

БЕЛОРУСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.91.01:621.762.8

МИХАЙЛОВ
Михаил Иванович

**ТЕОРИЯ, РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ
СБОРНОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
С АВТОМАТИЧЕСКОЙ СМЕНОЙ РЕЖУЩИХ КРОМОК
ДЛЯ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук
по специальности 05.02.07– Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Минск, 2014

Работа выполнена в учреждении образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого» и ГНУ «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси»

Научный консультант

Плескачевский Юрий Михайлович,

заслуженный деятель науки Республики Беларусь, член-корр. НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор, председатель президиума Гомельского филиала НАН Беларуси

Официальные оппоненты:

Хейфец Михаил Львович, доктор технических наук, профессор, заместитель академика-секретаря отделения физико-технических наук НАН Беларуси;

Данилов Виктор Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология и оборудование машиностроительного производства» УО «Полоцкий государственный университет»;

Шатуров Геннадий Филиппович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

Оппонирующая организация

ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»

Защита диссертации состоится «9» января 2015 г. в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корп.1, ауд. 202, тел. ученого секретаря: 292 24 04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «9» декабря 2014 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.03,
доктор технических наук, профессор

Девоино О.Г.

©Михайлов М.И., 2014

© Белорусский национальный
технический университет, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Тенденция перехода к широкой номенклатуре изделий при сближении сроков технологической подготовки производства и сроков сменяемости самих изделий требует сокращения временных, трудовых и материальных затрат при освоении новых видов продукции, которые возможны только путем автоматизации процессов проектирования, производства и эксплуатации оборудования и инструментального оснащения. Известно также, что надежность (долговечность) соединений зависит от топографии контактирующих поверхностей, которую можно обеспечить последовательной лезвийной обработкой.

Современное производство выдвигает высокие требования к надежности режущего инструмента. Этим требованиям отвечает сборный инструмент с механическим креплением режущих пластин. Однако сборный инструмент отличается большой сложностью и многовариантностью. Эффективность его работы может быть обеспечена при проектировании и изготовлении только на основе системного подхода, основанного на современной научной концепции.

Разнообразие номенклатуры сменных многогранных пластин, предлагаемых зарубежными фирмами-изготовителями, расширяет возможности отечественного потребителя в назначении оптимальных режимов обработки для получения заданного качества изделий при максимальной производительности и эффективности. Как отмечается в решениях Президента и Правительства РБ, полной зависимости отечественного производства от зарубежного продукта допускать нельзя.

Экономический период стойкости инструментальной оснастки в условиях гибкого автоматизированного производства, по данным зарубежных фирм, составляет 10–15 минут, и для обеспечения его работоспособности инструментальные магазины оснащаются резервными инструментами, в результате емкость накопителей инструмента может достигать 700–1000 единиц, что приводит к снижению эффективности использования инструмента. В этих условиях рационально использовать сборные инструменты с резервными автоматически сменяемыми режущими кромками.

Работоспособность таких инструментов зависит от статистических параметров их геометрической и статической точности, а также от формы обработанных поверхностей. Однако в работах, посвященных проектированию сборного металлорежущего инструмента, не учитывается статистический характер сложных форм контактных поверхностей элементов системы крепления, а также топография обработанных поверхностей. Поэтому разработка теоретических основ синтеза сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок для металлорежущих станков с числовым программным управлением, включенных в состав гибких производственных систем, является важной научной и практической проблемой.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа выполнена на основе исследований, проведенных в ходе реализации программ НАН Беларуси по решению важнейших проблем в области естественных и прикладных наук, по заданиям: «Разработка конструкций облегченных инструментальных блоков повышенной жесткости» (1996 г. № г.р. 19961801); «Разработка методов и способов повышения геометрической и кинематической точности станков» (1999 г. № г.р. 1999815); «Разработка теории работоспособности сборного механизированного металлорежущего инструмента» (2000–2005 гг. № г.р. 200112094); «Разработка демпфирующих полимерных покрытий контактных поверхностей сборного металлорежущего инструмента» (2006–2010 гг. № г.р. 20061661), договорами с отечественными предприятиями.

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь в части механики и надежности машин, методов расчета, проектирования, конструирования и испытаний машин и узлов (пункт 7.1. Постановления Совета Министров Республики Беларусь № 575 от 19.04.2010 г.)

Цель и задачи исследований

Цель работы – развитие теории с разработкой методов расчета и конструирования сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменной режущих кромок для повышения эффективности работы гибких производственных систем.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- разработать классификацию обработанных поверхностей, на основе которой сформировать инвариантные структурные схемы формообразования и срезания припуска;
- разработать математические модели и алгоритм синтеза режущих и формообразующих кромок инструмента с учетом топографии обработанных поверхностей;
- разработать математические модели геометрии режущих (формообразующих) зубьев сборного инструмента в инструментальной, статической и кинематической системах координат с оптимизацией углов ориентации сменных многогранных пластин относительно системы координат корпуса инструмента;
- разработать математические модели точности позиционирования сменных многогранных пластин и расположения их относительно системы координат корпуса инструмента с заданной вероятностью;
- разработать численную теоретическую модель напряженно-деформированного состояния рабочей части инструмента и исследовать статическую точность сборного инструмента;

– разработать конструкторско-технологические методы повышения работоспособности сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок;

– разработать методологию создания сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок и произвести внедрение разработок в производство.

Научная новизна

Разработаны научные основы синтеза формообразующих и режущих кромок инструмента с траекториями их движений на основе предложенной классификации виртуальных поверхностей, в соответствии с требуемой их топографией и принципами генерирования образующих и направляющих, а также исходя из принципов генерирования припуска в его продольных и поперечных секущих плоскостях, по разработанным схемам срезания, обладающим инвариантностью по отношению к виду поверхностей, методам и способам обработки.

Дано развитие теории формообразования поверхностей на основе разработанных обобщенных кинематической схемы формообразования и формообразующей кромки с их математическими моделями, отличающейся универсальностью в отношении к методам и способам обработки, а также предложены алгоритмы процессов синтеза и анализа формообразования требуемой топографии обработанных поверхностей, обеспечивающие получение рациональных размеров и расположение формообразующих кромок сменных многогранных пластин относительно образующих обработанных поверхностей, с оптимизацией параметров режима обработки.

Установлена взаимосвязь между углами ориентации сменных многогранных пластин относительно базовой системы координат корпуса инструмента и геометрическими параметрами режущих (формообразующих) зубьев сборного инструмента в инструментальной, статической и кинематической системах координат для не вращающегося и вращающегося инструментов, с направлением подачи вдоль его оси и по радиусу.

Разработаны математические модели контактирования элементов сборного инструмента, обеспечивающие получение пространственно-геометрических параметров области контакта с учетом виртуальных топографий контактирующих поверхностей, позволяющие определять взаимное расположение и точность позиционирования составляющих элементов инструментальной оснастки с заданной вероятностью.

Разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния рабочей части инструмента, с использованием теории графов, обеспечивающая уменьшение в три раза количества уравнений разрешающей системы по сравнению с методом конечных элементов.

Предложена методика экспериментальных исследований статической точности сборного инструмента со сменными многогранными пластинами с использованием оптико-лазерных измерений, обеспечивающая повышение качества анализа сборного инструмента.

Разработана математическая модель кинематики внешних приводов закрепления СМП и смены кромок сборных металлорежущих инструментов с автоматической сменой режущих кромок (СМИ с АСРК) с учетом совмещения (разделения) исполнительных движений различного функционального назначения и требуемых структур, позволяющая автоматизировать процесс проектирования и оптимизации приводов СМИ с АСРК.

Предложена методология создания сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок, на основе которой разработаны принципы и структурные схемы СМИ с АСРК, отличающиеся инвариантностью относительно типов и видов инструмента, учитывающие топографию обработанных поверхностей, статистические параметры элементов сборного инструмента и позволяющие управлять процессом формирования инструмента с автоматической сменой режущих кромок с заданным уровнем надежности, а также автоматизировать его проектирование.

Положения, выносимые на защиту

1. Математические модели и алгоритм синтеза формообразующих и режущих кромок сборного инструмента на основе разработанной классификации виртуальных обработанных поверхностей со структурами формообразования и срезания припуска, позволяющие учитывать требуемую топографию обработанных поверхностей и обеспечивающие сокращение периода проектирования инструмента.

2. Обобщенная кинематическая схема формообразования обработанных поверхностей металлорежущим инструментом и ее математическая модель, позволяющие автоматизировать процессы синтеза и анализа формообразования с требуемой топографией обработанных поверхностей, обеспечивающие получение рациональных размеров и размещение формообразующих кромок сменных многогранных пластин относительно образующей обработанной поверхности.

3. Математические модели взаимосвязи между геометрическими параметрами режущих (формообразующих) зубьев сборного инструмента в инструментальной, статической и кинематической системах координат для не вращающегося и вращающегося инструментов, с направлением движения подачи вдоль его оси и по радиусу и углами ориентации сменных многогранных пластин относительно базовой системы координат корпуса инструмента, позволяющие оптимизировать конструкции сборных инструментов.

4. Статистический анализ сменных многогранных пластин, позволяющий создавать теоретические базовые поверхности и формы режущих элементов с заданной вероятностью, обеспечивающий математическое моделирование статистического контакта элементов и параметрический синтез сборного инструмента.

5. Математические модели контактирования элементов сборного инструмента, позволяющие определять взаимное расположение и точность позиционирования составляющих элементов инструментальной оснастки с заданной вероятностью и обеспечивающие автоматизацию процесса синтеза сборных соединений инструмента.

6. Математическая модель напряженно-деформированного состояния рабочей части инструмента, на основе теории графов, обеспечивающая уменьшение в три раза количества уравнений разрешающей системы по сравнению с методом конечных элементов.

7. Методика экспериментальных исследований статической точности сборного инструмента со сменными многогранными пластинами на основе оптико-лазерных измерений, обеспечивающая повышение качества анализа сборного инструмента.

8. Составы покрытий базовых поверхностей сменных многогранных пластин, позволяющие генерировать заданные свойства контактных поверхностей и обеспечивающие повышение демпфирующих свойств, прочности и износостойкости сборного металлорежущего инструмента.

9. Методологию создания сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок, позволяющую управлять процессом формирования инструмента с автоматической сменой режущих кромок с заданным уровнем надежности и автоматизировать процесс его проектирования.

Личный вклад соискателя ученой степени

Концептуальная проработка направлений исследований и обсуждение их результатов проводились совместно с научным консультантом членом-корреспондентом НАН Беларуси, доктором технических наук, профессором Ю. М. Плескачевским. Лично соискателем разработаны: математические модели и алгоритм синтеза формообразующих и режущих кромок на основе разработанной классификации обработанных поверхностей и структур формообразования и срезания припуска; обобщенная кинематическая схема формообразования и ее математическая модель; математические модели геометрии формообразующих зубьев инструмента в инструментальной, статической и кинематической системах координат; математические модели и методики синтеза и анализа кинематики системы инструментообеспечения, базирующиеся на дискретно-логарифмических связях параметров начального и конечного приводных звеньев; методика синтеза вероятностно-геометрических моделей контактных поверхностей и форм режущих элементов инструмента; математические модели точности позиционирования элементов сборного металлорежущего инструмента; математические модели статической и динамической точности сборного инструмента; композиционные материалы с абразивосодержащими наполнителями для контактных поверхностей сборного инструмента с автоматической сменой режущих кромок.

Соавторы публикаций оказывали помощь в выполнении экспериментов, обсуждении их результатов и совместном формулировании выводов опубликованных работ.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты работы доложены на ряде научно-технических конференций и семинаров, в том числе на 1-м Белорусском конгрессе по теоретической и прикладной механике (Минск, 1995), на международных симпозиумах по трибофатике (Гомель, 1993) и природе трения твер-

дых тел (Гомель, 2002), на международных конференциях: «Интенсификация технологических процессов» (Ленинград, 1986), «Достижения науки и техники в области ресурсосбережения» (Гомель, 1989) «Применение композиционных материалов в народном хозяйстве» (Солигорск, 1992), «Физика и механика композиционных материалов на основе полимеров» (Гомель, 1993), «Отделочно-упрочняющая технология в машиностроении» (Минск, 1994), «Полимерные композиты» (Солигорск, 1995), «Использование ЭВМ в учебном процессе и научных исследованиях» (Гомель, 1995), «Юбилейная МНТК к 75-летию БГПА» (Минск, 1995), «Совершенствование процессов финишной обработки в машино- и приборостроении» (Минск, 1995), «Новые материалы и технологии» (Минск, 1996, 1998), «Создание ресурсосберегающих машин и технологий» (Могилев, 1996), «Технические вузы – Республике» (Минск, 1997), «Полимерные композиты» (Гомель, 1998), «Вычислительные методы и производство» (Гомель, 1998), «Современные направления развития производственных технологий и робототехника» (Могилев, 1998, 1999), «Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин» (Новополоцк, 1995, 1999), «Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно-хозяйственной деятельности, разработку экономических и экологически чистых технологий и прогрессивных методов обучения» (Минск, 2000), «Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка» (Могилев, 2000), «Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов» (Могилев, 2001), «Техника и технологии: Инновации и качество» (Барановичи, 2007), «Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые технологии» (Гродно, 2009), «Современные проблемы машиноведения» (Гомель, 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012), «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2004, 2006, 2007–2010, 2012, 2013), «Технические науки от теории к практике» (Новосибирск, 2014) и др.

Конструкции СМИ с АСРК демонстрировались на международных выставках: «Промышленный форум» (г. Минск, 2014), «Мир металла» (г. Минск, 2014) «Экономический форум» (г. Санкт-Петербург, 2014) и внедрены на ряде предприятий.

Опубликование результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 110 работ, среди которых 6 монографий (73,21 а. л.), 31 статья в изданиях, рекомендованных ВАК РБ, для публикации результатов диссертационных исследований (13,3 а. л.), статья в изданиях, рекомендованных ВАК РФ (0,68 а. л.), статья в изданиях, рекомендованных ВАК Украины (0,67 а. л.), 25 статей в сборниках научных трудов и материалов конференций, 26 тезисов докладов на конференциях, 17 авторских свидетельств и патентов и 2 заявки с решениями.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, основной части, включающей шесть глав, заключения, списка использованных библио-

графических источников и приложения. Полный объем диссертации 425 страниц. Работа включает 199 страниц текста, 171 рисунок, 39 таблиц, приложения, библиографический список из 514 наименований, включающий список использованных источников из 404 наименований и список публикаций соискателя из 110 наименований.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе «Особенности инструментообеспечения и проектирования сборных металлорежущих инструментов гибких производственных систем» выполнен анализ систем инструментообеспечения металлорежущих станков с ЧПУ и производственных структур на их основе. На примерах исследований, выполненных в ФРГ, США, Швейцарии и других странах, показано, что эффективное время обработки на традиционных станках и станках с ЧПУ в случае участия оператора составляет 6–10 % годового рабочего времени. По данным Кенига В. и Кетлера Г., наибольшая частота отказов характерна для режущего инструмента и системы управления станками.

Эффективность работы автоматизированного производства зависит от формирования и реализации потоков деталей и инструментов, а также от степени согласованности их взаимодействия. Формирование потоков инструментов производится поэтапно: на первом этапе определяется емкость накопителей инструмента, а на втором – техническая реализация потоков инструментов. Выявлено, что минимальную емкость инструментального магазина станка с ЧПУ необходимо определять по критерию максимальной производительности и корректировать по минимальной себестоимости обработки.

Приведена методика расчета емкости инструментального магазина станка с ЧПУ. Установлено, что на этапе формирования структуры системы инструментообеспечения (СИО) можно оптимизировать заданный уровень риска и вероятность ее безотказности путем различных видов резервирования элементов СИО. Выявлено влияние конструктивных вариантов инструментов на работоспособность системы инструментообеспечения и раскрыты перспективы создания сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок (СМИ с АСРК).

Во второй главе «Научные основы формирования рабочей части сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок» указывается, что для выполнения основных функций срезания припуска с заготовки и окончательного формирования обработанной поверхности инструмент снабжают режущими и формообразующими зубьями (кромками). Выявлено, что исходя из служебного назначения обработанная поверхность должна иметь определенную топографию, на основе которой разработан унифицированный алгоритм проектирования сборного инструмента. Для этого была разработана классификация виртуальных поверхностей по этапам их формирования, с выделением геометрической, статической, кинематической и динамической. На основе системного анализа процессов срезания припуска и формооб-

разования обработанных поверхностей разработаны их структуры, термины и определения, позволившие определять формы режущих и формообразующих кромок и траектории их движений.

Используя схемы формообразования и срезания припуска типовых поверхностей деталей, установлены связи между параметрами формообразования и требуемой топографией обработанной поверхности.

Разработаны алгоритм и математические модели оптимального формирования режущих и формообразующих кромок инструмента и траекторий их движений для требуемой топографии обработанной поверхности.

При этом на первом этапе определяется вид поверхности по геометрическим инвариантам и полуинвариантам. Затем, используя первую квадратичную форму Гаусса, выделяется асимптотическая сеть линий на поверхности заданной в параметрическом виде $\bar{r}_i = g(\theta_i)$, где \bar{r}_i – радиус-векторы локального участка (отсека) поверхности; θ_i – параметры выделенного отсека.

На втором этапе производится анализ выделенных линий по кручению χ и кривизне K , и из условия, что $\chi \rightarrow \min$; $\chi = \text{const}$; $K = \text{const}$, предварительно выбираются образующая и направляющая поверхности, которые уточняются исходя из требований технологичности.

В местной системе координат, ось OZ которой сонаправлена с вектором нормали, т. е.

$$\bar{k}[\bar{r}_{i_0_1}[g(\theta_1 \dots \theta_n)]] \times \bar{r}_{i_0_2}[g(\theta_1 \dots \theta_n)] = 1, \quad (1)$$

где $\bar{r}_{i_0_i}$ – радиус-векторы, касательные к линиям локального участка (отсека) поверхности; \bar{k} – единичный вектор, направленный вдоль оси OZ , а ось OX сонаправлена с касательной к выбранной кривой, т. е. $\bar{i}\bar{r}_{i_0_1}[g(\theta_1 \dots \theta_n)] = 1$, \bar{i} – единичный вектор, направленный вдоль оси OX , формируются уравнения образующей и направляющей.

На следующем этапе каждая из выбранных кривых анализируется по схемам формообразования, и определяются параметры формообразующих кромок:

– ориентация формообразующих кромок относительно локальных отсеков поверхности;

– длины формообразующих кромок при условии, что расчетная погрешность h меньше или равна допускаемой $h \leq \Delta_{\max j}$.

Установлено, что для обеспечения инвариантности при задании в дискретном виде образующей или направляющей необходимо использовать зависимости в форме Фергюсона. При этом предварительное положение формообразующих кромок в точках стыка локальных участков определялось из равенства

соответствующих радиус-векторов, кроме того, эти соотношения позволяют определить размеры и ориентацию кромок относительно образующей по численным значениям кинематической погрешности.

Для типовых поверхностей получены зависимости, позволяющие определить размеры и количество формообразующих кромок в инструменте.

Выбрав тип и вид сменной многогранной пластины, были получены математические зависимости расчета углов лезвия инструмента при различном расположении СМП относительно системы координат корпуса, в инструментальной, статической и кинематической системах координат, как для не вращающегося, так и вращающегося инструментов с осевой и радиальной подачами. На рисунке 1 представлена схема к расчету углов сборных резцов в статической системе координат.

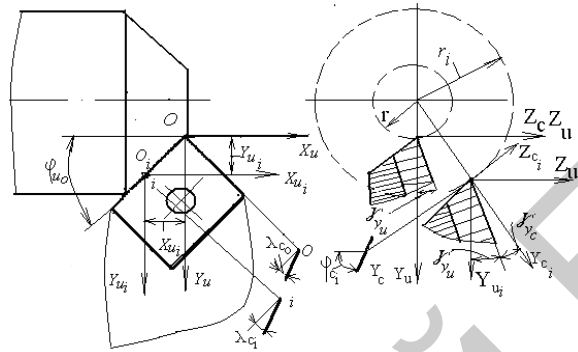


Рисунок 1. – Схема к расчету статических углов сборных резцов

Установлено влияние параметров процесса обработки и расположения кромок инструмента относительно обрабатываемой поверхности на углы ориентации сменных многогранных пластин (СМП) относительно системы координат корпуса инструмента, по которым получены математические зависимости между углами в кинематической системе координат для двух случаев движения подачи стержневого инструмента: по радиусу к оси заготовки и вдоль ее оси.

При направлении вектора скорости подачи по радиусу к оси заготовки они имели вид:

$$\operatorname{tg} \gamma_k = \operatorname{tg} \alpha_{x_i} \cos \varphi_k + \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{Y_{n_i}}{r_i} + \gamma_{y_{n_i}} + \operatorname{arctg} \frac{S_0}{\pi d_i} \right) \sin \varphi_k; \quad (2)$$

$$\operatorname{ctg} \alpha_k = -\operatorname{ctg} \alpha_{x_i} \sin \varphi_k + \operatorname{ctg} \left(\alpha_{y_{n_i}} - \arccos \frac{Y_{n_i}}{r_i} - \operatorname{arctg} \frac{S_0}{\pi d_i} \right) \cos \varphi_k, \quad (3)$$

где $\operatorname{ctg}\varphi_k = \operatorname{ctg}\varphi_c / \sqrt{1 + S_0^2 / \pi^2 d_i^2} + \operatorname{tg}\gamma_{X_c} / \sqrt{1 + \pi^2 d_i^2 / S_0^2}$; φ_k – главный угол в плане; α_k – главный задний угол; γ_k – главный передний угол; Y_{i_i} – координата i -й точки режущей кромки в инструментальной системе координат; r_i – радиус детали в i -й точке режущей кромки инструмента; S_0 – подача на один цикл главного движения.

Получены зависимости между углами в кинематической системе координат для двух случаев направления вектора скорости подачи вращающегося инструмента (рисунок 2).

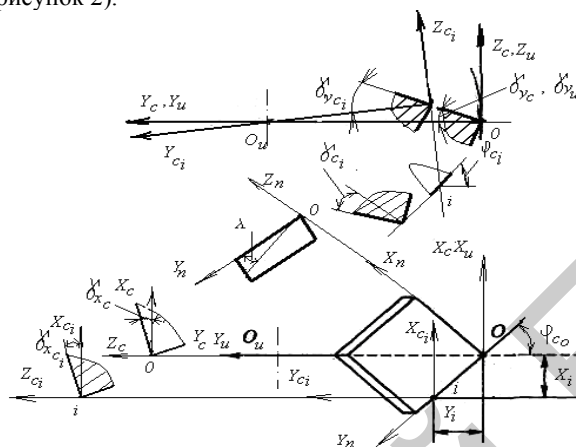


Рисунок 2. – Схема к расчету статических углов сборных инструментов с главным вращательным движением

При радиальном направлении вектора скорости подачи имели вид:

$$\operatorname{tg}\gamma_{k_i} = \operatorname{tg}\gamma_{X_{u_i}} \cos\varphi_{k_i} + \operatorname{tg}\left(\gamma_{Y_{c_i}} + \operatorname{arctg}\frac{S_Z z_\Phi}{\pi d_i}\right) \sin\varphi_{k_i}; \quad (4)$$

$$\operatorname{ctg}\alpha_{k_i} = -\operatorname{ctg}\alpha_{X_{u_i}} \sin\varphi_{k_i} + \operatorname{ctg}\left(\alpha_{Y_{c_i}} - \operatorname{arctg}\frac{S_Z z_\Phi}{\pi d_i}\right) \cos\varphi_{k_i}; \quad (5)$$

$$\operatorname{ctg}\varphi_k = \operatorname{ctg}\varphi_c / \sqrt{1 + S_Z^2 Z_\Phi^2 / \pi^2 d_i^2} + \operatorname{tg}\gamma_{X_c} / \sqrt{1 + \pi^2 d_i^2 / S_Z^2 z_\Phi^2}, \quad (6)$$

где d_i – диаметр инструмента в i -й точке режущей кромки инструмента; S_Z – подача на зуб; z_Φ – число зубьев инструмента.

В таблице 1 приведены расчетные зависимости углов в плане для частных случаев расположения СМП в корпусе инструмента (рисунок 3).

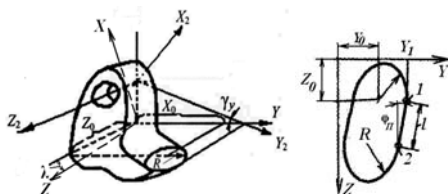


Рисунок 3. – Схема к расчету статических углов в плане

Таблица 1. – Расчетные зависимости углов в плане

Признаки СМП (рису- нок 4)	Расчетные зависимости
$\gamma_y \neq 0,$ $\lambda = 0,$ $R = 0$	$\varphi_c = \arctg \frac{2 \operatorname{ctg} \varphi_n Y_2}{\sqrt{Y_2^2 - Y_2^2(1) \sin^2 \gamma_y}}$ <p>где $Y_2(1)$ – максимальный радиус фрезы</p>
$\gamma_y \neq 0,$ $\lambda = 0,$ $R \neq 0,$ $l = 0$	$\varphi_c = \arctg \frac{Z_0 - Z_2}{2 \left[\left(\sqrt{R^2 - (Z_2 - Z_{02})^2} - \sqrt{Y_{02}^2 - Y_2^2(1) \sin^2 \gamma_y} \right)^2 + Y_2^2(1) \sin^2 \gamma_y \right]^{0.5}},$ <p>где Y_0, Z_0 – координаты центра передней поверхности пластины в системе XYZ; R – радиус кривизны кромки</p>
$\gamma_y \neq 0,$ $\lambda \neq 0,$ $\alpha \neq 0,$ $l = 0$	$\varphi_c = \arctg \left\{ \frac{2(Z_2 - Z_{02}) \left(\sqrt{R^2 \cos^2 \lambda + (Z_2 - Z_{02})^2} + \sqrt{Y_{02}^2 \cos^2 \lambda - (Y_2(1) \sin \gamma_y + Z_0 \sin \lambda)^2} \right) + \sin \lambda (Y_2(1) \sin \gamma_y \cos \lambda + Z_2 \sin \lambda)}{\left[2 \cos \lambda \sqrt{R^2 \cos^2 \lambda + (Z_2 - Z_0)^2} \times \sqrt{\left[\sqrt{R^2 \cos^2 \lambda + (Z_2 - Z_{02})^2} + \sqrt{Y_{02}^2 \cos^2 \lambda - (Y_2(1) \sin \gamma_y + z_0 \sin \lambda)^2} \right]^2 + (Y_2(1) \cos \lambda \sin \gamma_y)^2} \right]^{0.5}}$
$\gamma_y \neq 0,$ $\lambda \neq 0,$ $\alpha \neq 0,$ $R = 0$	$\varphi = \arctg \left[\frac{Z_2(1 + k^2 \sin \lambda) + \cos \lambda (k^2 Y_2(1) \sin \gamma_y - b)}{k \cos \lambda \sqrt{(Z_2 - b \cos \lambda)^2 + k^2 (Y_2(1) \cos \lambda \sin \gamma_y + Z_2 \sin \lambda)^2}} \right],$ <p>где $k = \operatorname{ctg} \varphi_n$</p>

Для анализа полученных результатов были разработаны математические модели, отражающие влияние геометрических параметров зуба инструмента на параметры формообразующих кромок:

$$\bar{r}_{u_p} = [A_m(\xi_{i_p})][A_k(\zeta_{j_p})]\bar{e}$$

$$\text{при } 0 \leq \xi_i \leq \frac{2\xi_{i_u,p}^2 + (4\xi_{i_u,p}^2 - 4(1 + \text{tg}^2(\pi - \varphi_{i_p})(\xi_{i_u,p}^2 - r_{b_p}^2))^{0,5}}{2(1 + \text{tg}^2(\pi - \varphi_{i_p}))}, \quad (7)$$

$$\text{где } \zeta_{j_p} = \zeta_{j_u,p} + (r_{b_p}^2 - (\xi_i - \xi_{i_u,p})^2)^{0,5};$$

$$\bar{r}_{i_p} = [A_n(\varphi_{i_p})][A_m(\xi_{i_p})][A_k(\zeta_{j_p})]\bar{e} \quad (8)$$

$$\text{при } \frac{2\xi_{i_u,p}^2 + (4\xi_{i_u,p}^2 - 4(1 + \text{tg}^2(\pi - \varphi_{i_p})(\xi_{i_u,p}^2 - r_{b_p}^2))^{0,5}}{2(1 + \text{tg}^2(\pi - \varphi_{i_p}))} \leq \zeta_j \leq$$

$$\leq \frac{2\xi_{i_{\text{во},p}}^2 + (4\xi_{i_{\text{во},p}}^2 - 4(1 + \text{tg}^2(\pi - \varphi_{i_p})(\xi_{i_{\text{во},p}}^2 - R_{b_p}^2))^{0,5}}{2(1 + \text{tg}^2(\pi - \varphi_{i_p}))},$$

$$\text{где } \xi_{i_p} = \text{tg}(\pi - \varphi_{i_p})\zeta_j.$$

Используя математические модели формообразующих кромок (7), (8), получены математические модели образующих исходных инструментальных поверхностей для локальных участков требуемых топографий обработанных поверхностей. При этом были выделены секции наружных и внутренних инструментов с главным вращательным движением, а также – секции с главным поступательным движением. Так, например, в таблице 2 приведены частные случаи уравнений образующих для вращающегося инструмента.

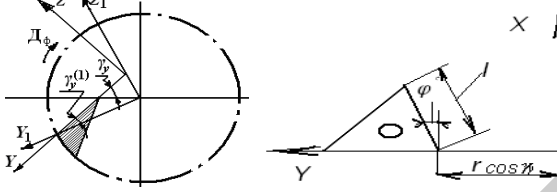
Кроме того, на основе теории рядов получены математические модели формообразующих кромок для сложных участков топографий кинематических поверхностей. Для формирования требуемых кинематических поверхностей была разработана универсальная кинематическая модель процессов формообразования (рисунок 4), используя которую получено обобщенное уравнение формообразования

$$\bar{r}_0 = \prod_n [A_m(\psi_i^3)] \prod_k [A_l(\xi_j^3)] \prod_k [A_l(a_i)] \prod_n [A_m(\psi_i^H)] \prod_k [A_l(\xi_j^H)] \bar{r}_H, \quad (9)$$

где \bar{r}_0 – радиус-вектор обработанной поверхности; \bar{r}_u – радиус-вектор формообразующих кромок инструмента; $[A_m(\psi_i^3)]$, $[A_m(\psi_i^H)]$ – матрицы поворота

соответственно заготовки и инструмента вокруг осей выбранной системы координат; $[A_I(\xi_j^3)]$, $[A_I(\xi_j^H)]$ – матрицы перемещений соответственно заготовки и инструмента вдоль осей выбранной системы координат; $[A_i(a_i)]$ – матрицы межосевых расстояний; ψ_i – углы поворота вокруг соответствующих осей координат; ξ_j ; a_i – расстояния между началами осей координат; $n = 1, 2, 3$; $m = 4, 5, 6$; $i = 1, 2, 3$; $k = 1, 2, 3$; $l = 1, 2, 3$; $j = 1, 2, 3$.

Таблица 2. – Расчетные зависимости образующих исходных инструментальных поверхностей инструментов с главным вращательным движением

Условия	Расчетные соотношения
1. Формообразующая кромка линейная $\gamma_y \neq 0$; $\lambda' \neq 0$, где λ' – угол наклона формообразующей кромки	 $y_2 = \sqrt{(x_2 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \lambda'} \operatorname{tg} \varphi' + r \cos \gamma_y)^2 + r^2 \sin^2 \gamma_y}$ $x_2 \in \left[0; \frac{l \cos \varphi'}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \lambda'}} \right]$
2. Формообразующая кромка – дуга окружности 2.1 $\gamma_y \neq 0$; $\lambda' \neq 0$	$\frac{x_2^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \lambda')}{R^2} + \frac{(\sqrt{y_2^2 - r^2 \sin^2 \gamma_y} - (R + r \cos \gamma_y))^2}{R^2} = 1;$ $y_2^2 + x_2^2 (1 + \operatorname{tg}^2 \lambda') - 2(R + r) \sqrt{y_2^2 - r^2 \sin^2 \gamma_y} + 2Rr + r^2 \cos^2 \gamma_y = 0;$ $x_2 \in \left[-\frac{R}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \lambda'}}; \frac{R}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \lambda'}} \right]$

Используя уравнения (7), (8), (9), получены математические модели кинематических поверхностей и их топографии для случаев обработки цилиндрической поверхности точением (рисунок 5) и фрезерованием.

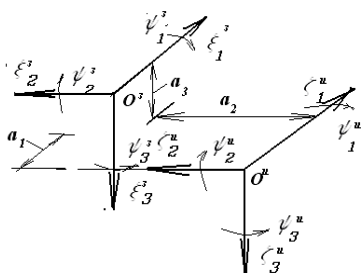


Рисунок 4. – Кинематическая модель формообразования

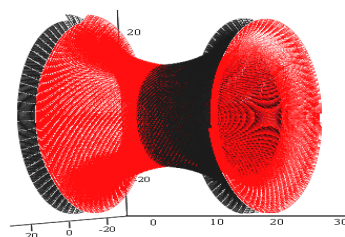


Рисунок 5. – Виртуальная топография участка обработанной поверхности

Так, например, уравнение обработанной поверхности при точении имело вид:

$$\bar{r}_0 = \begin{bmatrix} \cos(\psi^3) \cdot \sin(\varphi) \cdot \xi_{3c}^3 + \cos(\psi^3) \cdot (\xi_{1n}^3 + \xi_{1c}^3 - (S_{\text{прод}} \psi^3) \xi_{3c}^3 - (\xi_{3c}^3)^2 + R^2)^{0,5} \\ (-\sin(\psi^3) \cdot \sin(\varphi) \cdot \xi_{3c}^3 - \sin(\psi^3) \cdot (\xi_{1n}^3 + \xi_{1c}^3 - (S_{\text{прод}} \psi^3)^2 + \\ + 2(S_{\text{прод}} \psi^3) \xi_{3c}^3 - (\xi_{3c}^3)^2 + R^2)^{0,5}) \\ \cos(\psi^3) \cdot \xi_{3c}^3 + (\xi_{3n}^3 + S_{\text{прод}} \psi^3) \\ 1 \end{bmatrix}, (10)$$

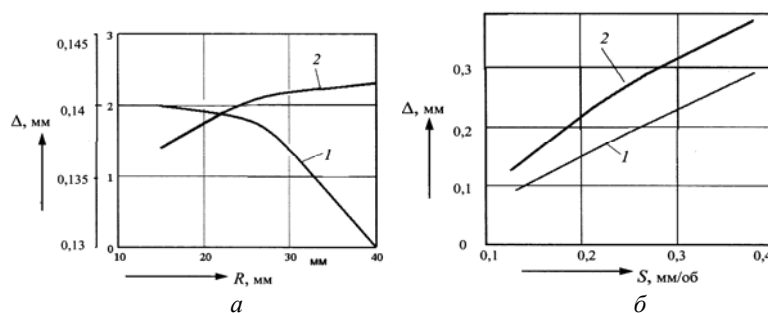
где ψ^3 – угол поворота формообразуемой поверхности; φ – угол в плане формообразующей кромки, ξ_{1c}^3 , ξ_{3c}^3 и R – соответственно координаты центра и радиус кривизны формообразуемой поверхности; $S_{\text{прод}}$ – численное значение продольной подачи формообразующей кромки резца; ξ_1^3, ξ_3^3 – текущие координаты формообразуемой поверхности; ξ_{1n}^3, ξ_{3n}^3 – соответственно начальные координаты формообразуемой поверхности.

Выявлено, что с увеличением радиуса кривизны образующей поверхности детали максимальное расстояние между кинематической и геометрической поверхностями (МРКГП) в точках с максимальным радиусом уменьшается в 13,5 раз по отношению к точкам с минимальным радиусом, что приводит к изменению топографии поверхности.

Анализ полученных топографий кинематических поверхностей позволил установить влияние параметров режима резания (рисунок 6) и расположения

СМП режущего инструмента относительно образующей детали на вид и характер кинематических поверхностей.

При увеличении радиуса кривизны образующей фасонной поверхности в два раза МРКГП в точках с максимальным радиусом фасонной поверхности уменьшается в 1,07 раза, а с минимальным – увеличивается в 1,3 раза.



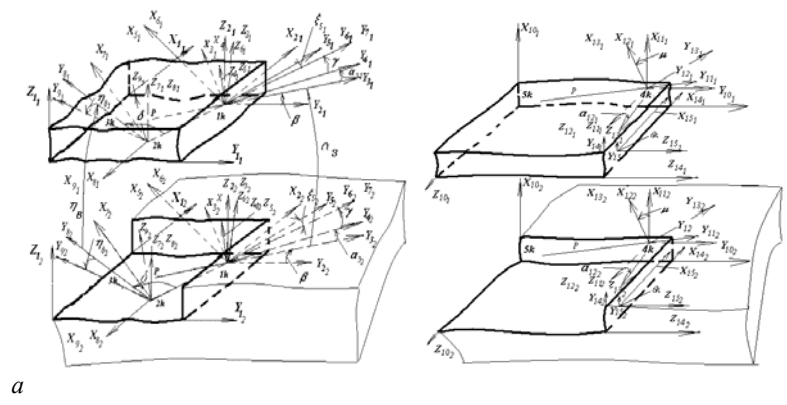
1 – с минимальным радиусом; *2* – с максимальным радиусом
Рисунок 6. – Графики влияния радиуса образующей поверхности детали (*a*) и подачи (*б*) на МРКГП обработанной поверхности

Анализ топографии обработанной поверхности при фрезеровании позволил заключить, что при увеличении радиального биения зубьев фрезы в 2 раза МРКГП возрастает в 4,1 раза при $S_z = 0,1$; в 4,6 раза при $S_z = 0,2$ и в 4,5 при $S_z = 0,3$ мм/зуб, а коэффициент изменения погрешности K_Δ при подаче $S_z = 0,1$ был равен 7; при $S_z = 0,2$ – $K_\Delta = 3,4$; при $S_z = 0,3$ мм/зуб, $K_\Delta = 2,1$. С увеличением отношения величин радиального биения зубьев фрезы и подач в 3 раза численное значение МРКГП обработки возрастает в 1,4 раза, а при увеличении в 6 раз – увеличивается в 2 раза.

В третьей главе «Теоретические основы геометрической точности сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок» выполнен анализ точности позиционирования и определено расположение СМП относительно корпуса инструмента с заданной вероятностью, что потребовало систематизированных баз данных о форме СМП. Для этого разработан алгоритм получения расчетных форм СМП с заданной вероятностью и приведены результаты экспериментальных исследований конкретных СМП.

Экспериментально определены вероятностные геометрические параметры стандартных СМП, с использованием которых получены формы расчетных контурных площадей контакта базовых поверхностей СМП при заданной вероятности, а также их топографии.

Разработан алгоритм и математические модели к расчету координат точек контакта базовых поверхностей СМП и паза корпуса инструмента с заданными вероятностями (рисунок 7) и установлены статистические условия их существования (таблица 3).



a

Рисунок 7. – Схема к расчету точек контакта СМП и паза корпуса инструмента

Таблица 3. – Условия существования точек контакта базовых поверхностей СМП и паза корпуса инструмента

Номер точек	Расчетные зависимости	Условия существования точки
1	2	3
1k	$1k \rightarrow \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} Z_{1S_{i,j}} \rightarrow \min;$ <p>$Z_{1S_{i,j}}$ – массивы координат расчетных топографий поверхностей</p>	<p>При заданных координатах точек установочной поверхности $X_{1S_{i,j}} \geq 0; Y_{1S_{i,j}} \geq 0; Z_{1S_{i,j}} \geq 0.$ $S = 1, 2$ – номера контактирующих поверхностей; i, j – номер точки поверхности; n, m – количество выделенных точек</p>
2k	$2k \rightarrow \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} \alpha_{3S_{i,j}} \rightarrow \min;$ $\alpha_{3S_{i,j}} = \arccos \frac{ Y_{3S_{i,j}} }{R_{3S_{i,j}}};$ $R_{3S_{i,j}} = \sqrt{(Y_{3S_{i,j}})^2 + (Z_{3S_{i,j}})^2}$	<p>$K_1 K_2 > 0$, где</p> $K_1 = \Delta X_{21P,1k} X_{21P} + \Delta Y_{21k,1P} Y_{21P} + \Delta Y_{21P,1k} Y_{21k} - \Delta X_{21P,1k} X_{21k};$ $K_2 = \Delta X_{21P,1k} X_{2i,j} + \Delta Y_{21k,1P} Y_{2i,j} + \Delta Y_{21P,1k} Y_{21k} - \Delta X_{21P,1k} X_{21k};$

Продолжение таблицы 3

1	2	3
		здесь X_{21P}, Y_{21k} – координаты точки проекции силы тяжести и точек контакта; $\Delta X_{21P,1k}, \Delta Y_{21k,1P}$ – соответственно первая разность координат точек контакта и токи проекции силы тяжести
3k	$3k \rightarrow \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} \xi_{5S_{i,j}} \rightarrow \min;$ $\xi_{5S_{i,j}} = \arccos \frac{ X_{5S_{i,j}} }{R_{5S_{i,j}}};$ $R_{5S_{i,j}} = \sqrt{(X_{5S_{i,j}})^2 + (Z_{5S_{i,j}})^2}$	$\lambda_1 > 0; \lambda_2 > 0, \lambda_1 + \lambda_2 < 1, \quad (1)$ <p>где</p> $\lambda_1 = \frac{\Delta X_{61P,3k} \Delta Y_{612k,3k} - \Delta Y_{61P,3k} \Delta X_{612k,3k}}{\Delta Y_{612k,3k} \Delta X_{611k,3k} - \Delta Y_{611k,3k} \Delta X_{612k,3k}};$ $\lambda_2 = \frac{\Delta Y_{61P,3k} \Delta X_{611k,3k} - \Delta Y_{611k,3k} \Delta X_{61P,3k}}{\Delta Y_{612k,3k} \Delta X_{611k,3k} - \Delta Y_{611k,3k} \Delta X_{612k,3k}}$
	<p>Окончательно</p> $3k \rightarrow \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} \eta_{8S_{i,j}} \rightarrow \min ;$ $\eta_{8S_{i,j}} = \arccos \frac{ X_{8S_{i,j}} }{R_{8S_{i,j}}};$ $R_{8S_{i,j}} = \sqrt{(X_{8S_{i,j}})^2 + (Z_{8S_{i,j}})^2}$	<p>Если (1) не выполняется, то при $K_1 K_2 < 0$, где</p> $K_1 = \Delta Y_{613k,2k} X_{61P} + \Delta X_{612k,3k} Y_{61P} +$ $+ Y_{612k} X_{613k} - X_{612k} Y_{613k};$ $K_2 = \Delta Y_{613k,2k} X_{61P} + \Delta X_{612k,3k} Y_{61P} +$ $+ Y_{612k} X_{613k} - X_{612k} Y_{613k}$ <p>каждая рассматриваемая точка отбрасывается</p>
4k	$4k \rightarrow \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} Z_{10S_{i,j}} \rightarrow \min$	<p>При заданных координатах точек направляющей поверхности</p> $X_{10S_{i,j}} \geq 0; Y_{10S_{i,j}} \geq 0; Z_{10S_{i,j}} \geq 0$

Окончание таблицы 3

1	2	3
5k	$5k \rightarrow \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} \alpha_{12S_{i,j}} \rightarrow \min ;$ $\alpha_{12S_{i,j}} = \arccos \frac{ Y_{12S_{i,j}} }{R_{12S_{i,j}}};$ $R_{12S_{i,j}} = \sqrt{(Y_{12S_{i,j}})^2 + (Z_{12S_{i,j}})^2}$	$K_1 K_2 > 0$, где $K_1 = \Delta X_{21P,4k} X_{21P} + \Delta Y_{214k,1P} Y_{21P} + \Delta Y_{21P,4k} Y_{214k} - \Delta X_{21P,4k} X_{214k};$ $K_2 = \Delta X_{21P,4k} X_{2i,j} + \Delta Y_{214k,1P} Y_{2i,j} + \Delta Y_{21P,4k} Y_{214k} - \Delta X_{21P,4k} X_{214k}$
6k	$6k \rightarrow \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} Z_{14S_{i,j}} \rightarrow \min$	При заданных координатах точек опорной поверхности $X_{10S_{i,j}} \geq 0; Y_{10S_{i,j}} \geq 0; Z_{10S_{i,j}} \geq 0$

На основе уравнений плоскостей, касательных к базовым поверхностям СМП, получены математические модели, позволившие определить точность позиционирования СМП в корпусе инструмента при базировании их на опорную и боковые грани.

Разработана инженерная методика оценки погрешностей позиционирования СМП в корпусе инструмента при базировании их на штифт и опорную поверхность, позволяющая учитывать погрешности формы и расположения базовых поверхностей, форму и размеры штифта, а также расположение его относительно СМП.

Для оценки расположения СМП относительно корпуса инструмента разработана соответствующая математическая модель, позволяющая рассчитывать микроперемещения и повороты СМП относительно корпуса инструмента в зависимости от погрешностей контакта СМП с элементами системы их крепления

$$[A_{yP}]^T = [Q_{ij}] \cdot [\Delta(Z, X, Y)]^T,$$

где $[A_{yP}] = [a_{yP} b_{yP} c_{yP} \lambda_{yP} \beta_{yP} \gamma_{yP}]$ – матрица, отражающая микроперемещения a_{yP}, b_{yP}, c_{yP} вдоль соответствующих осей базовой системы координат и повороты на углы $\lambda_{yP}, \beta_{yP}, \gamma_{yP}$ вокруг соответствующих осей; $[\Delta(Z, X, Y)]$ – матрица погрешностей базовых точек контакта СМП в направлении соответствующих осей с заданной вероятностью; $[Q_{ij}]$ – матрица связи, отражающая схему базирования СМП.

Разработанные модели позволили оценить геометрическую точность сборного инструмента с автоматической сменой режущих кромок и установить граничные условия для анализа его статической точности.

В четвертой главе «Исследование статической точности сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок» произведен анализ напряженно-деформированного состояния рабочей части сборного инструмента. Для получения разрешающих уравнений модель инструмента разделялась на отдельные элементы. В случае объемного элемента используется ячейка графовой модели из дуг и вершин (рисунок 8). Она отображает вектора абсолютных нормальных деформаций и деформаций, обусловленных сдвигом, также нормальные и тангенциальные внутренние силы (обобщенные напряжения).

Затем использовались известные связи между напряжениями и деформациями, при этом деформации аппроксимировались линейными полиномами.

Неизвестные коэффициенты полиномов выражались через деформации сторон элемента, соответствующего элементарной ячейки.

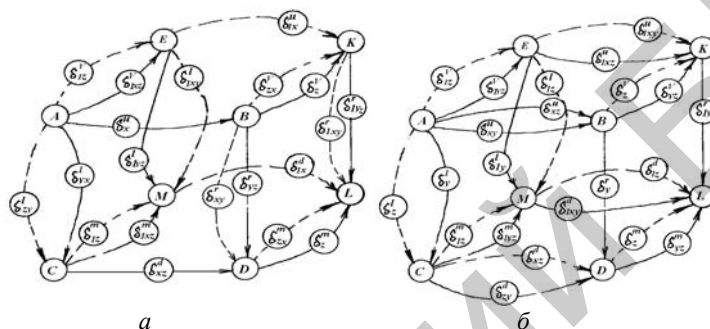


Рисунок 8. – Схема изменения деформаций элемента

Начало локальной системы координат располагалось в центре элемента, т. е. $-\Delta x/2 \leq x \leq \Delta x/2$, $-\Delta y/2 \leq y \leq \Delta y/2$, $-\Delta z/2 \leq z \leq \Delta z/2$. После преобразований определялись последовательные переменные графа, которые интерпретировались как внутренние силы модели:

$$\sigma_x \left(-\frac{z}{\Delta x \Delta z} - \frac{y}{\Delta x \Delta y} \right) - \frac{k_a y}{\Delta x \Delta y} \sigma_y + \frac{2k_a z}{\Delta x \Delta z} \sigma_z = f_x^u ;$$

$$\sigma_x \left(\frac{1}{2\Delta x} + \frac{z}{\Delta x \Delta z} \right) + \frac{2k_a z}{\Delta x \Delta z} \sigma_z = f_{1x}^n ; \quad \sigma_x \left(\frac{y}{\Delta x \Delta y} + \frac{1}{2\Delta x} \right) + \frac{k_a y}{\Delta x \Delta y} \sigma_y = f_x^d ;$$

$$\sigma_x \left(\frac{k_a x}{\Delta x \Delta y} \right) + \sigma_y \left(\frac{1}{2\Delta y} + \frac{x}{\Delta x \Delta y} \right) = f_y^r ;$$

$$\begin{aligned}
& \sigma_x \left(-\frac{k_a x}{\Delta x \Delta y} \right) + \sigma_y \left(-\frac{x}{\Delta x \Delta y} - \frac{z}{\Delta y \Delta z} \right) - \frac{2k_a z}{\Delta y \Delta z} \sigma_z = f_y^l; \\
& \sigma_x \left(\frac{k_a x}{\Delta x \Delta z} \right) + \sigma_z \left(\frac{1}{2\Delta z} - \frac{x}{\Delta x \Delta z} \right) = f_{1z}^v; \\
& \sigma_x \left(\frac{k_a x}{\Delta x \Delta z} \right) + \sigma_y \left(-\frac{k_d y}{\Delta y \Delta z} \right) + \sigma_z \left(-\frac{y}{\Delta y \Delta z} + \frac{x}{\Delta x \Delta z} \right) = f_z^v; \\
& \sigma_y \left(k_a \frac{y}{\Delta y \Delta z} \right) + \sigma_z \left(\frac{1}{2\Delta z} + \frac{y}{\Delta y \Delta z} \right) = f_z^m; \quad \sigma_y \left(\frac{1}{2\Delta y} + \frac{z}{\Delta y \Delta z} \right) + \frac{2k_a z}{\Delta y \Delta z} \sigma_z = f_{1y}^l; \\
& \tau_{xy} \left(-\frac{x}{\Delta x \Delta y} - \frac{z}{\Delta x \Delta z} - \frac{k_c x}{\Delta x \Delta y} \right) = f_{xy}^l; \quad \tau_{xy} \left(\frac{1}{2\Delta y} + \frac{z}{\Delta y \Delta z} \right) = f_{1xy}^l; \\
& \tau_{xy} \left(\frac{1}{2\Delta y} + \frac{x}{\Delta x \Delta y} + \frac{k_c x}{\Delta x \Delta y} \right) = f_{xy}^r; \quad \tau_{xy} \left(\frac{k_c y}{\Delta x \Delta y} + \frac{1}{2\Delta x} + \frac{y}{\Delta x \Delta y} \right) = f_{xy}^d; \\
& \tau_{xy} \left(\frac{1}{2\Delta x} + \frac{z}{\Delta x \Delta y} \right) = f_{1xy}^u; \quad \tau_{xy} \left(-\frac{k_c y}{\Delta x \Delta y} - \frac{y}{\Delta x \Delta y} - \frac{z}{\Delta x \Delta z} \right) = f_{xy}^u; \\
& \tau_{xz} \left(\frac{x}{\Delta x \Delta z} - \frac{y}{\Delta y \Delta z} + \frac{k_c x}{\Delta x \Delta z} \right) = f_{xz}^v; \quad \tau_{xz} \left(\frac{k_c z}{\Delta x \Delta z} + \frac{z}{\Delta x \Delta z} \right) = f_{1xz}^u; \\
& \tau_{xz} \left(\frac{1}{2\Delta z} + \frac{y}{\Delta y \Delta z} \right) = f_{xz}^m; \quad \tau_{xz} \left(\frac{1}{2\Delta z} - \frac{x}{\Delta x \Delta z} - \frac{k_c x}{\Delta x \Delta z} \right) = f_{1xz}^v; \\
& \tau_{xz} \left(\frac{1}{2\Delta x} + \frac{y}{\Delta x \Delta y} \right) = f_{xz}^d; \quad \tau_{xz} \left(\frac{1}{2\Delta x} - \frac{k_c z}{\Delta x \Delta z} - \frac{y}{\Delta x \Delta y} - \frac{z}{\Delta x \Delta z} \right) = f_{xz}^u; \\
& \tau_{yz} \left(\frac{1}{2\Delta z} + \frac{y}{\Delta y \Delta z} + \frac{k_d y}{\Delta y \Delta z} \right) = f_{yz}^m; \quad \tau_{yz} \left(\frac{1}{2\Delta z} - \frac{x}{\Delta x \Delta z} \right) = f_{1yz}^v; \\
& \tau_{yz} \left(\frac{k_c z}{\Delta y \Delta z} + \frac{1}{2\Delta y} + \frac{z}{\Delta y \Delta z} \right) = f_{1yz}^l; \quad \tau_{yz} \left(\frac{1}{2\Delta y} + \frac{x}{\Delta x \Delta y} \right) = f_{yz}^r; \\
& \tau_{yz} \left(\frac{x}{\Delta x \Delta z} - \frac{y}{\Delta y \Delta z} - \frac{k_d y}{\Delta y \Delta z} \right) = f_{yz}^v; \quad \tau_{yz} \left(-\frac{k_c z}{\Delta y \Delta z} - \frac{x}{\Delta x \Delta y} - \frac{z}{\Delta y \Delta z} \right) = f_{yz}^l, \quad (11)
\end{aligned}$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – нормальные и тангенциальные составляющие напряжений элементарной ячейки;

$$k_a = -\frac{(\lambda + \beta)}{2(\lambda + 2\beta)}; \quad k_c = -\frac{(\lambda + \beta)}{2\beta}; \quad k_d = \frac{2\lambda + 3\beta}{2\beta}; \quad k_b = -\frac{\lambda + \beta}{\lambda + 2\beta};$$

$$\lambda = \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}; \beta = \frac{E}{2(1+\mu)}; E \text{ и } \mu - \text{соответственно модуль упругости и}$$

коэффициент Пуассона материала элементарной ячейки; Δx , Δy , Δz – линейные размеры элемента.

Используя выражения для напряжений, определялись связи между силами и перемещениями, позволяющие рассчитывать напряженно-деформированное состояние (НДС) режущих инструментов. Установлено, что при одинаковом уровне аппроксимации в случае использования графового метода требуется примерно в три раза меньше уравнений, чем в методе конечных элементов. Повышенная точность вычислений обеспечивается тем, что графовые закономерности реализуют выполнение условий равновесия и неразрывности деформаций для элемента в целом. Воспользовавшись методом преобразования систем координат, получили уравнения для расчета статических граничных условий контакта многогранных пластин и корпуса инструмента.

Разработана методика численного расчета температуры в зоне обработки сборным инструментом. Полученные математические модели позволили исследовать влияние статистических параметров СМП на НДС рабочей части сборного инструмента. На рисунке 9 приведены примеры распределений эквивалентных напряжений по передней поверхности режущих зубьев сборного инструмента. Установлено, что при увеличении толщины зуба лезвийного инструмента в 1,5 раза значения максимальных напряжений уменьшаются в 1,2 раза, а при увеличении переднего угла в 1,5 раза – увеличиваются в 1,04 раза. Оценку адекватности математических моделей производили по статическим перемещениям сборных резцов, на специально разработанном стенде (рисунок 10).

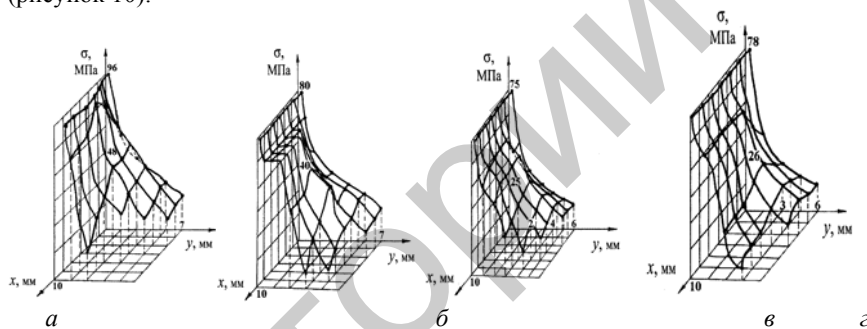
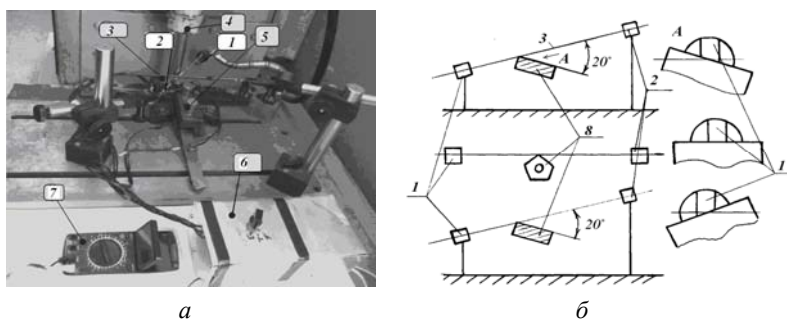


Рисунок 9. – Распределение эквивалентных напряжений по передней поверхности при толщине зуба: $b = 8$ мм (а), $b = 12$ мм (б) и переднем угле: $\gamma = 10^\circ$ (в); $\gamma = 15^\circ$ (г)



**1 – лазер; 2 – фотодиод; 3 – штанги; 4 – гидроцилиндр;
5 – резцедержатель; 6 – усилитель; 7 – вольтметр; 8 – СМП**
**Рисунок 10. – Фотография рабочей зоны станда для испытания резцов
на жесткость (а) и схема установки датчиков (б)**

Стенд состоял из полупроводникового лазера с длиной волны 600 нм, используемого в качестве источника света, фотодиода ФД-3В – приемника сигналов и усилителя с коэффициентом усиления, равным 500. Показания с усилителя снимались вольтметром Digital multimer DT-830В. Исследовались резцы различных типов крепления (таблица 4).

Анализ результатов исследований резцов с креплением четырехгранной СМП типа PW позволил заключить, что с увеличением относительной площади касания базовой грани в соотношении 1 : 1,37 : 1,41 уменьшаются максимальные перемещения пластины относительно корпуса инструмента в соотношении 1 : 1,37 : 1,5, а также изменяются относительные средние коэффициенты жесткости в соотношении 1 : 2,26 : 2,9.

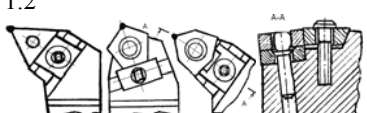
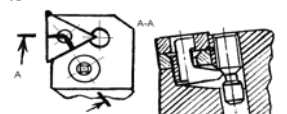


Анализ рисунка 11, а позволяет заключить, что с увеличением относительной площади касания базовой грани в соотношении 1 : 1,1 : 1,59 соответственно уменьшаются максимальные перемещения пластины в 1,22 и 1,72 раза, при этом средний коэффициент жесткости увеличивается в 1,7 и 1,87 раза.

Переход от типов крепления *PW* к *PT*, *CC* и *PP* позволил установить, что статическая точность повысилась соответственно в 1,45, 1,78 и 2,46 раза, при изменении среднего коэффициента жесткости в 0,78; 0,82; 1,51 раза.

Применение типов крепления *PW* и *PT* позволяет соответственно повысить статическую точность в 1,53 раза при увеличении среднего коэффициента жесткости 1,75 раза, что обеспечивается дополнительной составляющей силы крепления в конструкции типа *PW*.

Установлено, что применение четырех-, трех- и пятигранных пластин в державках с типом крепления *PW*, с максимальной контурной площадью касания базовых граней приводит к изменению статической точности в соотношении 1 : 1,5 : 1,28 вследствие влияния формы пластины на уровень контактных перемещений. Полученные результаты соглаются с расчетными в пределах 10 %.

Таблица 4. – Эскизы рабочих частей резцов

Типы крепления СМП	Эскизы рабочей части	Эскизы рабочей части
1.1 PW 1.2 PT	1.1 	1.2 
1.3 PP 1.4 CC	1.3 	1.4 
1.5 KL 1.6 WP	1.5 	1.6 

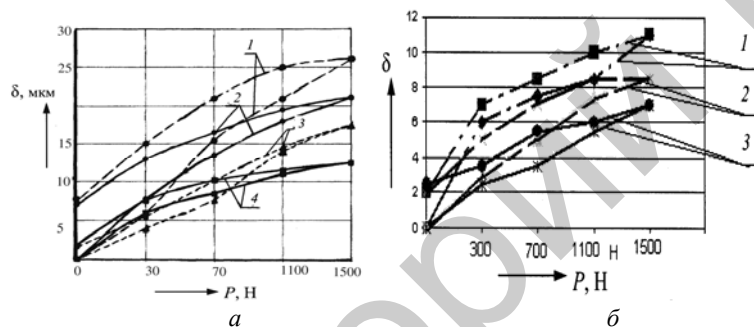


Рисунок 11. – Графики статической точности резцов с пятигранными пластинами (а) типов крепления PT (1); PW с относительными площадями касания (0,271 – 2; 0,287 – 3; 0,431 – 4) и с четырехгранными пластинами (б) типов крепления PT (1), PP (2) и CC (3)

Разработана методика вероятностной оценки точности инструментальной наладки, раскрывающая связи между ее статистическими параметрами в различных условиях эксплуатации сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок.

В пятой главе «Повышение работоспособности сборного металло-режущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок» приведен анализ влияния конструкторско-технологических методов на показатели работоспособности сборного инструмента.

Получены уравнения, устанавливающие связи между степенью резервирования элементов, вероятностью безотказности и риском отказа инструмента с автоматической сменой режущих кромок, учитывающие способ, вид и условия резервирования.

Для работы инструмента с автоматической сменой режущих кромок требуется встроенный или внешний приводы. В качестве внешнего привода могут использоваться приводы оборудования.

Впервые предложена математическая модель кинематики привода механизма автоматической смены режущих кромок инструмента, позволяющая автоматизировать расчеты приводов оборудования. Предложена классификация структур приводов и их математические модели, используя которые получены зависимости для определения передаточных отношений передач:

– понижающих

$$i_{p'_{j-1,j}} = \frac{1}{\varphi^{e'_{j-1,j} - z_{j-1}(p'_{j-1,j} - 1)}}; \quad (12)$$

– повышающих

$$i_{p''_{j-1,j}} = \varphi^{e''_{j-1,j} - z_{j-1}(p''_{j-1,j} - 1)}, \quad (13)$$

где φ – знаменатель геометрической прогрессии ряда частот привода; $e'_{j-1,j}$ $e''_{j-1,j}$ – принятые интервалы регулирования в понижающей и повышающих группах передач между валами $j-1, j$; z_{j-1} – количество скоростей на предыдущем валу в рассматриваемой группе передач; $p''_{j-1,j}$ – номер повышающей передачи, $p''_{j-1,j} = 1, \dots, \ell''_{j-1,j}$; $p'_{j-1,j}$ – номер понижающей передачи $p'_{j-1,j} = 1, \dots, l'_{j-1,j}$; $l'_{j-1,j}$ – количество понижающих передач $l'_{j-1,j} = e'_{j-1,j} / z_{j-1}$; $\ell''_{j-1,j}$ – количество повышающих передач $\ell''_{j-1,j} = e''_{j-1,j} / z_{j-1}$.

Впервые использованы графы при формировании привода, позволившие рационально расположить валы в приводе и элементы кинематики относительно входного и выходного звеньев.

Показано, что для повышения работоспособности СМИ с АСРК наиболее рационально на опорную поверхность СМП наносить покрытия с повышенными демпфирующими свойствами, а боковые поверхности дополнительно обрабатывать.

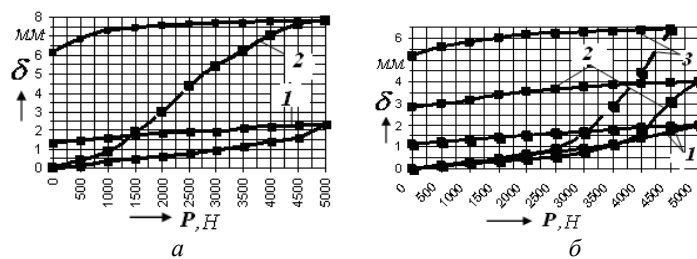
Разработаны демпфирующие композиционные материалы на основе эпоксиполиэфирных смол с абразивосодержащими наполнителями для контактных поверхностей сборного инструмента. В составе композиционного материала использовали: эпоксидную смолу (ЭД-40), полиэфирную смолу (ПЭ-265), полиамид (Л-20), ускоритель, 3%-ный раствор парафина в стироле (марки Б), инициатор (гидроперекись изопропилбензола) и наполнитель. В качестве наполнителя использовали материалы, обладающие высокой твердостью и абразивной способностью, основу таких материалов составляли электрокорунды и карбиды кремния. Для обеспечения требуемой теплопроводности наполнитель содержал металлические частицы. Методом инфракрасной спектроскопии контролировали структурные изменения, происходящие в эпоксидном связующем в процессе структурирования, ИК-спектры регистрировали при помощи двулучевого спектрометра UR-20 по прямому и дифференциальному методу.

Термостойкость полученного материала покрытия исследовалась методом дифференциально-термического анализа. Установлено, что деструкция связующего носит термоокислительный характер. Пик экзотермических кривых смещен в область высоких температур, по сравнению с материалом без наполнителя, что является положительным показателем.

Демпфирующую способность оценивали при исследовании на сжатие образцов, изготовленных по ГОСТ 4651–82. Размеры образцов: диаметр 8 мм, высота 15 мм. Скорость нагружения образцов составляла 50 Н/с. Нагружение производилось от 0 до нагрузки, которую выдерживал образец без разрушения. Измерение деформации образцов производилось через каждые 500 Н непрерывного сжатия каждого образца. После того как было проведено нагружение, образцы подвергались непрерывной разгрузке с измерением деформации через каждые 500 Н.

По результатам испытания каждой серии образцов было определено среднее значение деформации каждой композиции. Результаты расчетов представлены в виде графиков зависимости значения средней деформации образцов от величины нагрузки при нагружении образцов и их разгрузке (рисунок 12).

Составы покрытий контактных поверхностей оптимизированы по адгезионной прочности к твердым сплавам. Получены регрессионные уравнения, позволяющие выявить влияние количественного содержания компонентов материала на адгезионную прочность.



1 – с наполнителем из электрокорунда нормального 14А;
2 – с наполнителем из электрокорунда белого 24А (а); **1** – с наполнителем из электрокорунда белого (25А 40СМ и стальной стружки (сталь Р6М5));
2 – с наполнителем 25А 40СМ и стальная стружка (сталь 25ХГТ);
3 – с наполнителем 25А 40СМ и стальная стружка (сталь 45) (б)
Рисунок 12. – Графики деформации образцов в цикле нагружение-разгрузка

Получены зависимости между силовыми и температурными показателями и параметрами процесса обработки композиционных армированных материалов. Температура определялась методом инфракрасной пирометрии. Для $V = 50 \dots 300$ м/мин; $S = 0,1 \dots 0,6$; $t = 0,1 \dots 1$ мм получено регрессионное уравнение

$$\theta = 168,5 + 0,32V + 31,05S + 38,67t + 71St, \quad (14)$$

где θ – температура на передней поверхности резца; V , S , t – параметры режима резания.

Установлена степень влияния композиционных покрытий базовых граней СМП на их относительные контурные площади касания и получены расчетные формы площадей касания с заданной вероятностью.

Экспериментально установлено, что в среднем сборные резцы с композиционным покрытием опорных поверхностей обладают в 1,3 раза большей прочностью по сравнению с резцами без покрытия, а в условиях НПО «Машиностроитель» выявлено, что износостойкость резцов с композиционным покрытием в 1,4 раза выше, чем без покрытия.

Исследовано влияние состава абразивного инструмента на качество обработки боковых поверхностей СМП и разработана методика оценки НДС режущих элементов доводочного инструмента.

Используя математическую модель, предложенную в работах Kulman-Wilsdorf, полученную на основе теории Блока и Егера, установлено влияние нормальной нагрузки на температуру пятен контакта алмазное зерно – обрабатываемая поверхность. Полученные результаты согласуются с экспериментальными исследованиями.

В шестой главе «Практические результаты исследований и их внедрение» разработаны основные принципы конструирования сборного инструмента с ав-

томатической сменой режущих кромок, приведены конструкции инструмента и устройства для восстановления их работоспособности. Предложена конструктивная функциональная структура инструмента, позволяющая определить взаимосвязи и взаимовлияние конструктивных элементов и выполнять оптимизацию инструмента. Разработана вариантная структура инструментальной оснастки для автоматизированного производства, обеспечивающая получение конструкций для конкретных условий эксплуатации. На основе разработанных принципов предложена структурная схема методологии создания сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок и отдельные конструкции сборных режущих инструментов с автоматической сменой режущих кромок для повышения эффективности работы гибких производственных систем (рисунок 13). При использовании в конструкциях инструмента сменных перетачиваемых пластин разработана оснастка для восстановления работоспособности режущих элементов (рисунок 13).

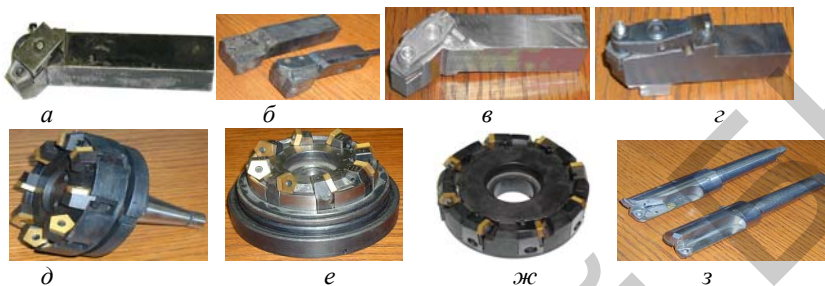
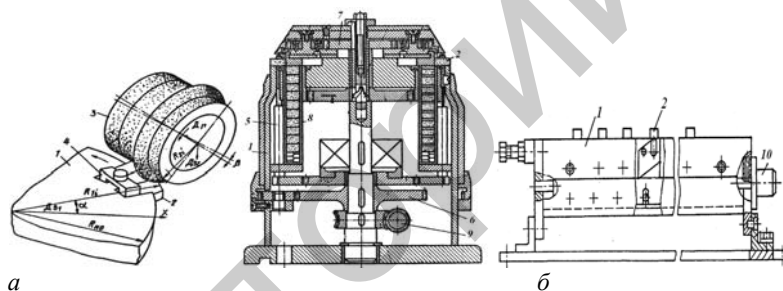


Рисунок 13. – Фотографии инструментов с автоматической сменой режущих кромок: *a–z* – резцы; *д–ж* – торцовые фрезы; *з* – сверла



1 – корпус; 2 – режущие элементы; 3 – абразивный инструмент; 4 – прижим; 5 – устройство закрепления СМП; 6 – устройство поворота СМП; 7 – устройство подачи резервных пластин; 8 – накопитель СМП; 9 – привод приспособления; 10 – привод поворота пластин

Рисунок 14. – Эскизы приспособлений для восстановления режущих пластин по методам: обката (*a*), копирования (*б*) и касания (*в*)

В приложении содержатся результаты экспериментальных исследований и акты экономической эффективности, результаты внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. На основе системного анализа исследований процесса формирования обработанных поверхностей выделены виртуальные поверхности и предложена их классификация с учетом статических, динамических и тепловых деформаций элементов технологических систем, их износа и геометрических погрешностей, а также свойств обрабатываемых материалов, используя которую и в соответствии с требуемой топографией обработанных поверхностей, разработаны принципы генерирования образующих и направляющих поверхностей и предложена структура их формообразования, отличающаяся инвариантностью относительно сложности поверхностей, а также используя принципы генерирования припуска в его продольных и поперечных секущих плоскостях, разработаны схемы срезания, обладающие инвариантностью по отношению к методам и способам обработки, позволяющие получать формообразующие и режущие кромки инструмента с траекториями их движений [1, 6, 13, 28, 30, 37, 40, 44].

2. На основе разработанных математических моделей обобщенной кинематической схемы формообразования и формообразующей кромки, отличающейся универсальностью в отношении к методам и способам обработки, получен алгоритм процессов синтеза и анализа формообразования требуемой топографии обработанных поверхностей, обеспечивающий получение рациональных размеров и расположение формообразующих кромок сменных многогранных пластин относительно образующих обработанных поверхностей, а также управление режимами обработки. Используя полученный алгоритм для частных случаев токарной обработки цилиндрической поверхности с образующей в виде дуги окружности и фрезерования плоской и цилиндрической поверхностей, установлено, что максимальное расстояние между кинематической и геометрической поверхностями (МРКГП) цилиндрической поверхности с образующей в виде дуги окружности отличается от своих минимальных значений в 13,5 раз, и при увеличении радиуса кривизны образующей обработанной поверхности в два раза МРКГП в точках с минимальным радиусом уменьшается в 1,07 раза, а с максимальным радиусом – увеличивается в 1,3 раза, при фрезеровании плоской поверхности с увеличением радиального биения зубьев фрезы в 2 раза МРКГП возрастает в 4,1 раза при $S_z = 0,1$; в 4,6 раза при $S_z = 0,2$ и в 4,5 при $S_z = 0,3$ мм/зуб. [6, 20, 23, 24, 28, 38, 46–48, 59, 61, 63, 77, 91].

3. На основе теоретических исследований, по разработанным математическим зависимостям между геометрическими параметрами режущих (формообразующих) зубьев сборного инструмента в инструментальной, статической и кинематической системах координат для не вращающегося и вращающегося инструментов с направлением движения подачи вдоль его оси и по радиусу

сформирован алгоритм определения углов ориентации сменных многогранных пластин относительно системы координат корпуса инструмента, учитывающий их вид и тип, а также требуемые значения задних углов зуба инструмента в кинематической системе координат. Используя полученные зависимости, установлено, что в точках режущей кромки инструмента, расположенной на расстояниях 1 мм, 0,05 мм от оси вращения заготовки (инструмента), задние углы в кинематической системе координат уменьшаются соответственно на $3,65^\circ$ и $7,3^\circ$ [1, 6, 25, 39, 83].

4. На основе гравитационно-геометрических связей контактирующих элементов и метода последовательных микроперемещений разработаны математические модели контактирования элементов сборного инструмента, обеспечивающие получение пространственно-геометрических параметров области контакта с учетом виртуальных топографий контактирующих поверхностей, позволяющие определять взаимное расположение и точность позиционирования составляющих элементов инструментальной оснастки с заданной вероятностью.

Используя полученные модели, для пластин трех-, четырех- и пятигранных форм со значениями углов при вершине β соответственно равными 60° , 90° , 108° , получены относительные погрешности их позиционирования, составляющие соответственно 1 : 1,15 : 1,125 [4, 6, 11, 22, 35, 49, 65, 74, 84, 89].

5. На основе разработанной математической модели напряженно-деформированного состояния рабочей части инструмента, с использованием теории графов, обеспечивающей уменьшение в три раза количества уравнений разрешающей системы по сравнению с методом конечных элементов, установлено, что при увеличении толщины зуба инструмента в 1,5 раза значения максимальных напряжений в тонком слое передней поверхности уменьшаются в 1,2 раза. При толщине зуба $b = 8$ мм уровень напряжений достигает максимума, в точках на расстоянии 1,4 мм от вершины (вдоль режущей кромки), и на расстоянии 0,7 мм от кромки (в направлении оси инструмента), а при толщине зуба $b = 12$ мм в аналогичных точках напряжения уменьшаются в 1,45 раза, а в точках, расположенных на расстоянии 6,8 мм от кромки, уровень напряжений падает в 1,17 раза. Увеличение толщины зуба в 1,5 раза приводит к уменьшению значений максимальных напряжений по задней поверхности в 1,2 раза, а в точках, расположенных на расстоянии 4,5 мм от режущей кромки, уровень напряжений падает в 1,17 раза [4, 6, 21, 29, 32, 41, 50, 71, 72, 78, 85, 87].

6. На основе разработанной методики экспериментальных исследований статической точности сборного инструмента со сменными многогранными пластинами установлено, что применение четырех-, трех-, пяти- и шестигранных пластин в державках с типом крепления РТ, с максимальной контурной площадью касания базовых граней, приводит к изменению относительной статической точности в соотношении 1 : 1,1 : 0,42 : 0,73, с увеличением относительной площади касания базовой грани пластин в соотношении 1:1,69:1,77 изменяется статическая точность в соотношении 1 : 1,78 : 4,16, при этом средний коэффициент жесткости изменяется в соотношении 1:1,6:5,8. Применение

типов крепления PW, PT, PP и CC приводит к изменению статической точности в соотношении 1 : 1,1 : 1,38 : 2,75 и среднего коэффициента жесткости – 1 : 0,81 : 3,71 : 2,39. Применение типов крепления PW и PT приводит к изменению статической точности в соотношении 1 : 1,53 и среднего коэффициента – 1 : 1,75 [4, 6, 15, 31, 33, 40, 43, 52, 58, 76, 86].

7. На основе впервые разработанных математических моделей кинематики внешних приводов закрепления СМП и смены кромок сборных металлорежущих инструментов с автоматической сменой режущих кромок (СМИ с АСРК) по предложенной классификации структур приводов, с учетом дискретно-логарифмических связей параметров начального и конечного приводных элементов, совмещении или разделении исполнительных движений разного функционального назначения, получен алгоритм синтеза приводов, позволяющий автоматизировать процесс проектирования и оптимизации внешних приводов СМИ с АСРК [14, 17, 55, 64].

8. В результате исследований прочности, жесткости и износостойкости сборных резцов со сменными многогранными пластинами разработаны составы покрытий опорных контактных поверхностей элементов сборного инструмента на основе эпоксиполиэфирных смол и латуни марки Л63 с абразивосодержащим наполнителем, обеспечившие увеличение контурных площадей касания (при постоянной вероятности), у трехгранных пластин в 2 раза (с увеличением среднего коэффициента жесткости в 1,76 раза, коэффициента прочности в 1,45 раза), у четырехгранных пластин в 1,8 раза (с увеличением среднего коэффициента жесткости в 1,6 раза, коэффициента прочности в 1,37 раза) и у пятигранных пластин в 2,6 раза (с увеличением среднего коэффициента жесткости в 1,9 раза, коэффициента прочности в 1,31 раза) [2, 3, 5, 6, 9, 10, 17–19, 26, 36, 42, 45, 51, 54, 56, 57, 60, 62, 68–70, 73, 79, 80–82, 88].

9. На основе методологии и принципов создания сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок разработаны их структурные схемы, отличающиеся инвариантностью относительно типов и видов инструмента, учитывающие топографию обработанных поверхностей, статистические параметры элементов сборного инструмента и позволяющие управлять процессом формирования инструмента с автоматической сменой режущих кромок с заданным уровнем надежности и автоматизировать его проектирование. Получены математические модели вероятности безотказности, риска и интенсивности отказов СМИсАСРК при различных видах резервирования и условиях эксплуатации. Установлено, что вероятность безотказной работы СИО, согласующаяся с усеченным нормальным законом, в течение длительного времени работы $t_{отн} = [0...0,4t]$ остается практически постоянной и система высоконаджна, но в течение короткого времени она теряет ресурс, а система с экспоненциальным законом распределения более надежна в период $t_{отн} = [0,57t...t]$, и чем выше надежность резервированной системы и меньше время ее работы, тем выше эффективность резервирования, с ростом кратности резервирования функция преимущества не пропорционально увеличивается [1, 2, 3, 4, 6–8, 12, 27, 34, 46, 66, 67, 75, 90].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанные составы покрытий контактных поверхностей сборных инструментов на основе эпоксиполиэфирных смол с абразивным наполнителем из зерен белого электрокорунда и карбида кремния в условиях Опытного экспериментального завода НПО «Машиностроитель» при обработке заготовок из стали 40 на станке 16К20 обеспечили повышение периода стойкости в 1,3–1,4 раза по сравнению со стандартными резцами без покрытия СМП. В условиях РУП «Гомельский завод пусковых двигателей» такие конструкции резцов позволили получить годовой экономический эффект 34118,712 тыс. руб. РБ (в ценах 1995 г.) и в условиях ОАО «Речицкая сельхозтехника» – годовой экономический эффект составил 690132 руб. РБ (в ценах 2002г.), а на заготовительном участке Гомельского завода станочных узлов (ГЗСУ) стойкость резцов возросла на 10 %.

2. Разработанные методики расчетов геометрических параметров зуба сборных инструментов в инструментальной, статической и кинематической системах координат, точности позиционирования сменных многогранных пластин в корпусе сборного инструмента, геометрической и статической точности инструментальных блоков и на их основе программный комплекс автоматизированного проектирования сборных торцовых фрез, осевого инструмента и резцов на РУП «Гомельский завод специнструмента и технологической оснастки» (ГЗСИиТО) в условиях конструкторского отдела и инструментального цеха № 3, позволили сократить время проектирования от 2 до 8 раз, в зависимости от сложности инструмента и получить в 2012 г. экономический эффект 387 млн бел. руб. С применением разработанного комплекса выпущено продукции в расчете на полугодие на сумму 17,494 млрд руб., а также разработан состав и технология получения композиционных материалов для пайки режущих элементов инструментов и в условиях ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (СИПРсОП) достигнуто сокращение стоимости припоя в 2,9 раза, что позволило получить экономический эффект от внедрения в производство 120 млн бел. руб. Аналогичные составы внедрены в производство на РУП «ГЗСИиТО» в условиях инструментального цеха № 3.

3. Разработанные конструкции сборного инструмента с комбинированной схемой срезания припуска, по комбинированной схеме формообразования методом касания позволили в 2014 г. при обработке ходовых винтов в условиях ОАО «ГЗСУ» повысить производительность труда в 2,3 раза и позволят получить экономический эффект 61, 845 млн. бел. руб. Методики расчета приводов закрепления СМП и смены кромок СМИ с АСРК позволили сократить время проектирования приводов оборудования от 2-х до 10-ти раз, в зависимости от его сложности, оптимизировать приводы по критериям габаритных размеров, металлоемкости и стоимости, сократить период перехода на новую модификацию приводов, достигнуть увеличения объемов производства за счет сокращения времени проектирования и подготовки производства, что в совокупности позволило получить экономический эффект от внедрения в условиях ЗАО «СИПРсОП» 390 млн бел. руб. В условиях ОАО «ГЗСУ» годовой экономиче-

ский эффект от сокращения сроков проектирования составил 261,6 млн бел. руб. и в полугодовом расчете 2012 г. выпуск станков, спроектированных с применением комплекса автоматизированного проектирования приводов главного движения и подач, составил более 43 млрд бел. руб. В условиях ОАО «Саста» (Россия) годовой экономический эффект от сокращения сроков проектирования составил 1,214 млн рос. руб. и за первое полугодие 2012 г. выпуск станков, спроектированных с применением комплекса автоматизированного проектирования приводов главного движения и подач, составил 233,429 млн рос. руб.

4. Перспективные направления применения результатов исследования, по которым проводится опытно-промышленная апробация:

- методы оценки напряженно-деформированного состояния и результаты исследования НДС позволяют значительно сократить вычислительные ресурсы ЭВМ и повысить производительность процесса проектирования сборных режущих инструментов [6];

- разработанная гамма покрытий на основе полимеров, в том числе защищенные патентами [106, 109], позволяет повысить виброустойчивость инструментальной оснастки, а следовательно – точность и производительность процесса обработки за счет демпфирующих свойств материалов. Кроме того, обеспечивается рециклинг отходов абразивного производства [2, 3, 6];

- новые конструкции устройств системы инструментообеспечения автоматизированных производств [1, 4, 5, 6, 12, 92, 95–98, 100–103, 104, 105, 107, 108, 110] позволяют организовать и значительно повысить эффективность таких производств, облегчить решение проблемы экономии трудовых ресурсов;

- новые устройства для восстановления и доводки режущих граней инструмента [93, 94, 99], позволяющие повысить их режущие свойства и обеспечивающие взаимозаменяемость сменных многогранных пластин, а соответственно – повышающие точность обработанных поверхностей и производительность обработки.

5. Результаты работы используются в учебном процессе студентов, магистрантов и аспирантов УО «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого» по специальностям 1-36 01 01 «Технология машиностроения» и 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительных производств» (учебные дисциплины «Инструментальные системы», «Математическое моделирование и САПР процесса резания, станков и инструментов», «Учебно-исследовательская работа студентов», «Конструирование и расчет технологического оборудования», «Основы научных исследований и инновационная деятельность»).

По результатам диссертационных исследований разработан авторский курс лекций с изданием учебного пособия с грифом Министерства образования РБ по дисциплине «Математическое моделирование и САПР процесса резания, станков и инструментов», а также подготовленные в соавторстве три учебных пособия и изданные с грифом Министерства образования, внедрены в учебный процесс по дисциплинам «Резание материалов», «Режущий инструмент» и «Инструментальные системы».

**СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ****Монографии**

1–А. Ресурсосберегающий режущий инструмент и рациональное инструментообеспечение / М.И. Михайлов, П.В. Сысоев, А.А. Барановский, В.Н. Жабинский, В.Я. Прушак; под общ. ред. М.И. Михайлова, П.В. Сысоева. – Минск: НТО машиностроителей, 1991. – 108 с.

2–А. Фрикционные композиты на основе полимеров / А.К. Погосян, П.В. Сысоев, Н.Г. Меликсетян, М.М. Близнач, П.Н. Богданович, Н.А. Ламбардян, М.И. Михайлов, В.Я. Прушак, А.С. Старовойтов; под ред. В.А. Белого. – Минск: Информтрибо, 1992. – 218 с.

3–А. Прушак, В.Я. Технология древесно-полимерных композитов для деталей машин / В.Я. Прушак, С.Н. Колдаева, М.И. Михайлов; под ред. П.В. Сысоева. – Минск: Информтрибо, 1992. – 226 с.

4–А. Михайлов, М. И. Повышение прочности сборного режущего инструмента / М. И. Михайлов; под ред. П.И. Ящерицына. – Минск: Навука і тэхніка, 1993. – 174 с.

5–А. Михайлов, М.И. Износостойкость ограничных дисков / М.И. Михайлов, В.Я. Щерба, В.Я. Прушак; под ред. П.Н. Богдановича, П.В. Сысоева. – Гомель: Инфотрибо, 1996. – 160 с.

6–А. Михайлов, М.И. Сборный металлорежущий механизированный инструмент: Ресурсосберегающие модели и конструкции / М.И. Михайлов; под ред. Ю.М. Плескачевского. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2008. – 339 с.

Статьи в научных журналах

7–А. Сысоев, П.В. Прогнозирование надежности процесса обработки по критерию износа резца / П.В. Сысоев, М.И. Михайлов // Трение и износ. – 1990. – № 4. – С. 746–749.

8–А. Оптимизация периода стойкости ограничного диска / М.И. Михайлов, П.В. Сысоев, В.Я. Прушак, В.Я. Щерба // Весці АН РБ. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1995. – № 4. – С. 11–15.

9–А. Оптимизация процесса механической обработки деталей из древесно-полимерных пресскпозиций / М.И. Михайлов, В.Я. Прушак, В.Я. Щерба, И.М. Заяц // Материалы, технологии, инструмент. – 1996. – № 3. – С. 73–76.

10–А. Михайлов, М.И. Оптимизация состава фрикционного покрытия твердосплавных пластин сборного инструмента / М.И. Михайлов, З.Я. Шабакеева // Материалы, технологии, инструмент. – 1996. – № 3. – С. 28–30.

11–А. Михайлов, М.И. Исследование геометрических параметров базовых граней сменных многогранных пластин / М.И. Михайлов, З.Я. Шабакеева // Материалы, технологии, инструмент. – 1996. – № 3. – С. 84–87.

12–А. Михайлов, М.И. Универсально-сборный инструмент / М.И. Михайлов, В.Я. Щерба // Материалы, технологии, инструмент. – 1996. – № 1. – С. 99–102.

13–А. Михайлов, М.И. Решение обратной задачи формообразования / М.И. Михайлов, В.Я. Щерба // *Материалы, технологии, инструмент.* – 1996. – № 1. – С. 103–106.

14–А. Михайлов, М.И. Методика кинематического расчета смешанной структуры механического привода станка / М.И. Михайлов // *Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого.* – 2000. – № 2. – С. 34–41.

15–А. Михайлов, М.И. Исследование влияния контурных площадей касания базовых граней СМП на статическую точность сборных резцов / М.И. Михайлов, В.В. Свич, А.А. Карпов // *Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого.* – 2001. – № 1. – С. 16–20.

16–А. Плескачевский, Ю.М. Работоспособность сборных резцов с композиционным покрытием многогранных пластин / Ю.М. Плескачевский, М.И. Михайлов, З.Я. Шабакаева // *Трение и износ.* – 2004. – Т. 25, № 5. – С. 519–522.

17–А. Михайлов, М.И. Методика кинематического расчета привода станка с множительной структурой / М.И. Михайлов // *Теория и практика машиностроения.* – 2005. – № 2. – С. 40–42.

18–А. Михайлов, М.И. Влияние наполнителя на податливость композиционного материала / М.И. Михайлов, Ю.М. Плескачевский, А.А. Карпов, З.Я. Шабакаева // *Материалы, технологии, инструмент.* – 2007. – Т. 12, № 4. – С. 52–54.

19–А. Михайлов, М.И. Исследование влияния компонентов композиционного материала на основе эпоксиполиэфирных смол на его свойства / М.И. Михайлов, А.А. Карпов, Ю.М. Плескачевский // *Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого.* – 2008. – № 3–4. – С. 49–55.

20–А. Михайлов, М.И. Анализ влияния параметров процесса точения на топографию цилиндрической кинематической поверхности / М.И. Михайлов // *Материалы, технологии, инструмент.* – 2009. – Т. 14, № 2. – С. 87–90.

21–А. Михайлов, М.И. Исследование влияния отклонения формы паза державки напайного резца на его напряженное состояние / М.И. Михайлов, М.Р. Шейбак // *Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого.* – 2009. – № 2. – С. 49–55.

22–А. Михайлов, М.И. Моделирование точности позиционирования сменных многогранных пластин в корпусе инструмента плоскостным методом / М.И. Михайлов // *Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого.* – 2009. – № 3. – С. 30–37.

23–А. Михайлов, М.И. Моделирование инструментальной поверхности, формируемой сборной фрезой / М.И. Михайлов // *Материалы, технологии, инструмент.* – 2010. – Т. 15, № 4. – С. 22–26.

24–А. Михайлов, М.И. Моделирование образующих инструментальных поверхностей, формируемых сборными периферийными фрезами / М.И. Михайлов // *Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого.* – 2011. – № 1. – С. 24–30.

25–А. Михайлов, М.И. Анализ влияния параметров сменных многогранных пластин на геометрические параметры зуба инструмента / М.И. Михайлов // *Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого.* – 2011. – № 4. – С. 18–26.

26–А. Михайлов, М.И. Влияние абразивосодержащего наполнителя на прочность композиционного материала на основе латуни / М.И. Михайлов, Д.В. Никитенко, В.А. Куземченко // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2012. – № 3. – С. 35–43.

27–А. Михайлов, М.И. Структурная оптимизация надежности системы инструментообеспечения по критериям риска и наработки на отказ/ М.И. Михайлов // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2012. – № 4. – С. 20–28.

28–А. Михайлов, М.И. Влияние параметров торцевой фрезы на размеры срезаемого слоя и вид обработанной поверхности/ М.И. Михайлов, О.А. Лапко // Вестн. ПГУ. – 2013. – № 11. – С. 52–57.

29–А. Михайлов, М.И. Влияние статистических параметров сменных многогранных пластин на контактные напряжения с корпусом сборного инструмента / М.И. Михайлов // Вестн. Черниг. технологич. университета. – 2013. – № 4. – С. 48–55.

30–А. Михайлов, М.И. Методика автоматизированного выбора схем формообразования обработанных поверхностей/ М.И. Михайлов, Ю.М. Плещачевский // Вестн. Рост. Гос. ун-та путей сообщения. – 2014. – № 3. – С. 21–27.

Статьи в сборниках научных трудов

31–А. Михайлов, М.И. Расчет жесткости осевого режущего инструмента / М.И. Михайлов // Машиностроение. – 1988. – Вып. 13. – С. 46–49.

32–А. Михайлов, М.И. Контактные напряжения на опорной грани режущей пластины сборного инструмента / М.И. Михайлов // Машиностроение. – 1989. – Вып. 14. – С. 11–16.

33–А. Михайлов, М. И. Экспериментальное исследование сборных резцов / М. И. Михайлов // Машиностроение. – 1990. – Вып. 15. – С. 39–42.

34–А. Михайлов, М.И. Расчет вместимости инструментального магазина многоцелевого станка / М.И. Михайлов // Машиностроение. – 1990. – Вып. 15. – С. 122–124.

35–А. Михайлов, М.И. Математическая модель точности сборного инструмента / М.И. Михайлов // Новые технологии в машиностроении и вычислительной технике. – Брест: БПИ, 1998. – С. 111–116.

36–А. Михайлов, М.И. Исследование фрикционных покрытий базовых граней СМП / М.И. Михайлов // В кн: Современные материалы, оборудование и технология упрочнения и восстановления деталей машин. – Новополоцк, 1999. – С. 356–358.

37–А. Михайлов, М.И. К вопросу о методике моделирования кинематических поверхностей, сформированных режущим инструментом по различным схемам формообразования / М.И. Михайлов // Машиностроение. – Минск, 2000. – Вып. 16. – С. 125–132.

38–А. Михайлов, М.И. Методика расчета профиля фрезы с учетом характера винтовой кинематической поверхности детали / М.И. Михайлов // Машиностроение. – Минск, 2001. – Вып. 17. – С. 47–53.

39–А. Михайлов, М.И. Методика автоматизированного расчета углов фасонного резца / М.И. Михайлов // Машиностроение. – Минск, 2002. – Вып. 18. – С. 60–63.

40–А. Михайлов, М.И. Экспериментальные исследования статической точности сборных резцов с трех- и пятигранными пластинами / М.И. Михайлов // Машиностроение. – Минск, 2003. – Вып. 19. – С. 195–199.

41–А. Плескачевский, Ю.М. Анализ напряженно-деформированного состояния сборного инструмента графовым методом / Ю.М. Плескачевский, М.И. Михайлов // Актуальные вопросы машиноведения. – Минск, 2013. – Вып. 2. – С. 363–368.

42–А. Плескачевский, Ю.М. Влияние композиционного покрытия базовых поверхностей СМП на прочность сборных резцов / Ю.М. Плескачевский, М.И. Михайлов // Актуальные вопросы машиноведения. – Минск, 2013. – Вып. 2. – С. 359–362.

Статьи в сборниках материалов конференций

43–А. Михайлов, М.И. Оптимизация системы крепления СМП сборного инструмента / М.И. Михайлов // Современные материалы, оборудование и технология упрочнения и восстановления деталей машин: темат. сб. – Вып. 2. – Республ. науч.-техн. конф., Новополоцк, 27–28 апр. 1995 г. – Новополоцк, 1995. – С. 78–79.

44–А. Михайлов, М.И. Схематизация срезания припуска как способ создания прогрессивных видов обработки и инструмента / М.И. Михайлов // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: темат. сб. – Вып. 2. – Республ. науч.-техн. конф., Новополоцк, 27–28 апр. 1995 г. – Новополоцк, 1995. – С. 79–80.

45–А. Михайлов, М.И. Исследование жесткости сборных резцов с фрикционным покрытием СМП / М.И. Михайлов, З.Я. Шабакаева // Современные проблемы машиноведения: материалы междунар. науч. конф., Гомель, 1–3 июля 1998 г. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого. – Гомель, 1998. – С. 88–89.

46–А. Михайлов, М.И. Оптимизация на ЭВМ фрезы и режима обработки деталей / М.И. Михайлов // Вычислительные методы и производство: реальность, проблемы, перспективы: материалы междунар. науч. конф., Гомель, 12–13 нояб. 1998 г. / Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель, 1998. – С. 10–11.

47–А. Михайлов, М.И. Математическое моделирование формообразующих кромок инструмента / М.И. Михайлов // Современные направления развития производственных технологий и робототехника: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24 окт. 1999 г. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 1999. – С. 137.

48–А. Михайлов, М.И. Моделирование номинальных кинематических поверхностей, полученных методом огибания / М.И. Михайлов // Современные направления развития производственных технологий и робототехника: мате-

риалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24 окт. 1999 г. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 1999. – С. 138.

49–А. Михайлов, М.И. Исследование контурных площадей касания базовых граней СМП с эталонной плоскостью / М.И. Михайлов, А.А. Карпов // Вклад вузовской науки в развитие приоритетных направлений производственно-хозяйственной деятельности, разработку экономических и экологически чистых технологий и прогрессивных методов обучения: материалы междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24 нояб. 2000 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2000. – С. 92.

50–А. Михайлов, М.И. Исследование напряженно-деформированного состояния режущей пластины с учетом контурных площадей касания ее базовых граней с эталонной плоскостью / М.И. Михайлов // Новые конкурентоспособные и прогрессивные технологии, машины и механизмы в условиях современного рынка: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 18–19 мая 2000 г. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2000. – С. 89.

51–А. Михайлов, М.И. Влияние фрикционных покрытий СМП на их износостойкость / М.И. Михайлов, З.Я. Шабакаева // Современные проблемы машиноведения: материалы междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 1–3 июля 2000 г.: В 2 т. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого. – Гомель, 2000. – Т. 1. – С. 153–156.

52–А. Михайлов, М.И. Исследование точности сборного резца со сменной четырехгранной пластиной / М.И. Михайлов, В.В. Свич, А.А. Карпов // Современные проблемы машиноведения: материалы междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 1–3 июля 2000 г.: в 2 т. / Гомел. гос. техн. ун-т им. П.О. Сухого. – Гомель, 2000. – Т. 1. – С. 156–158.

53–А. Михайлов, М.И. Оптимизация параметров процесса точения армированных древесно-полимерных композитов / М.И. Михайлов // Создание и применение высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 17 апр. 2001 г. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2001. – С. 113.

54–А. Михайлов, М.И., Исследование влияния полимерного покрытия на статическую точность сборных резцов с многогранными пластинами / М.И. Михайлов // Прогрессивные технологии и оборудование в машиностроении и металлургии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Липецк, 11 мая. 2006 г. / Липецкий технич. ун-т. – Липецк, 2006. – С. 180–183.

55–А. Михайлов, М.И., Методика автоматизированного расчета привода металлорежущего станка с наложенными частотами / М.И. Михайлов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 14 апр. 2006 г. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2006. – С. 89–90.

56–А. Михайлов, М.И. Анализ процесса формирования эпоксиполиэфирного материала для покрытия базовых граней СМП / М.И. Михайлов, З.Я. Шабакаева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : мате-

риалы междунар науч.-техн. конф., Могилев, 17 апр. 2007 г. / Беларус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2007. – С. 68–69.

57–А. Михайлов, М.И. Исследование влияния количественного состава композиционного материала на основе эпоксиполиэфирных смол на его реологические свойства / М.И. Михайлов, А.А.Карпов, З.Я. Шабакаева, Е.Н. Ленивко, В.И. Варлыга // Техника и технологии: инновации и качество: материалы междунар. науч.-практ. конф., Барановичи, 23–24 нояб. 2007 г. / Баранович. гос. ун-т. – Барановичи, 2007. – С. 355–358.

58–А. Михайлов, М.И. Оптимизация осевого комбинированного инструмента / М.И. Михайлов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 17 апр. 2007 г. / Беларус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2007. – С. 70–71.

59–А. Михайлов, М.И. Использование сетчатых каркасов при моделировании кинематических поверхностей / М.И. Михайлов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16 апр. 2009 г. / Беларус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2009. –С. 58–60.

60–А. Михайлов, М.И. Исследование влияния абразивосодержащих наполнителей адгезионных покрытий на их прочность на сдвиг / М.И. Михайлов, В.Н. Скоба, В.Д. Никитенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 16 апр. 2009 г. / Беларус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2009. – С. 60–62.

61–А. Михайлов, М.И. Математическое моделирование топографии фасонной кинематической поверхности, полученной точением / М.И. Михайлов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22 апр. 2010 г. / Беларус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2010. – С. 61–62.

62–А. Михайлов, М.И. Исследование влияния абразивосодержащих наполнителей латунных припоев на адгезионную прочность к стали / М.И. Михайлов, Л.И. Гулевич, В.Д. Никитенко // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 22 апр. 2010 г. / Беларус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2010. – С. 63–64.

63–А. Михайлов, М.И. Математическое моделирование инструментальной поверхности при формообразовании сложной поверхности детали/ М.И. Михайлов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2012 г. / Беларус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2012. – С. 49–50.

64–А. Михайлов, М.И. Методика автоматизированного расчета привода металлорежущего станка с дискретным регулированием частоты вращения двигателя / М.И. Михайлов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2012 г. / Беларус.-Рос. ун-т. – Могилев, 2012. – С. 51–52.

65. Михайлов, М.И. Анализ точности позиционирования сменных многогранных пластин при базировании их на опорную поверхность и центральное

отверстие сборного режущего инструмента / М.И. Михайлов // Технические науки – от теории к практике: сб. ст. по материалам междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 24.08.2014 г. - Новосибирск: СибАК, 2014. – С. 79–85.

Тезисы докладов на конференциях

66–А. Михайлов, М.И. Экономия трудовых и материальных ресурсов путем применения прогрессивной оснастки / М.И. Михайлов // Достижения науки и техники в области ресурсосбережения: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 24 апр. 1989 г. / Гомел. политехн. ин-т. – Гомель, 1989. – С. 25.

67–А. Михайлов, М.И. Разработка рекомендаций по созданию режущих инструментов для обработки композиционных материалов / М.И. Михайлов // Применение композиционных материалов в народном хозяйстве: тез. докл. конф., Солигорск, 19 окт. 1992 г. / Солигор. ин-т ресурсосбережения. – Солигорск, 1992. – С. 34.

68–А. Михайлов, М.И. Исследование обрабатываемости фрикционных материалов / М.И. Михайлов // Применение композиционных материалов в народном хозяйстве: тез. докл. конф., Солигорск, 19 окт. 1992 г. / Солигор. ин-т ресурсосбережения. – Солигорск, 1992. – С. 35.

69–А. Фрикционные покрытия на основе реактопластов для виброгашения в системе крепления режущего инструмента / П.В. Сысоев, М.И. Михайлов, М.М. Близнац, З.Я. Шабакаева // Трение, изнашивание, усталость: тез. докл. между. симпозиума по трибофатике, Гомель, 4–5 июня 1993 г. / Белорус. ин-т инженеров железнодорож. транспорта. – Гомель, 1993. – С. 92.

70–А. Демпфирующие композиционные покрытия на основе эпоксиполимерных смол / П.В. Сысоев, М.И. Михайлов, М.М. Близнац, З.Я. Шабакаева // Физика и механика композиционных материалов на основе полимеров: тез. докл. науч. конф., Гомель, 1993 г. / ИММС им. В.А. Белого НАН Б. – Гомель, 1993. – С. 29–30.

71–А. Михайлов, М.И. Опыт применения ЭВМ в расчетах на прочность сборного инструмента / М.И. Михайлов // Использование ЭВМ в учебном процессе и научных исследованиях: тез. докл. междунар. научн. конф., Гомель, 14 окт. 1995 г. / Гомел. гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель, 1995. – С. 27.

72–А. Михайлов, М.И. К механике процесса разрушения сборного режущего инструмента / М.И. Михайлов, В.Я. Прушак, П.Л. Кухарев // Механика-95: тез. докл. Белорус. конгресса по теорет. и прикладной механике, Минск, 6–11 февр. 1995 г. – Гомель: ИММС АНБ, 1995. – С. 166.

73–А. Михайлов, М.И. Влияние композиционных покрытий базовых граней СМП на стойкость сборных резцов / М.И. Михайлов, П.В. Сысоев, З. Я. Шабакаева // Полимерные композиты-95: тез. докл. междунар. науч. конф., Солигорск, 1995 / Ин-т проблем ресурсосбережения. – Солигорск, 1995. – С. 72.

74–А. Михайлов, М.И. Стохастическая модель точности позиционирования режущего элемента сборного инструмента / М.И. Михайлов // Состояние и перспективы развития науки и подготовки инженеров высокой квалификации

в Белорусской государственной академии: материалы междунар. науч.-техн. конф. к 75-летию БГПА: в 8 ч. / Белорус. гос. политехн. академия. – Минск, 1995. – Ч. 2. – С.146.

75–А. Михайлов, М.И. Обеспечение надежности сборного инструмента по критерию прочности / М.И. Михайлов // Создание ресурсосберегающих машин и технологий: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 24 окт. 1996 г. / Белорус.-Рос. ун-т. – Могилев, 1996. – С. 196.

76–А. Михайлов, М.И. Моделирование статической точности сборного инструмента / М.И. Михайлов // Материалы междунар. науч.-техн. конф. к 30-летию БрПИ, Брест, 24 апр. 1996 г. / Брест. политехн. ин-т. – Брест, 1996. – С. 87.

77–А. Михайлов М.И. Формообразование угловых поверхностей концевыми фрезами / М.И. Михайлов // Технические ВУЗы – Республике: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18 нояб. 1997 г. / Белорус. гос. политехн. акад. – Минск, 1997. – С. 86.

78–А. Михайлов, М.И. Исследование прочности сборных резцов с фрикционным покрытием СМП / М.И. Михайлов, П.В. Сысоев, З.Я. Шабакаева // Полимерные композиты: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 29–30 сентября 1998 г. / ИММС НАНБ. – Гомель, 1998. – С. 150–151.

79–А. Михайлов, М.И. Оптимизация геометрических параметров режущего инструмента для обработки древесных пластиков / М.И. Михайлов // Новые материалы и технологии: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Минск, 21–22 мая 1998 г. / Ин-т порошковой металлургии БГ НПК ПМ. – Минск, 1998. – С. 40.

80–А. Михайлов, М.И. Исследование фрикционных характеристик композиционного материала, используемого для покрытия СМП / М.И. Михайлов, З.Я. Шабакаева, И.А. Левин // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 4–6 июля 2002 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2002. – С. 30.

81–А. Михайлов, М.И. Исследование композиционного материала для покрытия СМП / М.И. Михайлов, З.Я. Шабакаева, И.А. Левин // О природе трения твердых тел: тез. докл. междунар. симпозиума. – Гомель, 28–30 авг. 2002 г. / ИММС им. В.А. Белого НАН Б. – Гомель, 2002. – С. 83–84.

82–А. Михайлов, М.И. Комплексный анализ композиционного материала на основе эпоксиполиэфирных смол / М.И. Михайлов, З.Я. Шабакаева, П.В. Сысоев // О природе трения твердых тел: тез. докл. междунар. симпозиума, Гомель, 28–30 авг. 2002 г. / ИММС им. В.А. Белого НАН Б. – Гомель, 2002. – С. 85–86.

83–А. Михайлов, М.И. Моделирование геометрических параметров вращающегося инструмента / М.И. Михайлов // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 2–3 июля 2004 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2004. – С. 55–56.

84–А. Михайлов, М.И. Моделирование точности сборного механизированного инструмента / М.И. Михайлов // Современные проблемы машиноведения

ния: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 19–20 окт. 2006 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2006. – С. 88–89.

85–А. Михайлов, М.И. Исследование влияния формы паза державки на напряженно-деформированное состояние резца / М.И. Михайлов, М.Р. Шейбак // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 19–20 окт. 2006 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2006. – С. 89–90.

86–А. Михайлов, М.И. Анализ точности сборных резцов с шестигранными СМП / М.И. Михайлов, А.М. Короткевич // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 23–24 окт. 2008 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2008. – С. 84.

87–А. Михайлов, М.И. Исследование напряженно-деформированного состояния расточного резца с пластиной из твердого сплава / М.И. Михайлов, Ж.А. Мрочек, М.Р. Шейбак // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 23–24 окт. 2008 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2008. – С. 85.

88–А. Михайлов, М.И. Анализ влияния абразивосодержащих наполнителей композиционного материала на основе эпоксиполиэфирных смол на его демпфирующие свойства / М.И. Михайлов, А.А. Карпов // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии: тез. докл. 8-й междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 29–30 окт. 2009 г. / НАН Б. – Гродно, 2009. – С. 201–202.

89–А. Михайлов, М.И. Вероятностная оценка точности инструментальной наладки сборного металлорежущего инструмента / М.И. Михайлов // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 28 окт. 2010 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2010. – С. 102–103.

90–А. Михайлов, М.И. Анализ эффективности работы системы инструментального обеспечения автоматизированного производства / М.И. Михайлов // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 28 окт. 2010 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2010. – С. 103–104.

91–А. Михайлов, М.И. Математическое моделирование топографии цилиндрической поверхности, полученной различными видами обработки / М.И. Михайлов // Современные проблемы машиноведения: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 23 окт. 2014 г. / ГГТУ им. П.О. Сухого. – Гомель, 2014. – С. 75.

Авторские свидетельства и патенты

92–А. Фреза с автоматической заменой режущих кромок: а.с. 1313589 СССР, МКИ 5 В 23 С 5/06 / М.И. Михайлов; дата публ.: 30.05.87.

93–А. Устройство для заточки режущих элементов: а.с. 1324825 СССР, МКИ 5 В 23 В 3/34 / М.И. Михайлов; дата публ.: 23.07.87.

94–А. Способ заточки режущих элементов: а.с. 1450979 СССР, МКИ 5 В 23 В 3/34 / М.И. Михайлов; дата публ.: 15.01.89.

95–А. Сборный режущий инструмент: а.с. 1458090 СССР, МКИ 5 В 23 В 27/16 / М.И. Михайлов; дата публ.: 15.02.89.

96–А. Устройство для механической обработки: а.с. 1553284 СССР, МКИ 5 В 23 В 51/06 / М.И. Михайлов; дата публ.: 15.03.90.

97–А. Фреза с автоматической заменой режущих кромок: а.с. 1579729 СССР, МКИ 5 В 23 Q 41/02 / М.И. Михайлов; дата публ.: 23.07.90.

98–А. Инструмент с автоматической заменой режущих пластин для станков с горизонтальным шпинделем: а.с. 1634393 СССР, МКИ 5 В 23 С 5/06 / М.И. Михайлов; дата публ.: 15.03.91.

99–А. Заточное приспособление: а.с. 1779548 СССР. МКИ 5 В 24 В 3/34 / М.И. Михайлов; дата публ.: 07.12.92.

100–А. Устройство для замены граней пластины резца: а.с. 1804953 СССР, МКИ 5 В 23 В 27/16 / М.И. Михайлов, А.А. Барановский; дата публ.: 30.03.93.

101–А. Торцовая фреза МИГ: а.с. 1741982 СССР, МКИ 5 В 23 В 27/16 / М.И. Михайлов, А.А. Геращенко; дата публ.: 23.06.92.

102–А. Устройство для автоматической смены осевого инструмента на многоцелевых станках: заявка № 4900621/08 от 9.01.91 г., МПК6 В23Q3/157 / М.И. Михайлов (Положительное решение от 29.10.91).

103–А. Сборная фреза. Заявка № 4954052/08 от 14.06.91, МКИ5 В23С 5/06 / М.И. Михайлов (Положительное решение от 13. 02. 92).

104–А. Устройство для замены режущих пластин резца: пат.3107 Респ. Беларусь, МПК 6 В23В27/16 / М.И. Михайлов, А.В. Жабинский; дата публ.: 30.12.99.

105–А. Режущий инструмент: пат. заявка №297 Респ. Беларусь, МПК 6 В 23 В 27/16 / М.И. Михайлов, В.Н. Жабинский; заявитель Гомел. завод пуск двигателей; № 297; заявл. 18.05.93 (Положительное решение от 18.05.98).

106–А. Полимерная фрикционная композиция: пат. 7400 Респ. Беларусь МПК7 С08J5/14 / П.В. Сысов, З.Я. Шабакаева, М. И. Михайлов; дата публ.: 30.09.05.

107–А. Устройство для поворота режущей пластины: полезная модель 4963 Респ. Беларусь МПК (2006) В23В27/16 / М.И. Михайлов, И.В. Лисеенко; дата публ.: 2008.10.01.

108–А. Фасонный резцовый блок: пат. 6525 Респ. Беларусь МПК (2009) В23В27/16 / М.И. Михайлов; дата публ.: 2010.10.01.

109–А. Композиционный материал для покрытия контактных поверхностей сборного режущего инструмента: пат. 12660 Респ. Беларусь МПК (2006) С 08J5/14 / М. И. Михайлов, А.А. Карпов, З.Я. Шабакаева, Е.Н. Ленивко; дата публ.: 30.12.09.

110–А. Сборная торцовая фреза: пат. 16537 Респ. Беларусь МПК (2006) В23С5/06 / М.И. Михайлов; дата публ.: 30.12.12.

Міхайлаў Міхаіл Іванавіч

**Тэорыя, разлік і канструіраванне зборнага металарэзальнага
інструмента з аўтаматычнай зменай рэзальных кантаў для гнуткіх
вытворчых сістэм**

Ключавыя словы: металарэзальны інструмент, аўтаматызаваная вытворчасць, інструментазабеспячэнне, аўтаматычная змена кантаў, дакладнасць, трываласць, цвёрдасць, надзейнасць.

Мэта работы – стварэнне зборнага металарэзальнага інструмента з аўтаматычнай зменай рэзальных кантаў для павышэння эфектыўнасці работы гнуткіх вытворчых сістэм.

Метады даследавання і апаратура. Матэматычныя мадэлі атрыманы на аснове метадаў аналітычнай і дыференцыяльнай геаметрыі і пераўтварэння каардынатных сістэм. Выкарыстана ўласцівасць графаў, выкананы разлікі статычнай дакладнасці рабочай часткі рэзальных інструментаў. Прыменены стандартныя метадыкі, праведзены даследаванні ўласцівасці кампазіцыйных матэрыялаў і іх уплыў на працаздольнасць рэзальнага інструмента.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Распрацавана метадалогія мадэлявання ўтваральных інструментальных паверхняў, геаметрычных параметраў рэзальных зубоў, а таксама дакладнасць паціцвання зменных шматгранных пласцін у корпусе інструмента. Зроблена аптымізацыя параметраў пры апрацоўцы тацэннем цыліндрычнай паверхні, фрэзераваннем перыферыйнай і шаравай фрэзамі. Прапанавана матэматычная мадэль кінематычных разлікаў прывада механызмаў заціску і паварота ЗШП. Распрацаваны дэмпфіральныя кампазіцыйныя матэрыялы на аснове эпаксіпаліэфірных смолаў з абразівазмяшчальнымі напаўняльнікамі да кантактных паверхняў зборнага інструмента. Распрацаваны прынцыпы праектавання і аснастка да аўтаматызаванай вытворчасці.

Ступень выкарыставання. На падставе прапанаваных матэматычных мадэляў распрацаваны праграмныя комплексы праектавання сборных тарцовых фрэз, восевага інструмента і разцоў, ўкаранёныя на ААТ «Гомельскі завод спецінструмента і тэхналагічнай аснасткі», а таксама аўтаматызаванага праектавання прывадаў сістэм інструментазабеспячэння тэхналагічнага абсталявання, ўкаранёныя в ААТ «Саста» РФ і ААТ «Гомельскі завод станочных вузлоў».

Сфера ўжывання. Машынабудаванне, праектаванне і вытворчасць металарэзальных інструментаў, падрыхтоўка спецыялістаў па матэрыялаапрацоўцы.

Михайлов Михаил Иванович

Теория, расчет и конструирование сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок для гибких производственных систем

Ключевые слова: металлорежущий инструмент, автоматизированное производство, инструментообеспечение, автоматическая смена кромок, точность, прочность, жесткость, надежность.

Цель работы – создание сборного металлорежущего инструмента с автоматической сменой режущих кромок для повышения эффективности работы гибких производственных систем.

Методы исследования и аппаратура. Математические модели получены на основе методов аналитической и дифференциальной геометрии и метода преобразования координатных систем. Используя свойства графов, выполнены расчеты статической точности рабочей части режущих инструментов. Применяя стандартные методики, проведены исследования свойств покрытий из композиционных материалов и их влияние на работоспособность режущего инструмента.

Полученные результаты и их новизна. Разработана методология моделирования образующих инструментальных поверхностей, геометрических параметров режущих зубьев, а также погрешностей позиционирования сменных многогранных пластин в корпусе инструмента. Произведена оптимизация параметров при обработке точением цилиндрической поверхности, фрезерованием периферийной и шаровой фрезами. Предложена математическая модель кинематических расчетов привода механизмов зажима и поворота СМП. Разработаны демфирующие композиционные материалы на основе эпоксиполиэфирных смол с абразивосодержащими наполнителями для контактных поверхностей сборного инструмента. Разработаны принципы проектирования и оснастка для автоматизированного производства.

Степень использования. На основе предложенных математических моделей разработаны программные комплексы проектирования сборных торцовых фрез, осевого инструмента и резцов, внедренные на РУП «Гомельский завод специнструмента и технологической оснастки», а также автоматизированного проектирования приводов систем инструментообеспечения технологического оборудования, внедренные в ОАО «Саста» РФ и ОАО «Гомельский завод станочных узлов».

Область применения. Машиностроение, проектирование и производство металлорежущих инструментов, подготовка специалистов по материалобработке.

Mikhailau Mikhail Ivanovich

THEORY, COMPUTATION AND DESIGNING METAL-CUTTING TOOL WITH AUTOMATIC INDEXABLE INSERT REPLACEMENT FOR FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS

Key words: metal-cutting tool, computerized manufacturing, tool management, automatic indexable inserts replacement, accuracy, durability, rigidity, reliability.

Research object: development of the assembly metal cutting tool with automatic indexable insert replacement with the purpose of improving flexible manufacturing systems performance

Research methods and equipment. Mathematical models were obtained based on the methods of analytical and differential geometry and the method of transformation of coordinate systems. Using graph features, calculations of static accuracy of a working part of cutting tools were performed. Using standard techniques the study of properties of composite materials and their influence on working capacity of the cutting tool was conducted.

Data obtained and novelty. The methodology of modeling of forming tool surfaces, dimensions of cutting teeth, and also errors of positioning of replaceable indexable inserts in the tool case was developed. Optimization of the parameters during lathe turning of a cylindrical surface and milling by peripheral and spherical mills was provided. The mathematical model of kinematic design of the drive of clamping and rotating mechanisms for replaceable indexable inserts is proposed. Damping resource-saving composite materials were developed based on epoxy polyester resins containing abrasive filling material for the contact surfaces of the assembly tool. Principles of designing and equipment for automated manufacture were developed.

Efficiency. On the basis of the mathematical models proposed software packages for designing assembly face mills, axial tools and cutters were developed and introduced at RUP "Gomel Plant of Special Tools and Production Tooling" and also software packages of computer aided design of the drives in the systems of tool management of technological equipment introduced at OAO "Sasta", Russian Federation, and OAO "Gomel Machine Tool Units Plant"

Field of application. Mechanical engineering, designing and manufacture of metal-cutting machine tools, training of specialists in material working.

Научное издание

МИХАЙЛОВ
Михаил Иванович

**ТЕОРИЯ, РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ
СБОРНОГО МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
С АВТОМАТИЧЕСКОЙ СМЕНОЙ РЕЖУЩИХ КРОМОК
ДЛЯ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук
по специальности 05.02.07– Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Подписано в печать 04.12.2014. Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Ризография

Усл. печ. л. 2,67. Уч.-изд.л. 2,09. Тираж 70. Заказ 1052

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск