

На правах рукописи



Филиппова Марина Владимировна

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ И РАЗРАБОТКА  
КОМПЛЕКСА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ  
ПОЛУГОРЯЧЕЙ БЕЗОБЛОЙНОЙ ШТАМПОВКИ**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Новокузнецк, 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном  
образовательном учреждении высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
Перетяцько Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, профессор кафедры  
«Обработка металлов давлением» ФГАОУ ВО «Сибирский  
федеральный университет» Сидельников Сергей Борисович

доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
главный специалист производственного комплекса «Салют»  
АО «ОДК», г. Москва Бурлаков Игорь Андреевич

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой  
«Металлургические технологии» Нижнетагильского техно-  
логического института (филиала) ФГАОУ ВО «Уральский  
федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина» Шевченко Олег Игоревич

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королева»

Защита диссертации состоится «25» мая 2021 г. в 10<sup>00</sup> в ауд. 3П на заседании дис-  
сертационного совета Д 212.252.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» по адресу: 654007, г. Новокузнецк, Кемеровская область –  
Кузбасс, Центральный район, ул. Кирова, зд.42, ФГБОУ ВО «СибГИУ».

Факс: (3843) 465792

E-mail: ds21225201@sibsiu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» [www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д212.252.01,  
д.т.н., профессор



О.И. Нохрина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Машины, механизмы и их детали при эксплуатации испытывают большие статические и динамические нагрузки, поэтому к таким деталям предъявляются высокие требования по прочности и надежности. При современном уровне машиностроительных технологий изготовление таких изделий возможно только ковкой или штамповкой. Процесс штамповки по сравнению с ковкой обеспечивает идентичность получаемых поковок, уменьшает их массу и характеризуется более высокой производительностью. Однако анализ различных способов металлообработки показывает, что в современном машиностроении преобладают самые трудоемкие, энергозатратные и материалоемкие способы получения готовых изделий путем облойной штамповки или обработки на металлорежущих станках.

Облойная штамповка проводится, как правило, за несколько переходов. При обрезке облоя (заусенца) теряется до 25 % металла, который идет в отходы. Основной составляющей себестоимости штампованных поковок является стоимость металла, достигающая 65–70 % от общей стоимости поковки. При дальнейшей обработке поковок и отливок на металлорежущих станках и получении готовых изделий потери металла в стружку составляют более 8 млн. т в год. Практика обработки изделий на металлорежущих станках показывает, что для снятия 1 т стружки требуется не менее 100 станко-часов. В связи с этим с целью сокращения потерь металла необходимо совершенствовать существующие, разрабатывать и внедрять новые основанные на безоблойной штамповке энерго- и ресурсосберегающие технологии для получения обработкой металлов давлением поковок, форма и размеры которых приближаются к форме и размерам готовой детали.

Существующие технологии штамповочного производства позволяют получать точные поковки без облоя с минимальными припусками на дальнейшую механическую обработку. Однако широкое внедрение технологии безоблойной штамповки сдерживается отсутствием способов получения точной мерной заготовки. Это объясняется наличием больших допусков (до 5 %) по диаметру горячекатаного металла и техническими сложностями в обеспечении точного дозирования длины и равенности торцов, отрезаемых от прутка на прессе заготовок. Существенную роль в разработке металлосберегающих технологий безоблойной штамповки играют теплотехнологии, обеспечивающие формирование необходимых пластических свойств металла, предопределяющие энергозатратность процесса деформации и качество поверхности готовых поковок. В настоящее время до 90 % стальных поковок производится посредством горячей объемной штамповки, которая сопровождается высокими потерями металла от угара, снижением качества поверхности вследствие окалинообразования и обезуглероживания стали.

Получение стальных изделий с заданными свойствами с помощью прогрессивных способов полугорячей (750–850 °С) штамповки представляет собой комплекс малоотходных технологий и сопряжено с решением ряда научно-технологических задач. Основными операциями этого комплекса технологий яв-

ляются: разделение металла на заготовки для безоблойной штамповки; нагрев заготовок до оптимальной температуры; безоблойная штамповка.

Таким образом, разработка комплекса технологий полугорячей безоблойной штамповки с учетом новейших достижений теории и технологии обработки металлов давлением является актуальной научно-практической задачей.

Работа выполнена в соответствии с основными задачами Государственной программы «Развитие науки и технологий» на 2013–2020 годы; в соответствии с приоритетным направлением развития науки, технологий и техники Российской Федерации от 2011 г. «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика»; гранта ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» («Разработка энергосберегающей технологии производства шаров большого диаметра») от 25.03.2014, № 1Д–14.

**Степень разработанности темы исследований.** Рассматривать технологию получения готовых изделий методом штамповки как комплекс, состоящий из отдельных взаимосвязанных между собой технологических операций, предложил А. М. Мансуров. Однако в настоящее время комплексный подход при разработке новых технологий штамповки отсутствует и все входящие в него операции рассматриваются отдельно.

Вопросами разделения металла на мерные заготовки методом резки металла в штампах или с применением пресс-ножниц занимались российские ученые В. Т. Мещерин, С. С. Соловцев, В. Т. Синицин, П. Е. Кислый и др. К недостаткам резки металла ножницами можно отнести погрешности размеров и массы полученных заготовок от номинала, которые составляют 7–10 %, а также значительные отклонения от исходной цилиндрической формы.

Значительно более эффективно можно получать мерные по объему заготовки при использовании станов поперечно-винтовой прокатки. Прокатанная шаровая заготовка имеет высокую точность по массе, хорошее качество поверхности и высокие механические свойства. Наибольший вклад в развитие технологии прокатки в винтовых калибрах внесли работы А. И. Целикова, Е. С. Рокотяна, С. П. Грановского, Э. Р. Шора, В. И. Котенка и др. Имеются одиночные примеры использования шаровой заготовки в штамповочном производстве, однако способы получения точных шаровых заготовок в настоящее время отсутствуют.

Перспективным направлением является снижение температуры нагрева заготовки, что позволяет значительно сократить потери металла от угара, расход топлива и электроэнергии при нагреве ТВЧ, исключить обезуглероживание и повысить качество поковки. Вопросам полугорячей штамповки посвящены труды Е. Н. Ланского, Л. Г. Овчинникова, В. А. Головина, О. Г. Прудко, и др. Однако в настоящее время научно обоснованная методика выбора оптимальной температуры нагрева металла для полугорячей штамповки отсутствует.

Исследованию процессов безоблойной штамповки были посвящены работы О. А. Ганаго и И. Я. Тарновского, С. А. Араповича, А. З. Журавлева, М. З. Альтмана, И. А. Норицина, И. Л. Акаро, В. Т. Мещерина, М. С. Эдуардова и др.

Штамповкой в закрытых штампах получают менее 10 % поковок. Это связано со сложностью получения точных по массе исходных заготовок. Использо-

вание точной шаровой заготовки позволит снизить усилие штамповки, уменьшить количество штамповых переходов и получить готовую поковку с минимальными припусками на механическую обработку.

Таким образом, анализ работ в области технологий горячей штамповки показывает, что наибольший положительный эффект энерго- и ресурсосбережения может быть получен только в том случае, если учитываются все операции комплекса технологий и их взаимосвязь. Такие разработки в настоящее время отсутствуют.

**Цель работы:** развитие научных основ, разработка процессов полугорячей безоблойной штамповки и создание комплекса ресурсосберегающих технологий производства стальных изделий ответственного назначения.

Для достижения цели работы были сформулированы следующие **задачи**:

1. Развить научные основы процессов получения точных по массе и размерам заготовок для безоблойной штамповки посредством разделения прутков на станах поперечно-винтовой прокатки и снижения температур нагрева металла:

– разработать новую методику расчета калибровки валков стана поперечно-винтовой прокатки с целью получения шаровых заготовок для полугорячей безоблойной штамповки стальных поковок;

– разработать новую калибровку валков шаропрокатного стана для производства шаровых заготовок повышенной точности по массе;

– с использованием детерминированных математических моделей исследовать напряженно-деформированное состояние металла в процессах прокатки шаровых заготовок на станах поперечно-винтовой прокатки, полугорячей штамповки и штамповки выдавливанием в закрытых штампах.

2. Исследовать пластичность, сопротивление деформации, угар сталей СтЗсп, 20, 20ХН, 40, 40Х, 40ХН, 65Г, 35ХГСА, 18ХГТ, 18Х2Н4МА и научно обосновать оптимальный интервал температур полугорячей штамповки.

3. Установить и научно обосновать зависимости и закономерности влияния формы, температуры нагрева заготовок, пластических и прочностных свойств металла на энергосиловые параметры процессов деформации, напряженно-деформированное состояние металла и вероятность дефектообразования.

4. Освоить в условиях стана поперечно-винтовой прокатки 40-80 новую калибровку и производство высокоточных шаровых заготовок диаметром до 120 мм с повышенным качеством поверхности и однородностью макроструктуры.

5. Разработать и внедрить в производство энерго- и ресурсосберегающий комплекс технологий полугорячей штамповки в закрытых штампах из шаровой заготовки поковок круглых в плане симметричных и несимметричных (относительно горизонтальной оси), типа «шестерня», и поковок, изготавливаемых прямым выдавливанием из цилиндрической заготовки, типа «корпус форсунки».

6. Внедрить в учебный процесс результаты теоретических и экспериментальных исследований способов полугорячей безоблойной штамповки и разработки комплекса ресурсосберегающих технологий производства стальных изделий ответственного назначения.

### **Научная новизна**

1. Разработаны концептуальные основы комплекса ресурсосберегающих технологий полугорячей безоблойной штамповки стальных изделий ответственного назначения.

2. На основе теоретических исследований разработана для производства новая научно обоснованная методика расчета калибровки валков стана поперечно-винтовой прокатки посредством разделения стальных прутков, шаровых заготовок повышенной точности по массе.

3. Впервые исследовано напряженно-деформированное состояние и использование ресурса пластичности металла в процессе разделения стальных прутков на станах поперечно-винтовой прокатки на шаровые заготовки повышенной точности по массе. Установлено влияние разработанной калибровки на распределение напряжений, деформаций, среднего нормального напряжения по объему шаровых заготовок и в перемычках.

4. Впервые для многокритериальной оптимизации температурных режимов полугорячей штамповки адаптирована и применена обобщенная функция желательности. На основе ее использования установлены оптимальные температурные интервалы нагрева исследуемых марок сталей, обеспечивающие получение поковок с заданными характеристиками качества.

5. Проведены комплексные исследования свойств сталей различных марок с предварительно деформированной (катаной) структурой. Получены новые количественные данные, установлены и научно обоснованы зависимости и закономерности влияния температурного фактора (в интервале температур полугорячей штамповки 600–1000 °С) на пластичность, сопротивление деформации и величину угара стали исследуемых марок.

6. На основе результатов физического и математического моделирования выявлены закономерности и получены новые данные по напряженно-деформированному состоянию и использованию ресурса пластичности при полугорячей безоблойной штамповке осесимметричных поковок и прямому выдавливанию прецизионных изделий. Установлено, что шаровая форма заготовки является более благоприятной в связи с тем, что диаметр шаровой заготовки больше диаметра равной по высоте цилиндрической заготовки и течение металла в радиальном направлении происходит более равномерно.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены следующие значимые результаты работы:

1. Разработана виртуальная модель шаропрокатного стана и проведено компьютерное моделирование, по результатам которого получены новые данные по заполнению калибров металлом, динамики изменения напряженно-деформированного состояния и силовым условиям при прокатке шаровых заготовок большого диаметра.

2. Разработаны фундаментальные основы ресурсосберегающей технологии нагрева металла под обработку давлением и расчет оптимальной температуры нагрева заготовок.

3. Разработана виртуальная модель и проведено компьютерное моделирование полугорячей штамповки в закрытых штампах из шаровой заготовки поковок круглых в плане, исследована динамика изменения напряженно-деформированного состояния металла и силовые условия штамповки.

4. Получены новые результаты исследования динамики заполнения металлом полости штампов; проведено компьютерное моделирование технологического процесса полугорячего выдавливания поковок типа «корпус форсунки» из точной цилиндрической заготовки; исследовано изменение напряженно-деформированного состояния металла при выдавливании поковок типа «корпус форсунки» из точной цилиндрической заготовки.

5. Разработана новая методика расчета калибровки валков стана поперечно-винтовой прокатки для производства геометрически точных шаровых заготовок с отклонением по массе не более 2 %.

6. Разработана новая калибровка валков стана поперечно-винтовой прокатки, изготовлены калиброванные валки для прокатки шаровых заготовок диаметром 60, 80, 90, 120 мм; технология внедрена в производство. Получены результаты исследования качества прокатанных шаров.

7. Разработана и внедрена в производство технология разделения металла на точные шаровые заготовки большого (90–120 мм) диаметра на станах поперечно-винтовой прокатки 40-80. Результаты исследования полученных заготовок показали отсутствие пористости в центральных слоях шара.

8. Разработаны и рекомендованы к внедрению новые данные температурных интервалов для полугорячей штамповки сталей СтЗсп, 20, 20ХН, 40, 40Х, 40ХН, 65Г, 35ХГСА, 18ХГТ, 18Х2Н4МА.

9. Разработаны ресурсосберегающие режимы нагрева шаровых заготовок для полугорячей штамповки, обеспечивающие заданное качество металлопродукции.

10. Установлено, что предложенный комплекс технологий полугорячей безоблойной штамповки, состоящий из разделения заготовок на станах поперечно-винтовой прокатки, нагрева до температуры полугорячей штамповки и полугорячей штамповки из шаровой заготовки в закрытых штампах, позволяет получать поковки высокого качества с заданными размерами.

11. Разработана и внедрена технология прецизионной полугорячей штамповки поковок круглых в плане из шаровой заготовки с исследованием динамики заполнения металлом полости штампа. Получены новые результаты исследования изменения силовых параметров и напряженно-деформированного состояния металла при штамповке из шаровой заготовки.

12. Разработан и внедрен технологический процесс полугорячего выдавливания поковок типа «корпус форсунки» для дизельных двигателей из точной цилиндрической заготовки.

13. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 22.03.02 «Металлургия» профиль «Обработка металлов давлением», магистров по направлению 22.04.02 «Металлургия» и аспирантов по направлению 22.06.01 «Технология материалов».

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использовали: моделирование процессов прокатки и штамповки с применением МКЭ в программах DEFORM-3D и QForm, при этом построение виртуальных объектов моделирования проводилось в CAD системах КОМПАС-3D и AutoCAD. Методы физического моделирования: метод определения деформированного состояния в пластической области измерением твердости, метод координатных сеток, тензометрирование, методика постадийного деформирования металла, метод оценки твердости, методы математической теории планирования эксперимента и математической статистики. Пластичность и сопротивление металла деформации исследовали методом испытания на высокотемпературное кручение. Угар стали исследовали гравиметрическим методом по потере полезной массы образцов. Результаты исследований обрабатывали с применением пакетов программ PTC Mathcad, MS Excel.

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

1. Научные основы разработки комплекса технологий полугорячей безоблойной штамповки: разделение металла на заготовки; нагрев металла под штамповку; способы штамповки поковок круглых в плане.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований получения шаровой заготовки на стане поперечно винтовой прокатки: калибровка прокатных валков, математические модели напряженно-деформированного состояния металла при прокатке, качество шаровой заготовки.

3. Методики расчета оптимальной температуры нагрева до температур полугорячей штамповки.

4. Разработанные виртуальные объекты для компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния металла при полугорячей штамповке в закрытых штампах, неравномерности деформации при штамповке, силовых условий штамповки из цилиндрической и шаровой заготовок.

5. Результаты: экспериментальных исследований шаропрокатного стана и качества шаровой заготовки; комплексных исследований сопротивления деформации, пластичности и угара стали некоторых марок в интервале температур полугорячей штамповки; штамповки поковок из шаровой заготовки с целью определения энергоэффективных режимов деформирования; проверки адекватности компьютерного моделирования при штамповке поковок из шаровой заготовки.

6. Новые технические и технологические решения, расширяющие возможности использования комплекса полугорячей безоблойной штамповки, повышающие конкурентоспособность изучаемых процессов.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций подтверждается использованием в работе известных положений классических и прикладных наук, таких как физика, математика, теория пластичности, теория обработки



металлов давлением; применением численного метода конечных элементов, реализованного в виде пакетов прикладных программ DEFORM-3D и QForm.; большим объемом экспериментального материала, полученного в лабораторных и промышленных условиях с применением современных методик; применением современных методов статистической обработки результатов; сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей; эффективностью предложенных технических и технологических решений, подтвержденных результатами промышленных испытаний и внедрением в производство.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: Всероссийской научно-практической конференции «Металлургия: технологии, управление, инновации, качество» (г. Новокузнецк, 2006, 2007, 2008, 2010, 2013); Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве» (г. Новокузнецк, 2007); Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения» (г. Новокузнецк, 2007, 2008, 2009, 2010, 2014, 2016); Международной конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (г. Санкт-Петербург, 2009); Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (г. Москва, 2009); Инновационном конвенте «Кузбасс: образование, наука, инновации» (г. Кемерово 2014, 2016, 2018, 2019); Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств» (г. Барнаул, 2015); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах» (г. Новокузнецк. 2016).

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Диссертация соответствует паспорту научной специальности ВАК 05.16.05 – Обработка металлов давлением по п. 1. «Исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки металлов, сплавов и композитов давлением», п. 2. «Исследование процессов пластической деформации металлов, сплавов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования», п. 4. «Оптимизация процессов и технологий обработки давлением для производства металлопродукции с заданными характеристиками качества», п. 6. «Разработка способов, процессов и технологий для производства металлопродукции, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, повышающих качество и расширяющих сортамент изделий».

**Публикации** по материалам диссертации опубликовано 59 печатных работ, в том числе 2 монографии, 57 статей в журналах и сборниках статей, 18 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов докторских диссертаций, 5 – в иностранных журналах, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 285 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, выводов, приложений, содержит 27 таблиц, 104 рисунка и список литературы из 345 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** изложены актуальность темы диссертационной работы, степень ее разработанности, описаны методы и методология исследования, сформулированы цель работы и задачи исследования, приведены научная новизна полученных результатов, практическая и научная значимость работы. Разработаны основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения о степени достоверности и апробации результатов работы.

**В первом разделе «Современное состояние проблемы и постановка задач исследования»** выполнен анализ теоретических и экспериментальных работ отечественных и зарубежных исследователей, которые посвящены операциям комплекса технологий штамповки и их взаимосвязи.

А. М. Мансуров отмечает, что современная технология горячей штамповки представляет собой сложный комплекс различных по своему характеру операций. Основными операциями этого комплекса являются: разделение металла на заготовки, нагрев металла под штамповку и способы штамповки. Наибольший положительный эффект энерго- и ресурсосбережения может быть получен только в том случае, если учитываются все операции комплекса технологий горячей штамповки.

Основная цель комплекса технологий штамповки – максимальный учет физических, теплофизических, механических и термомеханических свойств конкретной марки стали, изменение ее свойств при разделительных операциях, нагреве и непосредственно штамповке, что позволяет обеспечить высокое качество металлопродукции. Комплекс технологий горячей штамповки представляет синтез знаний в области обработки металлов давлением, тепломассообмена, термообработки, физики металлов, компьютерных технологий. Существующий комплекс технологий горячей штамповки для серийного и массового производства поковок круглых в плане (штампующим в торец) состоит из следующих операций:

Первой операцией является разделение прокатанного прутка на мерные заготовки. Наиболее распространенным способом разделения прутка на заготовки является резка металла в штампах или применение пресс-ножниц. Достоинство этого способа разделения заключается в безотходности процесса резки, быстрой перестройке штампа на разные длины резки, низкая себестоимость резки, простая конструкция режущего инструмента.

К недостаткам резки металла ножницами можно отнести: погрешности в виде отклонения размеров заготовки от правильного цилиндра и отклонение массы заготовки. Основные отклонения формы заготовки заключаются в наличии утяжин, вмятин, скоса торца, торцевого заусенца и др. Отклонение массы заготовки от номинала при резке металла достигает 10 %, причем в зависимости от диаметра прутка разница между плюсовым и минусовым допуском на прокат при

одной и той же длине заготовки составляет от 4 до 9 %. Одним из перспективных направлений в этой области является повышение качества и точности разделения прутка на заготовки при сохранении высокой производительности и низкой себестоимости, что требует внедрения новых нетрадиционных решений.

Высокие механические свойства поковок во многом зависят от температуры нагрева заготовок. По существующим технологиям нагрев заготовки для штамповки проводится до температур 1100–1200 °С. Достоинством нагрева до высоких температур является снижение сопротивления металла деформации и увеличение пластических характеристик металла. К недостаткам высокотемпературного нагрева можно отнести образование окалины на поверхности заготовки и обезуглероживание поверхностного слоя металла. Перспективным направлением в этой области является снижение температуры нагрева заготовки, что позволяет значительно снизить потери металла от угара, снизить расход топлива и электроэнергии при нагреве ТВЧ, исключить обезуглероживание и повысить качество поковки.

Основной составляющей себестоимости штампованных поковок является стоимость металла, которая составляет 68 % от общей стоимости поковки. Наиболее эффективным направлением снижения себестоимости поковок является снижением затрат на металл. Последнее зависит от применяемых способов штамповки: облойной в открытых штампах или безоблойной в закрытых штампах.

По существующим технологиям штамповка поковок круглых в плане производится на молотах или кривошипных горячештамповочных прессах, чаще всего в открытых штампах, что приводит к потерям металла при последующей обрезке облоя.

Предварительный анализ показал, что наиболее распространенный комплекс технологий горячей штамповки поковок круглых в плане для серийного и массового производства (штампуемых в торец) не является оптимальным.

Современные предпосылки создания комплекса технологий полугорячей штамповки как отдельного направления следующие: наметившиеся тенденции в специализации кузнечных предприятий по выпуску продукции массового и серийного производства; прогресс в области кузнечно-штамповочного оборудования (рост мощностей кузнечно-штамповочных прессов, производство специализированных прессов двойного и тройного действия для горячей штамповки, увеличения стойкости штампов и др.); возможность более гибкого управления нагревательными устройствами ТВЧ (регулировка рабочей частоты, температуры нагрева, времени выдержки и др.); развитие компьютерного моделирования, позволяющего оперативно и точно рассчитать несколько вариантов технологического процесса штамповки и выбрать оптимальный вариант.

Далее в работе приведен критический обзор литературы; по разделению металла на заготовки в штампах и на стане поперечно-винтовой прокатки; по изменению прочностных, пластических свойств и величине угара при нагреве металла, рекомендуемые температуры нагрева заготовок для штамповки; по исследованию штамповки металла в закрытых штампах; по применению компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением.

Во втором разделе «Развитие научных основ и компьютерное моделирование операций комплекса технологий полугорячей штамповки» отмечено, что при разработке комплекса технологий штамповки необходимо учитывать особенности отдельных операций и их взаимосвязь.

В комплексе технологий полугорячей штамповки разделение металла на заготовки предлагается проводить на стане поперечно-винтовой прокатки. В качестве исходной заготовки для штамповки принимается шаровая заготовка. Нагрев металла перед штамповкой производится в индукционном нагревателе до температур ниже 900 °С (полугорячая штамповка), далее заготовка штампуется в закрытых штампах (безоблойная штамповка).

При решении задачи проектирования комплекса технологий полугорячей штамповки был использован метод численного математического моделирования. Для создания математической модели и получения результатов моделирования были разработаны виртуальные объекты компьютерного моделирования: оборудование, рабочий инструмент, заготовка. Свойства виртуальных объектов, такие как размеры, конфигурация, марка стали, соответствуют свойствам натуре, технологический процесс в виртуальном объекте соответствует натуральному (изучаемому) технологическому процессу. Готовое виртуальное изделие имеет форму и размеры натуральной готовой продукции.

Компьютерное моделирование выполняли с использованием программных продуктов QForm-3D (лицензия № R0-U1791-091214Y100) и Deform 3D (лицензионный договор № TES-06/2016-AS от 23.03.2016 г.), в основу которых заложен метод конечных элементов. Данные программные продукты позволяют моделировать заполнение штампа металлом, образование и развитие дефектов, изменение по времени и по объему компонентов тензора напряжений и деформаций, инвариантные характеристики напряжения и деформации, изменение по времени деформирующей силы, температурные условия деформации металла, износ штампа и другие показатели при формоизменении металла.

В работе напряженно-деформированное состояние металла определяли, используя основные инвариантные характеристики:

интенсивность деформаций

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1\varepsilon_2 + \varepsilon_2^2}, \quad (1)$$

интенсивность напряжений

$$\sigma_i = ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)^{0,5}, \quad (2)$$

среднее нормальное напряжение

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}. \quad (3)$$

Кроме того, в отдельных областях деформируемого изделия, где имеются растягивающие напряжения, проверяли условия деформации металла без разрушения.

Для моделирования разделения металла на шаровые заготовки была разработана виртуальная модель стана поперечно-винтовой прокатки, рабочие валки которого имеют профиль в соответствии с разработанной калибровкой шаровой заготовки номинальным диаметром 120 мм. Заготовка представляет собой штангу

прокатанного металла диаметром 120 мм из стали 40 (марка стали шаровой заготовки соответствует марке стали поковки). Температура нагрева заготовки перед прокаткой 1100 °С. Теплофизические свойства стали определяли по справочным данным.

В соответствии с реальным технологическим процессом при моделировании были выбраны следующие данные: материал прокатных валков – сталь 35ХГСА; температура валков 200 °С; коэффициент трения 0,4; скорость вращения валков 60 об/мин.

При исследовании напряженно-деформированного состояния при прокатке шара пренебрегали инерционными силами, деформируемый металл заготовки принят несжимаемым. В уравнениях состояния использовали случай простого нагружения. Для материала проката принята упругопластическая модель.

Исследование формоизменения металла при разделении на шаровые заготовки показало, что нагретая заготовка в виде прутка горячекатаной стали хорошо захватывается валками, процесс прокатки происходит стабильно без пробуксовок. Металл заготовки полностью заполняет калибры. Зазора между металлом и стенками калибра не наблюдалось. Перемычки, соединяющие отформованные шары, полностью отделяются непосредственно в валках стана. При этом перемычка срезается ребордой валков и вдавливается в тело шара. Отделенный шар продолжает обкатываться на отделочном участке калибра, остатки перемычки заглаживаются и из валков выходит полностью оформленная шаровая заготовка, имеющая гладкую поверхность.

Полный процесс прокатки с момента захвата металла валками до получения готовой шаровой заготовки происходит за 3,5 полных оборота валков.

Исследование напряженно-деформированного состояния металла проводили в пяти характерных точках по оси прокатки при повороте валков последовательно на 90°: 1 – передний торец валков; 2 – внедрение первой реборды; 3 – центр первого шара; 4 – внедрение второй реборды; 5 – центр второго шара.

Анализ данных моделирования разделения металла на шаровые заготовки показал, что интенсивность деформаций по оси прокатываемой заготовки имеет небольшие значения и распределена неравномерно. Выделяется более высокая интенсивность деформаций под второй ребордой, радиус перемычки в которой составляет 18 мм. Распределение интенсивности деформаций по объему заготовки представлено на рисунке 1.

На рисунке 2 показано распределение интенсивности напряжений при прокатке шара.

Наибольшие значения интенсивности напряжений наблюдаются при деформации металла под второй ребордой и составляют 180–220 МПа.

Значения компонент тензора напряжений приведены в таблице 1.

Можно отметить, что все компоненты тензора напряжений имеют отрицательное значение. Это говорит о том, что все компоненты тензора напряжений сжимающие.

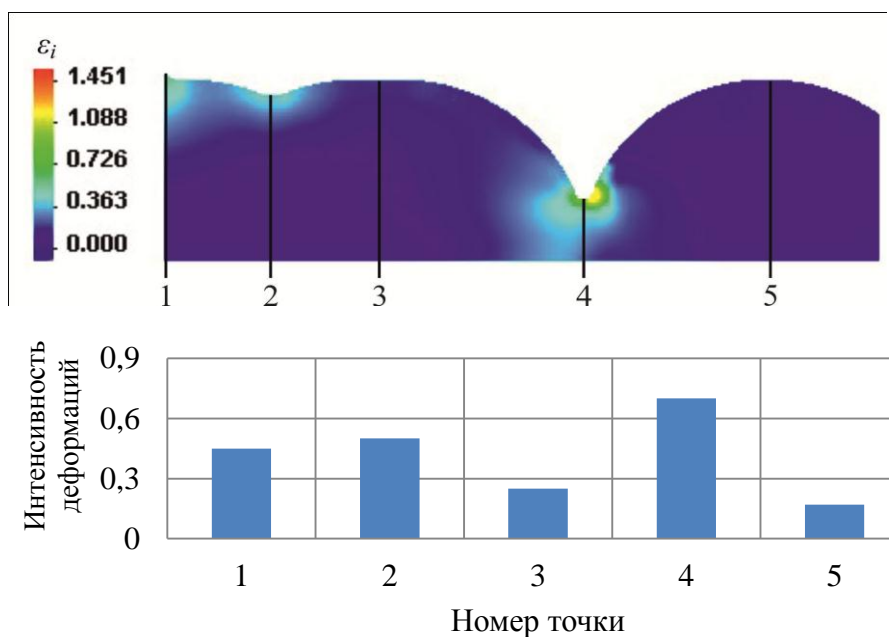


Рисунок 1 – Распределение интенсивности деформаций при разделении металла на шаровые заготовки

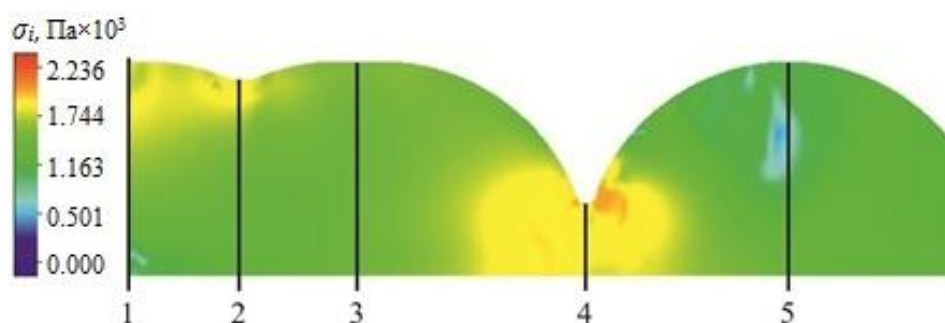


Рисунок 2 – Распределение интенсивности напряжений при разделении металла на шаровые заготовки

Таблица 1 – Компоненты тензора напряжений и интенсивность напряжений

Напряжение	Величина напряжений, МПа, в характерных точках				
	1	2	3	4	5
Вдоль оси прокатки, $\sigma_x$	-806	-948	-701	-878	-799
Вдоль направления уширения, $\sigma_y$	-807	-996	-688	-543	-710
Вдоль направления обжатия, $\sigma_z$	-722	-1004	-830	-726	-877
Интенсивность напряжений, $\sigma_i$	123	127	147	181	135

Как видно из таблицы 1, среднее нормальное напряжение по длине прокатываемой заготовки является сжимающим, поэтому образование внутренних дефектов в металле маловероятно. Наибольшие значения среднего нормального напряжения наблюдаются под ребрами прокатного вала.

На рисунке 3 приведена типовая мозаика распределения использования ресурса пластичности металла.

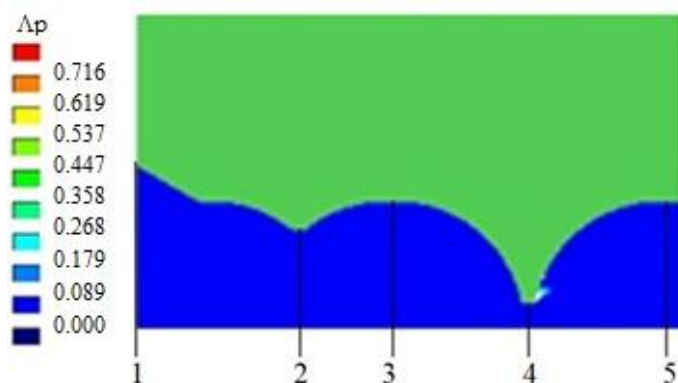


Рисунок 3 – Использование ресурса пластичности металла при разделении на шаровые заготовки

Результаты исследования использования ресурса пластичности металла шаровой заготовки,  $\Delta p$ :

1 – передний торец валков	0,01
2 – внедрение первой реборды	0,015
3 – центр первого шара	0,01
4 – внедрение второй реборды	0,022
5 – центр второго шара	0,016.

Малую величину использования пластичности можно объяснить малой величиной деформации металла при повороте валков на  $90^\circ$ . Абсолютное обжатие при повороте валков на  $90^\circ$  составляет 5–7 мм.

В дальнейшем под ребордой происходит разделение металла на шаровые заготовки, коэффициент использования пластичности плавно повышается от 0,716 до 1,0. При исчерпывании ресурса пластичности происходит разрушение металла.

При нагреве металла ухудшаются его прочностные свойства, увеличиваются показатели пластических свойств, на поверхности образуется слой окалины. Таким образом, оптимальная температура нагрева должна обеспечивать высокую пластичность металла, низкое сопротивление пластической деформации и незначительное или полное отсутствие слоя окалины  $T_{\text{опт}} = T_{\text{опт}}(\sigma, \Lambda, Y)$ .

В работе для решения задачи оптимизации процессов с большим количеством откликов использовали предложенный Харрингтоном критерий оптимизации в виде обобщенной функции желательности. Под желательностью  $d$  понимают тот или иной желательный уровень параметра оптимизации. Для этого предлагается преобразовать измеренные значения свойств (откликов) в безразмерную шкалу желательности. Удобной формой преобразования свойства  $y_i$  в частную функцию желательности  $d$  служит экспоненциальная зависимость:

$$d_i = \exp(-\exp(-z_i)), \quad (4)$$

где  $z_i$  – некоторая безразмерная величина, линейно связанная с изучаемыми свойствами  $y_i$  и измеряемая от +4 до –3.

Имея несколько значений свойств (откликов)  $y_i$ , преобразованных в частные функции желательности  $d_i$ , можно определить обобщенную функцию желательности:

$$D = \sqrt[i]{d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_i}. \quad (5)$$

Зависимость обобщенной функции желательности от температуры нагрева металла описывается кривой с максимумом. Максимальное значение обобщенной функции желательности соответствует оптимальной температуре нагрева металла.

Для исследования напряженно-деформированного состояния металла спроектирован виртуальный технологический процесс штамповки на кривошипном горячештамповочном прессе АККБ 8544. Моделировали процесс штамповки поковок, которые широко используются в машиностроении. К ним относятся поковки типа «фланец» (рисунок 4) и поковки типа «шестерня» (рисунок 5).

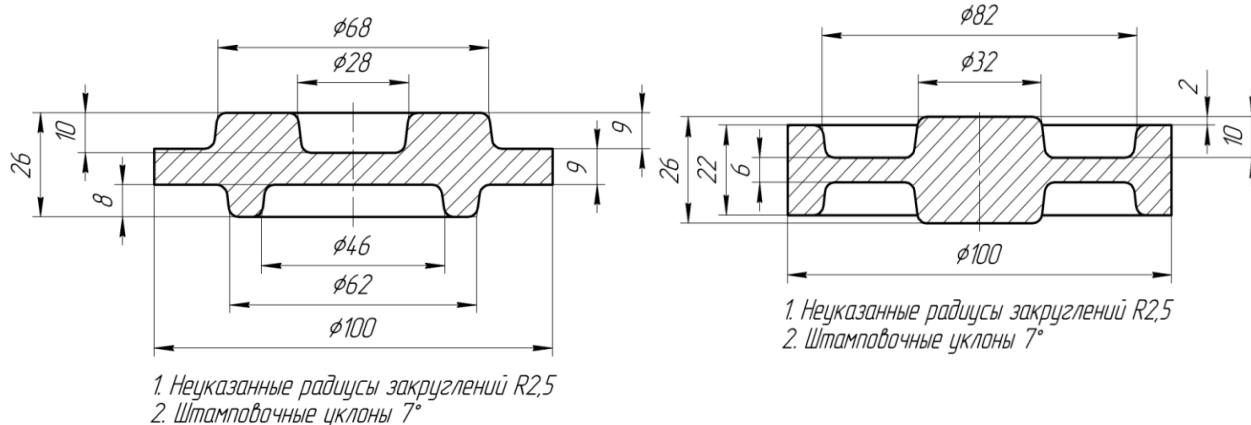


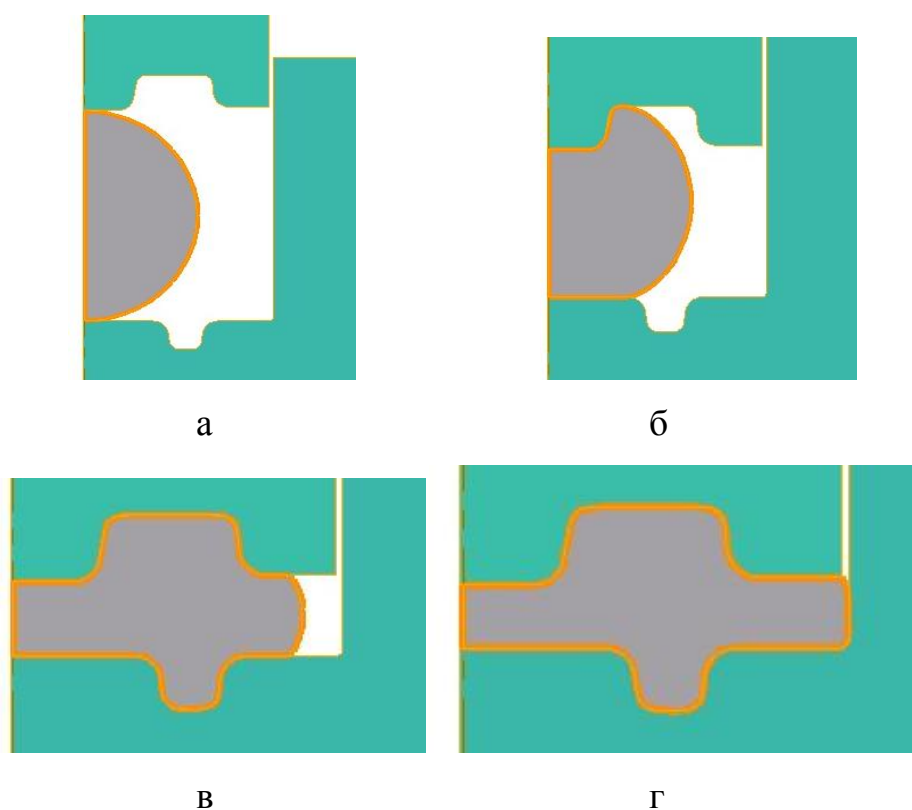
Рисунок 4 – Чертеж поковки типа «фланец» Рисунок 5– Чертеж поковки типа «шестерня»

Исходные данные для моделирования:

Материал поковок: фланец – сталь марки 40, шестерня – сталь марки 20Х, температура штамповки 840 °С, штамп изготовлен из штамповой стали 5ХНМ, температура штампа 200 °С, величина коэффициента трения между заготовкой и инструментом 0,4 (смазка графит + вода). Механические свойства стали с учетом температуры, скорости деформации и степени деформации выбирали из базы данных. Оборудование, используемое при моделировании, описывалось техническими характеристиками кривошипного горячештамповочного прессы АККБ 8544 усилием 25 МН.

В процессе моделирования безоблойной штамповки поковок круглых в плане использовали шаровую заготовку диаметром 60 мм, объемом 113 100 мм<sup>2</sup>. Объем заготовки равен объему поковки. Поскольку поковки симметричны относительно осевой линии, моделирование проводили только для половины поковки. На рисунке 6 представлены результаты моделирования процесса штамповки фланца из шаровой заготовки.





а –  $\Delta h = 0$  мм; б –  $\Delta h = 26,3$  мм; в –  $\Delta h = 49$  мм; г –  $\Delta h = 52$  мм

Рисунок 6 – Формоизменение металла при штамповке фланца из шаровой заготовки

По результатам компьютерного моделирования был выполнен анализ распределения интенсивности напряжений, деформаций и среднего нормального напряжения в горизонтальном осевом сечении поковки при перемещении пуансона на 26,3 мм, 49 мм и 52 мм. Графики распределения интенсивности напряжений и деформаций по объему поковки представлены на рисунке 7.

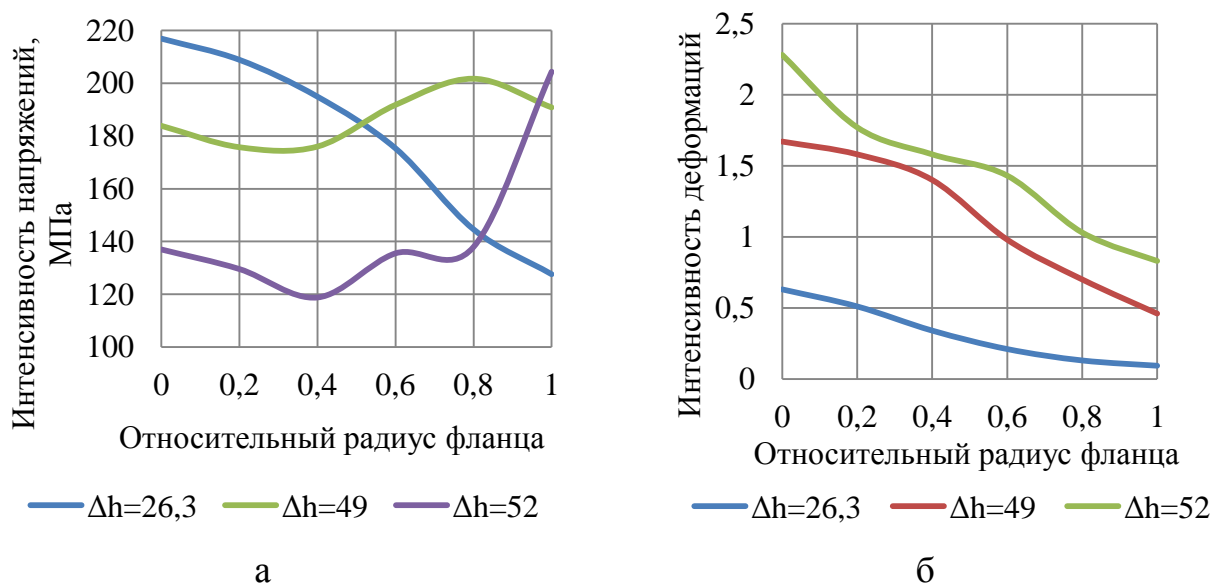
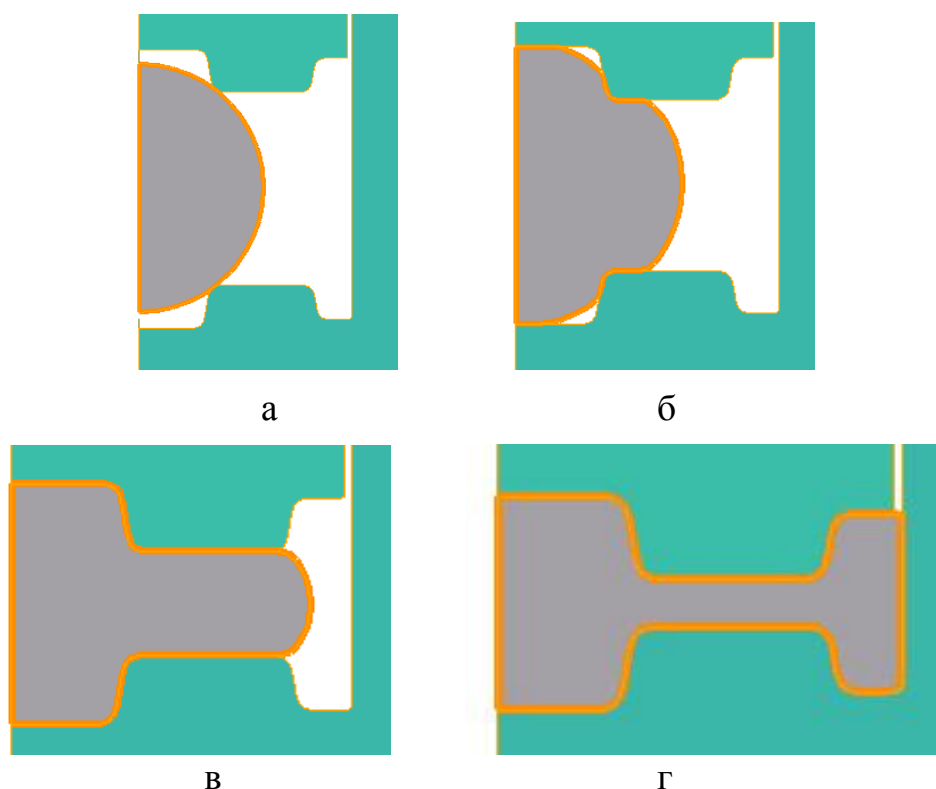


Рисунок 7 – Распределение интенсивности напряжений (а) и деформаций (б) в горизонтальном сечении фланца

Интенсивность напряжений зависит от степени деформации поковки. При малой степени деформации максимальные значения наблюдаются по вертикальной оси поковки, уменьшаются к боковой поверхности. На конечном этапе штамповки (закрытый штамп полностью заполняется металлом) интенсивность напряжений по горизонтальному сечению поковки снижается, оставаясь высоким только в торцевой части диска. Интенсивность деформаций по сечению поковки распределена неравномерно. С увеличением хода пуансона интенсивность деформаций возрастает. Максимальная величина интенсивности деформаций наблюдается в центральной части поковки и снижается в направлении торцевой части фланца.

Величина среднего нормального напряжения уменьшается от центральной к боковой части поковки. На промежуточных этапах штамповки среднее нормальное напряжение принимает положительное значение, на боковой поверхности поковки фланца появляются растягивающие напряжения.

При моделировании процесса штамповки шестерни установлено, что штамп заполняется металлом полностью, вытеснения металла в заусенец не происходит (рисунок 8). Анализ распределения интенсивности напряжений, деформаций и среднего нормального напряжения проводили в горизонтальном и вертикальном осевых сечениях поковки при перемещении пуансона на 14,5 мм, 30 мм и 41 мм.



а –  $\Delta h = 0$ ; б –  $\Delta h = 14,5$  мм; в –  $\Delta h = 30$  мм; г –  $\Delta h = 41$  мм

Рисунок 8 – Формоизменение металла при штамповке шестерни из шаровой заготовки

Анализ напряженного состояния поковки показал, что в горизонтальном осевом сечении шестерни на промежуточных этапах штамповки интенсивность напряжений уменьшается от ступицы к венцу. На последнем этапе штамповки интенсивность напряжений значительно снижается: в центральной части шестерни с 205,6 МПа при величине хода пуансона  $\Delta h = 30$  мм до 149,1 МПа при полном заполнении штампа и с 194 до 149,1 МПа в венечной части. По вертикальной оси симметрии наибольшее значение интенсивности напряжений на всех этапах штамповки наблюдается в центральной части ступицы.

Интенсивность деформаций по сечениям поковки «шестерня» распределена неравномерно. В горизонтальном осевом сечении поковки наблюдается общая тенденция возрастания интенсивности деформации при увеличении степени деформации. В готовой поковке происходит значительное увеличение интенсивности деформаций в диске шестерни. В точках, расположенных вблизи поверхности контакта металла со штампом, интенсивность деформаций изменяется незначительно. В вертикальном осевом сечении шестерни интенсивность деформаций распределяется симметрично относительно горизонтальной оси поковки. В центральной части поковки значение интенсивности деформаций выше, чем на торцевых поверхностях ступицы. С увеличением хода пуансона интенсивность деформации вблизи горизонтальной оси поковки возрастает, на поверхности контакта металла с инструментом значение интенсивности деформаций изменяется незначительно.

Величина среднего нормального напряжения увеличивается от ступицы к венечной части поковки. В ступице поковки среднее нормальное напряжение изменяется незначительно, оставаясь сжимающим. Изменения среднего нормального напряжения на свободной боковой поверхности поковки на отдельных этапах ее штамповки представлено на рисунке 9.

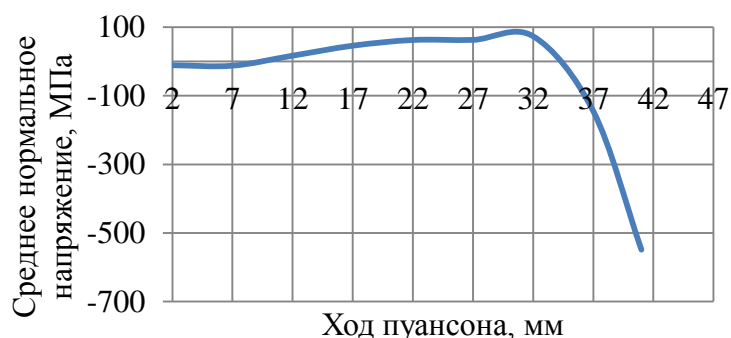


Рисунок 9 – Среднее нормальное напряжение на свободной боковой поверхности поковки «шестерня»

Как видно из графика, при штамповке поковки «шестерня» из шаровой заготовки на боковой свободной поверхности при ходе пуансона от 9,8 до 34,6 мм величина среднего нормального напряжения уходит в область положительных значений (имеются растягивающие напряжения). Поэтому, несмотря на отрицательное значение среднего нормального напряжения на последнем этапе штам-

поковки по всему объему поковки, на промежуточных этапах штамповки за счет растягивающих напряжений могут появляться дефекты.

Для сравнительного анализа распределения интенсивности напряжений, интенсивности деформаций и среднего нормального напряжения по объему поковки и усилия штамповки проведено моделирование безоблойной штамповки в закрытом штампе с использованием цилиндрической заготовки диаметром  $d = 49$  мм и высотой  $h = 60$  мм

По данным компьютерного моделирования сравнивали неравномерность распределения деформации по объему поковки при штамповке из шаровой и цилиндрической заготовок. Величина неравномерности деформации рассчитывается как отношение максимального значения интенсивности деформаций в сечении поковки к величине высотной логарифмической деформации по ступице:

$$Q = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\text{пок}}}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_{\max}$  – максимальное значение интенсивности деформаций в сечении поковки;  $\varepsilon_{\text{пок}}$  – высотная логарифмическая деформации поковки по вертикальной оси симметрии.

$$\varepsilon_{\text{пок}} = \ln\left(\frac{h_0}{h_{\text{пок}}}\right) \quad (7)$$

где  $h_0$  и  $h_{\text{пок}}$  – высота заготовки и текущая высота поковки по вертикальной оси симметрии, мм.

Результаты расчета неравномерности пластической деформации  $Q$  приведены на рисунке 10.

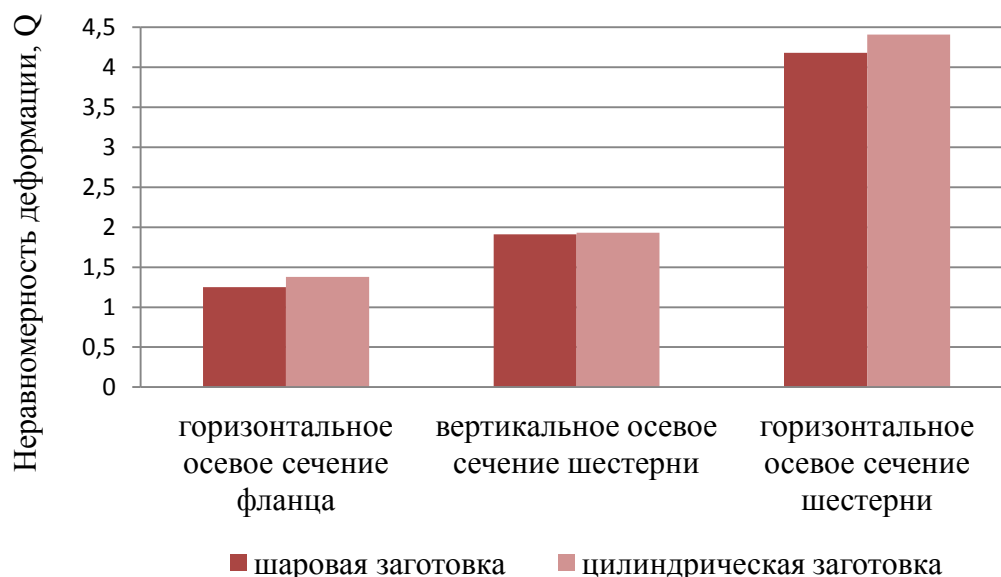


Рисунок 10 – Показатели неравномерности деформации при штамповке поковок «фланец» и «шестерня»

Анализ рисунка 10 показал, что во всех случаях неравномерность деформации  $Q$  меньше при штамповке из шаровой заготовки, чем при штамповке из цилиндра.

В таблице 2 приведены сравнительные данные по усилию штамповки поковок «фланец» и «шестерня».

Таблица 2 – Усилие штамповки из шаровой и цилиндрической заготовок

Поковка	Усилие штамповки, МН	
	Шаровая заготовка	Цилиндрическая заготовка
фланец	5,45	6,93
шестерня	4,22	5,17

Из таблицы 2 видно, что усилие при штамповке из шаровой заготовки ниже, чем из цилиндрической.

В процессе моделирования были получены данные по степени использования ресурса пластичности при штамповке поковок «фланец» и «шестерня» с применением показателя Кокрофта-Латэма. Установлено, что наибольшее использование ресурса пластичности наблюдается в торце диска поковки «фланец» и в венце на торце поковки «шестерня». Для поковки «фланец» при штамповке из шаровой заготовки максимальная величина степени использования ресурса пластичности составляет 0,18, при штамповке из цилиндрической заготовки – 0,09, для поковки «шестерня» – 0,163 и 0,12 соответственно. С увеличением степени деформации величина использования ресурса пластичности возрастает.

Расчеты степени использования запаса пластичности, проведенные по методике В. Л. Колмогорова и А. А. Богатова, показали, что при температуре 850 °С степень использования запаса пластичности на свободной поверхности поковки «шестерня» составляет от 21 %. Таким образом, на свободной боковой поверхности поковки «шестерня» на промежуточных стадиях штамповки разрушения металла не происходит.

Аналогичные результаты получены и при расчете степени использования запаса пластичности при штамповке «фланца» из цилиндрической и шаровой заготовок.

Компьютерное моделирование процесса выдавливания поковки типа «корпус форсунки распылителя» проводили на малогабаритных деталях следующих размеров: диаметр заготовки от 14 до 24 мм, угол наклона матрицы  $\gamma$  от 60° до 90°, коэффициенте трения  $\mu$  от 0,1 до 0,3. Диаметр стержня готовой детали оставался постоянным и составлял 9,6 мм. Коэффициент вытяжки  $\lambda = F_0/f$  при этом составлял от 2,2 до 6,3. Всего было проведено 32 модельных эксперимента.

Зона высокой интенсивности деформаций наблюдается в верхней части стержня поковки и уменьшается по высоте стержня. Интенсивность напряжений по высоте стержня изменяется незначительно. При анализе значения среднего нормального напряжения можно отметить зону высоких сжимающих напряжений в утолщенной части поковки и зону несколько меньших сжимающих напряжений в стержне проковки.

Относительное удельное усилие  $q$  возрастает с увеличением коэффициента вытяжки, увеличением угла наклона матрицы  $\gamma$  и с увеличением коэффициента

трения  $\mu$ . Полученные данные не противоречат ранее проведенным исследованиям.

Также было исследовано заполнение металлом торцевой части поковки стержня диаметром 9,6 мм. Торцевая часть стержня поковки выполнена в виде цилиндра, конуса и специальной формы. Увеличение усилия на заключительной стадии штамповки оценивали в виде коэффициента  $K_\Phi$

$$K_\Phi = \frac{p}{p_\Phi}, \quad (8)$$

где  $p$  – удельное усилие деформации при заполнении торцевой части стержня;  $p_\Phi$  – удельное усилие деформации при установившемся процессе выдавливания.

Коэффициент формы торцевой части поковки составляет 3,14 для цилиндра, 2,9 для конуса и 2,8 для форсунки.

Таким образом, на заполнение торцевой части стержня цилиндрической формы требуется большее усилие, чем для заполнения конической и специальной формы.

**В третьем разделе «Экспериментальные исследования операций комплекса технологий полугорячей безоблойной штамповки»** рассмотрены методики и результаты лабораторных и промышленных исследований разделения металла на стане поперечно-винтовой прокатки (шаропрокатном стане); экспериментальных исследований по влиянию температуры на прочностные и пластические свойства металла, процессы окисления металла при нагреве; нагрева металла для штамповки, штамповки поволоков круглых в плане, операции выдавливания.

Разработана новая методика расчета калибровки валков для прокатки точных шаровой заготовки (рисунок 11), составлена матрица планирования экспериментов и проведены промышленные исследования прокатки шаровых заготовок на стане поперечно-винтовой прокатки, по результатам которых отмечено, что диаграмма усилий прокатки имеет пилообразный вид. Установлено, что с увеличением скорости деформации и понижением температуры усилие прокатки возрастает. Сравнивая экспериментальные усилия прокатки с величиной максимально допустимых усилий (690 кН), можно отметить, что прокатка шара номинальным диаметром 90 мм возможна при всех скоростях работы стана. Таким образом, на рассматриваемом шаропрокатном стане 40-80 при скоростях прокатки от 30 до 80 об/мин без перегрузки по усилиям можно прокатывать шары диаметром 90 мм.

Проведены комплексные исследования 10 наиболее распространенных марок стали с предварительно деформированной (катаной) структурой в интервале температур 600–1000 °С при скорости деформации 1 с<sup>-1</sup>. В качестве основного метода определения сопротивления деформации и пластичности металла было принято испытание образцов металла на горячее кручение.

Опытные данные были аппроксимированы уравнениями:

$$\text{сопротивление деформации } \sigma = a_1 \cdot \exp(-b_1 \cdot T), \quad (9)$$

$$\text{пластичность металла } \Lambda = a_2 \cdot \exp(b_2 \cdot T), \quad (10)$$

$$\text{окисление металла (угар) } Y_r = a_3 \cdot \exp\left(-\frac{b_3}{T}\right), \quad (11)$$

где  $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$  – коэффициенты, определяемые экспериментально;  $T$  – температура, К.

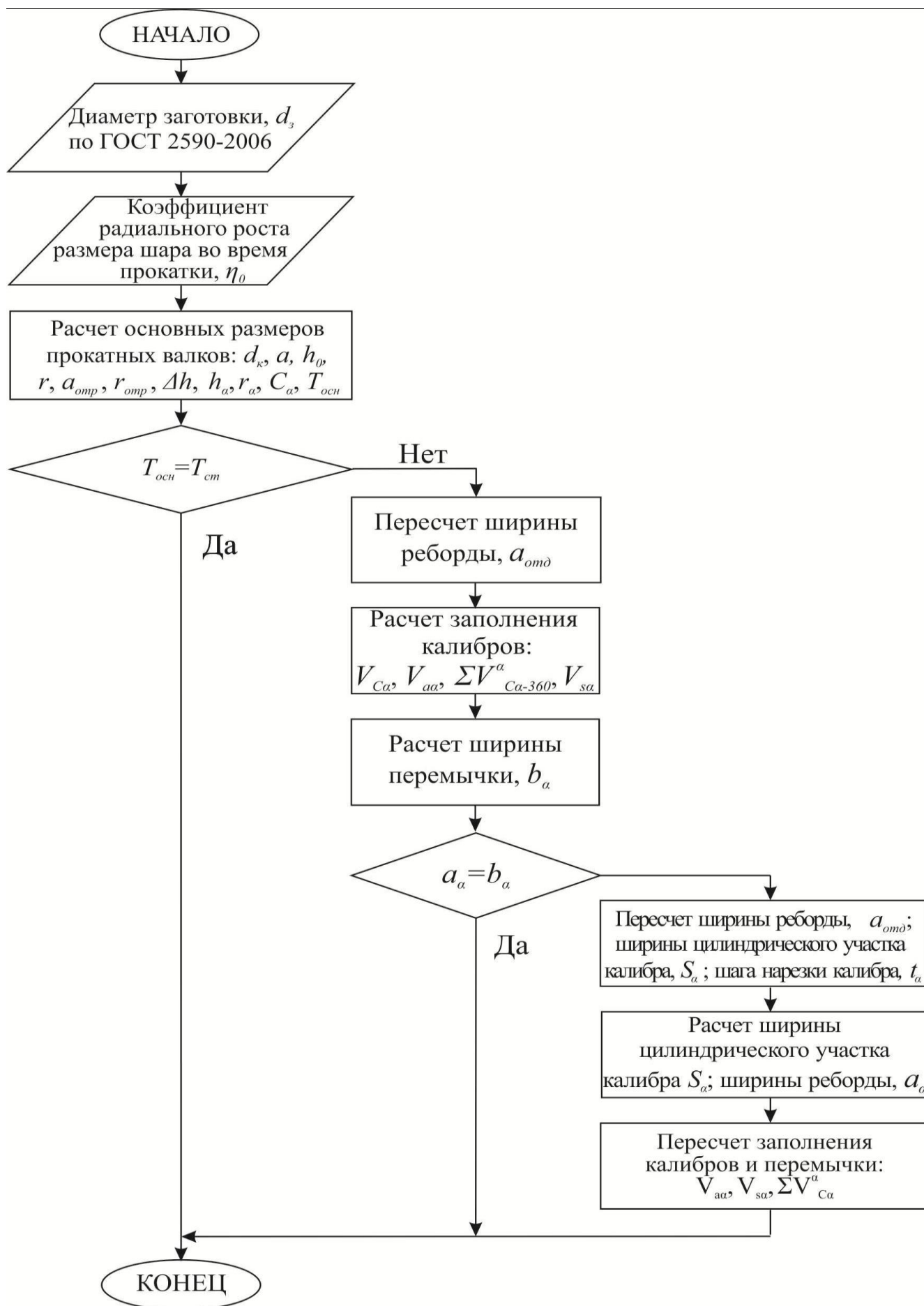


Рисунок 11 – Алгоритм расчета калибровки валков

Величину поверхностного угара при заданных температуре и времени нагрева определяли по соотношению:

$$y_r = \frac{m_1 - m_2}{F}, \quad (12)$$

где  $m_1$ ,  $m_2$  – масса образца до нагрева и после удаления окалина, г;  $F$  – площадь поверхности образца,  $\text{м}^2$ .

В работе приведены систематизированные данные для расчета сопротивления металла деформации, пластичности металла и окисления стали углеродистых и легированных марок при нагреве до температур полугорячей штамповки.

Для оценки достоверности результатов распределения деформаций и напряжений по объему поковки, проведены лабораторные исследования с применением метода определения напряженного состояния в пластической области по распределению твердости. В качестве модельного материала использовали алюминий.

По результатам экспериментального исследования и компьютерного моделирования построены графики распределения интенсивности деформаций в горизонтальном осевом сечении готовой поковки «фланец» (рисунок 12).

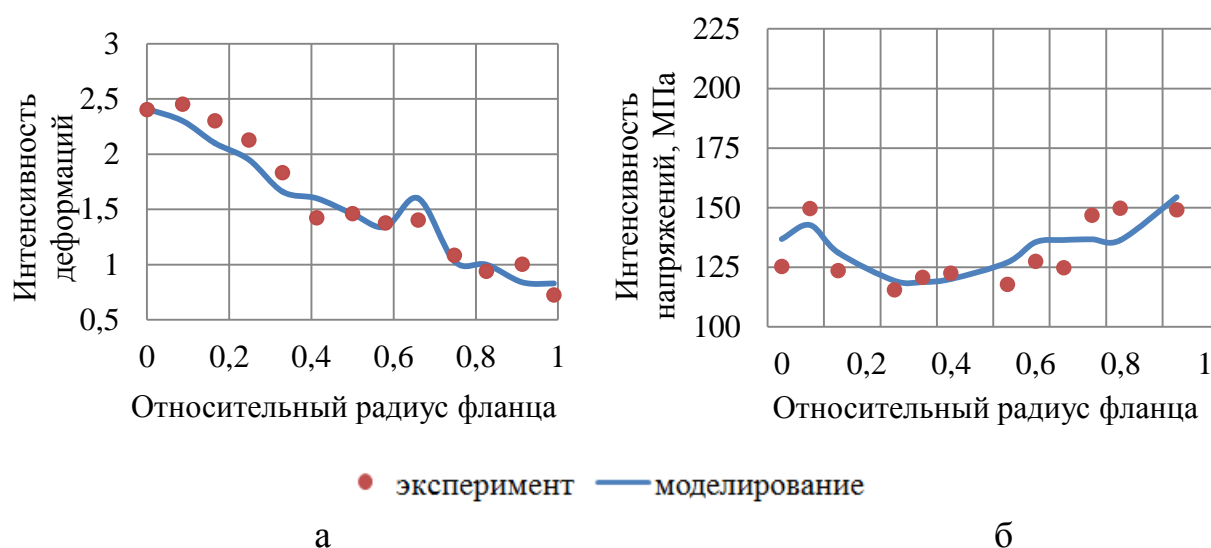


Рисунок 12 – Изменение интенсивности деформаций (а) и напряжений (б) в горизонтальных осевых сечениях фланца при штамповке из шаровой заготовки

Анализируя рисунок 12, можно отметить, что экспериментальные данные хорошо подтверждают результаты компьютерного моделирования.

Проверку адекватности компьютерного моделирования на стадии свободного выдавливания проводили путем экспериментального исследования силы выдавливания с использованием метода планирования эксперимента. В качестве факторов (независимых переменных) выбрали: коэффициент вытяжки, коэффициент трения, угол наклона матрицы, относительные размеры утолщенной части поковки и стержневой части. Результаты моделирования близко совпали с результатами экспериментальных данных.

В четвертом разделе «Совершенствование операций комплекса технологий полугорячей штамповки» описаны результаты: расчета калибровки вал-



ков для прокатки шаровых заготовок диаметром 120 мм; исследований качества шаровой заготовки; определение оптимальных температур нагрева заготовок для полугорячей штамповки с применением функции желательности; расчета оптимальных размеров заготовки для штамповки шаров большого диаметра.

Предварительные исследования возможности прокатки шаровых заготовок большого диаметра (до 120 мм) на шаропрокатном стане 40-80 показали, что главная линия прокатного стана нуждается в реконструкции. По разработанной методике приведен расчет калибровки валков для прокатки шаровых заготовок условным диаметром 120 мм. Рассчитанная калибровка валков предусматривает увеличение длины и диаметра бочки прокатного валка с минимально возможными зазорами между валком и кассетой для увеличения протяженности винтовой линии калибра и повышения прочности валков. Увеличение размеров бочки валка потребовало изменения в размерах прокатного валка и схемы сборки валка. Так же в ходе реконструкции увеличена мощность электродвигателя и повышена температура нагрева металла перед прокаткой.

Для исследования качества шаровой заготовки были отобраны прокатанные шары диаметром 120, 90, 80, 60 и 50 мм (30 штук в каждой партии), полученные поперечно-винтовой прокаткой на шаропрокатном стане 40-80. Проведя статистическую обработку экспериментальных данных по взвешиванию шаровой заготовки, получили результаты, представленные в таблице 3. В таблице 3 числитель – новые валки; знаменатель – изношенные валки.

Таблица 3 – Результаты статистической обработки

Диаметр шара, мм		Выборочное среднее значение $\bar{m}$ , г	Выборочная дисперсия $S^2$	Среднее квадратическое отклонение $S$	$\Delta m$ , г	Погрешность, %
Расчетный	Фактический					
120	125	7978,7	27818,80	166,80	$\pm 62,100$	$\pm 0,80$
		8297,3	29721,90	172,40	$\pm 64,200$	
90	93	3308,0	2776,70	52,69	$\pm 19,600$	$\pm 0,63$
		3329,0	3269,80	57,18	$\pm 21,300$	
50	52	567,0	82,06	9,059	$\pm 3,374$	$\pm 0,60$
		570,0	83,60	9,143	$\pm 3,405$	

При анализе таблицы можно отметить, что по мере увеличения диаметра шаровой заготовки точность прокатанных шаровых заготовок уменьшается. По мере износа валков размеры шаровой заготовки увеличиваются.

Одним из основных факторов процесса прокатки шаров в винтовых калибрах является определение режимов деформации, при которых отсутствует разрыхление металла и вскрытие полости в осевой зоне изделия.

Для проверки качества металла внутренних слоев шаровые заготовки после операций термообработки разрезали по диаметральному сечению, проходящему через полюса (место отрыва перемычек) шара. После шлифовки темплета и удаления поверхностного наклепанного слоя проводили визуальный осмотр поверхности при пятикратном увеличении. При осмотре на поверхности разреза дефектов в виде пористости или микротрещин обнаружено не было. Далее проводили

замеры твердости по всему сечению шара. Замеры проводили в узлах сетки размером  $5 \times 5$  мм.

Замеры твердости по горизонтальной и вертикальной осям шаровых заготовок номинальным диаметром 60 мм и 120 мм из углеродистой стали марки 40 приведены на рисунках 13, 14.

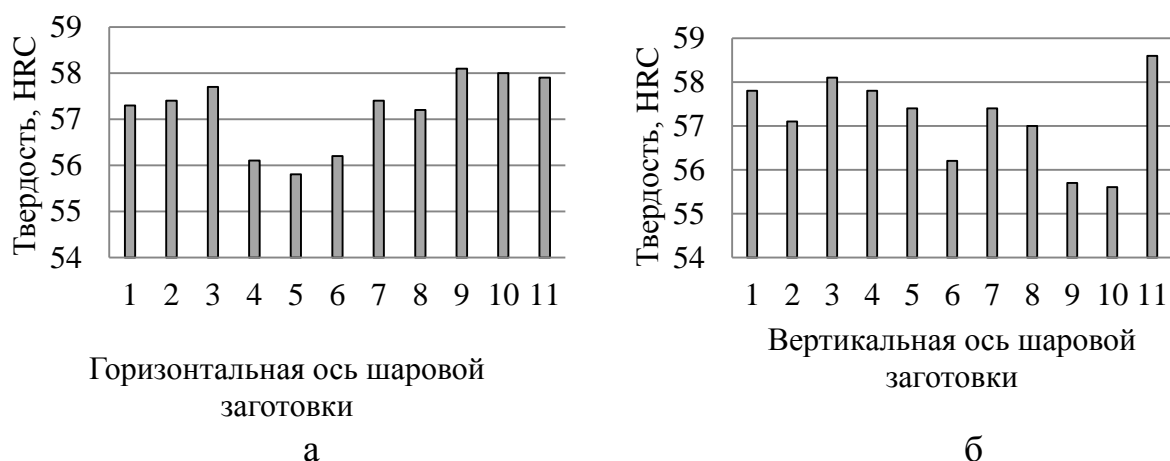


Рисунок 13 – Распределение твердости по диаметру шара 60 мм по вертикальной (а) и горизонтальной (б) оси

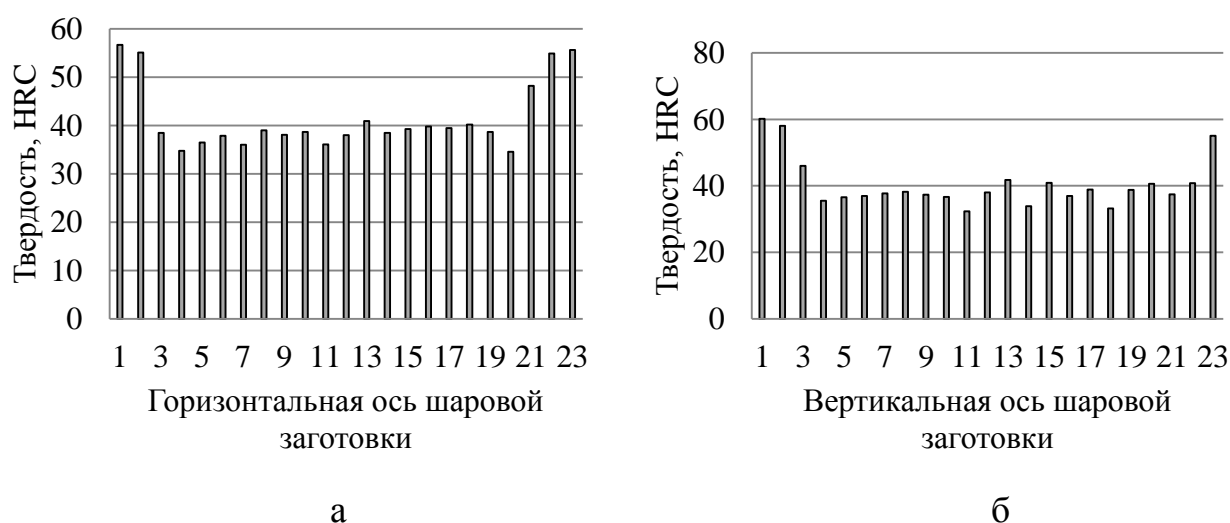


Рисунок 14 – Распределение твердости по диаметру шара 120 мм по вертикальной (а) и горизонтальной (б) оси

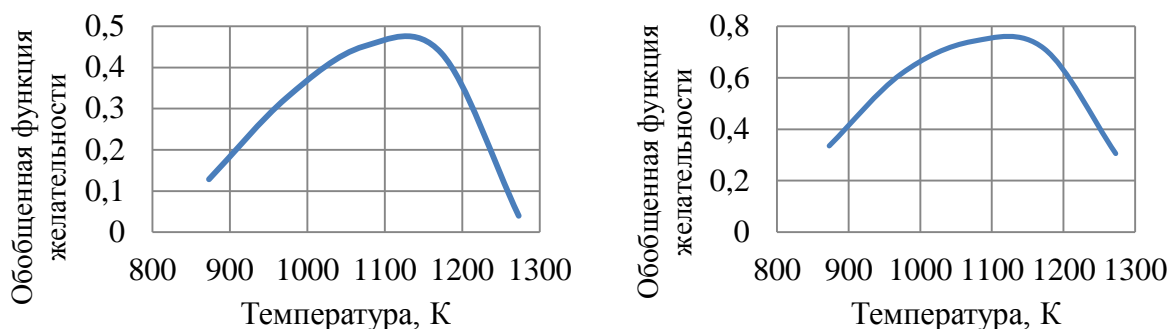
Анализ результатов исследования показал, что провалов твердости во внутренних слоях шара не обнаружено, что говорит о хорошем качестве металла сердцевинной зоны шаровой заготовки.

Таким образом, технология прокатки шара номинальным диаметром 120 мм обеспечивает получение изделия без разрыхления металла в сердцевине заготовки. Аналогичные результаты получены и на шарах диаметром 50, 80 и 90 мм. Провалов твердости во внутренних слоях шара также не обнаружено.

Для определения оптимальной температуры нагрева заготовки для точной объемной штамповки поковок «фланец», «шестерня» и выдавливания «корпуса

распылителя» была использована обобщенная функция желательности  $D$ . В качестве откликов были использованы: сопротивление металла деформации, пластические свойства металла (степень деформации сдвига до разрушения, поверхностный угар при нагреве).

По результатам расчета построен график зависимости обобщенной функции желательности  $D$  от температуры нагрева (рисунок 14).



а

б

а – сталь 40Х; б – сталь 18Х2Н4МА

Рисунок 15 – Влияние температуры на обобщенную функцию

Как видно из рисунка 14, обобщенная функция желательности имеет вид кривой с максимумом. Максимальное значение функции желательности соответствует оптимальной температуре полугорячей штамповки поковок. Таким образом, интервал оптимальной температуры нагрева заготовки с учетом охлаждения при передаче металла от печи к штампу составляет 850–860 °С для стали марки 40Х и 830–860 °С для стали марки 18Х2Н4МА.

В работе приведены систематизированные данные по оптимальной температуре нагрева металла перед штамповкой, рассчитанные с использованием обобщенной функции желательности. Сравнивая результаты температуры нагрева металла, рассчитанные с использованием обобщенной функции желательности, и справочные данные, можно отметить, что расчетные данные с учетом понижения температуры металла при пластической деформации находятся в пределах рекомендованного температурного интервала.

Шаропрокатные станы 40-80 предназначены для прокатки шаров максимальным диаметром 80 мм. Проведенные исследования показали, что путем модернизации оборудования прокатных станов можно прокатывать шары диаметром до 100 мм. Реконструкция линии прокатного стана позволяет прокатывать на существующем оборудовании шары номинальным диаметром до 120 мм. Оборудование и технология для прокатки шаров номинальным диаметром больше 120 мм в настоящее время отсутствуют.

Шары диаметром 120–200 мм и более получают штамповкой на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП).

Серийное производство мелющих шаров диаметром 120 мм штамповкой на КГШП усилием 25 МН (2500 т) в условиях кузнечного цеха осуществляется из проката диаметром 85 мм ГОСТ 2590-88. Предварительно, перед резкой прутка на

мерные заготовки, металл нагревают в камерной печи с выдвижным подом до температуры 600 °С и выдерживают в течение 1,5–2 часов. Резка заготовок под штамповку осуществляется на пресс-ножницах ScPK 1800.1 усилием 7,5 МН (750 т). Длина отрезаемой заготовки  $L=198\pm 2$  мм. Нагрев отрезанных заготовок до ковочной температуры 1100–1150 °С проводится в индукционном нагревателе ИК1 750/1 с темпом выдачи 18–20 с. Нагретую заготовку осаживают на плоскопараллельных плитах предварительного ручья штампа до высоты 130 мм. В окончательном ручье штампа формируется шар диаметром 120 мм. После штамповки шара производится операция обрезки облоя на кривошипном прессе усилием 2,5 МН (250 т), далее шары по наклонному желобу поступают в установку для закалки.

В связи с тем, что величина зерна зависит от неравномерности деформированного состояния шара во время его штамповки, была поставлена задача получения шара с более равномерной деформацией по сечению за счет изменения размеров исходной заготовки. Для оценки величины неравномерности деформированного состояния шара использовали результаты компьютерного моделирования.

Математическое моделирование штамповки шара показало, что наиболее технологичные размеры исходной заготовки составляют: диаметр 110 мм, высота 118 мм. Для проверки адекватности компьютерного моделирования были проведены экспериментальные исследования деформированного состояния шара с использованием метода определения деформаций в пластической области по распределению твердости. Результаты штамповки шара качественно совпадают с результатами компьютерного моделирования, погрешности компьютерного моделирования не превышают 10 %.

По результатам проведенного исследования была разработана технология штамповки шара из цилиндрической заготовки диаметром 110 мм и длиной 118 мм. Разработанная технология внедрена в производство. За счет сокращения одной операции (предварительная осадка заготовки) темп штамповки сокращен с 18–20 с до 10–12 с. Производительность прессы при штамповке шаров возросла почти в два раза.

**В пятой главе «Внедрение энерго- и ресурсосберегающего комплекса технологий полугорячей безоблойной штамповки»** представлены результаты промышленного внедрения комплекса технологий полугорячей объемной штамповки. Исходная шаровая заготовка высокой точности по массе для последующей штамповки была получена разделением металла на стане поперечно-винтовой прокатки. Для разработки оптимальных энерго- и ресурсосберегающих технических решений использовали математическое и компьютерное моделирование.

На основе результатов проведенных исследований разработаны и внедрены новые технологии получения деталей с применением комплекса полугорячей безоблойной штамповки, представленные в таблице 4.

Таблица 4 – Практическая реализация результатов работы

Технические предложения	Предприятие	Технологический эффект	Экономический эффект (руб)
Калибровка валков и технология прокатки шара 120 мм	ОАО «Гурьевский металлургический завод» Кемеровская обл., г. Гурьевск	Реализация нового вида продукции	3,54 млн. Долевой 1,56 млн.
Методика расчета калибровки валков для прокатки шара и технология прокатки	АО «ЕВРАЗ ЗСМК» Кемеровская обл. г. Новокузнецк	Реализация нового вида продукции	3 млн. Долевой 20 %
Штамповка двух поковок из шаровой заготовки	ООО «Тонар АГРО» Алтайский край, г. Барнаул	Экономия металла 21 %, электроэнергии 23 %. Рост производительности труда 10 %	2 млн. Долевой 2 млн.
Новая технология штамповки детали «корпус распылителя»	ООО «ТехнОмаш» Алтайский край, г. Барнаул	Экономия металла	1 млн. 458 тыс. Долевой 354,5 тыс.
Технология штамповки детали «шестерня»	ОАО «Новокузнецкий вагоностроительный завод» Кемеровская обл. г. Новокузнецк	Экономия металла	2 млн. 991,3 тыс. Долевой 774,8 тыс.

Применение комплекса технологий полугорячей безоблойной штамповки для производства детали шестерня:

Поковка «шестерня» 12.37.118 из стали марки 18ХГТ относится к категории серийной продукции кузнечных цехов. Исходную заготовку – горячекатаный прутки диаметром 95 мм (ГОСТ 2590-88) – при помощи пресс-ножниц ScPK 1800.1 усилием 7,5МН разрезают на мерные цилиндрические заготовки длиной 97 мм. Далее заготовки нагревают до температуры 1100–1150 °С в индукционном нагревателе ИК1 750/1. Штамповка «шестерни» осуществляется на кривошипном горячештамповочном прессе АК КБ 8544 усилием 25 МН за два перехода. Осадка заготовки в торец до высоты 61 мм производится в предварительном ручье штампа. Готовую поковку штампуют с образованием облоя в окончательном открытом ручье. Для последующей обрезки облоя поковка по цепному транспортеру передается на обрезной кривошипный пресс КБ9534 усилием 2,5МН. Готовые поковки складываются в контейнер. Согласно технологическому процессу масса заготовки составляет 5,4 кг, масса поковки 4,75 кг, масса заусенца 0,65 кг.

С целью снижения расхода металла и улучшения механических свойств готового изделия была предложена новая технология полугорячей штамповки поковки «шестерня» 12.37.118 в закрытом штампе из шаровой заготовки диаметром 105 мм.

На первом этапе было проведено компьютерное моделирование процесса штамповки «шестерни» в программном комплексе Deform-3D. Условия моделирования: исходная шаровая заготовка диаметром 105 мм из стали марки 18ХГТ; температура нагрева заготовки 850 °С; штамп изготовлен из штамповой стали 5ХНФ; температура штампа 2000С; смазка графитовая, коэффициент трения 0,4; деформация заготовки производится на кривошипном прессе АККБ 8544 усилием 25 МН.

Результаты компьютерного моделирования штамповки «шестерни» из шаровой заготовки показали, что в процессе заполнения полости штампа металлом зажимы и трещины не образуются. Штамп полностью заполняется металлом, незаполненные углы отсутствуют. Существующая и разработанная технологии приведены на рисунке 16.

По разработанной технологии при штамповке из шаровой заготовки количество операций уменьшается на два перехода, производительность прессы увеличивается. Отсутствие облоя на готовой поковке высвобождает одну единицу оборудования – пресс для обрезки облоя усилием 2,5 МН.

Расчеты показали, что при производстве поковки «шестерня» 12.37.118 безоблойной штамповкой из шаровой заготовки экономия металла на одной поковке составляет 0,65 кг по сравнению с получением этой же поковки горячей объемной штамповкой с облоем. При объеме годового производства поковок 100 тыс. штук экономия металла составит 65 т. Снижение температуры нагрева исходной заготовки позволяет снизить расход электроэнергии на 22 %.

Аналогичные исследования проведены и при разработке нового технологического процесса штамповки поковок «шайба упорная» и «фланец». Эскиз детали «шайба упорная» приведен на рисунке 17.

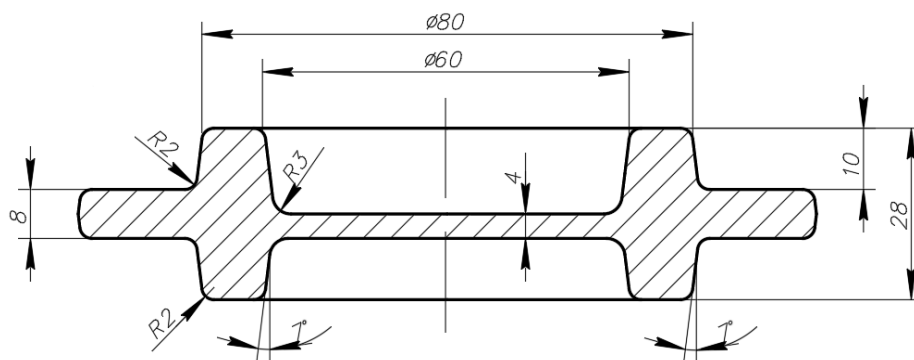


Рисунок 17 – Эскиз поковки «шайба упорная»

Заводская и новая разработанная технологические схемы штамповки детали «шайба упорная» представлена в таблице 5.

Как видно из таблицы 5, согласно новой технологии производства детали «шайба упорная» количество штамповочных операций сокращается на два перехода. Пресс для обрезки облоя не задействован.

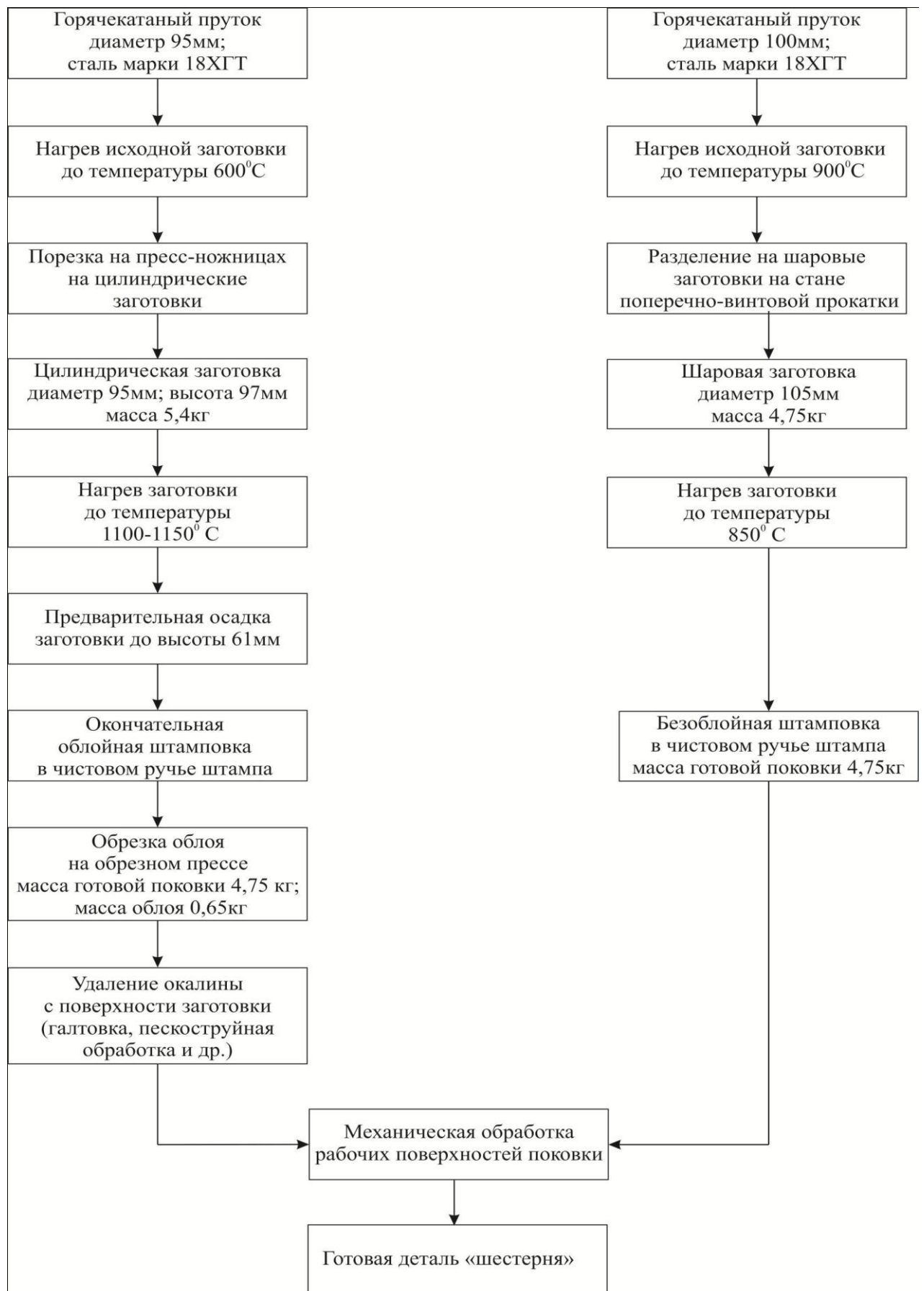


Рисунок 16 – Последовательность технологических операций производства поковки «шестерня» 12.37.118

Таблица 5 – Технологические схемы штамповки поковки «шайба упорная»

Заводская технология	Новая технология
1. Горячекатаный прутки диаметром 50 мм, сталь марки 40Х; 2. Нагрев исходной заготовки до температуры 600 <sup>0</sup> С; 3. Порезка на пресс-ножницах на цилиндрические заготовки; 4. Цилиндрическая заготовка диаметром 50 мм, высотой 90 мм; масса 1,378 кг; 5. Нагрев заготовки до температуры 1200 <sup>0</sup> С; 6. Предварительная осадка до высоты 33 мм; 7. Окончательная облойная штамповка в чистовом ручье штампа; 8. Обрезка облоя на обрезном прессе: масса готовой поковки 0,98кг, масса облоя 0,285кг; 9. Удаление окалины с поверхности заготовки (галтовка, пескоструйная обработка и др)	1. Горячекатаный прутки диаметром 60 мм, сталь марки 40Х; 2. Нагрев исходной заготовки до температуры 900 <sup>0</sup> С; 3. Разделение на шаровые заготовки на стане поперечно-винтовой прокатки; 4. Шаровая заготовка диаметром 62 мм, масса 0,98 кг; 4. Нагрев заготовки до температуры 850 <sup>0</sup> С; 3. Безоблойная штамповка в чистовом ручье штампа масса готовой поковки 0,98кг;
Механическая обработка рабочих поверхностей поковки	
Готовая деталь «шайба упорная»	

Расчеты показали, что при производстве шайбы упорной безоблойной штамповкой из шаровой заготовки экономия металла на одной поковке составляет 0,3 кг по сравнению с получением этой же поковки облойной штамповкой.

Применение комплекса технологий полугорячей безоблойной штамповки для производства детали фланец:

Поковка «фланец» является серийной продукцией кузнечных цехов.

Масса готовой поковки фланца 890 г, масса облоя 233 г, масса угара 13 г. По заводской технологии фланец штампуют за два перехода из цилиндрической заготовки. Масса цилиндрической заготовки из стали 40 диаметром 48 мм и высотой 80 мм составляет 1136 г. Таким образом, потери металла при штамповке только одной поковки составляют до 246 г или 21,7 % от массы поковки.

Применение технологии полугорячей безоблойной штамповки фланца из шаровой заготовки диаметром 60 мм взамен существующей позволило повысить коэффициент использования металла и улучшить качество готовой поковки за счет более равномерного распределения интенсивности деформаций по объему поковки (таблица 6).

При штамповке из шаровой заготовки согласно новой технологии производства фланца количество штамповочных операций сокращается на два перехода. Пресс для обрезки облоя не задействован.

Расчеты показали, что при производстве фланца безоблойной штамповкой из шаровой заготовки экономия металла на одной поковке составляет до 22 % по сравнению с получением этой же поковки облойной штамповкой.

Разработанные методы определения основных технологических параметров, а также определения оптимальной температуры нагрева были использованы для создания технологии изготовления детали «корпус форсунки».



Таблица 6 – Технологические схемы штамповки поковки «фланец»

Заводская технология	Новая технология
1. Горячекатаный пруток диаметром 48 мм, сталь марки 40; 2. Порезка на пресс-ножницах на цилиндрические заготовки 3. Цилиндрические заготовки диаметром 48 мм, высотой 80 мм, масса 1,14 кг; 4. Нагрев заготовки до температуры 1200°C; 5. Предварительная осадка до высоты 35 мм; 6. Окончательная облойная штамповка в чистовом ручье штампа; 7. Обрезка облоя на обрезном прессе: масса готовой поковки 0,89 кг, масса облоя 0,23 кг; 8. Удаление окалины с поверхности заготовки (галтовка, пескоструйная обработка и др.;	1. Горячекатаный пруток диаметром 58 мм, сталь марки 40; 2. Нагрев исходной заготовки до температуры 900°C; 3. Разделение на шаровые заготовки диаметром на стане поперечно-винтовой прокатки, масса заготовки; 4. Шаровая заготовка диаметром 60 мм, масса 0,89 кг; 5. Нагрев заготовки до температуры 850°C; 6. Безоблойная штамповка в чистовом ручье штампа масса готовой поковки 0,89кг
Механическая обработка рабочих поверхностей поковки	
Готовая деталь «фланец»	

Предварительно было проведено компьютерное моделирование процесса выдавливания. Условия моделирования: исходной заготовкой является точная цилиндрическая заготовка диаметром 16,5 мм длиной 38,5 мм из стали марки 18Х2Н4МА. Деформация заготовки производится на кривошипном прессе в закрытом штампе при температуре 850 °С при коэффициенте трения 0,4.

При штамповке с внешним компенсатором заготовку диаметром 16,5 мм и длиной 38,5 мм из стали 18Х2Н4МА нагревают в индукторе токами высокой частоты (1000 Гц) до температуры 830–850 °С и штампуют за один переход на кривошипном прессе усилием 1600 кН. Избыток металла заполняет полость компенсатора и удаляется затем путем механической обработки резанием.

При штамповке с внутренним компенсатором заготовку размерами после нагрева в индукторе токами высокой частоты до температуры 830–850 °С штампуют за два перехода на кривошипном прессе усилием 1600 кН. На первом переходе происходит свободное выдавливание металла и оформление компенсационной полости. На втором переходе происходит заполнение носика распылителя и вытеснение избытков металла в полость компенсатора, которая уменьшает свои размеры. Дополнительная операция по удалению заусенца отсутствует, деталь подвергается только операции шлифовки.

Для изготовления детали «корпус распылителя» дизельной форсунки спроектирован и запущен в работу технологический комплекс штамповки выдавливанием (рисунок 18).

Технологический комплекс включает прокатку на шаропрокатном стане цилиндрической заготовки, нанесение графитовой смазки на заготовку, нагрев заготовки токами высокой частоты и выдавливание поковки в закрытом штампе за один переход.

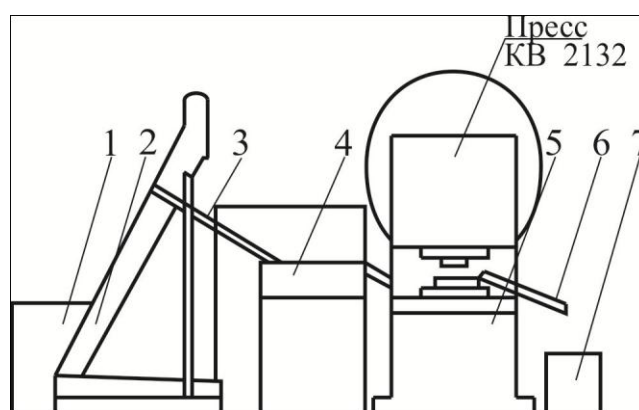


Рисунок 18 – Участок автоматической линии штамповки детали «корпус форсунки»

Технологическая линия (автоматизированный комплекс) состоит из двух участков и работает следующим образом. На участке получения мерной заготовки связка прутков стали 18Х2Н4МА подается в накопитель автоматизированного стеллажа. Пруток со стеллажа задается в проходной индукционный нагреватель, подогревается до температуры 750 °С и задается в валки стана поперечно-винтовой прокатки. В прокатном стане происходит разделение прутка на мерные цилиндрические заготовки.

Далее заготовка поступает в бункер-накопитель участка штамповки. В бункер-накопитель 1 подается графитовая смазка, которая равномерно распределяется по поверхности заготовок при их перемешивании в бункере. Тракторным транспортером 2 смазанная заготовка переносится вверх, откуда она попадает в лоток 3, из которого поштучно задается в индукционный нагреватель блока ТВ4-11 – 4. Нагретая заготовка выталкивается из индуктора и попадает в штамп кривошипного пресса 5. Для полугорячей штамповки выдавливанием в закрытом штампе используем пресс КВ2132 усилием 1600 кН.

По расчетам Алтайского научно-исследовательского института технологии машиностроения (АНИТИМ) (г. Барнаул) внедрение одного автоматизированного комплекса штамповки детали «корпус распылителя» позволяет получить годовой экономический эффект 9,5 млн. рублей, экономить – 30 т стали 18Х2Н4МА, высвободить 13 единиц металлорежущего оборудования и перевести на другие работы 5 человек производственного персонала.

### Заключение

Реализация комплекса технологий полугорячей безоблойной штамповки поковок круглых в плане из шаровой заготовки на примерах штамповки деталей «шестерня», «фланец», «шайба упорная» и других поковок показала его эффективность и перспективность. Возможность повышения энерго- и ресурсосбережения в процессах обработки металлов давлением за счет получения точной по массе заготовки, полугорячего малоокислительного нагрева и применения технологии безоблойной штамповки является мощным стимулом дальнейших исследований в этой области.

### Основные выводы:

1. Разработаны и научно обоснованы концептуальные основы комплекса ресурсосберегающих технологий полугорячей безоблойной штамповки стальных изделий ответственного назначения, включающего получение точных по массе заготовок путем разделения металла на станах поперечно-винтовой прокатки, нагрева заготовок до температур полугорячей штамповки, полугорячей безоблойной штамповки в закрытых штампах.

2. Разработана новая методика расчета калибровки валков стана поперечно-винтовой прокатки для разделения металла на геометрически точные шаровые заготовки для безоблойной штамповки в закрытых штампах. На основании разработанной методики рассчитаны новые дискретные однозаходные калибровки валков стана поперечно-винтовой прокатки с изменяющимся шагом подрезки реборды через каждые  $90^\circ$ . Исследование качества прокатанных стальных шаровых заготовок показало, что шары имеют одинаковую плотность по диаметральному сечению. Пустоты и рыхлости в центральных слоях отсутствуют. Шаровые заготовки имеют стабильную массу для всех исследованных диаметров в интервале 50–120 мм. Отклонение массы шаров от номинала не превышает 2 %. По мере увеличения диаметра шара и износа валков отклонение массы шаров от номинала увеличивается незначительно и не превышает 3,8 %.

3. Разработана методика и проведены комплексные экспериментальные исследования разделения прутка на шаровые заготовки номинальным диаметром 90 мм на промышленном стане поперечно-винтовой прокатки 40-80. В результате проведенных исследований энергосиловых параметров прокатки, расчета прочностных характеристик и использования разработанных технических решений расширен сортамент (до шаровых заготовок диаметром 100 мм) и повышена производительность стана поперечно-винтовой прокатки 40–80 ЭЗТМ за счет прокатки тяжелого профиля.

4. Проведены комплексные экспериментальные исследования по определению сопротивления металла деформации, пластическим свойствам и угару в интервале температур 600–1000 °С полугорячей штамповки углеродистой и легированной стали 10 марок: Ст3сп, 20, 20ХН, 40, 40Х, 40ХН, 65Г, 35ХГСА, 18ХГТ, 18Х2Н4МА. Впервые для определения оптимальной температуры нагрева заготовок для точной объемной штамповки поковок применена обобщенная функция желательности. В качестве откликов использованы: сопротивление металла деформации; пластические свойства металла, степень деформации сдвига до разрушения; поверхностный угар при нагреве. Установлено, что график обобщенной функции желательности имеет вид кривой с максимумом. Максимальное значение функции желательности соответствует оптимальной температуре нагрева металла для полугорячей штамповки. Определены оптимальные температуры 750–870 °С полугорячей штамповки в зависимости от марки стали Ст3сп, 20, 20ХН, 40, 40Х, 40ХН, 65Г, 35ХГСА, 18ХГТ, 18Х2Н4МА.

5. С применением физического и математического моделирования проведены сравнительные экспериментальные исследования напряженного и деформированного состояния, использования ресурса пластичности, энергосиловых условий

деформации металла при штамповке поковок круглых в плане (шестерня и фланец) из шаровых и цилиндрических заготовок. Установлено, что при штамповке поковок круглых в плане (штампующих в торец) полость штампа полностью заполняется металлом, поверхностных дефектов на готовой поковке не обнаружено. Напряженное состояние поковки можно характеризовать как объемное сжатие. Отмечено наличие растягивающих напряжений на свободной боковой поверхности поковки на промежуточных стадиях формоизменения. Однако максимальная степень использования ресурса пластичности для всех исследованных поковок не превышает 18 %. При штамповке из шаровой заготовки неравномерность деформации меньше на 15–29 %, и усилие штамповки на 20–30 % ниже, чем при штамповке из цилиндрической заготовки.

6. В результате физического и математического моделирования установлено, что при полугорячей штамповке поковок детали «корпус распылителя» прямым выдавливанием в закрытом штампе с увеличением коэффициента вытяжки от 2 до 4 относительное удельное усилие увеличивается в 1,8–1,9 раза. С увеличением угла наклона матрицы от 60° до 90° относительное удельное усилие возрастает на 4–6%. С увеличением коэффициента трения возрастает величина относительного удельного усилия, однако характер общей зависимости  $q = f(\lambda, \gamma)$  не изменяется. Исследования заполнения металлом торцевой части поковки стержня диаметром 9,6 мм с различной конфигурацией показали, что торцевая часть стержня поковки любой конфигурации (цилиндрическая, конусная, специальная форма) заполняется металлом. С использованием методики планирования эксперимента выполнены исследования формоизменения металла и усилий при полугорячем выдавливании металла в закрытом штампе. Установлена зависимость силы выдавливания от угла наклона матрицы, коэффициента трения и коэффициента вытяжки. Торцевая часть поковки может увеличивать усилие выдавливания в 3,0 раза.

7. По результатам теоретических и промышленных исследований для производства шаровых заготовок повышенной точности по массе:

- на АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк по новой методике разработана и внедрена в производство калибровка валков и технология прокатки шаров диаметром 30–50 мм. За счет реализации новой продукции получен экономический эффект в размере 3 млн. рублей;

- проведена реконструкция шаропрокатного стана 40–80 ОАО «Гурьевского металлургического завода», г. Гурьевск для прокатки шаровых заготовок диаметром 120 мм. Разработаны и внедрены: новая калибровка прокатных валков для проката шаров диаметром 120 мм; новая технология прокатки шаров большого диаметра повышенного качества. Совокупный экономический эффект за счет реализации нового вида продукции составляет 3 млн. 64 тыс. рублей в год.

8. Базируясь на концепции комплекса технологий полугорячей безоблойной штамповки, разработаны энерго- и ресурсосберегающие технологии полугорячей штамповки поковок:

- для условий ОАО «Новокузнецкий вагоностроительный завод», г. Новокузнецк, разработана и внедрена новая технология штамповки поковки «шестерня». Использование закрытого штампа и шаровой заготовки позволило сократить

отходы металла. Годовая экономия от внедрения новой технологии составляет 65 т стали марки 18ХГТ, что в денежном выражении соответствует 2 млн. 991,3 тыс. рублей

– в условиях ООО «Тонар – АГРО» г. Барнаул (Алтайский край) установлена оптимальная температура нагрева, спроектированы штампы, выполнено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния полугорячей безоблойной штамповки поковок «фланец» и «шайба упорная» в закрытых штампах из шаровой заготовки. Снижение температуры нагрева заготовок и использование безоблойной штамповки позволило снизить расход металла на 21 %, расход электроэнергии на 23 %, на 10 % увеличить производительность труда. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения новой технологии около 2 млн. рублей;

– для условий ООО «ТехнОмаш» г. Барнаул (Алтайский край) разработана энерго- и ресурсосберегающая технология полугорячей точной штамповки детали «корпус распылителя» для дизельных двигателей. Внедрение новой технологии штамповки поковки «корпус распылителя» позволило снизить расход металла и получить в условиях массового производства годовую экономию в размере 1 млн. 458 тыс. рублей.

Совокупный годовой эффект внедрения проведенных исследований в производство составляет 13 млн. 89,3 тыс. рублей.

9. Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет» и используются при подготовке бакалавров по направлению подготовки 22.03.02 – Metallurgy; магистров по направлению подготовки 22.04.02 – Metallurgy; аспирантов по направлению подготовки 22.06.01 – Technologies of materials.

### **Список публикаций по теме диссертационной работы Статьи в журналах из перечня ВАК**

1. Филиппова, М. В. Математическое моделирование прокатки шаров [Текст] / М. В. Филиппова [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2017. – Т. 60. – № 7. – С. 516–521.
2. Филиппова, М. В. Полугорячая штамповка шестерни [Текст] / М. В. Филиппова [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – 2017. – № 4. – С. 171–176.
3. Филиппова, М. В. Усилия и напряжения при прокатке шара [Текст] / М. В. Филиппова, В. Н. Перетяtko, С. В. Сметанин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59. – № 8. – С. 587–588.
4. Филиппова, М. В. Моделирование в QForm-3D штамповки шестерни из шаровой заготовки [Текст] / М. В. Филиппова [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – 2016. – № 8. – С. 14–18.
5. Филиппова, М. В. Компьютерное моделирование прокатки шаров большого диаметра [Текст] / М. В. Филиппова, С. В. Сметанин, В. Н. Перетяtko //

Бюллетень научно-технической и экономической информации. Черная металлургия. – 2016. – Вып. 9 (1401). – С. 75–78.

6. Филиппова, М. В. Кривые течения аустенитной стали 08X18H10T при горячей деформации [Текст] / М. В. Филиппова, М. В. Темлянцев, В. Н. Перетяtko // Проблемы черной металлургии и металловедения. – 2015. – № 4. – С. 104–109.

7. Филиппова, М. В. Качество мелющих шаров [Текст] / М. В. Филиппова, А. С. Климов, В. Н. Перетяtko // Заготовительные производства в машиностроении. – 2015. – № 12. – С. 30–35.

8. Перетяtko, В. Н. Калибровка валков шаропрокатного стана. Сообщение 1 [Текст] / В. Н. Перетяtko, А. С. Климов, М. В. Филиппова // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – № 4. – С. 27–30.

9. Перетяtko, В. Н. Калибровка валков прокатного стана. Сообщение 2 [Текст] / В. Н. Перетяtko, А. С. Климов, М. В. Филиппова // Известия вузов. Черная металлургия. – 2013. – Т. 56. – № 6. – С. 16–20.

10. Перетяtko, В. Н. Шаровая заготовка [Текст] / В. Н. Перетяtko, М. В. Филиппова, А. С. Климов [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. – 2012. – № 3. – С. 17–19.

11. Филиппова, М. В. Осадка шаровой заготовки [Текст] / М. В. Филиппова, А. А. Федоров, Г. С. Котлов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 6. – С. 55–56.

12. Филиппова, М. В. Моделирование безоблойной штамповки из шаровой заготовки [Текст] / М. В. Филиппова [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 10. – С. 24–27.

13. Перетяtko, В. Н. Моделирование штамповки осесимметричных поковок [Текст] / В. Н. Перетяtko, А. В. Бахаев, М. В. Филиппова // Известия вузов. Черная металлургия. – 2010. – № 4. – С. 27–29.

14. Перетяtko, В. Н. Штамповка осесимметричных поковок [Текст] / В. Н. Перетяtko, А. В. Бахаев, М. В. Филиппова, С. А. Вахман // Известия вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 4. – С. 21–22.

15. Перетяtko, В. Н. Моделирование процесса штамповки шара [Текст] / В. Н. Перетяtko, А. В. Бахаев, С. А. Вахман, М. В. Филиппова // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 12. – С. 30–31.

16. Филиппова, М. В. Аналитический расчет функции желательности при полугорячей штамповке стали 18X2H4MA [Текст] / М. В. Филиппова // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 4. – С. 67–68.

17. Перетяtko, В. Н. Выбор оптимальной температуры нагрева заготовки для полугорячей штамповки [Текст] / В. Н. Перетяtko, М. В. Филиппова // Известия вузов. Черная металлургия. – 2006. – № 6. – С. 16–19.

18. Перетяtko, В. Н. Пластичность высокохромистых среднеуглеродистых нержавеющей сталей / В. Н. Перетяtko, М. В. Филиппова // Известия вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 12. – С. 21–23.

### Статьи в зарубежных изданиях (из списка Scopus, Web of Science)

1. Filippova, M. V. Rolling of metal ball [Text] / M. V. Filippova, M. V. Temlyantsev, V. N. Peretyat'ko, E. E. Prudkii // Steel in Translation. – 2017. – Vol. 47. – No. 7. – P. 435–439.
2. Peretyatko, V. N. Roller grooving in ball-rolling mills [Text] / V. N. Peretyatko, A. S. Klimov, M. V. Filippova // Steel in Translation. – 2013. – Vol. 43. – No. 4. – P. 168–170.
3. Filippova, M. V. Flash-free stamping from a spherical blank [Text] / M. V. Filippova [et al.] // Steel in Translation. – 2011. – Vol. 41. – No. 10. – P. 805–807.
4. Peretyatko, V. N. Stamping axisymmetric forgings [Text] / V. N. Peretyatko, A. V. Bakhaev, M. V. Filippova, S. A. Vakhman // Steel in Translation. – 2009. – Vol. 39. No. 4. – P. 300–301.
5. Peretyatko, V. N. Simulation of ball stamping [Text] / V. N. Peretyatko, A. V. Bakhaev, S. A. Vakhman, M. V. Filippova // Steel in Translation. – 2008. – Vol. 38. – No. 12. – P. 971–972.

### Монографии

1. Развитие теории и практики металлургических технологий [Текст] : монография : В 3 т. / Под ред. В. Н. Перетятко, Е. В. Протопопова, И. Ф. Селянина. Т. 2 : Пластичность и разрушение стали в процессах нагрева и обработки давлением / В. Н. Перетятко, М. В. Темлянцев, М. В. Филиппова. – Москва : Тепло-техник, 2010. – 352 с.
2. Филиппова, М. В. Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением : монография [Текст] / М. В. Филиппова, В. Н. Перетятко, М. В. Темлянцев. – Новосибирск : СО РАН, 2016. – 266 с.

Подписано в печать 25.02.2021 г.

Формат 60×84 1/16. Бумага писчая. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 2,38 Тираж 100 экз. Заказ

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»

654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42

Издательский центр СибГИУ