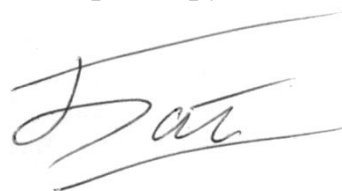


На правах рукописи



Аспирант

БАТЯЕВ ДАНИИЛ ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОЛЕЦ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ
НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОСАДКИ ЗАГОТОВОК**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена на кафедре «Технология и оборудование трубного производства» (ТОТП) в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»).

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки РФ

Лауреат Премии Совета Министров СССР

доктор технических наук, профессор **Тюрин Валерий Александрович**

Официальные оппоненты:

Кобелев Олег Анатольевич доктор технических наук,
главный специалист
ГК «РОСАТОМ» ГНЦ РФ ОАО НПО
«ЦНИИТМАШ»

Балуев Сергей Арсеньевич кандидат технических наук,
сотрудник представительства фирмы ZDAS (Чехия)
в России и странах СНГ

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения (ИМЕТ РАН) им. А.А. Байкова

Защита диссертации состоится « 23 » октября 2013 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.09 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС») по адресу.

119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, ауд. Б-607.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

Автореферат разослан « 20 » сентября 2013 года

Справки по телефону: (495) 955-01-27

e-mail: pdss@misis.ru

Ученый секретарь

диссертационного совета



Ионов С.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В настоящее время ужесточают требования к повышению топливной экономичности летательных аппаратов. Активно разрабатывают и внедряют экономичные крупногабаритные двигатели нового поколения, в которых используют кольца диаметром до (3200-3600) мм и высотой до (800-1200) мм. В энергетическом и атомном машиностроении установлена общемировая тенденция перехода на сверхкритические параметры пара и применение новых материалов, для производства экономичных крупногабаритных кольцевых полуфабрикатов для паровых, газовых и гидравлических турбин. К подшипниковым узлам предъявляют все большие требования по прочности, износостойкости и способности выдерживать экстремальные нагрузки.

Учитывая данные тенденции в машиностроении, увеличивается необходимость в производстве крупногабаритных высококачественных кольцевых изделий из различных сталей и сплавов.

Цель и задачи работы.

Целью диссертационной работы является разработка высокоэффективной ресурсосберегающей технологии производства колец из жаропрочных сплавов для изделий ответственного назначения.

Для достижения цели работы были поставлены и решены следующие задачи:

- Исследовать технологию горячего деформирования и выяснить какая операция играет главную, ведущую роль. Для установленной операции выполнить исследование зонообразования и распределения местных деформаций в заготовках, а также предложить, обосновать технологические мероприятия по получению заданных формы, структуры и распространения зон деформации в заготовках, и заданного распределения местных деформаций.
- Разработать и спроектировать деформирующий инструмент (бойки) для реализации заданного распределения деформаций.
- Разработать методику расчета технологических факторов, обеспечивающих решение задачи регулирования полей деформации, расчетный инструмент в виде математической модели.
- Разработать компьютерные программы и графоаналитический инструмент расчета, позволяющие решить две задачи: прямую - по определению режимов деформирования и обратную – прогнозировать качество металла поковок колец по шести параметрам оптимизации в зависимости от конкретных значений четырех основных технологических факторов.

Научная новизна работы.

1. Расчленение монолитных полей сил трения с одновременным расчленением монолитных тепловых полей с последующим их чередованием в периферийной и центральной областях на контактных поверхностях заготовки при осадке позволило регулировать процессы локализации и рассредоточения макросдвиговых деформаций.

2. В результате математического планирования эксперимента при поиске оптимальных условий по шести параметрам при осадке комбинированным инструментом, предложен интегральный внешний параметр оптимизации: профиль бочки - пять разновидностей.

3. Созданный графоаналитический инструмент расчета позволил оперативно решать две технологические задачи:

- прямую – определять оптимальные технологические режимы деформирования коническими и плоскими бойками, выбирать соотношения геометрических размеров исходных заготовок, конструировать рабочий ковочный инструмент – конические бойки,
- обратную – прогнозировать качество металла поковок колец по шести параметрам в зависимости от конкретных значений основных четырех технологических факторов устанавливаемых на заводе при производстве колец.

4. Теоретическими расчетами установлено и подтверждено экспериментально, что все стадии образования разновидностей профиля бочки реализуются при осадке заготовок с соотношением высоты к диаметру, равным 1,0 и обжатием на небольшую величину, равную 25 %, с небольшим диаметром плоской рабочей площадки конического бойка, равным 0,4 от диаметра заготовки. Осадка заготовок с соотношением высоты к диаметру, равным 2,5, возможна без образования выпуклой одинарной бочки.

Практическая значимость работы.

Разработан, изготовлен и применяется на ОАО «Русполимет» кузнечный инструмент для осадки заготовок, даны рекомендации по углу при вершине конического бойка и диаметру плоской рабочей площадки. Эффективность применения осадки коническими и плоскими бойками по сравнению с осадкой только плоскими бойками доказана опробованием и применением разработанной технологии в промышленных условиях завода ОАО «Русполимет».

Результаты теоретических исследований реализованы при производстве трех партий колец в количестве 14 штук из жаропрочных сплавов ЭП693-ВД, ЭИ698-ВД, ЭП708-ВД, переданных Заказчику.

Разработан и запатентован «Способ производства кольцевых изделий» (патент РФ №2465979).

Разработаны четыре компьютерных программы, шесть уравнений регрессии и графоаналитический инструмент расчета для определения оптимальных режимов деформирования и прогнозирования качества металла поковок колец. Программы, уравнения и графоаналитический инструмент расчета переданы и приняты Отделом Главного технолога на заводе ОАО «Русполимет».

Графоаналитический инструмент расчета применен при построении технологии получения поковок дисков из стали 07X16H4Б.

Технологические рекомендации, содержащиеся в трех научно-технических отчетах, утверждены научно-техническим советом завода и применяются в повседневной работе технологов.

Результаты работы внедрены в процесс обучения студентов по направлению «Металлургия» и профилю «Обработка металлов давлением».

Методы исследований и достоверность полученных результатов.

Для исследования величин местных деформаций, конфигурации зон деформации и тепловых полей в заготовках при осадке была выбрана конечно-элементная система QForm-2D v.2.2.03, как наиболее эффективная и простая система.

При разработке уравнений регрессии процесса осадки комбинированным инструментом применялся эффективный метод крутого восхождения.

Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, имеют теоретическое и практическое обоснование, получены с использованием экспериментальных и теоретических методов исследования, математической обработки результатов на современной вычислительной технике. Промышленное опробование подтвердило адекватность полученных результатов.

Уравнение регрессии, описывающее форму бочки после комбинированной осадки, позволяет заменить компьютерное моделирование в QForm-2D в 75 % опытов, так как результаты расчетов по математической модели совпадают с результатами компьютерного моделирования в QForm-2D в 6 из 8 опытов.

Результаты промышленного эксперимента и результаты компьютерного моделирования в QForm-2D по форме боковой поверхности осаженной заготовки совпадают в 62,5 % опытов.

Результаты расчетов, моделирования и промышленного эксперимента совпали в 37,5 % опытов.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Способ регулирования процессов локализации и рассредоточения макросдвиговых деформаций: расчленение монолитного поля деформаций и тепловых полей.

2. Технологические условия выполнения основной операции горячего деформирования при производстве колец.

3. Технологические инструменты для расчета факторов исполнения основной операции горячего деформирования – осадки: четыре компьютерных программы, шесть уравнений регрессии и графоаналитический инструмент расчета.

4. Количественные показатели эффективности и ресурсосбережения разработанной технологии производства колец из жаропрочных сплавов.

Апробация работы. Результаты работы были представлены и обсуждены в 7-и проектах: Международных, межвузовских научно-технических конференциях 65, 66 и 67-е Дни науки студентов МИСиС (Москва, 2010 – 2012); VI Международной научно-технической конференции «Инновационные технологии обработки металлов давлением» (Москва, 2011); Конкурсе У.М.Н.И.К. (Москва, 2012); II Международном научно-техническом Форуме «Дорога к звездам» (Москва, 2012); XII Всероссийской выставке НТТМ-2012 (Москва, 2012).

Публикации. Основное содержание работы отражено в 7 печатных работах, из них 6 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, и в 1 патенте РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, изложена на 170 страницах машинописного текста, включающего 96 рисунков, 28 таблиц, список использованных источников из 58 наименований отечественных и зарубежных авторов, 3 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи, приведен последовательный план исследований, раскрыта научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе изложен аналитический обзор литературы по производству колец.

Рассмотрены назначение и профили колец. Проанализированы основные способы производства колец - объемной штамповкой, литьем, раскаткой кованых, трубных, литых заготовок. Для производства цельнокатаных колец ответственного назначения наилучшей технологией является содержащая осадку, прошивку заготовок на прессе или молоте с последующей раскаткой на автоматизированных установках.

На основании рассмотрения выделены как операции горячего деформирования заготовок при производстве колец: осадка, прошивка и раскатка, и для основной из них – осадки – выполнен анализ технологических преимуществ и недостатков.

Во второй главе представлены результаты исследований зон деформации, накопленной степени деформации и тепловых полей в заготовках при основной операции горячего деформирования – осадке.

Исследованию операции осадки предшествовала характеристика объекта деформирования.

Кольца ответственного назначения из жаропрочных труднодеформируемых сплавов производят из слитков ВДП. Макроструктура слитка ВДП характеризуется следующими элементами, важными для построения технологииковки: зона осевой ликвации, белые «усы» (шнуры), усадочные несплошности, междендритные трещины, зона транскристаллизации, которая занимает почти всю площадь сечения слитка (рисунок 1), причем угловая ориентация дендритов изменяется от 0^0 до 90^0 по отношению к оси слитка.

Кованные штанги, производимые из слитков ВДП, поставляют с коэффициентом укова не менее 7,0 по ТУ 14-1-1531-75 – и с коэффициентом укова 3,0 по ТУ 14-1-1530-75. Такой большой коэффициент укова необходим для преобразования литой структуры металла слитка ВДП в деформированную. Традиционная технология (рисунок 2), начинается с предварительнойковки слитков ВДП – операций биллетировки, осадки и протяжки. Затем полученную штангу ВДП разрезают на мерные заготовки, которые осаживают, прошивают, просекают и раскатывают. Раскатку осуществляют как свободной ковкой на оправке, так и наиболее современным способом - на автоматизированных комплексах (рисунок 3). Комплекс, включает рабочий валок 1, оправку 2, два аксиальных валка 3, 4 и два центрирующих ролика 5, 6. Контроль размеров кольца осуществляется при помощи лазерного устройства.



Рисунок 1 – Типичная макроструктура слитка ВДП жаропрочного сплава на никелевой основе

В России комплекс фирмы «SMS MEER» установлен на Кулебакском металлургическом заводе ОАО «Русполимет». Максимальный диаметр получаемых на нем колец – 6000 мм, максимальная масса кольца - 12 т. На рисунке 3 обозначено: Р – внешнее усилие, Q и Q^I – потоки вытеснения, локализованные на рабочем валке (деформирующем

кольцевом инструменте) и оправке, V и V^I – предписанные потоки на рабочем валке (деформирующем кольцевом инструменте) и оправке, T – силы трения на участке заготовки, деформируемом валком, T^I – силы трения на участке заготовки, деформируемом оправкой, T^{II} – силы трения на оправке. При раскатке на таком комплексе на поверхности контакта кольца с рабочим валком, на участке захвата, действуют активные силы трения T , за счет которых происходит непрерывное вращение кольца. Кольцо тянет за собой оправку, создавая на ней активные силы трения T^{II} .

Исследование деформированного (рисунки 4, 6) и теплового (рисунок 7) состояний заготовок при осадке проводилось в конечно-элементной системе QForm-2D v.2.2.03. Для моделирования на начальном этапе были выбраны заготовки диаметром 400 мм, что соответствует диаметру слитка МР-2 широко применяющемуся на заводе ОАО «Русполимет». На данном заводе при производстве колец часто осаживают заготовки с соотношением высоты к диаметру близким или равным 1,0, поэтому для моделирования на начальном этапе были выбраны заготовки высотой 400 мм.

Для моделирования в QForm-2D были заданы следующие необходимые условия, значения которых максимально приближены к применяемым в производстве: температура нагрева заготовки перед каждой операцией осадки равна 1200 °С; температура нагрева инструмента составляет 250 °С; перед каждой операцией осадки заготовка охлаждается на воздухе в течение 45 с, а затем охлаждается на инструменте 30 с; материал смазки – no-st-h (горячая ковка стали без смазки), в данном случае коэффициент трения стали по стали составит порядка 0,3; деформирующее оборудование – гидравлический пресс усилием 98 МН; заготовки осаживали коническими и плоскими бойками до высоты 200 мм (на степень деформации по высоте ϵ_{H0} равную 50 %). При данной степени деформации у заготовки с соотношением высоты к диаметру, равным 1,0, наблюдается максимальное бочкообразование с четко выраженной формой, что позволяет определить наилучшие углы при «вершине» и диаметры плоской рабочей площадки конических бойков.

Установлено, что при обжатии заготовки плоскими бойками (рисунок 4) образуются массивные зоны затрудненной деформации (темные области вблизи торцов заготовки с величиной накопленной степени деформации 1.1), которые занимают до 30 % объема заготовки, а локальные деформации в них примерно в 2,7 раза меньше, чем в центре заготовки. При прошивке металл зон затрудненной деформации полностью не удаляется с выдрой.

С целью уменьшения объема зон затрудненной деформации и повышения равномерности деформации по сечению заготовки было предложено обжимать заготовки комбинированным инструментом – вначале коническими, а затем плоскими бойками. По известным способам производства колец и коническим бойкам для данного производства

было проведено патентное исследование. После исследования найденных материалов было предложено техническое решение по производству кольцевых изделий (рисунок 5), представляющее собой последовательность операцийковки: осадку коническими бойками, осадку плоскими бойками, прошивку и раскатку заготовки. Конические бойки имеют плоские рабочие площадки диаметром, равным диаметру прошиваемого отверстия. На данное техническое решение получен патент на изобретение - патент РФ №2465979.

Конические бойки с плоскими рабочими площадками показаны на рисунке 5. Для эффективного их применения необходимо найти подходящий диаметр плоской площадки, и угол при «вершине». Для диаметра плоской рабочей площадки было выбрано два крайних значения 250 мм и 140 мм, исходя из оснащения завода ОАО «Русполимет» на котором наиболее часто применяются диаметры прошивня от 140 мм до 250 мм, а диаметр плоской рабочей площадки равен диаметру прошивня. Диапазон углов при «вершине» конических бойков при компьютерном моделировании варьировали от 60° до 150° , так как при углах меньше 60° бойки аналогичны прошивням и равномерная деформационная проработка металла по всему сечению заготовки не будет достигнута, а при углах больше 150° бойки аналогичны плоским.

Осадка заготовок комбинированным инструментом (рисунок 6, б) по сравнению с осадкой плоскими бойками (рисунок 4) позволяет уменьшить объем зон затрудненной деформации в 2 раза за счет уменьшения площади контакта заготовки с рабочим инструментом в начале осадки. Металл из этих зон заготовки удаляется полностью при прошивке заготовки, что предотвращает попадание металла со слабой деформационной проработкой в готовое кольцо.

На основании анализа изменения зон деформации в зависимости от угла при «вершине» конических бойков установлено, что вне зависимости от диаметра плоской рабочей площадки конических бойков наилучшие углы составляют от 90° до 120° . Для завода ОАО «Русполимет» были рекомендованы бойки с углом при «вершине» 120° как наиболее практичные, так как при большем угле при «вершине» конических бойков, существует больше возможностей для переточки инструмента за счет уменьшения угла при «вершине» или диаметра плоской рабочей площадки.

Уменьшение диаметра плоской рабочей площадки конических бойков позволяет уменьшить объем зон затрудненной деформации и улучшить равномерность деформации в заготовке (рисунок 6). При перечисленных выше условиях компьютерного моделирования наилучшими размерами конических бойков является: угол при «вершине», равный 120° и диаметр плоской рабочей площадки равный 140 мм. Бойки с данными размерами применяются при производстве колец (рисунок 5) на операции осадки.

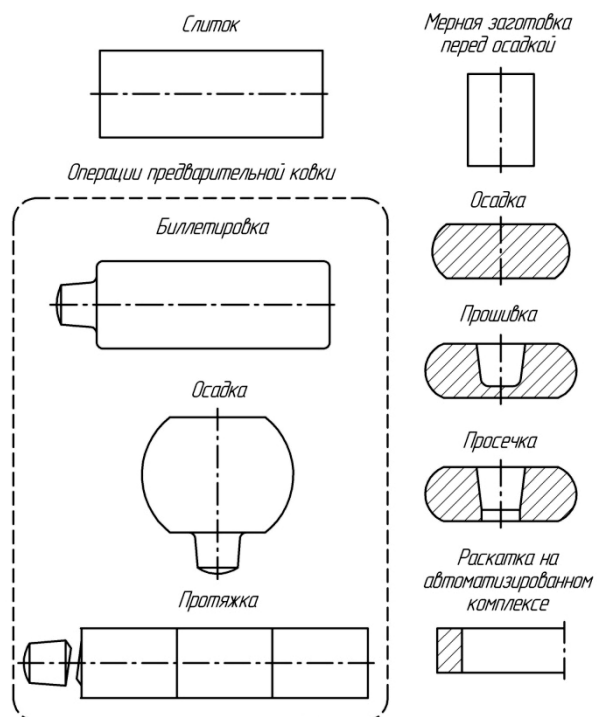


Рисунок 2 – Последовательность операций в традиционной технологии ковки колец

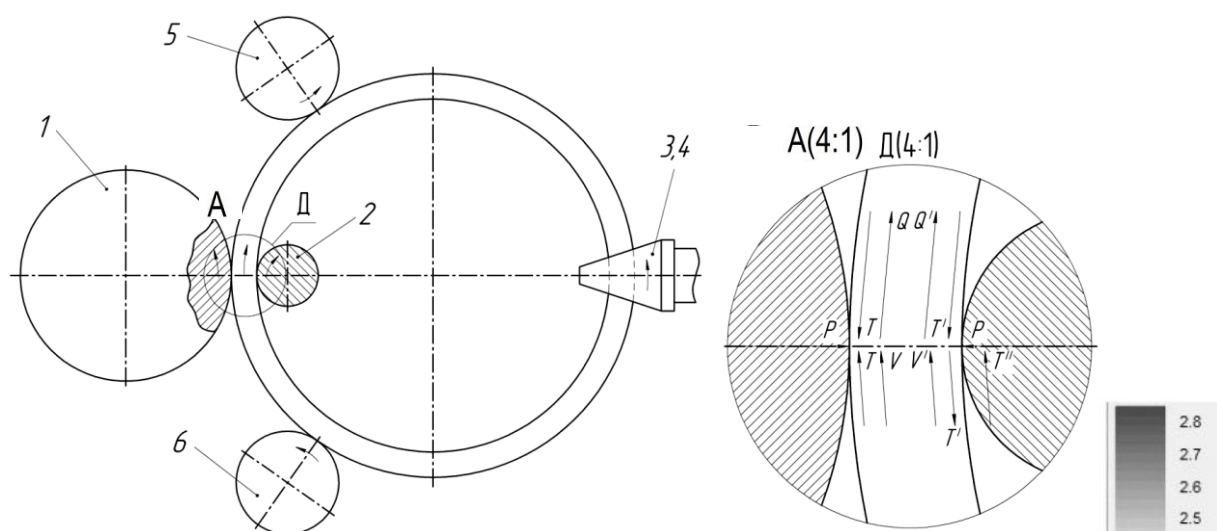


Рисунок 3 – Схема раскатки на автоматизированном комплексе

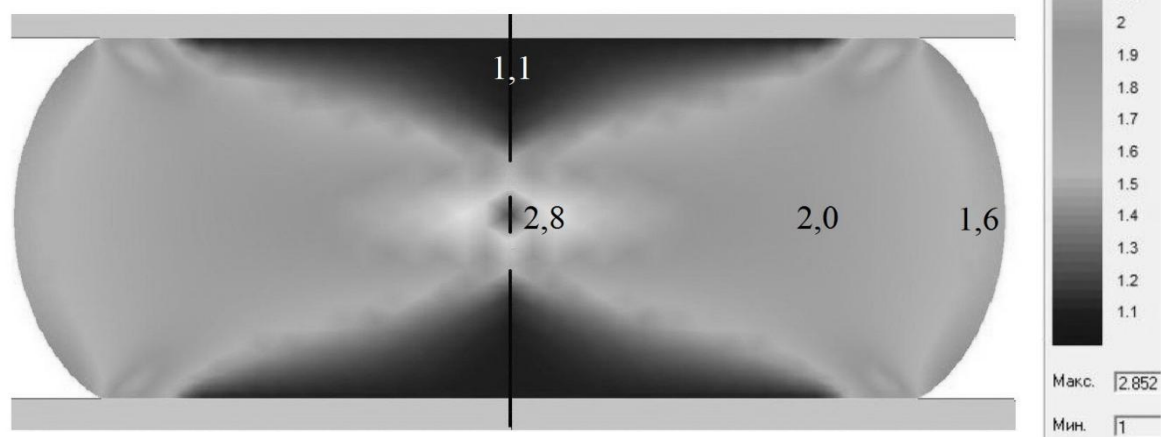


Рисунок 4 – Зоны деформации в заготовке при осадке плоскими бойками

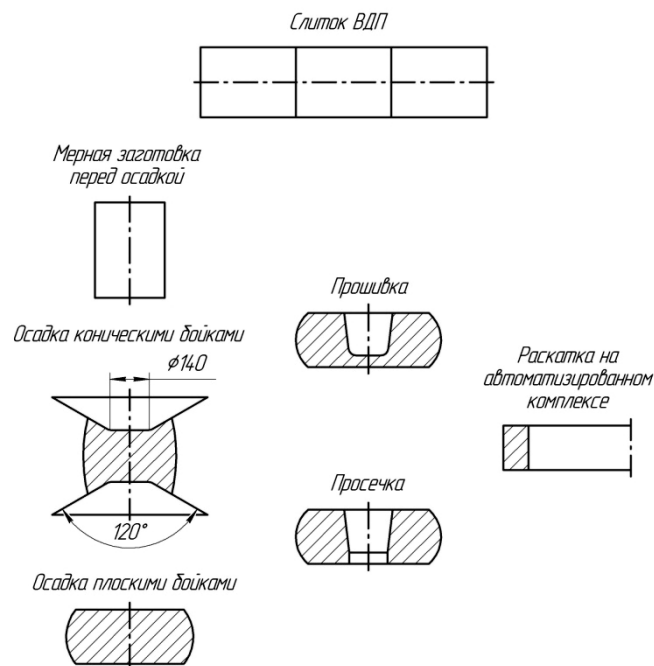


Рисунок 5 – Последовательность операцийковки с применением комбинированного инструмента

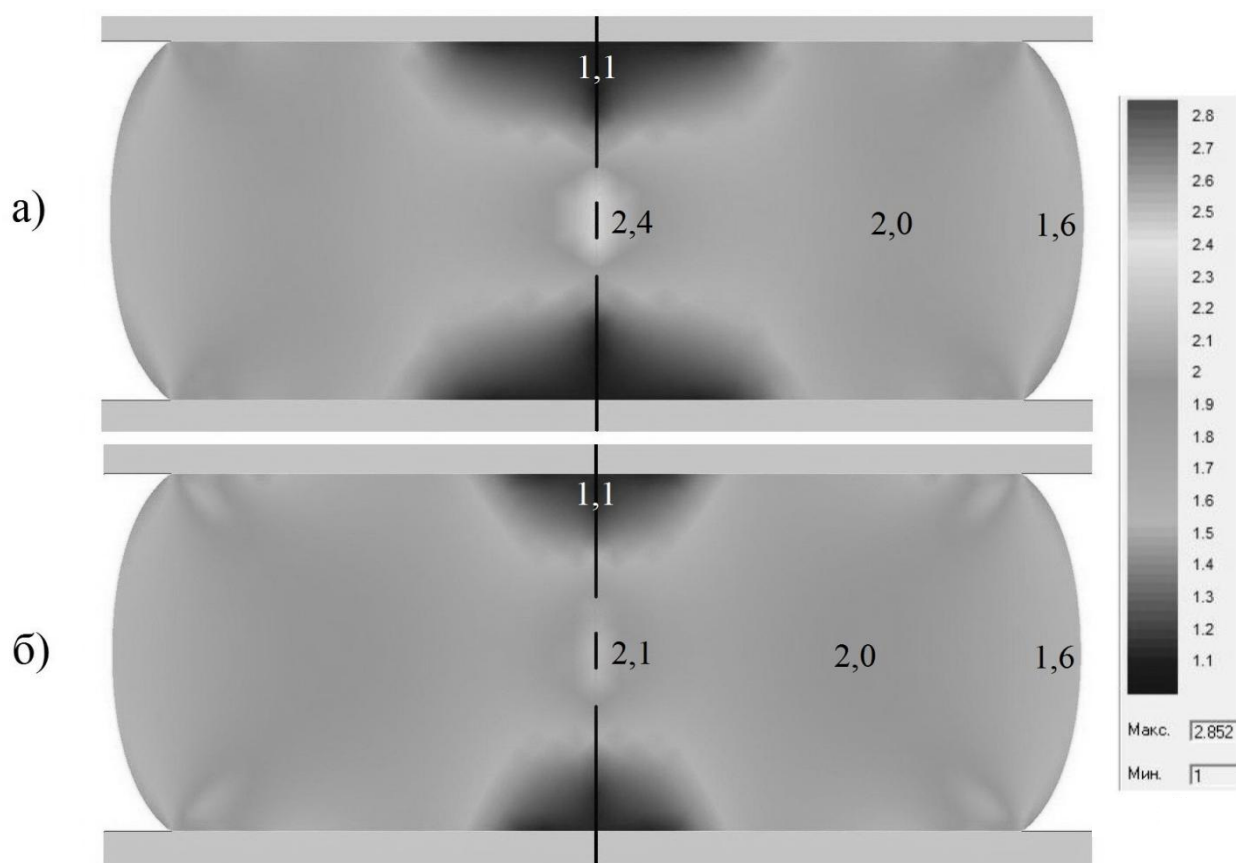


Рисунок 6 – Зоны деформации в заготовке при осадке коническими и плоскими бойками; диаметры плоской рабочей площадки - 250 мм (а) и 140 мм (б)

Для изучения возможности регулирования тепловых полей в заготовке при осадке было применено моделирование в конечно-элементной системе QForm-2D. При осадке заготовок только плоскими бойками вблизи каждого торца видны монолитные

охлажденные зоны, температура металла в них достигает 600° (рисунок 7, а). Применение осадки заготовок комбинированным инструментом (рисунок 7 б, в) позволяет расчленить монолитные зоны на три – две охлажденные зоны (температура 600°) – периферийный охлажденный ободок и зона в центре торцов с более высокой температурой ($1000^{\circ} \div 1050^{\circ}$), проникающая вглубь металла. Температура металла на боковой поверхности заготовок одинакова (1050°), однако боковая поверхность заготовок, обжатых комбинированным инструментом охлаждена сильнее, из-за дополнительного времени для смены конических бойков на плоские.

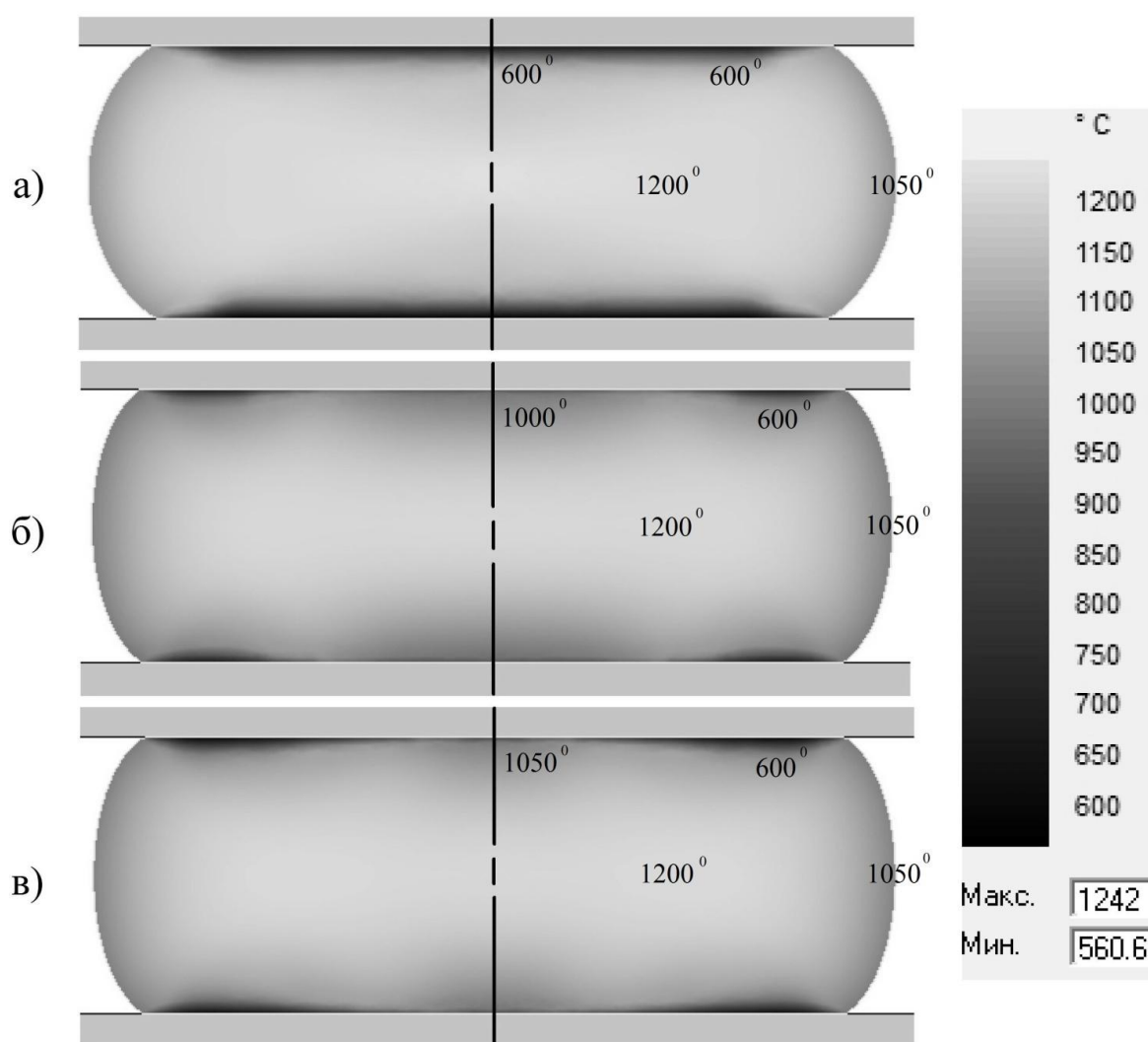


Рисунок 7 – Тепловые поля в заготовках при осадке:

а) плоскими бойками; б), в) коническими и плоскими бойками, диаметр плоской рабочей площадки 250 мм (б) и 140 мм (в)

Расчленение монолитных полей сил трения с одновременным расчленением монолитных тепловых полей с последующим их чередованием в периферийной и

центральной областях на контактных поверхностях заготовки при осадке позволяет регулировать процессы локализации и рассредоточения макросдвиговых деформаций.

Третья глава посвящена планированию полного факторного эксперимента для создания расчетного инструмента в виде математической модели процесса осадки комбинированным инструментом.

Провести опыты полного факторного эксперимента в промышленных условиях не представлялось возможным по причине их дороговизны. Выходом из данной ситуации стала реализация опытов полного факторного эксперимента в конечно-элементной системе QForm-2D. По этой причине были определены следующие шесть параметров оптимизации:

Y_1 – максимальная величина накопленной степени деформации в области интенсивной деформации вне оси;

Y_2 – максимальная величина накопленной степени деформации на боковой поверхности заготовки;

Y_3 – вид бочки у заготовки в конце осадки (1 - сложной формы, 2 - выпуклая, 3 - прямая, 4 - двойная, 5 - вогнутая);

Y_4 – выпрямление «чашек» на торцах заготовки в конце осадки плоскими бойками;

Y_5 – отношение диаметра зоны затрудненной деформации на торце заготовки в конце осадки к диаметру ее торца;

Y_6 – отношение глубины зон затрудненной деформации к высоте осаженной заготовки.

Из множества факторов, влияющих на процесс осадки заготовок комбинированным инструментом, были выбраны следующие четыре основных фактора, записанных в порядке их априорного ранжирования:

X_1 – отношение исходной высоты H_0 к исходному диаметру D_0 заготовки;

X_2 – степень деформации заготовки по высоте в конце осадки коническими бойками, $\varepsilon_{0H}^{к.б.}, \%$;

X_3 – суммарная степень деформации заготовки по высоте в конце осадки сначала коническими, а затем плоскими бойками, $\varepsilon_{0H}^{\Sigma}, \%$;

X_4 – отношение диаметра плоской рабочей площадки конического бойка к исходному диаметру заготовки, $\frac{D_{npn}}{D_0}$.

Факторы X_1 и X_4 варьировали на четырех уровнях, а факторы X_2 и X_3 – на двух, для более полного охвата значений факторов, с целью получения более точных уравнений регрессии процесса комбинированной осадки. Общее количество опытов полного факторного эксперимента равно 64. Все комбинации уровней данных факторов составляют 4 группы. Натуральные значения факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Натуральные значения уровней факторов

Факторы	Группа опытов							
	1-я		2-я		3-я		4-я	
$\frac{H_0}{D_0}$	1,5	2,0	1,5	2,0	2,5	3,0	2,5	3,0
$\varepsilon_{0H}^{к.б.}, \%$	25	50	25	50	25	50	25	50
$\varepsilon_{0H}^{\Sigma}, \%$	35	60	35	60	35	60	35	60
$\frac{D_{npn}}{D_0}$	0,4	0,6	0,8	1,0	0,4	0,6	0,8	1,0

Для всех сочетаний уровней факторов составлены матрицы планирования для полного факторного эксперимента.

Полный факторный эксперимент был проведен в конечно-элементной системе QForm-2D, поэтому при проведении параллельных опытов значения параметров оптимизации не изменяются и ошибка параллельных опытов равна нулю. В данном случае для построения адекватных математических моделей необходимо задать величины рассеяния параллельных опытов около среднего значения, то есть, задать для каждого параметра оптимизации значение среднего квадратичного отклонения - S. В том случае, если опыты были проведены в промышленных условиях, то необходимость задавать S отсутствовала, так как ошибка параллельных опытов с большой долей вероятности была бы отлична от нуля. Однако, как было описано ранее, реализация большого количества опытов в промышленных условиях невозможна в связи с их дороговизной, а малое количество опытов не позволит разработать уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс осадки комбинированным инструментом.

Так для первого и второго параметров оптимизации значение S было выбрано равным 0,1, так как погрешность определения накопленной степени деформации равна 0,1. При определении формы бочки можно спутать одну форму относительно другой, поэтому погрешность определения равна 1 и значение S равно 1. Последние три параметра оптимизации определяются путем расчета значений в процентах после измерения высоты выпрямленных полостей на торцах заготовки, диаметра и глубины зон затрудненной деформации, значение S было выбрано равным 5 %.

В общем виде уравнение регрессии для эксперимента с четырьмя факторами выглядит следующим образом:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4$$

Для каждого из шести параметров оптимизации было составлено свое уравнение регрессии. Были рассчитаны коэффициенты в уравнениях регрессии, определены

незначимые коэффициенты и записаны уравнения регрессии в окончательном виде - формулы (1) – (6).

Для первого параметра оптимизации:

$$y_1 = 1,825 - 0,024 \cdot x_1 + 0,036 \cdot x_2 + 0,231 \cdot x_3 - 0,013 \cdot x_4 + 0,005 \cdot x_1 x_2 - 0,020 \cdot x_1 x_3 - 0,010 \cdot x_1 x_4 - 0,048 \cdot x_2 x_3 + 0,012 \cdot x_2 x_4 - 0,025 \cdot x_3 x_4 + 0,008 \cdot x_1 x_2 x_3 - 0,005 \cdot x_1 x_2 x_4 - 0,005 \cdot x_1 x_3 x_4 - 0,006 \cdot x_2 x_3 x_4 + 0,005 \cdot x_1 x_2 x_3 x_4 \quad (1)$$

Для второго параметра оптимизации:

$$y_2 = 1,703 + 0,027 \cdot x_1 + 0,042 \cdot x_2 + 0,163 \cdot x_3 - 0,004 \cdot x_4 + 0,001 \cdot x_1 x_2 + 0,004 \cdot x_1 x_3 - 0,007 \cdot x_1 x_4 - 0,020 \cdot x_2 x_3 - 0,018 \cdot x_3 x_4 - 0,002 \cdot x_1 x_2 x_3 - 0,003 \cdot x_1 x_2 x_4 + 0,006 \cdot x_1 x_3 x_4 - 0,007 \cdot x_2 x_3 x_4 + 0,007 \cdot x_1 x_2 x_3 x_4 \quad (2)$$

Для третьего параметра оптимизации:

$$y_3 = 2,859 + 0,422 \cdot x_2 - 0,234 \cdot x_3 - 0,089 \cdot x_4 + 0,099 \cdot x_1 x_2 + 0,109 \cdot x_1 x_3 + 0,207 \cdot x_1 x_4 + 0,203 \cdot x_2 x_3 - 0,172 \cdot x_2 x_4 + 0,089 \cdot x_3 x_4 - 0,061 \cdot x_1 x_3 x_4 - 0,120 \cdot x_2 x_3 x_4 \quad (3)$$

Для четвертого параметра оптимизации:

$$y_4 = 95,422 - 3,703 \cdot x_2 + 3,891 \cdot x_3 + 1,651 \cdot x_4 + 3,453 \cdot x_2 x_3 + 1,109 \cdot x_2 x_4 - 1,255 \cdot x_3 x_4 - 0,984 \cdot x_2 x_3 x_4 \quad (4)$$

Для пятого параметра оптимизации:

$$y_5 = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{23} x_2 x_3 + b_{34} x_3 x_4 \quad (5)$$

Для шестого параметра оптимизации:

$$y_6 = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{12} x_1 x_2 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{234} x_2 x_3 x_4 \quad (6)$$

Первые четыре уравнения регрессии (1) – (4) удовлетворяют условию адекватности. Для достижения адекватности у пятой и шестой математических моделей было применено «загрубление» - увеличили значения среднего квадратичного отклонения с 5 % до 15 % для параметра оптимизации y_5 и до 10 % для параметра оптимизации y_6 . В результате этой операции уравнения регрессии (7), (8) стали адекватными:

Для пятого параметра оптимизации:

$$y_5 = 57,422 + 12,734 \cdot x_4 \quad (7)$$

Для шестого параметра оптимизации:

$$y_6 = 39,250 - 3,906 \cdot x_1 + 6,906 \cdot x_3 + 4,781 \cdot x_4 \quad (8)$$

Бочкообразность обжатый заготовки является внешним проявлением неравномерности деформации и по данному параметру можно контролировать равномерность деформации в промышленном эксперименте, при расчете по уравнению регрессии или при компьютерном моделировании в QForm-2D, то в качестве

интегрального внешнего параметра оптимизации при осадке комбинированным инструментом из шести параметров выбран третий.

Интегральный параметр оптимизации следовало бы дополнять расчетом степени бочкообразности обжатой заготовки. Однако, так как, при одинаковом объеме металла, находящемся в бочкообразной части заготовки, могут быть различные формы бочки (рисунок 8), то для оценки равномерности деформации качественный показатель формы боковой поверхности оказывается нагляднее, чем степень бочкообразности.

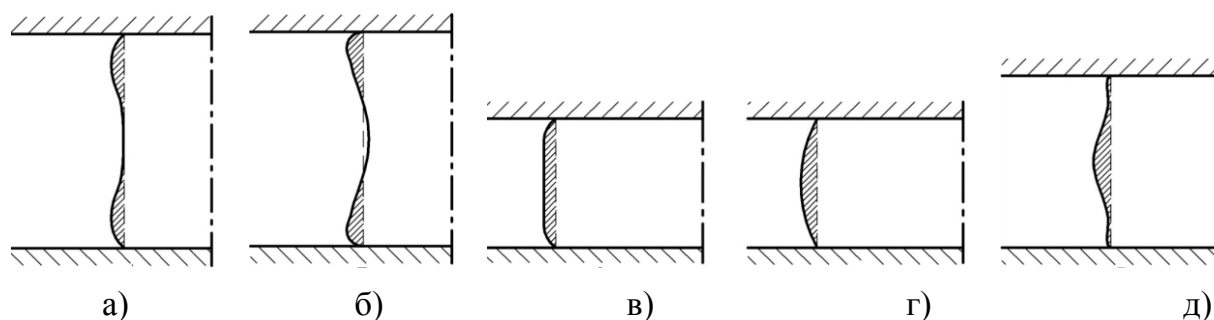


Рисунок 8 –Различные формы бочек одинакового объема:

а) двойная, б) вогнутая, в) прямая, г) выпуклая, д) сложная

Для практического применения результатов моделирования разработаны три программы «Математические модели», «Вид бочки у заготовки» и «Производство колец» в среде Microsoft Visual Basic 2010.

Программа «Математические модели» разработана для расчета параметров оптимизации по найденным при помощи планирования полного факторного эксперимента формулам математических моделей.

Программа «Вид бочки у заготовки», окно которой показано на рисунке 9, показывает зависимость формы бочки у заготовки после осадки от различных граничных условий, скоростей деформирования, различных углов при «вершине» конических бойков и от соотношения высоты к диаметру исходной заготовки.

Программа «Производство колец», окно которой показано на рисунке 10, предназначена для расчета основных технологических параметров процесса изготовления колец: массы кольца, массы исходной заготовки, приведенного диаметра заготовки после осадки, приведенного диаметра заготовки после прошивки, высоты заготовки после осадки, высоты исходной заготовки, коэффициентов укова после операций осадки, прошивки и раскатки, а также суммарного коэффициента укова.

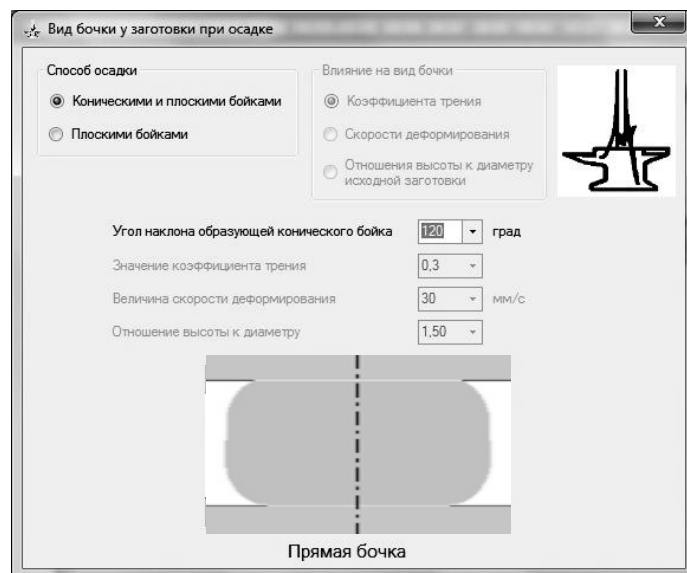


Рисунок 9 – Окно программы «Вид бочки у заготовки»

Программа расчета параметров заготовки в процессе производства колец

Параметры кольца

Высота (Hкц), мм: 110

Внешний диаметр (Dкц), мм: 2340

Внутренний диаметр (dкц), мм: 2250

Плотность материала

- ☒ Выбрать из списка: ХН77Т10Р (ЗИ437БУ)
- ☐ Ввести значение: 8200 кг/м3

Параметры прошивки

Диаметр (dпр), мм: 190

Угол конусности, град: 7

Диаметр исходной заготовки (Dо), мм: 290

Параметры процесса производства колец

Высота выдры составляет от высоты заготовки: 0,30

При раскатке на SMS Meer или Walpin увеличению внутреннего (внешнего) диаметра кольцевой заготовки на каждые 100 мм соответствует следующее уменьшение ее высоты, мм: 4

Суммарный угар, %: 3,5

РАСЧЕТ

СОХРАНИТЬ РАСЧЕТ

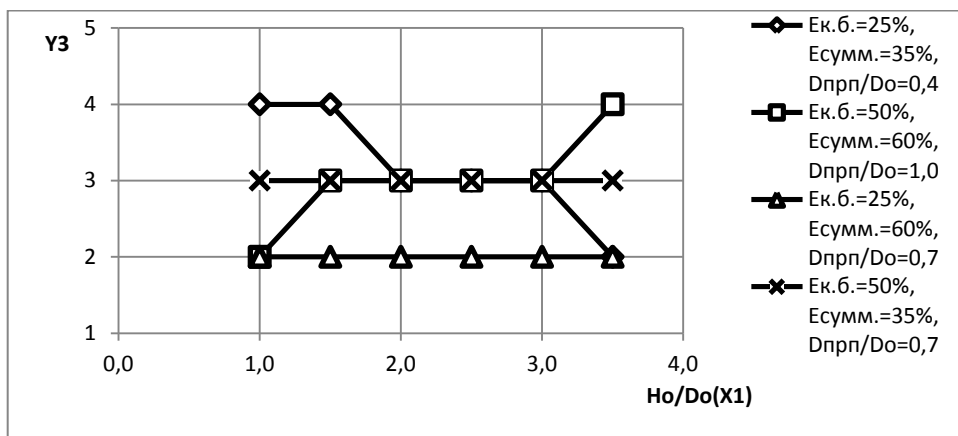
Результаты расчетов

Масса кольца (mкц), кг	292,7
Масса исходной заготовки (mзаг), кг	316,8
Приведенный диаметр заготовки после осадки (Dос), мм	506
Приведенный диаметр заготовки после прошивки (Dпрош), мм	570
Высота заготовки после осадки (Hос), мм	192
Высота исходной заготовки (Hо), мм	585
Коэффициенты укова после операции:	
- осадки	3,04
- прошивки	1,13
- раскатки	5,11
Суммарный коэффициент укова	17,5

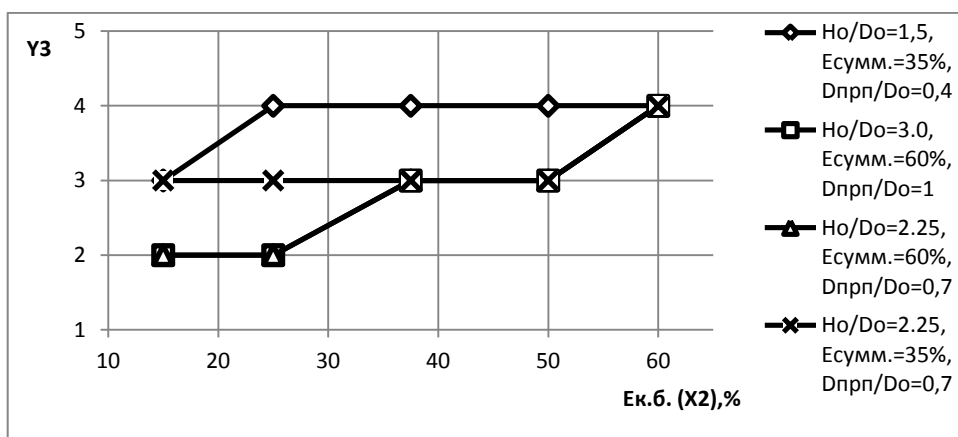
Рисунок 10 – Окно программы «Производство колец»

Разработанные программы успешно работают в современных операционных системах, таких как Windows XP; Windows Vista; Windows 7. При приемке программ Отделом Главного технолога ОАО «Русполимет» проблем с совместимостью не возникло.

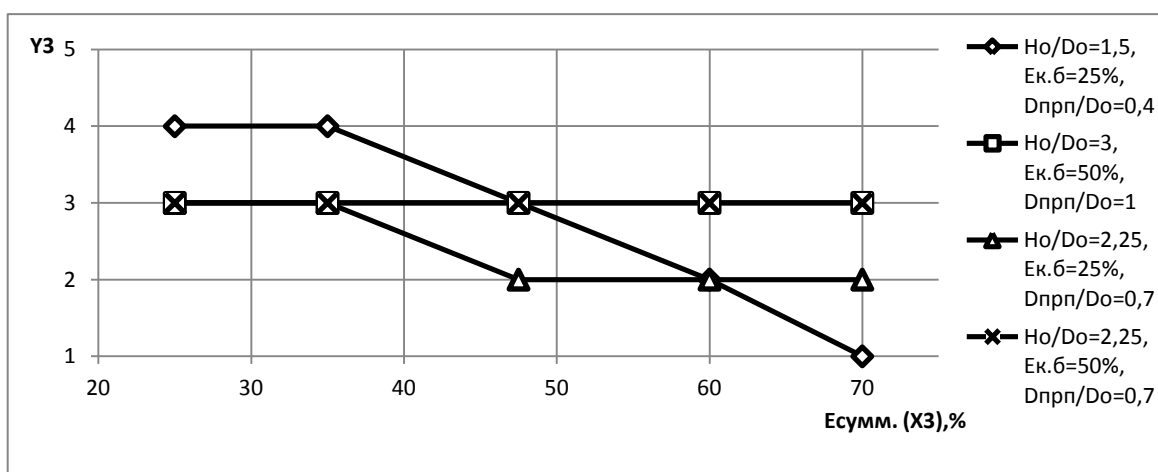
а)



б)



в)



г)

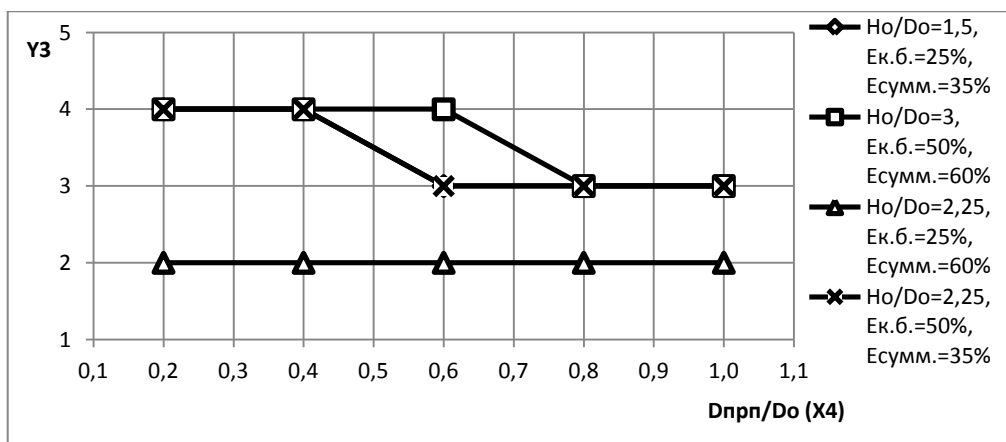


Рисунок 11 – Графические поля зависимости параметра оптимизации Y_3 - «Вид бочки у заготовки в конце осадки» от четырех факторов X_1 (а), X_2 (б), X_3 (в), X_4 (г)

Кроме составления компьютерных программ, были выполнены расчеты каждого из шести параметров оптимизации для каждого из четырех факторов, всего 24 графических поля. Структуру полей сделали такой, чтобы можно было быстро, графическим путем, проанализировать зависимость конкретного параметра оптимизации от конкретно выбранного фактора. Поэтому совокупность всех графиков назвали графоаналитическим инструментом расчета осадки. На рисунке 11 показаны четыре графических поля для параметра оптимизации «Вид бочки у заготовки в конце осадки».

Созданный графоаналитический инструмент расчета позволяет оперативно решить прямую задачу – определить оптимальные технологические режимы деформирования коническими и плоскими бойками, выбрать соотношения (геометрических) размеров исходных заготовок, конструировать конические бойки, и обратную задачу – прогнозировать качество металла поковок колец по шести параметрам в зависимости от конкретных значений четырех технологических факторов при производстве колец.

Графоаналитический инструмент расчета был применен при вычислении технологических режимов осадки заготовок с получением поковок «дисков» практически с прямой бочкой (рисунок 12).

До применения осадки комбинированным инструментом на заводе ОАО «Русполимет» поковки «дисков» производили осадкой плоскими бойками. У поковок получали значительную бочкообразность, при которой действует схема напряженного состояния двухосного растяжения, что, в свою очередь, зачастую приводило к образованию трещин на боковой поверхности поковки.

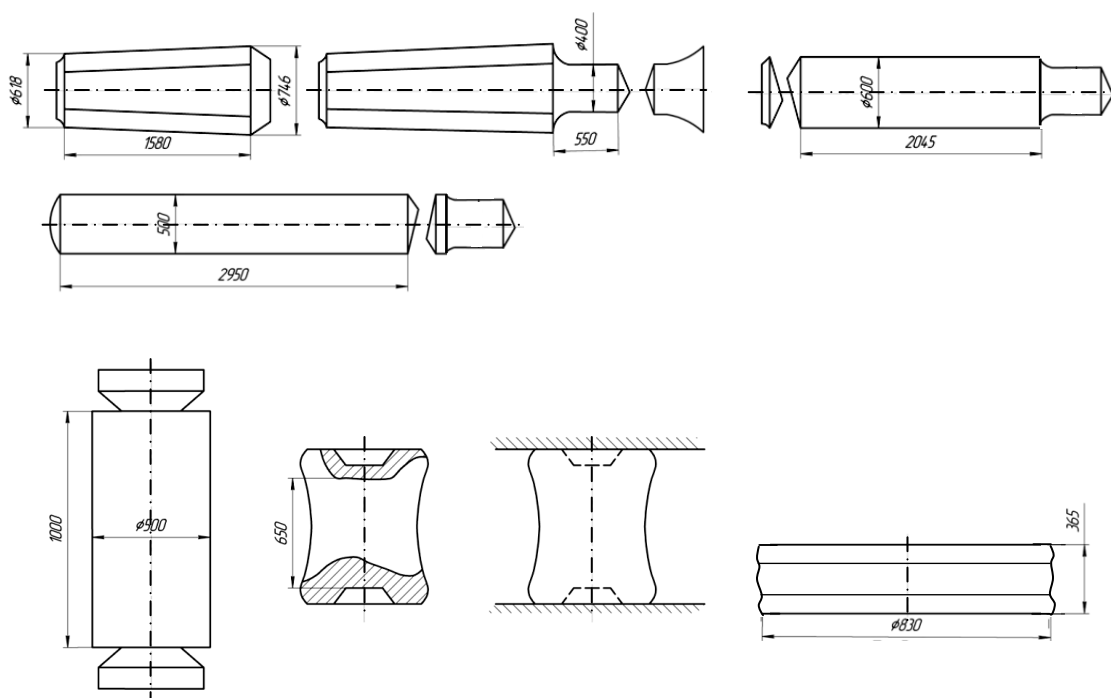


Рисунок 12 – Переходыковки 8-гранного слитка для поковки «диск» из стали 07X16H4Б

Реализация технологии осадки комбинированным инструментом показала работоспособность программ, графоаналитического инструмента расчета и эффективность применения конических бойков для предотвращения трещинообразования на «дисках» из малопластичной стали 07X16H4Б.

В четвертой главе показаны результаты промышленного опробования комбинированного инструмента и новой технологии.

Процесс осадки комбинированным инструментом, построенный на основе теоретических исследований распределения зон деформации, полей накопленных степеней деформаций и тепловых полей был опробован при обжатии заготовок диаметром 400 мм и высотой 996 мм из стали 55. При осадке заготовок до 65 % из стали 55 удалось получить профиль бочки, близкий к цилиндрическому. В результате успешного опробования осадки сначала коническими, а затем плоскими бойками на заготовках из стали 55, данный процесс было решено реализовать при ковке трех партий заготовок из жаропрочных сплавов ЭП693-ВД (ХН68ВМТЮК-ВД), ЭИ698-ВД (ХН73МБТЮ-ВД) и ЭП708-ВД (ХН62МВТЮ-ВД), так как на момент эксперимента на заводе ОАО «Русполимет» из производимых цельнокатаных колец это были наиболее труднодеформируемые жаропрочные сплавы на никелевой основе. На данных сплавах выполнили три серии эксперимента, по 2, 4 и 5 заготовок в серии. В таблице 2 представлены параметры исходных заготовок и готовых колец; первая цифра номера заготовки – номер серии заготовок.

Таблица 2 – Технологические параметры заготовок и колец в промышленном эксперименте

№ заготовки	Размеры исходной заготовки, мм		Соотношение высоты к диаметру	Размеры кольца, мм			Материал
	диаметр	высота		диаметр внешний	диаметр внутренний	высота	
1.1	280	320	1,14	1426	1336	87	ЭП693-ВД
1.2	308	275	0,89	1272	1144	70	
2.1	300	164	0,55	672	544	81	ЭИ698-ВД
2.2							
2.3	300	180	0,60	682	575	103	
2.4							
3.1	223	270	1,21	845	777	110	ЭП708-ВД
3.2	210	420	2,00	840	737	128	
3.3							
3.4	290	276	0,95	645	528	171	
3.5	224	462	2,06				

Первая и вторая серии эксперимента необходима для определения возможности производства колец без предварительнойковки слитка ВДП при осадке заготовок только плоскими бойками с коэффициентами укова в первой серии ~ 15, во второй серия ~ 5. Третья серия необходима для определения возможности производства колец без предварительнойковки слитка ВДП при осадке заготовок комбинированным инструментом.

В таблице 3 приведены значения коэффициентов укова по операциям - горячего деформирования заготовок.

Коэффициенты укова для осадки рассчитали по отношению высот заготовки до и после обжатия, для прошивки – по отношению приведенного диаметра заготовки после и до прошивки, а для раскатки коэффициенты укова рассчитали по отношению площади поперечного сечения до и после раскатки.

При производстве колец без предварительных операцийковки слитка величины коэффициентов укова для первой серии эксперимента составили 14,5 - 15,3, а в случае с предварительнойковкой слитков ВДП коэффициенты укова возросли бы в $7 \div 3$ раза и составили бы $107,1 \div 45,9$.

Для первого эксперимента исследования механических свойств и микроструктуры металла выполнили на кольцевых пробах, вырезанных из наружной части поковок, в которых величина местных деформаций довольно большая – 2,0, по сравнению с деформациями в зоне затрудненных деформаций – 1,2. Металл кольцевых поковок 1.1 и 1.2 удовлетворяет требованиям нормативного документа (ОСТ 1 90396-91) по механическим свойствам.

Таблица 3 –Коэффициенты укова по операциям горячего деформирования

№ заготовки	При осадке K_H	При прошивке K_D	При раскатке K_F	Суммарный коэффициент укова $K_{\Sigma}=K_H \cdot K_D \cdot K_F$
1.1	2,91	1,11	4,75	15,3
1.2	3,06	1,10	4,30	14,5
2.1	1,82	1,08	2,61	5,1
2.2				
2.3	1,58	1,11	2,86	5,0
2.4				
3.1	2,18	1,23	3,76	10,1
3.2	3,16	1,16	3,00	11,0
3.3				
3.4	1,53	1,22	2,52	4,7
3.5	2,57			7,9

У всех четырех поковок второй серии эксперимента свойства выше, нормативных показателей на $10 \div 15 \%$ по прочностным свойствам и до 2 раз выше по пластическим. Для изучения микроструктуры были вырезаны пробы с внутренней стороны колец, где величина местных деформаций не превышает 1,5. Микроструктуру металла изучали на оптическом микроскопе при увеличении $\times 100$. На микрошлифе заготовки 2.3 (рисунок 13) отмечено два «гигантских» зерна, значительно крупнее, чем оцениваются баллом №1. Микроструктура металла в целом характеризуется значительной разнотернистостью. Причина образования гигантских зерен – слабая деформационная проработка металла (накопленная степень деформации не превышает 1,5). Данная микроструктура является наглядным подтверждением неэффективности осадки плоскими бойками.

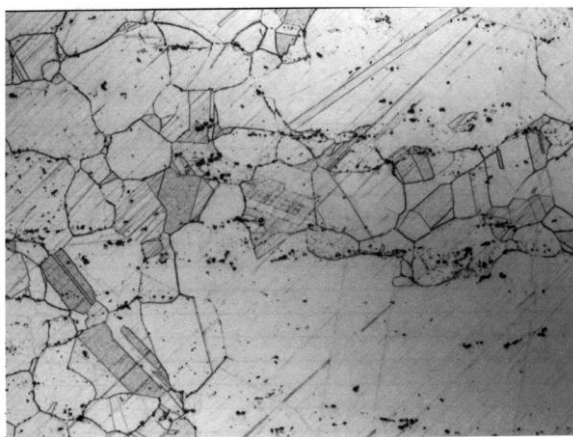


Рисунок 13 – Микроструктура металла поковки кольца 2.3 из сплава ЭИ698-ВД

Чтобы уменьшить величину зерна и разнотернистость микроструктуры путем повышения равномерности распределения местных деформаций в заготовке, в третьей серии эксперимента осадку осуществили комбинированным инструментом: сначала коническими, а затем – плоскими бойками по режимам, установленным во второй и третьей главах диссертации.

Качество металла у всех пяти колец в третьей серии эксперимента удовлетворяет требованиям нормативных документов (ОСТ 1 90396-91, ТУ 1-1018-98), таким образом, минимальное значение суммарного коэффициента укова при производстве колец ответственного назначения по новой технологии равно 4,7. Для исследования эффективности новой технологии осадки комбинированным инструментом выполнили расширенный объем испытаний и пробы отбирали от трех частей кольца – двух торцевых (фланца и подошвы) и от средней части (прожимки) (рисунок 14).

У кольца 3.1 макроструктура плотная, однородная, без дефектов. Микроструктура металла кольца приведена на рисунке 14 а – в: балл зерна № 4, 5, 6 с отдельными зернами

балла № 3. Сравнение рисунка 13 и рисунка 14, дает возможность увидеть эффективность осадки комбинированным инструментом.

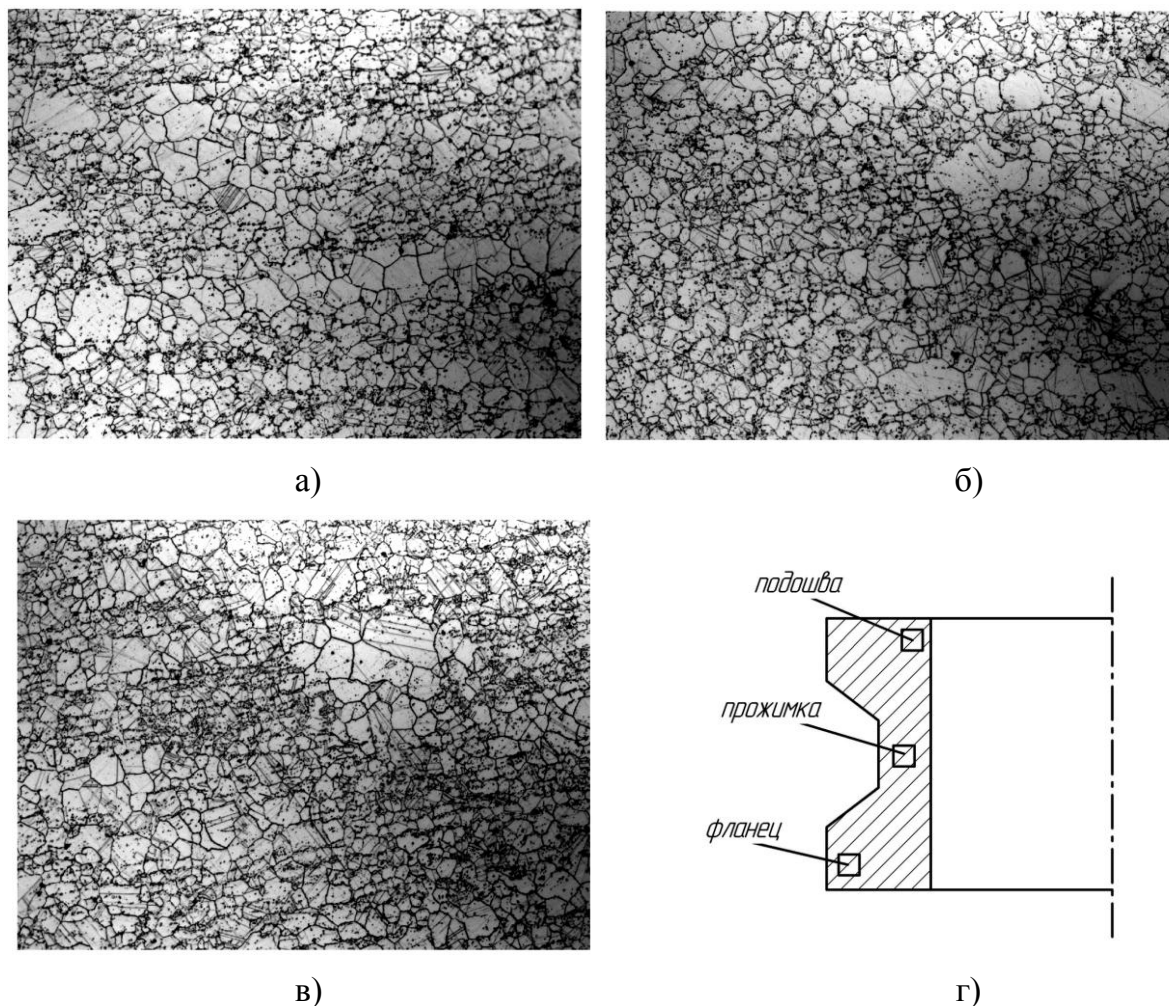


Рисунок 14 – Микроструктура металла поковки кольца 3.1 из сплава ЭП708-ВД во фланце (а), в прожимке (б) и в подошве (в); области отбора проб для испытания механических свойств и микроструктуры (г)

В пятой главе даны определения понятий эффективность и ресурсосбережение, в соответствии с которыми оценены результаты, полученные в диссертационной работе.

Высокая эффективность новой технологии производства заключается в получении более мелкозернистой изотропной однородной микроструктуры металла колец. Разработанная технология позволила заводу ОАО «Русполимет» выйти на новый, более высокий уровень качества металла по характеристикам микроструктуры.

Производство колец, минуя операции предварительнойковки слитка ВДП позволяет:

- сэкономить в среднем - 26104 руб. за 1 т на перевозке кованой штанги ВДП из Электростали, Златоуста или Челябинска в Кулебаки;

- сэкономить ~50 кВт электроэнергии, потребляемой гидравлическим прессом и вспомогательным оборудованием при производстве 1 т кованой штанги ВДП;
- сэкономить $105 \div 140$ кг топлива на нагреве и подогревах слитка при производстве 1 т кованой штанги ВДП;
- уменьшить образование окалины на 1 %.

Устранение одного из трех переходов операции осадки из технологического процесса горячего деформирования колец сокращает время пребывания заготовки в печи на 20 %.

Выводы по диссертации:

1. Установлено, что основной формирующей качество колец – структуру и механические свойства металла операцией в технологическом цикле горячего деформирования является осадка заготовок.

2. С помощью разработанной методики расчета технологических факторов решена задача регулирования зонообразования и распределения местных деформаций при осадке заготовок комбинированным инструментом.

3. При осадке заготовок разработанным инструментом объем зон затрудненной деформации удалось уменьшить в два раза. Наилучшие результаты по уровню накопленной степени деформации получены при осадке коническими бойками с углом при вершине 120° .

4. На основе теоретических выводов исследования пластических потоков путем регулирования зонообразования и распределения местных деформаций в заготовках при осадке установлено минимальное значение суммарного коэффициента укова при производстве колец из жаропрочных сплавов вакуумно-дугового переплава, составляющее 4,7. Соответствующее уменьшение суммарного укова в 3,0 – 7,0 раз для слитков ВДП производства ОАО «Русполимет» обеспечило значительное повышение эффективности и ресурсосбережения при изготовлении колец.

5. Разработанная технология получения колец из слитков ВДП собственного производства (ОАО «Русполимет») позволила отказаться от услуг других заводов-изготовителей и экономить в среднем 26104 руб. на транспортных расходах при перевозке 1 т штанг. За счет отказа от операций предварительнойковки слитков экономить примерно 50 кВт электроэнергии, потребляемой гидравлическим прессом и вспомогательным оборудованием, устранить расходы $105 \div 140$ кг топлива, необходимые ранее для нагрева и подогрева слитка, уменьшить потери металла с окалиной на 1 % на 1 т продукции.

6. Высокая эффективность новой технологии производства заключается в получении более мелкозернистой изотропной однородной микроструктуры (уменьшение балла с №1

до №4-5-6) металла колец, которая обеспечивает повышение эксплуатационных характеристик и надежности изделий ответственного назначения.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Батяев Д.В., Тюрин В.А. Визуализация изображений деформированных слоистых заготовок. // Известия ВУЗов. Черная металлургия.- 2010.- № 5.- С. 68.
2. Тюрин В.А., Батяев Д.В. Расчет усредненных показателей деформации при раскатке колец. // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Инновационные технологии обработки металлов давлением». – М.: Изд. Дом МИСиС, 2011. – С. 487 - 491.
3. Тюрин В.А., Батяев Д.В. Деформации и зонообразование в заготовках при производстве поковок колец. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2012. - № 10. – С. 40 - 44.
4. Тюрин В.А., Батяев Д.В. Оценка адекватности моделирования процесса производства колец. // Известия ВУЗов. Черная металлургия.- 2013.- № 3.- С. 8 - 10.
5. Повышение качества металла колец из жаропрочных сплавов при ковке с применением комбинированного инструмента. / В.А. Тюрин, Д.В. Батяев, Ю.В. Луканин и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2013. - № 6. – С. 23 - 28.
6. Тюрин В.А., Ларионов И.В., Батяев Д.В. Графоаналитический инструмент для расчета технологических параметров процесса осадки заготовок. // Известия ВУЗов. Черная металлургия.- 2013.- № 7.- С. 49 - 51.
7. Патент РФ №2465979, В21К 1/28, В21J 1/06. Способ производства кольцевых изделий. Бюлл. №31, 2012. / В.А. Тюрин, Д.В. Батяев, Ю.В. Луканин, А.Л. Сапунов.