^2. \quad (32)$$

Анализ теоретических и экспериментальных исследований процесса фрезерования композиционных материалов на древесной основе режущим инструментом, оснащенным прогрессивными инструментальными материалами, позволил сделать следующие выводы. При фрезеровании композиционных мате-

риалов 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  $\beta = 60^\circ$  (при постоянном значении угла  $\gamma$ ).

Кроме того, проведена серия экспериментальных исследований процесса фрезерования полимерных композиционных материалов. Для исследований инструмент оснащался твердыми сплавами группы ВК. Группа инструментальных материалов выбрана на основе исследования работоспособности инструмента при обработке композиционных материалов на древесной основе. В качестве полимерного композиционного материала использован стеклотекстолит марки СТЭФ-1. Обоснование выбора режимов обработки, инструментальных и обрабатываемого материалов представлено в тексте диссертации.

Результаты экспериментов по определению технологического периода стойкости инструмента при обработке полимерных композиционных материалов позволили получить степенные модели зависимости периода технологической стойкости от режимов обработки инструментом, оснащенным разными марками инструментальных твердых сплавов группы ВК.

$$\text{Для ВК8: } T = 0,82 \cdot S_z^{4,75 + 2,94 \ln S_z + 2,38 \ln t} \cdot t^{0,46 + 1,13 \ln t}, \text{ мин.} \quad (33)$$

$$\text{Для ВК15: } T = 2,6 \cdot S_z^{2,08 + 1,11 \ln S_z + 3,02 \ln t} \cdot t^{2,54 + 0,65 \ln t}, \text{ мин.} \quad (34)$$

$$\text{Для ВК3М: } T = 0,64 \cdot S_z^{3,49 + 2,42 \ln S_z + 3,44 \ln t} \cdot t^{2,05 + 1,04 \ln t} \text{ мин.} \quad (35)$$

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что максимальную работоспособность в заданных условиях 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, угол заострения режущего элемента  $\beta = 60^\circ$ .

Таким образом, для достижения высоких качественных показателей обработанных поверхностей из композиционных материалов необходимо стремиться к повышению скорости резания в сочетании с рациональной геометрией. Варьирование глубиной резания и подачей позволит управлять, в этом случае, производительностью обработки.

**В шестой главе** приведены практические рекомендации по повышению эффективности обработки композиционных неметаллических материалов фрезерным твердосплавным инструментом.

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, что положительно сказывается на качестве выпускаемой продукции и эффективности производства.

Представлены теоретико-экспериментальные исследования эффективности применения различных марок инструментальных материалов в конструкциях инструмента для обработки композиционных материалов.

В главе рассмотрены примеры реализации 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 обоснованного выбора конструктивных решений инструмента при варьируемых условиях сопоставимости.

Представлены рекомендации по изготовлению и восстановлению инструмента рациональными методами путем качественного формообразования рабочих поверхностей и создания требуемой геометрии инструмента для обработки композиционных материалов, оснащенного прогрессивными инструментальными материалами являются комбинированные методы электроалмазной обработки.

Предложены рекомендации по модернизации заточного оборудования под процессы комбинированной электроалмазной обработки: по выбору технологических режимов, характеристик абразивного инструмента, специальной оснастки, состава технологических сред. Рекомендации направлены на реализацию предложенной технологии, ориентированной на обеспечение высокого качества режущих элементов инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов, оснащенного инструментальными материалами с повышенными эксплуатационными свойствами.

Инструмент, подготовленный с учетом системы представленных мероприятий, обладает повышенной работоспособностью, снижает силы 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.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Дальнейшее развитие тематики исследования предполагает изучение обрабатываемости резанием широкой гаммы современных российских и зарубежных композиционных материалов: полимерных, древесных, углерод-углеродных, керамических и металлических. Планируется изучить особенности, производительность и качество обработки изделий из композиционных материалов инструментом, оснащенным широкой гаммой высокопрочных, износостойких инструментальных материалов, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью.

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. Требуются научно – обоснованные рациональные электрические и механические режимы обработки таких инструментальных материалов, совершенствование технологических сред и ос-

настки для эффективной обработки такими методами.

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 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.

Для получения изделий из композиционных материалов с гарантированным качеством и размерной точностью изготовленных поверхностей необходим инструмент, 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 другие виды сборных инструментов. Такой подход позволит оценить и систематизировать широкую гамму сборного режущего инструмента для обработки композиционных материалов. Эти шаги расширят возможности реализации методик, представленных в работе, и созданного на их основе программного обеспечения для формирования, хранения и использования информационной базы данных по видам сборного инструмента. Кроме того, такие мероприятия значительно автоматизируют подготовку инструмента на предприятиях любой другой отрасли промышленности, где реализована лезвийная обработка изделий сборным инструментом.

Для более широкой оценки и анализа конструкции режущего инструмента при варьируемых условиях сопоставимости целесообразно введение в представленную в работе методику большего числа факторов и характеристик. Это позволит оперативно реагировать на вероятностные изменения в условиях и методах обработки изделий разной номенклатуры и типоразмеров на любом виде технологического оборудования. Такое совершенствование методик приведет к созданию новых программных продуктов для их реализации. Подобный подход позволит значительно повысить гибкость производства и, как следствие, сократить сроки освоения новой продукции.

Становится актуальной задача исследования таких операций механической обработки композитов как сверление, зенкерование, развертывание, внутреннее и наружное точение и другие. Это даст возможность оптимизировать процессы получения деталей любой конфигурации, что значительно расширит

область применения изделий из композиционных материалов. Понадобятся рациональные научно - обоснованные математические модели и режимы обработки, характерные для этих процессов, гарантирующие требуемое качество изделий из композитов на различных операциях механической обработки.

### **Заключение**

В представленной работе изложена система научно обоснованных технических и технологических решений, позволяющих повысить эффективность работы фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов и расширить область применения изделий из них. Внедрение предложенных мероприятий вносит значительный вклад в развитие экономики страны.

1. Разработаны теоретические положения и научно-обоснованная методика моделирования и систематизации сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов, позволившие математически описать конструктивные и геометрические особенности, определить характер структурных связей в системе инструмента. Разработанные программные продукты в целях 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.

2. Предложена методика многокритериального сравнительного анализа конструктивных решений инструмента для выбора рациональной конструкции при варьируемых условиях сопоставимости. Создан программный комплекс 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 рациональной 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.

3. Спроектированы новые конструкции сборного фрезерного инструмента, увеличивающие его технологические возможности, снижающие расход инструментальных материалов, простои, связанные с переналадкой инструмента и его заменой при потере режущей способности и отличающиеся повышенной точностью и надежностью при обработке композиционных материалов. По результатам исследований целесообразности 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.

4. Разработана физико-математическая модель процессов деформации, по-

вреждения и разрушения инструментальных материалов типа WC-Co при алмазном затачивании на основе теоретических положений механики повреждаемых твердых сред. Модель адаптируется и для других высокопрочных и труднообрабатываемых инструментальных материалов. Реализована возможность оценки формирующегося при алмазном затачивании напряженно-деформированного состояния в затачиваемой пластине с определенными 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. Выявлено при анализе результатов численного моделирования, что для качественного затачивания твердосплавного режущего инструмента рекомендованы комбинированные методы электроалмазного шлифования.

5. Установлены закономерности влияния комбинированных методов электроалмазной обработки на экономические и качественные параметры обработки. Обоснованы преимущества комбинированного метода электроалмазного 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 %.

6. Разработаны рекомендации по модернизации технологического оборудования под процессы комбинированной электроалмазной обработки, выбору абразивного инструмента и технологических сред. Научно-обоснованы технологические режимы, позволяющие с гарантированным качеством затачивать твердосплавные режущие инструменты комбинированным методом электроалмазной обработки: 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. Исследован процесс обработки композиционных неметаллических материалов инструментом, подготовленным с учетом рекомендаций по созданию, изготовлению и анализу конструктивных решений. Получены 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. Установлено, что для достижения высоких качественных показателей поверхностей обработанных изделий из композиционных неметаллических материалов необходимо стремиться к повышению скорости резания и уменьшению величины угла при вершине режущего элемента.

8. Экспериментально обоснованы геометрические параметры инструмента: 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 композиционных материалов: передний угол  $\gamma = 15...20^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 10...15^\circ$ ; угол заострения  $\beta = 55...60^\circ$ .

Рекомендуемые режимы, гарантирующие высокое качество обработки:

- для композиционных материалов на древесной основе: подача на зуб  $S_z = 0,10...0,15$  мм/зуб; глубина резания  $t = 0,5...1$  мм;

- для полимерных композиционных материалов: подача на зуб  $S_z = 0,15...0,17$  мм/зуб; глубина резания  $t = 0,5...0,6$  мм

при скоростях резания, максимально допустимых технологическим оборудованием.

9. Новизна разработанных на основе результатов проведенных исследований конструкций инструментов, устройств, оснастки и программного обеспечения подтверждена 8 патентами РФ и свидетельствами на регистрацию программ для ЭВМ. Результаты работы прошли апробацию на промышленных предприятиях Иркутской области, Красноярского края и Республики Монголия. Экономический эффект от внедрения результатов исследований составляет более 1,5 млн. руб.

#### **Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:**

##### **Монографии**

1. 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.

2. Лобанов, Д.В. Подготовка режущего инструмента для обработки композиционных материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин: монография. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2011. – 192 с.

3. Лобанов, Д.В. Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин: монография // Тонкие наукоемкие технологии. Старый Оскол. - 2012. - 296 с.

##### **Статьи, опубликованные в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора технических наук**

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. Рычков, Д.А. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. Лобанов, Д.В. Организационно-технологическая подготовка инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. - № 2-2 (292). – С. 17-23.

13. Рычков, Д.А. Совершенствование технологии формообразования высокопрочных стекловолоконистых композиционных материалов на полимерной основе / Д.А. Рычков, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, В.В. Базаркина // Обработка металлов. – 2012 - № 3 (56) – С. 150 – 153.

14. Скрипняк, В.В. Механические свойства наноструктурной керамики на основе диборида циркония / В.В. Скрипняк, И.К. Ваганова, В.А. Скрипняк, Е.Г. Скрипняк, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. - № 7/2 (Том 55). – С. 119 – 123.

15. Янюшкин, А.С. Потеря режущей способности алмазных кругов на металлической связке при шлифовании композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, П.В. Архипов // Вестник СибГАУ. – 2013. - № 1 (47) – С. 187 – 183.

16. Янюшкин, А.С. Особенности фрезерования полимерных композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Д.В. Лобанов, Е.В. Ткаченко, Н.А. Ткаченко // Системы. Методы. Технологии. - 2013. - № 2. – С. 88 – 90.

17. Лобанов, Д.В. Автоматизация организационной подготовки инструмента для обработки композиционных материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин // Автоматизация и современные технологии. – 2013. - № 3. С. 3 – 9.

#### **Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:**

18. Патент RU 2228621 / МПК С2 В27 G13/12. Сборная фреза для деревообработки [Текст] / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов. - № 2002117387/02; 10.05.2004.

19. Патент RU 2239525 / МПК С1 В23 Н5/00, В24 В53/00. Устройство для комбинированной электроалмазной обработки с непрерывной правкой круга [Текст] / А.С. Янюшкин, С.П. Ереско, А.А. Сурьев, Д.В. Лобанов, А.М. Кузнецов. - № 2003105413; 10.11.2004.

20. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Определение оптимальной конструкции инструмента. (Optim tool v.1.0) / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, К.В. Сопин, А.М. Кузнецов. - № 2004612489; 2004.11.11.



21. Патент RU 2257289 / МПК В27 G13/12. Сборная фреза для деревообработки [Текст] / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, А.М. Кузнецов. № 2004109804/0220; 2005.07.27.

22. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Формирование базы данных фрезерного сборного инструмента. (DB Tools v.1.0) / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков. - № 2007613694 08; 29.2007.

23. Патент RU 2325272 С2 / МПК В27 G13/00. Сборная фреза для деревообработки [Текст] // А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, А.А. Сурьев, А.М. Кузнецов, М.В. Сталидзан. - № 2006124008/03; 27.05.2008.

24. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Формирование базы данных инструментов с возможностью выбора оптимальной конструкции фрезерного инструмента для заданных условий производства (DB Tools v.2.0) / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков. - № 2010615966; 13.09.2010.

25. Патент RU № 2446039 С2 / МПК В24В53. Конструкция катода для правки круга при комбинированной электроалмазной обработке [Текст] / 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. № 2010111574/02; 25.03.2010.

**Публикации, не вошедшие в перечень ведущих периодических изданий:**

26. 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].

27. 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].

28. Янюшкин, А.С. Повышение качества затачивания инструмента для обработки 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.

29. 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 ВШР России, №2 (9), 2006. – С. 100-104.

30. Янюшкин, А.С. Программные продукты для автоматизации подготовки инструментального производства на предприятиях / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Ползуновский альманах. – 2008. - № 4. – С. 214-216.

31. Янюшкин, А.С. Повышение качества подготовки твердосплавного инструмента / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, С.В. Ковалевский // Системы. Методы. Технологии. №1. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. – С. 95-98.

32. 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.

33. 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.

34. 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.

35. 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.

36. 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.

37. Янюшкин, А.С. Автоматизация технологической подготовки производства при выборе режущего инструмента / А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Д.В. Лобанов // Мир техники и технологий. Международный промышленный журнал. – 2013. - №6 (139). С. 36–38.

#### **Публикации в других изданиях и сборниках трудов:**

38. 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. Сборник научных трудов / Под ред. Е.А.Памфилова. – Выпуск 3. Брянск: БГИТА, 2004. - С. 60-63.

39. Янюшкин, А.С. Автоматизация процесса создания баз данных сборного фрезерного инструмента / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых. Новосибирск.: Изд-во НГТУ, 2007. Часть 3 269 - С. 33-36.

40. 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. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. - Красноярск, 2007. – С. 185-186.

41. Янюшкин, А.С. Технология подготовки к работе фрезерного сборного дереворежущего инструмента / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XIV международной научно-технической конференции. 2007 г. - Донецк: ДонНТУ, 2007, Т.2 – С. 262-267.

42. 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. трудов XXI Междунар. науч. конф.: в 10 т. Т. 4. Саратов: Саратов. гос. техн. Ун-т, 2008. - С. 49-51.

43. 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 научно-техническая конференция с международным участи-

ем: сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2008. – С. 203-205.

44. 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 научно-техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. – Кн. 2. – С. 94-98.

45. Ковалевский, С.В. Исследование технологических возможностей применения прогрессивного режущего инструмента / С.В. Ковалевский, А.Ф. Покидько, Д.В. Лобанов // Нейросетевые технологии и их применение: сборник трудов VII международной научной конференции. – Краматорск: ДГМА, 2009. – С.72-77.

46. Янюшкин, А.С. Комплексная автоматизация проектирования, подготовки и управления инструментальным производством / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков, Т.Е. Лисова // Современные проблемы механики. Материалы Международной научно-технической конференции. – Ташкент – 2009. – С. 358-362.

47. 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.

48. 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. / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. - Красноярск, 2009. – Ч. 2 - С. 480-481.

49. 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.

50. Рычков, Д.А. 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.

51. 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.

52. Янюшкин, А.С. Методика расчета эффективности применения инструмента, оснащенного прогрессивными инструментальными материалами / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, О.Г. Боловина // Механики XXI века. IX Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2010. – С. 39-41.

53. 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: КБТУ, 2012. Т.1. – С.351-356.

54. Лобанов, Д.В. Перспективы развития электрохимического шлифования деталей машин и инструмента / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин // Материалы пятой международной конференции «Проблемы механики современных машин». – Улан-Удэ, 2012. – Т.3. – С.167-171.

55. Лобанов, Д.В. Технология изготовления и выбора инструмента для рациональной обработки изделий из композиционных неметаллических материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин // Решетневские чтения: материалы XVI Междунар. науч. конф. - Красноярск, 2012. – Ч. 1 - С. 234-238.

56. Ковалевский, С.В. Исследование методов адаптации инструмента технологической системы с помощью нейронных сетей / С.В. Ковалевский, Т.А. Федюк, Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин // Нейросітьові технології і їх застосування: збірник праць Міжнародної наукової конференції «Нейросітьові технології і їх застосування». – Краматорськ: ДДМА, 2012. – С. 74–77.

57. Янюшкин, А.С. Оптимизация процессов комбинированной электроалмазной обработки / А.С. Янюшкин, Д.С. Максудинов, Д.В. Лобанов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки развитию регионов Сибири. Юбилейный выпуск к 55-летию Братского государственного университета. – Братск: Изд-во БрГУ, 2012. – 203 с. - С. 64 - 70.

58. Медведева, О.И. Анализ геометрии контактного взаимодействия алмазного круга с обрабатываемой деталью при плоском шлифовании / О.И. Медведева, А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, П.В. Архипов // Механики XXI века. XII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сборник докладов. – Братск: Изд-во БрГУ, 2013. – 266 с. - С. 104 – 107.

59. Лобанов, Д.В. Расширение области использования полимерных композиционных материалов за счет совершенствования режущего инструмента для их обработки / Д.В. Лобанов, Н.В. Иванов // Молодая мысль: Наука. Технологии. Инновации: материалы V (XI) Всероссийской научно-технической конференции. – Братск: ФГБОУ ВПО «БрГУ», 2013. – 238 с. - С. 189 – 190.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
тел./факс (383) 346-08-57

Формат 60×84 1/16, объём 2 п.л., тираж экз.

Заказ №      подписано в печать      . 2013