

На правах рукописи



ИСТОЦКИЙ Владислав Владимирович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФАСОННЫХ
ИНСТРУМЕНТОВ С ВИНТОВЫМИ ЗУБЬЯМИ И ТЕХНОЛОГИЯ ИХ
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКОГО СИНТЕЗА**

05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Тула 2019

Работа выполнена на кафедре «Инструментальные и метрологические системы» Тульского государственного университета

Научный консультант доктор технических наук, профессор
Протасьев Виктор Борисович

Официальные оппоненты **Комаров Владимир Алексеевич,**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «МИРЭА - Российский технологический
университет», г. Москва, профессор.

Щуров Игорь Алексеевич,
доктор технических наук, профессор, Политех-
нический институт ФГАОУ ВО «Южно - Ураль-
ский государственный университет (Нацио-
нальный исследовательский университет)», г.
Челябинск, зам. директора.

Ямникова Ольга Александровна,
доктор технических наук, профессор, АО «НПО
«Сплав», г. Тула, специалист I категории сектора
оценки рисков.

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Липецкий государственный техни-
ческий университет».

Защита состоится «08» октября 2019 года в «14.00» часов на заседании диссертационного совета Д212.271.01, созданного на базе Тульского государственного университета по адресу: 300012, г. Тула, проспект Ленина, 92 (9-101)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тульского государственного университета и на сайте <http://tsu.tula.ru>

Автореферат разослан «01» августа 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета



Черняев
Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Применение фасонных режущих инструментов в технологических процессах формирования поверхностей деталей машин обусловлено выполнением требований, предъявляемым к профилю таких поверхностей и технологическими особенностями их получения.

Технологичность конструкции осевых режущих инструментов в решающей степени зависит от целенаправленного обобщающего синтеза их геометрических параметров, использования винтовых зубьев, изменения их числа в различных торцовых сечениях, рациональных углов режущего клина, применения осевых и радиальных конструктивных подач, объединения зубьев в группы, обеспечения переменной кривизны режущей кромки.

Задача синтеза параметров многократно усложняется, если производящая поверхность инструментов является фасонной. Винтовые поверхности зубьев в этом случае имеют аксиально – радиально переменный шаг, и их обработка не с точечным, а линейным контактом формообразующего инструмента требует особого внимания и до настоящего времени не получила теоретической основы достаточной для практического применения.

Успешный процесс синтеза конструктивных параметров, характеризующих режущую часть фасонных инструментов, возможен только в узкой области и считается результативным, когда удается обеспечить заданные величины выходных характеристик не только в одном (исходном) сечении инструмента, но и на всей режущей части обеспечить оптимальную и монотонную тенденцию их изменения.

Применение многокоординатных шлифовально – заточных станков с ЧПУ, являющихся основным оборудованием для изготовления осевых режущих инструментов и обеспечивающих необходимый набор поступательных и вращательных относительных движений заготовки инструмента и шлифовальных кругов (инструментов второго порядка), при условии наличия методик его программирования, позволяет решить актуальную задачу формирования винтовых поверхностей фасонных инструментов с винтовой режущей кромкой при обеспечении требуемой точности параметров, характеризующих режущие свойства.

Научная проблема заключается в отсутствии взаимосвязи системы конструктивных параметров фасонных режущих инструментов с винтовыми зубьями с геометрическими и кинематическими параметрами инструментов второго порядка и особенностями шлифовально – заточных станков с ЧПУ, позволяющей проектировать и изготавливать фасонный инструмент с управлением параметрами угла заострения в заданных сечениях производящего профиля.

Цель и задачи работы

Целью диссертационной работы является разработка алгоритма формообразования режущей части фасонных инструментов с режущей кромкой в виде винтовой линии аксиально – радиально переменного шага с обеспечением

одинаковых кинематических углов резания во всех сечениях производящего профиля.

Для достижения поставленной цели в настоящей работе можно выделить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих решений для процессов проектирования и формообразования поверхностей фасонного инструмента с винтовой режущей кромкой и обозначить необходимые улучшения;
2. Разработать алгоритм графоаналитического синтеза фасонного режущего инструмента, который позволит синтезировать его конструктивные параметры с учетом возможностей технологического оборудования и инструментов второго порядка, при условии выполнения условий профилирования;
3. Разработать математические зависимости для решения т.н. кинематических задач формообразования поверхностей обобщенной параметрической модели, учитывающие существующие кинематические схемы перемещений исполнительных органов технологического оборудования и прямолинейные формы производящей поверхности инструментов второго порядка;
4. Исследовать внутренние связи многопараметрической системы исходных данных, используемых при графоаналитическом синтезе параметров обобщенной математической модели производящей поверхности режущего инструмента и обозначить области влияния параметров;
5. Разработать алгоритм математической и визуальной оценки фасонного режущего инструмента с помощью графоаналитического симулятора, позволяющего оценивать результат по технологическим 3D моделям;
6. Разработать, адаптировать и внедрить в действующее инструментальное производство программно – методический комплекс (ПМК) автоматизированной подготовки управляющих программ к станкам с ЧПУ для выпуска фасонных инструментов с режущей кромкой в виде винтовой линии.

Методика проведения исследований

Методологической основой работы являются фундаментальные положения дифференциальной геометрии, векторного анализа, теории изготовления винтовых поверхностей, положения Булевой алгебры. Численное и графическое моделирование выполнялось с использованием возможностей систем 3D моделирования.

Экспериментальные исследования проводились с применением разработанного в рамках настоящей работы графического симулятора процессов виртуального профилирования. Достоверность полученных результатов подтверждена полученными образцами режущих инструментов, экспериментальной проверкой их адекватности и работоспособности, а также результатами промышленной апробации и внедрения.

Работа выполнялась в рамках фундаментальных исследований НИР 7.1439.2011 по теме “Базовые промышленные технологии формообразования зубьев цилиндрических колес для создания перспективных видов вооружения”.

Научная новизна работы

Научная новизна заключается в создании теоретических основ проектирования фасонных режущих инструментов с винтовыми зубьями, обеспечи-

вающих управление параметрами угла заострения, и учитывающих особенности формообразования с применением шлифовально-заточных станков с ЧПУ и инструментов второго порядка, имеющих прямолинейную форму производящей поверхности.

Практическая ценность работы

1. Обеспечена визуализация результата проектирования фасонных режущих инструментов с винтовой режущей кромкой с учетом технологии их изготовления путем синтеза аналитических зависимостей, характеризующих законы движения инструмента второго порядка и симулятора процесса формообразования поверхностей путем взаимодействия 3D моделей заготовки фасонного инструмента и инструмента второго порядка.

2. Разработан и внедрен в действующее производство отечественный программно – методический комплекс (ПМК) по проектированию и изготовлению фасонных режущих инструментов, позволяющий реализовывать все схемы срезания припуска, необходимые для обработки высоколегированных сталей, кевларов, углепластиков с получением технологических 3D моделей проектируемого инструмента, и обеспечивающий оперативность и эффективность корректирующих воздействий.

Реализация результатов в промышленности

Результаты настоящей работы внедрены на ООО НПП «РИТ - Инжиниринг» и используются для производства режущих инструментов, поставляемых на ведущие предприятия РФ: ПАО «НАЗ им. В.П. Чкалова», ПАО «Завод «Красное Сормово», АО «Конструкторское бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова», АО «НПО «Сплав», ПАО «Красное знамя», АО «Вятское машиностроительное предприятие «Авитек», АО «Производственное объединение «Северное машиностроительное предприятие», АО Центр судоремонта «Звездочка», ПАО «Камаз», АО ОДК «Пермские моторы», АО СКБ «Турбина» и др. в целом более 100 предприятий РФ.

Автор защищает следующие основные положения:

1. Структурную схему графоаналитического синтеза путем последовательного использования входных свободных и зависимых параметров для определения рациональных параметров установки инструментов второго порядка при выполнении всех условий профилирования фасонных режущих инструментов и оценкой результата с использованием технологических 3D моделей.

2. Способ проектирования режущего инструмента на основе технологического 3D моделирования винтовых поверхностей постоянного и аксиально - радиально переменного шага на фасонных производящих поверхностях, обеспечивающий устранение методических ошибок и повышение эффективности подготовки инструментального производства.

3. Способ определения параметров установки дисковых инструментов, основанный на априорном выборе массива точек, описывающих дно стружечной канавки синтезируемого инструмента и предназначенный для касания с базовой окружностью на производящей поверхности инструмента второго порядка, позволяющий устранить трансцендентные расчетные зависимости и использовать шлифовальные круги с прямолинейной формой профиля.

4. Зависимости для аналитического решения кинематических задач профилирования поверхностей фасонных режущих инструментов с винтовыми зубьями дисковыми инструментами с прямолинейным профилем.

5. Алгоритм и созданный на его основе программно – методический комплекс решения обратной задачи профилирования, который позволяет визуализировать процессы удаления материала с виртуальной заготовки по траекториям, полученным на основе решения кинематических задач.

6. Методы формирования полюсной зоны фасонных инструментов за счет использования групповых зубьев и минимизации количества зубьев в осевой зоне с обеспечением их угловой симметричности.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно – технических конференциях профессорско - преподавательского состава ТулГУ в 2006 – 2018 г.г. а также на: международном симпозиуме “Образование, наука и производство: проблемы, достижения и перспективы” (Комсомольск-на-Амуре 2010 г.); международной юбилейной научно-технической конференции “Проблемы формообразования деталей при обработке резанием”, посвященной 90-летию со дня рождения С.И. Лашнева (Тула 2007 г.); международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 2016 г.); международной научной конференции под редакцией В.Я.Ушакова. (Москва 2014г.); международной научно-технической конференции “Технологические методы повышения качества продукции в машиностроении (ТМ-2010)” (Воронеж, 2010г.); заседании Совета главных инженеров Союза предприятий оборонных отраслей промышленности Свердловской области (Екатеринбург, 2012 г.); международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Коганова И.А. (Тула, 2016г.); на научно-технических конференциях БГТУ, ВГУ, ОГУ; на заседании кафедры «Инструментальная техника и технологии» (МТ-2) МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2017г.); на международных выставках «Металлообработка 2014-2019».

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 43 научных работ, из которых 17 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 входят в базу Scopus, 1 монография.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников из 164 наименований и 16 приложений. Общий объем диссертации 332 страницы, в том числе 138 рисунков, 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, а также сформулирована научная проблема, цель, научные задачи и научная новизна.

Взаимосвязь научных задач показана на Рисунке 1 в виде диаграммы, позволившей сгруппировать их в шесть направлений, каждое из которых, за исключением шестого, рассматривается в диссертационной работе.

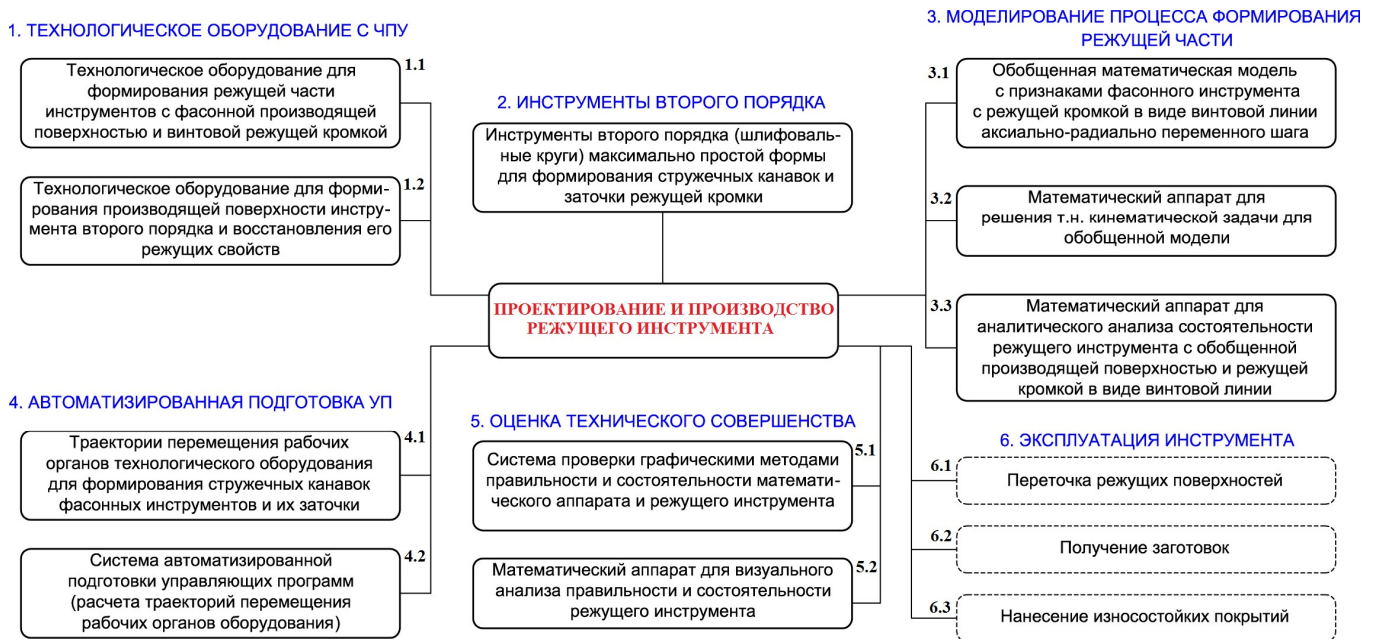


Рисунок 1. Анализ составляющих проектирования и формообразования режущих инструментов.

В результате анализа достигнутых рубежей процесса проектирования и производства фасонных инструментов с винтовыми зубьями выявлено:

- система представления графической информации, характеризующей параметры взаимного расположения поверхностей фасонного инструмента не информативна, и требует дополнения в виде технологических 3D моделей;
- рекомендации по проектированию фасонных режущих инструментов имеют методические несоответствия и высокую степень неконкретности задания параметров в интервальной форме;
- математический аппарат для решения кинематических задач формирования винтовых поверхностей фасонных инструментов с винтовыми зубьями подразумевает использование трансцендентных уравнений, затрудняющих выбор действительных корней, и не учитывает особенности формообразования винтовых поверхностей аксиально – радиально переменного шага на режущих инструментах;

В первой главе анализируются методы проектирования фасонных режущих инструментов с применением конструкторских САПР. Анализ показывает, что существующие методы содержат три методические ошибки.

Первая состоит в том, что при проектировании инструментов используются правила технического черчения, а не 3D модели тел, взаимодействие которых формирует винтовую стружечную канавку фасонных инструментов.

Вторая заключается в использовании фасонных инструментов второго порядка там, где эффективно можно применять производящие поверхности с прямолинейными профилями.

Третья методическая ошибка заключается в разделении исполнителей (конструктора инструмента и технолога инструментального производства) при проектировании и изготовлении инструментов.

Для устранения этих ошибок предлагается использовать виртуальный аналог станков с ЧПУ представляющий из себя компьютерную модель кинематической схемы реального оборудования и имеющий идентичные ему системы координат и состав движений. В процессе виртуального формообразования путем взаимодействия 3D моделей заготовки и инструмента второго порядка формируется 3D модель проектируемого инструмента, учитывающая его дальнейшее изготовление инструмента.

Далее в этой главе рассматривается классификация типов технологического оборудования для производства и переточки режущего инструмента и показано, что все существующее многообразие шлифовально – заточных станков делится на две кинематические схемы: у первой все установочные повороты совершает заготовка режущего инструмента; у второй все установочные повороты совершает шлифовальный круг.

В продолжении показаны профили шлифовальных кругов, применяемых в мировом инструментальном производстве для формирования стружечных канавок и заточки, и анализируются методы и средства, применяемые для решения задач восстановления режущей способности шлифовальных кругов.

Обзор основных работ по теме диссертации показал, что вопросами изготовления и проектирования винтовых поверхностей переменного шага занимались отечественные и зарубежные учёные, такие как И.А. Дружинский, В.А. Гречишников, В.А. Люкшин, Б.А. Перепелица, Г.И. Шевелёва, В.Б. Протасьев, Ю.С. Степанов, С.Г. Емельянов, Г.А. Харламов, А.В. Хандожко, С.Ю. Илюхин, Hien Nguyen, Sung-Lim Ko, M. Baburaj и др. Объектами исследований были винтовые поверхности режущих инструментов, шнеки, валки для поперечно - винтовой прокатки, конические колёса с криволинейными зубьями, зуборезные инструменты и т.п.

В процессе анализа научных работ отечественных ученых, внесших наибольший вклад в вопросы связанные с темой настоящей работы, показана незавершенность теории профилирования фасонных инструментов с винтовыми зубьями и ее нестыковка с современными методами визуализации результатов проектирования и изготовления инструментов с применением шлифовально-заточных станков с ЧПУ.

Опубликованные работы зарубежных ученых, занимающихся вопросами проектирования и производства режущих инструментов, ограничиваются решением задач только для передней поверхности, при которой не учитывается окружной шаг зубьев, формированием стружечных канавок инструментов со сферическим торцом в условиях САД систем или поверхностей, допускающих движение “самих по себе”.

В заключение главы приводится структурная схема графоаналитического синтеза режущего инструмента (Рисунок 2) с применением которой строятся все дальнейшие исследования.

Началом структурной схемы является исходная информация об обобщающем профиле синтезируемого инструмента и инструменте второго порядка, с применением которого будет производиться профилирование рабочей части синтезируемого инструмента.

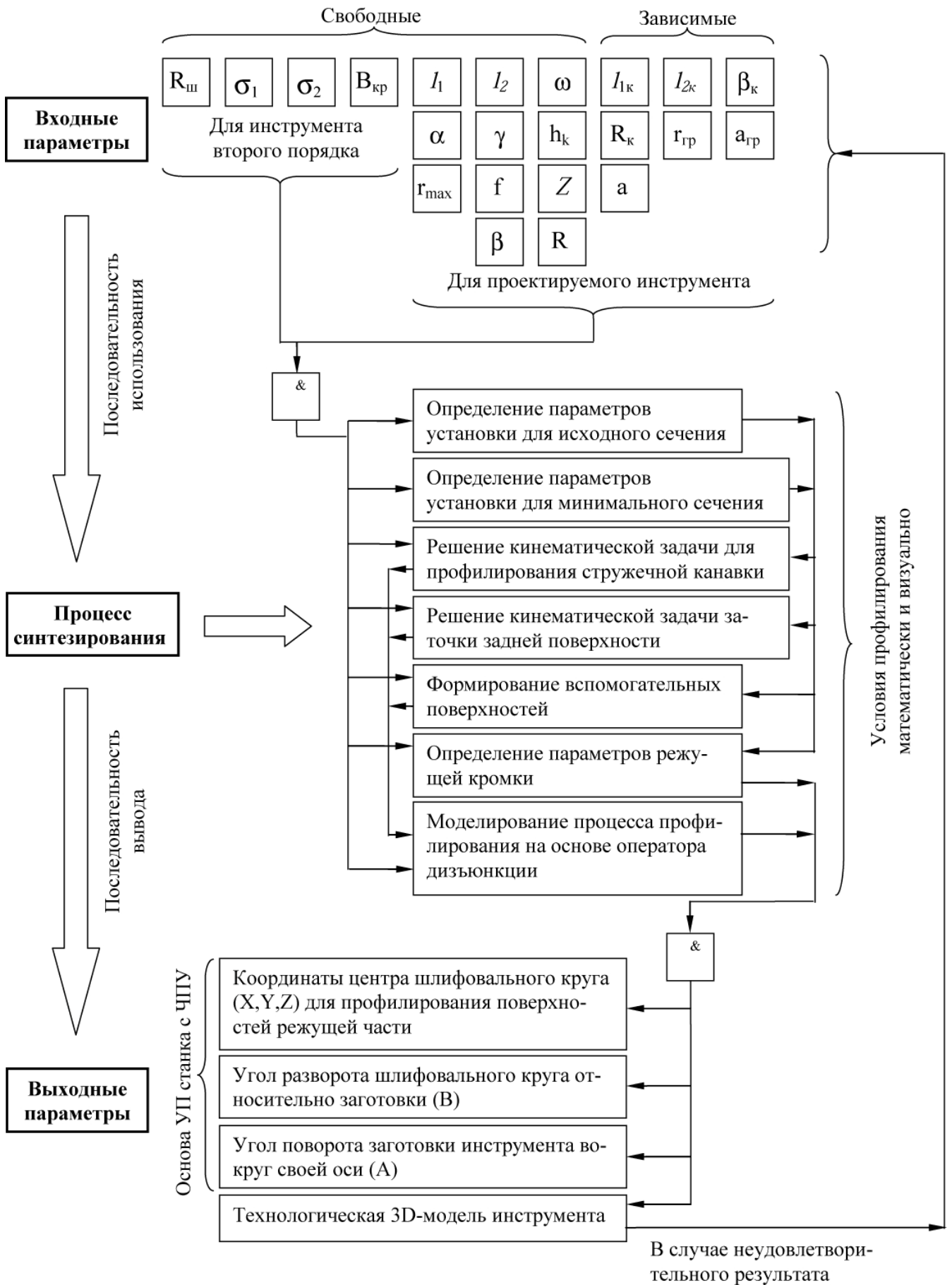


Рисунок 2. Структурная схема графоаналитического синтеза режущего инструмента

Исходной информацией об инструменте второго порядка в общем виде (Рисунок 3б) является радиус его максимальной окружности $R_{ш}$ (непосредственно влияет на значение переднего угла и глубину стружечной канавки), профильные углы σ_1 (выполняет роль заборного конуса) σ_2 (влияет на профиль спинки стружечной канавки и ширину задней поверхности) и его высота $B_{кр}$ (вместе с σ_2 влияет на профиль спинки стружечной канавки и ширину задней поверхности).

Исходная информация – входные параметры – для проектируемого (синтезируемого) инструмента показана на Рисунок 3а. Группа свободных входных параметров для проектируемого инструмента позволяет полностью описать производящую поверхность синтезируемого инструмента.

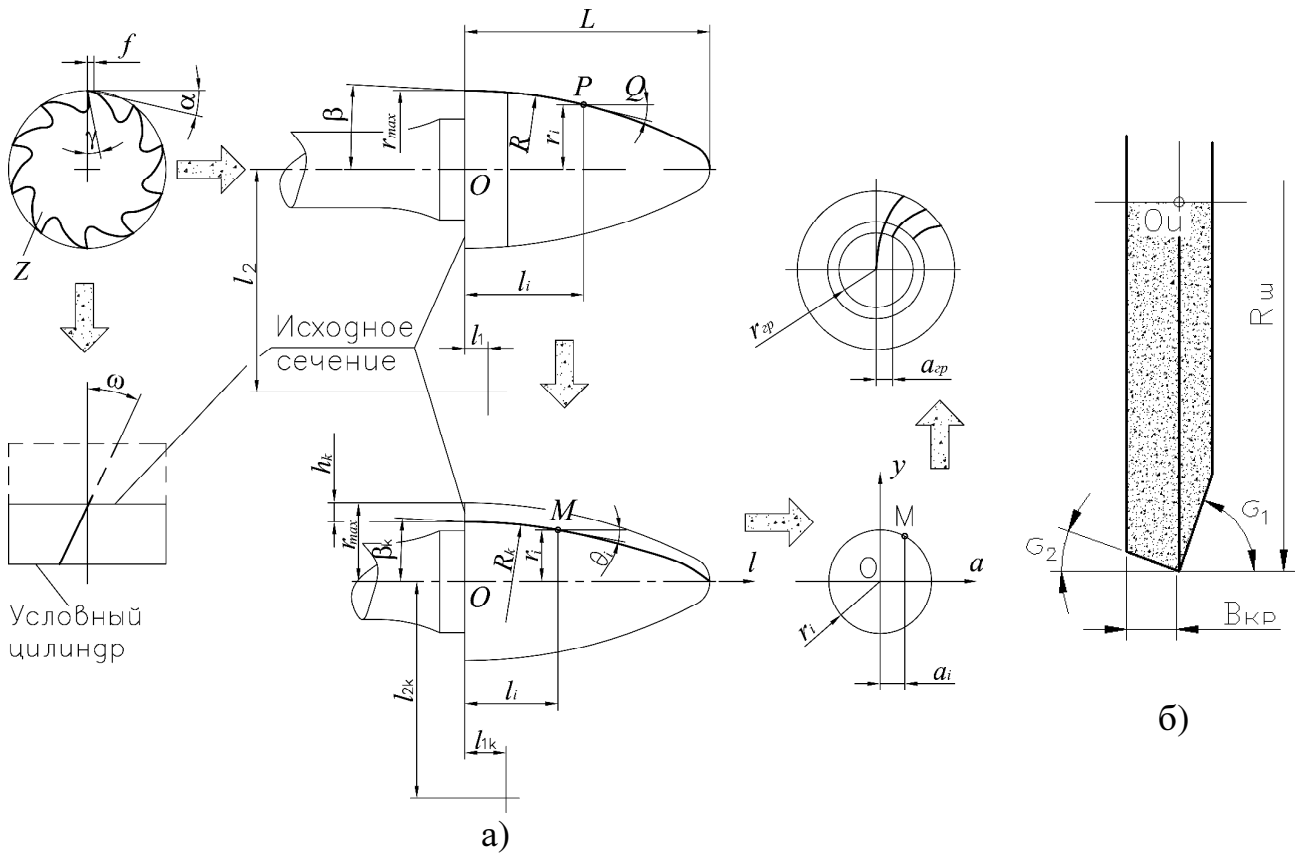


Рисунок 3. Входные параметры:

- а) обобщающего профиля синтезируемого инструмента;
 б) инструмента второго порядка

Она включает в себя свободные параметры, задаваемые в исходном сечении: максимальный радиус r_{max} , глубину стружечной канавки h_k , угол подъема винтовой линии ω , передний угол γ , задний угол α , ширина затачиваемой задней поверхности f , число зубьев Z , радиус кривизны производящей поверхности R , смещение центра радиуса кривизны производящей поверхности по горизонтальной и вертикальной осям l_1 , l_2 ; а также угол β конического участка образующей обобщенной производящей поверхности.

В результате синтеза в процессе строгой последовательности использования входных (свободных и зависимых) параметров синтезируемого инстру-

мента (Рисунок 3а) и инструмента второго порядка (Рисунок 3б) в рамках дальнейшего исследования определяются рациональные параметры установки при выполнении всех условий профилирования и, с применением аналитических зависимостей, формируется технологическая 3D модель для визуальной оценки состоятельности и контроля инструмента, а также текст управляющей программы для станка с ЧПУ.

Вторая глава посвящена исследованиям, связанным с повышением технологичности конструкции фасонных инструментов с винтовыми зубьями, производящая поверхность которых образуется пересечением передней поверхности и спинки зубьев, обрабатываемых двухугловыми шлифовальными кругами одновременно за один проход – таких как борфрезы.

Процесс синтеза параметров, обуславливающих наиболее эффективное формообразование винтовых стружечных канавок таких режущих инструментов, происходит в результате решения кинематической задачи, особенностью которой является то, что форма инструмента второго порядка задается, как и точки его касания с обрабатываемой заготовкой, а траектория его перемещения рассчитывается, и совместно с неравномерным вращением самой заготовки составляет основу для разработки управляющей программы, используемой станками с ЧПУ.

В процессе производственной эксплуатации полученного ранее решения кинематической задачи формообразования таких инструментов, потребовались существенные дополнения, при внедрении которых стало возможным управлять результатом синтеза исходного сечения, схемой расположения групповых зубьев и взаимным расположением поверхностей проектируемого инструмента.

В продолжение главы рассматриваются два возможных способа определения траекторий перемещения инструментов второго порядка, относительно заготовки инструмента.

Первый из них, использующийся в предшествующих работах, предполагает представлять траекторию движения центра шлифовального круга $O_{И1} \dots O_{И\Sigma}$ в системе координат XYZ (Рисунок 4) относительно заготовки, как массив точек $O_{И}$, или некоторой линией $O_{И1}O_{И\Sigma}$, взятых по замыслу проектировщика как начальная информация и являющихся, при данном подходе, свободными параметрами.

Далее, ориентируясь на полученные результаты, (профиль винтовой канавки, значения углов γ и α , угла подъема винтовой линии и т.д.), траектория $O_{И1}O_{И\Sigma}$ корректируется до получения приемлемого результата. Все данные получаются измерением технологической 3D модели инструмента в необходимых сечениях средствами ЭВМ. По этому методу работают все известные автору зарубежные программно – методические комплексы (ПМК).

Во втором способе, предлагаемом автором, проектировщик сам назначает координаты точек M (Рисунок 5) и углы поворота заготовки по координате A в которых поверхность заготовки последовательно касается с производящей поверхностью шлифовального круга по окружности наибольшего радиуса $R_{ш}$.

При таком подходе проектировщик по своему усмотрению назначает в системе координат станка XYZ линию M_1M_Σ по которой происходит касание окружности с радиусом $R_{ш}$ и заготовки.

Она может тоже составлять массив точек, либо выразаться математической зависимостью. Это позволяет для каждой точки M определить ее радиус r , смещение a (по оси Z), и угол наклона касательной β_k (на Рисунке 5 не показан). В этом случае линия M_1M_Σ характеризует дно стружечной канавки и должны выполняться следующие условия:

- тело шлифовального круга заменяется на одну окружность с наибольшим радиусом $R_{ш}$ (Рисунок 5а);
- тело обрабатываемого инструмента представляется совокупностью точек M , каждая из которых имеет координаты l_i (Рисунок 3а), r_i и a_i (Рисунок 3а, 5б), а также профильный угол θ (Рисунок 3а, на рис. 5 не показан), относящийся к его осевому сечению.
- для определения координат центра шлифовального круга решается задача по определению точки касания M с окружностью радиусом $R_{ш}$, которая развернута на угол B .

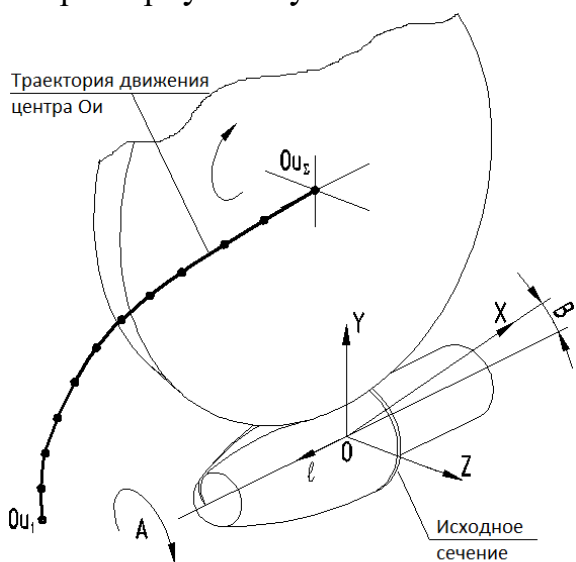


Рисунок 4. Назначение траектории движения центра инструмента $O_{и1}O_{и\Sigma}$ по координатам X, Y, Z

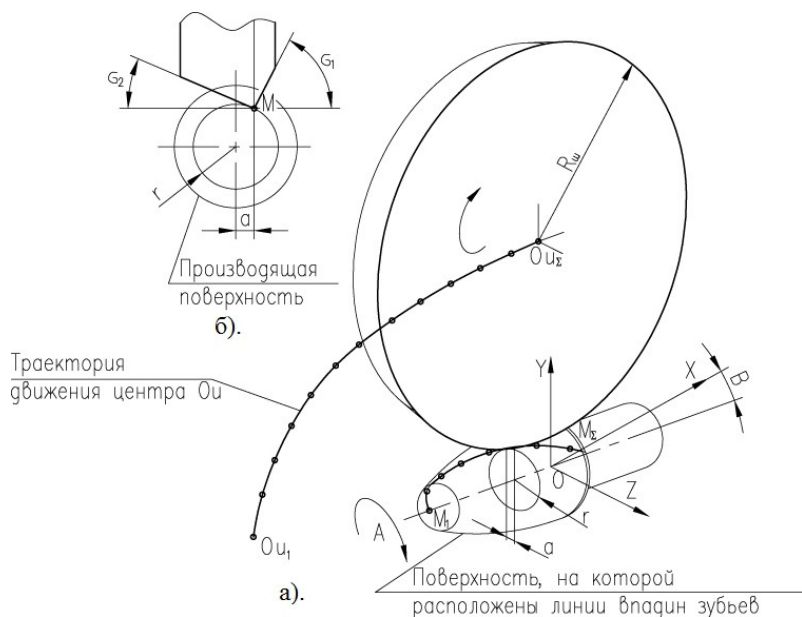


Рисунок 5. Назначение линии касания M_1M_Σ и расчет координат X, Y, Z для центра инструмента $O_{и}$

Исследования показали, что по касанию окружности с радиусом $R_{ш}$ с точкой M на дне профиля стружечной канавки можно оценить весь процесс формообразования винтовой стружечной канавки. Передняя поверхность всегда формируется дугой окружности с радиусом $R_{ш}$ по генераторной схеме, а спинка образуется конической поверхностью шлифовального круга с углом σ_2 по профильной схеме. Коническая поверхность шлифовального круга с углом σ_1 играет роль заборного конуса и в пределе может иметь значение $\sigma_1 = 0$.

В продолжение второй главы описываются улучшения, необходимые для повышения технологичности конструкции фасонных борфрез с групповы-

ми зубьями, путем применения процедуры коррекции координат точек начала групповых зубьев и процедуры визуализации результатов синтеза исходного сечения. Обозначенные улучшения необходимы для внесения корректирующих воздействий на рассчитанные аналитически параметры установки инструментов второго порядка на этапе проектирования.

Использование коррекции и визуализации результата синтеза исходного сечения стало возможным, после создания дополнительного модуля проектируемого режущего инструмента в дополнение к разработанному ранее программно – методическому комплексу.

В рамках главы 4 настоящей работы, разработан модуль, позволяющий с применением технологической 3D модели, оценить результат проектирования групповых зубьев фасонных борфрез. Результат такого проектирования на Рисунке 6.

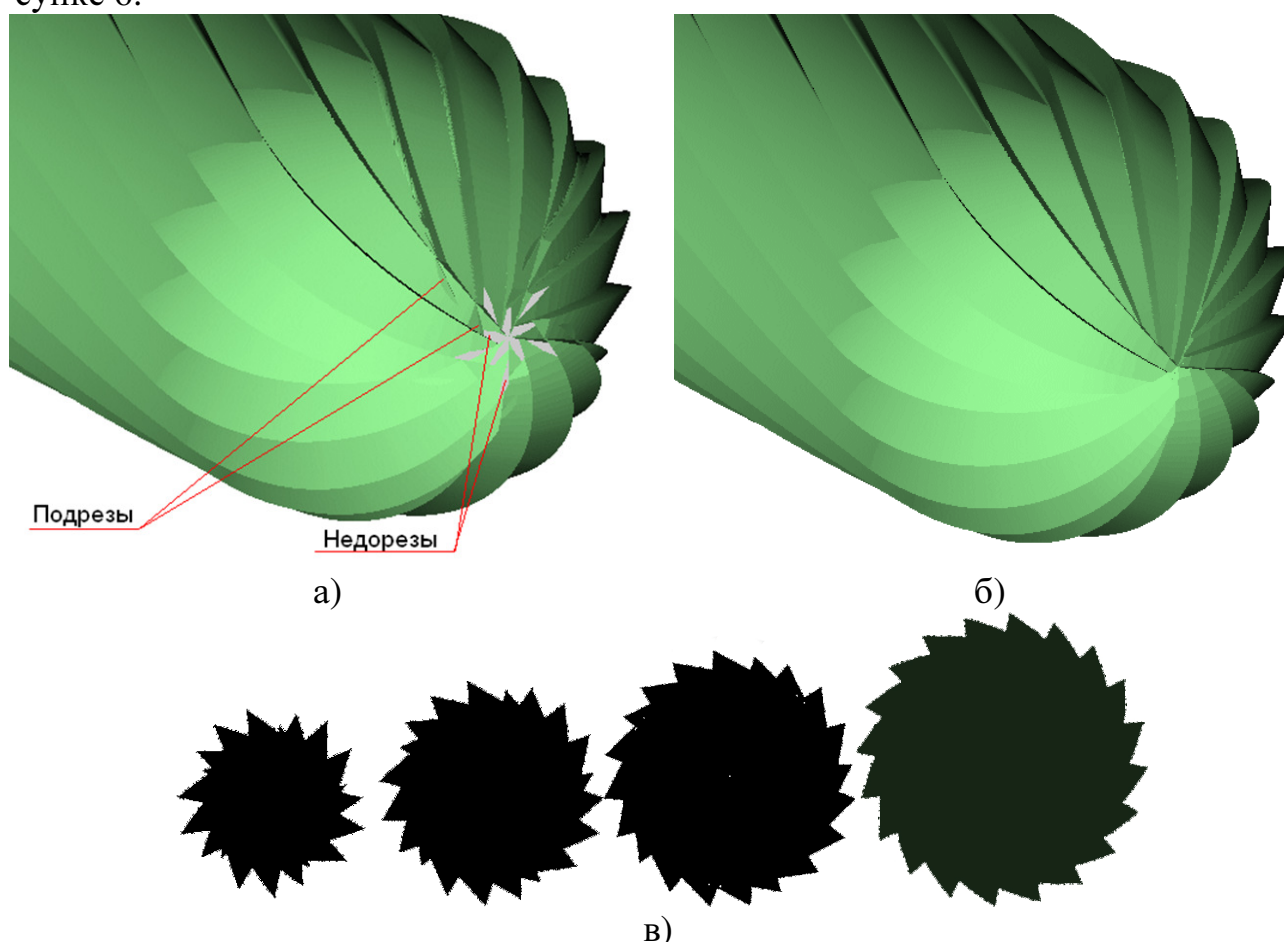


Рисунок 6. Технологическая 3D-модель проектируемой борфрезы:

- а) групповые зубья с подрезами – недорезами;
- б) приемлемые групповые зубья;
- в) сечения спроектированного инструмента

В продолжение второй главы приводится описание алгоритмов ограничивающих винтовую линию режущей кромки на полюсах таких инструментов как борфрезы, графоаналитический синтез параметров с целью визуализации исходного сечения, необходимый для проведения корректирующих воздействий на аналитически определенные параметры установки и формирование технологической 3D модели. Измерение полученной технологической 3D модели

показали, что отклонения формы производящей поверхности и параметры исходного сечения не выходят за пределы допуска задаваемых величин.

В заключение этой главы приводится алгоритм графоаналитического синтеза фасонных борфрез с групповыми зубьями.

Третья глава посвящена вопросам синтеза параметров для формирования поверхностей зубьев фасонных осевых инструментов с винтовой режущей кромкой аксиально – радиально переменного шага и заточенной задней поверхностью.

Режущая кромка таких инструментов образуется отдельным формированием стружечной канавки, совмещенной с формированием передней поверхности, причем за одно движение формообразующего инструмента, и последующей заточкой по задней поверхности с одновременным формированием производящей поверхности.

Синтез параметров, необходимый для решения кинематической задачи профилирования инструментов с заточенной задней поверхностью, отличается от задачи, рассмотренной во второй главе тем, что в ней при формировании винтовой стружечной канавки, обеспечивая необходимые значения передних углов на протяжении производящего профиля, требуется оставить заданную ширину ленточки, необходимую для последующей заточки задней поверхности, выдержав при этом благоприятные условия ее трансформации.

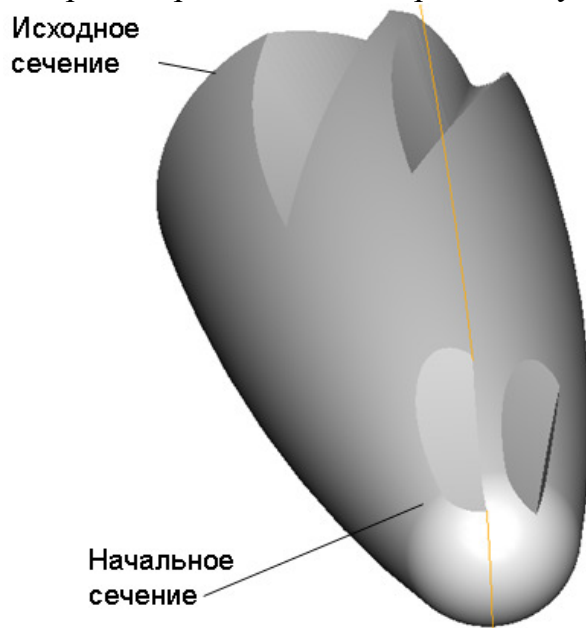


Рисунок 7. Результат синтеза параметров граничных сечений фасонного инструмента с заточенной задней поверхностью

Для проектирования режущей части фасонного инструмента с заточенной задней поверхностью необходимо рассчитать граничные сечения – исходное (максимальное) и минимальное, расположенное в точке сопряжения основной режущей части с полюсной зоной режущего инструмента. Получив приемлемый вариант их проектирования (Рисунок 7), необходимо определить траектории перемещения инструмента второго порядка и заготовки при переходе от одного сечения к другому.

Для определения параметров установки инструментов второго порядка в исходных сечениях инструментов с фасонной производящей поверхностью и затачиваемой задней поверхностью необходимо рассмотреть Рисунок 8.

Здесь, как и ранее, под исходным сечением понимается то, в котором на чертеже инструмента заданы все геометрические параметры режущей части (число зубьев, передний угол, задний угол, глубина стружечной канавки и т.д.), и которое имеет максимальный диаметр.

Определяемые параметры установки обеспечивают заданную величину переднего угла γ . Здесь принято, что для упрощения поиска этих параметров, винтовая поверхность, следующая за исходным сечением, допускает движение “самой по себе”.

При определении параметров установки искомыми параметрами являются величина межосевого расстояния m и величина смещения центра шлифовального круга a_2 , обеспечивающие заданное значение переднего угла в точке 2 и заданный угол τ ($\angle 2O3$), характеризующий окружной шаг зубьев.

Для определения параметров установки будем задаваться углом θ ($\frac{\pi}{2} < \theta < \pi$), который описывает положение точки касания проекции шлифовального круга и окружности дна стружечной канавки с радиусом $r_{кан}$ (Рисунок 8).

Используя каноническое уравнение эллипса и уравнение касательной к эллипсу в рассматриваемой точке, определяются координаты точки 1 в системе координат эллипса O_u :

$$\begin{aligned} x_1 &= \operatorname{tg}(\pi - \theta) \cdot \frac{R_{uu}^2}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(\pi - \theta) \cdot R_{uu}^2 + R_{uu}^2 \cdot \sin^2 B}} \\ y_1 &= R_{uu}^2 \cdot \sin^2 B \cdot \frac{1}{\sqrt{\operatorname{tg}^2(\pi - \theta) \cdot R_{uu}^2 + R_{uu}^2 \cdot \sin^2 B}} \end{aligned} \quad (1)$$

Зная координаты точки 1, определяется положение центра шлифовального круга в системе координат инструмента O .

$$m = x_1 + r_{кан} \cdot \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (2)$$

$$a_2 = y_1 + r_{кан} \cdot \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = r^2, \\ \frac{(x - m)^2}{R_{uu}^2} + \frac{(y + a_2)^2}{R_{uu}^2 \cdot \sin^2 B} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

В процессе выполнения математических преобразований получается уравнение четвертой степени

$$x^4 + k_1 x^3 + k_2 x^2 + k_3 x + k_4 = 0, \quad (4)$$

где

$$k_1 = 4 \cdot \operatorname{tg}^2 B \cdot m, \quad (5)$$

$$k_2 = \frac{4 \cdot m^2 \cdot \sin^4 B - 4 \cdot a_2^2 - 2 \cdot \cos^2 B \cdot E}{\cos^4 B}, \quad (6)$$

$$k_3 = \frac{4 \cdot m \cdot \sin^2 B \cdot E}{\cos^4 B}, \quad (7)$$

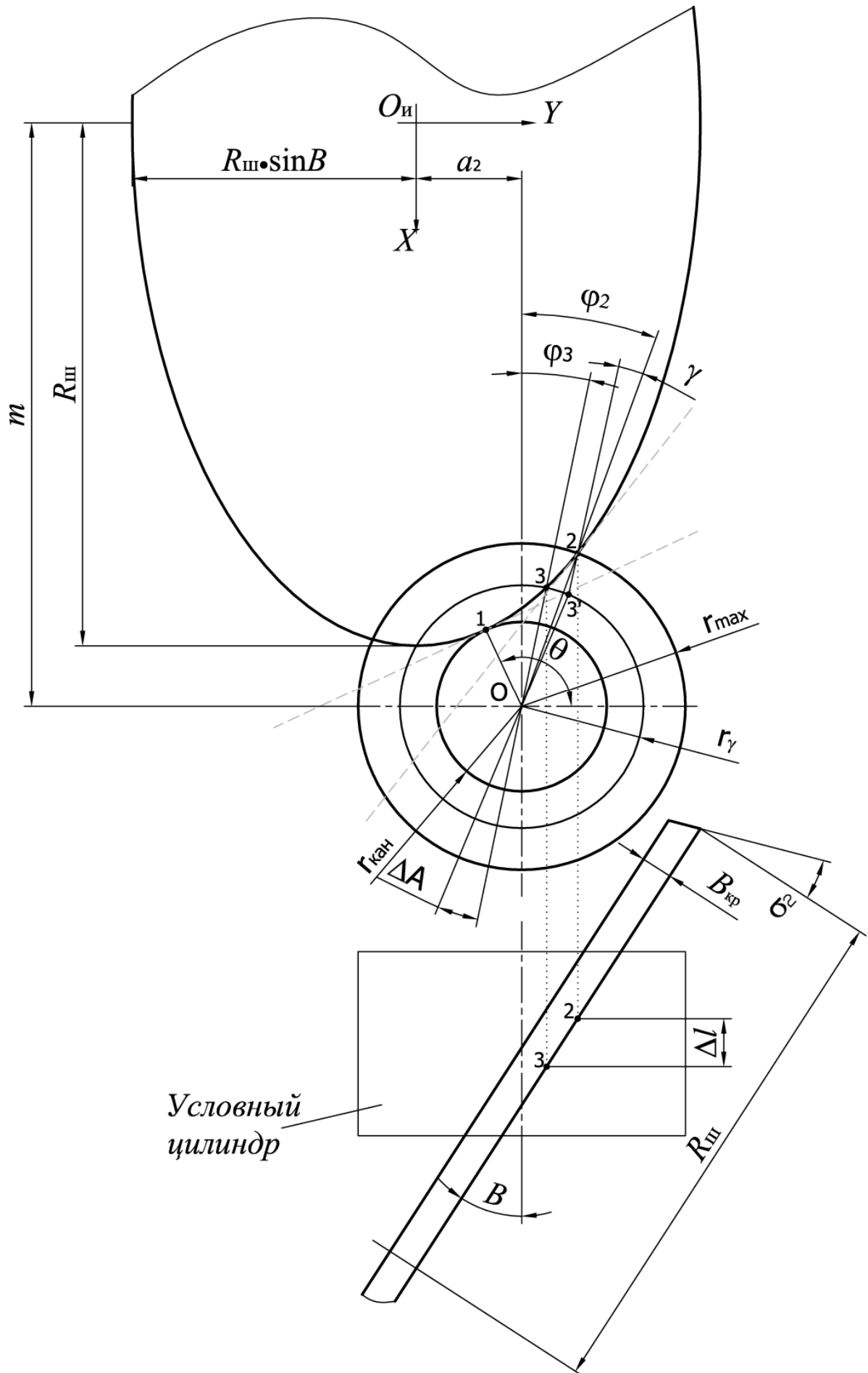


Рисунок 8. Определение параметров установки в исходном сечении

$$k_4 = \frac{E^2 + 4 \cdot a_2^2 \cdot r^2}{\cos^4 B}, \quad (8)$$

где

$$E = R_{ш}^2 \cdot \sin^2 B - a_2^2 - r^2 - m^2 \cdot \sin^2 B. \quad (9)$$

Для определения корней уравнения (4) используется решение уравнений четвертой степени с применением теории Галуа. Отличием этого способа решения уравнений четвертой степени является то, что корни уравнения определяются в явном виде.

В продолжение алгоритма определения параметров установки, при которых будет сформирован требуемый передний угол необходимо определить координаты точки 2 в которой с учетом винтового движения он формируется, и точки 3, находящейся на пересечении проекции окружности с радиусом $R_{ш}$ и вспомогательным радиусом r_γ .

Вследствие винтового движения точка 3 переместится в точку 3'. При этом сформируется передний угол γ .

Координаты точек 2 и 3 определяются решением систем уравнений

$$\begin{aligned} x_{2,3} &= m - r_{\max} \cdot \cos \varphi_{2,3}, \\ y_{2,3} &= a_2 + r_{\max} \cdot \sin \varphi_{2,3}, \\ \frac{x_{2,3}^2}{R_{ш}^2} + \frac{y_{2,3}^2}{R_{ш}^2 \cdot \sin^2 B} &= 1. \end{aligned} \quad (10)$$

где φ_2, φ_3 – полярные углы точек 2 и 3 соответственно, задаваемые в диапазоне $0 < \varphi_{2,3} < \frac{\pi}{4}$.

Определив корни уравнения (4), удовлетворяющие взаимному положению инструмента второго порядка и заготовки, учитывая винтовой параметр $p = \frac{P}{2 \cdot \pi}$ (где P -шаг винтовой линии на условном цилиндре, следующим за исходным сечением), определяется значение переднего угла γ в точке 2 (Рисунок 8) при определенных ранее значениях установки шлифовального круга (m, a_2, B):

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{r_\gamma \cdot \sin(\varphi_3 + \frac{180 \cdot \Delta l \cdot \operatorname{tg} \omega}{\pi \cdot r_{\max}} - \varphi_2)}{\sqrt{r_{\max}^2 + r_\gamma^2 - 2 \cdot r_{\max} \cdot r_\gamma \cdot \cos(\varphi_3 + \frac{180 \cdot \Delta l \cdot \operatorname{tg} \omega}{\pi \cdot r_{\max}} - \varphi_2)}} \right). \quad (11)$$

Если полученное значение переднего угла γ не является удовлетворительным, то следует, изменяя параметры установки, и, повторяя решение уравнений (1), (2), (4), (10), (11) найти значения m, a_2 и B , обеспечивающие приемлемое значение угла γ . Исследования влияния свободного параметра r_γ на “ар-

хитектуру” сечения показали, что он должен находиться в диапазоне $(r_{\max} - f_z) > r_{\gamma} > 0,9r_{\max}$, где f_z - подача на зуб для проектируемого инструмента.

Аналогичным образом следует поступать при расчете положения точки, характеризующей спинку стружечной канавки, учитывая при этом изменяемый за счет угла σ_2 (Рисунок 8) радиус шлифовального круга.

Определение параметров установки с применением такой методики возможно для любого сечения производящей поверхности, но не учитывает взаимных подрезов соседних сечений в процессе профилирования. Поэтому эти результаты используются только для исходного сечения.

Для расчета начального (минимального) сечения (Рисунок 7) рассматривается расчетная схема, показанная на Рисунке 9.

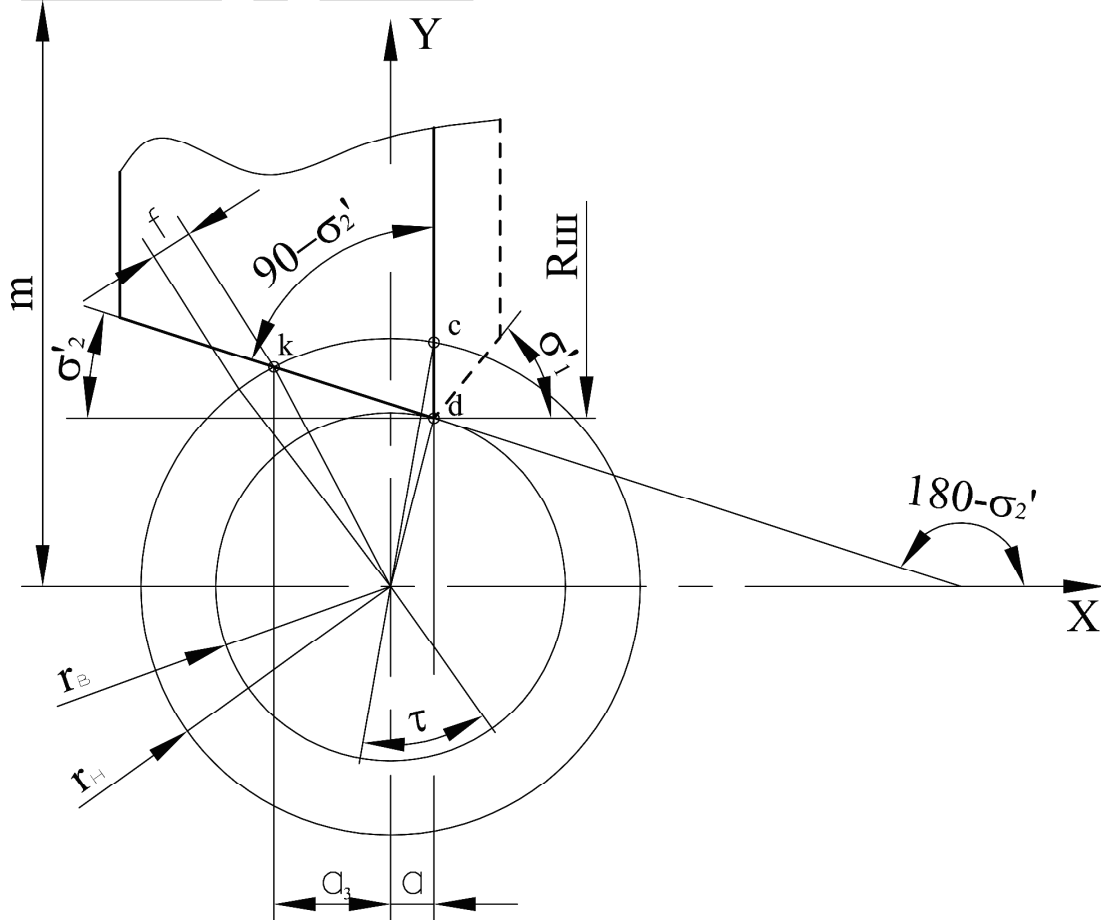


Рисунок 9. Определение параметров минимального сечения

На Рисунке 9 показаны: $r_н$ – наружный радиус сечения; $r_в$ – радиус, характеризующий контактную точку на дне стружечной канавки в торцовом сечении; τ - окружной шаг зубьев; f – ширина задней поверхности; $R_{ш}$ – радиус шлифовального круга; σ_2' - профильный угол шлифовального круга с учетом угла разворота инструмента второго порядка (B) относительно оси заготовки инструмента.

Для определения радиуса дна стружечной канавки в минимальном сечении, значение которого удовлетворит необходимому значению ширины задней поверхности, решается система уравнений

$$\begin{cases} x_d^2 + y_d^2 = r_6^2 \\ y_d - y_k = \operatorname{tg}(180 - \sigma'_2) \cdot (x_d - x_k) \end{cases} \quad (12)$$

из которой определяются координаты точки d

$$y_d = y_k + x_d \cdot \operatorname{tg} \varepsilon - x_k \cdot \operatorname{tg}(180 - \sigma'_2). \quad (13)$$

Путем решения кинематической задачи, расчетная схема которой показана на рисунке 10, определяются траектории взаимного перемещения шлифовального круга и заготовки при переходе от минимального сечения к исходному.

Условным профилирующим инструментом является окружность с радиусом $R_{ш}$. Этой окружностью формируется только передняя поверхность стружечной канавки. В отличие от ранее разработанных схем здесь дополнительно учитывается профильный угол шлифовального круга σ_2 и его ширина $B_{кр}$. Эти два параметра непосредственно влияют на форму спинки стружечной канавки и ширину задней поверхности подвергаемой в дальнейшем дополнительной заточке с выдерживанием параметров производящей поверхности синтезируемого инструмента.

Определив массив координат точек, характеризующих положение инструмента второго порядка, принадлежащих центру окружности радиуса $R_{ш}$, можно решить основную задачу разработки управляющей программы (УП) по второму варианту ее построения (Рисунок 5).

Для решения этой задачи определяются координаты центра шлифовального круга $X_{ст}$, $Y_{ст}$, $Z_{ст}$ для произвольного торцового сечения 1-1 (рис. 10):

$$X_{cm} = \left[(L-l) - R_{ш} \cdot \sin \beta_0 \cdot \cos B - \frac{a - R_{ш} \cdot \sin \beta_0 \cdot \sin B}{\operatorname{tg} B} \right] \cdot \cos B + \frac{a - R_{ш} \cdot \sin \beta_0 \cdot \sin B}{\sin B}, \quad (14)$$

$$Y_{cm} = R_{ш} \cdot \sin \beta_0 \cdot \cos \beta_0 + Y_{сеч}, \quad (15)$$

$$Z_{cm} = \left[(L-l) - R_{ш} \cdot \sin \beta_0 \cdot \cos B - \frac{a - R_{ш} \cdot \sin \beta_0 \cdot \sin B}{\operatorname{tg} B} \right] \cdot \sin B, \quad (16)$$

где $X_{ст}$, $Y_{ст}$, $Z_{ст}$ – координаты центра шлифовального круга для рассматриваемого сечения; L – общая длина режущей части инструмента; l – расстояние от исходного сечения до рассматриваемой точки; $R_{ш}$ – радиус максимальной окружности инструмента второго порядка (шлифовального круга); B – угол скрещивания осей шлифовального круга и заготовки; a – дополнительная координата; β_0 – угол общей касательной между обрабатываемой поверхностью и шлифовальным кругом.

В дополнение к произведенным расчетам необходимо проверить условие профилирования, обеспечивающее отсутствие подреза на уже сформированной (оставленной для заточки задней) поверхности шириной f .

На Рисунке 11а показаны следы начала формирования стружечной канавки двух соседних зубьев (крестовая штриховка), а на Рисунке 11б на них “наложены” два следующих реза шлифовального круга. Режущая кромка зуба проходит через точки $PNT1$ и $PNT3$ на одном зубе и $PNT0$ и $PNT2$ на другом. Здесь видно, что последующий рез нарушил (подрезал) уже сформированную ширину задней поверхности шириной f .

На Рисунке 11б пунктиром показано, где должна располагаться линия пересечения поверхности спинки одного зуба и задней поверхности другого зуба в случае отсутствия подреза.

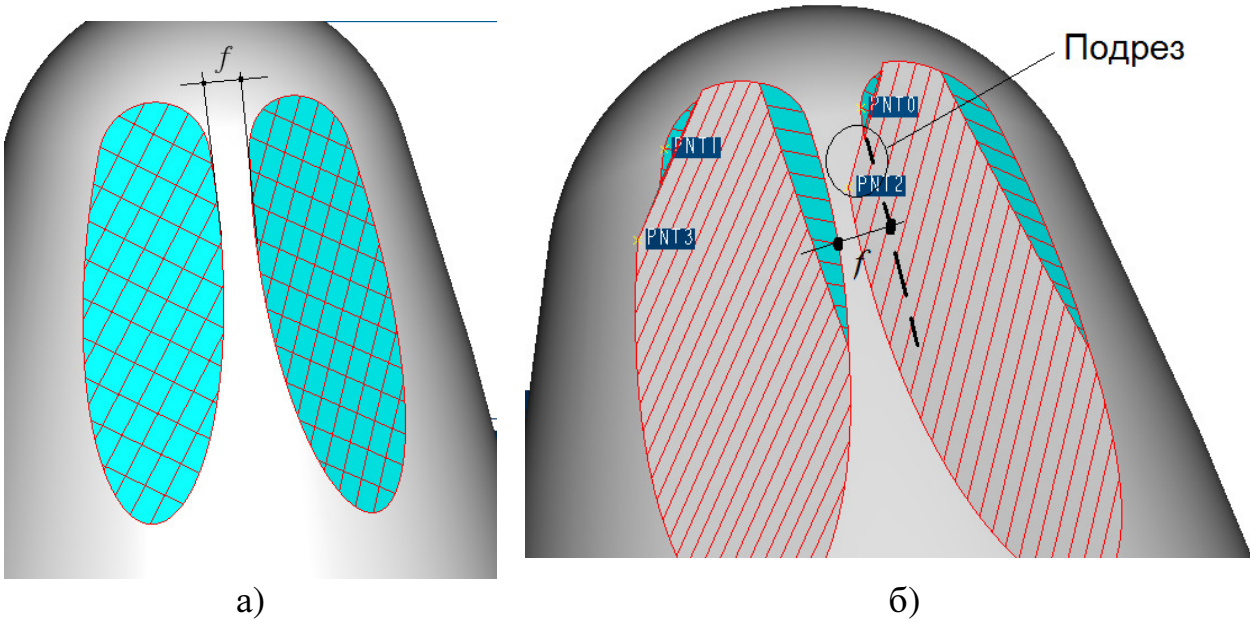


Рисунок 11. Возникновение подреза задней поверхности фасонного инструмента

Для проверки отсутствия подрезов определяются зависимости для нахождения значений $X_{сеч}$ и $Y_{сеч}$ для сечения 1-1 (Рисунки 10, 12)

$$X_{сеч} = a - \frac{\Delta B_{кр}}{\cos B},$$

$$Y_{сеч} = m - \sqrt{R_{ш}^2 - \left(\frac{h_{сеч} - \Delta B_{кр} \cdot \sin B}{\cos B} \right)^2}. \quad (17)$$

и для сечения 2-2 (Рисунки 10, 12)

$$X_{сеч_{\Delta l}} = (a + \Delta l \cdot \operatorname{tg} B) - \frac{\Delta B_{кр}}{\cos B},$$

$$Y_{сеч_{\Delta l}} = m - \sqrt{R_{ш}^2 - \left(\frac{h_{сеч} + \Delta l - \Delta B_{кр} \cdot \sin B}{\cos B} \right)^2}. \quad (18)$$

Выполнение неравенств $X_{сеч_{\Delta l}} > X_{сеч}$ и $Y_{сеч_{\Delta l}} > Y_{сеч}$ является необходимым и обеспечивает выполнение условия профилирования.

На Рисунке 12 сечения 1-1 и 2-2 показаны в торцевой плоскости при отсутствии подреза, т.е. в случае выполнения вышеуказанных неравенств.

Далее в содержании этой главы решается задача формирования задних поверхностей зубьев фасонных инструментов.

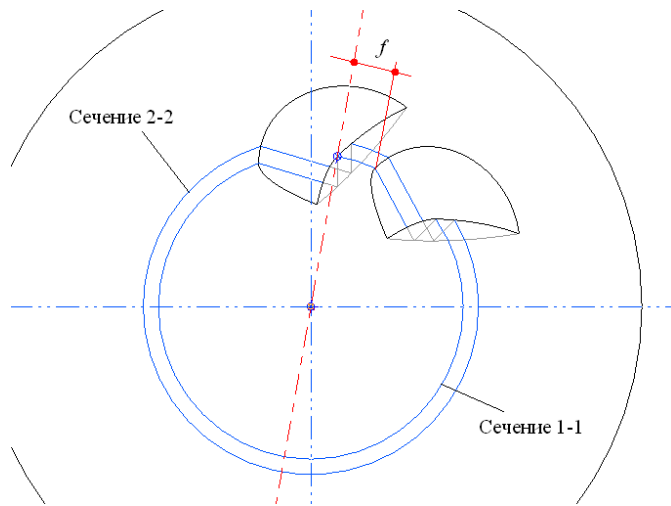


Рисунок 12. Отсутствие подреза соседнего сечения

Здесь принято условие, что формирование задней поверхности выполняется в момент, когда точка P (Рисунок 13) совмещается с осью неподвижной системы координат и проходит через вертикальную плоскость.

Это условие существенно упрощает расчеты и не ограничивает возможности формообразования задней поверхности.

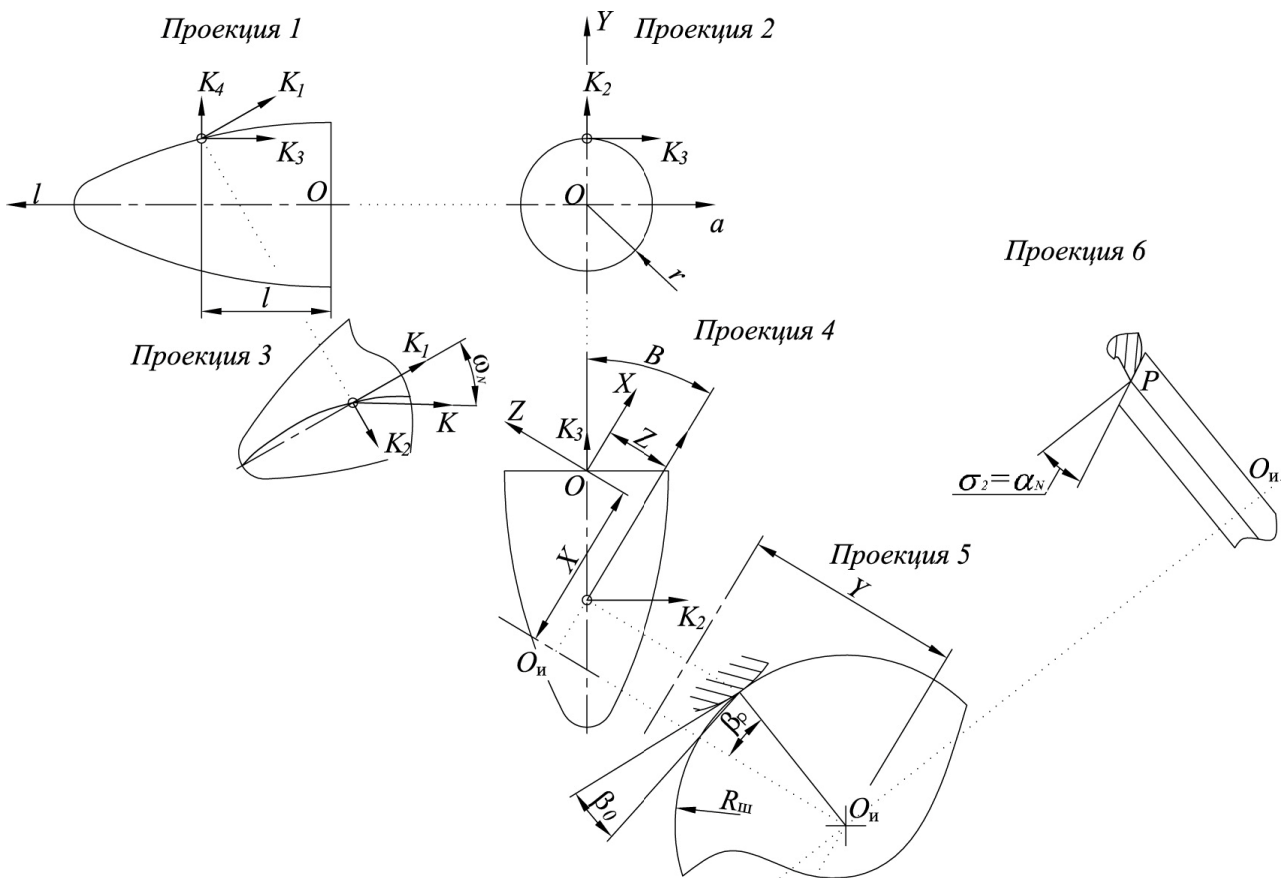


Рис. 13. Формообразование задних поверхностей зубьев фасонных инструментов

В результате синтеза параметров, составляющих расчетную схему (Рисунок 13), определяются координаты точек, характеризующих положение инструмента второго порядка при заточке задних поверхностей. При этом используются зависимости определенные ранее, за исключением параметра a , который принимается равным нулю.

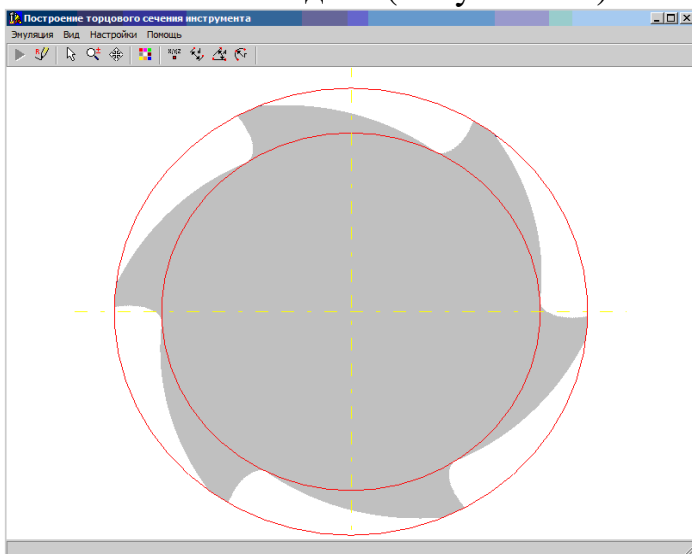
В продолжение главы определяются математические зависимости, описывающие координаты любой точки на винтовой режущей кромке, углы подь-

ема на режущей кромке и значения передних углов. Также показано, что для полного решения задачи определения формы стружечной канавки и ее профиля необходимо решать итерационную задачу синтеза всех величин, описывающих параметры установки, или использовать графический (3D) метод анализа.

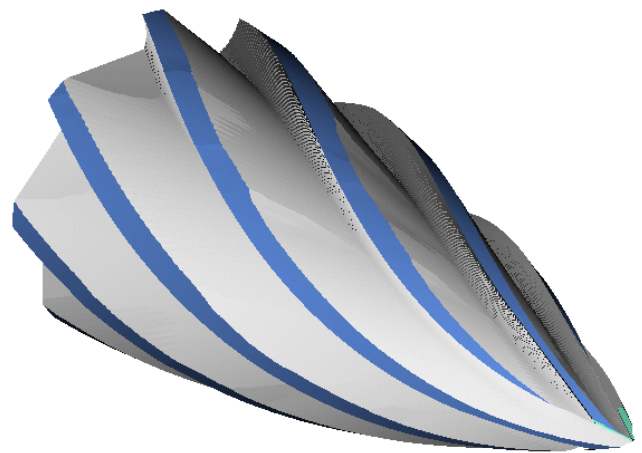
В заключение третьей главы приводится алгоритм графоаналитического синтеза фасонных инструментов с затачиваемой задней поверхностью.

В процессе исследований, произведенных **в четвертой главе**, синтезированные параметры реализуются в технологические 3D модели с применением технологий компьютерного моделирования процессов формообразования. Для этого используются положения булевой алгебры, на основе которых создается виртуальный аналог шлифовально-заточного станка, что позволяет на начальном этапе получить исчерпывающую информацию об изготавливаемом в дальнейшем изделии. Результатом является Windows совместимый программно-методический комплекс (ПМК) подготовки управляющих программ для изготовления фасонных режущих инструментов на шлифовально – заточных станках с ЧПУ.

При решении задач связанных с компьютерным моделированием процессов формообразования фасонных режущих инструментов применяется имитационное моделирование. Результатом 2D моделирования служит торцовое сечение проектируемого инструмента (Рисунок 14а), а 3D моделирования - технологическая модель (Рисунок 14б).



а) Исходное сечение – 2D модель



б) Технологическая 3D модель

Рисунок 14. Результат технологического моделирования режущего инструмента

Для синтеза исходного сечения (с учетом параметров установки инструмента второго порядка, определенных в главе 3) составлена расчетная схема, изображенная на Рисунке 15, а именно произвольное сечение Б-Б шлифовального круга, находящееся между торцом заготовки и точкой 2, в которой формируется передний угол (Рисунок 8). Сечение Б-Б представляет собой сечение конуса, часть которого является производящей поверхностью инструмента второго порядка с профильным углом σ_2 .

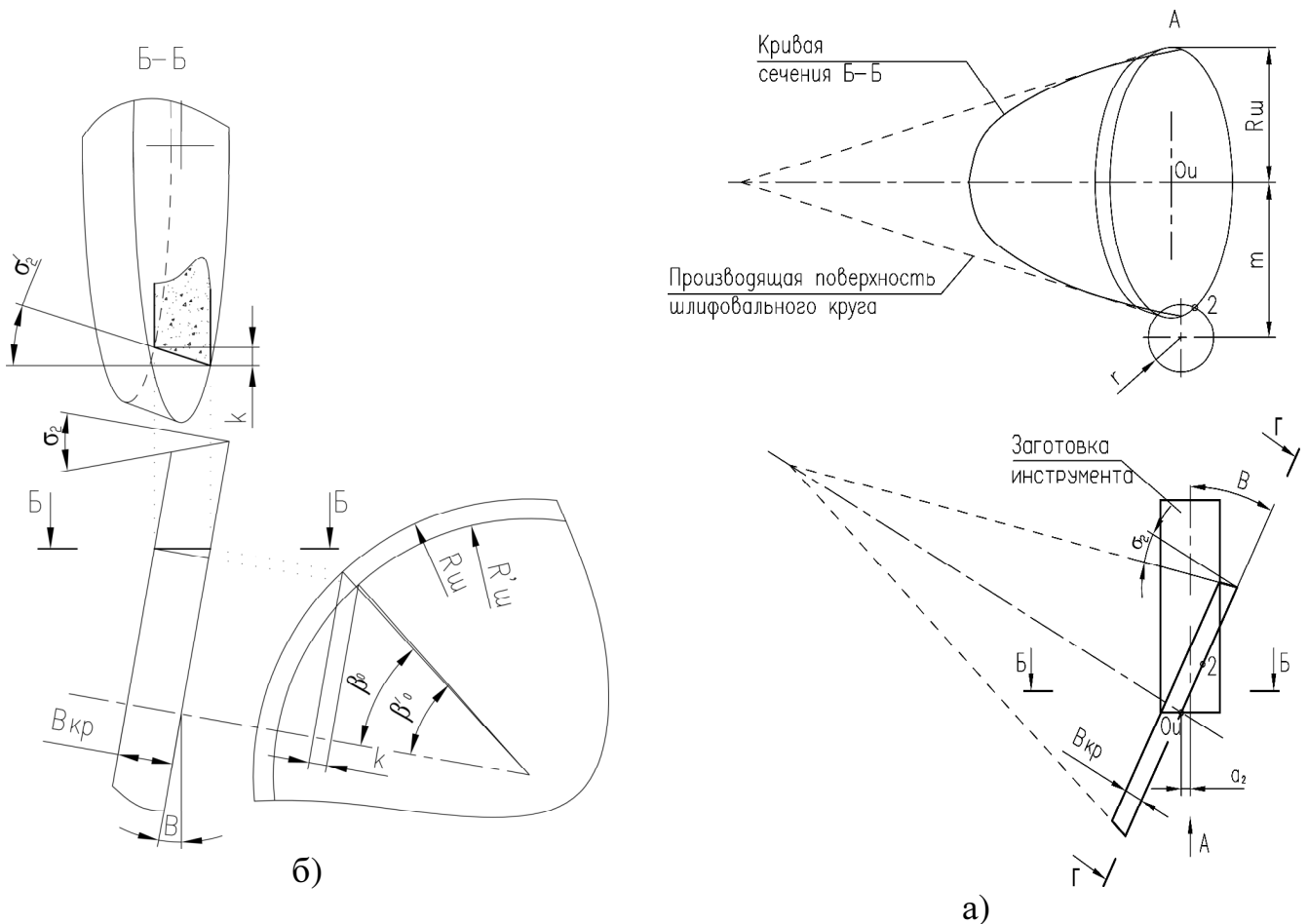


Рисунок 15. Сечение шлифовального круга при определенных параметрах установки а) точное; б) упрощенное

Произвольное сечение инструмента второго порядка (шлифовального круга) Б-Б, показанное на Рисунке 15б, участвующее в профилировании сечения инструмента, является параболой, а с учетом высоты круга $B_{кр}$ её частью.

Это показывает, что сектор шлифовального круга, располагающийся между точками $1O_и2$, формирующий сечение, является ничем иным как семейством парабол, параметры которых зависят от угла разворота B и угла заострения σ_2 .

Таким образом, для построения сечения (Рисунок 14а) инструмента, режущие кромки которого являются винтовой линией необходимо построить семейство сечений шлифовального круга (Рисунок 15а) и “свернуть” их с учетом винтового параметра, для чего достаточно построить часть параболы, зная межосевое расстояние m , координаты точки 2 и использовать каноническое уравнение параболы.

Исходя из того, что высота шлифовального круга мала (5...20 мм), по сравнению с общей высотой конуса, а сам круг имеет значительный диаметр (75...150 мм) и малый профильный угол σ_2 ($0 < \sigma_2 < 20^\circ$) целесообразней часть параболы заменить на прямую (Рисунок 15б), соединяющую крайние точки сечения.

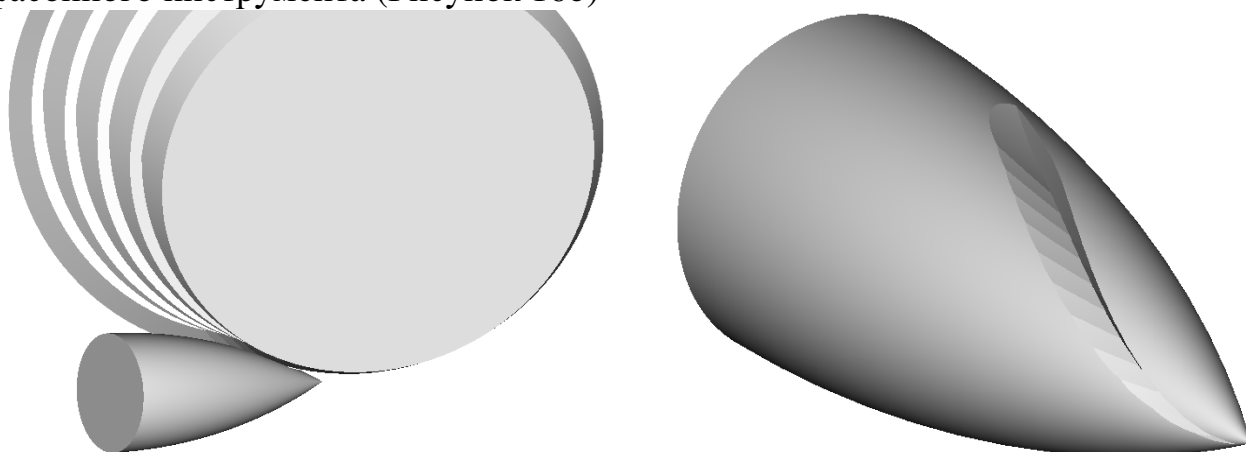
В дальнейшем при моделировании торцовых сечений инструмента в настоящей работе используются упрощенные сечения шлифовального круга.

Для построения упрощенного сечения достаточно определить угол σ' (Рисунок 15б), зависящий от положения рассматриваемого сечения (угол β_0 Рисунок 10), угла B - разворота круга относительно заготовки инструмента, радиуса шлифовального круга $R_{ш}$, его профильного угла σ_2 и его высоты $B_{кр}$.

Такой механизм построения торцового сечения удобно применять на первоначальном этапе проектирования, например для анализа граничных сечений инструмента (исходном и минимальном).

Таким образом, исследование, связанное с синтезом геометрических параметров фасонных режущих инструментов и параметров инструментов второго порядка, приобретает законченный вид в виде технологической 3D модели, полученной с учетом аналитических зависимостей, определенных в главе 3.

Алгоритм формирования технологической 3D модели проектируемого инструмента заключается в последовательном формировании 3D моделей заготовки и инструмента второго порядка, задании массива мгновенных положений контакта (МПК) (Рисунок 16а), являющихся результатом решения кинематических задач, и выполнении операций дизъюнкции (процедура вычитания объемов пересечения тел), в результате которых формируется стружечная канавка фасонного инструмента (Рисунок 16б)



а) мгновенные положения контакта (МПК) шлифовального круга и заготовки

б) результат исключения (вычитания) объемов пересечения

Рисунок 16. Построение 3D модели проектируемого инструмента

Копируя полученный результат с учетом окружного шага зубьев, формируется технологическая 3D модель проектируемого инструмента.

В продолжение главы 4 рассматривается использование результатов графоаналитического синтеза фасонных инструментов при проведении технических измерений, для которых, в настоящее время, активно используются виртуальные модели геометрических тел.

Показано, что полученная технологическая 3D модель позволяет всесторонне оценить проектируемый инструмент, т.е. измерить его размеры, углы на режущем клине, глубину стружечных канавок и, главное, при необходимости ввести коррективы в исходную информацию и управляющую программу.

Измерением технологических 3D моделей фасонных инструментов определено, что отклонения формы производящей поверхности не превышает 0,04% от задаваемого значения, а значения передних углов в различных сечениях производящего профиля укладываются в допуск $\pm 2^\circ$. График изменения переднего угла в различных сечениях обобщающего профиля показан на Рисунке 17.

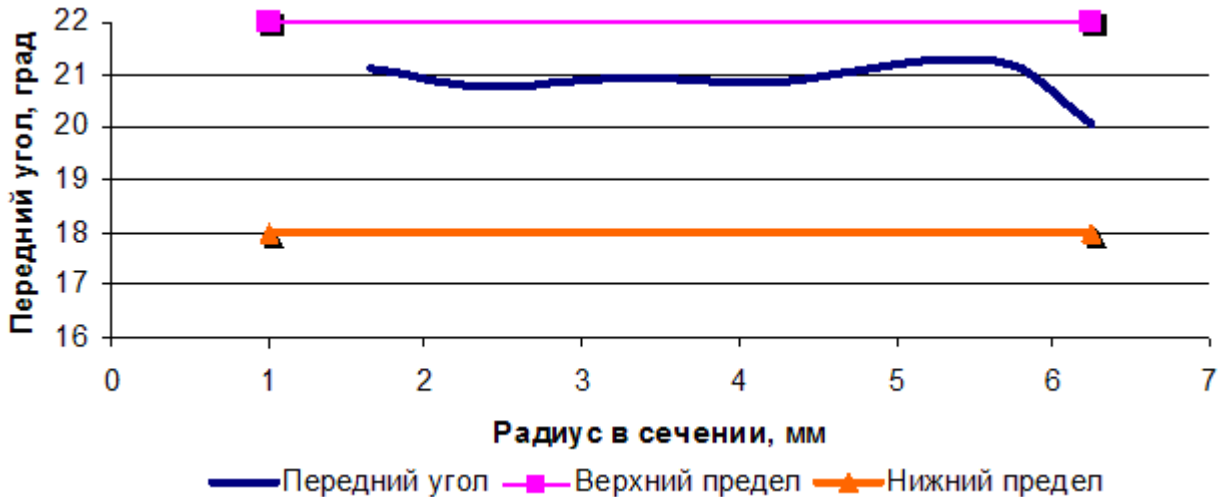


Рисунок 17. График изменения переднего угла в различных сечениях профиля

Получение технологических 3D моделей позволило проанализировать влияние износа производящей поверхности инструментов второго порядка и определить допустимые значения износа для различных диапазонов диаметров, изготавливаемых режущих инструментов. По результатам исследования показано, что максимальный износ шлифовального круга, обеспечивающий допуск на передний угол ($\pm 2^\circ$), не должен превышать 0,5 мм при диаметре изготавливаемого режущего инструмента 20мм.

В продолжение главы рассмотрены вопросы влияния отклонений профиля производящей поверхности инструментов второго порядка при формировании режущей части мелкогабаритных (диаметр менее 3 мм) и многозубых инструментов.

В заключение главы разработана структурная схема программно – методического комплекса (ПМК). В результате дальнейшей детализации структурной схемы формируется алгоритм приложения, который является основой для программирования.

Логическим завершением созданного алгоритма является этап его кодирования, т.е. программирования, который заключается в переводе алгоритмов, разработанных для каждого программного модуля в исходные текстовые файлы, написанные на языке программирования (в нашем случае используются языки ObjectPascal и C++) с применением графических библиотек OpenGL и sgCore. В приложениях 1-6 приведены примеры программных кодов некоторых процедур на указанных языках.

В качестве обобщающего алгоритма проектирования фасонного инструмента с винтовыми зубьями в работе показана блок-схема работы расчетного

модуля с отображением выводимых на экран окон интерфейса пользователя, а в приложении 7 приведено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018663021.

Пятая глава посвящена практическому применению результатов графоаналитического синтеза параметров режущих инструментов, с учетом их изготовления на многокоординатных шлифовально-заточных станках с ЧПУ.

В ней рассматривается особенность формообразования концевых фрез с модернизированной режущей кромкой (МРК), снижающей вибрации при высокоскоростном фрезеровании. Предлагаемые инструменты составляют весомую конкуренцию таким фирмам как ISCAR, Guhrind, SGS.

Основным отличием предложенных фрез является то, что каждая пара зубьев (для инструментов с четным числом зубьев) имеет различный угол подъема режущей кромки ω° и $\omega^\circ + \delta^\circ$ соответственно (сечения S-S и S1-S1), что в свою очередь обеспечивает периодичность окружного шага d, e, f, g (Рисунок 18).

В дополнение к этому зубья таких инструментов имеют неравномерный окружной шаг. 3D модель такой фрезы показана на Рисунке 19.

По результатам проведения измерений оказалось, что концевые фрезы с модернизированной режущей кромкой снижают усилия резания и уменьшают размерные погрешности при высокоскоростном фрезеровании почти на 18% (Рисунок 20).

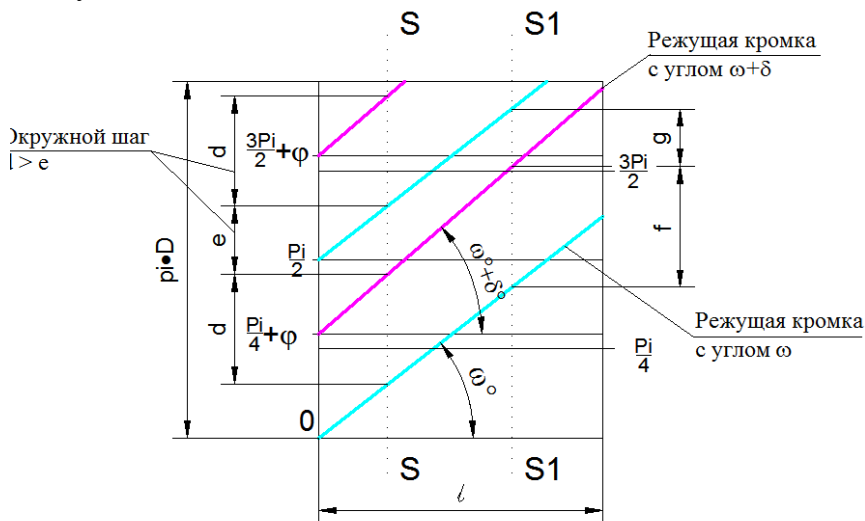


Рисунок 18. Развертка рабочей части концевой фрезы с модернизированной режущей кромкой

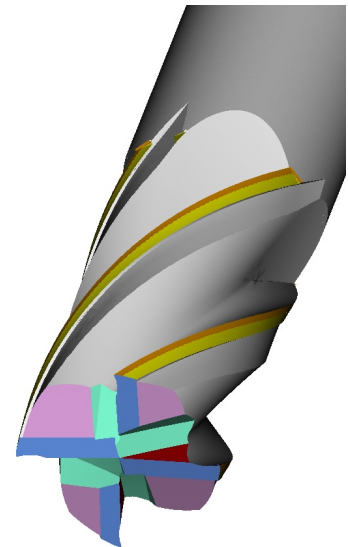
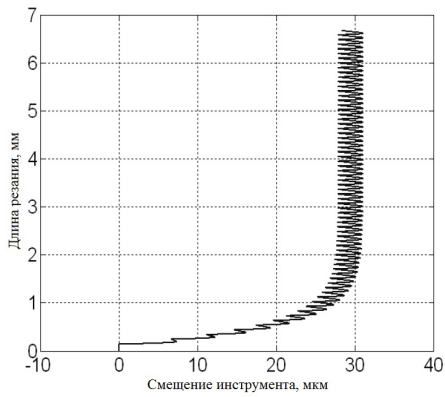


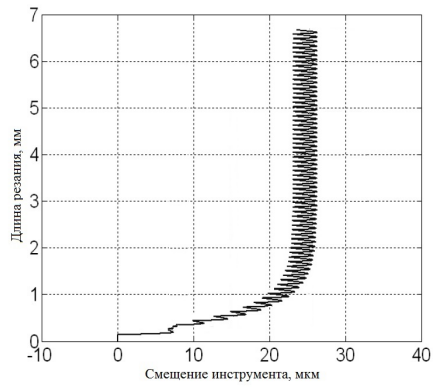
Рисунок 19. 3D модель фрезы с МРК

Дополнительным применением разработанных методик является возможность изготовления твердосплавных концевых фрез с винтовой волнистой режущей кромкой (Рисунок 21), т.е. имеющей знакопеременную кривизну.

Концевые фрезы с волнистой режущей кромкой применяются в основном для фрезерования вязких и жаропрочных материалов, в авиастроении, энергомашиностроении и т.п. В качестве линии волны предложено использовать дуги окружностей с радиусом R (Рисунок 22).



а) обычная концевая фреза



б) фреза с МРК

Рисунок 20. Траектория смещения (отжим) концевой фрезы при обработке

Для формирования линии волны, относительно ее средней линии (режущей кромки обычной фрезы), необходимо вводить корректировку углового положения каждой точки режущей кромки, составляющей винтовую линию, проходящую под углом ω . В настоящее время проводится оптимизация алгоритмов расчета подобных инструментов, конечной целью которой будет создание специального модуля (ПМК).



Рисунок 21. Фреза с волнистой режущей кромкой

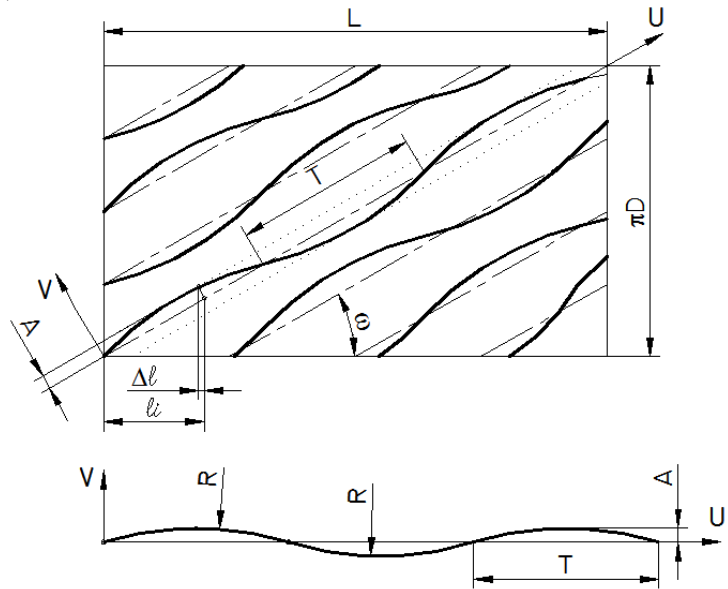


Рисунок 22. Развертка концевой фрезы с волнистой режущей кромкой

Синтез параметров фрез с конструктивной подачей в дополнение с разработкой принципов эффективной механической обработки композитных материалов с использованием твердосплавных инструментов, заключающихся в управляемом разделении режущей кромки на элементы, позволило снизить температуру в зоне резания и способствовать удалению из неё стружки, что значительно повысило эксплуатационные свойства режущего инструмента.

Применение графоаналитического синтеза позволило разработать алгоритм формообразования режущей части концевых фрез с конструктивным стружколомающим элементом на винтовой передней поверхности, параметры сечения которого показаны на Рисунке 23.

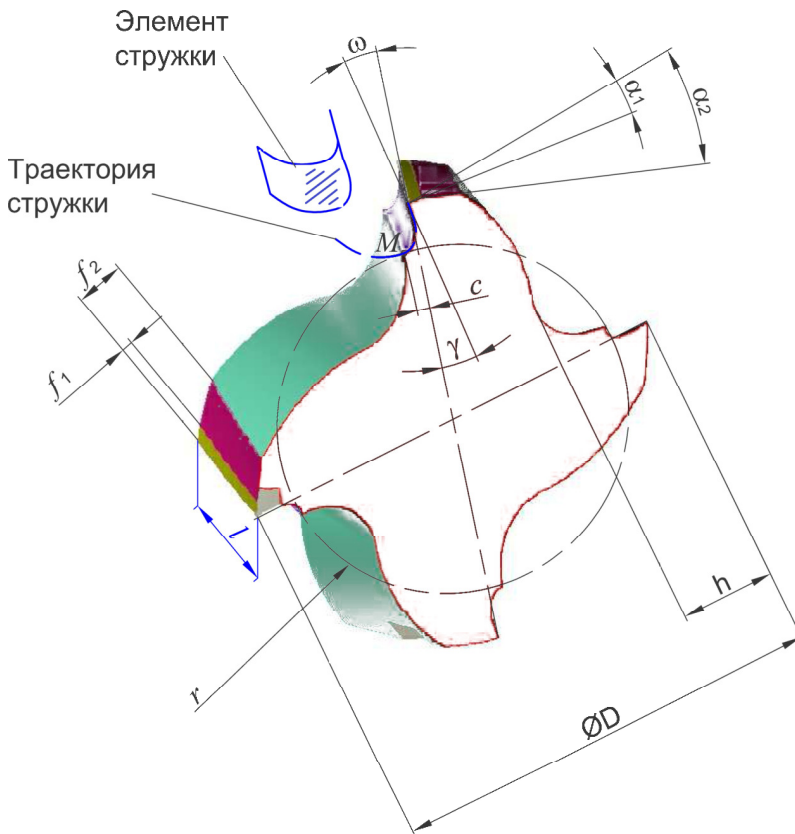


Рисунок 23. Параметры сечения фрезы со стружколомом на передней поверхности
ные характеристики, т.е. сегментирование стружки.

Эмпирическое определение этих параметров для обработки различных материалов и разработка математических зависимостей, позволяющих систематизировать результаты опытов, является дальнейшей целью исследований.

В результате применения такого стружколомающего элемента, находящегося в кинематической главной секущей плоскости, в совокупности с классически применяемым стружколомом, находящимся в кинематической основной плоскости, был получен новый вид инструмента с комбинированным разделением стружки, технологическая 3D модель которого показана на Рисунке 24.

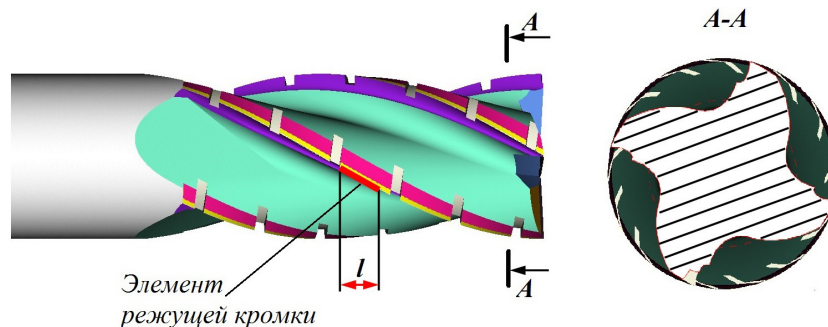


Рисунок 24. Технологическая 3D модель концевой фрезы с комбинированным стружколомом

В продолжение главы 5 приведены результаты применения графоаналитического синтеза параметров при формировании режущей части червячных фрез, применяемых для изготовления прямобочных шлицев. Конструктивные

В результате исследования показано, что точка «излома» передней поверхности M задаваемая радиусом r и смещением c выполняет роль стружколома, т.е. искусственного препятствия, при контакте с которым элемент стружки,двигающийся по передней поверхности, за счет изменения направления движения ломается.

Изменение таких параметров инструмента как угол подъема режущей кромки ω , передний угол γ и положение точки излома передней поверхности M , а также режимы резания, влияет на эксплуатацион-

параметры червячных фрез предложено определять с применением принципов винтового затылования, однако в результате исследования выяснилось, что такая конструкция имеет как достоинства, так и недостатки. Недостатком червячных фрез, изготовленных с применением винтового затылования является увеличение (примерно в 1,8...2 раза в сравнении с ГОСТ 8027-86) их диаметральных размеров при сохранении одинакового числа зубьев Z_n .

При одинаковых диаметральных значениях задние углы α_6 возрастают до 25...30°, что неприемлемо при обработке металлов, зато может эффективно использоваться при обработке неметаллических материалов.

Положительной особенностью рассматриваемой конструкции является расположение зубьев в шахматном порядке (Рисунок 25)

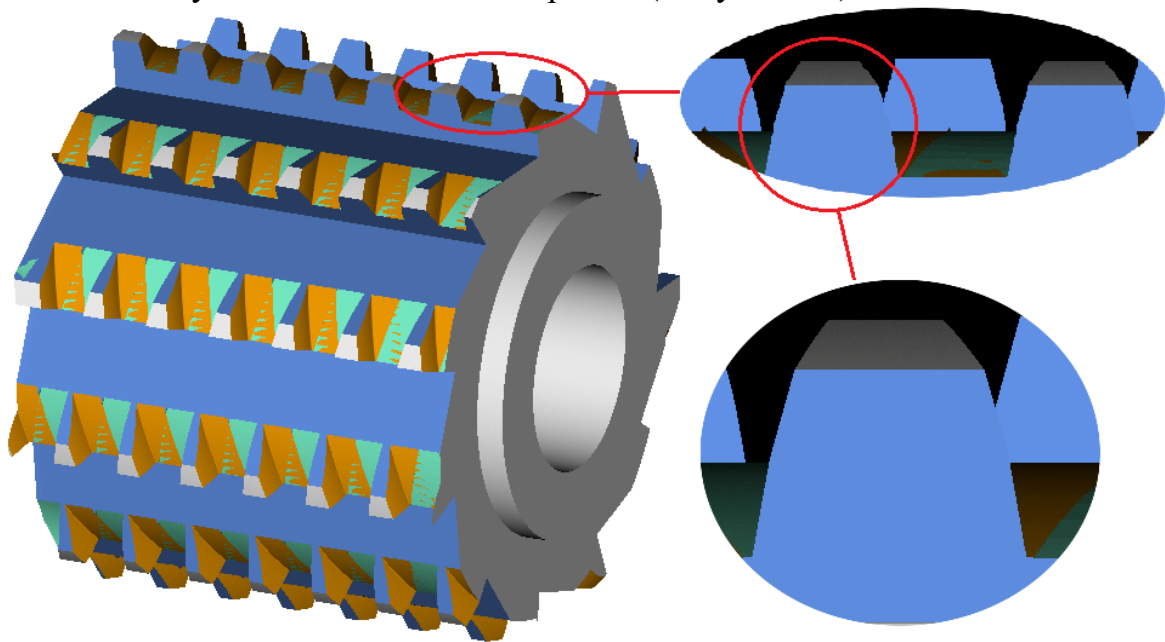


Рисунок 25. Технологическая 3D модель червячной фрезы, спроектированной с применением принципов винтового затылования (затылование по цилиндру не показано)

В заключение главы 5 разрабатывается 3D верификатор процесса шлицефрезерования винтовых прямобочных шлицев червячными фрезами, чем доказана универсальность разработанной методики графоаналитического синтеза режущей части фасонных и цилиндрических инструментов, использующих винтовые поверхности аксиально-радиально переменного шага. Результат работы верификатора показан на Рисунке 26. На полученной технологической 3D модели с высокой степенью точности ($\pm 0,001$) можно измерить геометрические параметры, которые прогнозируемо будут получены при изготовлении детали на реальном оборудовании.

Моделируемый процесс шлицефрезерования является дискретным, т.к. поверхность (форма) зубчатого изделия формируется путем фиксирования результатов последовательного контакта производящей поверхности червячной фрезы при ее движении относительно обрабатываемой детали.

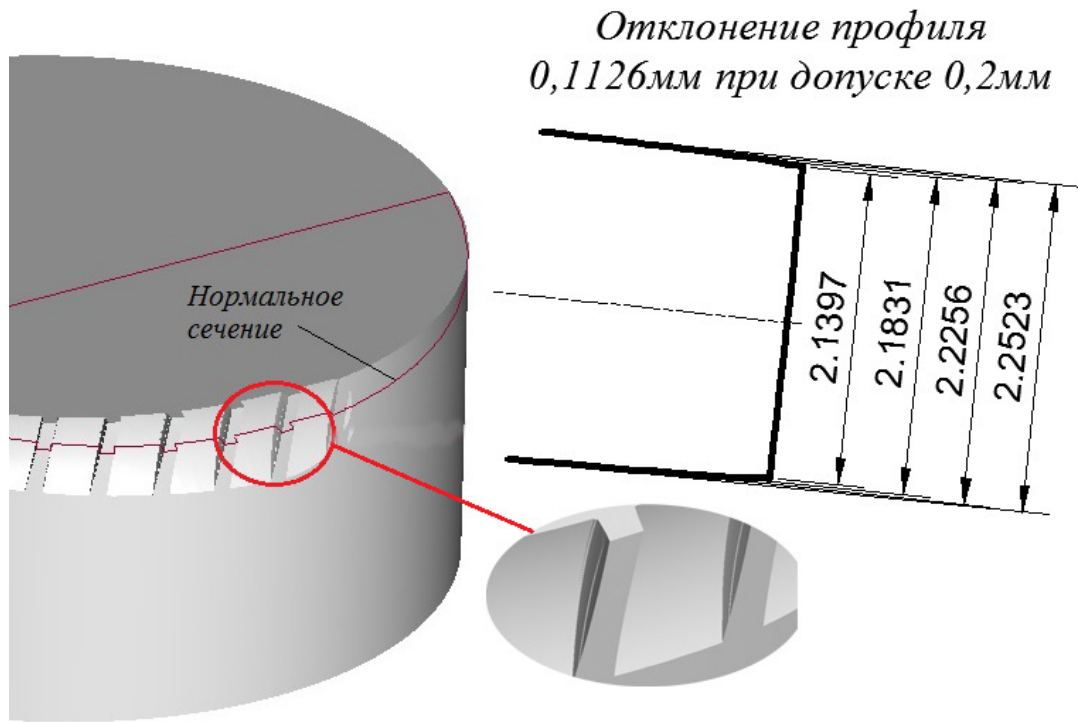


Рисунок 26. Технологическая 3D модель изделия с винтовыми прямобочными шлицами

Основные выводы и результаты

В результате выполненных исследований решена научная проблема, связанная с отсутствием взаимосвязи системы конструктивных параметров фасонных режущих инструментов с винтовыми зубьями с геометрическими и кинематическими параметрами инструментов второго порядка и особенностями шлифовально – заточных станков с ЧПУ, позволяющей проектировать и изготавливать фасонный инструмент с управляемыми параметрами угла заострения в задаваемых сечениях производящего профиля.

В процессе решения научной проблемы с применением графоаналитического синтеза параметров разработана новая система проектирования и изготовления фасонных инструментов с применением 5-координатных шлифовально-заточных станков с ЧПУ, включающая методы оценки полученных результатов аналитически и с использованием технологического 3D- моделирования.

Решены следующие научные задачи:

1. Выполнен анализ существующих методов расчета и формирования винтовых поверхностей который показал, что применение матричных методов определения номинальных поверхностей инструмента и детали, фасонных инструментов второго порядка и метода огибающих обозначает сложность определения параметров установки для массива сечений фасонного инструмента с винтовой режущей кромкой и не имеет полной взаимосвязи с технологией его изготовления.

2. Разработана структурная схема алгоритма графоаналитического синтеза, учитывающего свободные и зависимые параметры фасонного инструмента с винтовыми режущими кромками, геометрические и кинематические

параметры инструментов второго порядка при выполнении условий профилирования математически и визуально.

3. С использованием векторного анализа и дифференциальных уравнений решена кинематическая задача формообразования поверхностей фасонных режущих инструментов инструментами второго порядка, имеющими профиль, образованный прямыми линиями. Решение кинематической задачи позволяет за одно непрерывное движение инструмента второго порядка сформировать стружечную канавку с заданным передним углом и нормируемым припуском под заточку задней поверхности.

4. Исследованием связей системы конструктивных параметров фасонных инструментов с геометрическими и кинематическими параметрами формообразующего инструмента установлено, что использование линии характеризующей дно стружечной канавки и используемой для касания с окружностью максимального радиуса инструмента второго порядка позволяет получить требуемые значения передних углов во всех сечениях производящего профиля.

5. Разработаны зависимости для аналитического определения параметров режущей кромки, а путем формирования технологических 3D моделей, полученных при дискретном перемещении 3D моделей заготовки и инструмента второго порядка, реализован алгоритм визуальной оценки формообразования поверхностей фасонных инструментов.

6. На основе полученных зависимостей и методик разработан и внедрен в действующее производство программно – методический комплекс (ПМК) автоматизированной подготовки управляющих программ к станкам с ЧПУ, для формирования режущей части фасонных инструментов и их оценки по технологическим 3D моделям.

Применение графоаналитического синтеза для формообразования режущей части концевых фрез с модернизированной режущей кромкой позволило снизить вибрации и повысить стойкость твердосплавных фрез на 12...15% по сравнению с классически изготавливаемыми фрезами при работе по труднообрабатываемым материалам.

С практической стороны универсальность разработанного метода графоаналитического синтеза доказывается эффективностью проектирования и изготовления различных инструментов. Успешным синтезом параметров режущей части червячных фрез и разработкой 3D верификатора процесса обката доказана универсальность разработанного метода графоаналитического синтеза режущей части фасонных и цилиндрических инструментов, использующих винтовые поверхности аксиально-радиально переменного шага, изготавливаемых на многокоординатных шлифовально – заточных станках с ЧПУ.

Разработанные алгоритмы и созданный на их основе программно - методический комплекс успешно решают задачи импортозамещения и позволяют применять современные многокоординатные шлифовально – заточные станки с отечественным программным продуктом, позволяющим проектировать и изготавливать инструменты с режущей частью, учитывающей реологию современных конструкционных материалов. Акты проведения сравнительных и эксплуатационных испытаний режущего инструмента, изготовленного с применением

разработанного метода, приведены в приложениях 8-15. В приложении 16 приведен акт внедрения расчетного модуля программно – методического комплекса, поставленного на предприятие ВПК РФ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ

Научные работы в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Протасьев В.Б., Плахотникова Е.В., Истоцкий В.В. Пример реализации методики оценки состояния производственных систем по критерию сигнал/шум при производстве твердосплавных борфрез // Вестник БГТУ 2019, № 1. С. 15-19
2. Истоцкий В.В., Протасьев В.Б., Виноградов А.Е. Учёт реологических свойств при обработке резанием композитных материалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 3. С. 78-84.
3. Протасьев В.Б., Виноградов А.Е., Истоцкий В.В. Моделирование процессов формообразования винтовых зубьев на фасонных фрезерных инструментах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 8-1. С. 37-41.
4. Истоцкий В.В., Протасьев В.Б., Виноградов А.Е. Производство борфрез в РФ: исторические, теоретические и технологические аспекты // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 11-2. С. 568-573.
5. Истоцкий В.В. Принципы эффективной механической обработки композитных материалов с использованием твердосплавных инструментов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-1. С. 334-339.
6. Истоцкий В.В., Протасьев В.Б. Анализ состояния станкоинструментальной промышленности России в период с 2000 по 2015гг. в разрезе импортозамещения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016г. №2(316). С. 92-98.
7. Истоцкий В.В., Протасьев В.Б. Технологические особенности изготовления спиральных сверл в условиях современного инструментального производства // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014г. №5. С. 88-90.
8. Протасьев В.Б., Истоцкий В.В. Состояние производства современного металлорежущего инструмента в России // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013г. №8. С. 223-231.
9. Протасьев В.Б., Истоцкий В.В., Козлова О.В. Концевая однозубая модульная фреза для финишной обработки зубчатых колес // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013г. №8. С. 232-237.
10. Истоцкий В.В. Современный инструмент для прогрессивной обработки легких сплавов на основе алюминия // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2012г. №4 (181). С. 29-30.

11. Протасьев В.Б. Истоцкий В.В. Подготовка управляющих программ к шлифовально-заточным станкам с ЧПУ при изготовлении сложнопрофильных режущих инструментов // Инженерный журнал справочник №7(184) за 2012 г. С. 8-12.

12. Истоцкий В.В., Протасьев В.Б. Обеспечение точности передних углов при изготовлении концевых цилиндрических фрез на шлифовально-заточных станках с ЧПУ // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012г. №2-3(292). С. 21-23.

13. Истоцкий В.В., Протасьев В.Б. Обработка фрезерованием декоративных винтовых поверхностей // СТИН. 2011г. №3. С. 37-38.

14. Истоцкий В.В., Протасьев В.В. Методы современного проектирования групповых зубьев борфрез // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011г. №3. С. 66-69.

15. Истоцкий В.В., Протасьев В.Б. Проектирование зубьев в осевой зоне концевых фасонных инструментов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып.2: в 2 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. Ч. II. С. 172-175.

16. Истоцкий В.В. Протасьев В.Б. Принципы современного проектирования режущей части фасонных инструментов с учетом особенностей их изготовления на заточных станках с ЧПУ // Известия ТулГУ (Технология машиностроения). – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. – С. 102-107.

17. Свид. 2018663021 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Design Cut Tools – Проектирование режущего инструмента / В.В. Истоцкий; заявитель и правообладатель В.В. Истоцкий. – №2018660722; заявл. 27.09.2018; опубл. 18.10.2018, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

Scopus

18. Istotskii V.V., Protasev V.B., Milling of decorative helical surfaces // Russia Engineering Research. 2011. Т.31. №6. pp. 623-624.

19. Истоцкий В.В. Алгоритм графоаналитического синтеза фасонных инструментов с винтовыми зубьями // Черные металлы 2019. №1. С. 72-77.

Монографии

20. Протасьев В.Б., Истоцкий В.В. Проектирование фасонных инструментов, изготавливаемых с использованием шлифовально-заточных станков с ЧПУ. – М.: ИНФРА-М, 2011. – (Научная мысль). 126 с.

Научные работы в других изданиях

21. Istotskiy V., Protasev V. Increasing the level of technical perfection technology manufacture of cutting tools / Norwegian Journal of development of the International Science №11/2017, Vol. 1. - pp. 61-70. (In Russian).

22. Истоцкий В.В., Протасьев В.Б. Переточка фасонных режущих инструментов с винтовыми зубьями // Вопросы современных технических наук: свежий взгляд и новые решения. Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. - г. Екатеринбург, 2016. С. 18-21.

23. Протасьев В.Б., Истоцкий В.В. Решение задач формообразования винтовых поверхностей инструментов при использовании шлифовально-заточных станков с ЧП // В сборнике. Технические науки: интеграция науки и

практики. Сборник материалов международной научной конференции под редакцией В.Я.Ушакова. 2014 г. С.7-15.

24. В.Б. Протасьев, В.В. Истоцкий, О.М. Мекеня Оценка точности измерений с использованием 3D моделей // Журнал Мир измерений № 7(137) за 2012 г. С. 18-22.

25. Истоцкий В.В., Протасьев В.Б., Панченко О.Л., Мекеня О.М. Измерения с использованием 3D-моделей // Журнал Мир измерений № 5 за 2011 г. С. 15-19.

26. Истоцкий В.В., Протасьев В.Б. Использование возможности 3D моделирования в учебном процессе и при производстве фасонных инструментов с винтовыми зубьями // Сборник трудов международной научно-технической конференции “Технологические методы повышения качества продукции в машиностроении (ТМ-2010)”. – Воронеж: ВГТУ, 2010. С. 165-168.

27. Истоцкий В.В., Протасьев В.Б., Киричек А.В. Использование возможности 3D моделирования в учебном процессе и при производстве фасонных инструментов с винтовыми зубьями // Международный симпозиум “Образование, наука и производство: проблемы, достижения и перспективы”: материалы международной научно-технической конференции “Проблемы и перспективы обработки материалов и заготовительных производств” (Комсомольск-на-Амуре, 27-30 сентября 2010 года): В 5 т. Т.2 / Редкол.:А.М. Шпилев (отв. ред.) и др. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО “КнФГТУ”, 2010. С. 89-96.

28. Истоцкий В.В., Протасьев В.Б. Измерение с использованием 3D моделей // Мир измерений. 2010г. №5. С. 57.

29. Истоцкий В.В. Выбор оптимальной формы шлифовальных кругов для профилирования стружечных канавок концевых фрез // Вестник ТулГУ. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. – (Инструментальные и метрологические системы). – С. 174-177.

30. Шереметьев Е.М., Истоцкий В.В, Робастное проектирование процесса пайки твердосплавных борфрез // Вестник ТулГУ. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. – (Инструментальные и метрологические системы). – С. 192-194.

31. Истоцкий В.В., Протасьев В.Б. Техническое обслуживание многоинструментальных наладок на шлифовально-заточных станках // Вестник ТулГУ. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. – (Инструментальные и метрологические системы). – С. 209-214.

32. Истоцкий В.В. Основные направления развития инструментального производства в современных условиях // Журнал ИТО №5 за 2007 г. С. 82-83.

33. В.В. Истоцкий Современные технологии инструментального производства // Журнал Оборонный заказ №3 за 2007 г. С. 66-67.

34. Истоцкий В.В. Усовершенствование технологии формирования зубьев рихтовочных напильников с использованием возможностей 3D моделирования // Известия ТулГУ. Вып.2: Труды Междунар. юбил. научн.-техн. конф. “Проблемы формообразования деталей при обработке резанием”, посвящ. 90-летию со дня рождения С.И. Лашнева, 29-30 января 2007 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006.-(Инструментальные и метрологические системы). С. 174-178.

35. Шереметьев Е.М., Истоцкий В.В. Технологии и оборудование производства твердосплавного инструмента // Журнал ИТО №11 за 2007 г. с.24-26.
36. Истоцкий В.В., Протасьев В.Б. Проектирование режущей части фасонных инструментов с использованием виртуальных аналогов шлифовально-заточных станков с ЧПУ, основанных на положениях булевой алгебры // Известия ТулГУ. Вып. 2: Труды Междунар. юбил. научн.-техн. конф. “Проблемы формообразования деталей при обработке резанием”, посвящ. 90-летию со дня рождения С.И. Лашнева, 29-30 января 2007 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006.- (Инструментальные и метрологические системы). С. 170-174.
37. ТУ 3929 – 001 – 11777140 – 2014. Борфрезы твердосплавные. Технические условия.
38. ТУ 3918 – 002 – 11777140 – 2014. Фрезы концевые твердосплавные цельные. Технические условия.
39. Истоцкий В.В. Каталог режущего инструмента. – Тула: Типография «БОРУС», 2014 г.
40. Истоцкий В.В. Каталог «Резьбофрезы твердосплавные». –Тула: Типография «БОРУС», 2016 г.
41. Истоцкий В.В. Каталог «Борфрезы твердосплавные». –Тула: Типография «БОРУС», 2016 г.
42. Истоцкий В.В. Каталог «Инструмент для обработки пластиков и композитных материалов». – Тула: Типография «БОРУС», 2016 г.
43. Истоцкий В.В. Каталог «Вставки резцовые твердосплавные». – Тула: Типография «БОРУС», 2017 г.

Авторское редактирование

Подписано в печать 29.06.19

Формат бумаги 70x100 1/16. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 2,9.

Тираж 100 экз. Заказ 078к.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 30012, г. Тула, просп. Ленина, 95