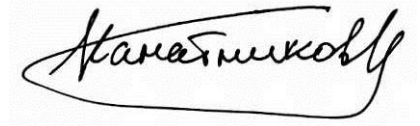


На правах рукописи



КАНАТНИКОВ НИКИТА ВЛАДИМИРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЗУБОСТРОГАНИЯ ПРЯМОЗУБЫХ
КОНИЧЕСКИХ КОЛЕС**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел - 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»

Научный руководитель

Харламов Геннадий Андреевич
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК»,
профессор кафедры «Конструкторско-
технологическое обеспечение
машиностроительных производств»

Официальные оппоненты

Протасьев Виктор Борисович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Тульский государственный
университет», профессор кафедры
«Инструментальные и метрологические
системы»

Алтухов Александр Юрьевич
кандидат технических наук
ФГБОУ ВПО «Юго-Западный
государственный университет» (г. Курск),
научный сотрудник Управления научных
исследований и инновационных программ

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО «Брянский государственный
технический университет»

Защита диссертации состоится «27» июня 2014 г. в «12⁰⁰» часов на заседании диссертационного совета Д 212.182.06 по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, главный корпус, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» (302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29).

Автореферат разослан «30» апреля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Василенко Юрий Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.Прямозубые конические колеса находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Помимо использования в дифференциалах автомобилей их широко применяют в электроинструменте, сельскохозяйственной технике и различном оборудовании. Это связано с тем, что в прямозубых конических передачах снижены осевые нагрузки по сравнению со спиральными коническими передачами, так же осевая сила постоянна по направлению, что позволяет упростить конструкцию подшипниковых узлов.

Известен ряд способов получения прямозубых конических колес. Однако механическая обработка остается основной при создании точных зубчатых колес и используется при производстве небольших партий разных размеров. Особо важную роль этот факт приобретает в связи с тем, что в настоящее время до 75% предприятий отечественного машиностроения выпускают продукцию, которая по своему характеру является серийной и мелкосерийной. Наибольшее распространение получили процессы зубофрезерования и зубострогания по методу обката. Их отличает широкий диапазон нарезаемых модулей колес и относительно высокое (до шестой степени точности) качество получаемого зубчатого профиля.

Возрастание требований к функциональным показателям зубчатых колес привело к применению новых схем обработки, конструкций инструмента, новых инструментальных и обрабатываемых материалов. Однако внесение изменений в отработанные технологические процессы ведет к большим затратам, связанным с разработкой режимов резания и определением влияния вносимых изменений на показатели качества изделия. Определением взаимосвязей параметров технологической системы и качества получаемых изделий занимались многие российские ученые В. Ф. Безъязычный, А. С. Васильев, А. М. Дальский, В. М. Кован, Э. В. Рыжов, А. П. Соколовский, Ю. С. Степанов, А. Г. Сулов, В. Б. Протасьев, А. С. Тарапанов, О. В. Таратынов, Г. А. Харламов и др.

В этой связи представляется актуальной задача определения степени влияния различных параметров технологической системы и режимов резания на производительность процесса обработки, качество изделия, стойкость инструмента и разработки алгоритма управления процессом. Это позволит значительно сократить расходы на подготовку производства и определить оптимальные параметры технологической системы, что является базой для бережливого производства.

Цель работы. Повышение качества (точности, шероховатости) и производительности зубострогания прямозубых конических колес методом обката за счет совершенствования конструкции инструмента и управления технологическими параметрами процесса обработки.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

1) разработать математическую модель процесса зубострогания прямозубых конических колес, позволяющую определить положение точек режущего лезвия инструмента в пространстве, осевые составляющие силы резания, точность и шероховатость обрабатываемого профиля;

2) разработать алгоритм управления процессом зубострогания прямозубых конических колес, сущность которого заключается в

- прогнозировании качественных параметров (точности, шероховатости) процесса обработки в зависимости от заданных параметров технологической системы (геометрии детали, оборудования, инструмента) и режимов резания;

- определении режимов обработки и конструкции инструмента в зависимости от требуемых параметров точности и шероховатости.

3) определить рациональные величины распределения срезаемых слоев между режущими лезвиями инструмента;

4) провести экспериментальные исследования влияния режимов обработки и конструкции инструмента на осевые составляющие силы резания, стойкость инструмента, точность и шероховатость;

5) разработать практические рекомендации, направленные на повышение эффективности зубострогания конических зубчатых колес по методу обката резцами с дифференцированными схемами резания.

Объект исследования: процесс зубострогания прямозубых конических колес методом обката.

Предмет исследования: производительность и качество (точность, шероховатость) зубострогания прямозубых конических колес, а так же конструкция зубострогальных резцов.

Методика исследований. Теоретические исследования базируются на положениях теории резания металлов, проектирования режущего инструмента, научных основ технологии машиностроения, дифференциальной геометрии, векторного анализа, инженерии поверхности.

Экспериментальные исследования проводились на действующем оборудовании Госуниверситета – УНПК, Орловского ЦКП и в реальных производственных условиях ОАО «Орелстроймаш» (г. Орел). В основе экспериментальных исследований использованы методы многофакторного планирования экспериментов и математической статистики.

Исследования проводились с помощью лицензионных программных продуктов (MicrosoftOffice 2007, LabVIEW 2010, КОМПАС-3DV13).

Научная новизна работы. Разработана математическая модель процесса зубострогания прямозубых конических колес методом обката, позволяющая на основе комплексного анализа технологических (режима обработки, материала заготовки и жесткости оборудования) и конструкторско-технологических (схемы разделения стружки) параметров, управлять точностью и шероховатостью рабочего профиля детали.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- методика комплексного анализа параметров процесса зубострогания прямозубых конических колес методом обката, сочетающая в себе возможность прогнозирования качества изделия и определения оптимальных режимов обработки;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований зубострогания резцами с дифференцированными схемами резания прямозубых конических колес методом обката;
- технологические рекомендации по реализации процесса зубострогания прямозубых конических колес резцами с дифференцированными схемами резания.

Практическая значимость работы заключается в обосновании вариантов конструкции зубострогальных резцов с дифференцированными схемами резания и технологических рекомендаций к ним, обеспечивающих повышение производительности процесса до 1,8 раза.

Реализация результатов работы: разработанные рекомендации по конструкции инструмента с дифференцированной схемой резания и методика управления процессом

обработки прямозубых конических колес апробированы и приняты к внедрению на ОАО «Орелстроймаш» (экономический эффект более 200 тыс. рублей в год).

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных конференциях: «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии», г. Липецк, 2012; XV Международной научно – технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии» «Технология 2012», г. Орел, 2012; «Высокие технологии в машиностроении», г. Курган, 2012; VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства», г. Орел, 2013; ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Госуниверситета-УНПК (г. Орел 2011-2014 гг.).

Диссертация выполнялась при поддержке гранта ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» «Создание программно-аппаратного комплекса,повышающего эффективность обработки конических зубчатых колес» (2013-2014 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 6 в изданиях, рекомендованных ВАК для публикаций материалов диссертационных исследований.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 154 страницах, содержит 57 рисунков и 5 таблиц. Состоит из введения, пяти глав, списка литературы, включающего 97 наименований и приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, определены цель, задачи, объект, предмет и методы исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе выделены основные методы производства прямозубых конических колес на современных машиностроительных предприятиях – начальное формирование, пластическое формирование, обработка резанием. Определены преимущества и недостатки каждого метода, выделена область применения.

Резание является наиболее распространенным методом обработки в мелкосерийном и серийном производстве, как в России, так и за рубежом. Это связано с тем, что резание позволяет обеспечить необходимую точность профиля и производительность процесса при наименьших затратах на инструмент и оборудование.

Проведен анализ работ, посвященных обработке зубчатых профилей, оборудованию для нарезания прямозубых конических колес, современных конструкций инструментов, предназначенных для нарезания зубьев как в предварительно прорезанных впадинах, так и на цельной заготовке. Представлены особенности кинематики формообразования рабочего профиля прямозубых конических колес. Рассматриваются современные станки, применяемые для обработки зубьев конических колес. Выделяются основные направления развития зубообрабатывающего оборудования.

Проанализировано состояние вопроса о влиянии силы резания и ее изменения, возникающего в процессе обработки на точность и качество получаемого профиля. Кроме того рассмотрены различные методики расчета данной силы.

Был произведен анализ работ, посвященных износу инструментов, предназначенных для обработки зубчатых колес. В рассмотренных работах вопрос причины линейного размерного износа исследован в достаточной степени. Однако, износ инструмента в процессе нарезания методом обката, в результате перемещения стружки и обработанной поверхности детали относительно рабочих поверхностей инструмента в условиях повышенных температур и больших давлений, является весьма сложным технологическим процессом. Единой теории, охватывающей все стороны износа режущего инструмента и объясняющей его физические причины, в настоящее время не существует.

Определены возможности влияния параметрами технологической системы на точность и качество получаемого изделия. Поставлена цель работы, сформулированы задачи исследования.

Проведенный анализ работ позволил сделать вывод, что на данный момент не существует методики, позволяющей проанализировать процесс обработки профиля прямозубого конического колеса на этапе технологической подготовки производства с целью определения оптимальных параметров технологической системы в зависимости от целевой функции процесса обработки.

Во второй главе представлена методика комплексного анализа процесса обработки профиля прямозубого конического колеса методом обката. Данная методика позволяет определить: кинематическое изменение параметров резания (передний угол, задний угол, толщина стружки), осевые составляющие силы, возникающей в процессе обработки, точность и шероховатость рабочего профиля зуба колеса.

При определении зависимостей, отображающих процесс формообразования, были сделаны следующие допущения: обработка ведется по схеме плосковершинного производящего колеса, заготовка неподвижна, начало координат расположено в вершине начального конуса колеса и совпадает с осью симметрии одной из впадин колеса, все необходимые для формообразования движения совершает инструмент, обкат происходит по делительной окружности колеса без скольжения.

Математическое описание процесса формообразования (рис. 1,2), заключающегося в обработке зубчатого колеса K воображаемым производящим колесом M , представляется выражением, описывающим положение каждой точки профиля впадины прямозубого конического зубчатого колеса в любой момент обработки. Резцы представляют собой зуб производящего колеса, а прямолинейные режущие кромки резцов являются сторонами смежных зубьев производящего колеса.

Математическое отображение схемы строгания прямозубого конического колеса в пространстве имеет вид:

$$\begin{aligned} X &= -\sin \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} (\operatorname{tg} \varphi_M + \Delta h) + \cos \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} [l \sin \Phi \pm (b + \Delta h \operatorname{tg} \alpha') \cos \Phi] (M); \\ Y &= \cos \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} (\operatorname{tg} \varphi_M + \Delta h) + \sin \frac{\Phi}{\operatorname{tg} \varphi_M} [l \sin \Phi \pm (b + \Delta h \operatorname{tg} \alpha') \cos \Phi] - \operatorname{tg} \varphi_M (M); \\ Z &= l \cos \Phi \mp (b + \Delta h \operatorname{tg} \alpha') \sin \Phi (M). \end{aligned} \quad (1)$$

где X, Y, Z – координаты точки режущего лезвия резца в процессе резания, м; l – параметр движения резания, линейное перемещение резца, м; Φ – угол поворота производящего колеса; Δh – параметр режущего лезвия, м; b – параметр технологической системы, равный расстоянию от точки A до вершины рассматриваемой режущей кромки, м; α' – профильный угол резца в сечении, перпендикулярном направлению движения; \pm – входная или выходная кромка.

$l, \Phi, \Delta h$ – являются параметрами варьирования математического отображения схемы резания. Их изменение позволяет определить положение любой точки режущего лезвия в требуемый момент времени.

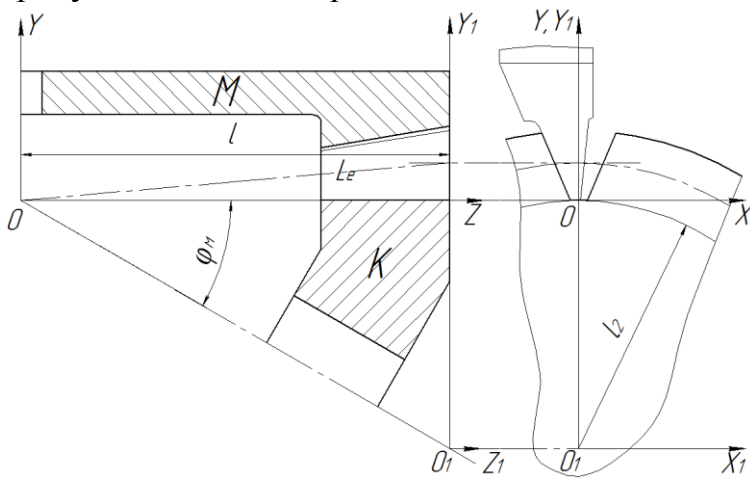


Рис.1. Нарезание по схеме плосковершинного-производящего колеса: K – нарезаемое зубчатое колесо; M – производящее колесо; Le – длина образующей начального конуса, m ; φ_m – угол внутреннего конуса; l_2 – радиус окружности впадин зубьев в рассматриваемом сечении, m

Предложенное математическое отображение позволяет произвести расчеты параметров процесса резания – кинематические изменения углов резания, а также толщин срезаемых стружек.

Проведенный векторный анализ математического отображения схемы резания позволил определить положение плоскости резания p , значения кинематических углов в каждом элементе режущего лезвия – переднего γ , заднего α , углов наклона режущей кромки, а также толщины срезаемого слоя.

Оптимизация эксплуатационных возможностей зубообрабатывающих станков по производительности и качеству нарезаемых колес связана, в первую очередь, с определением максимальной амплитуды силы резания и ее изменения в процессе обработки.

Расчет осевых составляющих силы резания производился по методике, изложенной в работах В. А. Евдокимова, А. С. Тарапанова, О. В. Полохина и позволил оценить погрешности, возникающие при обработке прямозубых конических колес, вызванные деформациями технологической системы.

Результаты аналитического расчета осевых составляющих силы резания, возникающих в процессе обработки венца конического зубчатого колеса ($Z=40$, $m=4$ мм, $\varphi = 45^\circ$, $V=14$ м/мин, $T=25$ с/зуб) представлены на рис.3. Основной линией показано изменение осевых составляющих силы резания при строгании универ-

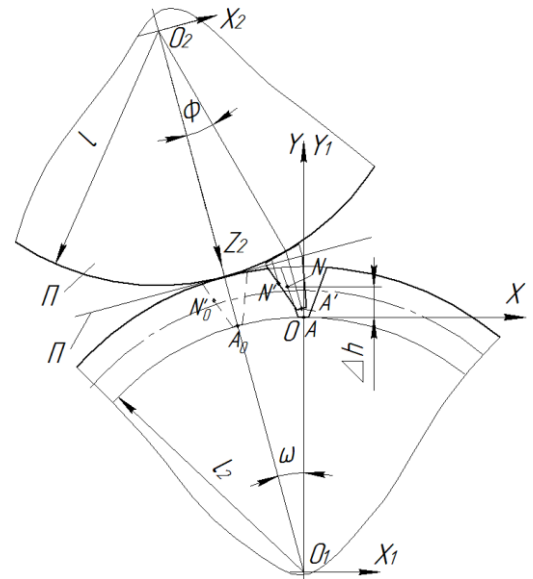


Рис. 2. Схема расчета математического отображения процесса резания: ω – угол поворота обрабатываемого колеса

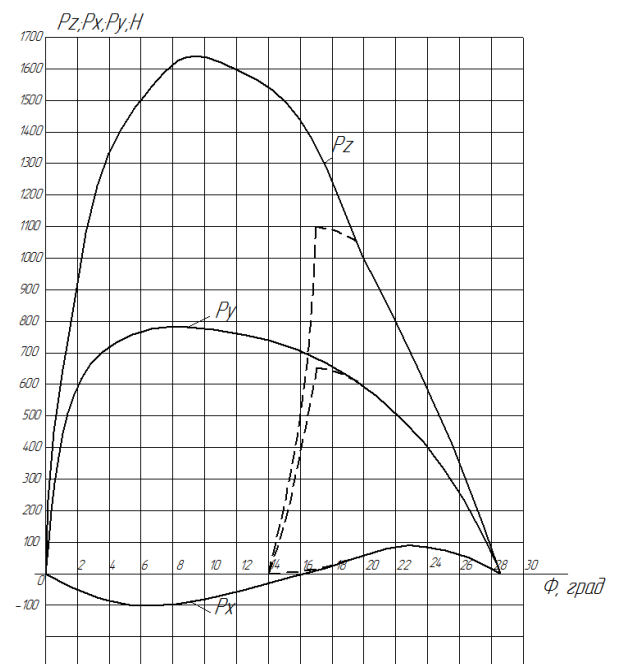


Рис. 3. Осевые составляющие силы резания

силы резания при строгании универ-

сальным резцом цельной заготовки и пунктирной линией – изменения составляющих силы резания при строгании заготовки с уже прорезанными впадинами. Из графика видно, что при строгании цельной заготовки максимальная амплитуда осевой составляющей силы резания увеличивается более чем на 40%. Полученные результаты подтверждают нежелательность строгания колес среднего модуля без предварительной обработки.

Деформации технологической системы оказывают значительное влияние на формирование погрешностей обработки. В процессе зубострогания деформации изменяются во времени, поэтому такие погрешности крайне сложно компенсировать соответствующей наладкой оборудования.

Общее смещение по оси ОУ (рис.4):

$$y = Py \left(\frac{1}{j_{д0}} + \frac{\cos \varphi \cos \varphi}{j_{д1}} + \frac{1}{3E} \left[\frac{l_0^3}{J_0} + \frac{\cos \varphi \cos \varphi l_1^3}{J_1} \right] \right) + Pz \sin \varphi \cos \varphi \left(\frac{1}{j_{д1}} + \frac{l_1^3}{3E J_1} \right) \quad (м), \quad (2)$$

по оси ОХ:

$$x = Px \left(\frac{1}{j_{д0}} + \frac{1}{j_{д1}} + \frac{1}{3E} \left[\frac{l_0^3}{J_0} + \frac{l_1^3}{J_1} \right] \right) \quad (м), \quad (3)$$

где φ – угол начального конуса; $j_{д0}$, $j_{д1}$ – динамическая жесткость технологической системы, обеспечивающей крепление и необходимые кинематические перемещения резца и заготовки соответственно, Н/м; E – модуль упругости, МПа; J_0 , J_1 – сосредоточенный момент инерции сечения державки резца и оправки колеса, кг·м²; l_0 , l_1 – расстояние от точки контакта до опоры резцедержателя и бабки станка, м.

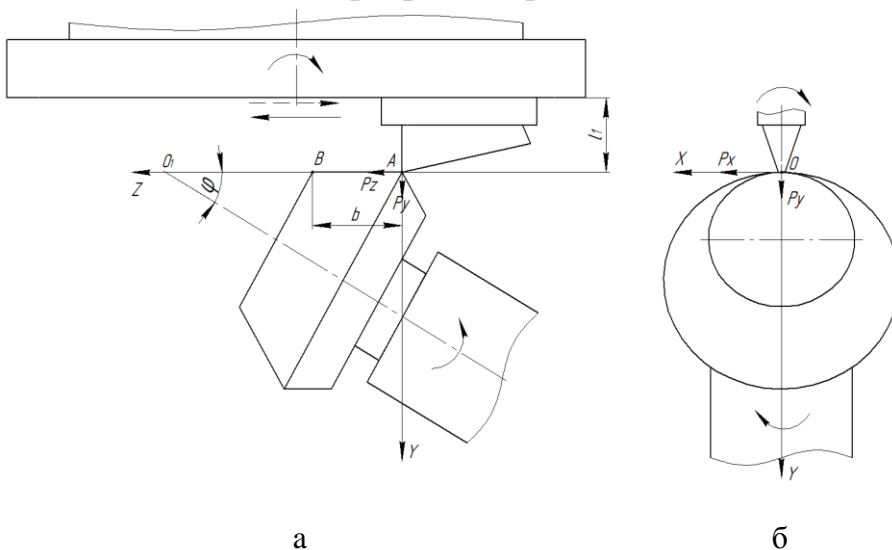


Рис. 4. Схема определения погрешности обработки:

а – в плоскости ZOY, б – в плоскости XOY

Величина деформаций, возникающих в технологической системе прямо пропорциональна силе резания возникающей в процессе обработки, следовательно, одним из условий увеличения точности обрабатываемого колеса является уменьшение максимальной силы резания.

Расчет и прогнозирование величины шероховатости обработанной поверхности производился в соответствии с положениями учения об инженерии поверхности, учитывая динамические и кинематические особенности процесса зубообработки прямозубых конических колес. В качестве базы для расчета был использован подход А.Г. Сулова-закрывающийся в том, что средняя высота профиля шероховатости определяется сле-

Суммарное относительное перемещение осей бабки и люльки станка являются результатом перемещений узлов и деталей станка, составляющих упругую систему. Прямая пропорциональность между деформацией и нагрузкой имеет место в станках после устранения всех зазоров и преодоления препятствующих этому сопротивлений, а также ликвидации циклической и кинематической погрешностей.

дующим выражением:

$$Rz = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 \text{ (м);} \quad (4)$$

Проведенный в работе анализ процесса обработки позволил получить представленные ниже зависимости для определения составляющих профиля шероховатости.

$$h_{1i} = \frac{1}{32} \rho_i \left(\frac{\theta M_i}{h} \right)^2 \text{ (м),}$$

$$h_2(\tau) = \frac{P(\tau) - P_{\min}}{j} \text{ (м),}$$

$$h_3 = 0,25 \rho \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\theta M}{2h} \right) \cdot \left(1 - \frac{\tau_{\text{сдв}}}{\sqrt{\tau_{\text{сдв}}^2 + \sigma_T^2}} \right) \text{ (м),}$$

$$h_4 = 0,8 \text{ мкм (м).}$$
(5)

где ρ_i – радиус кривизны зуба в середине формируемого участка профиля, м; θ – угол поворота производящего колеса, необходимый для полной обработки профиля зуба нарезаемого колеса; M_i – ширина i -го реза, м; h – высота зуба, м; $P(\tau)$ – мгновенное значение силы резания, Н; P_{\min} – минимальное значение силы резания, возникающей в процессе формирования профиля зуба, Н; j – жесткость технологической системы, Н/м; ρ – радиус скругления режущей кромки, м; $\tau_{\text{сдв}}$ – прочность обрабатываемого материала на сдвиг, Н/м²; σ_T – предел текучести обрабатываемого материала, Н/м².

Расчеты (рис. 5) показали, что наибольшее влияние на величину средней высоты профиля шероховатости оказывает составляющая h_2 . Это связано с большой амплитудой изменения силы резания, возникающей в процессе зубострогания. Кинематическая составляющая h_1 оказывает заметно меньшее влияние на величину средней высоты профиля шероховатости, однако у головки зуба ее влияние достаточно высоко.

На основе проведенных исследований установлено, что на величину шероховатости обрабатываемой поверхности влияют следующие факторы: режимы обработки, свойства материала заготовки, геометрия обрабатываемого колеса.

Во второй главе была предложена конструкция инструмента – зубострогального резца с дифференцированной схемой резания. Аналогичный инструмент был описан в работах В. Н. Кедринского, К. М. Писманика, однако не приведены конструкторско-технологические рекоменда-

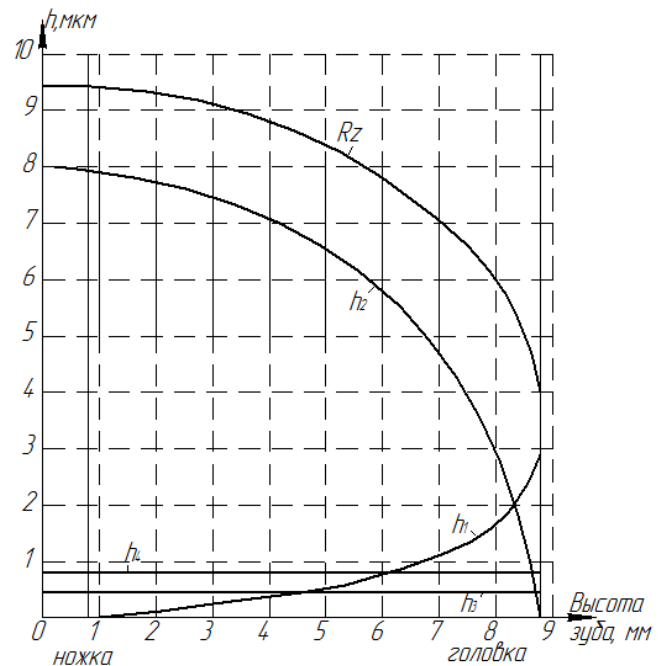


Рис. 5. График аналитического расчета изменения средней высоты профиля шероховатости в торцевом сечении колеса: $Z=40$, $t=4$ мм, $\varphi=45^\circ$, сталь 45, $j=1,2 \cdot 10^5$ МПа, $M=0,23$ мм, $V=14$ м/мин, черновая обработка производилась методом простого врезания

дации по его использованию.

Резец с дифференцированной схемой резания – это такая модификация обычного резца, в результате которой он приобретает приведенную конструктивную подачу в виде разности размеров зуба по ступеням. Эта подача выражает величину смещения двух соседних поверхностей резания относительно друг друга, смещение осуществляется закономерным расположением режущих лезвий на поверхности режущей части инструмента при отсутствии абсолютной подачи. Форма поверхностей резания, полученных при помощи приведенной конструктивной подачи, зависит от образующих, их режущих лезвий и принятой схемы резания.

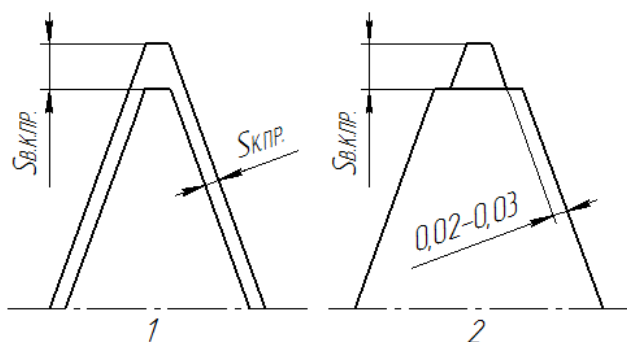


Рис.6.Схемы разделения срезаемого слоя: 1 – параллельная; 2 – распределенная

При параллельной схеме разделение происходит по всему периметру срезаемого слоя, и чистовая ступень инструмента отделяет постоянный, определяемый приведенной конструктивной подачей слой металла.

При распределенной схеме первый зуб работает боковыми сторонами, а второй вершиной. Для того, чтобы исключить из работы боковые режущие лезвия второго зуба резца, между ними и боковыми режущими лезвиями первого зуба делается перепад в пределах: 0,02 - 0,03мм.

Соотношения между приведенной и круговой подачей были получены аналитически, на основе анализа математической модели процесса и зависимостей, связывающих параметры качества обрабатываемого колеса с параметрами технологической системы.

По вершинному режущему лезвию:

$$S_{кпр.в} = (1,2 \div 1,3) \frac{1}{T} \text{ (мм)}, \quad (6)$$

по боковым режущим лезвиям:

$$S_{кпр.б} = (0,9 \div 1,0) \frac{1}{T} \text{ (мм)}, \quad (7)$$

где T – время обработки зуба конического колеса, с.

Была предложена методика, позволяющая управлять процессом нарезания зубчатого венца конического колеса. Использование данной методики позволит прогнозировать качество и точность изделия на этапе технологической подготовки производства для нового технологического процесса, а также определить оптимальные режимы резания, необходимые для обработки зубчатого колеса требуемой точности.

В третьей главе приведено описание экспериментальной установки и изложена методика экспериментального исследования, позволяющая определить осевые составляющие силы резания, возникающей в процессе зубострогания. Исследование силы резания при обработке прямозубых конических колес производилось с помощью универсального динамометра УДМ-600, персонального компьютера и среды LabView.

Кроме того, была предложена методика исследования процесса обработки прямозубых конических колес резцами с дифференцированными схемами резания, целью которого являлось подтверждение аналитических зависимостей для расчета приведенной конструктивной подачи.

С целью определения влияния, распределения срезаемого слоя металла по ступеням на стойкость инструмента, качество получаемого профиля и производительность процесса резцы с дифференцированной схемой резания были испытаны и внедрены на предприятии.

Для контроля параметров шероховатости зубчатой поверхности прямозубого конического колеса использовался иммерсионно-репликовый метод (метод слепков). Шероховатость слепков измерялась с помощью электромеханического профилографа-профилометра модели 201.

Исследование точности прямозубых конических колес проводилось с помощью координатно-измерительной машины Prismo 7. Пятно контакта проверялось на специальных обкаточных приспособлениях. Оценка существенности различия между средними значениями показателей точности и шероховатости производилась с помощью критерия Стьюдента.

Износ зубострогальных резцов оценивался без снятия инструмента со станка. При проведении экспериментов через определенные промежутки времени измеряли максимальный износ задних поверхностей резцов с помощью бинокулярной лупы. Критерием прекращения эксперимента являлось достижение критического износа задней поверхности чистовой ступени резца.

В четвертой главе проведено экспериментальное исследование силы резания. Подтверждено ее соответствие с аналитическими данными. Разница между прогнозируемыми и экспериментальными силами не превышает 10%, что доказывает возможность применения расчетных значений осевых составляющих силы резания для определения качественных параметров обрабатываемого изделия.

Было проведено экспериментальное исследование процесса обработки зубчатого конического колеса резцами с дифференцированными схемами резания (рис.7,8). Анализ результатов измерения подтвердил справедливость полученных с помощью математической модели процесса зависимостей между приведенной конструктивной подачей и окружной подачей. Наибольшее уменьшение всех составляющих силы резания осуществится лишь при значении приведенной конструктивной подачи резца, являющейся оптимальной при данных условиях обработки.

Производительность процесса зубообработки инструментами с дифференцированными схемами резания повышается в 1,5 – 1,8 раза без потери точности обработки. Это происходит за счет возможности использования больших подач и сокращения числа проходов за которое обрабатывается изделие.



Рис.7. Зубострогальные резцы с дифференцированной схемой резания

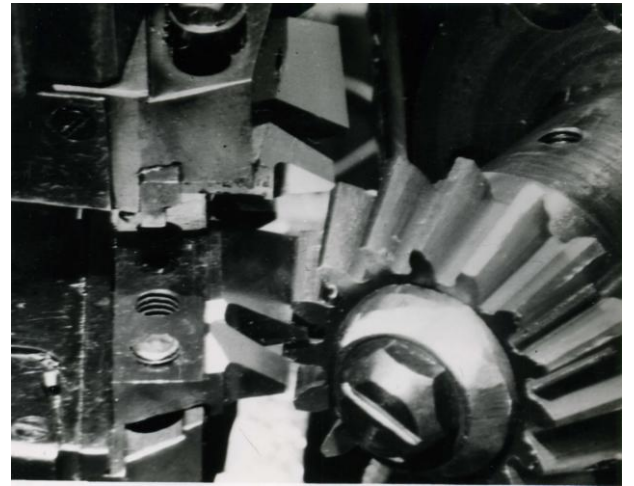


Рис.8. Процесс обработки прямозубого конического колеса специальными резцами

Анализ результатов измерений показывает, что среднее значение шероховатости зубьев, обработанных специальным инструментом с параллельной схемой резания уменьшается по сравнению с обычными резцами на 20%, а шероховатость зубьев обработанных инструментом с распределенной схемой резания уменьшается на 10%.

При исследовании точности и шероховатости установлено, что точность изделий, изготовленных согласно рекомендациям, полученным с помощью математической модели процесса, соответствует требованиям чертежа и прогнозируемым значениям (прогнозируемые значения отличаются от полученных экспериментально на 10-15%).

Различие средних значений показателей точности зубчатого венца существенно. Среднее значение радиального биения при использовании зубострогальных резцов с дифференцированной схемой резания открытого типа уменьшается более чем на 30% по сравнению со стандартными резцами (рис. 9 б). Закрытый тип увеличивает биение зубчатого венца на 10 – 12%, по сравнению с открытым (рис. 9 а). Параллельная схема резания дает более стабильные показатели точности по сравнению с распределенной.

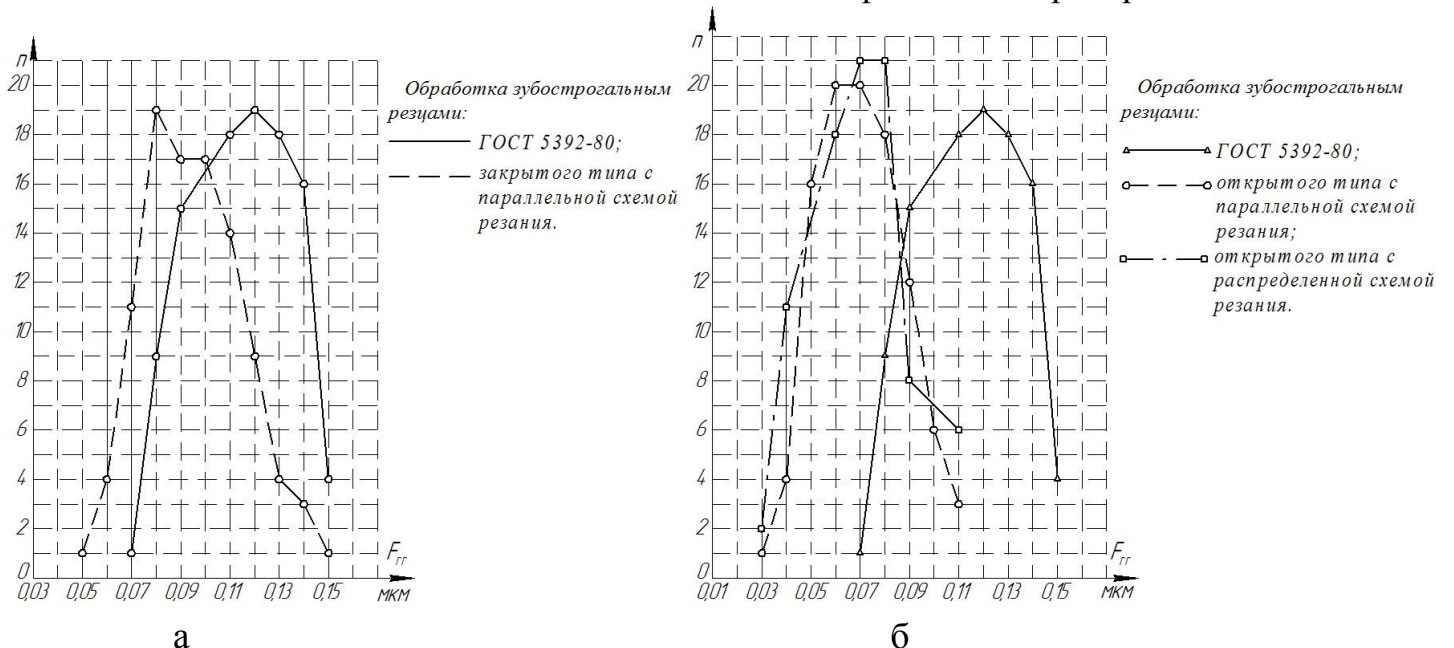


Рис.9. Радиальное биение зубчатого венца конической шестерни

Размер пятна контакта профиля конического зубчатого колеса (рис.10) при обработке резцами с дифференцированными схемами резания увеличивается более чем на 20%.

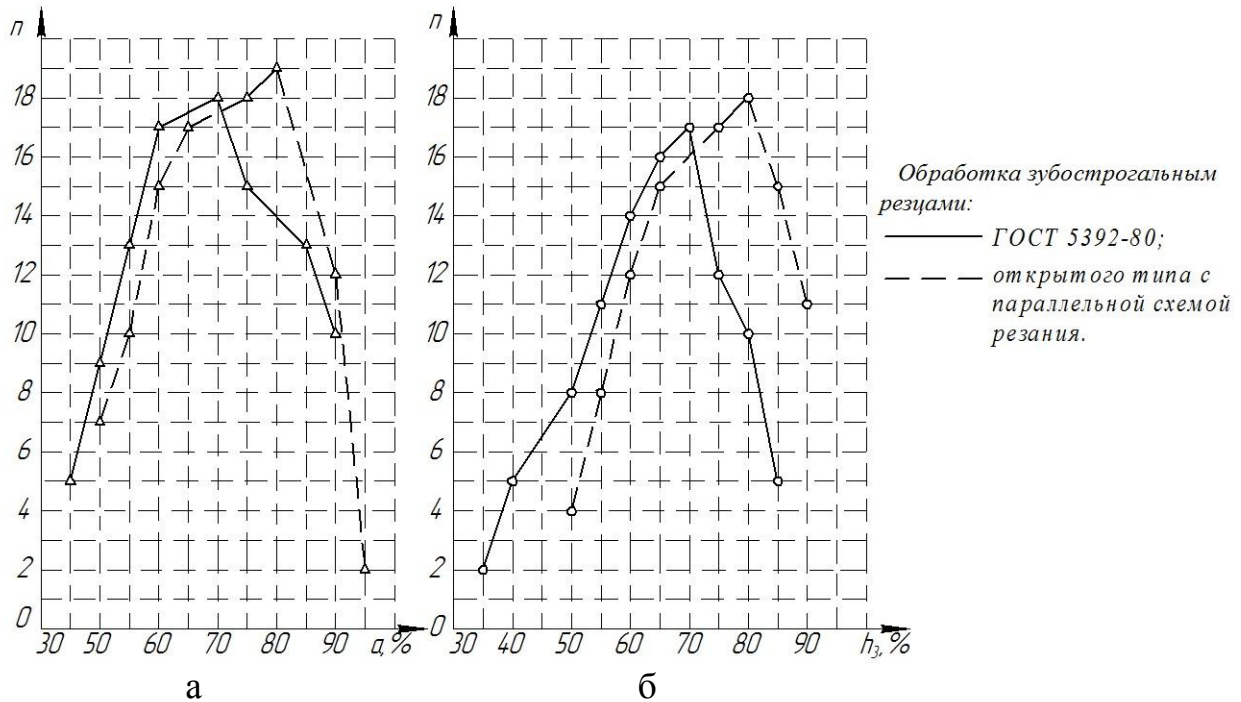


Рис.10. Параметры пятна контакта конической шестерни:
а – длина пятна контакта, *б* – высота пятна контакта

Согласно результатам эксперимента стойкость резцов с параллельной схемой резания увеличивается по сравнению с обычными резцами в 1,2 – 1,5 раза, а с распределенной в 1,6 – 2 раза (рис. 11). Это объясняется тем, что создаются благоприятные условия резания, влияющие на лимитирующую по стойкости чистовую ступень резца, которая при параллельной схеме резания имеет одинаковую толщину срезаемых слоев металла вдоль режущих лезвий.

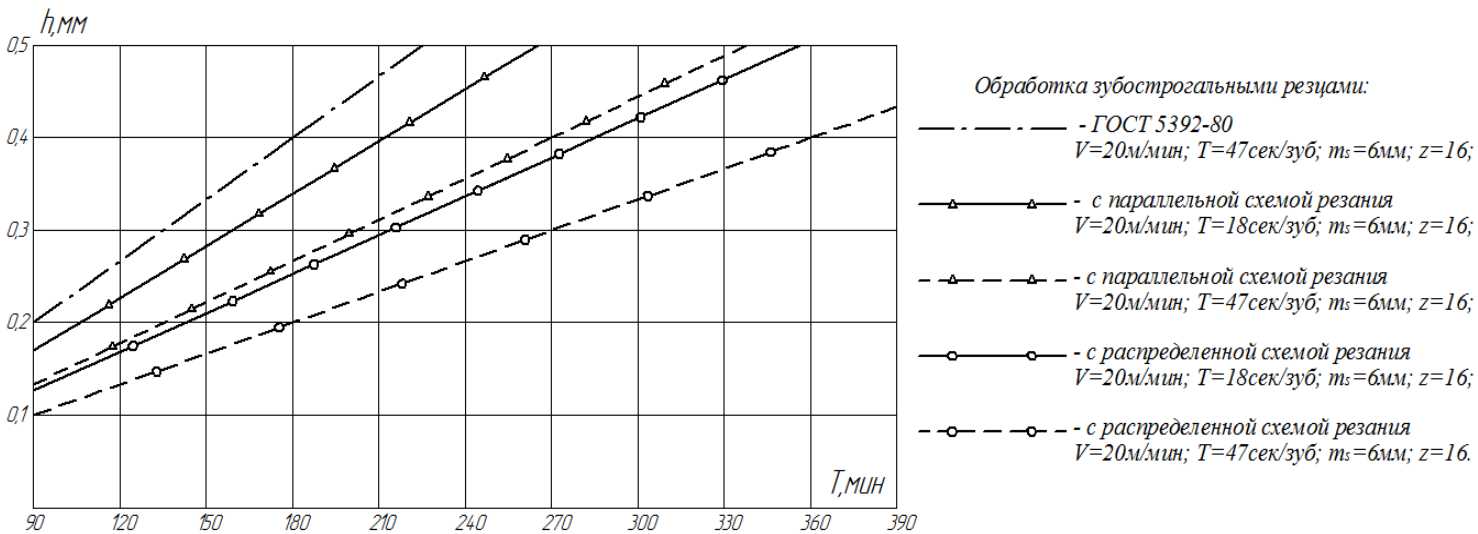


Рис.11. Зависимость износа зубострогальных резцов от конструкции инструмента и времени обработки

При распределенной схеме резания геометрия слоев металла, срезаемых вершинным лезвием черновой ступени и боковыми режущими лезвиями чистовой ступени, значительно упрощается, что и предопределяет увеличение стойкости инструмента.

Исследования процесса обработки резцами с дифференцированными схемами резания подтверждают снижение составляющих силы резания и более равномерное их перераспределение, что увеличивает точность нарезаемых изделий благодаря меньшему отжатию технологической системы в процессе обработки и увеличение стойкости инструмента за счет создания благоприятных условий резания.

В пятой главе даны рекомендации по выбору режимов резания для обработки прямозубых конических колес зубострогальными резцами с дифференцированными схемами резания. Приводятся поправочные коэффициенты, позволяющие учитывать конструкцию резца и схему распределения срезаемого слоя.

Число двойных ходов резцов n' , необходимое для обработки профиля одного зуба колеса:

$$n' = K \frac{h}{M} \text{ (дв. ход.)}, \quad (8)$$

где h – полная высота зуба на внешнем торце, м; M – ширина реза одного резца, м; K – коэффициент, зависящий от схемы распределения срезаемого слоя.

Рекомендуемые значения коэффициента K и ширины срезаемой стружки M приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Рекомендуемый коэффициент K для резцов с дифференцированными схемами резания

Тип резцов	Схема распределения срезаемого слоя	
	параллельная	распределенная
Открытый	0,9	1
закрытый	0,75	0,85

Таблица 2 – Рекомендуемая ширина реза M , мм, одного резца при чистовом нарезании прямозубых конических колес специальными резцами

Модуль, мм	Твердость обрабатываемого материала, HV		
	170-223	223-269	269-321
1	0,213	0,178	0,140
2	0,249	0,195	0,159
3	0,284	0,213	0,178
4	0,322	0,250	0,213
5	0,374	0,355	0,322
6	0,427	0,390	0,357
7	0,480	0,427	0,392
8	0,532	0,462	0,427

При предъявлении высоких требований к качеству поверхности, ширину реза M необходимо уменьшить на 25%. Если требования к шероховатости поверхности невысокие, ширину площадки резания и скорость резания необходимо увеличить на 20%.

Проведена реализация результатов и расчет экономической эффективности обработки при производстве изделий «Колесо» и «Шестерня» с прямозубым коническим венцом на ОАО «Орелстроймаш». Экономический эффект составил более 200 тыс. рублей в год.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В представленной научно-квалификационной работе изложена совокупность технических и технологических решений, направленных на повышение производительности и точности, а также снижение шероховатости обработки прямозубых конических колес зубостроганием за счет использования резцов с дифференцированными схемами резания и управления технологическими параметрами процесса.

2. На основе комплексного анализа геометрических, кинематических и силовых параметров зубострогания прямозубых конических колес разработана математическая модель процесса позволяющая связать точность и шероховатость обрабатываемой поверхности с параметрами технологической системы (оборудованием, изделием, инструментом) и режимами обработки. Экспериментально подтверждено, что различия между расчетными и экспериментальными значениями параметров точности и шероховатости не превышают 15%, что подтверждает адекватность полученных зависимостей.

3. Разработан алгоритм, позволяющий управлять зубостроганием прямозубых конических колес, основанный на использовании полученных зависимостей процесса обработки. Использование данного алгоритма позволяет как прогнозировать точность и шероховатость обрабатываемого изделия, так и определять режимы обработки и конструкцию инструмента в зависимости от требуемых параметров качества (точности и шероховатости).

4. Предложены конструкции специального инструмента – резцов с дифференцированными схемами резания, позволяющих снизить амплитуду силы резания и равномерно её перераспределить, а также две схемы разделения срезаемого слоя по ступеням режущего инструмента – параллельная и распределенная.

Рассчитаны аналитически и подтверждены экспериментально величины конструктивных подач предложенных резцов:

- по вершинному режущему лезвию $S_{КПР.В} = (1,2 \div 1,3) \frac{1}{T}$;

- по боковым режущим лезвиям $S_{КПР.Б} = (0,9 \div 1,0) \frac{1}{T}$.

5. Разработаны практические рекомендации по выбору режимов резания для обработки прямозубых конических колес зубострогальными резцами с дифференцированными схемами резания, направленные на повышение производительности процесса. Установлено:

- производительность процесса зубострогания прямозубых конических колес при использовании инструмента с дифференцированными схемами резания повышается в 1,5 – 1,8 раза при сохранении точностных параметров за счет увеличения подачи и сокращения числа проходов;

- использование резцов с дифференцированными схемами резания открытого типа позволяет повысить точность обрабатываемых колес на одну степень при сохранении производительности процесса за счет снижения амплитуды силы резания и более равномерного распределения нагрузки по ступеням инструмента. Закрытый тип резцов снижает кинематическую точность на 15% по сравнению с открытым;

- стойкость резцов с параллельной схемой резания увеличивается по сравнению с обычными в 1,2 – 1,5 раза. Стойкость резцов с распределенной схемой резания увеличивается по сравнению с обычными в 1,6 – 2 раза.

б) Произведена апробация результатов исследования на предприятии ООО «Орелстоймаш». Внедрен прогрессивный технологический процесс, основанный на использовании алгоритма управления процессом зубострогания прямозубых конических колес, включающий использование специальных резцов с рекомендуемой конструктивной подачей и предложенные режимы резания. Экономический эффект от внедрения более 200 тыс. руб. в год.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Канатников, Н.В. Математическая модель схемы формообразования профиля зуба прямозубого конического колеса зубострогальными резцами [Текст] / Н.В. Канатников, А.Н.Дерли // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2011. – №6. – С.37-42.

2. Канатников, Н.В. Определение составляющих силы резания возникающей в процессе нарезания конического прямозубого колеса инструментом с прямолинейными режущими кромками [Текст] / Н.В. Канатников, А.В. Хандожко, Г.А. Харламов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2011. – №6/3. – С.26-34.

3. Канатников, Н.В. Повышение эффективности обработки конических зубчатых колес среднего модуля [Текст] / Н.В. Канатников, А.А. Ревенков // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2012. – №3/3. – С.24-33.

4. Канатников, Н.В. Влияние угла наклона тыловой кромки зубострогальных резцов на силу резания. [Текст] / Н.В. Канатников, Г.А. Харламов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2012. – №2/6. – С.40-46.

5. Канатников, Н.В. Зубострогальные резцы с дифференцированными схемами резания. [Текст] / Н.В. Канатников, Г.А. Харламов, А.В. Канатников // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии.* – 2013. – №3-2. – С.136-141.

6. Канатников, Н.В. Определение средней высоты профиля шероховатости, возникающей в процессе зубострогания конических зубчатых колес. [Текст] / Н.В. Канатников, Г.А. Харламов // *Известия ТулГУ. Технические науки.* Вып. 8. – 2013. – С.117-121.

Список публикаций в других изданиях:

7. Канатников, Н.В. Влияние геометрических параметров зубострогального резца на осевые составляющие силы резания [Текст] / Н.В. Канатников, Г.А. Харламов // *«Фундаментальные проблемы техники и технологии», «Технология 2012».* Материалы XV Международной научно-технической конференции. - Орел: Госуниверситет – УНПК, 2012. – С.183.

8. Канатников, Н.В. Определение погрешностей изготовления прямозубых конических колес, вызванных деформацией технологической системы [Текст] / Н.В. Канатников, С.И. Брусов, Г.А. Харламов // *«Высокие технологии в машиностроении».* Материалы Международной научно-технической конференции. - Курган: КГУ, 2012. – С. 51-55.

9. Канатников, Н.В. Возможности повышения производительности процесса зубострогания конических зубчатых колес [Текст] / Н.В. Канатников, Г.А. Харламов, А.В. Канатников // *Актуальные проблемы техники и технологии машиностроительного производства: Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции.* - Орел: Госуниверситет – УНПК, 2013. – С.30-32.

Подписано в печать 03.04.2014 Формат 60×84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Times New Roman. Печать электрографическая. Усл. печ. л. 1. Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ №06ОП/14

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК» 302030, г. Орел, ул. Московская, 65