

На правах рукописи



НИЗАМОВ РАВИЛЬ САЛИМОВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЦИЗИОННОЙ ШТАМПОВКИ  
ЗУБЧАТЫХ ВЕНЦОВ КОНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ

Специальность 2.5.7 Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орёл  
ОГУ им. И.С. Тургенева  
2023

Работа выполнена в Набережночелнинском институте Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет».

**Научный  
руководитель:**

**Панкратов Дмитрий Леонидович**

доктор технических наук, профессор, НЧИ  
ФГБОУ ВО «Казанский (Приволжский)  
федеральный университет», кафедра  
«Машиностроение»

**Официальные  
оппоненты:**

**Сосёнушкин Евгений Николаевич**

доктор технических наук, профессор кафедры  
систем пластического деформирования ФГБОУ  
ВО "МГТУ "СТАНКИН";

**Пасынков Андрей Александрович**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры «Механика пластического  
формоизменения» ФГБОУ ВО  
«Тульский государственный университет».

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова».

Защита состоится «15» июня 2023 г. в 11 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.353.02 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» по адресу: 302015, г. Орел, Наугорское ш., д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» ([www.oreluniver.ru](http://www.oreluniver.ru)) и в фундаментальной библиотеке по адресу: 302028, г. Орел, пл. Каменская, д. 1.

Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» ([www.oreluniver.ru](http://www.oreluniver.ru)) и на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации ([www.vak.minobrnauki.gov.ru](http://www.vak.minobrnauki.gov.ru)).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

24.2.353.02, к.т.н.



О.Г. Кожус

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

Повышение мощности и грузоподъёмности грузовых автомобилей вызвало острую необходимость производства ведущих мостов, способных выдерживать повышенный крутящий момент. Основной проблемой является ограничение возможного увеличения массы и габаритов ведущих мостов. Таким образом, задача по увеличению крутящего момента передаваемого ведущим мостом сводится к задаче повышения механических характеристик конических шестерён, входящих в состав дифференциала. Ряд механических характеристик сталей и сплавов: ударная вязкость, пластичность, сопротивление разрушению существенно зависят от волокнистой макроструктуры, которая формируется в результате пластического деформирования при штамповке деталей. Использование последующей обработки резанием для окончательного формирования профиля зуба приводит к подрезанию волокон металла и снижению механических свойств шестерён. В настоящее время в отечественной промышленности отсутствуют научно обоснованные методы проектирования технологических процессов и штампового инструмента для производства конических шестерён методом пластической деформации с зубчатым венцом, не требующим последующей механической обработки. В связи с этим, актуальной является разработка процесса получения профиля зуба без последующей обработки резанием - методом прецизионной штамповки. Это позволит обеспечить точность геометрических размеров отштампованных зубьев, а также повышение максимального крутящего момента, передаваемого дифференциалом, без увеличения его размеров и массы. Работа основывается на исследованиях и достижениях в области повышения точности и эффективности технологических процессов объёмной штамповки: В.Г. Шibaкова, Ф.И. Антонока, А.Т. Крука, Е.Н. Ланского, А.В. Сафонова, В.Л. Колмогорова, В.Ю. Лавриненко.

**Цель диссертационной работы** – повышение эксплуатационных свойств и размерной точности зубчатых венцов конических колёс без механической обработки, полученных прецизионной штамповкой.

**Объект исследования** – технологический процесс прецизионной штамповки зубьев конических шестерён.

**Предмет исследования** – закономерности формирования размерной точности и эксплуатационных свойств зубьев конических шестерён, получаемых в процессе прецизионной штамповки (горячая объёмная штамповка и последующая холодная калибровка повышенной точности).

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать комбинированный процесс прецизионной штамповки (горячая объёмная штамповка и последующая холодная калибровка повышенной точности) зубчатых венцов без механической обработки.

2. Установить закономерности формирования точности и повышенных эксплуатационных свойств зубчатых венцов конических шестерён, получаемых прецизионной штамповкой (горячая объёмная штамповка и последующая холодная калибровка).

3. Апробировать разработанные и научно обоснованные технические решения в производственных условиях.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

- научно обоснован новый процесс получения зубчатых венцов конических передач, обеспечивающий требуемую точность (кавалитет IT7) и упрочнение рабочих поверхностей изделия, состоящий из горячей объёмной штамповки и последующей холодной калибровки повышенной точности;

- установлены новые параметры обеспечения рационального напряжённо-деформированного состояния при холодной калибровке выпуклой конфигурации припуска;

- определён рациональный диапазон высоты припуска выпуклой формы под холодную калибровку зубчатого венца в зависимости от условий контактного трения.

**Методы исследований.**

Все исследования осуществлялись на основе системного подхода. Исследование особенностей формоизменения, напряжённого и деформированного

состояния произведено методом конечных элементов в программе QForm с использованием многофакторного эксперимента. Исследование макро- и микроструктуры зубьев шестерён, полученных при опытной штамповке, и стендовые испытания проведены в лаборатории на аттестованном оборудовании.

### **Практическая значимость.**

Разработан комбинированный процесс прецизионной штамповки, состоящий из горячей объёмной штамповки и последующей холодной калибровки повышенной точности, обеспечивающий требуемую точность (квалитет IT7) зубчатых венцов конических передач с модулем до 8,5.

Результаты диссертационной работы апробированы на Кузнечном заводе ПАО «КАМАЗ» (Протокол исследования № 17-17300-20149-2020 от 21.05.20г. по результатам испытаний межколёсных дифференциалов мод. 6520, укомплектованных сателлитами и шестернями, изготовленных их сталей 18ХГР и 25Х5М, методом прецизионной штамповки). По результатам стендовых испытаний, проведённых в соответствии с ГОСТ Р 53445-2009, показано повышение долговечности межколёсного дифференциала в 2,5 раза по сравнению с зубьями шестерён, полученными обработкой резанием.

### **Положения, выносимые на защиту:**

- научно обоснованный процесс прецизионной штамповки зубчатых венцов конических передач, состоящий из горячей объёмной штамповки и последующей холодной калибровки повышенной точности, обеспечивающий высокую производительность процесса, стойкость штамповой оснастки при получении поковки, а также позволяющий достичь необходимую точность и повышенные механические характеристики отштампованного зубчатого венца конических передач;

- параметры (радиус и высота выпуклого припуска, температура заготовки перед деформацией), обеспечивающие рациональное напряжённо-деформированное состояние при холодной калибровке выпуклой конфигурации припуска в области пятна контакта зубьев и снижающие вероятность возникновения микроразрушений подповерхностных слоёв металла;

- рациональный диапазон высоты припуска выпуклой формы под холодную калибровку зубчатого венца в зависимости от условий контактного трения.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Основные результаты диссертационной работы соответствуют направлению исследования паспорта научной специальности 2.5.7 – «Технологии и машины обработки давлением», а именно пункту 3 - методы деформирования, формирующие в материалах структуру с комплексом физико-механических свойств, обеспечивающих повышение возможностей пластического формообразования заготовок и последующей эксплуатации изделий.

**Личный вклад автора** в диссертационную работу заключается в выполнении теоретических и экспериментальных исследований, включая имитационное моделирование процессов горячей объёмной штамповки и холодной калибровки, разработку технологического процесса прецизионной штамповки и его реализацию в производстве, лабораторные исследования макро- и микроструктуры полученных образцов, в анализе и обобщении полученных данных.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты, полученные в работе, опубликованы в статьях, доложены и обсуждены на заседаниях кафедры «Машиностроение» в 2017-2021г.г., а также всероссийской научно-практической конференции «Камские чтения» (г. Набережные Челны, 2017г), международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы» (г. Казань, 2017, 2018, 2019г.), международной научно-практической конференции «Междисциплинарность научных исследований как фактор инновационного развития» (г. Магнитогорск, 2020г), Международной научно-практической конференции «Научные революции как ключевой фактор развития науки и техники» (г. Тюмень, 2021г).

**Структура и объем диссертации:** диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов, заключения, библиографического списка,

включающего 114 наименований. Работа изложена на 131 странице машинописного текста, содержит 55 рисунков, 15 таблиц.

**Публикации:** по теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 4 статьи SCOPUS, 1 статья Web of Science, а также 6 статей в материалах международных, всероссийских и республиканских конференций.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

**Во введении** обоснована актуальность рассматриваемой в работе научно-технической проблемы, изложены цель и задачи работы, методы исследования, научная новизна, практическая ценность и реализация работы, приведена информация об апробации работы, публикациях и структуре диссертационной работы.

**В первой главе** проведён анализ существующих способов получения зубчатого венца шестерён пластическим деформированием. К ним относятся накатка зубьев, калибровка зубьев шестерней раздачей коническим пуансоном и высокоточная объёмная штамповка методом ортогональной экструзии в закрытых штампах. Во всех указанных способах формообразование зубьев производится за счёт пластической деформации, однако ни один из них не позволяет исключить окончательную механическую обработку резанием. Для силовых конических передач транспортных средств норма точности по пятну контакта назначается по более высоким нормам точности относительно других показателей качества. Следует отметить, что погрешность профиля и направление зуба для конических колёс в этом случае не нормируется. Точность формы боковых поверхностей и точность направления зуба могут оцениваться по полноте пятна контакта, размеры которого устанавливаются обычно по результатам испытания под нагрузкой. Контакт зубьев в паре определяется величиной суммарного пятна контакта по длине и высоте, отклонением межосевого расстояния и отклонением суммарной зоны касания.

В качестве метода формообразования рабочих поверхностей зубчатого венца без применения механической обработки, целесообразно применение

комбинированной технологии, состоящей из горячей объёмной штамповки, термической обработки, дробеочистки и последующей холодной калибровки поковки повышенной точности. При прецизионной штамповке зубчатый профиль конических колёс формируется как негативный отпечаток в начале в штампе при ГОШ, а затем в штампе холодной калибровки зубчатого венца. Такой технологический процесс обеспечивает высокую производительность процесса, стойкость штамповой оснастки при получении поковки, и позволяет достичь необходимой точности (кавалитет IT7) и повышенных механических характеристик отштампованного зубчатого венца.

В поковках, произведённых по типовой технологии горячей объёмной штамповки, образуются дефекты заштампованной окалины глубиной до 63мкм. Наличие такого дефекта, являющегося концентратором напряжений, крайне негативно сказывается на долговечности зубчатых передач при эксплуатации. Предложены технологические приёмы, существенно уменьшающие появление такого дефекта при горячей объёмной штамповке шестерён (Рисунок 1).

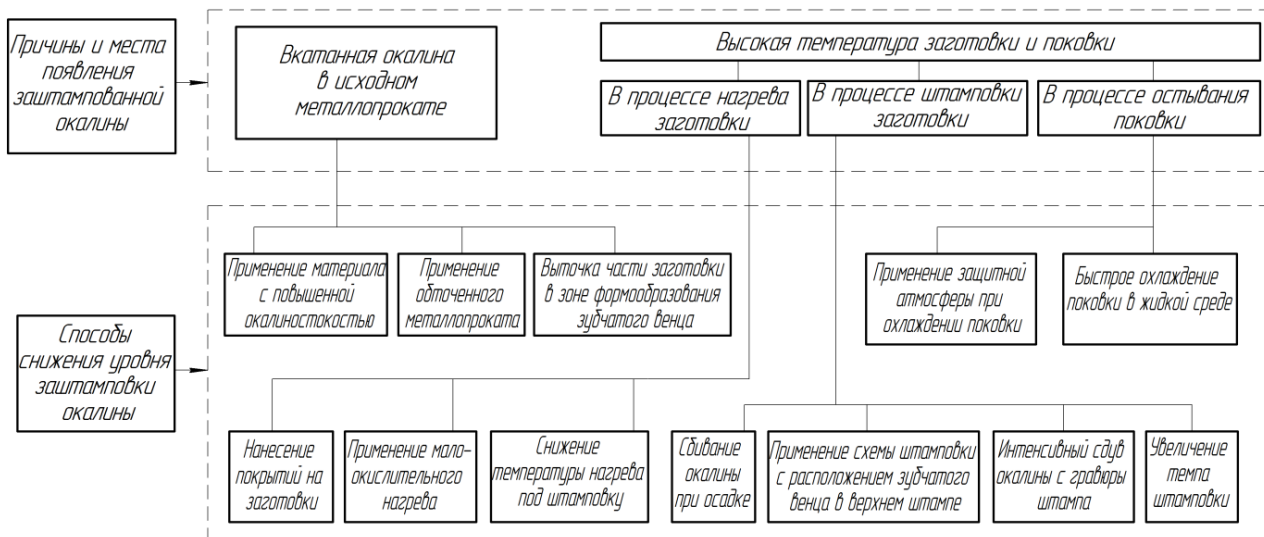


Рисунок 1 - Причины и способы предотвращения заштамповки окалины в зубчатый венец шестерён

Таким образом, сформулированы следующие рекомендации для разработки технологического процесса горячей объёмной штамповки. Для исключения наследования в области зубчатого венца включений вкатанной окалины глубиной до 0,2мм от горячекатаного металлопроката следует применять металлопрокат



первой группы качества поверхности или обточенную в зоне, приходящейся на формирование зубчатого венца, заготовку. Снижение температуры заготовки до 1050°С вместо 1200°С позволит уменьшить образование окалины на 40%, одновременно происходит снижение пластичности материала заготовки и увеличение силы штамповки на 30%, что является приемлемым. Для уменьшения окалинообразования нагрев следует проводить в атмосфере, содержащей минимум кислорода. Заштамповку окалины непосредственно в процессе горячей объёмной штамповки можно минимизировать путём выбора наиболее эффективной, с точки зрения сбивания окалины, схемы осадки на первом переходе.

**Вторая глава** содержит описание метода исследования процесса холодной калибровки повышенной точности. Исследование проводилось в программном комплексе QForm V9.0.8. Имитационное моделирование проведено на цилиндрических образцах с припуском на торцевой поверхности трёх типов: плоским, выпуклым и вогнутым (Таблица 1). Благодаря постепенному увеличению площади соприкосновения калибруемой поверхности горячештампованной поковки и штампового инструмента, в случае деформирования припуска переменного сечения сила деформирования растёт постепенно до момента выборки высоты припуска, что при применении гидравлического пресса позволяет обеспечить остановку по достижении силы деформирования. Это увеличивает точность холодной калибровки вне зависимости от вариабельности иных факторов (разброс механических свойств материала, разброс высоты горячештампованной поковки).

Необходимо подобрать величину деформации ( $\epsilon, \%$ ), значение радиуса припуска ( $R, \text{мм}$ ) и температуру ( $T, ^\circ\text{C}$ ) образца таким образом, чтобы получить значение интенсивности напряжений в центральной области торца образца, не превышающего предела прочности материала, и не допустить перенаклёп. Величину деформации ( $\epsilon, \%$ ) на образцах принимаем 4%, которая соответствует моменту полной выборки припуска 1,5мм, и 6%, соответствующей уменьшению высоты на 2,4мм, при превышении которой наблюдается значительное изменение

формы самого образца. Упругой деформацией деформацией и анизотропией механических свойств пренебрегаем, критерий пластичности принят в виде:

$$\sigma_s = K\varepsilon_i^n \quad (1.1)$$

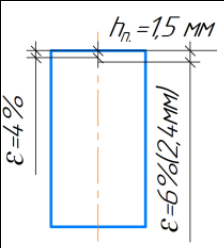
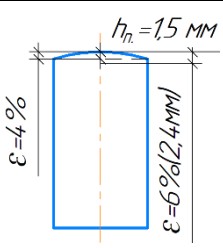
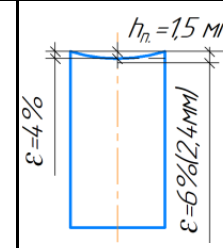
константы  $K$  и  $n$  определяются по результатам испытаний на растяжение материала шестерни – стали марки 18ХГР. Температура ( $T, ^\circ\text{C}$ ) образца перед деформацией выбрана для условий работы в нормальных условиях ( $20^\circ\text{C}$ ) и для условий, позволяющих снизить силу штамповки, не допуская при этом начала процесса разупрочнения. Зависимость напряжённо-деформированного состояния в центральной области торца образца от значения радиуса припуска, степени деформации и температуры будет представлена уравнением регрессии типа:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + e, \quad (1.2)$$

где  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$  - коэффициенты регрессии,  $e$  - случайная ошибка (отклонение),  $\beta_0$  - свободный член.

В третьей главе проведена обработка результатов имитационного моделирования (таблица 1).

Таблица 1. Результаты имитационного моделирования

Форма припуска			
Степень деформации в центральной части образца	0,03–0,04	0,19–0,22	0,02
Интенсивность напряжений в центральной части образца, МПа	125–170	60–200	0–25

Наиболее интенсивные деформации поверхности в центральной части образца претерпевает заготовка с выпуклым припуском в среднем 0,19-0,22 против 0,02-0,04 для плоской и вогнутой формы припуска. Кроме того, как показали металлографические исследования, формируется более плотная волокнистая структура и мелкозернистая микроструктура, что сказывается на эксплуатационных свойствах калибруемой плоскости. По сравнению с плоской и

вогнутой формами, выпуклая форма припуска обеспечивает наибольшие значения сжимающих напряжений в центральной области торца образца, снижающих вероятность возникновения микроразрушений подповерхностных слоёв металла.

Зависимость напряжённого состояния в центральной области торца образца (1.3) от значения радиуса припуска, степени деформации и температуры заготовки перед деформацией представлена функцией:

$$\sigma_i = 422,1712 + 6,0875 * \varepsilon + 3,4993 * R - 0,4698 * T, \text{ МПа} \quad (1.3)$$

Статистическая значимость полученной зависимости проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации 99.11% общей вариабельности  $\sigma_i$  объясняется изменением факторов  $\varepsilon$ ,  $R$ ,  $T$ .

Таким образом, уравнение для вычисления значения радиуса припуска выпуклой формы будет иметь вид:

$$R = (\sigma_i - 422,1712 - 6,0875 * \varepsilon - 0,4698 * T) / 3,4993, \text{ мм} \quad (1.4)$$

С целью оценки величины пластических деформаций и напряжений в зависимости от относительной высоты припуска проведено моделирование образца трапецидальной формы с выпуклым припуском, сечение которого подобно сечению зуба конусной шестерни. При этом высота припуска назначена в процентном соотношении к формируемому пятну контакта шириной  $L$  (Рисунок 2), являющейся хордой сектора окружности радиусом  $R$ , и для него справедлива геометрическая зависимость:

$$h = R - (R - \sqrt{R^2 - L^2/4}), \text{ мм} \quad (1.5)$$

Моделирование проведено для трех вариантов смазки: стеарат цинка с коэффициентом трения 0,1; водно-графитовая смесь с коэффициентом трения 0,2; минеральное масло с коэффициентом трения 0,3.

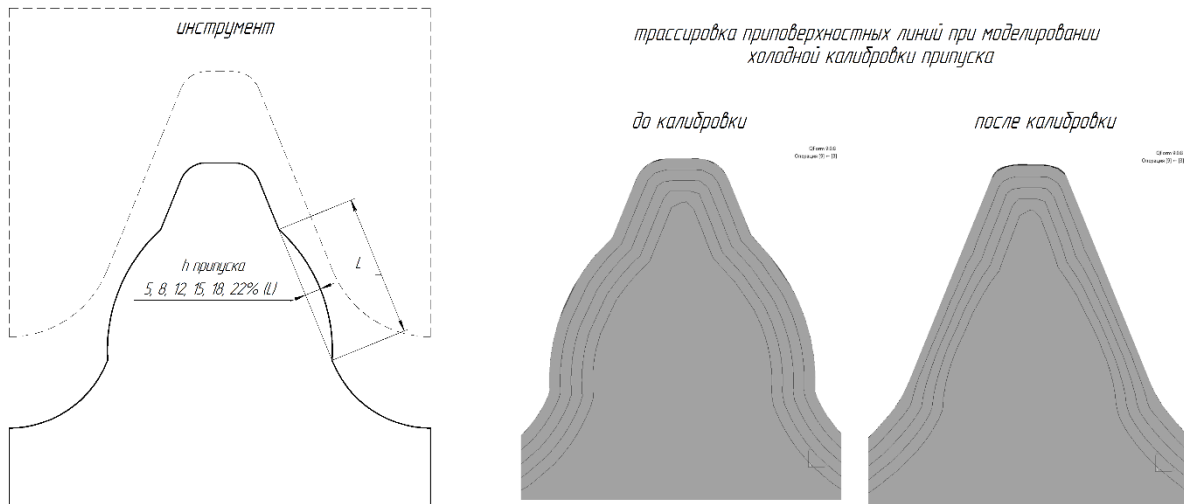


Рисунок 2 - Трапецидальный образец.

Из результатов моделирования (Таблица 2) видно, что наиболее равномерное деформированное и напряжённое состояние по сечению образца соответствует высоте припуска  $h=0,12L$ .

Для значения  $h=0,15L$  видно зарождение поднутрения у основания трапеции. Дефект в виде складки образуется при высоте припуска более 12% и возникает вследствие перемещения излишка металла у основания зуба 2 в направлении движения калибрующего инструмента 1 (Таблица 3). С увеличением коэффициента трения с 0,1 до 0,3 высота припуска, исключая складкообразование, уменьшается. Таким образом, с точки зрения обеспечения равномерного НДС без образования поднутрения и складкообразования, рациональной высотой выпуклого припуска будет значение не более 12% от ширины основания припуска  $L$  (Рисунок 3). С учётом зависимостей (1.4 и 1.5) при известном значении ширины пятна контакта зубьев конической шестерни возможно рассчитать радиус и высоту припуска под последующую калибровку и, при необходимости, скорректировать значение температуры поковки для исключения попадания в область критических деформаций и превышения интенсивности напряжений, превышающих предел прочности материала поковки.

Таблица 2. Влияние фактора трения на НДС при холодной калибровке

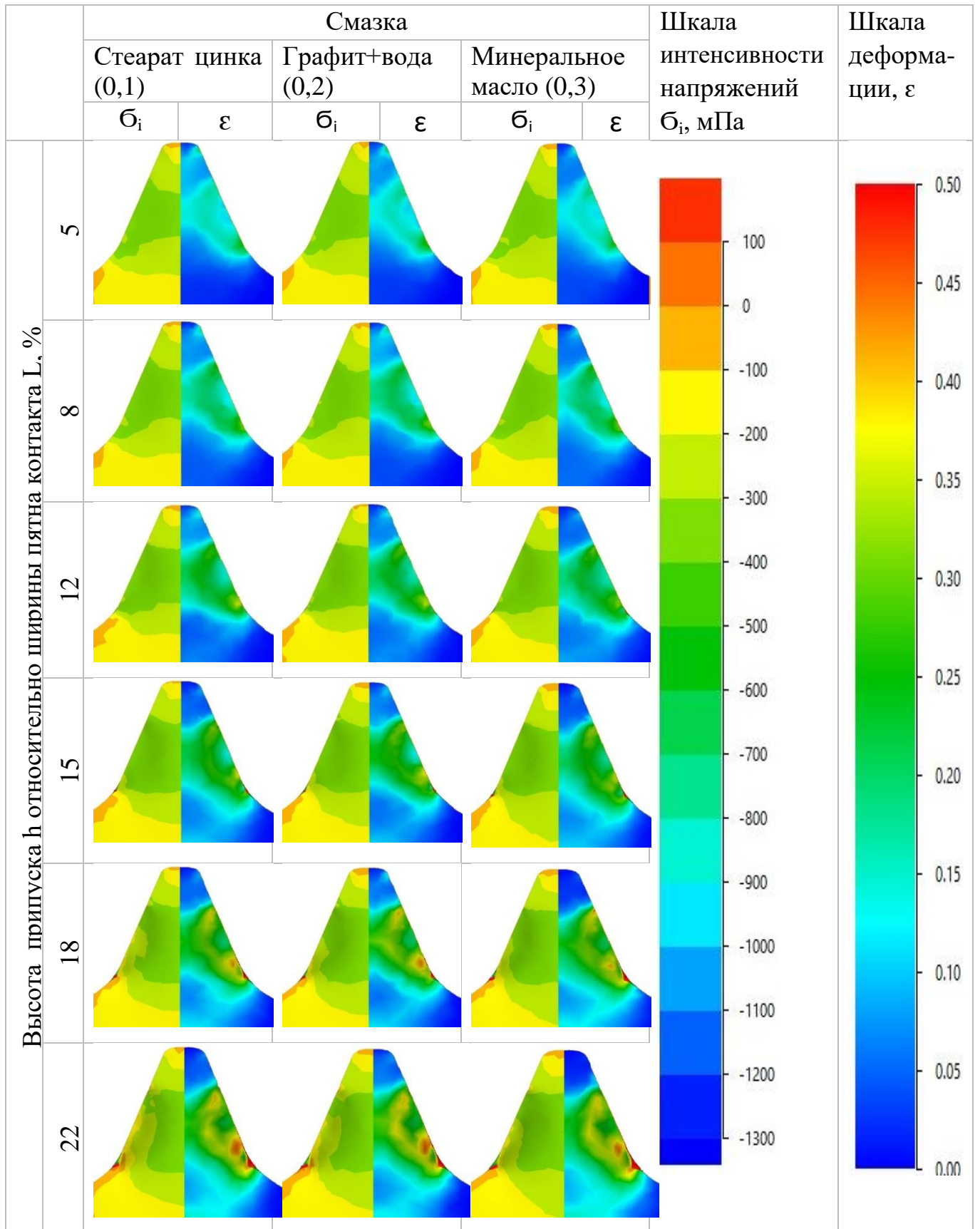
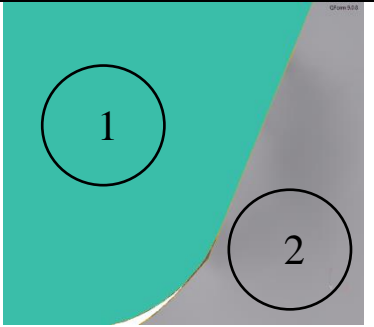
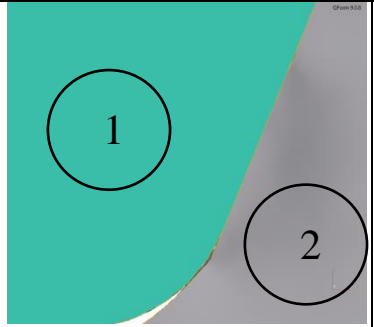



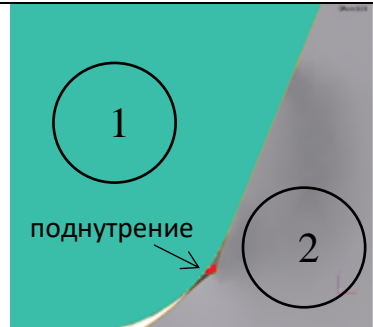

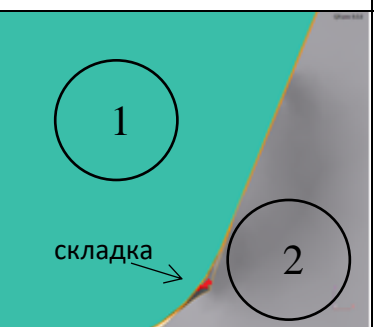
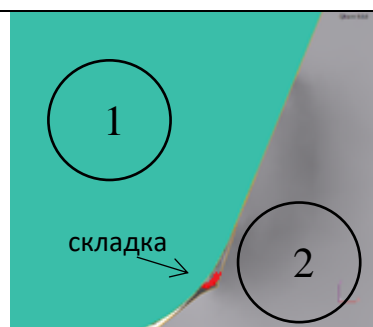


Таблица 3. Образование складки

		Смазка		
		Стеарат цинка(0,1)	Графит+вода (0,2)	Минер. масло(0,3)
Высота припуска $h$ относительно ширины пятна контакта $L$ , %	12			
	15			
	18			

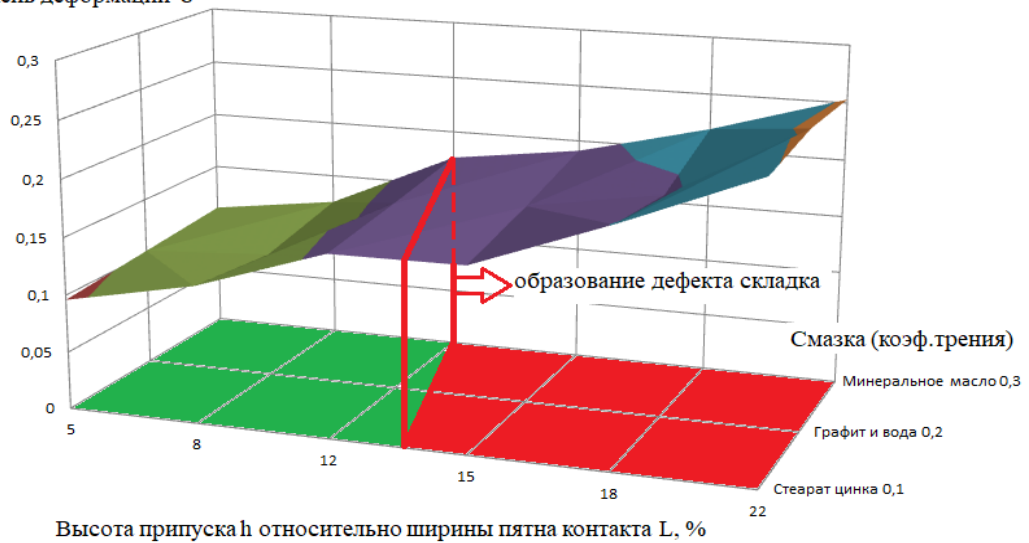
Степень деформации  $\epsilon$ 

Рисунок 3. Зависимость значения пластической деформации от высоты припуска и коэффициента трения.

В четвертой главе приведены результаты апробации прецизионной штамповки (горячая объемная штамповка и последующая холодная калибровка) на примере изготовления штамповки детали «Сателлит межколесного дифференциала» из стали марки 18ХГР на Кузнечном заводе ПАО«КАМАЗ».

Для практической реализации прецизионной штамповки при проектировании чертежа и 3D модели поковки на обрабатываемые поверхности припуски и допуски назначены согласно ГОСТ 7505-89, а на поверхности зубьев в области формирования пятна контакта назначен припуск выпуклой формы высотой 12% от ширины основания припуска L под последующую холодную калибровку. В результате совмещения 3D модели поковки и конфигурации припуска на калибровку в CAD системе получена твердотельная модель с зубчатым венцом поковки после ГОШ под последующую холодную калибровку повышенной точности. Далее формировалась твердотельная 3D модель вставки калибровочного штампа, как негативный отпечаток 3D модели детали.

Комбинированный технологический процесс прецизионной штамповки включает в себя следующие операции:

1. отрезка мерных заготовок от прутка металлопроката первой группы качества поверхности или обточка отрезанной заготовки в зоне, приходящейся на формирование зубчатого венца;
2. нагрев заготовок до температуры 1050°С в малоокислительной среде;
3. штамповка с предварительной осадкой заготовки, позволяющей ориентировать поверхности со сбитой окалиной в область гравюры штампа, формирующей зубчатый венец поковки;
4. термическая обработка горячештампованных поковок;
5. дробеочистка термообработанных поковок;
6. холодная калибровка поковок на гидравлическом прессе.

Эффективность принятых решений подтверждается результатом 3D сканирования штампованных сателлитов (Рисунок 4). Отклонения размеров по профилю зубьев в области пятна контакта не превышает 0,03 мм, что удовлетворяет допуску в конструкторской документации.

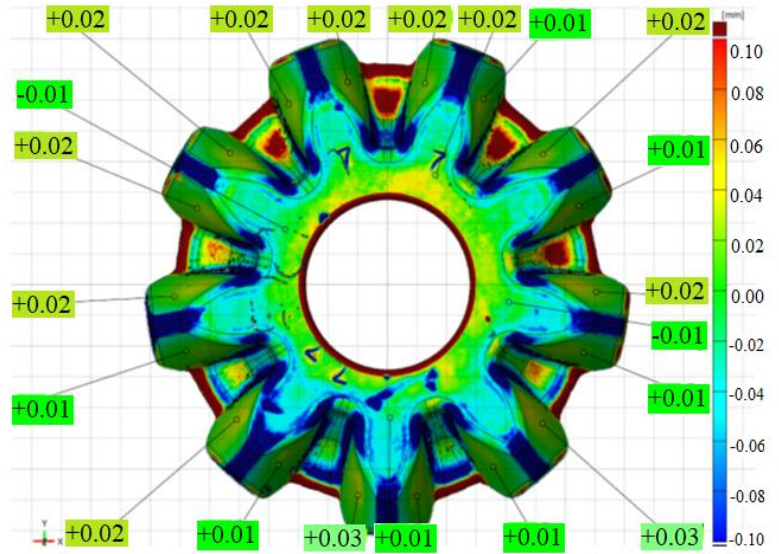
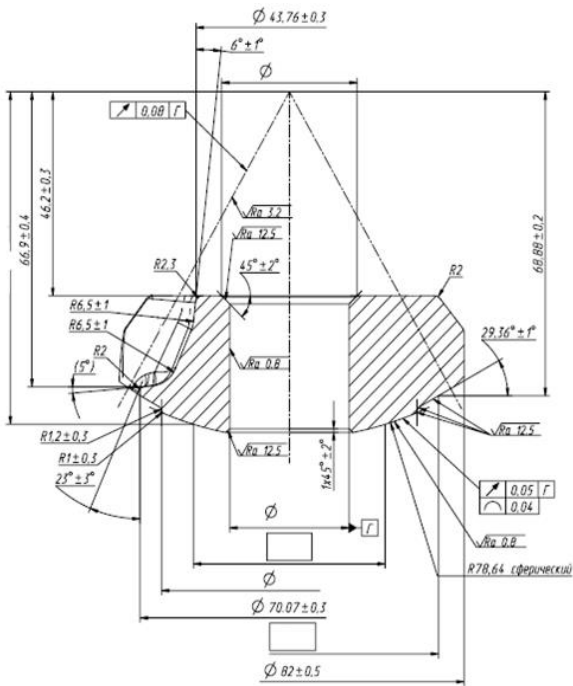


Рисунок 4. Эскиз сателлита и результаты сканирования .

В таблице 4 приведены визуализация деформаций и интенсивности напряжений в виде полигонов их распределения.

Таблица 4. Результаты моделирования

Деформации	Интенсивность напряжений
<p>QForm V8.0.7 - Максимальные деформации</p> <p>Диапазон шкалы: 0.100, 0.095, 0.090, 0.085, 0.080, 0.075, 0.070, 0.065, 0.060, 0.055, 0.050, 0.045, 0.040, 0.035, 0.030, 0.025, 0.020, 0.015, 0.010, 0.005, 0.000</p> <p>Значение поля: Макс: 0.855537, Мин: 0, В точках: 1</p> <p>Масштаб: x1</p>	<p>QForm V8.0.7 - Интенсивность напряжений [MPa]</p> <p>Диапазон шкалы: 800, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150, 100, 50</p> <p>Значение поля: Макс: 848.258, Мин: 23.9677, В точках: 1</p> <p>Масштаб: x1</p>

Моделирование показало распределение деформаций в области пятна контакта зубчатого венца. Металлографические исследования зубьев шестерён, полученных по разработанной технологии, показали огибающее профиль зуба, расположение сформировавшейся волокнистой макроструктуры, мелкозернистой микроструктуры и уменьшение глубины заштамповки окалины на калиброванной поверхности зубьев поковки на 60% с 63 мкм до 25 мкм (Рисунок 5). По результатам стендовых испытаний проведённых по утвержденной научно-технической программе-методике №37-104-17-1375 соответствующей ГОСТ Р 53445-2009 «Автомобильные транспортные средства. Передатки ведущих мостов. Методы стендовых испытаний» долговечность



межколесного дифференциала, укомплектованного полуосевыми шестернями и сателлитами, изготовленными методом прецизионной штамповки составила 108 часов 30 минут, что до 2,5 раз превысило долговечность межколесного дифференциала, укомплектованного полуосевыми шестернями и сателлитами, изготовленными по традиционной технологической схеме с механической обработкой зубьев.

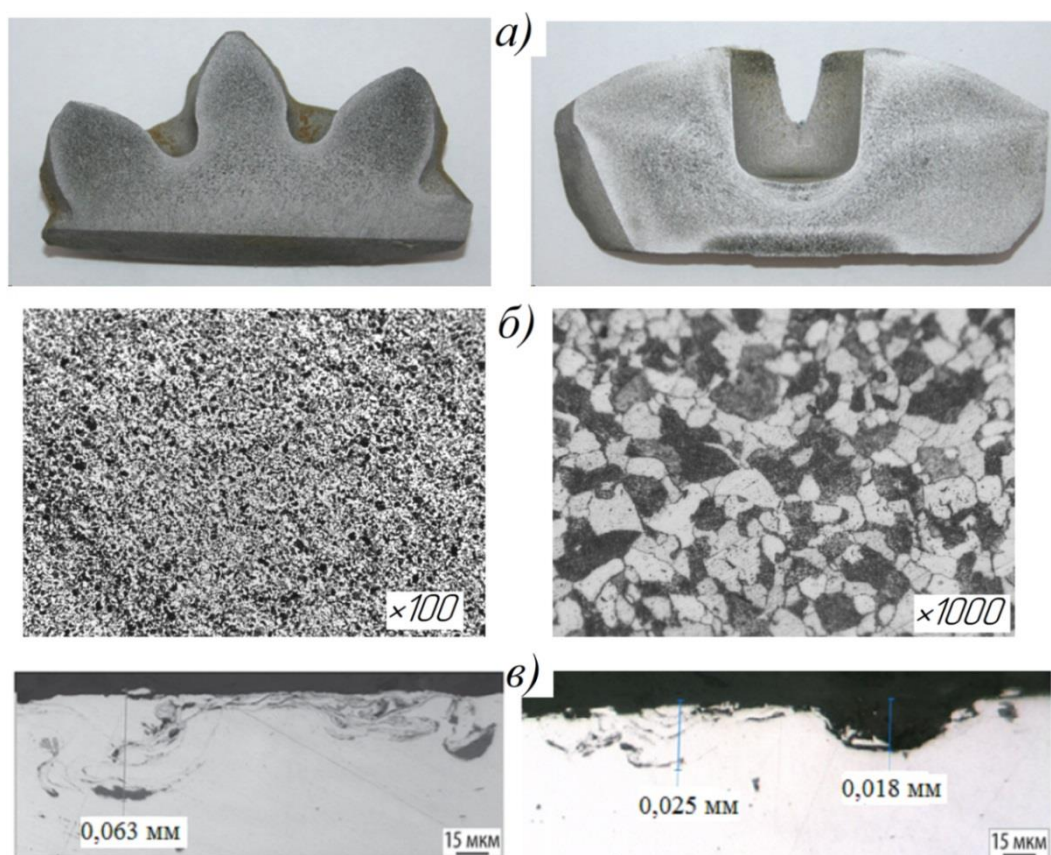


Рисунок 5. Результаты металлографического исследования зубьев шестерён полученной прецизионной штамповки: а — макроструктура зубьев поковки; б — микроструктура зубьев поковки; в — сравнение глубины заштампованной окалины на калиброванной поверхности зубьев поковки, полученной по типовой технологии штамповки и технологии прецизионной штамповки.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы:

1. Для исключения механической обработки зубчатых венцов при изготовлении конических колёс и улучшения их эксплуатационных свойств разработан процесс прецизионной штамповки, включающий горячую объёмную

штамповку полуфабриката с последующей холодной калибровкой, и установлены связанные с ним закономерности, что в совокупности является решением задачи, имеющей важное значение в автомобилестроении.

2. Применительно к разработке процесса прецизионной штамповки использовался системный подход с применением метода экспертных оценок, представленный в виде матрицы значимости параметров системы {М,З,О,Т,И,П,С} с точки зрения точности и качества поверхности получаемых поковок.

3. Выбраны технологические приёмы, существенно уменьшающие появление дефекта типа вкатанная или заштампованная окалина при горячей штамповке: применение металлопроката первой группы качества поверхности или частичная обточка заготовки, снижение температуры штамповки до 1050°C и использование малоокислительного нагрева, а также разработана схема осадки для интенсивного сбивания окалины с поверхности заготовки, находящейся в области формирования зубчатого венца. Результаты лабораторных исследований образцов, полученных в ходе опытных работ, показали уменьшение глубины заштамповки окалины на 60% с 63 мкм до 25 мкм.

4. Предложена форма выпуклого припуска на поверхностях полуфабриката, обеспечивающая их упрочнение в процессе устранения выпуклости холодной калибровкой. Для имитации процесса использован конечно-элементный анализ выравнивания выпуклого торца цилиндра, данные его локального упрочнения, преобразованные в регрессионную зависимость от размеров припуска, степени деформации и температуры, а также аналогичного моделирования на образцах трапецеидального сечения с применением различных смазок позволили установить предельную высоту стрелки припуска на зубчатых венцах – 12% от ширины основания, при которой калибровка поверхностей с нанесённым стеаратом цинка или графитом не образует складок и поднутрений.

5. По результатам стендовых испытаний, проведённых в соответствии с ГОСТ Р 53445-2009, показано повышение долговечности межколёсного дифференциала до 2,5 раз по сравнению с зубьями шестерён, полученными

обработкой резанием. Это стало возможным благодаря сформировавшейся волокнистой макроструктуре, огибающей профиль зуба, мелкозернистой микроструктуре и уменьшению глубины заштамповки окалины на калиброванной поверхности зубьев поковки.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

а) публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. В.Г.Шибakov, Д.Л.Панкратов, Р.А.Хайруллин, Д.Д.Панкратов, Р.С.Низамов. Обоснование требований к точности заготовки для прецизионной штамповки шестерен. Заготовительные производства в машиностроении. 2019.№ 7.С.310-312.

2. Шибakov В.Г., Панкратов Д.Л., Низамов Р.С., Хайруллин Р.А., Панкратов Д.Д. Целесообразность и возможность автоматизации прецизионной калибровки зубчатого венца шестерен. КШП ОМД, №11, 2019. с.28-33.

3. Панкратов Д.Л., Валиев А.М., Низамов Р.С., Низамова Л.М. Повышение точности поковок при калибровке горячештампованных полуфабрикатов. Заготовительные производства в машиностроении.2022.№ 6.

б) публикации SCOPUS и Web of Science

4. V G Shibakov, D L Pankratov, R S Nizamov and R A Hairullin. Surface quality assurance of ring gear during precision stamping of gearwheels. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 412 (2018).

5. V G Shibakov, D L Pankratov, R S Nizamov and R A Hairullin. Rationality and possibility of automation of precision calibration of gears. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 915 (2020).

6. В. Г. Шибakov, Д. Л. Панкратов, Р. В. Шибakov, Р. С. Низамов. Особенности формирования служебных свойств зубчатых передач, получаемых прецизионной штамповкой. Черные металлы, июль 2020 г., № 7 (1063), с.40-45.

7. В. Г. Шибakov, Д. Л. Панкратов, Р. В. Шибakov, Р. С. Низамов. Корректировка параметров прецизионной штамповки шестерен по результатам моделирования физических процессов при их химико-термической обработке. Черные металлы, март 2021 г., № 3 (1071), с.34-39

8. A M Valiev, D L Pankratov, L M Nizamova, RS Nizamov. Development of a Methodology for Evaluating the Impact of Technological Parameters of Hot Forging on Quality and Cost. *Helix* (2020) 10 (5): p 149-155.

г) статьи в материалах международных, всероссийских и республиканских конференций

9. Хайруллин Р.А., Низамов Р.С., Владимирова С.Г. Выбор метода штамповки, обеспечивающего получения рабочих поверхностей детали без применения механической обработки. «IX Камские чтения»: всероссийская научно-практическая конференция. (2017; Набережные Челны).

10. Хайруллин Р.А., Низамов Р.С., Панкратов Д.Л., Шibaков В.Г. Выбор рациональной системы переходов при прецизионной штамповке зубчатого венца шестерён. Материалы VIII Международной научно-технической конференции «ИМТОМ – 2017». Ч. 1. – Казань, 2017. – 388 с.

11. Шibaков В.Г., Панкратов Д.Л., Низамов Р.С., Хайруллин Р.А. Обеспечение качества поверхности зубчатого венца при прецизионной штамповке шестерён. Материалы VIII Международной научно-технической конференции «ИМТОМ – 2017». Ч. 1. – Казань, 2017. – 388 с., ил.

12. Шibaков В.Г., Панкратов Д.Л., Низамов Р.С., Низамова Л.М. Разработка рациональной компоновочной схемы штампового блока. Материалы X Международной научно-технической конференции «ИМТОМ – 2019». Ч. 2. – Казань, 2019. – 327 с., ил.

13. Шibaков В.Г., Панкратов Д.Л., Низамов Р.С., Низамова Л.М. Основные факторы, определяющие точность и качество зубчатого венца после горячей прецизионной штамповки и холодной калибровки. Международная научно-практическая конференция Междисциплинарность научных исследований как фактор инновационного развития. - Уфа: 2020. – 231с.

14. В. Г. Шibaков, Л. М. Низамова, Р. С. Низамов, Д. Л. Панкратов Особенности применения АСУ ТП холодной калибровки. Международной научно-практической конференция Научные революции как ключевой фактор развития науки и техники. – Тюмень: 2021. – С. 46-53.