

На правах рукописи



**Таупек Иван Михайлович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КОВКИ  
ВАЛОВ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена на кафедре «Технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта» Старооскольского технологического института им. А.А. Угарова (филиале) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Научный  
руководитель: Кандидат технических наук, доцент  
**Алексеев Павел Леонидович**

Официальные  
оппоненты: **Соломонов Константин Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО  
«Московский государственный университет путей  
сообщения» Воронежский филиал, профессор кафедры  
теоретической и прикладной механики

**Жигулев Геннадий Петрович**, кандидат технических  
наук, доцент, кафедра ОМД НИТУ "МИСиС", научный  
сотрудник

Ведущая организация: Государственный научный центр Открытое акционерное  
общество "Научно-производственное объединение  
"Центральный научно-исследовательский институт  
технологии машиностроения" (ОАО НПО  
"ЦНИИТМАШ")

Защита состоится «1» марта 2017 года в на заседании диссертационного  
совета Д212.132.09 при Федеральном государственном автономном  
образовательном учреждении высшего образования «Национальный  
исследовательский технологический университет «МИСиС» по адресу: 119049, г.  
Москва, Ленинский проспект, д. 4, ауд.

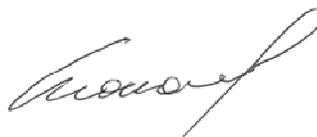
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИТУ «МИСиС» и на  
сайте <http://www.misis.ru>.

Справки по телефону: 8(495)955-01-27

e-mail: [vachiyana@yandex.ru](mailto:vachiyana@yandex.ru)

Автореферат разослан «    »    2016 года

Учёный секретарь  
Диссертационного совета



С.М. Ионов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Кованые гладкие и ступенчатые валы являются ответственными деталями машиностроения, широко распространенными в промышленности. К ним относятся разнообразные изделия: прокатные валки, ротора турбин и др. Повышение их качества является актуальной задачей.

Исследование и управление деформационным состоянием металла при ковке позволяют повысить качество получаемых высококачественных изделий. При этом традиционные методы исследований требуют проведения многократных дорогостоящих лабораторных и производственных экспериментов, что в современных условиях зачастую является нежелательным. Поэтому всё больше внимания уделяется различным способам компьютерного моделирования в программных комплексах, использующих численные методы решения прикладных задач. Наиболее широкое распространение получили комплексы, расчётные модули которых основаны на методе конечных элементов. Данные средства моделирования позволяют исследовать множество параметров изучаемого процесса: напряжённо-деформированное состояние, картину тепловых полей, скоростные параметры и др. Их применение позволяет произвести исследования, проверить, отработать и оптимизировать технологические процессы в относительно короткое время, уменьшив количество дорогостоящих производственных экспериментов.

**Цель и задачи работы.** Целью диссертационной работы является совершенствование технологических процессовковки гладких и ступенчатых валов на основе результатов компьютерного моделирования в программных пакетах, использующих метод конечных элементов.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Провести анализ путей совершенствования технологических процессовковки валов с применением компьютерного моделирования.
2. Провести сравнение различных программных пакетов конечно-элементного моделирования на примере осадки цилиндрических образцов. Осуществить научно обоснованный выбор программного средства компьютерного моделирования для проведения исследований.
3. Разработать методику обработки справочных данных для построения математической модели реологических свойств материала в программном комплексе DEFORM. Провести проверку адекватности результатов моделирования деформации образцов с импортированием в систему моделирования результатов обработки справочных данных по реологии материала.
4. Разработать методику оценки деформации металла при моделировании технологических процессовковки валов. Используя данную методику оценить влияние различных типов бойков на напряжённо-деформированное состояние (НДС) заготовки при протяжке.
5. Установить влияние технологических факторов процессаковки вала на радиально-обжимной машине на напряжённо-деформированное состояние металла в осевой зоне заготовки. Выполнить моделирование в программных

пакетах, использующих метод конечных элементов, технологических процессов ковки гладких и ступенчатых валов на прессах и РОМ с целью установления связи между напряжённо-деформированным состоянием и технологическими режимами обработки, формой инструмента и размерами заготовки.

6. Разработать рекомендации по промышленной реализации разработанных мероприятий по совершенствованию режимов ковки гладких и ступенчатых валов, предотвращающие появлению характерных дефектов.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Разработана методика обработки справочных данных для построения математической модели реологических свойств материалов для применения в программном комплексе DEFORM. Используя данную методику, создана модель для жаропрочного сплава ЭП199 (ХН56ВМТЮ).
2. Создана методика оценки деформации металла с помощью исследования элементарных объёмов в очаге деформации, позволяющая наглядно оценить деформированное состояние, направление течения и характер формоизменения металла в отдельных областях заготовки.
3. Созданы математические модели влияния технологических параметров процесса ковки валов на радиально-обжимной машине (величина угла заходного участка бойка и продольная подача) на напряжённо-деформированное состояние металла (значения интенсивности напряжений и интенсивности деформаций) осевой зоны заготовки из жаропрочного сплава ЭП199 (ХН56ВМТЮ), позволяющие уточнить существующие методики анализа процесса радиальнойковки.

**Практическая значимость работы.** Произведена оценка напряжённо-деформированного состояния поковок штанг из сталей 12Х18Н10Т, получаемых при применении на АО «Металлургический завод «Электросталь» технологическом процессе ковки на быстроходном прессе усилием 16 МН. Полученные результаты выявили неблагоприятное напряжённо-деформированное состояние металла вследствие применения плоских бойков для большей части процесса протяжки и сравнительно малого количества подогревов поковки. Предложены и внедрены рекомендации по более широкому использованию вырезных бойков при протяжке, а также увеличение числа подогревов поковок.

Для установленной на АО «Металлургический завод «Электросталь» радиально-обжимной машине SMX 600, усилием 12 МН оценена возможность использования бойков различных типов: плоских и вырезных с радиусной калибрующей поверхностью при производстве однотипных поковок полых валов. Полученные результаты моделирования показали возможность производства сопоставимых по механическим свойствам поковок при использовании более технологичных и простых в изготовлении плоских бойков. Также для данных бойков были предложены скорректированные режимы обжатий, позволяющие уменьшить возникающие различия в качестве поковок.

Произведен анализ технологического процесса ковки валка для сортопрокатного стана из стали 9Х2МФ на прессе усилием 30 МН в условиях

кузнечно-прессового цеха ОАО «ЭЗТМ». Результаты моделирования позволили разработать способы совершенствования применяемого технологического процесса и устранить появление таких дефектов, как продольные торцевые трещины в шейке валка и подприбыльные кольцевые трещины. Для их устранения было предложено и внедрено в технологический процесс использование: верхней сферической плиты для осадки, а также изменение последовательности единичных обжатий и подач при протяжке, позволившее значительно уменьшить (вплоть до полного устранения) появление дефектов.

Результаты, представленные в диссертационной работе, используются в учебном процессе на кафедре Машиностроительных и металлургических технологий Электростальского политехнического института – филиала Университета машиностроения в рамках курсов: «Моделирование процессов и объектов в металлургии», «САПР комплексов ОМД», «Физические основы упрочнения материалов», а также при подготовке курсовых и дипломных проектов, выпускных квалификационных работ студентами, обучающимися по специальности 150201 «Машины и технология обработки металлов давлением», студентами бакалавриата по направлению 150400 «Металлургия», профилю «Обработка металлов давлением», по направлению 150700 «Машиностроение», профилю «Машины и технология обработки металлов давлением», по направлению 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», профилю «Технология машиностроения».

**Методы исследований и достоверность полученных результатов.** Для разработанной методики исследования процессовковки средствами компьютерного моделирования был использован инженерный программный комплекс DEFORM v.10.1 SP2, основанный на методе конечных элементов (лицензия № 7435).

Для определения степени достоверности получаемых способом компьютерного моделирования данных было произведено их сравнение с результатами теоретических исследований и промышленных экспериментов. Полученные результаты показали высокую сходимость экспериментальных данных и моделирования.

Выводы, рекомендации, и научные положения, сформулированные в работе, имеют теоретическое и практическое обоснование и получены с использованием теоретических и экспериментальных методов исследования, а также последующей математической обработкой результатов. Адекватность полученных результатов подтверждена промышленным опробованием.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Сравнение программ конечно-элементного моделирования DEFORM и Simufact Forming на примере осадки высокого образца.
2. Обработка справочных данных для создания реологической модели материала в DEFORM на примере жаропрочного сплава ЭП199 (ХН56ВМТЮ).
3. Оценка деформации металла с помощью исследования элементарных объёмов в процессе протяжки цилиндрической заготовки с использованием бойков различных типов.

4. Моделирование и анализ технологического процессаковки валка для сортопрокатного стана из стали 9Х2МФ.
5. Влияние технологических параметров на напряжённо-деформированное состояние осевой зоны заготовки при ковке на радиально-обжимной машине.
6. Результаты анализа и совершенствования технологических процессовковки гладких и ступенчатых валов.

**Апробация работы.** Результаты работы были представлены и обсуждены на следующих научно-практических конференциях:

1. XVIII международная научно - практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 9–13.04.2012 г.
2. Всероссийская научно-практическая конференция преподавателей, сотрудников и аспирантов с международным участием «Образование, наука, производство и управление», Старый Оскол, 21–23.11.2012 г.
3. IX всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов. Старый Оскол 14–16.05.2013 г.
4. III Всероссийская молодёжная школа–конференция «Современные проблемы металловедения», Пицунда 9–14.09.2013г.
5. Международная научно-техническая конференция «Современные технологии обработки металлов давлением: моделирование, проектирование, производство», посвящённой 70-летию кафедры «Машины и технологии обработки металлов давлением» им. И.А. Норицына, Москва 23–25.09.2013г.
6. X Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Энергосбережение. Экология. Новые технологии», Старый Оскол 25–27.11.2013г.
7. XI Всероссийская научно-практическая конференция аспирантов и студентов, посвящённая 35-летию СТИ НИТУ «МИСиС» и 60-летию образования Белгородской области, Старый Оскол 24–25.04.2014 г.
8. XI Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» в рамках проведения «Международного горно-металлургического конгресса» НИТУ «МИСиС», Старый Оскол, 3–5.12.2014 г.
9. XII Всероссийская научно-практическая конференция аспирантов и студентов. Старый Оскол, 27–30.04.2015 г.

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в 10 печатных работах, из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, изложенных на 192 страницах машинописного текста, включающего 177 рисунков, 38 таблиц, список использованных источников из 103 наименований отечественных и зарубежных авторов, 2 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, научная и практическая значимость, сформулированы цели и задачи, приведён план исследований.

**В первой главе** выполнен аналитический обзор литературы по технологииковки и её влияния на механические свойства металла. Описаны операции свободнойковки, в частности, основная операция формоизменения – протяжка, во многом ответственная за итоговые механические характеристики будущего изделия. Рассмотрено несколько классификаций разновидностей операций протяжки в зависимости от формы заготовки и рабочего инструмента, кинематических и температурных факторов и влияния данных факторов на напряжённо–деформированное состояние поковки. Также описаны различные способы экспериментальных исследований и варианты численного моделирования процессовковки. Рассмотрены основы метода конечных элементов, а также особенности применения элементов различных типов и построения сеток с различными исходными параметрами с учётом их применения при моделировании процессовковки. Произведён анализ результатов моделирования операций свободнойковки в различных программных комплексах: Simufact Forming, DEFORM, QForm, MSC.SuperForge на основании которых были сформулированы цели и задачи исследований.

**Во второй главе** описана общая методика моделирования процессовковки, применяемая при компьютерном моделировании с использованием программных комплексов Simufact Forming и DEFORM, основанных на методе конечных элементов. Из технической литературы и практического опыта известно, что обработку крупных поковок валов производят ковкой с применением процессов осадки и протяжки. На первом этапе была произведена оценка различных программных пакетов конечно-элементного моделирования на примере осадки высокого цилиндрического образца из стали AISI–1045 (американский аналог стали 45) с соотношением  $H_0/D_0 = 3,75$ . Сравнивались комплекс Simufact Forming и DEFORM. Полученные результаты сопоставлялись с данными о распределении различных зон деформации, взятыми из литературных источников (Охрименко Я.М., Тюрин В.А., Сторожев М.В.).

Полученные результаты моделирования по распределению зон накопленных деформаций показали высокую сходимость с данными физических экспериментов для обоих программных комплексов. При этом конкретные значения величин интенсивности нормальных напряжений ( $s_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_3 - s_1)^2}$ ), при общей качественной схожести характера распределения, полученные в DEFORM (до 50 МПа) оказались в 1,5 больше расчетных значений, полученных в Simufact Forming, (35 МПа). Подобное расхождение объясняется разными данными по реологическим свойствам материалов, заложенным по умолчанию в программные комплексы: сопротивление деформации при равных условиях (температуре деформации 1200 °С, скорость деформации 0,1 с<sup>-1</sup>, степени деформации 5 %) в DEFORM

составляет 35МПа, а в Simufact Forming – 20МПа. Данные из отечественных литературных источников (Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М.) составляют 30 МПа. На основе полученных данных для дальнейшего моделирования процессовковки было принято решение использовать программный комплекс DEFORM, позволяющий более простой ввод и редактирование характеристик материалов, чем Simufact Forming. Также в дальнейшем данные для реологии применяемых сталей и сплавов брались из литературных источников, либо из результатов исследований заводских лабораторий.

Для быстрой и точной обработки справочных данных по реологическим свойствам исследуемых материалов была разработана методика, использующая современные средства САПР. Исходное отсканированное высококонтрастное изображение с графиками кривых упрочнения импортируется в САПР AutoDesk AutoCAD, где подбирается необходимый масштаб отображения и производится обработка кривых упрочнения при помощи инструмента «Spline». Результаты представляются в виде табличных данных и вносятся в базу данных DEFORM. Полученные значения заносились в таблицы. Пример обработанных данных изменения сопротивления деформации сплава ЭП199 (ХН56ВМТЮ) приведён в таблице 1. Подобные таблицы составляются для всего диапазона температур, при которых производились испытания. Полученные данные вносились в базу данных DEFORM. Температурные свойства материала: теплопроводность и теплоемкость обрабатываются аналогичным способом.

Таблица 1 – Пример обработанных данных по кривых упрочнения для сплава ЭП199 (ХН56ВМТЮ)

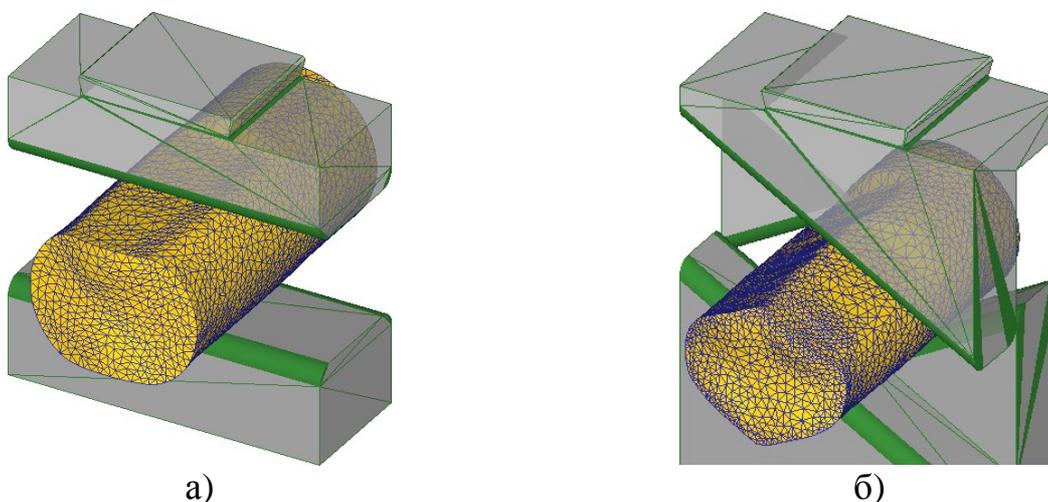
Т = 1000 °С	скорость деформации, с <sup>-1</sup>					
	0,01	0,5	1	10	50	100
степень деформации	Сопротивление деформации $\sigma_s$ , МПа					
0	166	288	390	435	486	553
0,1	252	369	468	568	652	742
0,2	250	369	483	618	730	829
0,3	213	328	453	618	754	861
0,4	160	259	395	584	747	859

Для детальной оценки деформированного состояния металла была рассмотрена деформация элементарных объёмов (в данном случае исходной сферической формы), расположенных в различных местах заготовки. Сферическая форма делает их схожими с эллипсоидом деформации, но в отличие от него, позволяет оценить деформированное состояние не в точке, а в определённой области. Также при деформации заготовки данные объёмы искажаются не только по основным координатным осям, а по всей поверхности сферы, что позволяет определить направления сдвигов металла.

Для этого изначально производилось моделирование протяжки цилиндрического образца диаметром 500 мм и длиной 1000 мм с применением различных типов бойков: плоские; комбинированные с углом выреза нижнего бойка 100°; вырезные ромбические с углом выреза 100°; вырезные радиусные с

углом охвата  $100^\circ$ ; комбинированные с непрямолинейным фронтом подачи; с непрямолинейным фронтом подачи; вырезные со скрещивающимися рабочими поверхностями, угол выреза  $120^\circ$ ; четырёхблочный ковочный блок.

В заготовке использовались реологические свойства жаропрочного сплава ХН62ВМЮТ (ЭП708). Скорость перемещения бойков была задана постоянной, равной 150 мм/сек. Для всех типов бойков выполнялось два прохода с кантовкой заготовки на  $90^\circ$  в конце первого прохода (для некоторых вырезных бойков угол кантовки отличался). Степень деформации в каждом проходе составляла 20 %, таким образом, после первого прохода высота заготовки составляла 400 мм, а после второго порядка 410 мм. Перед началом деформации заготовке по всему сечению присваивалась температура в  $1200^\circ\text{C}$ , затем имитировалась транспортировка от печи до пресса: путём охлаждения на воздухе в течение 120 секунд. Бойкам присваивалась постоянная температура  $150^\circ\text{C}$ . Заготовка представляла собой вязко-пластичное тело (при этом отсутствует упругая составляющая в напряженно – деформированном состоянии материала), разбитое на конечно – элементную сетку, с элементами различного размера: от 16 до 32 мм. Непосредственно в очаге деформации сетка была намеренно сгущена, что позволило повысить точность получаемых данных, общее количество элементов составляло 32000. Бойки выполнялись в виде абсолютно жёстких тел. В качестве примера на рисунке 1 показаны сборки трёхмерных моделей для протяжки в плоских бойках и вырезных бойках со скрещивающимися поверхностями.

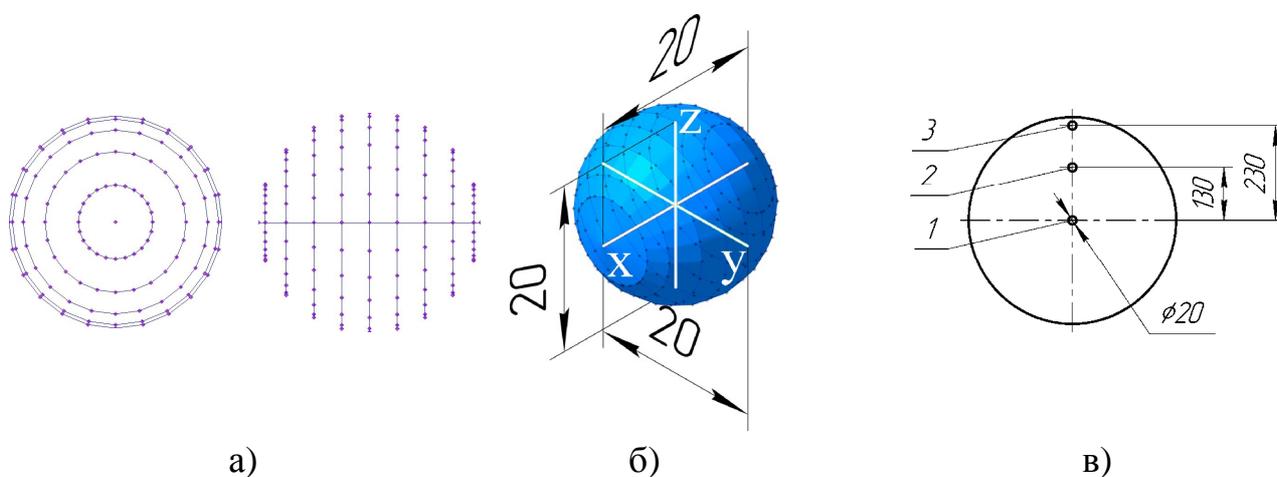


а) – плоские бойки; б) – бойки со скрещивающимися рабочими поверхностями  
Рисунок 1 – Применяемые сборки трёхмерных моделей

Для непосредственного моделирования формоизменения элементарного объёма в заготовке были рассчитаны координаты для 227 контрольных точек, образующих сферу диаметром 20 мм. Подобный размер был выбран исходя из плотности конечно-элементной сетки: в сферу попадало сразу несколько элементов, что увеличивало точность итоговых результатов. Далее массив точек загружался в Постпроцессор DEFORM и производилось отслеживание перемещения каждой точки. Точки помещались в передней части заготовки, на

расстоянии 200 мм от переднего торца в продольном направлении. Подобное расположение совместно с величиной подачи позволило сферам находиться непосредственно в очагах деформаций единичных обжатий. Размещение в радиальном направлении зависело от предполагаемых потоков металла: по три исходных сферы на прямой линии между центром заготовки и местом соприкосновения с бойками. После расчёта на основе имеющегося массива точек в КОМПАС–3D с помощью поверхностных кривых создавался каркас сферы, который «обтягивался» поверхностями.

В качестве примера на рисунке 2 показаны этапы построения элементарного объёма и места его размещения в радиальном направлении в заготовке при протяжке в плоских бойках.



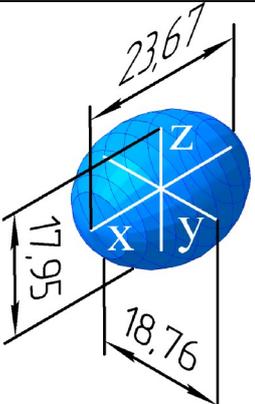
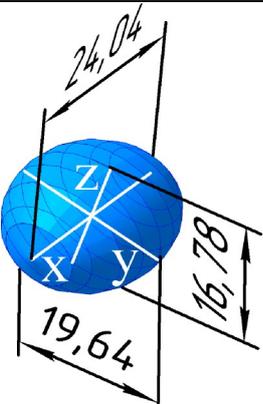
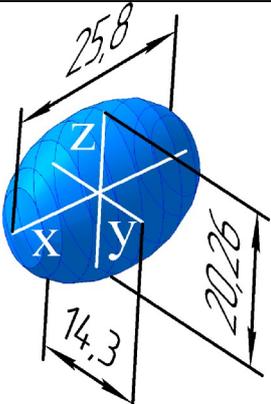
а) – исходный массив точек; б) – построенная сфера; в) – размещение в заготовке в радиальном направлении

Рисунок 2 – Построение и места размещения сфер

Для детальной оценки изменения размеров сфер до и после деформации производилось построение координатных осей: X – продольной, Y – поперечной и Z – вертикальной, как показано на рисунке 2б, также производилось измерение их длины. Построение осей производилось через определённые точки, что позволило измерять изменение длины осей после деформации и изменения положения сфер, как показано на рисунке 2в. Подобные построения и измерения производились для всех используемых в моделировании типов бойков.

В качестве примера в таблице 2 приведены результаты расчета изменения формы и размеров в плоских бойках после протяжки.

Таблица 2 – Изменение формы и размеров элементарных объёмов при использовании плоских бойков

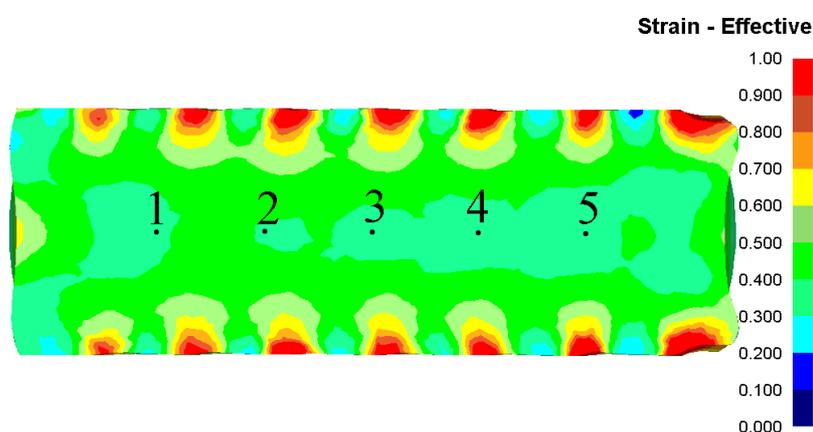
			№ сферы					
1			1			3		
								
Изменения размеров по основным осям								
X, %	Y, %	Z, %	X, %	Y, %	Z, %	X, %	Y, %	Z, %
18,5	-6	-10	20	-2	-16	29	1,5	-28,5

Анализ полученных результатов показал, что все три исходных сферических объёма испытывают как сжимающие деформации в вертикальном направлении, так и растягивающие в поперечном и продольном. После первого прохода сферы видоизменяются в расплющенные эллипсоиды. Чем ближе к поверхности, тем больше величина сжатия в вертикальном направлении. Искажение сферы 2 и 3, заметное по изменению угла наклона центральной оси, повороту и вертикальному смещению плоскостей, отображает потоки течения металла в объёме поковки. Наиболее искажённой оказывается сфера 3, расположенная в месте наибольшего сосредоточения деформаций. В данной области наблюдается значительное течение металла не только в вертикальном, но и в продольном направлении, постепенно уменьшающееся по мере приближения к центральной области. Поэтому сфера 1 удлиняется в продольном направлении более равномерно, а после второго прохода вообще приобретает форму эллипсоида, вытянутого только по одной, продольной, оси. В то время как две другие сферы деформированы более неравномерно по всем трём осям. Подобное различие в искажениях сфер согласуется с теоретическими предположениями.

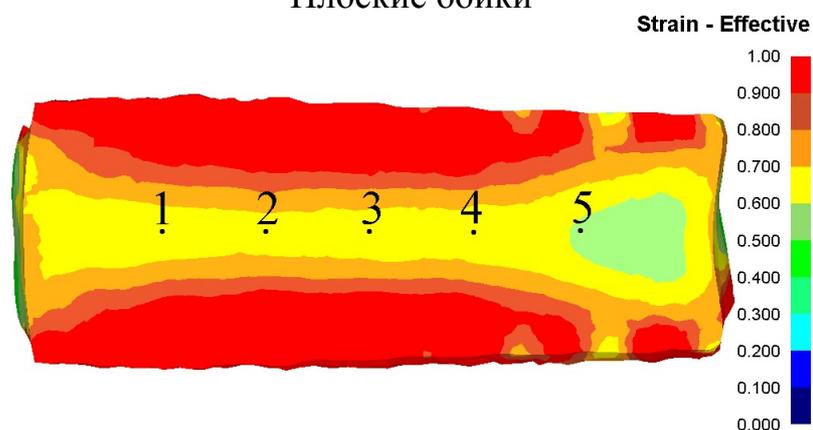
Аналогичные расчёты было использованы при моделировании протяжки в бойках со скрещивающимися рабочими поверхностями. При этом произошло более значительное искажение формы сфер: наблюдались поперечные и продольные смещения окружностей, образующих сферы, что объясняется значительными изменениями в течение металла. Явно проявляются описанные в литературных источниках макросдвиги (работы Тюрина В.А., Охрименко Я.М.) По сравнению с протяжкой в других типах бойков металл заготовки подвергается

более значительной проработке даже при одинаковых степенях относительной деформации.

Итоговое распределение накопленных деформаций показано на рисунке 3. Для более детальной оценки распределения накопленных деформаций в осевой зоне поковки было задано пять контрольных точек, в которых происходило отслеживание изменение параметров. Полученные значения представлены в таблице 3. Анализ полученных результатов показал, что применение бойков со скрещивающимися рабочими поверхностями приводит к появлению более высоких значений деформаций по всему сечению заготовки, чем при ковке в плоских бойках. При этом максимальные величина наблюдаются в верхней и нижней областях поковки и занимают практически всю длину поковки без пробелов, что не достигалось при протяжке в других типах бойков. Значения в осевой зоне также оказываются выше в среднем на 30 %.



Плоские бойки



Бойки со скрещивающимися рабочими поверхностями

Рисунок 3 – Итоговое распределение накопленных деформаций

Таблица 3 – Значения накопленных деформаций в контрольных точках

Тип бойков	№ контрольной точки				
	1	2	3	4	5
Плоские	<b>0,4</b>	<b>0,4</b>	<b>0,39</b>	<b>0,37</b>	<b>0,36</b>
Со скрещ. раб. поверхн.	<b>0,65</b>	<b>0,67</b>	<b>0,66</b>	<b>0,65</b>	<b>0,59</b>

В третьей главе было произведено проектирование, моделирование и анализ технологического процесса ковки валка для сортопрокатного стана из стали 9Х2МФ. В качестве основы был взят технологический процесс, применяемый на ОАО «ЭЗТМ». Схема технологического процесса приведена на рисунке 4.

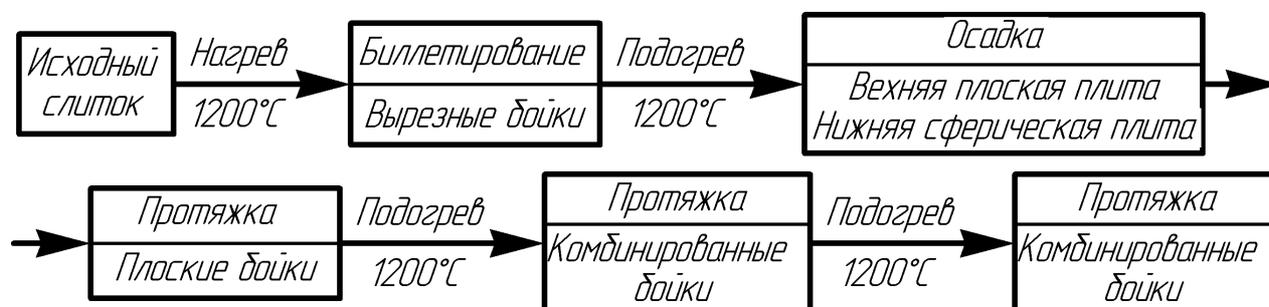


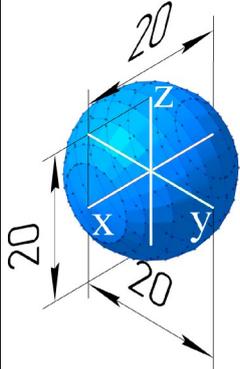
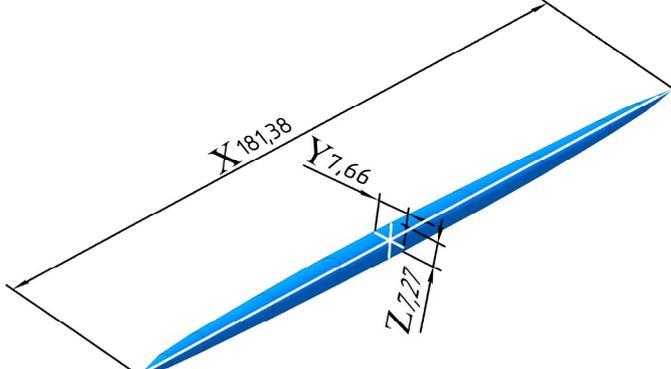
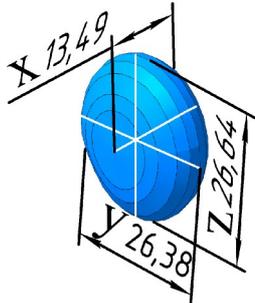
Рисунок 4 – Схема технологического процесса

После моделирования производился анализ НДС. Накопленные деформации в отдельных областях валка распределены равномерно, что свидетельствует о равномерности механических свойств, но между самими областями наблюдается заметное различие. Наиболее высокие значения наблюдаются в шейках, что благоприятно сказывается на работе валка, т.к. именно данные области испытывают наиболее высокие напряжения при эксплуатации. Значительная часть деформации поковки при протяжке происходила в комбинированных бойках, что положительно сказалось на напряжённом состоянии металла: в осевой зоне и местах контакта с рабочим инструментом наблюдались преимущественно сжимающие напряжения. Области с растягивающими напряжениями были сравнительно невелики, особенно при финальных стадиях протяжки, что важно, т.к. в них пластичность металла, в связи с охлаждением, понижена. Оценка направления потоков металла была проведена с использованием элементарного объёма. Применялось две сферы, расположенные на продольной осевой линии, в передней и центральной части (будущих шейке и бочке валка). Диаметр сфер составлял 20 мм. Отслеживание формоизменения осуществлялось после операции биллетирования. Результаты изменения формы и размеров элементарных объёмов в полученной поковке показаны в таблице 5.

После анализа полученных данных можно сделать вывод о различиях в течение металла в разных частях поковки. Так, сфера, размещённая в центральной части, получила наибольшее сжатие по оси X и растяжение по осям Y и Z при осадке. И при дальнейшей протяжке так и не произошло её растяжение по продольной оси и сжатие по двум остальным до исходных размеров. Таким образом, структура металла будет вытянута в радиальном направлении. Для сферы, расположенной в передней части заготовки картина деформации иная. При осадке она получила небольшие искажения (аналогичные первой сфере:

сжатие по оси X и растяжение по Y и Z). Однако при дальнейшей протяжке происходит её значительные растяжения (более чем на 800 %) вдоль оси X и сжатия вдоль осей Y и Z (более 60 %). Таким образом, структура металла в шейках валка будет вытянута вдоль продольной оси. Подобное распределение благоприятно влияет на механические свойства готового валка.

Таблица 5 – Изменение формы и размеров элементарных объёмов по основным осям после итоговой протяжки

Исходная форма	Передняя часть поковки			Центральная часть поковки		
						
Изменения размеров по основным осям						
	X, %	Y, %	Z, %	X, %	Y, %	Z, %
	807	-61,5	-63,5	-32,5	33	32

Моделирование также показало большую вероятность возникновения торцевой полости, показанной на рисунке 5, которая в дальнейшем приводит к появлению таких дефектов как продольные трещины и свищи в осевой зоне.

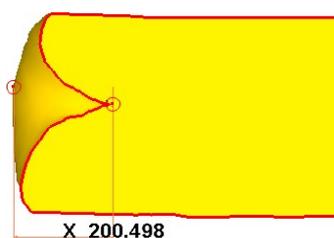


Рисунок 5 – Продольный разрез передней части поковки с полостью

Причиной появления полости является использование верхней плоской осадочной плиты совместно с началом протяжки с передней части заготовки с относительными единичными обжатиями 10–13 % и относительными подачами 0,6, что вызывает значительное продольное течение периферийных слоёв металла.

**В четвёртой главе** рассмотрено влияние технологических параметров процесса ковки на радиально–обжимных машинах на напряжённо-деформационное состояние осевой зоны цилиндрической заготовки из жаропрочного сплава ХН56ВМТЮ (ЭП199). Литературные источники (Тюрин

В.А., Власов А.В., Лазоркин В.А., и др.) сообщают, что течение металла при данном процессе характеризуется ярко выраженным движением в продольном направлении и слабо – в радиальном, а за единичное обжатие происходит относительно малая деформация металла. Совместно эти особенности создают схему напряженно–деформированного состояния, при которой интенсивно деформируются поверхностные слои металла и недостаточно прорабатывается – центральные области, в которых не происходит разрушение литой структуры металла. Качественную проработку заготовки по всему сечению можно достигнуть сочетанием определённых деформационно-скоростных параметров процессаковки совместно с формой рабочего инструмента. При этом происходит увеличенное течение металла к центру поковки и в осевой зоне возникают напряжения, превышающие предел текучести, но не превышающие предел прочности обрабатываемого металла, что обеспечивает пластическую деформацию и, как следствие, разрушение литой структуры без образования дефектов. Для проверки было проведено моделирование в программном комплексе DEFORM. Исходная заготовка цилиндрической формы диаметром 250 мм и длиной 500 мм деформировалась до диаметра 220 мм за один проход. Заготовка разбивалась на конечно-элементную сетку из 32000 элементов различного размера от 8 до 16 мм. Начальная температура заготовки составляла 1150 °С. Скорость движения бойков была выбрана постоянной, равной 170 мм/сек. Продольная подача и кантовка заготовки производились между единичными обжатиями, величина кантовки была постоянной и составляла 15°. Применяемая сборка моделей показана на рисунке 6.

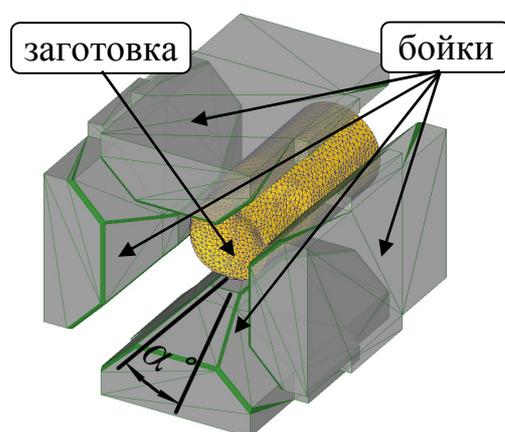


Рисунок 6 – Сборка моделей, загруженная в DEFORM

Всего было смоделировано девять сочетаний таких технологических параметров как угол заходного участка бойка и величина продольной подачи. В ходе исследования оценивалось их влияние на значения интенсивности напряжений и накопленных деформаций в осевой зоне поковки. Сочетание изменений технологических параметров и полученные значения представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Сочетания факторов при моделировании и полученные значения

№ моделирования	Угол заходного участка, $\alpha$ град.	Продольная подача, мм/ед.обжатие	Результаты моделирования	
			Интенсивность напряжений, МПа	Накопленные деформации
1	7	7	130	0,15
2	7	15	150	0,17
3	7	23	155	0,21
4	12	7	125	0,14
5	12	15	145	0,17
6	12	23	150	0,22
7	17	7	120	0,16
8	17	15	140	0,21
9	17	23	150	0,22

Для проведения опытов были построены три различные трёхмерные модели плоских бойков РОМ. Изменение величины подачи и её сочетание с различными бойками настраивалось непосредственно в DEFORM. После завершения процесса, полученные данные обрабатывались в Постпроцессоре DEFORM, где в осевой зоне заготовки размещалось 9 контрольных точек (с шагом 50 мм), с которых снимались значения интересующих параметров. По окончании всех расчетных операций моделирования производилась обработка полученных данных, результаты которых представляются в виде диаграмм зависимостей интенсивности напряжений и накопленных деформаций от различных технологических факторов (рисунки 7 и 8).

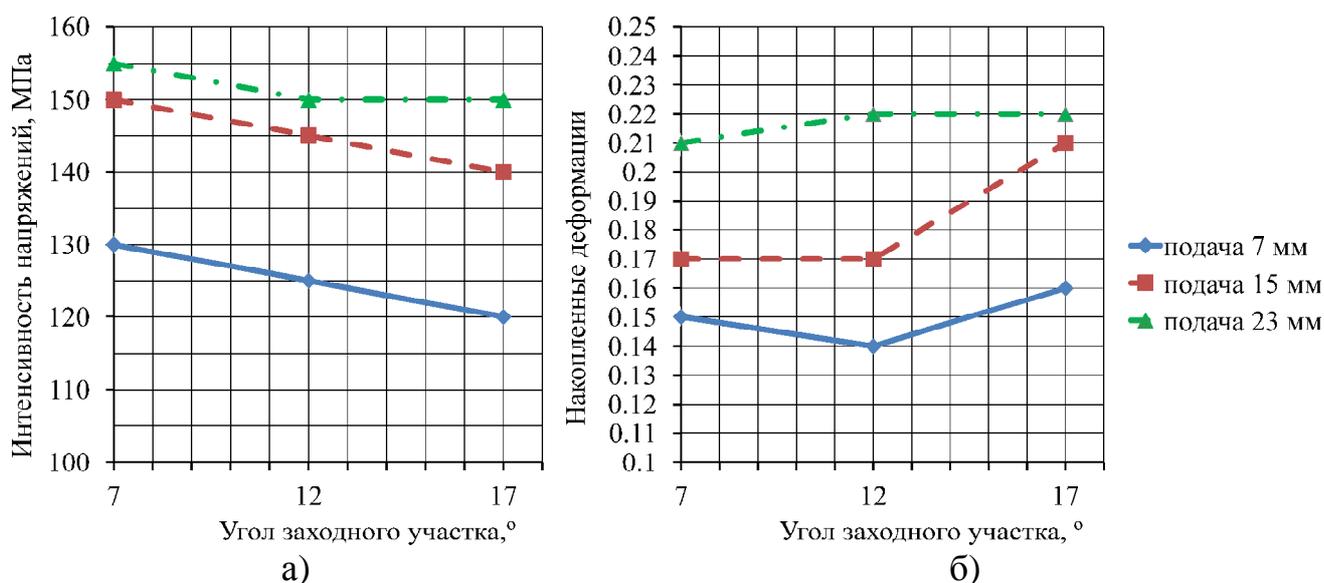


Рисунок 7 – Зависимость интенсивности напряжений (а) и накопленных деформаций (б) от величины угла заходного участка бойка

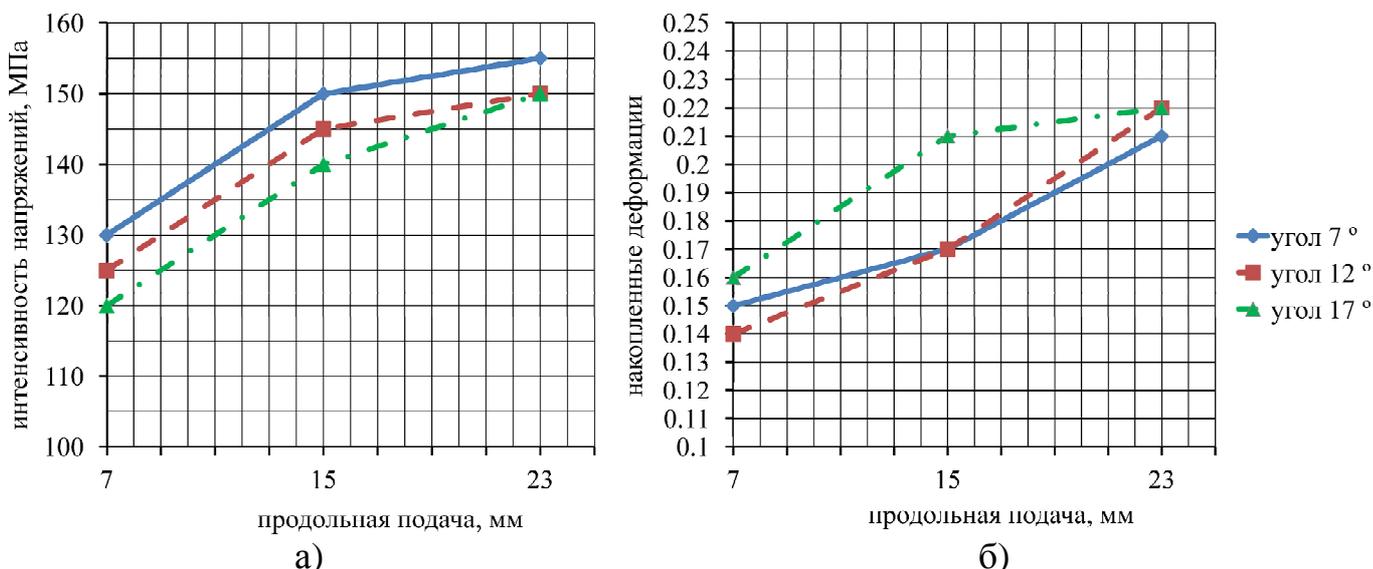
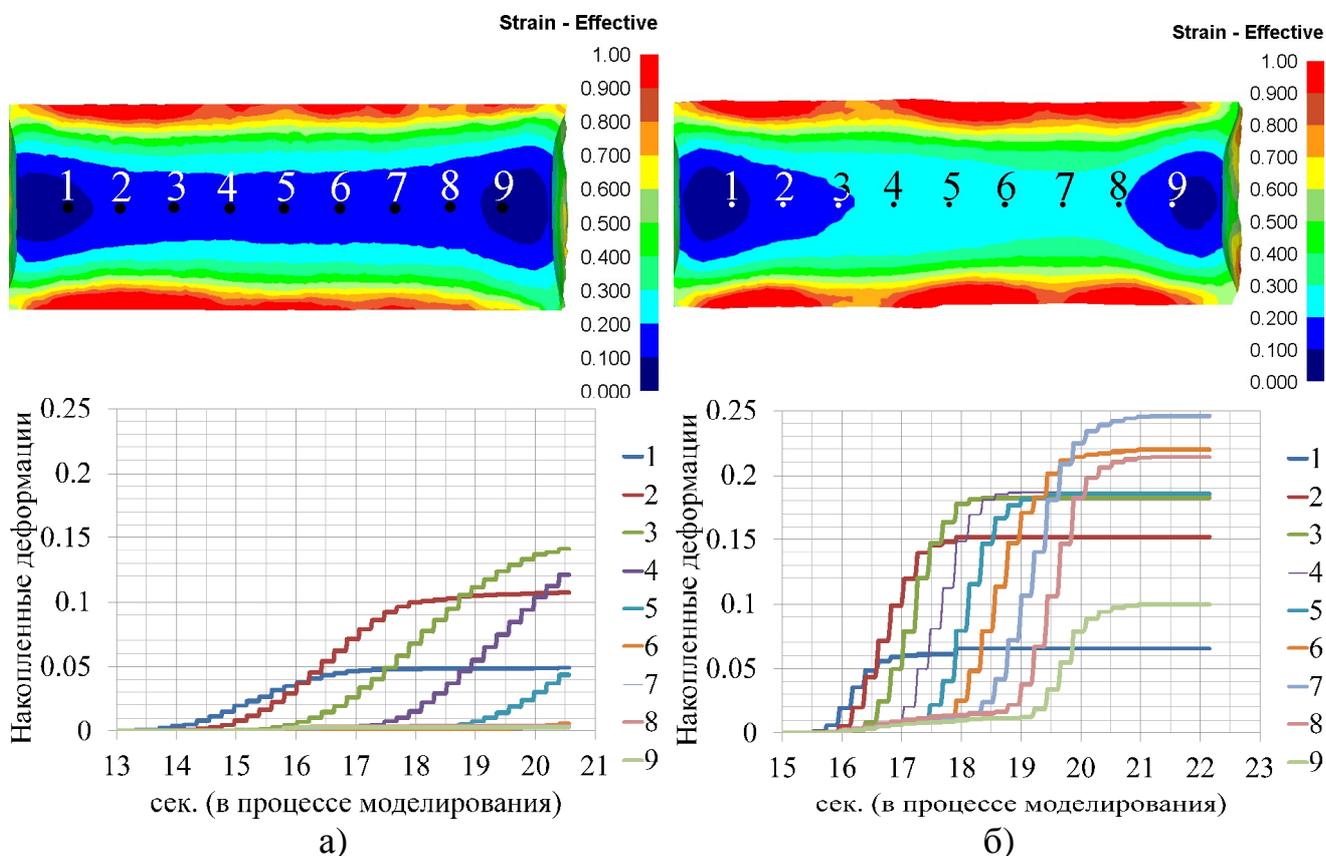


Рисунок 8 – Зависимость интенсивности напряжений (а) и накопленных деформаций (б) от величины продольной подачи

На основании полученных данных сделан вывод, что увеличение величины угла заходного участка снижает величину интенсивности напряжений в осевой зоне поковки, при этом происходит повышение значений накопленных деформаций, т.е. приводит к лучшей проработке осевой зоны. Увеличение продольной подачи приводит как к повышению значений напряжений, так и деформаций.



а) – угол 7°, подача 7 мм/ед.обжатие; б) – угол 17°, подача 23 мм/ед.обжатие  
 Рисунок 9 – Распределение накопленных деформаций в поковках

Для определения значений НДС в осевой зоне поковки на основе факторного вычислительного эксперимента были получены уравнения множественной линейной регрессии. Расчёт коэффициентов уравнений регрессии осуществлялся матричным способом. Были получены две линейные модели: для значений интенсивности напряжений (1):

$$s_i = 125,5 - 0,83 \cdot x_1 + 1,67 \cdot x_2, \quad (1)$$

где:  $x_1$  – угол заходного участка, град.;

$x_2$  – продольная подача между обжатиями, мм.

и накопленных деформаций (2):

$$e_i = 0,097 + 0,002 \cdot x_1 + 0,004 \cdot x_2, \quad (2)$$

где:  $x_1$  – угол заходного участка, град.;

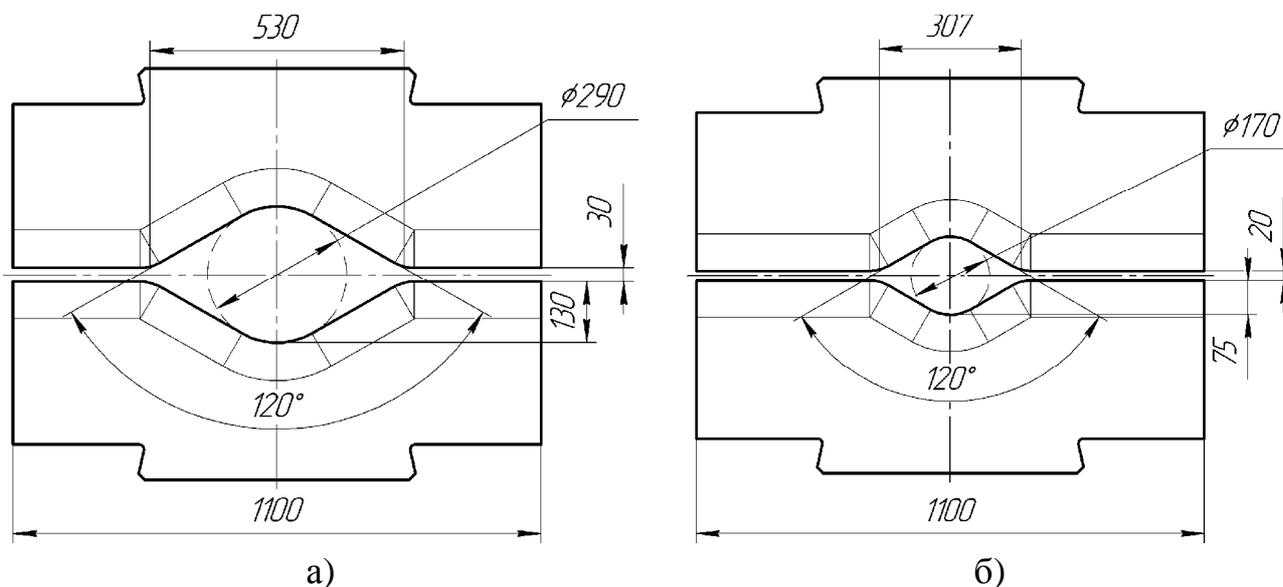
$x_2$  – продольная подача между обжатиями, мм.

Ошибка в результатах расчётов по уравнениями (1) и (2) и полученных при использовании компьютерного моделирования составляет для интенсивности напряжений 2,14 %, а для накопленных деформаций – 4,19 %, что показывает на адекватность полученных уравнений.

**В пятой главе** представлены рекомендации по совершенствованию технологических процессов производства гладких и ступенчатых валов.

Была произведена оценка напряженно–деформированного состояния и тепловых полей поковок круглых штанг диаметром 170 мм из стали 12Х18Н10Т, получаемых на быстроходном прессе усилием 16 МН в условиях АО «Металлургический завод «Электросталь». На основании полученных результатов предложены и внедрены рекомендации корректировки технологического процесса:

- увеличение числа подогревов для предотвращения снижения пластичности металла в финальных стадиях процессаковки;
- взамен применяемых при протяжке плоских бойков, были предложены варианты вырезных радиусных, показанные на рисунке 10. Их использование позволят уменьшить области с растягивающими напряжениями в осевой зоне поковок, и тем самым, предотвратить появление таких дефектов как трещины и разрывы.



а) – бойки для начальной стадии протяжки; б) – бойки для финальной стадии протяжки

Рисунок 10 – Варианты предлагаемых бойков

Также было проведено тепловизионное исследование процесса ковки штанги из жаропрочного сплава ЭП708 (ХН62ВМЮТ), которое показало хорошую сходимость значений температуры заготовки с результатами моделирования. Так, в начале процесса методом тепловидения получены значения поверхности температуры поковки порядка 1000 – 900°С, данные моделирования показали температуру в 1000°С. В конце процесса тепловизионный метод показал температуру 800 – 850°С, при моделировании картина в целом аналогична, но области, нагретые до 850°С занимали более значительную площадь. Возникающие расхождения объясняются некоторыми различиями во времени реального процесса и моделирования, а именно междеформационных паузах (транспортировка заготовки, продольные подачи, кантовки), которые при моделировании оказались меньше, чем в реальности.

Для установленной на АО «Металлургический завод «Электросталь» радиально-обжимной машины SMX 600 усилием 12 МН была оценена возможность использования бойков различных типов: плоских и вырезных с радиусной калибрующей поверхностью. Бойки применяются для производства однотипных поволоков полых валов из сплава ЭП708 (ХН62ВМЮТ). При производстве используются полые (просверленные) заготовки. В работе показано, что при использовании обоих типов бойков распределение конечных деформаций при обработке отличается незначительно, поэтому сделан вывод о предпочтительном применении плоских бойков при корректировке режимов обжатия: вводе дополнительного проглаживающего прохода, поскольку такие

бойки более технологичны: охватывать более широкий сортамент продукции и более просты в изготовлении.

В условиях ОАО «ЭЗТМ» был произведен анализ технологического процесса ковки валка для сортопрокатного стана из стали 9Х2МФ на прессе усилием 30 МН. Результаты моделирования позволили разработать способы совершенствования применяемого технологического процесса и устранить появление продольных осевых трещин и свищей в шейке валка. Было предложено производить осадку с использованием верхней сферической плиты, что создавало сферический выступ на торце заготовки, который компенсировал продольное течение периферийных слоёв металла и предотвращал появление полости на торце поковки. Продольные разрезы поковки на различных этапах моделирования технологического процесса показаны на рисунке 11.

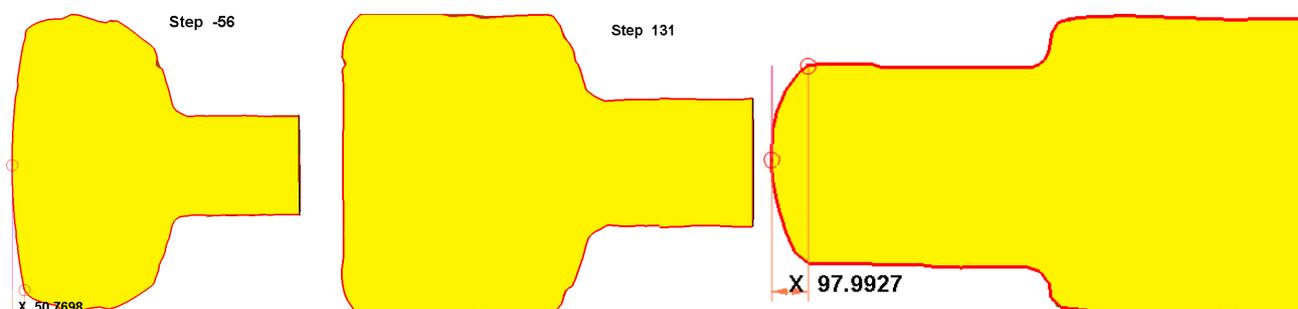
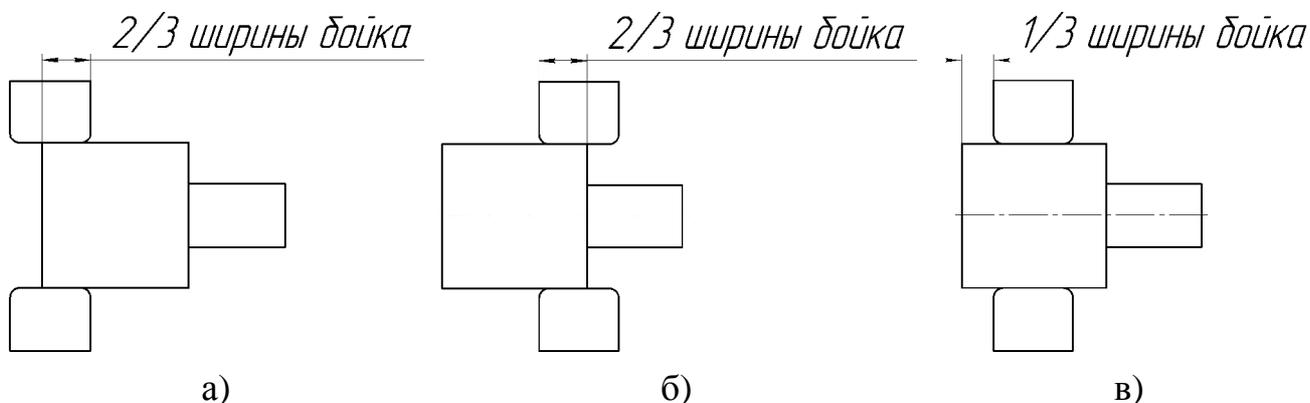


Рисунок 11 – Продольный разрез заготовки на различных этапах ковки

Также была предложена другая возможность устранения вышеописанного дефекта: изменение последовательности подач при протяжке. На рисунке 12а показан исходный вариант, при котором протяжка начиналась с передней части поковки (которая заходила в бойки на  $2/3$  их ширины) с относительной подачей 0,6. Это вызывало значительное продольное течение металла и, как следствие, появление на торце поковки полости, приводящей к появлению осевой трещины.



а) – исходный вариант протяжки; б) – изменённый вариант протяжки;  
в) – положение поковки в конце протяжки

Рисунок 12 – Различные варианты положения заготовки при протяжке

При предложенных изменениях процесс протяжки начинается с задней части поковки, как показано на рисунок 12б. Перед финальным обжатием в проходе поковка занимает положение, показанное на рисунке 12в. Её передний торец находится от бойков на расстоянии не менее чем в  $1/3$  от их ширины. Величина относительных подач при этом в процессе протяжки изменяется в диапазоне  $0,4 - 0,7$ . Подобное первоначальное расположение поковки, совместно с последовательностью подач, позволяет уменьшить продольное течение периферийных слоёв металла в её передней части и также предотвращает появление торцевой утяжины. Продольные разрезы поковки на различных этапах моделирования изменённого технологического процесса показаны на рисунке 13.

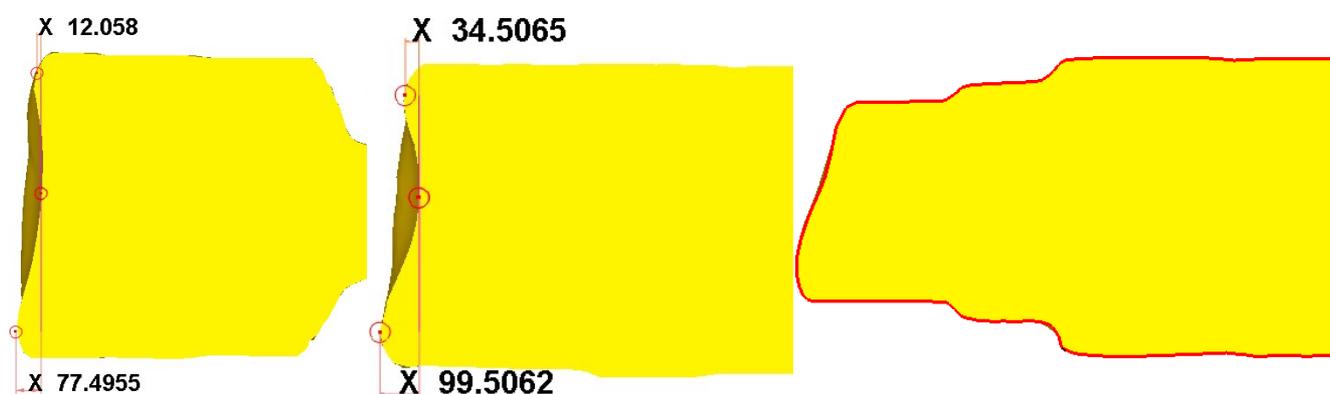


Рисунок 13 – Продольный разрез заготовки на различных этапахковки

Средствами моделирования также были определены причины появления подприбыльных кольцевых трещин: недостаточно высокая температура поверхности поковки при деформации совместно с выполнением разметки непосредственно бойками, что вызывало высокие растягивающие напряжения. На основании полученных данных были предложены рекомендации по изменению времени выдержки заготовки в печи при подогреве и необходимости использовать для разметки соответствующие инструменты - пережимки взамен бойков.

### **Основные результаты работы и выводы:**

1. Проведён анализ путей совершенствования технологических процессовковки гладких и ступенчатых валов. Установлено, что применение компьютерного моделирования является распространённым и эффективным методом совершенствования технологических процессов.
2. На примере осадки цилиндрических образцов проведено сравнение программных пакетов конечно-элементного моделирования Simufact Forming

и DEFORM. На основе наилучшего соответствия модели реологических свойств и задачам работы выбран комплекс DEFORM.

3. Разработана методика обработки справочных данных для построения математической модели реологических свойств материалов для применения в программном комплексе DEFORM. Используя данную методику, созданы модели для жаропрочного сплава ЭП199 (ХН56ВМТЮ).
4. Разработана методика оценки деформации металла при помощи исследования элементарных объёмов в очаге деформации, позволяющая совместно с картинами распределения деформаций, получаемыми при моделировании, наглядно показать потоки металла в теле заготовки, в зависимости от способа деформирования. С помощью данной методики оценено влияние различных типов бойков на распределение деформаций и течение металла при протяжке цилиндрических заготовок. Подтверждено, что при одинаковой степени укова применение бойков, обеспечивающих более сложное течение металла, позволяет увеличить области с высокими значениями накопленных деформаций по всему объёму поковок.
5. Установлено влияние технологических факторов процессаковки вала на радиально-обжимной машине на НДС металла в осевой зоне поковки: увеличение величины угла заходного участка и продольной подачи обеспечивает повышение значений интенсивности напряжений и накопленных деформаций. На основе факторного вычислительного эксперимента получены уравнения, позволяющие получить значения интенсивности напряжений и накопленных деформаций в осевой зоне поковки без проведения компьютерного моделирования.
6. Уточнены варианты вырезных бойков для протяжки круглых штанг диаметром 170 мм в условиях АО «Металлургический завод «Электросталь», позволяющие увеличить области с сжимающими напряжениями в поковках, тем самым уменьшить возможность появления трещин в осевой зоне.
7. Предложены изменения режимов обжати для радиально-обжимной машины, применяемой АО «Металлургический завод «Электросталь», позволяющие использовать для получения полых валов плоские бойки взамен вырезных. При использовании обоих типов бойков распределение конечных деформаций при обработке отличается незначительно, но при вводе дополнительного проглаживающего прохода плоские бойки являются более технологичными: позволяют охватывать более широкий сортамент продукции и проще в изготовлении.

8. Уточнены параметры технологического процессаковки валька для сортопрокатного стана в условиях ОАО «ЭЗТМ»: изменение последовательности подач заготовки, увеличение числа подогревов и применение сферической осадочной плиты, позволяющие устранить появление таких дефектов как торцевые полости и подприбыльные кольцевые трещины.

#### **Основное содержание диссертации опубликовано в работах:**

1. Таупек И.М., Алексеев П.Л. Анализ напряженно-деформированного состояния металла при ковке-протяжке с использованием макросдвигов в DEFORM–3D. "Образование, наука, производство и управление". Всероссийская научно-практическая конференция преподавателей, сотрудников и аспирантов с международным участием. Сборник научных и научно-методических докладов. ТОМ I Технические науки. 21-23 ноября 2012 г., Старый Оскол, с. 223–228.

2. Таупек И.М., Антощенко Ю.М., Горбачев Д.С. Возможностьковки заготовок из высоколегированных сталей и сплавов на радиально–обжимных машинах. Кузнечно–штамповочное производство. Обработка материалов давлением. №1, 2013г. с. 38–40. **(Рекомендован ВАК)**.

3. Таупек И.М., Лисовский А.В. Моделирование процессов горячей обработки металлов давлением с целью управления структурами и свойствами получаемых заготовок для машиностроительного производства. Сборник трудов III Всероссийской молодёжной школы–конференции «Современные проблемы металловедения». Пицунда 9–14 сентября 2013г., с. 245–254.

4. Таупек И.М., Алексеев П.Л. Анализ технологического процессаковки–протяжки с помощью моделирования в DEFORM–3D. Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. Серия 2. Технология машиностроения и материалы.–М., МГТУ «МАМИ», №2(16), 2013, т.2, 423с. ISSN 2074-0530. с. 220–224. **(Рекомендован ВАК)**.

5. Таупек И.М., Антощенко Ю.М. Особенности моделирования осесимметричной осадки. Кузнечно–штамповочное производство. Обработка материалов давлением. №10, 2014г. с. 42–48. **(Рекомендован ВАК)**.

6. Таупек И.М., Антощенко Ю.М. Исследование процесса осесимметричной осадки методами компьютерного моделирования. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. №1, 2015г. с. 49–53. **(Рекомендован ВАК)**.

7. Таупек И.М., Алексеев П.Л. Анализ формоизменения элементарного объёма при протяжке заготовки с использованием различных типов бойков. Сборник тезисов докладов 49-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь XXI-го века–будущее Российской науки». Электросталь 21–24 апреля 2015. с. 30–31.

8. Таупек И.М., Алексеев П.Л., Лисовский А.В. Моделирование изменения формы элементарного объёма при протяжке заготовки с использованием бойков различных типов. Сборник научных и научно-практических докладов XII всероссийской научно-практической конференции аспирантов и студентов. Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСиС», 27–30 апреля 2015 г. с. 392–395.

9. Общее руководство по работе с программным комплексом DEFORM / Таупек И.М., Кабулова Е.Г., Положенцев К.А., Лисовский А.В., Макаров А.В. // – Старый Оскол: ООО ИПК «Кириллица», 2015. – 217 с.

10. Свидетельство № 2015619538 Российская Федерация. Программа «Ковка» для расчётов проходов ковочного пресса: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ / Глушенкова С.Г., Положенцев К.А., Кабулова Е.Г., Таупек И.М.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический институт «МИСиС». - № 2015616588 ; заявл. 17.07.2015; зарегистр. 04.09.2015. – 1 с.