

Понкратов Павел Александрович

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО ДОЛБЕЖНОГО ИНСТРУМЕНТА
ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЛОЖНЫХ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ПО МЕТОДУ ОБКАТЫВАНИЯ**

Специальность: 05.02.07 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Курск - 2013

Работа выполнена на кафедре машиностроительных технологий и оборудования в Юго-Западном государственном университете

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Барботько Анатолий Иванович

Официальные оппоненты: Козлов Александр Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
Липецкий государственный технический университет, заведующий кафедрой «Технология машиностроения»

Тарапанов Александр Сергеевич,
доктор технических наук, профессор,
Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс, профессор кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»

Ведущая организация: Брянский государственный технический университет

Защита диссертации состоится «26» декабря 2013 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.105.09 при Юго-Западном государственном университете по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94 (аудитория Г-7).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Юго-Западного государственного университета по адресу: г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Автореферат разослан «23» ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета Д 212.105.09



В.В. Куц

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее время в отечественном и зарубежном машиностроении находят применение механизмы, в составе которых имеются соединения деталей, заданных специальным профилем. Профильные соединения в нормальном сечении могут иметь самые различные конфигурации, основанные на криволинейной геометрии. Большой научный вклад в разработку профильных соединений внесли отечественные ученые: С.Г. Лакирев, С.Г. Чиненов, Л.С. Борович, Л.М. Червяков, А.И. Тимченко, С.Г. Емельянов и др., а также зарубежные исследователи: Р. Мюзиль (R. Musyl), А. Франк (A. Frank), Л. Грибовски (L. Gribovski) и др. Несмотря на доказанные приведенными авторами эксплуатационные и технологические преимущества профильных соединений, они все еще не находят широкого распространения в отечественном машиностроении.

Зарубежный опыт показывает, что традиционные соединения деталей машин, построенных на основе шлицевых и шпоночных соединений, являются зачастую не только не технологичными, но и более затратными по сравнению с профильными. С целью обеспечения конкурентоспособности отечественного машиностроения необходимо создать технологическое обеспечение изготовления профильных соединений на базе универсального оборудования. Сегодня профильные соединения создаются на основе деталей со сложными криволинейными поверхностями.

Одним из путей решения проблемы получения профильных соединений является применение широко распространенного долбежного оборудования как наиболее универсального в условиях отечественного машиностроения без необходимости закупки дорогостоящих станков с ЧПУ. На долбежном оборудовании возможна обработка как наружных, так и внутренних профильных поверхностей, что сокращает число станков производственной линии обработки деталей типа вал и втулка, затраты на производственные площади и количество рабочих.

Долбежный инструмент имеет ряд эксплуатационных преимуществ по сравнению с другими металлообрабатывающими инструментами. Для большого числа деталей долбяк является финишным инструментом, т.е. помимо послойного снятия технологического припуска он задает окончательную форму, размеры и качество поверхности обрабатываемой детали. Кроме того, долбежный инструмент может быть использован в тех областях обработки, где другим типом инструмента осуществить обработку невозможно либо менее рационально, в том числе исходя из себестоимости операции. К таким типам обработки относится обработка внутренних поверхностей, поверхностей, имеющих бурт, либо обработка «в упор». В работах российских ученых: М.И. Юликова, В.М. Матюшина, Н.И. Жигалко и В.В. Киселева, В.А. Аршинова, Г.А. Алексеева, И.И. Семенченко и др., достаточно глубоко рассмотрены аспекты получения точных параметров долбежного инструмента, в частности связанных с обработкой профильных соединений. Однако несмотря на глубокую исследованность теоретических положений по его изготовлению все еще остаются актуальными задачи проектирования и уменьшения погрешности производящего контура его режущей кромки. Кроме того, углы заточки долбяка оказывают существенное влияние на: геомет-

рию обрабатываемой детали – погрешность контура детали, пределы допуска на которую необходимо обеспечить в случае, если при переточке изменить передний угол для улучшения режущих способностей инструмента, в зависимости от состояния материала обрабатываемой детали; качество поверхности – ее шероховатость.

В связи с этим направление исследований по получению контура долбяка для обработки профильных соединений, с возможностью определения и управления погрешностью формообразующего контура инструмента и, соответственно, обработанных деталей, применяемых в инновационных, наукоемких, военных и гражданских объектах производства, является перспективным, а задача – актуальной для науки и техники.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ по теме «Разработка и исследование жизненного цикла сложных наукоемких технических систем на основе CALS-технологий» (НШ-4423.2012.8).

Цель работы – разработка инструментального обеспечения обработки резанием деталей профильных криволинейных соединений типа вал и втулка, определение и управление значением геометрической точности инструмента, работающего по методу обкатывания, с использованием универсального оборудования, при наименьших затратах на производство.

Для достижения намеченной цели в диссертации поставлены следующие задачи:

- 1) провести анализ технологических процессов обработки сложных криволинейных поверхностей профильных моментопередающих соединений с применением различного станочного и инструментального обеспечения;
- 2) разработать способ проектирования режущего инструмента, формообразующего сложные криволинейные поверхности по методу обкатывания, с возможностью его автоматизации;
- 3) рассмотреть способы задания образующей контура инструмента путем аппроксимации его режущей кромки различными геометрическими кривыми;
- 4) провести анализ и синтез конструктивных параметров инструмента, обеспечивающих различные схемы съема припуска в условиях непостоянной глубины резания, с обеспечением рационального использования инструментального материала;
- 5) рассмотреть способы формирования углов заточки долбяка в условиях различных типов производства и использования инструмента;
- 6) установить теоретические зависимости, выражающие влияние углов заточки инструмента на отклонение контура режущей кромки от расчетной, в проекции на основную плоскость, с целью обеспечения получения геометрически точного профиля обрабатываемого изделия;
- 7) разработать способ определения оптимальных конструктивных параметров инструмента и режимов обработки, методом графической интерпретации количественных значений степенных зависимостей;

8) провести апробацию разработанного инструментального обеспечения и теоретических положений по его изготовлению в условиях инструментального производства.

Методы исследования. С целью обеспечения теоретических расчетов и получения физической модели экспериментального обеспечения были использованы: методы аналитической геометрии, моделирование на ЭВМ с применением программных продуктов SolidWorks 2010, КОМПАС-3D V10, Matchcad 15, Delphi 16 (XE2), статистический анализ результатов планируемых экспериментов, численные эксперименты, основные положения классической теории резания, геометрической теории формирования поверхностей резанием и высшей математики, программный продукт Mastercam X7 для реализации численного управления проволочно-вырезного электроискрового станка с ЧПУ Sodick AQ535L. Достоверность результатов и выводов подтверждена практически при испытаниях на базе механических цехов Курского ОАО «Прибор».

Объект исследования. Разработка специального долбежного инструмента для формообразования деталей типа вал и втулка, имеющих профильную криволинейную поверхность.

Предмет исследования. Разработка способов обработки профильных отверстий и валов. Профилирование рабочего контура долбяка, определение искажения формообразующей линии режущей кромки инструмента в зависимости от его типоразмера углов заточки.

Научная новизна работы:

1. Определена конфигурация задней поверхности профильного долбежного инструмента для обработки сложных криволинейных поверхностей путем задания ее формы как конусной в результате выполненной аппроксимации образующей его режущей кромки в исходном сечении дугой окружности.

2. Впервые установлены теоретические математические зависимости, отражающие отклонение проекции режущей кромки профильного долбяка на основную плоскость по отношению к расчетному в исходном сечении для каждой конкретной точки контура, в зависимости от типоразмера и изменения углов заточки инструмента.

3. Разработан и раскрыт способ определения оптимальных показателей значений конструктивных параметров долбяка методом графического определения количественного значения степенных моделей, алгоритм действия которых реализован в среде компьютерной программы, позволивший повысить наглядность влияния изменения исходных конструктивных параметров профиля инструмента на искажение контура режущего инструмента по отношению к расчетному, в связи с изменением каждого из параметров типоразмера и углов заточки, тем самым снизить объем расчетов, ускорив выбор оптимальных конструктивных показателей инструмента из интервала имеющихся значений.

Практическая ценность работы:

1. В результате проведенного анализа технологических процессов обработки сложных криволинейных поверхностей установлена целесообразность применения для обработки профильных моментопередающих соединений специального

профильного инструмента, работающего по методу обкатывания, с применением универсального оборудования на основе долбежного.

2. Разработан способ и указаны особенности проектирования инструмента на основе профильных долбяков для формообразования сложных криволинейных поверхностей втулок и валов профильных соединений, выполнена их программная реализация на ЭВМ, позволившая достичь сокращения конструкторского времени на проектирование и повысить точность выполняемых расчетов.

3. На основе проведенного анализа металлорежущего инструмента был выполнен синтез новых конструкций долбежного инструмента, построенных на различных схемах съема припуска в условиях непостоянной глубины резания, позволивший определить их преимущества и недостатки, дать рекомендации по области применения каждой конструкции.

4. На основе анализа способов изготовления инструмента созданы рекомендации по формированию их задней поверхности на проволочных электроискровых станках с ЧПУ в условиях инструментального производства, а передней поверхности по способу заточки из центра с целью обеспечения возможности переточки в условиях машиностроительных производств. На основе данных рекомендаций созданы способы определения искажения истинного контура режущего контура инструмента по отношению к расчетному.

5. Проведена апробация долбежного инструментального обеспечения для обработки сложных криволинейных поверхностей по методу обкатывания с внедрением на производстве.

Область исследований. Содержание диссертационной работы соответствует п. 4 «Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию параметров инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки» паспорта специальности 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

На защиту выносятся:

1. Способ построения исходного контура долбежного инструмента, позволяющий автоматизировать проектирование инструмента.

2. Новый вид конструкции профильного инструмента для формирования деталей со сложной криволинейной поверхностью профильных моментопередающих соединений типа вал и втулка.

3. Способ задания образующей контура режущей кромки инструмента путем аппроксимации различными геометрическими кривыми.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, выраженных в виде системы математических зависимостей, характеризующих искажение линии, образующей поверхность долбяка, в зависимости от конструктивных параметров и углов заточки инструмента.

5. Способ оценки и назначения конструкторско-технологических параметров обработки путем графического определения количественного значения степенных моделей.

Реализация результатов работы. Результаты работы прошли промышленные испытания на предприятии Курское ОАО «Прибор», и приняты к внедрению в ООО «Комплект». Материалы диссертации используются в научно-исследовательской работе научно-образовательного центра «Управление технико-экономическими системами» Ульяновского государственного технического университета, в учебном процессе кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» Юго-Западного государственного университета при изучении дисциплин «Процессы формообразования и инструментальная техника» и «Детали машин и основы конструирования».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» ЮЗГУ (2010–2013 гг.), III Международной научно-технической конференции «Современные автомобильные материалы и технологии» (Курск, 2011 г.), VII, VIII международных научно-технических конференциях «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации» (Курск, 2010, 2011 гг.), I Международной научно-практической конференции «Современные инновации в науке и технике» (Курск, 2011 г.), II Международной научно-практической конференции «Современные инновации в науке и технике» (Курск, 2012 г.), 2-й Международной научно-практической конференции «Техника и технологии: Пути инновационного развития» (Курск, 2012 г.), XVII Международной заочной научно-практической конференции «Технические науки – от теории к практике» (Новосибирск, 2013 г.), IV Международной научно-практической конференции «Интеграция науки и практики как условие экономического роста» (Ульяновск, 2013 г.), V Международной научно-технической конференции «Машиностроение – основа технологического развития России (ТМ-2013)» (Курск, 2013 г.), Конкурсе молодежных научно-исследовательских работ Санкт-Петербургского государственного политехнического университета «Технологическая разработка инструментальных систем обработки некруглых поверхностей двух диаметров» (Диплом III степени) (2013 г.), VI Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (Москва, 2013 г.) (Диплом I степени по направлению «Инструментальная техника и технологии»).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 23 печатные работы, в том числе 4 в рецензируемых научных журналах, получено 2 патента на изобретение, 2 патента на полезную модель, 3 свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту результаты получены автором лично. В работах, опубликованных в соавторстве и приведенных в автореферате, автору принадлежат: выполнение анализа технологических процессов обработки профильных моментопередающих соединений с применением различного станочного и инструментального обеспечения [7; 19]; определение параметров обеспечения прочностных характеристик профильного вала в зависимости от его типоразмера и количества граней [23]; разработка нового типа соединения [17]; разработка способа проектирования исходного сечения долбяка для обработки вала и втулки [5; 22]; разработка принципа реализации моделирования профиля ин-

инструмента с применением ЭВМ [5; 20]; разработка принципиальных конструкций инструмента [3; 9; 10; 13]; решение вопроса технологичности изготовления и использования инструмента в условиях производства, экономической эффективности [8; 16]; определение математических зависимостей, выражающих погрешность фактического контура инструмента по отношению к расчетному [1]; определение основных конструктивных параметров для контроля профиля детали [14]; разработка принципиальной конструкции измерительного инструмента профильных долбяков [12; 18]; разработка способа определения параметров инструмента [2; 3; 21].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, включающего 135 наименований, и приложений. Работа изложена на 200 страницах машинописного текста, содержит 73 рисунка и 10 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткая характеристика состояния проблемы, обосновывается актуальность выполненного исследования, определяется цель и ставятся задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе диссертации содержится обзор научной литературы, относящейся к классификации видов профильных соединений и их обработке. Рассмотрены примеры применения деталей с профильными соединениями в различных механизмах и машинах. Проведен анализ проблемы получения данного вида соединений, показавший, что существующие методы обработки имеют недостатки, заключающиеся в низком качестве обработки либо существенной стоимости, неприемлемой для некоторых типов производства. Выполнен обзор литературных источников, посвященный вопросам профилирования режущих инструментов, выделен наиболее приемлемый для условий серийного производства метод обработки деталей профильных соединений. Рассмотрены основные геометрические параметры, определяющие контур в нормальном сечении. Показано, что наиболее простые сечения имеют вид правильных многогранников, другие же описываются сложными замкнутыми кривыми, определяемыми в зависимости от функционального значения детали в узле, для которых характерны также симметричные выступы и впадины, число которых N равно числу осей симметрии (рис. 1). Указанные кривые могут быть охарактеризованы следующим зависимостями:

1) $R = a$, $x^2 + y^2 \neq \text{const}$, т. е. уравнение, выражающее контур профиля не совпадает с уравнением окружности (рис. 1, а);

2) $x^2 + y^2 = R^2 = \text{const}$, т.е. линия 2 (рис. 1, а, б) является частью окружности, описанной около профиля начальной фигуры сечения, и может быть выражена формулой окружности, при этом радиус описанной окружности будет выражаться известными формулами: $R = \frac{a}{2} \cdot \cos \varphi = \frac{a}{2} \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{a}{\sqrt{3}}$ (рис. 1, а); $R = \frac{a}{\sqrt{2}}$ (рис. 1, б);

3) $r = \frac{a}{2}$, т. е. точка центра формообразующего радиуса r лежит на середине стороны начальной фигуры сечения.

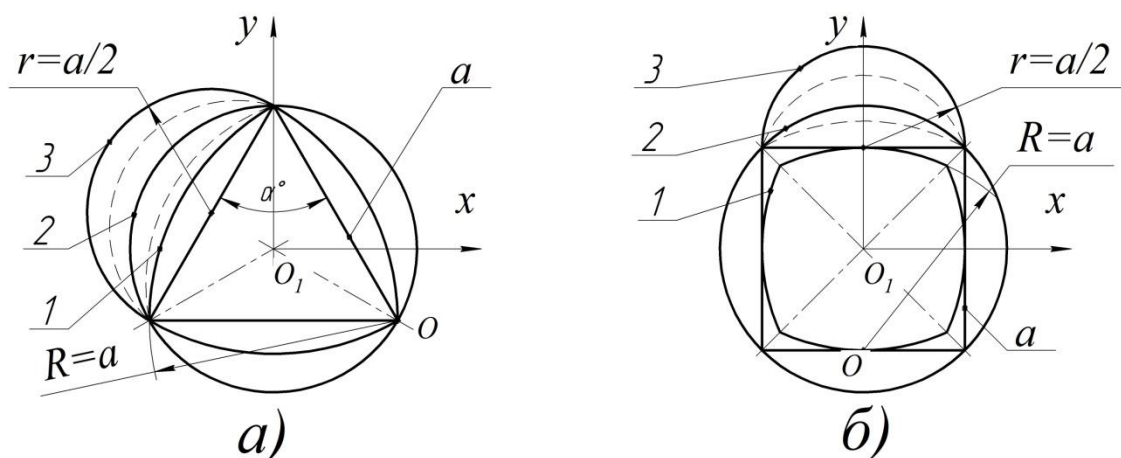


Рис. 1. Системы фигур, создаваемые на основе криволинейной геометрии для случая:
 a – равностороннего треугольника; b – квадрата

Найдены оптимальные конструкции профильных соединений, отвечающие простоте изготовления и контроля, определены основные геометрические параметры, однозначно определяющие их типоразмер, позволяющие систематизировать и упростить схему контроля и процесса изготовления. Дана характеристика исследуемого типа соединения, получившего название профильное соединение на основе контура двух диаметров.

Показано, что наиболее перспективным и универсальным с точки зрения обработки как наружных, так и внутренних элементов профильных соединений является обработка долблением за счет имеющегося обширного станочного парка, эксплуатируемого в отечественном машиностроении. Рассматриваются основные преимущества долбежного оборудования.

Во второй главе разработаны способы обработки профильной части втулки и вала, основанные на различных схемах съема припуска. Отмечаются основные, принципиальная схема которых применяется в дальнейшем, при обработке по генераторной (рис. 2, а) и пропорциональной схеме съема припуска (рис. 2, б) для обработки валов. Выбран способ обработки профиля втулочной части соединения по генераторной схеме работы. Формулируются основные преимущества и недостатки каждого способа, определен оптимальный, сделаны соответствующие выводы.

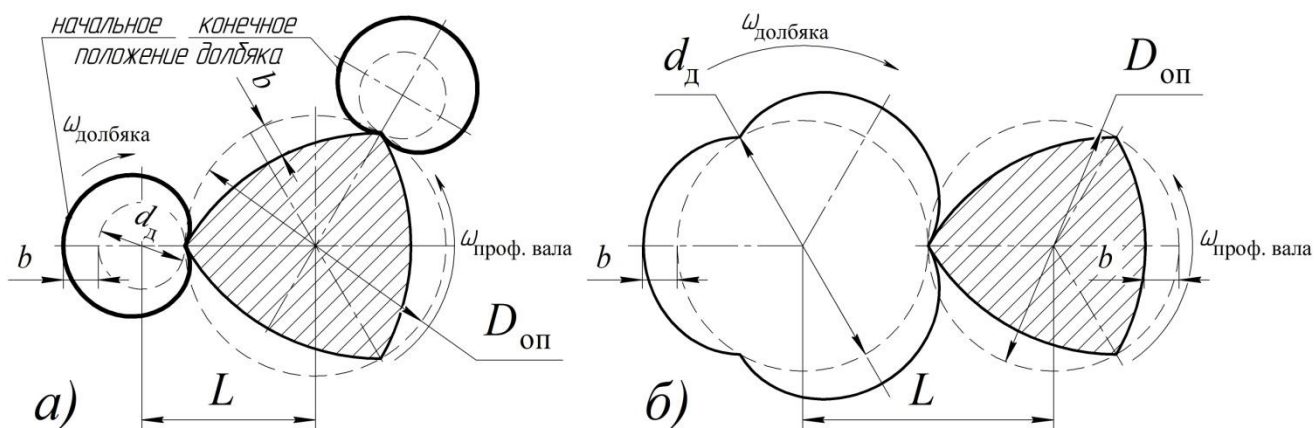


Рис. 2. Способ обработки профильного вала: a – сегментным долбяком по генераторной схеме съема припуска; b – по пропорциональной схеме съема припуска

Разработан способ проектирования режущей кромки долбяка в исходном сечении (рис. 3).

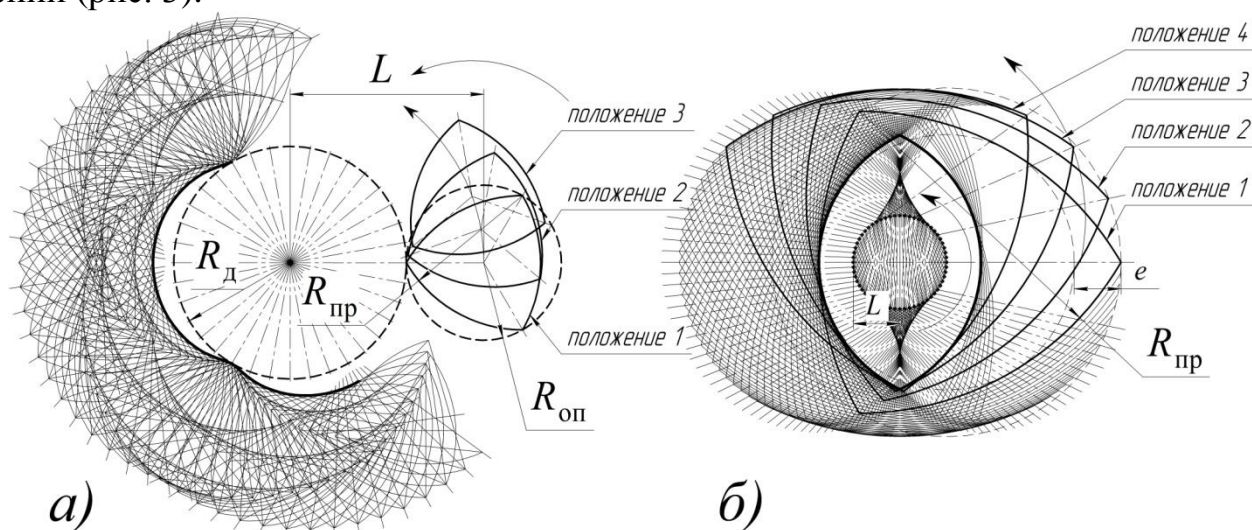


Рис. 3. Схема построения профиля долбяка для обработки: а – вала; б – втулки

Определены основные параметры, необходимые для проектирования: $R_{оп}$ – радиус, описанный около профиля; R_d – радиус, вписанный в контур проектируемого долбяка; $R_{вп}$ – радиус, вписанный в контур профиля; e – величина разности между радиусами описанной окружности $R_{оп}$ и вписанной $R_{вп}$. Контакт радиусов R_d и $R_{оп}$, лежащих на одной оси, характеризует межосевое расстояние L проектирования и дальнейшей обработки элементов вала профильного соединения. Радиусы $R_{пр}$ и $R_{оп}$ характеризуют размерность профильного соединения на основе контура двух диаметров. Контакт радиусов R_d и $R_{вп}$, лежащих на одной оси, характеризует межосевое расстояние L проектирования и дальнейшей обработки элементов втулки профильного соединения ($L \geq e$).

В третьей главе осуществляется разработка возможных вариантов создания модели долбежного инструмента на основе способов обработки, приведенных во второй главе, и способов их заточки. Исходя из эксплуатационных возможностей производства принимаются оптимальные параметры режущей части. Определено влияние переменных углов заточки на искажение конечного контура, доказана их эффективность, принимается условие осуществления переточки долбяка по передней поверхности, в условиях эксплуатирующего производства, из центра. Сформулированы конструкторские и технологические ограничения, которые необходимо учитывать при проектировании и оптимизации параметров инструмента. Дана схема технологических операций долбления профильного вала и втулки.

Определено, что в результате заточки из центра возникает искажение проекции режущей кромки на основную плоскость по отношению к расчетному контуру в исходном сечении (рис. 4, а). С целью определения качественных показателей обработанной поверхности, таких как шероховатость поверхности, необходимо знать длину режущей кромки и радиус ее образующий, а также выполнить настройку станка на определенные параметры обработки. Показатели коэффици-

ента использования материала (КИМ) при этом влияют на стоимость инструмента, которым производится обработка.

Для случая прямого проектирования необходимо определить первоначальную окружность обката, которая будет являться вписанной в профильный долбяк. Ввиду сложности определения и задания модели линии, образующей режущую кромку, выделим способы аппроксимации сложнопрофильных кривых отрезками прямой, параболой и сектором окружности определенного радиуса.

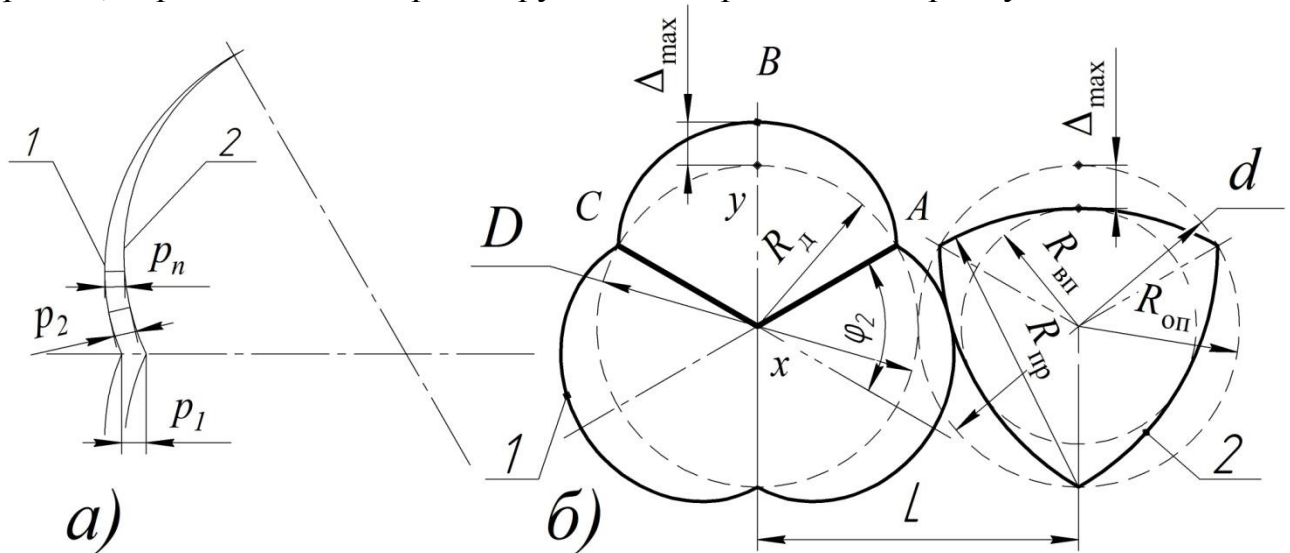


Рис. 4. Схема определения параметров долбяка и профиля в зацеплении: *a* – проекции 1 режущей кромки в исходном сечении и режущей кромки заточенного долбяка 2 на основную плоскость: p_1, p_2, p_n – значения отклонений контура в соответствующих точках; *б* – R_d – радиус вписанной (обкаточной) окружности долбяка; Δ_{\max} – расстояние от вписанной в долбяк окружности до максимально удаленной от его геометрического центра точки (половина разницы между диаметрами вписанной и описанной окружности)

Для определения начальных параметров воспользуемся следующими формулами. Из известного условия соотношения длин сторон равностороннего треугольника к радиусу описанной около него окружности запишем (рис. 4, б):

$$R_{\text{пр}} = R_{\text{оп}} \cdot \sqrt{3}, \quad (1)$$

где $R_{\text{пр}}$ – радиус, образующий стороны сечения профильного вала (втулки); $R_{\text{оп}}$ – радиус, описанный около профильного вала (втулки).

Радиус вписанной в профильный вал (втулку) окружности определим из формулы:

$$R_{\text{вп}} = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right) \cdot R_{\text{оп}} \cdot \sqrt{3} = R_{\text{оп}} \cdot (\sqrt{3} - 1). \quad (2)$$

Определим координаты в полярной системе для точки С: $x_1 = R_d \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot N}\right)$; $y_1 = R_d \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot N}\right)$; для точки В: $x_2 = 0$; $y_2 = (R_d + \Delta)$; для точки А: $x_3 = -R_d \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2 \cdot N}\right)$; $y_3 = R_d \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot N}\right)$, где N – число граней профильной части детали.

Запишем продифференцированное уравнение параболы $g(x) = 2ax + b$.

Для случая аппроксимации параболой имеем следующее уравнение аппрок-

симации режущей кромки по трем ее точкам:

$$L_{\text{пар}} = \int_{x_1}^{x_3} \sqrt{1 + (p'(x))^2} dx. \quad (3)$$

Для случая аппроксимации линии режущей кромки долбяка окружностью, определяемой по трем точкам, получим следующее уравнение для дуги окружности:

$$L_{\text{окр}} = \int_{x_1}^{x_3} \sqrt{1 + (c'(x))^2} dx. \quad (4)$$

На основе сравнительного анализа результирующих значений в сравнении с истинным для пяти различных типоразмеров долбяка отобразим зависимости в виде графиков функций (рис. 5).

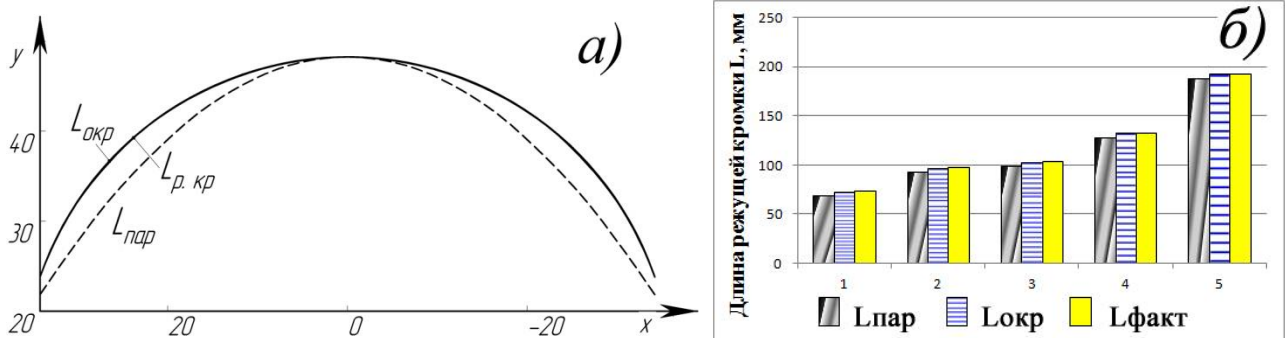


Рис. 5. График аппроксимации режущей кромки долбяка по трем функциям (а) и сравнение значений расчетной и фактической длин режущей кромки профильного долбяка (б)

Из графика, приведенного на рис. 5, а, наглядно видно, что значения длины режущей кромки, рассчитанные по формуле аппроксимации режущей кромки окружностью, наиболее приближены к истинным значениям и не расходятся с ними более чем на 0,85%, следовательно, ее следует принять для использования при расчете начальных параметров проектирования профильных долбяков.

При аппроксимации режущей кромки окружностью форму задней поверхности можно представить в виде конусной поверхности. Режущая кромка будет определяться из условия пересечения конусной части задней поверхности плоскостью торца шлифовального круга (рис. 6). Для описания формы задней поверхности найдем уравнение конуса.

Уравнение конусной части запишем в виде

$$z(x_k, y_k) = \sqrt{x_k^2 + y_k^2} \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{R_c}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (5)$$

где x_k и y_k – абсцисса и ордината конусной части относительно оси z .

На основании приведенных схем составим уравнение секущей плоскости, проходящей по передней поверхности и совпадающей с торцом шлифовального круга:

$$z(x_{\text{пл}}; y_{\text{пл}}) = -\operatorname{tg} \gamma \cdot y_{\text{пл}} + \operatorname{tg} \gamma (R_d + \Delta_{\text{max}}) = \operatorname{tg} \gamma (R_d + \Delta_{\text{max}} - y_{\text{пл}}), \quad (6)$$

где $x_{\text{пл}}$ и $y_{\text{пл}}$ – абсцисса и ордината плоскости относительно оси z .

Приравняв уравнения (5) и (6), получим:

$$\sqrt{x^2 + y^2} \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{R_c}{\operatorname{tg} \alpha} = \operatorname{tg} \gamma (R_d + \Delta_{\max} - y). \quad (7)$$

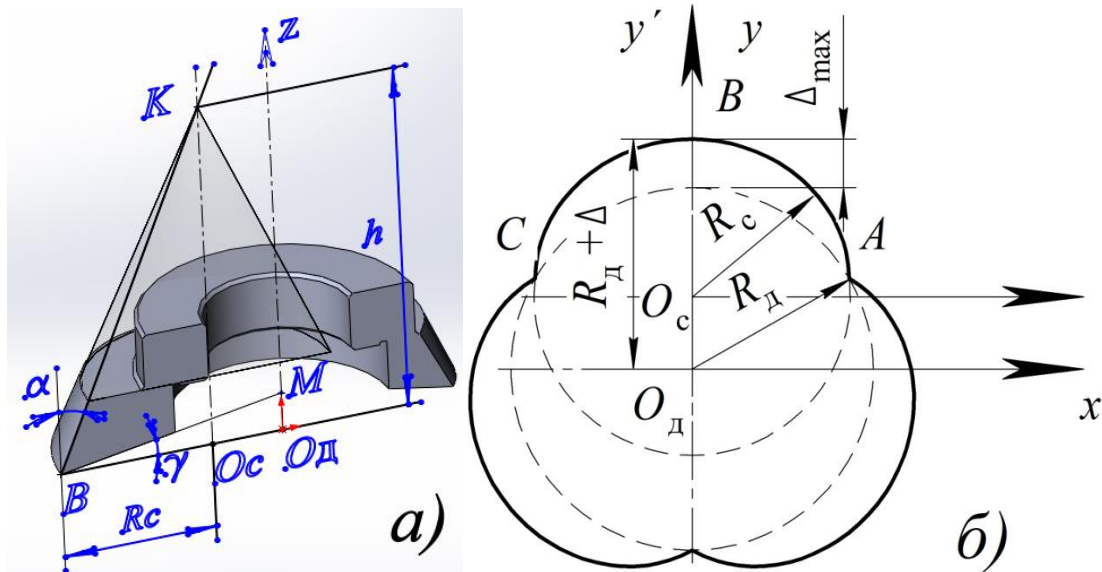


Рис. 6. Параметризация контура режущей части: *a* – сечение конусной части через геометрический центр долбяка: α – задний угол заточки долбяка; γ – передний угол; O_d – геометрический центр долбяка (начало координат); O_c – центр конусной части сектора режущей кромки долбяка; h – высота конусной части; K – вершина конусной части; B – точка наибольшего удаления режущей кромки от геометрического центра долбяка (точка с «нулевой» погрешностью); R_c – радиус аппроксимационной окружности режущей кромки в исходном сечении; *б* – схема задания режущей кромки в исходном сечении: R_d – радиус вписанной (обкаточной) окружности долбяка; Δ_{\max} – расстояние от вписанной в долбяк окружности до максимально удаленной от его геометрического центра точки (половина разницы между вписанной и описанной окружностями)

Получить функцию эллипса можно в среде вычислений Mathcad. Подставив конкретные значения, например: $R_d = 40,7$; $R_c = 36,16$; $\alpha = 8^\circ$; $\gamma = 5^\circ$, получим следующую формулу:

$$y = 0,434 - 4 \cdot 10^{-9} \cdot \sqrt{4,470 - 3,595 \cdot x^2}. \quad (8)$$

В четвертой главе на основе статистического анализа результатов планируемых экспериментов выведена математическая зависимость в виде системы уравнений, отражающая зависимость погрешности исходного профиля по сравнению с «идеальным» в зависимости от типоразмера долбяка и углов заточки. Система уравнений состоит из зависимостей, имеющих ограничение по области определения погрешности относительно контура долбяка. Теоретически определено, что число уравнений должно быть кратно количеству секторов 10° , приходящихся на одну грань, зависящей соответственно от общего числа режущих кромок n инструмента. Однако, исходя из условий возможности замеров и вероятности ошибки, число таких секторов может сократиться ввиду объединения части секторов по градусной мере, допустимой к рассмотрению из условия возможности замеров. Так, например, для профильного долбяка с тремя режущими кромками в интервале $50^\circ \dots 60^\circ$, при значениях углов заточки долбяка по передней и задней поверхности до 2° , значение отклонения Δ выходит за пределы значения $0,0001$ мм. То-

гда из условия, что максимально допустимое значение угла секущей плоскости принимаем $\varphi=53,3^\circ$, получим систему из 5 уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_1 = 2,7183^{-10,7107} \cdot \alpha^{1,0048+0,011\ln\gamma} \cdot \gamma^{1,0037} \cdot \varphi^{-0,1646+0,0021\ln\varphi} \cdot D^{1,0012}, \quad 0^\circ \leq \varphi \leq 10^\circ; \\ p_2 = 2,7183^{-9,6143} \cdot \alpha^{1,0313+0,0165\ln\gamma-0,0137\ln\varphi} \cdot \gamma^{0,9936} \cdot \varphi^{-0,648} \cdot D^{1,0098}, \quad 10^\circ < \varphi \leq 20^\circ; \\ p_3 = 2,7183^{-7,1757} \cdot \alpha^{0,9929+0,0172\ln\gamma} \cdot \gamma^{0,9907} \cdot \varphi^{-1,4481} \cdot D^{0,9994}, \quad 20^\circ < \varphi \leq 30^\circ; \\ p_4 = 2,7183^{-2,2782} \cdot \alpha^{1,0338} \cdot \gamma^{1,0221} \cdot \varphi^{-2,8752} \cdot D^{0,9719}, \quad 30^\circ < \varphi \leq 40^\circ; \\ p_5 = 2,7183^{15,7771} \cdot \alpha^{0,9944} \cdot \gamma^{0,9915} \cdot \varphi^{-7,5658} \cdot D^{0,8243}, \quad 40^\circ < \varphi \leq 60^\circ. \end{array} \right. , (9)$$

где $p_1 \dots p_5$ – значения отклонения режущей кромки долбяка от расчетной для соответствующих углов φ ее измерения; φ – угол поворота секущей плоскости относительно начального, выбранного для отсчета положения, в которой осуществляется замер погрешности; D – диаметр образующей стороны профиля окружности, $D = 2 \cdot R_{\text{пр}}$.

Точность замеров обеспечивается трехмерными моделями инструмента, выполненными в рабочих средах Компас-3D V10 и SolidWorks 2010 с точностью 0,000001 мм. Точность результатов математической зависимости 0,0003 мм.

Расчеты возможно осуществлять в автоматическом режиме, благодаря чему сокращается конструкторское время на проектирование.

В машиностроении большинство операций относятся к операциям технологической подготовки и наладки процессов механической обработки, обеспечивающих получение заданных показателей технологии, математическими моделями которых, как правило, являются степенные функции, отражающие влияние на результаты обработки многих переменных факторов. В области машиностроения такие зависимости могут распространяться на операции механической обработки: точение, сверление, шлифование, долбление, протягивание и др.

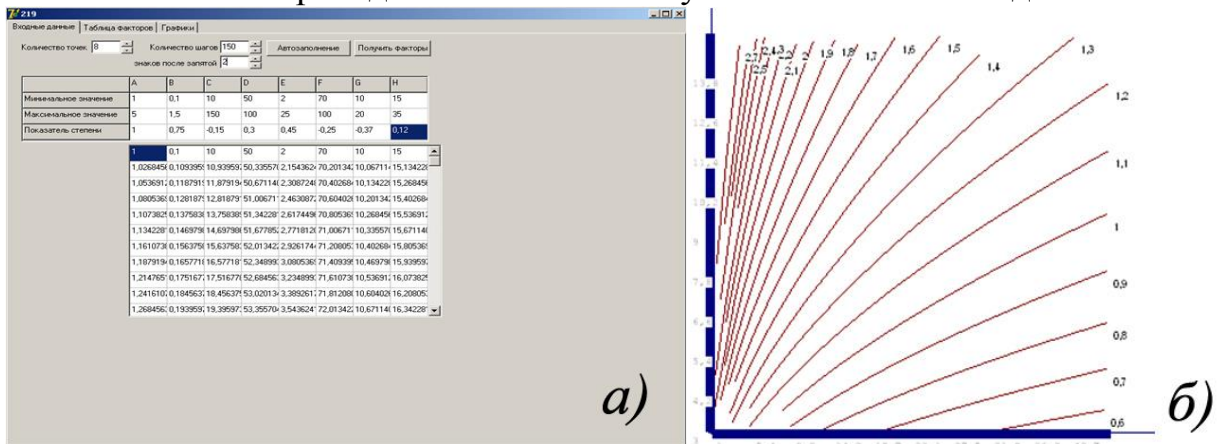
Осуществлено описание алгоритма работы и реализации программ для ЭВМ, выполняющих, исходя из исходных параметрических значений, графическое отображение зависимостей параметров проектирования долбяка и построение профиля в исходном сечении, с учетом всех возможных условий подрезания и наложения контуров. Данное представление дает возможность наиболее эффективно использовать инженерное время на выполнение расчетной части, сокращая период проектирования исходного контура к минимуму и позволяя, не прибегая к громоздким вычислениям, иметь представление о возможных вариантах исполнения инструмента.

На основе проведенных исследований выполнена программа на ЭВМ (рис. 7), позволяющая, исходя из начальных параметров проектирования, задаваемых оператором, определять погрешности исходного контура в любой точке проекции режущей кромки на основную плоскость в виде графической зависимости определения параметров процесса, задаваемого степенной функцией, разбитой на парные сомножества каждого из параметров:

$$x = 2,7183 \cdot \alpha^{g/g'} \cdot \gamma^{y/y'} \cdot \varphi^{n/n'} \cdot R_{\text{пр}}^{k/k'} \cdot \alpha^{g/g''} \cdot \gamma^{y/y''} \cdot \varphi^{n/n''} \cdot R_{\text{пр}}^{k/k''},$$

где g, y, n, k – числитель показателя степени; $g'', y'', n'', k'', g', y', n', k'$ – знаменатель показателя степени, определяемый как половина значения числителя.

Полученные значения возможно использовать для задания изначального корректирующего искажения инструмента с целью получения в процессе обработки годной детали. На основе известных типов профильных соединений и возможности более точного расчета начальных параметров межосевого расстояния, типоразмера и углов заточки проектирования долбежного инструмента для их обработки с ранее неизвестной совокупностью признаков становится возможным более качественный переход к использованию указанных типов соединений.



исходном сечении с учетом накладываемых в процессе его изготовления углов заточки. Рассмотрены технологическое оборудование, схема его настройки на требуемые параметры обработки, контрольно-измерительные средства, необходимые для контроля инструмента и обработанной детали.

Изготовлены образцы инструмента и выполнена обработка пробной партии деталей. Проведен ряд экспериментов (рис. 8), результаты которых подтвердили полученные ранее математические зависимости.

В заключении показана актуальность применения в современном отечественном машиностроении профильных соединений, в частности построенных на базе контура двух диаметров. Доказана технологичность изготовления деталей валов и втулок с применением указанного соединения на базе долбежного оборудования. Исходя из анализа полученных экспериментальных данных, можно говорить о справедливости полученных математических зависимостей. Применение изложенной теории позволяет определять с достаточной точностью контур режущей кромки долбежного инструмента для обработки элементов деталей профильных соединений на базе контура двух диаметров.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Анализ способов обработки показал, что совмещение движений резания и профилирования одновременно с частичным перенесением функций кинематики формообразования станка на инструмент позволяет упростить кинематические схемы обработки элементов деталей профильных соединений, снижает время операции и обеспечивает низкую ее себестоимость при использовании универсального оборудования.

2. Способ проектирования исходного сечения долбежного инструмента, основанный на движении контура обрабатываемого профиля относительно фиксированного начального положения точки обката, с выполняемой корректировкой при каждом последовательном смещении инструмента, используемый для применения в среде автоматизированного проектирования на ЭВМ, позволяет сократить конструкторское время, необходимое для расчета образующей линии исходного сечения инструмента.

3. Анализ способов аппроксимации траектории режущей кромки и конструктивное исполнение инструмента для обработки профильных соединений, построенных на базе контура двух диаметров, показал, что дуга окружности наиболее полно характеризует номинальную режущую кромку в исходном сечении инструмента. Это позволило получить математическое уравнение профиля инструмента при наложении углов заточки, позволившее создать автоматизированную систему для получения скорректированного контура долбяка, с учетом последующей заточки, обеспечивая снижение погрешности формы получаемого изделия.

4. Анализ и синтез схем съема припуска при обработке резанием долбяками позволил сформулировать две основные концепции их проектирования, заключающиеся в изменении числа режущих кромок на рабочей поверхности от одной кромки (генераторная схема резания) до количества, равного или кратного количеству граней на криволинейной поверхности (пропорциональная схема ре-

зания). Установлено, что обработка долбяками, созданными на основе пропорциональной схемы съема припуска, обеспечивает максимальное время стойкости инструмента, а генераторная схема обеспечивает единство обрабатываемой базы для всех сторон обрабатываемого соединения и возможность вести обработку больших размеров соединения по сравнению с пропорциональным способом, при сохранении меньших габаритов инструмента и, соответственно, с меньшим коэффициентом использования материала инструмента. Для обработки профильной части втулки наиболее целесообразно применение долбяка с двумя режущими кромками, который обеспечивает полное формирование обрабатываемого контура.

5. Разработан способ определения оптимальных показателей технологической системы параметров долбяков методом графического определения параметров степенных моделей, позволяющий повысить наглядность изменения исходных величин отклонения профиля в связи с изменением каждого из параметров типоразмера и углов заточки, тем самым снизить объем расчетов, ускорив выбор оптимальных технологических показателей из интервала имеющихся значений.

6. Экспериментально получены математические зависимости параметров долбежного инструмента, выражения погрешности формообразующей линии режущей части долбяка в зависимости от типоразмера и углов заточки для обработки профильных соединений на основе контура двух диаметров. Экспериментальные данные подтвердили верность полученных ранее теоретических зависимостей.

7. Результаты апробации способов изготовления долбежного инструмента для обработки профильных поверхностей показали целесообразность формирования их задней поверхности на проволочных электроискровых станках с ЧПУ в условиях инструментального производства, а передней поверхности – по методу заточки из центра с целью обеспечения возможности переточки в условиях машиностроительных производств.

8. Результаты работы прошли промышленное испытание на заводе Курское ОАО «Прибор», приняты к внедрению в ООО «Комплект»; материалы диссертации используются в научно-исследовательской работе научно-образовательного центра «Управление технико-экономическими системами» Ульяновского государственного технического университета, в учебном процессе кафедры «Машиностроительные технологии и оборудование» Юго-Западного государственного университета, при изучении дисциплин «Процессы формообразования и инструментальная техника» и «Детали машин и основы конструирования».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

**Научные работы, опубликованные в рецензируемых научных журналах,
входящих в перечень рецензируемых научных периодических изданий**

1. Анализ погрешности формы профильного вала при обработке фасонным долбяком [Текст] / А.И. Барботько, П.А. Понкратов, М.С. Разумов [и др.] // Изве-

ствия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. – 2012. – №2, ч. 1. – С. 54–57.

2. Графический метод определения параметров технологического процесса заданного степенной функцией [Текст] / А.И. Барботько, М.С. Разумов, П.А. Понкратов [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия Техника и технологии. – 2012. – №2, – ч.3. – С. 64–67.

3. Автоматизированная система для реализации графического решения степенных функций [Текст] / А.И. Барботько, М.С. Разумов, П.А. Понкратов [и др.] // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2013. – №1 (46). – С. 90–94.

4. Проектирование профиля долбежного инструмента для формирования профильных отверстий [Электронный ресурс] / П.А. Понкратов, А.И. Барботько, М.С. Разумов [и др.] // Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. – 2013. – №5. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru>.

Научные работы, опубликованные в других изданиях

5. Понкратов, П.А. Проектирование долбяка для формообразования фасонных поверхностей на примере правильного шестигранника [Текст] / П.А. Понкратов, М.С. Разумов // Техника и технологии: Пути инновационного развития: материалы Международной научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2011. – С. 103–107.

6. Понкратов, П.А. Автоматизированное проектирование профиля инструмента для формообразования деталей по методу обката [Текст] / П.А. Понкратов, М.С. Разумов // Современные автомобильные материалы и технологии: материалы III Международной научно-технической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2011. – С. 113–117.

7. Барботько, А.И. Анализ методов формообразования элементов профильных соединений [Текст] / А.И. Барботько, П.А. Понкратов // Современные материалы, техника и технология: материалы Международной практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2011. – С. 271–274.

8. Барботько, А.И. Особенности изготовления долбежного инструмента для обработки профильных соединений [Текст] / А.И. Барботько, П.А. Понкратов, М.С. Разумов // Техника и технологии: Пути инновационного развития: материалы 2-й Международной научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2012. – С. 36–39.

9. Понкратов, П.А. Технология обработки профильных валов чашечными долбяками [Текст] / П.А. Понкратов, А.И. Барботько, М.С. Разумов // Технические науки – от теории к практике: XVII Международная заочная научно-практическая конференция. – Новосибирск: СибАК, 2013. – ч.1. – С. 75–79.

10. Барботько, А.И. Метод генераторной обработки профильных валов долбяками [Текст] / А.И. Барботько, П.А. Понкратов, М.С. Разумов // Машиностроение – основа технологического развития России (ТМ-2013): материалы V Международной научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2013. – С. 440–442.

11. Понкратов, П.А. Определение длины режущей кромки долбежного инструмента геометрическим способом при определении параметров в начальном сечении [Электронный ресурс] / П.А. Понкратов // Research Journal of International Studies: материалы XVII заочной научной конференции. – 2013. – №7 (14), ч.2. – С. 67–69. – Режим доступа: <http://research-journal.org>.

12. Барботько, А.И. Микрометр для измерения радиальных размеров профильных долбяков [Текст] / А.И. Барботько, П.А. Понкратов, М.С. Разумов // Интеграция науки и практики как условие экономического роста: материалы IV Международной научно-практической конференции. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – С. 6–9.

13. Понкратов, П.А. Технологическая разработка инструментальных систем обработки некруглых поверхностей двух диаметров [Текст] / П.А. Понкратов, А.И. Барботько, М.С. Разумов // Материалы работ победителей и лауреатов конкурса. – СПб.: Из-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 14–16.

14. Аспекты контроля профильных соединений на базе треугольника Рело [Текст] / А.И. Барботько, П.А. Понкратов, М.С. Разумов [и др.] // Сборник научных трудов SWorld. – Вып. 2. – Т. 4. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2013. – С. 92–94.

15. Понкратов, П.А. Проектирование системы долбежных инструментов для обработки профильных поверхностей, сформированных на основе криволинейной геометрии [Текст] / П.А. Понкратов // Будущее машиностроения России: материалы VI Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – С. 20–21.

16. Понкратов, П.А. Определение стоимости изготовления деталей профильного соединения при использовании различных технологических процессов [Текст] / П.А. Понкратов, М.С. Разумов, А.О. Гладышкин // Безопасность и проектирование конструкций в машиностроении и строительстве: материалы Международной научно-практической конференции / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2013. – С. 360–364.

Авторские свидетельства и патенты

17. Пат. 102719 Российская Федерация, МПК⁷ F 16 D 1/06. Бесшпоночное некруглое соединение вал-ступица с натягом [Текст] / Разумов М.С., Барботько А.И., Понкратов П.А. [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное общеобразовательное учреждение высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет». – № 2010143828/11; заявл. 26.10.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. №7. – 4 с.: ил.

18. Пат. 113348 Российская Федерация, МПК⁷ G 01 B 3/18. Микрометр с базированием по отверстию [Текст] / Барботько А.И., Разумов М.С., Понкратов П.А. [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное общеобразовательное учреждение высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет». – № 2011141101/28; заявл. 10.10.2011; опубл. 10.02.2012, Бюл. №4. – 4 с.: ил.

19. Пат. 2463129 Российская Федерация, МПК⁷ B 23 B 5/44. Способ обработки профильного вала со сторонами равной ширины [Текст] / Барботько А.И., Понкратов П.А., Разумов М.С.; заявитель и патентообладатель Федеральное госу-

дарственное общеобразовательное учреждение высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет». – № 2011110843/02; заяв. 22.03.2011; опубл. 10.10.2012, Бюл. №28. – 5 с.: ил.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012618887. Обратное проектирование рабочей части профильных долбяков [Текст] / Барботько А.И., Разумов М.С., Понкратов П.А. [и др.]; заявл. 03.08.2012; зарег. 02.10.2012.

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013611073. Программа для решения степенных функций графическим методом [Текст] / Барботько А.И., Разумов М.С., Понкратов П.А. [и др.]; заявл. 06.12.2012; зарег. 09.01.2013.

22. Пат. 2488466 Российская Федерация, МПК⁷ В 23 D 3/00, В 23 D 13/00. Способ графического проектирования долбяков для обработки профильных валов [Текст] / Барботько А.И., Понкратов П.А., Разумов М.С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное общеобразовательное учреждение высшего профессионального образования «Юго-Западный государственный университет» - № 2011142677/02; заявл. 21.10.2011; опубл. 27.04.2013, Бюл. №21. – 7 с.: ил.

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013617137. Программа для определения рационального количества граней профильных моментопередающих соединений [Текст] / Быковская Н.Е., Гладышкин А.О., Понкратов П.А. [и др.]; заявл. 06.06.2013; зарег. 01.08.2013.

Подписано в печать 20.11.2013 г. Формат 60x84 1/16. Печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ ____.

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, д. 94.

Отпечатано в ЮЗГУ