

*На правах рукописи*



**Рахметов Станислав Львович**

**РАСШИРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОЦЕССА  
ШЕВИНГОВАНИЯ-ПРИКАТЫВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЕС  
С КРУГОВЫМИ ЗУБЬЯМИ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тула – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук  
Сидоркин Андрей Викторович

Официальные оппоненты: Козлов Александр Михайлович,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный  
технический университет», заведующий  
кафедрой  
Канатников Никита Владимирович,  
кандидат технических наук,  
ФГБОУ ВО «Орловский государствен-  
ный университет им. И.С Тургенева»,  
доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Брянский государственный  
университет»

Защита диссертации состоится «24» марта 2020 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92, 9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте:  
[http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/Rakhmetov\\_SL/](http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/Rakhmetov_SL/)

Автореферат разослан «21» января 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Черняев Алексей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Перспективным направлением повышения эффективности технологий производства цилиндрических колес с круговыми зубьями (ЦККЗ) является комбинированная (режущо-деформирующая) чистовая зубообработка их венцов, предварительно формообразованных высокопроизводительными методами (например: горячим накатыванием, зубофрезерованием двусторонними режцовыми головками), шевингованием-прикатыванием. При этом, несмотря на достаточно широкую научную проработку аспектов совершенствования рассматриваемого процесса, из поля зрения исследователей выпал такой вопрос, как определение взаимосвязи основных конструктивных параметров ЦККЗ, в частности, радиуса кривизны арки кругового зуба, уменьшение которого, при фиксированной ширине зубчатого венца, приводит к росту коэффициента перекрытия в передаче, с комплексом конструктивно-технологических ограничений комбинированного инструмента – шевера-прикатника, задействованного для его осуществления.

В связи с вышеизложенным теоретическое обоснование рациональной конструкции комбинированного инструмента, базирующейся на взаимной увязке его основных параметров с конструктивными параметрами обрабатываемого ЦККЗ в процессе шевингования-прикатывания, является **актуальной** задачей.

**Цель работы** – повышение эффективности процесса чистовой зубообработки ЦККЗ за счет расширения технологических возможностей шевингования-прикатывания колес с малым радиусом кривизны арки зуба.

Для достижения указанной цели необходима постановка и решение следующих основных **задач**:

1. Произвести анализ существующих процессов формообразования зубчатых венцов и установить их пригодность для осуществления зубообработки комбинированного инструмента с круговыми зубьями.

2. Определить параметрическую взаимосвязь диаметра шевера-прикатника с диаметром обрабатываемого им ЦККЗ.

3. Разработать математическую модель, с последующей реализацией в виде алгоритма, позволяющую рассчитывать совокупную ширину венца комбинированного инструмента, при варьируемых параметрах стружечной канавки, достаточную для его эффективной и стабильной работы.

4. Раскрыть механизм влияния технологических ограничений, возникающих при изготовлении шевера-прикатника, на радиус кривизны арки его кругового зуба, и разработать математическую модель, направленную на определение основных параметров процесса и инструмента для предварительного формообразования зубчатого венца ЦККЗ.

5. Разработать общие принципы постановки и алгоритмы решения «проверочной» и «проектной» задач при проектировании конструкции и технологии изготовления шевера-прикатника для обработки ЦККЗ.

**Объект исследования** – процесс шевингования-прикатывания ЦККЗ и инструмент для его осуществления.

**Предмет исследования** – взаимосвязь конструктивных параметров комбинированного инструмента, технологических параметров его изготовления с конструктивными параметрами ЦККЗ, обрабатываемого шевингованием-прикатыванием.

**Методы исследования.** Теоретические исследования базируются на основных положениях теории резания, теории проектирования режущих инструментов с использованием методов математического и графического моделирования, теории механизмов и машин, технологии машиностроения. При моделировании использован инструментарий аналитической геометрии и векторной алгебры. Для геометрического моделирования в ходе решения задач была использована САПР «Компас-3D». Компьютерное моделирование производилось в пакете «MathCAD», разработка программного обеспечения осуществлялась в среде «С++ Builder» на языке программирования С++.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** По теме и содержанию работа соответствует специальности 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» в части п. 2 «Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических воздействий.» и п. 4 «Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки» «Области исследований».

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) метод классификации факторов пред- и заплосного станочного зацепления в процессе чистовой зубообработки ЦККЗ шевингованием-прикатыванием на управляемые и ограничивающие;
- 2) методика определения параметрической взаимосвязи диаметра шевера-прикатника с диаметром обрабатываемого им ЦККЗ;
- 3) математическая модель расчета ширины венца шевера-прикатника;
- 4) математические модели, описывающие процессы формообразования круговых зубьев венца комбинированного инструмента, для определения основных геометрических параметров инструментов второго порядка и технологических параметров их работы;
- 5) перспективный способ и инструмент для финишной комбинированной обработки венца шевера-прикатника с круговыми зубьями;
- б) методики и алгоритмы решения «проверочной» и «проектной» задач, направленных на определение минимально допустимого радиуса кривизны арки кругового зуба ЦККЗ, обрабатываемого шевингованием-прикатыванием.

**Научная новизна работы** заключается в раскрытии параметрической взаимосвязи основных геометрических параметров ЦККЗ, комбинированного инструмента для его чистовой зубообработки шевингованием-прикатыванием и инструмента второго порядка, с учетом конструктивно-технологических ограничений, присущих процессу формообразования венца инструмента и его свободного обката в паре с обрабатываемым ЦККЗ.

**Теоретическая значимость** работы заключается в развитии теории проектирования процесса зубообработки ЦККЗ шевингованием-прикатыванием по методу свободного обката при внеполусном станочном зацеплении пары инструмент-заготовка, в частности, установления характера взаимосвязи основных конструктивных (для пар ЦККЗ-ЦККЗ – в рабочем, инструмент-заготовка – в станочном зацеплении) и технологических (для пары инструмент-заготовка) па-

раметров с минимальным радиусом кривизны арки кругового зуба обрабатываемого ЦККЗ.

**Практическая значимость** работы состоит в разработке рекомендаций по построению процесса комбинированной зубообработки ЦККЗ и реализации инструмента для его осуществления, с учетом ряда ограничений, присущих внеплоскостному зацеплению инструмент-заготовка и созданию автоматизированного программно-математического комплекса (ПМК), позволяющего проводить решение двух типов задач: «проверочной» и «проектной». ПМК реализует расчет основных конструктивных параметров инструментов второго порядка и технологических параметров их работы при построении двух альтернативных вариантов маршрутов зубообработки комбинированного инструмента, предусматривающих использование на финишной стадии формообразования его венца перспективного способа комбинированной отделочной зубообработки и инструмента для его реализации.

**Реализация работы.** Полученные в ходе выполнения работы результаты анализа, расчетные методики и ПМК рекомендованы к внедрению при построении технологических процессов выпуска перспективных изделий с зубчатыми передачами, составленными из ЦККЗ, на предприятии ЗАО «Тулаэлектропривод», г. Тула.

Отдельные результаты исследований использованы в учебном процессе при подготовке магистров техники и технологии по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», а также в научно-исследовательских работах студентов, при выполнении курсовых проектов и выпускных квалификационных работ на кафедре «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены на: 54-й и 55-й научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ТулГУ (2018 – 2019 г.г.); заочной национальной научно-технической конференции с международным участием «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» №23 (г. Тула, ТулГУ, 2018 г.); 2-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых (г. Курск, ЮЗГУ, 2018 г.); X Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство» (г. Белгород, БГТУ им. В. Г. Шухова, 2018 г.).

В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном заседании кафедры «Технология машиностроения» Тульского государственного университета.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 работ, в том числе 11 статей в ведущих рецензируемых изданиях из «Перечня ВАК РФ...», суммарным объемом 5,06 печатных листа. Личный вклад автора – 2,93 печатных листа.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 110 наименований. Работа изложена на 144 с. печатного текста, содержит 52 илл., 1 табл. Пять приложений представлены на 49 с. печатного текста.

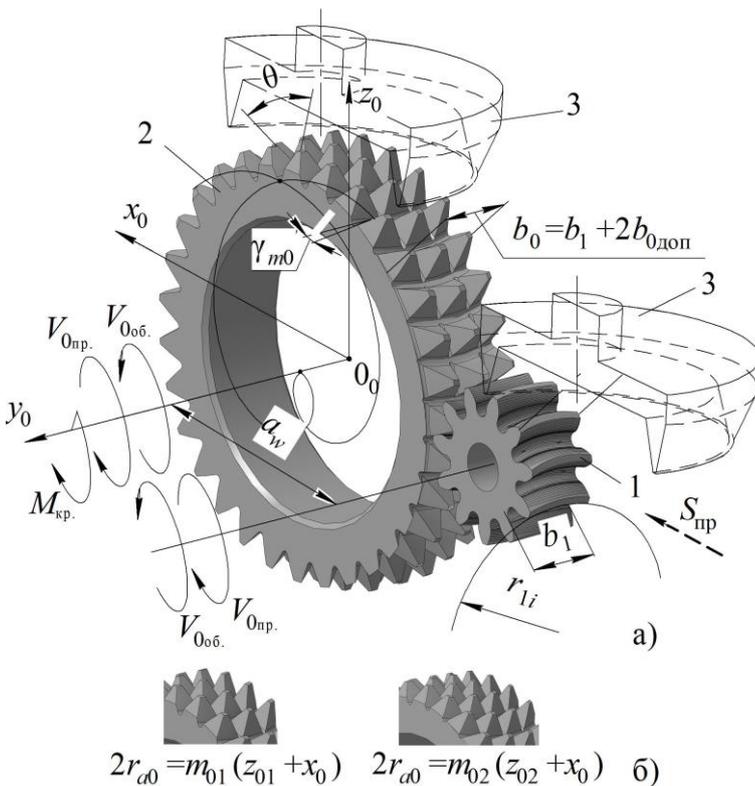
### ***ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ***

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, положения, выносимые на защиту, научная новизна, методы исследований, теоретическая и практическая ценность работы, приводятся данные об апробации работы, публикациях, структуре и объеме.

**В первой главе**, на основании аналитического обзора работ ведущих отечественных: М.Н. Бобкова, И.А. Болотовского, М.И. Догоды, С.Н. Калашникова, И.А. Коганова, Ф.Л. Литвина, М.З. Мильштейна, С.П. Радзевича, Э.В. Ратманова, В.Н. Севрюка, М.Г. Сегалья, А.Е. Склярова, Ю.С. Степанова, А.С. Тарапанова, Н.А. Шахбазова, Г.И. Шевелевой, Г.М. Шейнина и зарубежных: Н. Stadtfeld, V. Simon, L.E. Wilcox ученых, определен широкий спектр процессов формообразования зубчатых венцов, пригодных для осуществления зубообработки комбинированного инструмента с круговыми зубьями в условиях современного инструментального производства, в рамках маршрутной технологической схемы:

А) черновая стадия: формообразование впадины двухсторонней или одно-сторонними резцовыми головками; чистовая – раздельное формообразование впадины односторонними резцовыми головками; отделочная – раздельное формообразование выпуклой и вогнутой сторон зуба (планетарным) шлифованием чашечными кругами;

Б) черновая стадия: формообразование впадины твердосплавной концевой сферической фрезой; чистовая – аналогично; отделочная – аналогично, но с последующей комбинированной обработкой специальным чашечным инструментом.



**Рис. 1. Процесс шевингования-прикатывания ЦККЗ:**  
 а) взаимодействие в станочном зацеплении инструмента и обрабатываемого колеса; формообразование выпуклой стороны кругового зуба инструментом второго порядка; б) возможные варианты реализации зубчатого венца шевера-прикатника для зубообработки ЦККЗ

ческих ограничений, возникающих при его проектировании и изготовлении, изучена недостаточно. В частности, для переднего станочного зацепления, радиус кривизны арки зубьев ЦККЗ 1 вынужденно существенно завышен исходя из условия неподрезания венца шевера-прикатника 2 при его формообразовании торцовым инструментом 3 (рис. 1).

том.

Процесс шевингования-прикатывания нашел широкое отражение в работах Ю.Н. Сухорукова, Р.И. Евстигнеева, Е.Н. Валикова, О.И. Борискина. Для него характерны: процесс резания, сопровождаемый удалением тонких слоев металла с боковых поверхностей зубьев заготовки, а также, процесс прикатывания, возникающий при контакте боковых поверхностей заготовки с зубьями инструмента, имеющих развитую поверхность.

На основании проанализированных работ А.С. Ямникова, А.А. Маликова и их учеников, можно заключить, что взаимосвязь диаметров ЦККЗ 1 и обрабатывающего его комбинированного инструмента 2 (рис. 1), с учетом конструктивных и технологи-

Отсюда возникает необходимость определения диаметра шевера-прикатника и изучение его зависимости от диаметра обрабатываемого колеса во взаимной увязке с минимальным радиусом кривизны арки кругового зуба с учетом обеспечения условия эффективного осуществления внеполюсного станочного зацепления.

Анализ работ Р.Б. Марголита и В.Д. Плахина наглядно иллюстрирует возможность применения концевых твердосплавных сферических фрез, как альтернативу торцовому лезвийному и абразивному инструменту, практически на всех стадиях формообразования венца шевера-прикатника с круговыми зубьями. Однако исследования U. Gaiser, F. Klocke, C. Löpenhaus говорят о том, что, несмотря на достаточную эффективность работы твердосплавных концевых сферических фрез в условиях инструментального производства, добиться высокого качества обработки боковых поверхностей его зубьев без применения чашечного инструмента, как минимум на финишной стадии обработки, становится невозможно.

**Во второй главе** работы исследована параметрическая взаимосвязь диаметра шевера-прикатника  $2r_{a0}$  с диаметром  $2r_{a1}$  обрабатываемого им ЦККЗ. В большинстве случаев, при чистовой стадии зубообработки ЦККЗ, используется шевер-прикатник с диаметром  $2r_{a0}$  большим диаметра  $2r_{a1}$ . Исходя из этого, минимальный радиус кривизны арки зуба ЦККЗ  $r_{i\min}$  определяется конструкцией инструмента, так как  $r_{0e\min} = r_{i\min}$ . Вместе с тем, этот важнейший конструктивный параметр оказывает непосредственное влияние на коэффициент перекрытия  $\varepsilon$  в передаче, составленной из ЦККЗ. При фиксированной ширине венца ЦККЗ  $b_1$  (рис. 1) уменьшение  $r_{0e}$  приводит, по аналогии с шевронными передачами, к существенному увеличению  $\varepsilon$ .

Исследование проводилось на примере зубчатых пар, составленных из ЦККЗ, для модулей  $m=2\dots 5$  мм (с шагом 1 мм) с коэффициентами смещений исходных контуров  $x_1 = -0,95\dots 0,95$  (с шагом 0,25) и числами зубьев  $z_1=11, 15\dots 50$  (с шагом 5).

Разработанная математическая модель и алгоритм расчета (рис. 2), позволяют определить оптимальный диаметр  $2r_{a0}$ , а разработанный программный код и его реализация в виде компьютерного приложения – автоматизировать процесс расчета основных параметров инструмента.

Алгоритм разделен на две ветви: для предполюсного и заполюсного зацеплений. Более детальная проработка позволила выявить для каждого вида зацепления ограничения, которые необходимо обеспечивать за счет введения параметра отклонения  $\Delta_{r_{w1}}$  от начальной окружности станочного зацепления  $r_{w1}$  обрабатываемого колеса и которые позволяют определить возможность существования внеполюсного зацепления при заданном наборе исходных параметров.

Влияние отклонения от начальной окружности станочного зацепления  $\Delta_{r_{w1}}$  (представлено на рис. 3 в долях  $m$ ) можно рассмотреть на примере  $m=2$  мм. Анализ результатов компьютерного моделирования комбинаций пред- и заполюсного станочных зацеплений инструмент-заготовка показал, что для заполюсного зацепления, (рис. 3, а) при уменьшении коэффициента смещения исходного контура обрабатываемого колеса  $x_1$ , высота активного участка профиля зуба шевера-прикатника уменьшается, что ведет к невозможности обработки боковой

поверхности зуба ЦККЗ по всей высоте. С целью восстановления высоты активного участка профиля зуба шевера-прикатника отклонение  $\Delta_{rv1}$  значительно увеличивается, что носит отрицательный характер ввиду изменения скоростей скольжения и перераспределения долей процессов резания и поверхностного пластического деформирования в пользу последнего. Можно заключить, что условия протекания процесса шевингования-прикатывания будут благоприятнее для колес с небольшими коэффициентами смещения исходного контура. Для предположного зацепления (рис. 3, б), снижение числа зубьев обрабатываемого

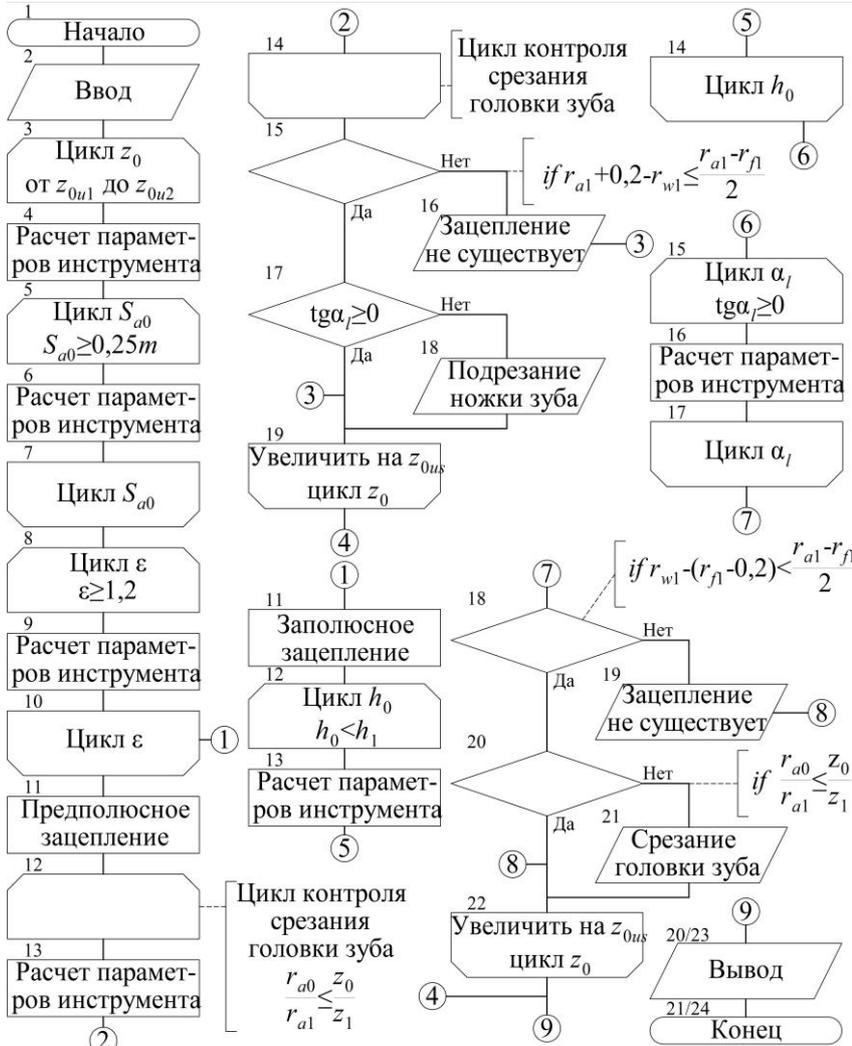


Рис. 2. Блок-схема алгоритма работы программы при расчете станочного зацепления

колеса ведет к уменьшению коэффициента перекрытия в станочном зацеплении (I). А увеличение коэффициента смещения исходного контура  $x_1$  обрабатываемого колеса и рост числа его зубьев  $z_1$  ведет к уменьшению толщины зуба шевера-прикатника на его вершине  $S_{a0}$  (II). Поэтому наблюдается сначала резкое уменьшение, затем плавный рост рассматриваемых параметров.

При значительном уменьшении  $x_1$  и  $z_1$  возникает опасность подрезания ножки зуба обрабатываемого колеса. Поэтому процесс шевингования-прикатывания наиболее эффективен для средних значений чисел зубьев колес и малых коэффициентов смещения исходного контура.

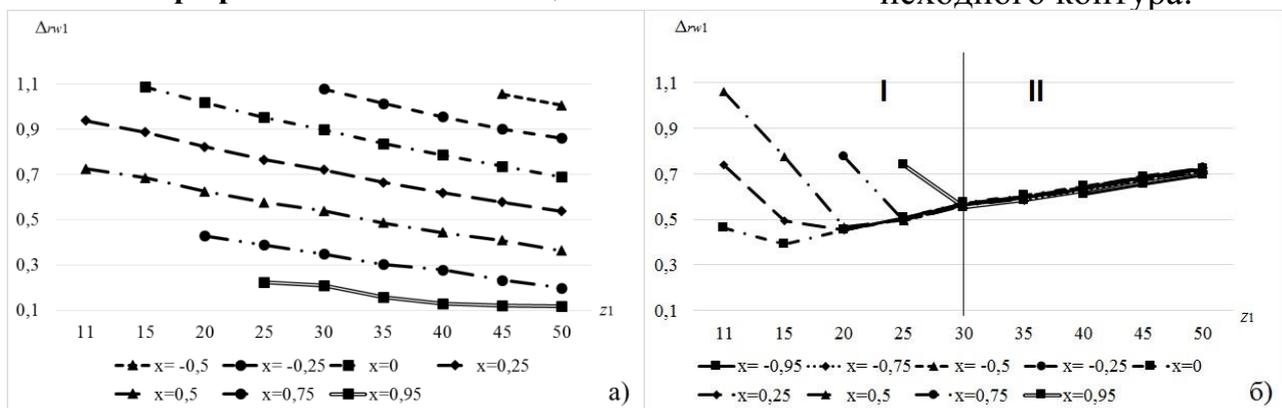


Рис. 3. Отклонение от начальной окружности станочного зацепления для  $m=2$  мм. Исследование показало, что для заплоского и предположного зацеплений,

при заданном коэффициенте смещения исходного контура  $x_1$ , увеличение диаметра  $2r_{a0}$  шевера-прикатника позволяет сместить полюс зацепления за пределы активного участка профиля, что благоприятно влияет на протекание процесса резания при комбинированной зубообработке.

Условия выбора величины  $\Delta_{rw1}$  при достижении желаемого эффекта, определили отношение диаметра шевера-прикатника и обрабатываемого им колеса для гаммы конструктивных вариантов реализации первого. Так, для обоих видов зацеплений, прирост отношения указанных диаметров снижается при увеличении числа зубьев  $z_1$  обрабатываемого ЦККЗ (рис. 4). Для заплосного зацепления (рис. 4, а) значительное отклонение  $\Delta_{rw1}$  при увеличении  $x_1$  приводит к сильному росту габаритного диаметра шевера-прикатника  $2r_{a0}$  и росту отношения диаметров с шагом 9%.

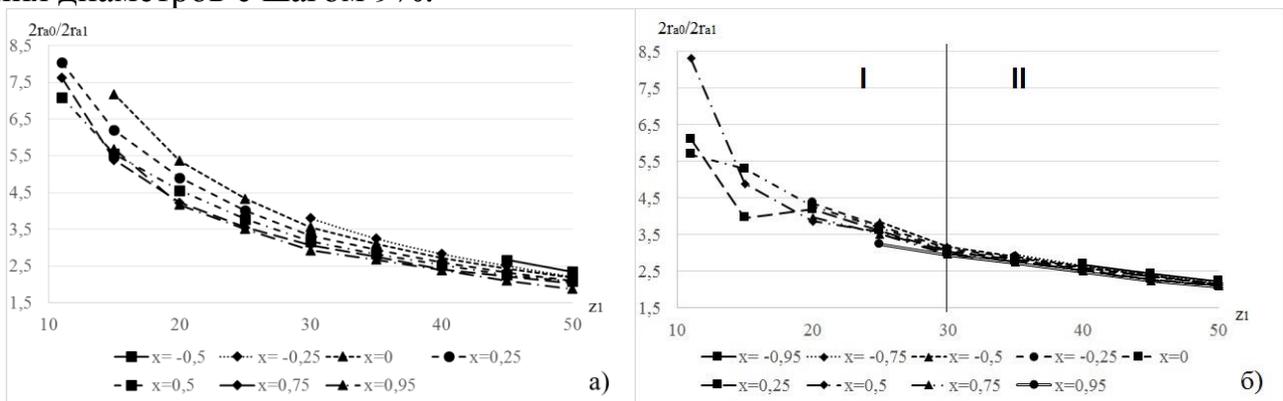


Рис. 4. Отношение диаметров шевера-прикатника и колеса для  $m=2$  мм

Для предполосного зацепления (рис. 4, б) ограничение двух факторов просматривается как некоторое рассеивание отношения диаметров при различных  $x_1$  и  $z_1 < 30$  и сказывающимся влиянии коэффициента перекрытия в станочном зацеплении (I). Для рассматриваемых значений  $x_1$  при  $z_1 > 30$  – сказывается значительное влияние фактора обеспечения толщины зуба шевера-прикатника на окружности вершин на характер рассматриваемого семейства кривых (II).

В третьей главе разработана методика расчета ширины венца шевера-прикатника  $b_0$ , которая должна быть больше, чем у обрабатываемого колеса  $b_1$  (рис. 1). Это необходимо для того, чтобы исключить преждевременные сколы и выкрашивания зубьев инструмента, расположенных ближе к его торцам и обеспечить обработку зубьев ЦККЗ по всей их длине. Запас по ширине  $b_{0\text{доп}}$  с каждой стороны шевера-прикатника задается равным половине толщины его зуба в нормальной плоскости к витку (рис. 5). Методика, получившая развитие в

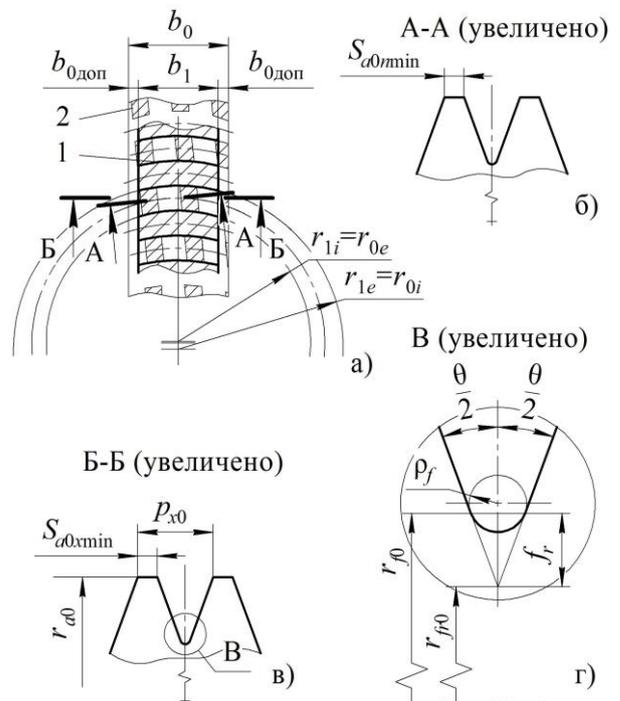


Рис. 5. К расчету геометрических параметров стружечной канавки

виде алгоритма и программно-реализованная, позволяет рассчитывать совокупную ширину комбинированного инструмента  $b_0$  с учетом дополнительной ширины  $b_{0\text{доп}}$ , при варьируемых параметрах стружечной канавки шевера-прикатника, таких как угол наклона боковой поверхности  $\theta/2$  и число заходов  $z_c$ , достаточную для эффективной и стабильной работы инструмента.

$$b_{0\text{доп}} = \frac{0,5p_{x0}\varphi_{0\text{доп}}}{z_c\pi}, \quad (1)$$

где  $p_{x0}$  – осевой шаг винтовой стружечной канавки;  $\varphi_{0\text{доп}}$  – угол поворота, задающий смещение по оси  $0_0x_0$ ,  $\varphi_{0\text{доп}} = \frac{S_{f0x} \cos \gamma_{mf0}\pi}{0,5p_{x0}}$ ;  $S_{f0x}$  – толщина витка

стружечной канавки в нормальной плоскости к нему на окружности впадин  $r_{f0}$ ,  $S_{f0x} = y_{f0xR} - y_{f0xL}$ ;  $\gamma_{ma0}$  – угол между осевой и нормальной плоскостями,

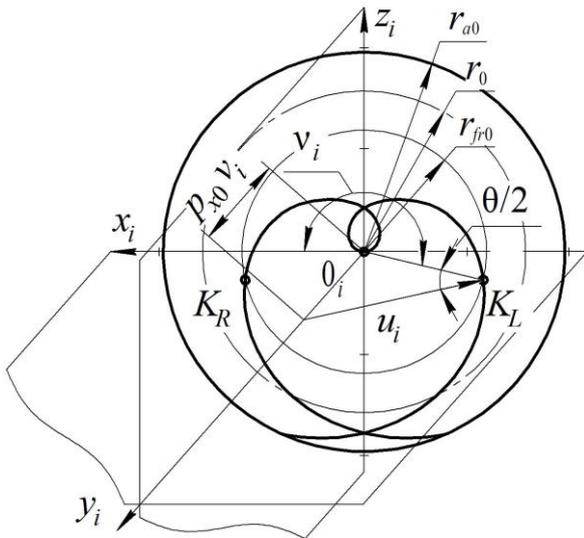
$\gamma_{mf0} = \arcsin\left(\frac{z_c m}{2r_{f0}}\right)$ .

$$\gamma_{mf0} = \arcsin\left(\frac{z_c m}{2r_{f0}}\right).$$

Стружечная канавка шевера-прикатника представляет собой геликоид, боковые поверхности которого образованы вращением архимедовых спиралей вокруг оси с заданным винтовым параметром. Координаты  $y_{f0xR}$ ,  $y_{f0xL}$  определяются из матричного равенства, описывающего правую и левую стороны стружечной канавки, в осевой плоскости:

$$r_{0x}(u_{0x}, v_{0x}) = \begin{vmatrix} x_{0x}(u_{0x}, v_{0x}) \\ y_{0x}(u_{0x}, v_{0x}) \\ z_{0x}(u_{0x}, v_{0x}) \end{vmatrix} = M_\zeta \cdot \begin{vmatrix} x_{f0}(u_{f0}, v_{f0}) \\ y_{f0}(u_{f0}, v_{f0}) \\ z_{f0}(u_{f0}, v_{f0}) \end{vmatrix} \quad (2)$$

Параметры архимедова червяка в торцевом сечении шевера-прикатника в координатной системе  $S_i$  проиллюстрированы на рис. 6. Уравнением (3) выражены координаты точек архимедовых спиралей.



**Рис. 6. Параметры архимедова червяка в торцевом сечении шевера-прикатника**

Блок-схема алгоритма расчета (рис. 7) дополнительной ширины  $b_{0\text{доп}}$  содержит, помимо прочего, условие обеспечения толщины зуба на вершине инст-

$$\left. \begin{aligned} x_i &= \pm u_i \cos(\theta/2) \cos(v_i), \\ y_i &= p_{zx0} v_i - u_i \sin(\theta/2), \\ z_i &= u_i \cos(\theta/2) \sin(v_i). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Преобразование координат при переходе в осевую плоскость  $S_0$  представлено матрицей:

$$M_\zeta = \begin{vmatrix} \cos \zeta_0 & 0 & \sin \zeta_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{\pm 0,5p_{x0}\zeta_0}{\pi} \\ -\sin \zeta_0 & 0 & \cos \zeta_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где  $\zeta_0$  – угловое смещение точек, рассматриваемых в осевой плоскости, по

винтовой линии,  $\zeta_0 = \arctg\left(\frac{z_0}{x_0}\right)$ .

румента  $S_{a0} \geq 0,25m$  и механизм расчета ряда геометрических параметров: толщина витка на окружности вершин  $r_{a0}$  в нормальной плоскости к витку  $S_{a0n}$ , в осевой плоскости –  $S_{a0x}$ .

В результате компьютерного моделирования установлено, что изменение модуля  $m$  в большую сторону ведет к линейному увеличению дополнительной ширины  $b_{0\text{доп}}$ . Изменение шага витка стружечной канавки  $p_{x0}$  оказывает пренебрежительно малый эффект воздействия на  $b_{0\text{доп}}$ . При варьировании угла наклона стружечной канавки  $\theta/2$  от  $10^\circ$  до  $40^\circ$  (с шагом  $10^\circ$ ), результирующий показатель  $b_{0\text{доп}}$  увеличивается соответственно на 5, 8 и 11%.

В четвертой главе разработана математическая модель, позволяющая определять возможность реализации шевера-прикатника с учетом возникающих технологических ограничений, таких как, срезание

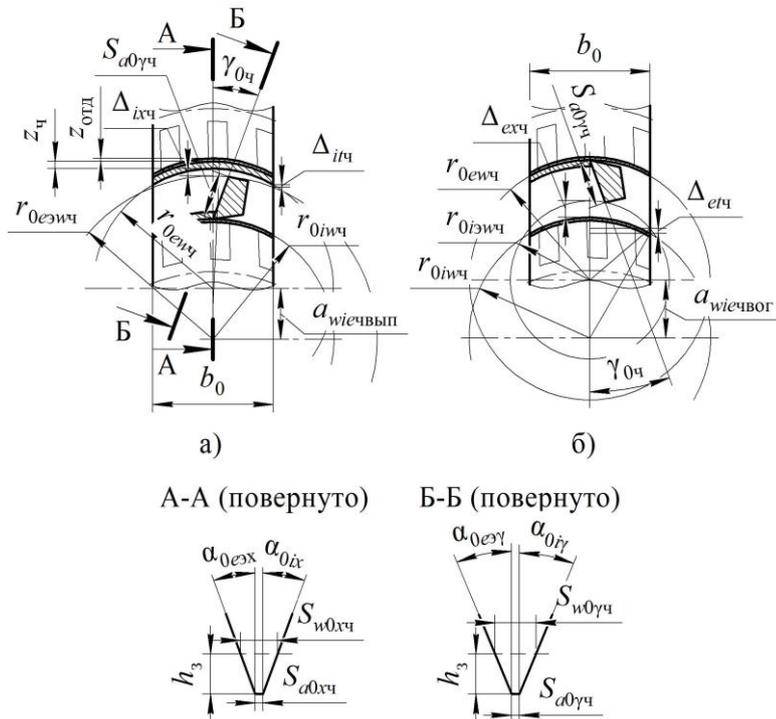


Рис. 8. Схема к определению зазоров в торцевой плоскости при чистовой зубообработке

резцовой головки не участвующей в формообразовании:

$$r_{0e3ч} = \sqrt{A^2 + r_{0iwч}^2 - 2Ar_{0iwч} \cos(\pi - \gamma_{0ч})}. \quad (6)$$

Вспомогательный параметр  $A$ , определяется:

$$A = S_{a0\gammaч} + h_3(\text{tg}(\alpha_{0i\gamma}) + \text{tg}(\alpha_{0e3\gamma})), \quad (7)$$

Угол профиля рабочей стороны зуба в передней плоскости:

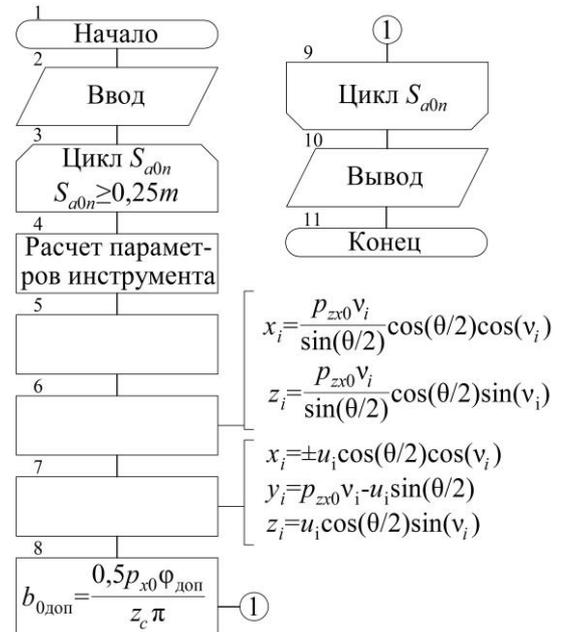


Рис. 7. Блок-схема алгоритма расчета дополнительной ширины шевера-прикатника

зубьев на торцах венца при выходе инструмента второго порядка из обрабатываемой впадины, срезание зубьев в противоположной стороне от обрабатываемой впадины.

Определение основных геометрических параметров инструментов второго порядка удобно рассмотреть на примере чистовой стадии зубообработки выпуклой стороны зуба комбинированного инструмента (рис. 8). Радиус производящей поверхности инструмента, формообразующий выпуклую сторону зуба:

$$r_{0iwч} = r_{0iw}. \quad (5)$$

Радиус поверхности зу-



Разработан ПМК для ПЭВМ (рис. 10), позволяющий автоматизировать процесс расчета геометрических и технологических параметров инструмента с учетом всего спектра рассмотренных в рамках настоящей работы конструктивных и технологических ограничений.

Результаты анализа работы ПМК при расчете группы контрольных примеров указывают на следующие особенности. Увеличение числа зубьев ЦККЗ при фиксированном числе зубьев -  $z_0$  шевра-прикатника в пред-

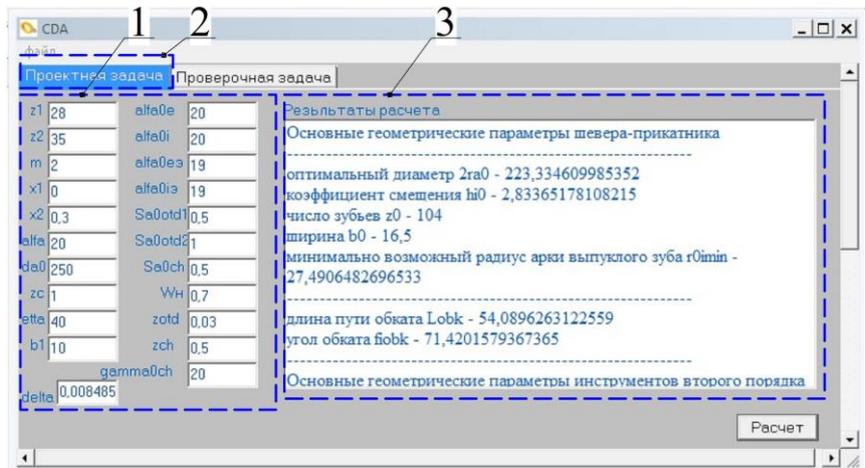


Рис. 10. Пример работы ПМК при решении проектной задачи

положном зацеплении. В то же время, при фиксированном  $z_1$ , уменьшение  $z_0$ , для обоих видов зацепления, ведет к увеличению отклонения  $\Delta_{rw1}$ , что в свою очередь приводит к уменьшению радиуса кривизны арки зуба ЦККЗ  $r_{li}$  (рис. 11). Это, в свою очередь, согласуется с результатами исследований, приведенными во II главе настоящей работы и подтверждает корректность работы ПМК. Таким образом, пробная отработка ПМК указала на главные особенности проявления конструктивных и технологических ограничений, выявленных в настоящей работе, а также проиллюстрировала возможность определения необходимого комплекса параметров, позволяющих значительно ускорить технологическую подготовку производства ЦККЗ с применением перспективного процесса комбинированной зубообработки шевингованием-прикатыванием в условиях современного производства с большим объемом выпуска.

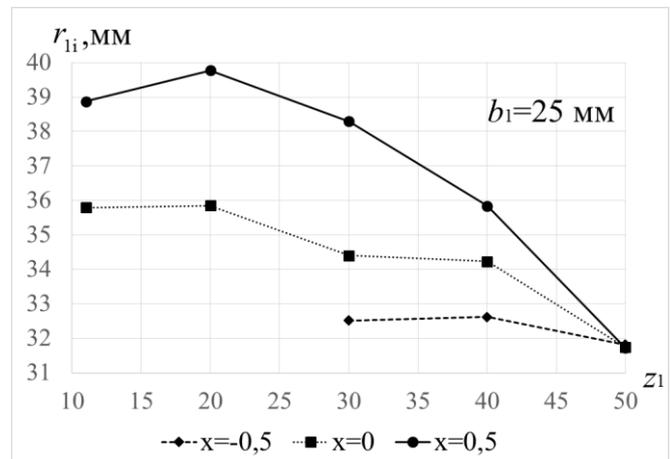


Рис. 11. Радиус кривизны арки выпуклой стороны зуба ЦККЗ для  $m=2$  мм

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполнения работы получено решение научной задачи, направленной на теоретическое обоснование рациональной конструкции комбинированного инструмента, базирующейся на взаимной увязке его основных параметров с конструктивными параметрами обрабатываемого ЦККЗ в процессе шевингования-прикатывания.

При выполнении работы были получены следующие основные результаты и сделаны выводы.

1. В результате проведенного анализа установлены процессы формообразования зубчатого венца комбинированного инструмента и зуборезные инструмен-

ты второго порядка, которые позволили выстроить два варианта технологического маршрута изготовления шевера-прикатника с круговыми зубьями. Показано, что разработанный способ финишной комбинированной обработки и инструмент для его осуществления являются действенной альтернативой процессу зубошлифования, способствуют расширению технологических возможностей, повышению точности и качества обработки на завершающей стадии формообразования венца шевера-прикатника.

2. Раскрытие механизма параметрической взаимосвязи диаметра шевера-прикатника с диаметром обрабатываемого им ЦККЗ позволило установить, что диаметр инструмента, в большинстве случаев, оказывается больше диаметра обрабатываемого им колеса, следовательно радиус кривизны арки кругового зуба ЦККЗ оказывается вынужденно завышенным. Доказано, что при фиксированном коэффициенте смещения исходного контура обрабатываемого ЦККЗ, обеспечение внеполюсного зацепления сопровождается увеличением диаметра шевера-прикатника, который ограничивается технологическими возможностями оборудования.

3. Разграничение факторов для заплоского (на управляемые: толщина зуба шевера-прикатника на вершине, коэффициент перекрытия, высота активного участка профиля зуба, подрезание ножки зуба и ограничивающие: срезание вершины зуба, условие существования зацепления) и предплоского (на управляемые: толщина зуба на вершине, коэффициент перекрытия, срезание вершины зуба и ограничивающие: подрезание ножки зуба, условие существования зацепления) зацеплений, по сравнению с известными методиками, позволило обосновать выбор числа зубьев комбинированного инструмента при котором обеспечивается положение полюса станочного зацепления за пределами активного участка профиля зуба.

4. Анализ комплекса факторов, носящих конструктивный (для обрабатываемого колеса и комбинированного инструмента) и технологический (для комбинированного инструмента) характер, оказывающих непосредственное влияние как на эффективность протекания самого процесса шевингования-прикатывания, так и на конструкцию комбинированного инструмента, для параметров ЦККЗ:  $m=2...5$  мм, коэффициент смещения исходных контуров  $x_1 = -0,95...0,95$ , число зубьев  $z_1=11, 15...50$ , впервые позволил разграничить области эффективного существования: а) предплоского зацепления для  $m=2...5$  мм при  $z_1$  от 11 до 50 и  $x_1$  от -0,95 до 0,25; б) заплоского зацепления для  $m=2...5$  мм при  $z_1$  от 11 до 50 и  $x_1$  от 0,25 до 0,95.

5. За счет разработки методики определения рациональной ширины венца шевера-прикатника с учетом варьируемых геометрических параметров стружечной канавки удалось исключить взаимодействие дефектных участков зубьев, расположенных на торцах инструмента с боковыми поверхностями зубьев обрабатываемой заготовки.

6. Разработанная математическая модель, охватывающая все рассматриваемые процессы формообразования круговых зубьев: для ЦККЗ – предварительного, для комбинированного инструмента – от предварительного до финишного, позволила определить основные геометрические параметры (радиуса производящих и нерабочих поверхностей) различных типов инструментов второго порядка и технологические параметры их работы (длину пути обката и угол пово-

рота в станочном зацеплении), минимально допустимые зазоры при отдельной односторонней обработке круговых зубьев с учетом припусков на обработку, а также учесть рекомендации, основанные на стойкостных ограничениях инструментов второго порядка.

7. Сформулированные «проверочная» и «проектная» задачи и разработанные методология и алгоритмы их решения, направленные на определение минимально допустимого радиуса кривизны арки кругового зуба ЦККЗ с учетом комплекса конструктивных и технологических ограничений, присущих процессу его чистовой зубообработке шевингованием-прикатыванием, позволили для каждого из ЦККЗ, составляющих зубчатую пару:

а) при жестко заданных конструктивных параметрах (ширина зубчатого венца, радиус кривизны арки кругового зуба), выполнить полный цикл расчета конструкции комбинированного инструмента – шевера-прикатника, а также основных параметров процессов и инструментов второго порядка, необходимых для его реализации, а в случае невозможности его выполнения – указать ограничивающие факторы;

б) при известной ширине зубчатого венца, определить минимально возможный радиус кривизны арки кругового зуба ЦККЗ исходя из условия его зубообработки комбинированным инструментом с учетом возможности его конструктивной и технологической реализации.

8. Разработанная методика позволила автоматизировать процесс расчета геометрических параметров инструмента с учетом комплекса ограничений и исключить ошибки при проектировании.

9. Разработанные расчетные методики, алгоритмы, результаты анализа и конструктивно-технологические решения рекомендованы к внедрению в производстве на предприятии ЗАО «Тулаэлектропривод», г. Тула, и применены в учебном процессе ФГБОУ ВО ТулГУ.

## **ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ 14 РАБОТ**

**1. Рахметов С.Л., Маликов А.А., Сидоркин А.В. Анализ взаимосвязи диаметров шевера-прикатника и обрабатываемого им цилиндрического колеса с круговым зубом // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 9. С. 303 – 314.**

**2. Рахметов С.Л., Маликов А.А., Сидоркин А.В. К вопросу о технологических ограничениях, обусловленных конструкцией инструмента, используемого в процессе шевингования-прикатывания цилиндрических колес с круговыми зубьями // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 1. С. 165-171.**

**3. Рахметов С.Л., Маликов А.А., Сидоркин А.В. К вопросу определения минимального радиуса кривизны арки зуба цилиндрического колеса с учетом технологических ограничений, возникающих при его зубообработке // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 7. С. 131 – 136.**

**4. Рахметов С.Л., Маликов А.А., Сидоркин А.В. Маршрутная технология зубообработки венца шевера-прикатника для обработки цилиндрических колес с круговыми зубьями // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 4. С. 301-308.**

5. Рахметов С.Л., Маликов А.А., Сидоркин А.В. Некоторые аспекты совершенствования и реализации алгоритмов определения взаимосвязи геометрических параметров шевера-прикатника и цилиндрического колеса с круговым зубом // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 9. С. 49 – 57.

6. Рахметов С.Л., Маликов А.А., Сидоркин А.В. Определение механизма параметрической взаимосвязи диаметра шевера-прикатника с диаметром обрабатываемого им цилиндрического колеса с круговым зубом // Научно-технологические проблемы машиностроения. 2018. №9. С. 39 – 44.

7. Рахметов С.Л., Маликов А.А., Сидоркин А.В. Определение степени влияния основных параметров стружечной канавки шевера-прикатника на его ширину // Научно-технологические проблемы машиностроения. 2018. №11. С. 9 – 14.

8. Рахметов С.Л. Анализ влияния геометрических ограничений на диаметр шевера-прикатника для обработки цилиндрических колес с круговым зубом // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 10. С. 590 – 597.

9. Рахметов С.Л. Построение алгоритма параметрической взаимосвязи ширины шевера-прикатника с основными параметрами стружечной канавки // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып. 10. С. 153 – 156.

10. Рахметов С.Л. Некоторые аспекты определения технологических параметров процесса изготовления шевера-прикатника для обработки цилиндрических колес с круговыми зубьями в условиях инструментального производства // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 3. С. 584 – 590.

11. Рахметов С.Л., Маликов А.А., Сидоркин А.В., Артамонов В.Д. Определение габаритного диаметра шевера-прикатника при заданном радиусе кривизны арки его кругового зуба // СТИН. 2019. №6. С. 10 – 12.

12. Рахметов С.Л., Маликов А.А., Сидоркин А.В. Автоматизация расчета геометрических параметров шевера-прикатника для обработки колес с круговыми зубьями // Вестник Тульского государственного университета. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: сб. научных трудов национальной заочной научно-техн. конф. с международным участием «АПИР-23», 8-9 ноября 2018 года / под ред. В.В. Прейса. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. С. 165 – 168.

13. Рахметов С.Л. К вопросу об исследовании параметрической взаимосвязи диаметра шевера-прикатника с диаметром обрабатываемого им цилиндрического колеса с круговым зубом [Электронный ресурс] / X Международный молодежный форум «Образование, наука, производство». Белгород. 2018. 3 с.

14. Рахметов С.Л. О двух типах задач, связанных с проектированием шеверов-прикатников для обработки цилиндрических колес с круговым зубом // Молодежь и наука: шаг к успеху: сб. науч. статей 2-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых (22-23 марта 2018 года), в 3-х томах. Том 3. Юго-Зап. гос. ун-т., Курск. 2018. С. 286 – 291.

Подписано в печать . . . 2019

Формат бумаги 70x100 1/16. Бумага типограф. №2

Офсетная печать. Усл. печ. л. 1,1. Усл. кр. отт. 1,2. Уч. изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Тульский государственный университет. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Издательство ТулГУ. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 95