

Донбасская государственная машиностроительная академия

*На правах рукописи*

**МАРКОВА МАРИНА АЛЕКСАНДРОВНА**

УДК 621.735.3-416

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПУСТОТЕЛЫХ ПОКОВОК  
НА ОСНОВЕ СПОСОБА КОВКИ БЕЗ ОПРАВКИ**

Специальность: 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор  
Алиев Играмотдин Серажутдинович

Краматорск – 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
<p style="text-align: center;"><b>1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОСНАСТКА И МЕТОДЫ РАСЧЕТА КОВКИ ПУСТОТЕЛЫХ ЗАГОТОВОК</b> .....</p>	
1.1 Современные подходы к проектированию и совершенствованию технологических процессов получения пустотелых заготовок.....	12
1.2 Основные методы расчета технологических режимов ковки пустотелых заготовок.....	23
1.2.1 Теоретические исследования процессов ковки пустотелых заготовок .....	23
1.2.2 Экспериментальные исследования процессов ковки пустотелых заготовок.....	30
Выводы по разделу 1 .....	41
Постановка цели и задач исследования .....	42
<p style="text-align: center;"><b>2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ КОВКИ БЕЗ ОПРАВКИ ПУСТОТЕЛЫХ ЗАГОТОВОК</b>.....</p>	
2.1 Методика теоретических исследований методом конечных элементов процессов ковки пустотелых заготовок .....	45
2.1.1 Методика теоретического исследования механизма заковки отверстия при протяжке полых заготовок без оправки .....	49
2.1.2 Планирование математического эксперимента .....	54
2.2 Методика экспериментальных исследований.....	60
2.2.1 Моделирование процессов протяжки пустотелых поковок без оправки.....	61
Выводы по разделу 2 .....	64

3 ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВОК НА ТЕПЛОВОЕ И ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА .....	65
3.1 Тепловое и деформированное состояния металла заготовки при ковке пустотелых заготовок вырезными бойками .....	65
3.2 Заковка отверстия заготовки при ковке вырезными бойками .....	66
3.3 Совершенствование способаковки пустотелых заготовок за счет применения вырезных бойков со скосами.....	71
3.3.1 Исследование теплового состояния металла заготовки .....	73
3.3.2 Исследование деформированного состояния металла заготовки .....	74
3.3.2.1 Ковка заготовок с толстой стенкой ( $d_0 / D = 0,3$ ).....	74
3.3.2.2 Ковка заготовок со средней стенкой ( $d_0 / D = 0,55$ ).....	79
3.3.2.3 Ковка заготовок с тонкой стенкой ( $d_0 / D = 0,8$ ) .....	83
3.3.3 Исследование механизма заковки отверстия пустотелой заготовки ....	88
3.3.3.1 Ковка вырезными бойками со скосами с подачей $a = 0,1D$ .....	88
3.3.3.2 Ковка вырезными бойками со скосами с подачей $a = 0,2D$ .....	93
3.3.3.3 Ковка вырезными бойками со скосами с подачей $a = 0,3D$ .....	97
Выводы по разделу 3 .....	100
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОВКИ БЕЗ ОПРАВКИ ПУСТОТЕЛЫХ ЦИЛИНДРОВ.....	102
4.1 Исследование формоизменения заготовки в процессе протяжки вырезными бойками.....	102
4.2 Исследование формоизменения заготовки в процессе протяжки вырезными бойками со скосами.....	107
Выводы по разделу 4 .....	111
5 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОСНАСТКИ ПРОЦЕССОВ КОВКИ БЕЗ ОПРАВКИ ПУСТОТЕЛЫХ ПОКОВОК .....	112
5.1 Рекомендации и методика для проектирования новых ресурсосберегающих технологических процессовковки без оправки .....	112

5.2 Технологический процесс изготовления длинномерных пустотелых заготовок со сквозным отверстием без оправки .....	117
5.3 Технологический процесс изготовления полых цилиндрических поковок с безоправочным устранением внутренней конусной поверхности ...	120
5.4 Технологический процесс изготовления тонкостенных длинномерных труб на гидравлических прессах .....	125
5.5 Технологический процесс изготовления пустотелых цилиндров с заковом дна .....	129
5.6 Промышленная апробация процессаковки без оправки .....	135
Выводы по разделу 5 .....	139
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ .....	141
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	144
Приложение А. Результаты замеров осевого отверстия .....	164
Приложение Б. Матрица планирования теоретического исследования.....	166
Приложение В. Акты внедрения результатов работы на ПАО «НКМЗ» и ПАО «ЭМСС» .....	169
Приложение Г. Акты про внедрение и использование результатов диссертационной работы в НИР и учебный процесс ДГМА.....	176

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Развитие тяжёлого и энергетического машиностроения неразрывно связано с повышением качества и снижением себестоимости деталей крупных машин, чему способствует совершенствование существующих и создание новых конкурентоспособных технологий изготовления заготовок, получаемых ковкой. Решению этих задач способствует внедрение в промышленность прогрессивных технологийковки пустотелых заготовок без оправки.

Приоритетным направлением развития тяжелого машиностроения Украины является повышение качества деталей ответственного назначения для улучшения их эксплуатационных характеристик и снижение затрат на их производство. В современных условиях существует востребованность в получении, повышении качества и снижении затрат на изготовление крупных пустотелых деталей ответственного назначения, которые применяются в энергетике и тяжелом машиностроении. К таким деталям относятся пустотелые цилиндры с дном (пустотелые плунжеры и корпуса мощных гидравлических цилиндров) и толстостенные трубы с малым диаметром отверстия. Повышение эксплуатационных характеристик данных деталей требует разработки новых схем деформирования для обеспечения высокого качества заготовок.

Основные существующие методы производства пустотелых цилиндров с дном предусматривают приварку дна к полым цилиндрам. Полученные данным способом детали не гарантируют сплошности металла дна и корпуса цилиндра. Это, в свою очередь, снижает ударную вязкость и прочность металла детали в зоне сварного шва. По этой причине возможен обрыв дна цилиндра вследствие действия высоких знакопеременных нагрузок.

Менее распространенные способы получения глухонных заготовок на основе применениековки трубной заготовки с заковом дна не обеспечи-

вают полного смыкания и заварки отверстия заготовки вследствие окисленной поверхности металла заготовки в процессе горячего деформирования. Данные способы получения глухондных заготовок не обеспечивают герметичности дна получаемых заготовок, и такие поковки не могут быть использованы для изготовления пустотелых плунжеров или корпусов гидравлических цилиндров с боковой подачей жидкости высокого давления.

Более того, при ковке толстостенных труб с диаметром отверстия менее 350 мм невозможно применение оправки вследствие её сильного разогрева и деформации в процессековки. В этом случае удаление оправки из поковки становится невозможным. На производстве эта проблема решается закрытием отверстия напуском, что приводит к увеличению расхода металла.

Расширение технологических возможностей и повышение технико-экономических показателей процессовковки пустотелых поковок требует разработки новых схем деформирования. В значительной степени решению этих задач способствует разработка и внедрение в промышленность новых прогрессивных технологий изготовления цельнокованых пустотелых заготовок без применения оправки.

В современной теории и практике по обработке металлов давлением (ОМД) отсутствуют научные основы проектирования процессов и рекомендации дляковки пустотелых заготовок без применения оправки. Это делает затрудненным разработку ресурсосберегающих процессовковки пустотелых поковок. В этой связи необходимость разработки научно обоснованной методики проектирования новых технологических процессовковки пустотелых цилиндров без оправки с целью повышения качества поковок и снижения затрат на их производство представляет большой научный и практический интерес и подтверждает актуальность темы диссертационной работы.

**Связь с научными программами, планами, темами.** Диссертация соответствует приоритетному направлению развития науки и техники «Новейшие ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе» и научному направлению «Развитие ресур-

сосберегающих процессов обработки давлением на основе создания новых технологических способов и методик анализа закономерностей пластического деформирования» научной школы кафедры ОМД Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА). Работа выполнена в рамках госбюджетных научно-исследовательских работ (НИР) ДГМА, предусмотренных планами Министерства образования и науки Украины (работы 0111U006174, 0112U001244, 0113U000608, 0116U003614), при выполнении которых автор принимала участие как исполнитель.

**Цель работы** состоит в расширении технологических возможностей и повышении технико-экономических показателей процессовковки пустотелых поковок на основе применения способаковки без оправки.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

- проанализировать существующие технологические процессыковки пустотелых заготовок с дном и толстостенных труб с малым диаметром отверстия, разработать направления их дальнейшего совершенствования;

- разработать методику проведения теоретических и экспериментальных исследований моделирования процессовковки пустотелых заготовок без оправки;

- установить влияние диаметра отверстия в исходной заготовке на удлинение поковки и изменение толщины стенки в процессековки без оправки;

- предложить новый параметр оценки интенсивности удлинения поковки, который позволит оценить степень заковки осевого отверстия через изменение площади поперечного сечения пустотелой заготовки в процессековки;

- установить закономерности распределения параметров НДС пустотелой заготовки в процессе протяжки без оправки в зависимости от различных размеров заготовки, режимовковки и геометрии инструмента, что позволит

установить схемуковки с равномерным распределением деформаций в теле заготовки;

– определить формоизменение и интенсивность удлинения пустотелой заготовки в процессековки без оправки бойками различной геометрии при различных технологических режимах протяжки, что позволит разработать новую схемуковки с минимальной заковкой отверстия;

– провести верификацию теоретических результатов моделирования формоизменения заготовки при ковке без оправки экспериментальными исследованиями;

– на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработать рекомендации по совершенствованию технологий и оснастки дляковки пустотелых заготовок без оправки;

– спроектировать эффективную геометрию вырезных бойков, которая обеспечивает минимальную заковку отверстия при ковке без оправки;

– разработать методику проектирования технологических процессовковки без оправки пустотелых заготовок, что позволит расширить технологические возможности процессовковки;

– выполнить опытно-промышленную апробацию нового технологического процессаковки пустотелых заготовок без оправки и внедрить его в производство.

**Объектом исследования** являются технологические процессы и инструмент дляковки пустотелых поковок

**Предметом исследования** выступают закономерности формоизменения, технологические возможности и параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовок в процессековки без оправки пустотелых поковок.

**Методы исследования.** Теоретическое исследование НДС реализовано на основе метода конечных элементов (МКЭ). Формоизменение заготовки в процессековки без оправки определялось экспериментом в лабораторных условиях, которые основываются на законах подобия и моделирования. При

обработке результатов численных экспериментов применялись методы математической статистики. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена соблюдением соответствующих современных методик при проведении экспериментов, проверкой математической модели на адекватность и подтверждена соответствием экспериментальных данных с результатами расчетов.

### **Научная новизна полученных результатов.**

1. Впервые установлено на основе теоретического исследования, что в процессековки пустотелых заготовок без оправки с увеличением диаметра отверстия в исходной заготовке интенсивность удлинения заготовки снижается, а максимальное увеличение толщины стенки в процессековки без оправки происходит при диаметре отверстия 0,6 от наружного диаметра заготовки.

2. Впервые на основе МКЭ установлены закономерности распределения параметров НДС пустотелой заготовки в процессе протяжки без оправки в зависимости от различных исходных соотношений размеров заготовки, степени обжатия, величины подачи и геометрии инструмента, что позволило установить схемуковки с равномерным распределением деформаций в теле заготовки.

3. Впервые для процессовковки пустотелых заготовок без оправки предложен параметр оценки интенсивности удлинения заготовки, который позволяет оценить степень заковки осевого отверстия через изменение площади поперечного сечения пустотелой заготовки в процессековки.

4. Расширены представления о влиянии величины подачи, углов вырезов и углов скосов вырезных бойков на формоизменение отверстия пустотелой заготовки, что позволило установить эффективную геометрию инструмента, режимовковки и разработать новую схему деформирования без оправки с минимальной заковкой отверстия.

**Практическую ценность** диссертационной работы представляют следующие её основные результаты:

– предложен новый способ деформирования пустотелых заготовок без оправки вырезными бойками со скосами, который расширяет технологические возможности процессаковки;

– разработана методика проектирования технологических процессовковки, которая заключается в определении диаметра отверстия в заготовке перед протяжкой без оправки в зависимости от диаметра отверстия в поковке и степени деформации;

– разработаны новые технологические процессы, механические режимы деформирования и геометрия деформирующего инструмента дляковки пустотелых заготовок без оправки, которые позволяют интенсифицировать процесс протяжки и обеспечивают равномерное распределение деформаций в теле поковки.

Экономический эффект от внедрения новых технологических процессовковки пустотелых заготовок на ПАО «НКМЗ» с учетом долевого участия составил 576 000 грн. по уровню цен 2015 г., а на ПАО «ЭМСС» – 175 000 грн. по уровню цен 2014 г.

Научно-практические разработки, выполненные в диссертации, используются в учебном процессе и НИР кафедры ОМД ДГМА при изучении дисциплин «Технологияковки» и «Ковка крупных поковок», а также при выполнении студентами специальности «Обработка металлов давлением» курсовых, дипломных проектов и магистерских работ.

**Личный вклад соискателя.** Автором самостоятельно осуществлена постановка цели и задач диссертационной работы, выполнен анализ литературных источников и разработаны конечно-элементные модели процессовковки пустотелых заготовок без оправки. Проведены экспериментальные исследования и даны рекомендации по проектированию технологических процессовковки пустотелых цилиндрических заготовок без оправки. Разработаны и предложены для промышленного освоения технологические процессы и инструмент дляковки без оправки.

Вклад соискателя в работах, опубликованных вместе с соавторами, представлен в аннотациях к списку опубликованных работ по теме диссертации.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения работы, научные и практические результаты докладывались на международных научно-технических конференциях (МНТК): XVI–XIX МНТК «Достижения и проблемы развития технологий и машин обработки давлением» (Краматорск, 2013–2016); IV МНТК «Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве» (Краматорск, ДГМА, 2013); НТК «Механіка пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів» (Київ: НТТУ «КПІ», 2014); XIV МНТК «14th International Conference RaDMI» (Topola, Serbia, 2014); XII МНТК «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (Краматорськ, 2014); XXXVII НТК професорсько-викладацького складу, науково-технічних працівників, аспірантів і студентів (Краматорськ, 2015); III МНТК «Машины и пластическая деформация металлов» (Запорожье, 2015); IV МНТК молодых ученых та студентів (Тернопіль, 2015); VII МНТК «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии» (Харьков: НТУ ХПИ, 2015), а также на ежегодных научных семинарах ДГМА (2013–2016 гг.) и объединенном научном семинаре по ОМД ДГМА (2016 г.).

**Публикации.** Материалы диссертационной работы опубликованы в 17 печатных работах, из них 10 статей в 10 научных специализированных изданиях Украины, в том числе 1 статья без соавторов; 2 статьи в зарубежных изданиях; 4 тезисов докладов на МНТК. Новые технические решения защищены 1 патентом Украины.

# 1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ОСНАСТКА И МЕТОДЫ РАСЧЕТА КОВКИ ПУСТОТЕЛЫХ ЗАГОТОВОК

## 1.1 Современные подходы к проектированию и совершенствованию технологических процессов получения пустотелых заготовок

Приоритетным направлением развития тяжелого машиностроения является повышение качества деталей ответственного назначения для улучшения их эксплуатационных характеристик и снижение затрат на их производство. На сегодняшний день существует востребованность в повышении качества и снижении затрат на изготовление крупных деталей ответственного назначения, которые применяются в энергетике, тяжелом машиностроении и пр. Повышение механических свойств деталей ответственного назначения предполагает разработку новых способовковки для гарантированного получения высокого качества заготовок [1–8].

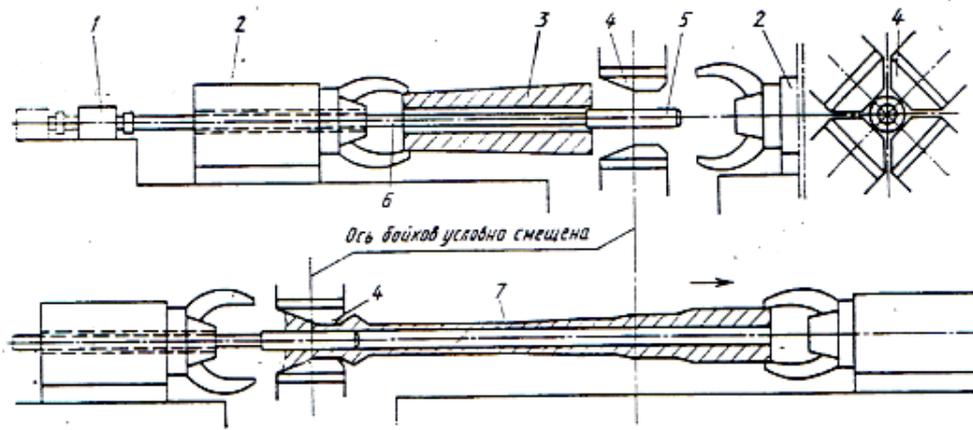
Исследования процессовковки-протяжкипустотелыхпоковокпредставлены в работах Ю. М. Антощенкова и А. Н. Сидорова [9–11]. Эти исследования были направлены на совершенствование технологииковки-протяжки за счет оптимизации конфигурации инструмента. В исследовании было установлено формоизменение заготовки в процессековки, однако, в данных работах не было проведено исследование влияния формы бойков на напряженно-деформированное состояние (НДС) заготовки.

Традиционные способы изготовления заготовок полых длинномерных поковок характеризуются значительной металлоемкостью ( $K_{\text{им}} = 0,15 \dots 0,3$ ) и трудоемкостью, не отвечают возрастающим требованиям по уровню и стабильности параметров, определяющих эксплуатационные характеристики изделия. В. А. Ростовщиков предложил способ изготовления полых поковок

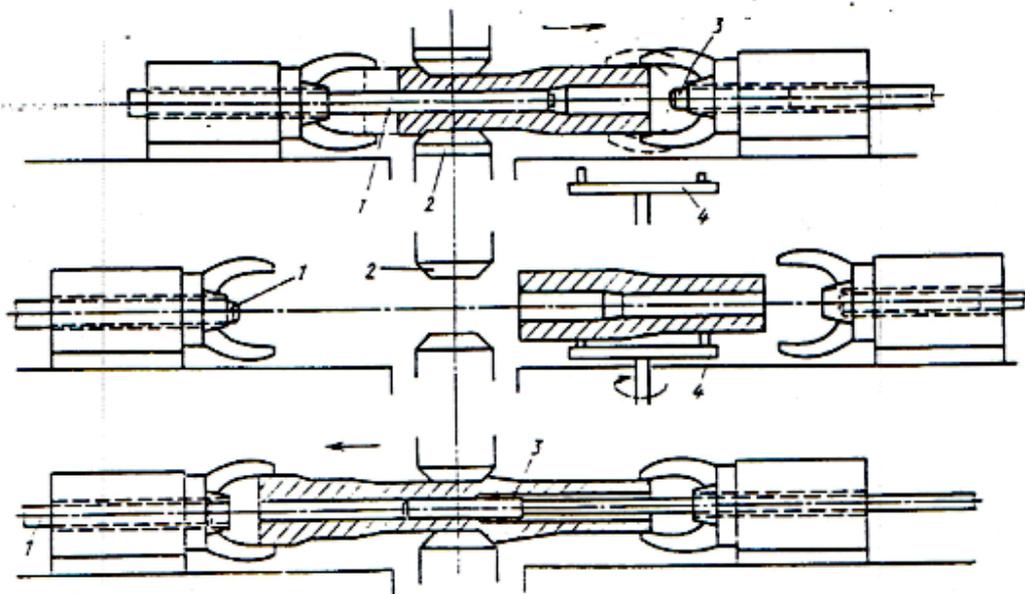
[12], близких к профилю готовых деталей, на современных радиально-обжимных машинах, оснащенных специальными устройствами (рис. 1.1). Недостатком данного способа является невозможность получения труб с высоким качеством поверхности, это обусловлено смещением оправки при ковке в зоне деформирования относительно условной оси, что является причиной разностенности поковки и увеличения припусков под последующую механическую обработку.

Известен также способ И. В. Голышева [13] для изготовления полых поковок на гидравлическом ковочном прессе с применением оправки. В данном способе в нагретую полу заготовку устанавливают длинную оправку с небольшим зазором и удерживают при ковке с одной или двух сторон на цепях крана или манипулятором. Ковку производят двумя бойками, обжимая участки заготовки в определенной последовательности без перемещения заготовки относительно оправки. После окончанияковки оправку удаляют из поковки гидравлическим экстрактором или путем перемещения стола прессы. Недостатком данного способа является то, что при его осуществлении требуются большие силы для снятия заготовки с оправки, а в некоторых случаях, вследствие заковывания оправки и возникающих при этом больших сил трения между оправкой и заготовкой, не удается снять последнюю с оправки без изменения искажения формы заготовки.

Согласно данным Н. В. Пасечника и И. А. Суркова [14] в ряде случаев разрушение цилиндров связано с возникновением и развитием усталостных трещин в галтели днища. В качестве примера на рисунке 1.2 представлена схема произошедшего в 1994 г. разрушения сварнокованного из стали 35 цилиндра силой 50 МН. Аналогичная трещина была обнаружена в 2004 г. в цилиндре силой 35 МН, изготовленном из той же стали. Разрушения по такой же схеме происходили ранее в цилиндрах, изготовленных из стали 25ГС. Отмеченные выше разрушения днищ происходили в цилиндрах прессов, установленных в линиях производства железнодорожных колес.



а)



б)

Рисунок 1.1 – Формообразование поковки трубы за один переход (а)  
и с разворотом на  $180^\circ$  (б)

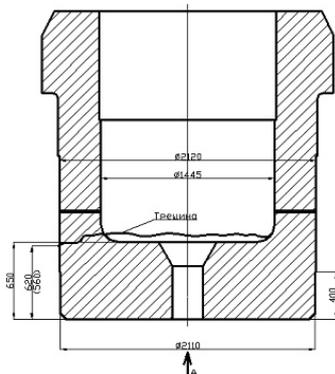


Рисунок 1.2 – Обрыв дна в сваркованном гидроцилиндре [14]

В рассмотренных выше примерах причину разрушения определяли конструкция и технология изготовления собственно цилиндра. В ряде случаев причина разрушения связана с условиями совместной работы цилиндра и поперечины, в которую он установлен.

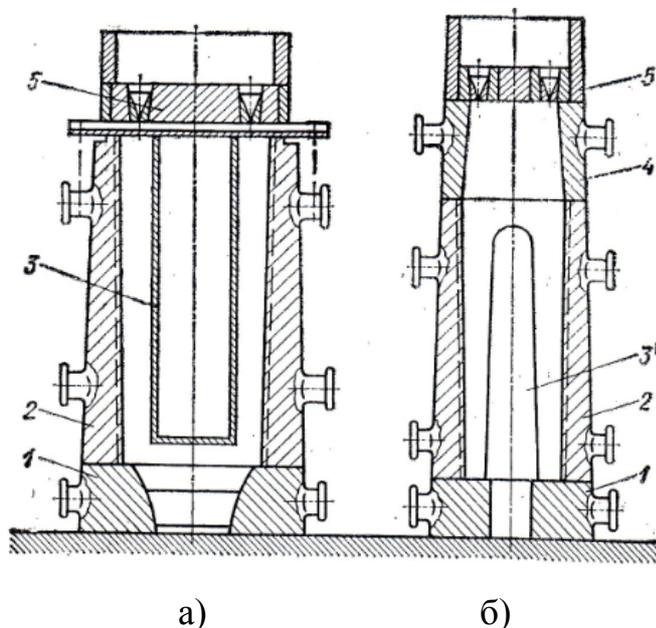
При изготовлении пустотелых поковок применяют операцию прошивки после осадки для формирования отверстия [10]. Операция прошивки требует значительных сил, иногда превышающих возможности действующих прессов. В таких случаях для получения полых заготовок нужного диаметра приходится вводить дополнительную операцию – раскатку предварительно прошитых слитков, что увеличивает трудоемкость и разностенность исходных заготовок перед протяжкой.

Для устранения указанных недостатков Я. М. Охрименко и др. разработали и опробовали комплексную технологию изготовления толстостенных полых заготовок из специального кузнечного слитка с глухой полостью (рис. 1.3), обеспечивающую улучшение технологичности процесса, экономию металла, снижение трудоемкости и повышение качества получаемых трубных изделий [15]. Изучено влияние степени деформации на проработку структуры и качества металла опытного слитка. Показано, что полное разрушение литой структуры наблюдается при степени деформации, равной 65...70 %, при этом анизотропия свойств минимальна.

Способ прошивки слитков в контейнере со стороны усадочной раковины бесприбыльного слитка, предложенный Ю. Ф. Шевакиным и В. Д. Арефьевым [16, 17] обладает рядом существенных недостатков, связанных с неравномерностью распределения по телу поковки накопленной деформации и неблагоприятным распределением металла дефектной зоны слитка, обогащенной вредными примесями и неметаллическими включениями, прилегающей к усадочной раковине слитка.

А. В. Пакало и соавторы [18] предложили новый способ получения поковок труб, включающий операции: осадку слитка в контейнере, прошивку осажденного слитка со стороны донной части. Этот способ позволяет, по

сравнению с существующим, снизить разностенность труб, расположить дефектную зону в области технологического отхода поковки (в донной части) и исключить дефекты на внутренней поверхности стакана (трубы), уменьшить технологические припуски и увеличить коэффициент использования металла.



а – трубный вариант, б – стержневой вариант; 1 – поддон; 2 – изложница;  
 3 – труба, формирующая полость; 3' – стержень, формирующий полость;  
 4 – прибыль; 5 – промежуточное разливочное устройство

Рисунок 1.3 – Схема устройства для получения слитков с глухой полостью [15]

Я. Г. Жбанковым был проведен анализ факторов, влияющих на НДС заготовки в процессахковки поковки типа труб. Установлены основные направления дальнейшего совершенствования процессовковки труб и предложена схемаковки труб прошивкой по специальному режиму, позволяющему увеличить зазор между прошивнем и деформируемой заготовкой для легкого удаления инструмента из заготовки. Установлены основные параметры формоизменения заготовки в процессе прошивки по специальному

режиму. Определено влияние основных параметров процесса прошивки на величину зазора между заготовкой и деформирующим инструментом [19].

С использованием метода верхней оценки Yunjian Wu и соавторами предложена модель для определения осевой деформации металла в процессе радиальной ковки, позволяющая прогнозировать силу ковки в зависимости от величины обжатия [20]. Авторами установлено влияние осевой подачи заготовки и её обжатия на искривление профиля в меридиональной плоскости поковки. Полученная модель не позволяет определить радиальное течение металла в процессе деформации, что требует решения задачи в трёхмерной постановке.

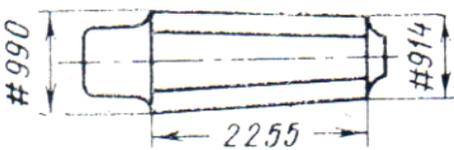
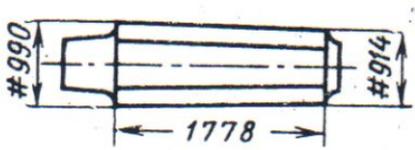
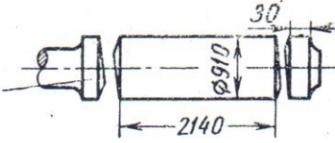
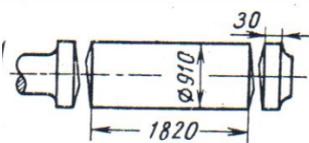
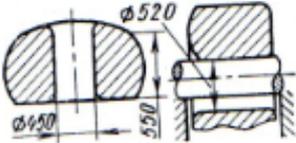
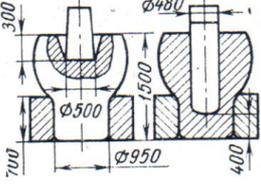
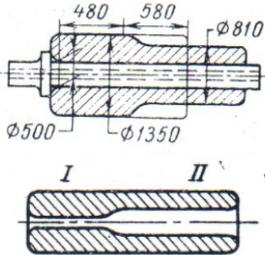
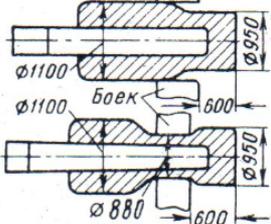
Новый процесс получения бесшовных толстостенных труб большого диаметра, работающих в агрессивных средах, в условиях высоких температур и сравнительно высоких давлений, разработанный С. И. Данилиным и др. [21], принципиально отличается от существующих способов тем, что изготовление их производится из слитков прошивкой в матрице на вертикальном гидравлическом прессе и протяжкой полученного стакана на горизонтальном гидравлическом прессе. Качество труб, полученных новым методом, характеризуется высоким уровнем механических свойств и однородностью состава. Однако, этот способ не применим для изготовления цилиндров массой более 25 т, вследствие больших сил при прошивке в матрице.

С целью снижения расхода металла и исключения операции удаления в отход прибыльной части слитков А. И. Зубковым и соавторами [22] было предложено изготавливать бесприбыльные слитки с вогнутой донной частью методом сифонной разливки. Использование бесприбыльных слитков с вогнутым дном для изготовления поковок труб способом протяжки на оправке предварительно прошитых слитков обеспечивает получение качественных труб и способствует снижению трудоемкости процесса за счет устранения операции удаления прибыли слитков. В результате повышается коэффициент использования металла, снижается разностенность поковок труб за счет изменения формы донной части слитков и применения сферического толкателя

при прошивке слитков. Ограничением способа является невозможностьковки по предложенному способу цилиндров с дном.

Для нужд тяжелого машиностроения требуются поковки пустотелых цилиндров с глухим дном. Из таких поковок изготавливаются цилиндры и плунжеры гидравлических прессов, плунжеры механизмов шагающих экскаваторов и другие детали. Ф. Н. Голиков и соавторы [23] предложили новую технологию изготовления пустотелых цилиндрических заготовок с глухим дном, представленную в таблице 1.1. Однако, предложенная технологияковки глуходонных цилиндров предполагает глубокую прошивку заготовки оправкой в матрице, что приведет к уводу оправки, вследствие отсутствия её направления. В результате полученная разностенность заготовки при прошивке будет способствовать образованию разностенности в поковке.

Таблица 1.1 – Старый и новый технологический процесс изготовления пустотелых цилиндрических заготовок с глухим дном

Старая технологияковки		Новая технологияковки	
Эскизы переходов		Эскизы переходов	
			
1		1	
2		2	
3		3	

Изготавливать пустотелые поковки большого диаметра на горизонтальном гидравлическом прессе из центробежно-литых заготовок было предложено А. С. Чукмасовым и соавторами [24]. Была разработана следующая технологическая схема: центробежная отливка заготовок, механическая обработка заготовок и металлографический контроль металла, заковка одного конца заготовок, горячая протяжка, обрезка закованного конца и заднего конца («бахромы»), термическая обработка труб и механическая обработка.

В своей работе О. А. Кобелев проанализировал преимущества и недостатки основных способов изготовления толстостенных трубных поволоков и заготовок [25]. Перспективным, по его мнению, является изготовление полых поволоков на ротационно-обжимных и радиально-обжимных машинах. Метод радиального обжатия обеспечивает высокую производительность процесса, достаточную точность размеров заготовок, снижение энергозатрат и повышение коэффициента использования металла. Существующие типы радиально-обжимных машин позволяют получать полые заготовки. Толстостенные трубы чаще всего изготавливают ковкой на прессах из слитков. К недостаткам можно отнести большую разностенность, достигающую 35 %, малый выход годного, значительные припуски под механическую обработку. В настоящее время разработаны и внедрены в производство технологические процессы изготовления толстостенных труб протяжкой предварительно проштампованной заготовки через ряд уменьшающихся в диаметре колец (рис. 1.4). Обычно в качестве исходной заготовки используют многогранные и квадратные слитки. Основным недостатком этого способа – повышенная разностенность из-за плохого центрирования слитка в контейнере.

Н. W. Sizek в своей работе [26] предложил новую технологию изготовления сложнопрофильных полых поволоков, в которой часть поволоков нагревают и штампуют в закрытых штампах. Сочетание осевой силы и использование закрытых ковочных штампов гарантирует, что материал течет в центральную часть. После высадки ступенчатого контура ось концов формируется на оправке с водяным охлаждением (рис. 1.5).

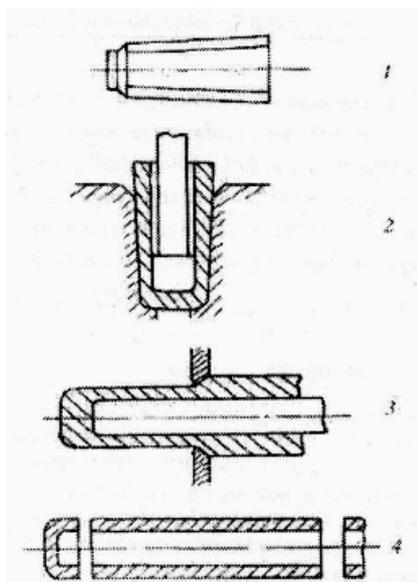
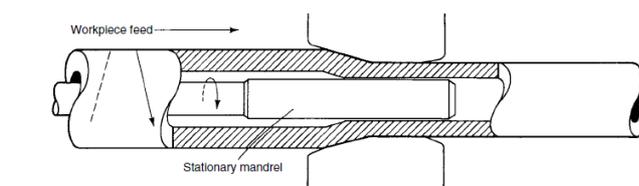
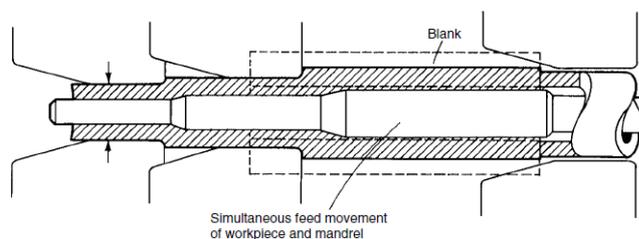


Рисунок 1.4 – Технологическая схема протяжки через матрицы [20]



а)



б)



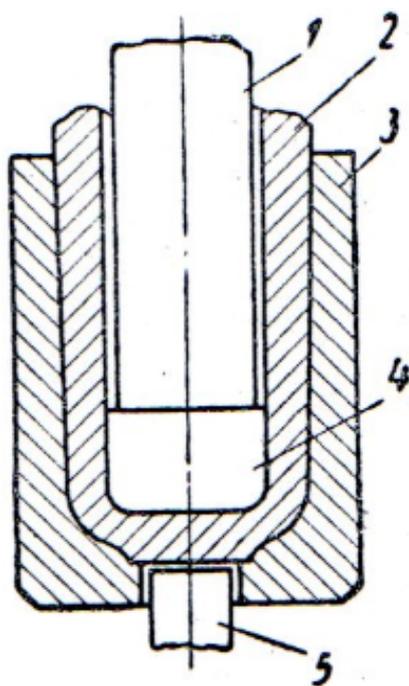
в)

Рисунок 1.5 – Ковка трубчатых частей более короткой оправки (а) и длинной оправки (б), фотография детали (в) [26]

С целью увеличения срока службы бойков ковочных прессов Ю. М. Беловым и В. А. Красавчиковым был разработан новый способ наплавки их рабочей поверхности износостойким металлом [27]. Наплавленный металл должен обладать хорошей теплостойкостью для сохранения высокой твердости после многократных нагревов до 600...650 °С, иметь твердость не ниже НВ 400 при 650 °С, обладать минимальной склонностью к образованию трещин во время наплавки и при работе сохранять мартенситную структуру при нагреве в процессе наплавки, быть пригодным к использованию после наплавки и отпуска для снятия напряжения с последующей минимальной механической обработкой.

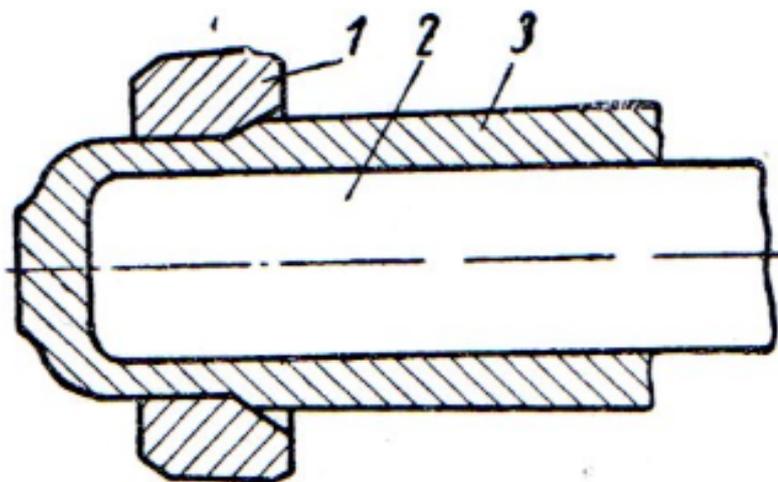
Технологический процесс изготовления поковок типа труб, предложенный В. Н. Лебедевым и соавторами [28], методом прошивки на вертикальном прессе и последующей протяжке на горизонтальном прессе имеет ряд преимуществ в сравнении с ковкой только на вертикальном прессе методом осадки, сквозной прошивкой и протяжкой на оправке. Уменьшением веса слитка достигается экономия металла на 17...28 %. Машинное время, затраченное на изготовление одной поковки, сокращается примерно в 10 раз. На рисунке 1.6 показана схема прошивки слитка на вертикальном прессе, схема протяжки показана на рисунке 1.7. Однако, прошивка в матрице требует значительных сил, что делает способ неприменимым для получения цилиндров из слитков, массой более 20 т.

Распространенным способом изготовления поволоков пустотелых цилиндров с дном является способковки цилиндра на оправке с последующей заковкой дна. В своих работах П. П. Кальченко и соавторы определили, что при заковке большое влияние имеет толщина стенки, причем, чем больше толщина стенки, тем больше металла течет в длину, т. е. требуется большее сечение для закова [29, 30]. Сочетание операций ступенчатой раскатки заготовки с последующим заковом концевого участка до получения выступа по внутреннему диаметру поковки позволяет получить поковку новой конфигурации, приблизив ее по форме и размерам к чистовым размерам детали.



1 – пуансон; 2 – заготовка; 3 – матрица; 4 – прошивная головка;  
5 – выталкиватель

Рисунок 1.6 – Схема прошивки [28]



1 – кольцо; 2 – дорн; 3 – заготовка

Рисунок 1.7 – Схема протяжки [23]

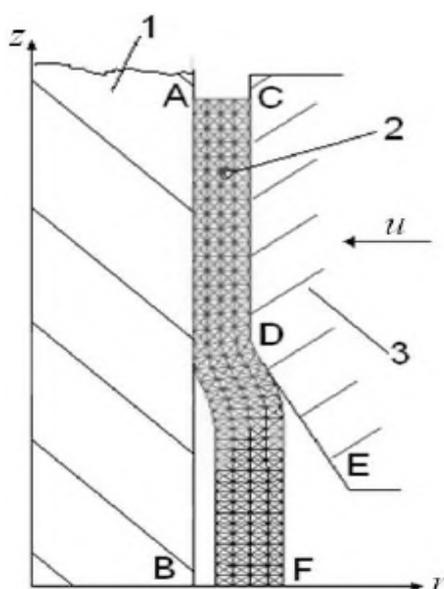
Это в значительной мере сокращает расход металла и трудоемкость механообработки. Кроме того, по предложенному решению при изготовлении крупных поковок цилиндров исключается необходимость в изготовлении тяжеловесных оправок, а так же расширяет номенклатуру изготовления поковок, как по конфигурации, так и по диаметрам. При этом, операция заковки дна не гарантирует полной заварки стенок отверстия и такие заготовки не применимы для изготовления цилиндров с боковой подачей жидкости высокого давления.

Исследованию процесса протяжки на оправке посвящены работы Н. Е. Сидорова и В. Ф. Касатонова [31, 32]. Принципиальным отличием предложенных технологий от общепринятых является изменение последовательности операцийковки, применение подогрева до температуры 1000 °С, являющейся температурой последующей термической обработки и не приводящей к значительному росту зерна, и отказ от промежуточных термических обработок. Длительность термического циклаковки при таком процессе сократилась до 620 ч. Снижает технологические возможности предложенного способа сложность получения пустотелых цилиндров с дном.

## **1.2 Основные методы расчета технологических режимовковки пустотелых заготовок**

### **1.2.1 Теоретические исследования процессовковки пустотелых заготовок**

На базе метода конечных элементов А. Н. Пасько, О. А. Ткач и Л. В. Муравлева провели исследование процесса ротационнойковки на оправке полый цилиндрической заготовки (рис. 1.8) [33, 34].



1 – оправка; 2 – заготовка; 3 – боек

Рисунок 1.8 – Расчетная схема процесса ротационнойковки трубчатой заготовки на оправке [33]

Проведенное исследование позволяет утверждать, что пошаговое нагружение приводит к существенной неоднородности параметров НДС по длине заготовки. Однако при этом сила процессаковки ниже на 75 %, чем при ковке длинным бойком за один переход.

В своем исследовании А. Ghaei и др. методом конечных элементов провели моделирование процесса радиальнойковки труб без оправки [35]. Результаты этого исследования показывают, что процесс радиальнойковки без оправки особенно эффективен при небольшой осевой подаче. Осевые растягивающие напряжения на внутренней поверхности трубы могут привести к образованию кольцевых трещин в кованой трубе. При ковке без оправки увеличение осевой подачи увеличивает максимальную осевую нагрузку, которая может привести к появлению трещин. При ковке без оправки увеличиваются остаточные напряжения по сравнению с ковкой на оправке.

На основе теоретических исследований В. А. Лазоркин [36] предложил способ горячей радиальнойковки полой заготовки на неподвижной оправке с

конической рабочей поверхностью. В результате повышаются точность размеров и качество поверхности получаемых труб, а также надежность работы оборудования.

Вопросом моделированияковки полых поковок занимались А. М. Володин и соавторы [37]. В полость, нагретую до температуры деформации полой заготовки, они устанавливали оправку. В процессековки и удаления оправки в заготовке и оправке возбуждали ультразвуковые колебания. Колебания были направлены параллельно силам трения между заготовкой и оправкой и поверхности их контакта. В результате уменьшались силы трения между заготовкой и оправкой, что позволяло снизить нежелательные нагрузки на кузнечно-прессовое оборудование. Этот способ отличается высокой производительностью и позволяет получать полые поковки высокой точности с минимальными припусками на механическую обработку. Недостатком данного способа является то, что при неправильном выборе режимовковки или подстуживании заготовки возможно залипание заготовки на оправке и последующее ее заковывание. Это приводит к резкому росту сил трения между оправкой и заготовкой, приводящему, в свою очередь, к повышению нагрузок на манипуляторы и механизм крепления оправки, превышающих допустимые, что приводит к их поломке. Кроме того, на РКМ не всегда возможно изготовить поковки большой массы, а сами РКМ относятся к уникальному и дорогостоящему оборудованию.

Исследованиями процессовковки поковок для трубных заготовок большого диаметра занимался Э. З. Розенблат [38] и А. И. Зубков с В. Д. Арефьевым [39, 40]. А. И. Зубков с соавторами в своих работах исследовали влияние параметров процесса деформирования на условия протяжки толстостенных труб большого диаметра. В результате исследований было установлено, что для рационального построения технологического процесса протяжки цилиндров с дном необходимо учитывать следующее: толщина дна должна быть больше толщины стенки; в процессе прошивки слитков получают разностенные заготовки (разностенность  $\Delta s$  достигает 30 мм).

Известно, что большое влияние на образование внутренних плен в трубах оказывают дефекты макроструктуры и скопления неметаллических включений. В своей работе Р. Д. Мининзон и соавторы [41] теоретически исследовали и экспериментально подтвердили влияние развеса и конфигурации слитка на состав и количество оксидных неметаллических включений. Исследователи пришли к выводу, что разливка металла в изложницы для квадратных слитков с конусностью исключает образование грубых дефектов макроструктуры, как в слитке, так и в трубной заготовке.

В своей работе В. А. Тюрин и соавторы [42] изучали и сравнивали модели очага деформаций при ковке полой заготовки на оправке и без оправки. На рисунке 1.9, а приведен очаг деформаций (1/8 часть заготовки), на рисунке 1.9, б – годограф скоростей при радиальном обжатии полой заготовки на оправке. На рисунке 1.10, а представлен очаг деформаций (1/8 часть заготовки), при радиальном обжатии полой заготовки без оправки. На рисунке 1.10, б – годограф скоростей.

Модельковки трубы на оправке В. А. Тюрин и соавторов [43], полученная на основе метода верхней оценки, позволяет оценить энергосиловые параметрыковки (силу, мощность), необходимые для выбора ковочного оборудования. Модельковки полой заготовки без оправки позволяет прогнозировать форму и размеры зоны макросдвиговых деформаций, определяющих глубину проработки литой структуры.

В работах [44, 45] А. Н. Пасько и О. А. Ткач рассматривается процесс многопереходной ротационнойковки. Ротационнаяковка полых цилиндрических заготовок без оправок приводит к увеличению толщины стенки заготовки (рис. 1.11). Исследования показали, что с увеличением всех рассматриваемых технологических параметров ротационнойковки увеличивается толщина стенки заготовки после обжатия. Но наибольшее влияние на утолщение стенки оказывает степень обжатия.

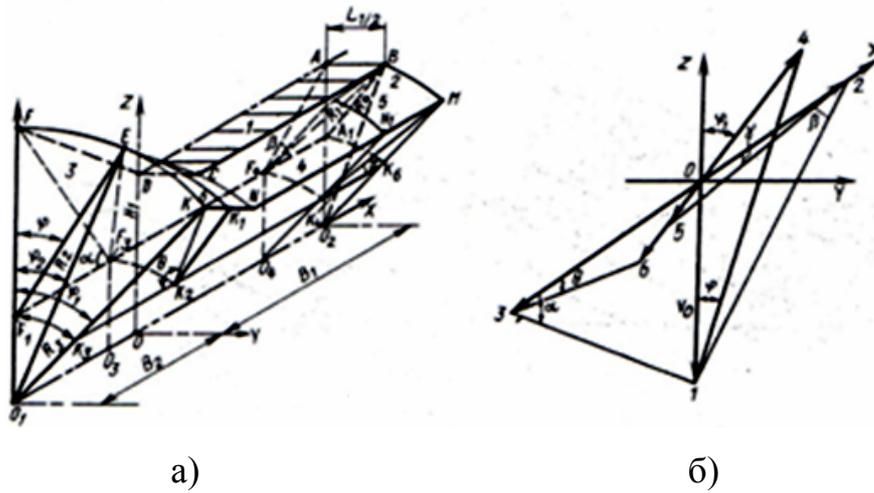


Рисунок 1.9 – Радиальное обжатие на оправке [42]

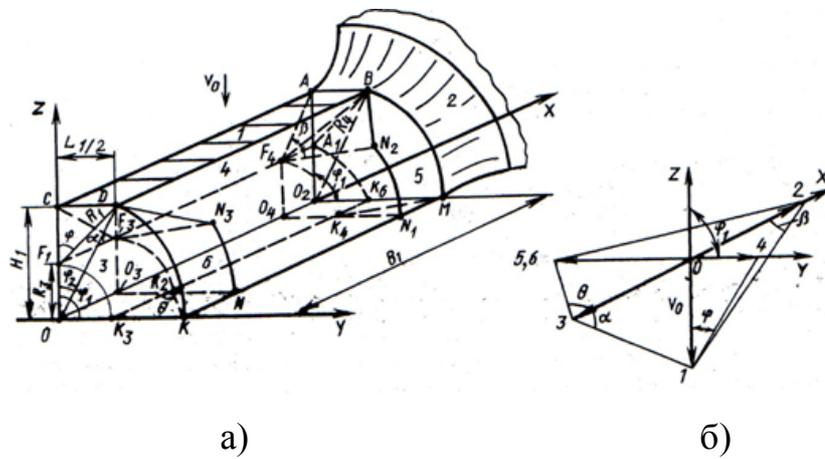
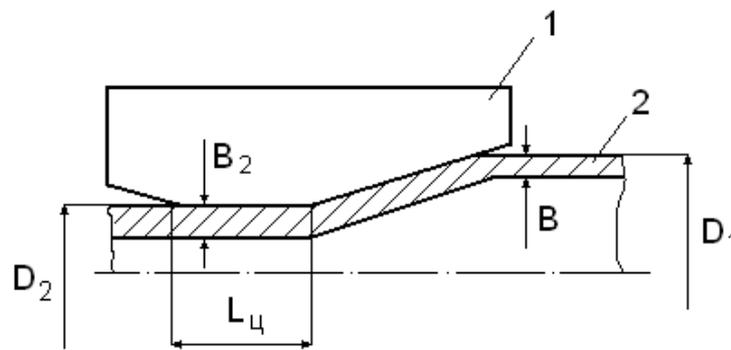


Рисунок 1.10 – Радиальное обжатие без оправки [42]



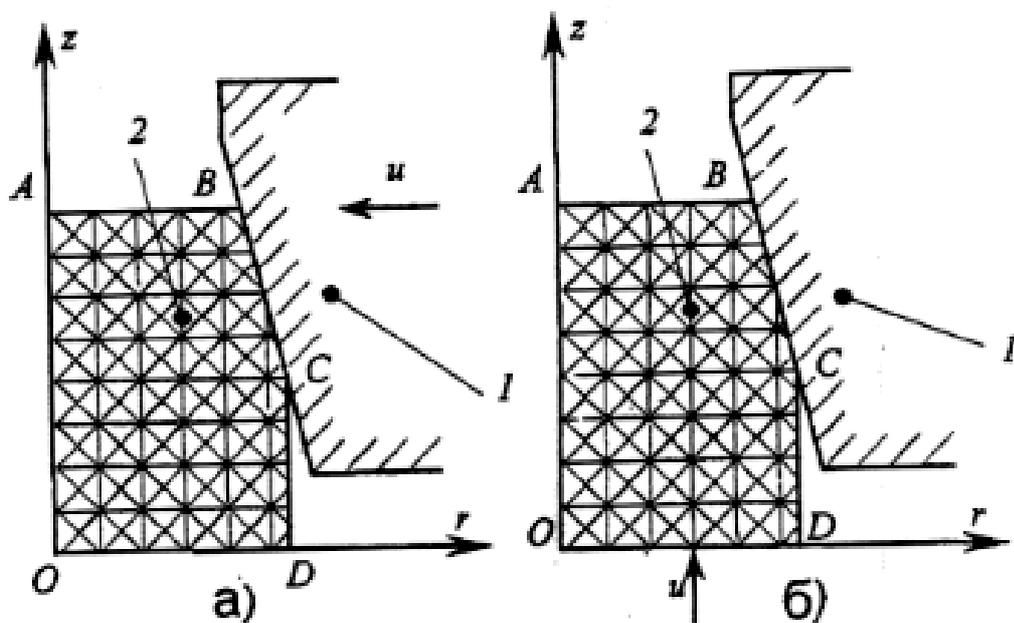
1 – боек; 2 – заготовка

Рисунок 1.11 – Схема процесса ротационнойковки без оправки [39]

Исследованиями И. Г. Цыгуры и соавторов [46] установлено, что уков 1,5 обеспечивает получение однородной структуры по сечению поковок. Уков 1,5...2,0 обеспечивает достаточную проработку полого слитка с получением необходимых механических свойств металла. Однако, авторами работы не рассмотрен способ получения из пустотелых слитков пустотелых цилиндров с дном.

С. П. Яковлевым была проведена оценка влияния технологических параметров на процесс ротационной ковки конических заготовок [47]. Для оценки влияния технологических параметров на процесс ротационной ковки конических заготовок проводили математическое моделирование процесса МКЭ. В первом случае (рис. 1.12, а) формоизменение заготовки происходит за счет изменения зазора между бойками. Во втором случае (рис. 1.12, б) осуществляется осевая подача заготовки в зону обработки при неизменном зазоре между бойками. Анализ результатов деформированного состояния заготовки по первому способу показал, что деформации по сечению заготовки неоднородны (рис. 1.13). Наибольшее их значение наблюдается непосредственно в зоне контакта материала и бойка, в связи с чем удлинение материала на наружной поверхности заготовки больше, чем на внутренней, что приводит к возникновению утяжин на торце заготовки.

Возможность регулирования процесса вытеснения металла в удлинение при ковке полых заготовок на оправке исследовали в своей работе Ю. М. Антощенко и В. А. Тюрин [48]. Авторами было установлено, что при протяжке полый заготовки на оправке течению металла в продольном направлении препятствуют силы трения, действующие по поверхности оправки в очаге деформаций и во внешних, недеформированных зонах заготовки, и приводящие к нежелательному дополнительному уширению заготовки. С целью интенсификации удлинения заготовки, за счет уменьшения контактных сил трения металла внешних зон, использовали ступенчатую оправку.



1 – боек; 2 – заготовка;  $u$  – направление перемещения

Рисунок 1.12 – Расчетные схемы процесса ротационнойковки осесимметричной заготовки [47]

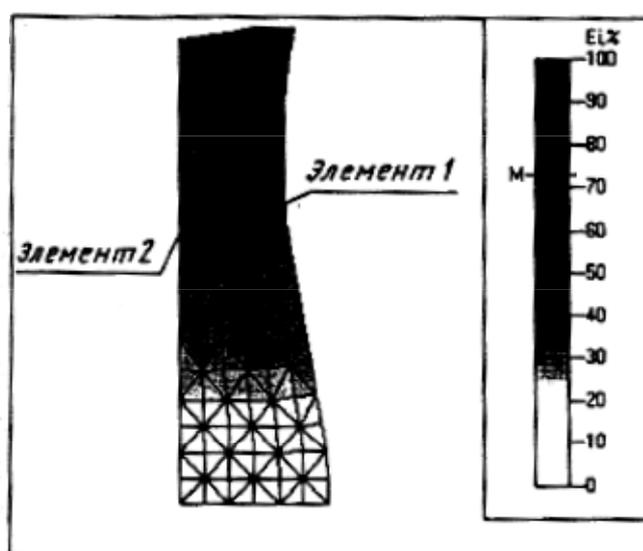


Рисунок 1.13 – Распределение интенсивности деформаций в меридиональном сечении на заключительной стадии процесса [47]

Наибольшая ступень с поперечными размерами, равными размерам внутренней полости, является рабочей деформирующей частью, которая в каждый момент деформации контактирует с металлом заготовки. Таким образом, изменяя контактные условия на границах пластического очага деформации с внешними зонами, можно управлять макропотоками металла при ковке полых заготовок и, следовательно, управлять формоизменением поковок.

В результате исследований Lixia Fan и соавторов была разработана конечно-элементная 3D-модель процесса радиальнойковки пустотелой заготовки на оправке и проведен всесторонний анализ деформированного состояния металла в процессековки [49]. Показана эффективность процесса всестороннего обжатия пустотелой заготовки на оправке. Установлено, что угол кантовки заготовки не оказывает значительного влияния на формоизменение поковки. Однако получение ковкой заготовок с малым внутренним диаметром с применением оправки невозможно вследствие малого диаметра канала и большой его длины.

### **1.2.2 Экспериментальные исследования процессовковки пустотелых заготовок**

Для уменьшения или исключения застревания поковки на оправке А. В. Пакало и др. [50, 51] предложили на основе экспериментальных исследований проталкивать на ступенчатой оправке (дорне) дно заготовки с частичным его обжатием в осевом направлении и образованием ступени на внутренней поверхности поковки. Использование предлагаемой технологии дает возможность за счет снижения пика силы при протягивании (в зависимости от параметров заготовки и инструмента) на 5...20 % уменьшить тол-

щину и массу данного отхода, что позволяет повысить выход годного на 2...7 %, а также увеличить степень обжатия на 10...40 %.

В своей работе S. P. Burkin и др. изучали экспериментальными методами радиальное обжатие полых слитков с помощью мульти-радиальной ковки [52]. Схемы ковки заготовки показаны на рисунке 1.14. Данный способ является новым подходом к усовершенствованию ковочного оборудования для отказа от ковки на молотах. Авторами была установлена зависимость изменения толщины стенки в процессе закова отверстия.

И. Н. Потаповым и соавторами [53] была разработана и опробована в промышленных условиях новая металлосберегающая технология изготовления полых поковок, включающая отливку специальных полых кузнечных заготовок и последующее их обжатие на радиально-обжимных машинах. Авторами было установлено, применение нового технологического процесса позволяет снизить расход металла на 15...20 %, существенно сократить время изготовления поковок, улучшить проработку литого металла по толщине стенки заготовок. В результате разработанная комплексная технология позволяет получить толстостенные полые поковки, минуя ряд подготовительных операций. При обжатии на пластичной прокладке в бойках с углом заходной части  $10^\circ$  и подачах 0,01...0,02 наружного радиуса исходной заготовки деформационная проработка литого металла равномерная.

Разработанная Ю. М. Антощенковым [54] схема деформации полых заготовок на оправке предусматривает ковку в комбинированных бойках с непрямолинейным фронтом подачи. Экспериментальные исследования позволили определить оптимальные геометрические размеры деформирующего инструмента, при которых неравномерность удлинения и уширения металла заготовки в процессе протяжки минимальная (рис. 1.15). Примененный новый технологический инструмент представляет собой комбинированные бойки, у которых верхний боек плоский с непрямолинейным фронтом подачи  $2\beta = 90^\circ$ , а нижний – вырезной с углом выреза  $110^\circ$  (рис. 1.16).

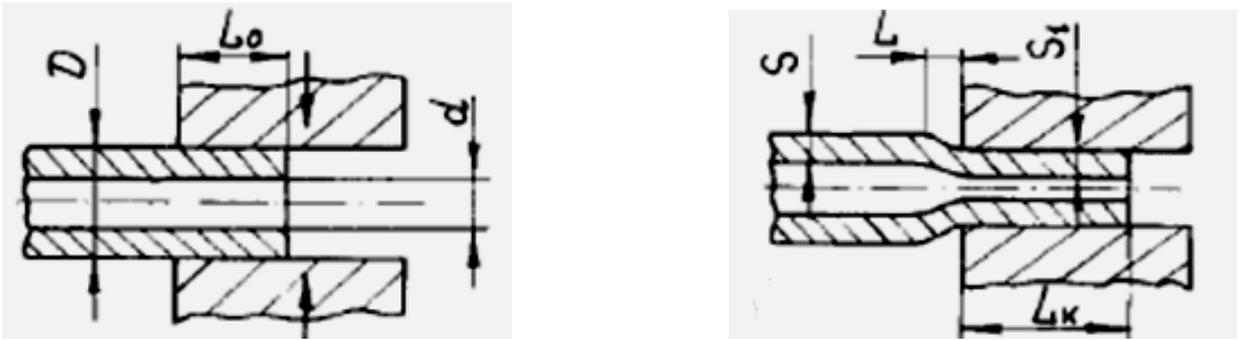


Рисунок 1.14 – Схемыковки без оправки [52]

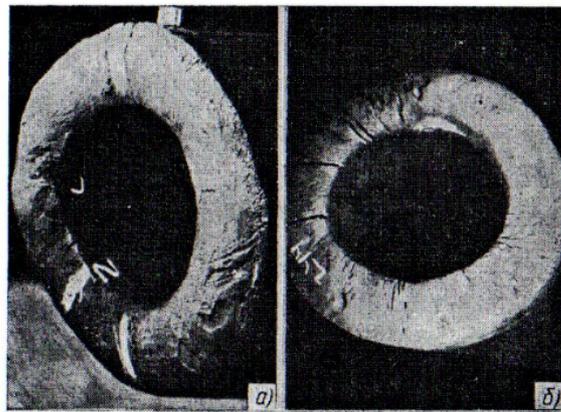
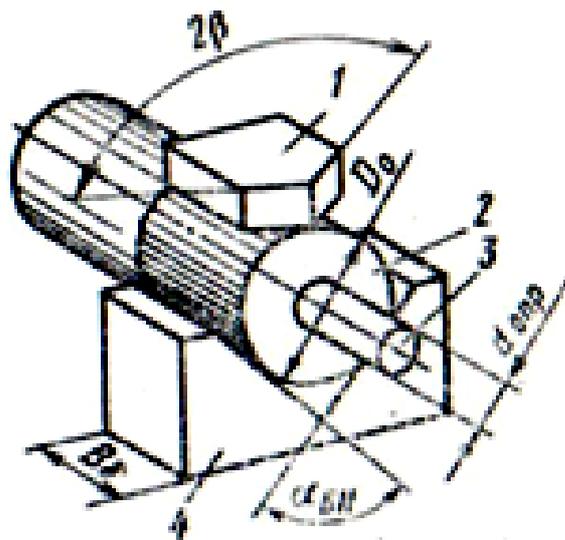


Рисунок 1.15 – Торцевые поверхностикованыхпоковок [54]



1 – специальный боек; 2 – заготовка; 3 – оправка; 4 – нижний вырезной боек

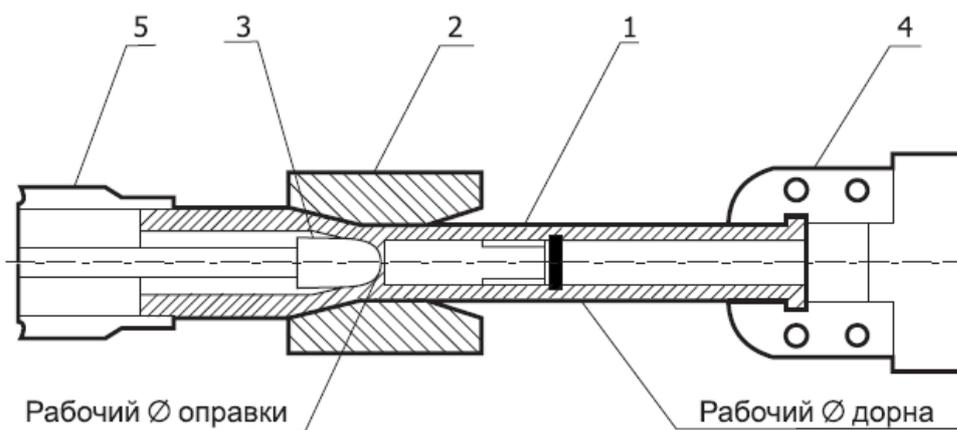
Рисунок 1.16 – Ковка на оправке с непрямолинейной подачей [54]

Б. С. Каргиным и Е. С. Котовой изучалось влияние формы бойков на производительность протяжки на оправке [55]. Применение вырезных бойков способствует более интенсивному течению металла в удлинение, что повышает производительность процесса, по сравнению с ковкой комбинированными бойками, на 25...30 %. Это происходит за счет контакта по максимальной части периметра поперечного сечения заготовки с инструментом, а напряженное состояние при обжатии вырезными бойками в большей степени приближается к всестороннему неравномерному сжатию. При ковке полых заготовок в комбинированных и вырезных бойках интенсивность течения металла различна.

В своей работе Г. А. Картель совершенствует техническую базу оборудования, конструкцию инструмента и разрабатывает новую технологическую схемуковки [56]. Исследования показали, что использование комбинированной оправки не только уменьшает значения остаточных напряжений после холодной радиальнойковки, но и стабилизирует значения отклонений от прямолинейности внутреннего канала и диаметра (рис. 1.17).

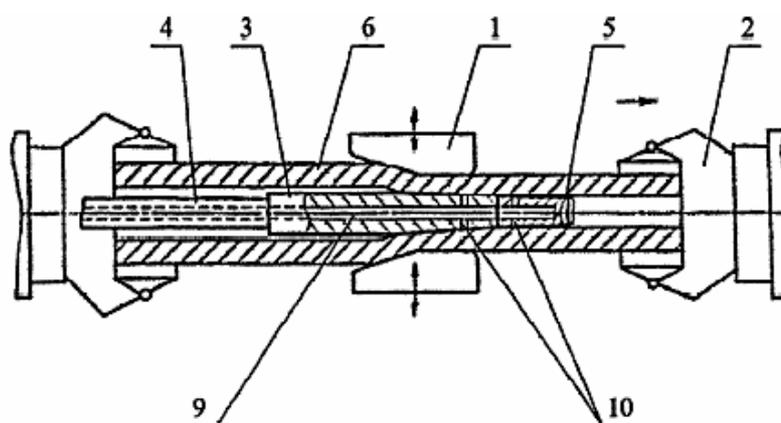
А. М. Володиным и соавторами исследован способ изготовления полых поковок ковкой на гидравлическом ковочном прессе в четырехбойковом ковочном устройстве [57]. Установлено, что данный способ изготовления полых поковок позволяет получать точные поковки по внутреннему диаметру и толщине стенки, имеющие требуемую длину, с заданным уковом.

Для изготовления труб В. А. Лазоркин теоретически исследовал способковки на радиально-ковочной машине (рис. 1.18) [58]. Согласно способу, получают полуфабрикат трубы горячей радиальной ковкой полый заготовки на неподвижной ковочной оправке с конической рабочей поверхностью. Используют центрирующий хвостовик для фиксации ковочной оправки по каналу уже откованной части. В результате исследований было установлено, что при ковке по данному способу повышаются точность размеров и качество поверхности получаемых труб, а также надежность работы оборудования.



- 1 – трубная заготовка; 2 – деформирующий инструмент – бойки;  
 3 – комбинированная оправка; 4 – зажимные губки;  
 5 – центрирующая труба противодержателя

Рисунок 1.17 – Технологическая схема радиального обжатия трубной заготовки на комбинированной оправке [56]



- 1 – бойки; 2 – зажимные головки-манипуляторы; 3 – ковочная оправка;  
 4 – державка; 5 – центрирующий хвостовик; 6 – полая заготовка;  
 7 – дополнительная выглаживающая оправка; 8 – калибрующий пояс;  
 9 – продольный канал; 10 – радиальные каналы

Рисунок 1.18 – Схема холодной радиальнойковки на ковочной оправке с выглаживанием на дополнительной оправке [58]

Конечноэлементные исследования двух способов радиальной ковки слитков и заготовок на РОМ и на ковочном прессе представлены в работе А. М. Володина и др. [59]. Анализ полученных результатов позволил установить, что РОМ экономически целесообразно использовать при массовом производстве поковок с удлиненной осью из легированных сталей и сплавов. Эти машины относятся к узкоспециализированным машинам, предназначенным только для выполнения операции протяжки. Кроме того, высокая стоимость РОМ и низкая производительность ковочных прессов при протяжке способствовали поиску новых недорогих технических решений, повышающих эффективность производства поковок с удлиненной осью. Такие технические решения были найдены – это новая технология четырехсторонней ковки слитков на ковочном прессе в четырехбойковом ковочном устройстве с плоскими рабочими поверхностями и по два комплекта бойков с криволинейными рабочими поверхностями (рис. 1.19).

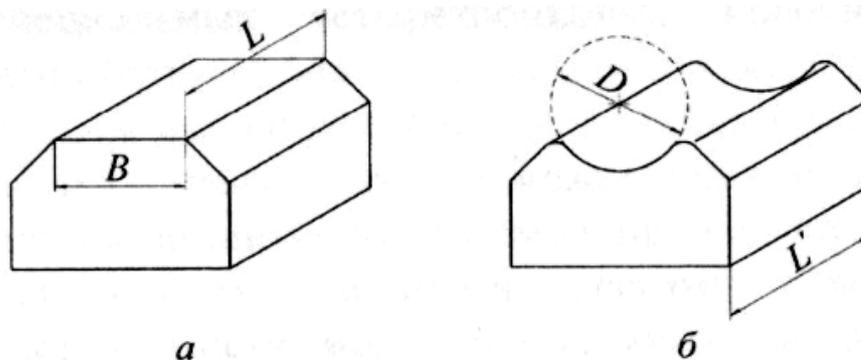


Рисунок 1.19 – Бойки с плоскими (а) и криволинейными (б) рабочими поверхностями [59]

Анализ производства поковок с использованием четырехбойковых ковочных устройств показал, что экономическая эффективность нового процесса за счет повышения производительности ковки и экономии металла при производстве поковок из углеродистых и низколегированных сталей примерно равна. Данные ковочные устройства можно использовать на прессах силой

до 100 МН и более и ковать в них слитки, значительно превышающие по массе и размерам слитки, обрабатываемые на радиально-ковочных машинах. Однако размеры ковочного четырёхбойкового устройства не позволяют ковать заготовки большого диаметра.

В работе Qi Zhang [60] было установлено, что ковка трубы без оправки способствует интенсивной заковке отверстия и минимальному удлинению пустотелой заготовки. Результаты экспериментальных данных процессаковки без оправки позволили установить, что разнотолщинность стенки пустотелой поковки составила менее 1,1 %. В работе не исследована различная геометрия деформирующего инструмента, которая бы позволила интенсифицировать процесс удлинения пустотелой заготовки без применения оправки.

В статье M. Sanjari и соавторов исследуется влияние продольной формы кузнечного инструмента (вырезных бойков) на напряженно-деформированное состояние металла заготовки в процессековки с оправкой [61]. Проводится сравнение процессовковки бойками с различной геометрией. Установлено, что для получения трубной заготовки с минимальной неоднородностью распределения деформаций и, как следствие, механических свойств по толщине стенки необходимо использовать бойки с выпуклой радиусной кромкой.

Согласно экспериментальных исследований Z. G. Wang процессовковки пустотелых заготовок на РКМ установлено, что этот процесс позволяет повысить прочностные и усталостные свойства металла [62]. Автором разработана модель для определения деформации металла в радиальном, окружном и осевом направлениях. Установлено влияние оправки и величины обжатия на технологические параметры процессаковки. Дальнейшие исследования следует направить на установление влияния схемы деформирования на образование текстуры металла, которая приводит к анизотропии механических свойств.

В своих работах Розов Ю. Г. [63–65] исследовал процессы деформирования трубчатых изделий на оправке. Автором было определено гидростати-

ческое давление для реализации процесса и использование степени исчерпания ресурса пластичности. В ходе его исследований была получена конечная геометрическая форма деформируемой заготовки, определена необходимая сила для выбора оборудования. Однако полученные рекомендации не возможны для деформирования трубчатых изделий без оправки.

F. Knauf с соавторами рассматривал радиальную ковку толстостенных труб на оправке [66]. В ходе экспериментальных исследований были получены трубы большой длины, разного диаметра с разной толщиной стенок. Авторы проводили ковку четырьмя бойками, что позволило направить течение металла строго в осевом направлении, снижая уширение заготовки.

R. Koppensteiner и Z. Tang при радиальной ковке длинномерных заготовок прутков, стержней и брусьев использовали инструмент разной геометрии, чтобы изучить влияние способаковки на эффективность проработки центральной зоны слитка [67]. Авторы доказали, что возможно получить однородные механические свойства в продольном и в поперечном направлениях.

Исследованием качества внутренней и внешней поверхности стальных труб при ковке на оправке занимался Jinn-Jong Sheu с соавторами [68]. Ими были спроектированы два типа бойков (а – угол  $5^\circ$ , б – угол  $30^\circ$ ), способные дать эффективное распределение деформаций при радиальной ковке труб. Авторы пришли к выводу, что с увеличением угла выреза бойка достигается более равномерное распределение деформации. Увеличение деформации также способствует уменьшению шероховатости внутренней поверхности трубы, но может привести и к разрушению поковки при превышении уровня деформации.

O. Jaocen и соавторы [69] изучали распределение химической ликвации в процессековки, что позволяет более точно назначить последующие операции термообработки (рис. 1.20). Разработали программное обеспечение для моделирования технологической последовательности изготовления изделия от слитка до поковки.



Рисунок 1.20 – Процесс ковки цилиндра на оправке [69]

В своих работах Yong Li с соавторами проводили сравнение радиальнойковки медных тонкостенных труб между двумя и тремя бойками без оправки [70, 71]. В ходе экспериментов было выявлено, что при ковке двумя бойками дефекты поверхности образуются интенсивнее, чем при ковке тремя бойками. Было определено, что сила деформирования в двух бойках больше, чем в трех бойках. Напряжения и деформации кованных тонкостенных медных труб при использовании трех бойков распространяются более равномерно. Однако данные методы радиальнойковки тонкостенных труб не приемлемы при ковке длинномерных крупных изделий из стали.

Радиальнойковкой для изготовления полых изделий занимались и O. Pantalé и B. Gueye [72]. Они сравнивали геометрию заготовки, силу ковки, деформации и напряжения. Было установлено, что если процесс ковки осуществляется без оправки, то при уменьшении диаметра пустотелой заготовки на 17 % утолщение стенки трубы происходит на 10 %.

J. Kowalski с соавтором экспериментально исследовали деформированное состояние при раскатке колец на оправке [73]. Они использовали метод координатных сеток. Сравнивалась раскатка плоским и вырезным бойком. Было установлено, что использование плоского верхнего бойка способствует образованию меньшей неоднородности деформации.

A. Pastore с соавторами проводили эксперимент с полым слитком для определения эффективности способа ковки с применением оправки, манипу-

лятора, крана с цепью и оправки [74]. Они рассчитывали времяковки, количество нагревов (рис. 1.21). Было установлено, что применение оправки увеличивает массу пустотелой заготовки. В результате грузоподъёмности манипулятора не хватает и появляется необходимость применения кантователя, что снижает производительностьковки и увеличивает число нагревов.



Рисунок 1.21 – Процессковки с использованием кантователя [74]

G. Banaszek и соавтор определили влияние формы инструмента и основных параметров процессаковки на закрытие металлургических дефектов [75]. Авторы пришли к выводу, что с помощью формы инструмента и технологических параметровковки можно контролировать течение металла в процессе формированияпоковки. Было выявлено, что для устранения дефектов центральной пористости слитков плоские бойки должны использоваться на заключительных этапахковки.

В своей работе А. Ameli и М. R. Movahhedy исследовали радиальнуюковку труб на оправке [76]. Исследовали такие параметры как подача за один ход, длина бойка и его угол, диаметр заготовки. Авторами было установлено, что больше всего на внутренние напряжения влияет подача. Повышение трения, длина бойка, осевая подача за один ход и толщина стенки вызывают увеличение давления. Распределение напряжений на внутренней и внешней поверхностях в осевом направлении трубы однородное. Напряжения на внутренней поверхности трубы в значительной степени зависят от геометрии

и размеров профиля оправки. Полученные результаты исследования являются ценными для дальнейшего изучения радиальнойковки и разработки эффективного инструмента для оптимизации геометрии бойка и оправки.

Протяжку труб на длинной конической оправке с небольшим конусом для оценки критериев разрушения изучал С. Linardon с соавторами [77]. Они изучали на трех образцах конической оправки зависимость силы протяжки от диаметра оправки. Были получены локальные данные давления и напряжения деформирования. Исследовали характеристики трения, что позволило определить давление в зависимости от коэффициента трения.

L. Medovar с соавторами в своей работе сравнивали технологические способы получения крупных полых изделий [78]. Экспериментальным путем авторы установили, что методом ЭШП можно получить слитки диаметром 3,4...3,8 м и с толщиной стенки до 1 м. Производство слитков методом ЭШП целесообразно для их дальнейшей деформации ковкой на оправке.

S. Khayatzadehc с соавторами моделировали процесс радиальнойковки на пустотелых моделях [79]. Авторы пришли к следующим выводам, что деформации в трубе больше и однороднее, чем в сплошной заготовке. На наружной и внутренней поверхности стенки трубы деформации больше, чем в стенке. Свойства материала вдоль направления оси одинаковые в обоих случаях. Градиент температуры в сплошном цилиндре выше, чем в трубе. Самые высокие компоненты напряжения и деформации возникают в осевом направлении, что вызывает улучшение свойств в этом направлении.

Исследования закрытия пористости в процессе радиальнойковки представлены J. Chen с соавторами [80]. Авторы рассматривали варианты радиальнойковки цилиндрической заготовки с оправкой и без оправки бойками разной формы (плоский и вырезкой с углом 135 °). В ходе исследования авторы пришли к выводу, что для закрытия пустот при радиальнойковке применение оправки и вырезного бойка обеспечивают большую площадь зоны пластической деформации.

В работе П. П. Кальченко и соавтора [81] предложены новые технологические процессыковки крупных прессовых поковок, которые позволяют повысить качество и снизить затраты на ковку. Результаты работы исследованы и внедрены на ПАО «НКМЗ», что свидетельствует о высокой достоверности предлагаемых технологических решений. Однако в работе слабое внимание уделено технологическим процессамковки пустотелых поковок с дном [82]. В этой связи совершенствование и разработка новых технологических процессовковки пустотелых заготовок требует проведения дополнительных исследований [83].

### **Выводы по разделу 1**

В результате проведения литературного обзора было установлено, что существует востребованность в получении цельнокованных пустотелых поковок с дном и необходимо установить влияние размеров заготовки и геометрии инструмента на деформированное состояние металла заготовки в процессековки без оправки.

1. Существующие технологические процессы получения пустотелых заготовок с диаметром отверстия менее 350 мм предполагают закрытие отверстия напуском, что приводит к повышенному расходу металла. Коэффициент использования для таких деталей составляет примерно 20 %.

2. Пустотелые заготовки с дном типа корпусов гидравлических цилиндров на сегодняшний день изготавливаются сварнокованными. Наличие сварного шва со стороны дна детали снижает усталостную прочность детали, что существенно снижает её срок службы.

3. Способы безоправочнойковки пустотелых заготовок на гидравлических прессах применимы крайне редко. Это обусловлено сложностью управления течением металла и отсутствием технологических рекомендаций по формоизменению заготовки в процессековки без оправки.

4. Развитие технологических процессовковки пустотелых заготовок позволит расширить номенклатуру выпускаемой продукции, расширить технологические возможности процессовковки, повысить качество и снизить затраты на ковку, реализуемых за счетковки без оправки. Необходимо установить влияние размеров заготовки и геометрии инструмента на деформированное состояние металла заготовки в процессековки без оправки на удлинение заготовки и заковку осевого отверстия.

5. Внедрение процессовковки без оправки требует научного обоснования назначаемых технологических рекомендаций. В литературе нет данных по исследованию формоизменения пустотелой заготовки и НДС в процессековки без оправки. Известные решения задачиковки пустотелых заготовок проводились МКЭ. Метод позволяет учесть трёхмерное течение металла, что позволит моделировать процессыковки без оправки.

Первый раздел диссертации опубликован в работах [130–135].

### **Постановка цели и задач исследования**

На основании литературного обзора было установлено, что на сегодняшний день существует востребованность в получении, повышении качества и снижении затрат на изготовление деталей особо ответственного назначения [84–90]. К таким деталям относятся пустотелые заготовки со сквозным отверстием и с дном. Повышение эксплуатационных характеристик данных деталей требует разработки новых схем деформирования для обеспечения высокого качества заготовок [91–93]. Более того, изготовление пустотелых заготовок с диаметром отверстия менее 350 мм и с дном не возможно с применением оправки. В этом случае отверстие закрывается напуском металла, а в случае получения глухонных цилиндров – приваривание дна. Следовательно, задача совершенствования процессовковки пустотелых заготовок без оправки является актуальной [94–96].

Применяемые на сегодняшний день основные способы изготовления пустотелых цилиндров с заковом дна или его приваривания не обеспечивают высокого качества [97–100]. Недостатками данных способов являются: сложность обеспечить полное заковывание дна за счет окисленной поверхности металла заготовки; необходимость использования дорогостоящей оправки; а также недостаточная надежность сварочного шва [101–103].

При использовании технологииковки без оправки пустотелых цилиндров с дном повышаются механические свойства изделий и появляется возможность изготавливать цельнокованные полые цилиндры без применения оправки, которые идут на изготовление деталей ответственного назначения [104–108]. Отсутствие оправки будет способствовать заковке отверстия пустотелой заготовки и увеличению стенки поковки, что усложняет проектирование технологического процесса [109–110]. Снижение расхода металла при ковке длинномерных пустотелых заготовок и получение цельнокованных заготовок с дном высокого качества является важной научно-технической задачей [111–114]. Эти группы поковок невозможно ковать с применением оправок. Поэтому следует разработать новую концепцию составления технологических процессовковки пустотелых заготовок без оправки [115–117].

Цель работы – расширение технологических возможностей и повышение технико-экономических показателей процессовковки пустотелых поковок на основе применения способаковки без оправки.

Совершенствование технологических процессовковки пустотелых заготовок, направленное на расширение технологических возможностей и снижение затрат на ковку, представляет важную научно-техническую задачу. В этой связи в работе сформулированы следующие основные задачи:

- проанализировать существующие технологические процессыковки пустотелых заготовок с дном и толстостенных труб с малым диаметром отверстия, разработать направления их дальнейшего совершенствования;

- разработать методику проведения теоретических и экспериментальных исследований моделирования процессовковки пустотелых заготовок без

оправки;

– установить влияние диаметра отверстия в исходной заготовке на удлинение поковки и изменение толщины стенки в процессе ковки без оправки;

– предложить новый параметр оценки интенсивности удлинения поковки, который позволит оценить степень заковки осевого отверстия через изменение площади поперечного сечения пустотелой заготовки в процессе ковки;

– установить закономерности распределения параметров НДС пустотелой заготовки в процессе протяжки без оправки в зависимости от различных размеров заготовки, режимов ковки и геометрии инструмента, что позволит установить схему ковки с равномерным распределением деформаций в теле заготовки;

– определить формоизменение и интенсивность заковки осевого отверстия пустотелой заготовки в процессе ковки без оправки бойками различной геометрии при различных технологических режимах протяжки, что позволит разработать новую схему ковки с минимальной заковкой отверстия;

– провести верификацию теоретических результатов моделирования формоизменения заготовки при ковке без оправки экспериментальными исследованиями;

– на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработать рекомендации по совершенствованию технологий и оснастки для ковки пустотелых заготовок без оправки;

– спроектировать эффективную геометрию вырезных бойков, которая обеспечивает минимальную заковку отверстия при ковке без оправки;

– разработать методику проектирования технологических процессов ковки без оправки пустотелых заготовок, что позволит расширить технологические возможности процессов ковки;

– выполнить опытно-промышленную апробацию нового техпроцесса ковки пустотелых заготовок без оправки и внедрить его в производство.

## 2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ КОВКИ БЕЗ ОПРАВКИ ПУСТОТЕЛЫХ ЗАГОТОВОК

### 2.1 Методика теоретических исследований методом конечных элементов процессов ковки пустотелых заготовок

Исследование процессов протяжки осуществлялось методом конечных элементов (МКЭ). В качестве реализаций метода использовался программный продукт «Deform 3D». Численная модель процесса деформирования основана на теории течения. Материал заготовки рассматривается как несжимаемое упруго-пластическое тело. Система исходных уравнений включает [118]:

Уравнения равновесия

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (2.1)$$

Уравнение движения

$$\sigma_{ij,j} + \rho \frac{dv_i}{dt} = 0 \quad (2.2)$$

Кинематические соотношения

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (2.3)$$

Определяющие уравнения течения

$$S_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\varepsilon}}} \dot{\bar{\varepsilon}}_{ij} . \quad (2.4)$$

Условие несжимаемости

$$v_{i,i} = 0 . \quad (2.5)$$

Уравнение сопротивления деформации для упругопластического материала

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T) , \quad (2.6)$$

где  $\sigma_{ij}$ ,  $\dot{\varepsilon}_{ij}$  - компоненты тензоров напряжений и скоростей деформаций;

$v_{i,i}$  - компоненты вектора скорости;

$S_{ij}$  - девиатор тензора напряжений;

$\bar{\sigma}$ ,  $\bar{\varepsilon}$ ,  $\dot{\bar{\varepsilon}}$  - интенсивности напряжений, деформаций и скоростей деформаций соответственно;

$\rho$  - плотность.

Дискретизация уравнений 2.1–2.5 производится на основе принципа виртуальных скоростей и работ. Неизвестными являются узловые значения скоростей и средних напряжений. Конечно-элементная сетка состоит из линейных четырехузловых тетраэдров [118].

Деформирующий инструмент рассматривается как абсолютно жесткое тело при расчете формоизменения заготовки. Для 3D моделирования заготовка и инструменты импортируются из CAD систем с помощью STL формата. В

Deform 3D используется квадратичная конечно-элементная аппроксимация поверхностей. Такой подход позволяет перестраивать сетку без «подрезания» заготовки и поддерживать таким образом постоянный ее объем. Программа автоматически генерирует конечно-элементную сетку. Адаптивный алгоритм обеспечивает оптимальное распределение плотности конечно-элементной сетки. Кинематические граничные условия формируются для различных поверхностей  $S$  [118].

На поверхностях  $S_v$ , где задана скорость  $v_i^0$ , граничные условия могут быть выражены через скорости

$$v_i = v_i^0 \quad (2.7)$$

На поверхностях  $S_F$ , где действуют силы

$$\sigma_{ij} n_j = F_i, \quad (2.8)$$

где  $n_j$  – компоненты единичной нормали;

$F_i$  – компоненты вектора силы.

На поверхности  $S_S$ , где заданы скорость и силы, граничные условия будут:

$$v_i n_i = v_n^0, \quad (2.9)$$

$$\sigma_{ij} n_i l_j = F_f, \quad (2.10)$$

где  $F_f$  – это касательная составляющая действующих на поверхность сил;

$l$  – это единичный касательный вектор, направленный в противоположную сторону от вектора скорости заготовки относительно инструмента  $\Delta v_i$ :

$$l_i = - \frac{\Delta v_i}{|\Delta v|} . \quad (2.11)$$

Граничные условия (2.7) используются для участков, где между заготовкой и инструментом имеются зоны прилипания. Выражение (2.10) с  $F_i = 0$  может использоваться для свободных частей поверхности заготовки.

Более общие граничные условия (2.9) и (2.10) используются совместно для участков с трением и для тех участков, где задана симметрия. В последнем случае выражения (2.9) и (2.10) заменяются следующими:

$$v_i n_i = 0 , \quad (2.12)$$

$$\sigma_{ij} n_i l_j = 0 , \quad (2.13)$$

где единичные нормальные и касательные вектора задаются в зависимости от плоскости симметрии.

Граничные условия, учитывающие трение, (2.12) и (2.13) должны быть дополнены зависимостью для касательной силы  $F_f$ , входящей в закон трения. На контакте заготовка – инструмент контактные касательные напряжения рассчитываются по закону трения Зибеля [118]:

$$F_f = mk = m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} ,$$

где  $k$  – касательное напряжение;

$m$  – фактор трения сдвига.

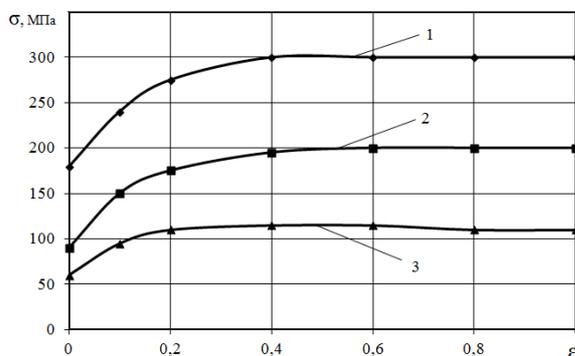
### 2.1.1 Методика теоретического исследования механизма заковки отверстия при протяжке полых заготовок без оправки

По результатам литературного обзора было установлено, что перспективным способом изготовления цельнокованных заготовок является способ ковки без оправки. Примером такого способа ковки является решение, предложенное в работе [119]. Этот способ ковки глухотелых цилиндров является новым и неизученным. Большую сложность представляет определение диаметра внутреннего отверстия пустотелой заготовки в зависимости от известных размеров поковки. Поэтому необходимо установить, как влияет процесс протяжки вырезными бойками на заковку внутреннего отверстия в зависимости от соотношения диаметров заготовок, угла выреза бойков и их геометрии. Процессы ковки – это трёхмерные задачи [120]. Как было отмечено выше (см. п. 2.1), исследование формоизменения и параметров НДС заготовки в процессе ковки без оправки производилось методом конечных элементов (МКЭ). В этой связи была разработана методика теоретических исследований на основе численных методов исследования.

В качестве материала заготовки была выбрана конструкционная сталь 34ХНМ (из которой изготавливаются подобные детали), температурный интервал ковки для этой стали 1200...800°С, механические и теплофизические характеристики материала, такие, как сопротивление деформированию, теплопроводность, теплоемкость приведены на рисунках 2.1 – 2.3 (эти свойства автоматически определялись для выбранного материала из базы данных программы Deform 3D). Плотность при комнатной температуре составляла 7840 кг/м<sup>3</sup>; модуль Юнга  $2 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона 0,3.

При ковке поковок цилиндров на оправке с применением операции закова дна применяется способ протяжки поковок вырезными бойками. Поэтому исследования и анализ влияния геометрических параметров кузнечного

инструмента на напряженно-деформированное состояние в процессековки без оправки целесообразно начать со схемыковки вырезными бойками.



1 – при  $t = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 – при  $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 – при  $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 2.1 – Сопротивление деформированию стали 34ХНМ от степени деформации при различных температурах [121]

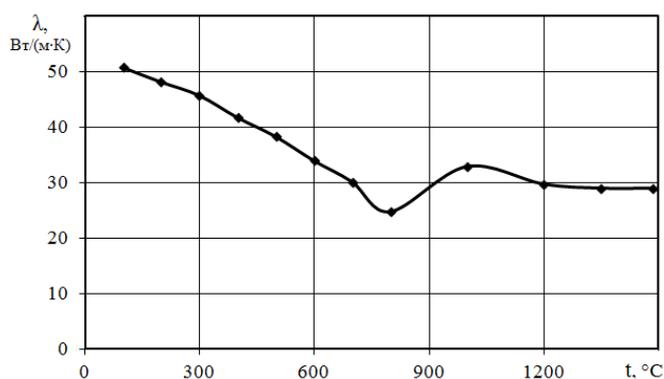


Рисунок 2.2 – Теплопроводность стали 34ХНМ от температуры [121]

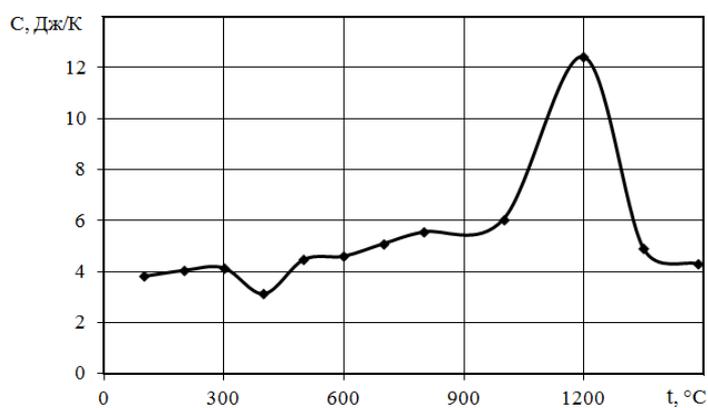


Рисунок 2.3 – Теплоёмкость стали 34ХНМ от температуры [121]

Исходные данные для расчета: начальная температура заготовки  $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; скорость деформирования  $v = 40\text{ мм/с}$ ; начальный наружный диаметр пустотелой заготовки  $D = 1000\text{ мм}$ . Отношения наружного и внутреннего диаметра отверстия  $d_0/D = 0,3; 0,55; 0,8$  (рис. 2.4).

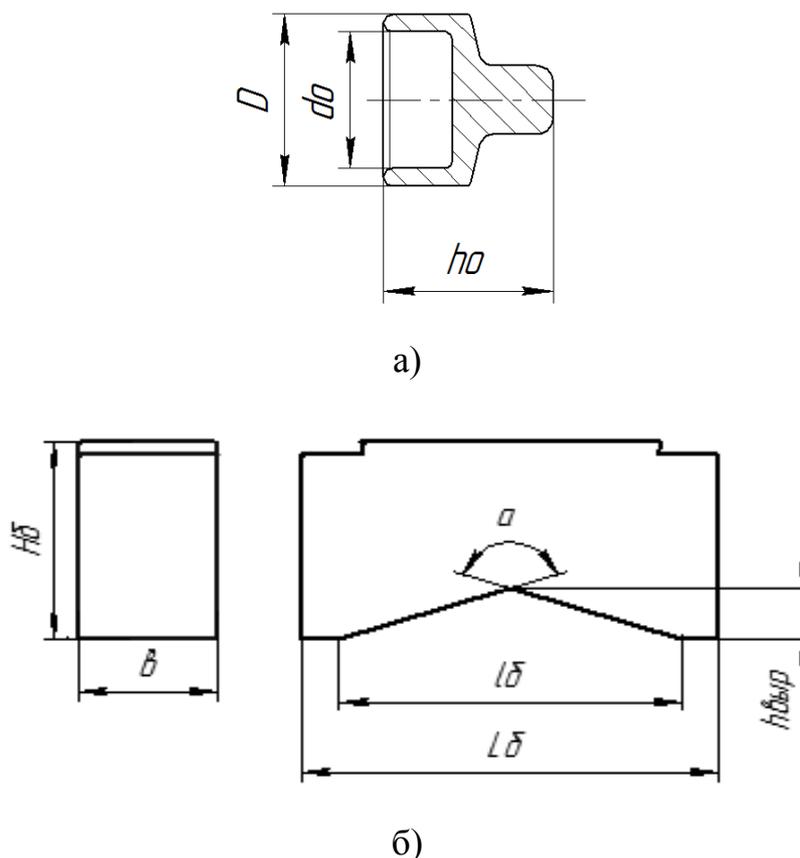


Рисунок 2.4 – Эскиз заготовки (а) и вырезных бойков (б)

Исследуемая схема протяжки представлена на рисунке 2.5. В исследовании использовались цилиндрические стальные полые модели. Наружный диаметр заготовок  $D = 1000\text{ мм}$ , а диаметр внутреннего отверстия варьировался в диапазоне  $d_0 = 800\text{ мм}; 550\text{ мм}; 300\text{ мм}$ ; высота заготовок составляла  $H_1 = 480; 330; 288\text{ мм}$  (рис. 2.6). Варьирование диаметров отверстий и высот позволяли обеспечить постоянный объём заготовки для адекватного сопоставления полученных результатов.

Заготовки протягивались вырезными бойками с углами выреза  $\alpha = 90^\circ$ ,  $115^\circ$ ,  $140^\circ$ , углами скоса вырезов  $\beta = 10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  и длиной горизонтальной полки деформирующей части, которая определяет величину подачи  $a = 100, 200, 300$  мм (рис. 2.7) [121].

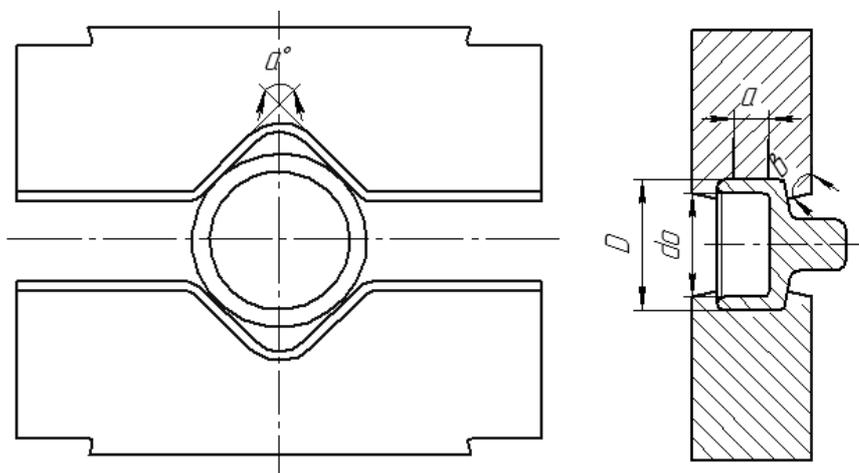


Рисунок 2.5 – Схема протяжки вырезными бойками со скосами

$$\frac{d_{омв}}{D} = \frac{800}{1000} = 0,8 \quad \frac{d_{омв}}{D} = \frac{550}{1000} = 0,55 \quad \frac{d_{омв}}{D} = \frac{300}{1000} = 0,3$$

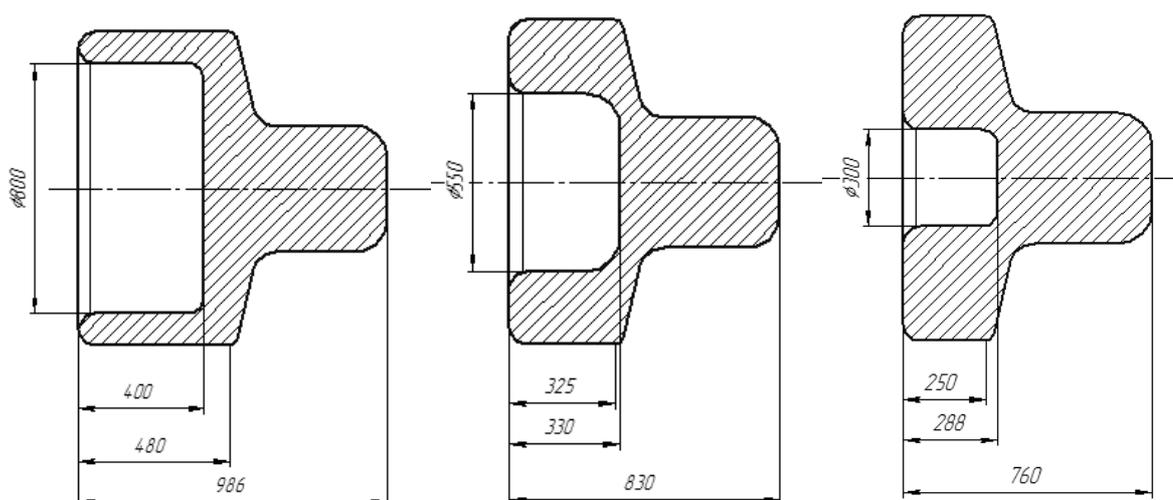


Рисунок 2.6 – Исходные заготовки для исследования протяжки вырезными бойками

Исследовалось влияние четырёх факторов, которые варьировались на трех уровнях (кубическая модель), в результате получаем 81 схему для исследования (п. 2.1.2). Были получены результаты расчета в виде распределения деформаций, силовых характеристики процесса и заковка внутреннего отверстия при протяжке.

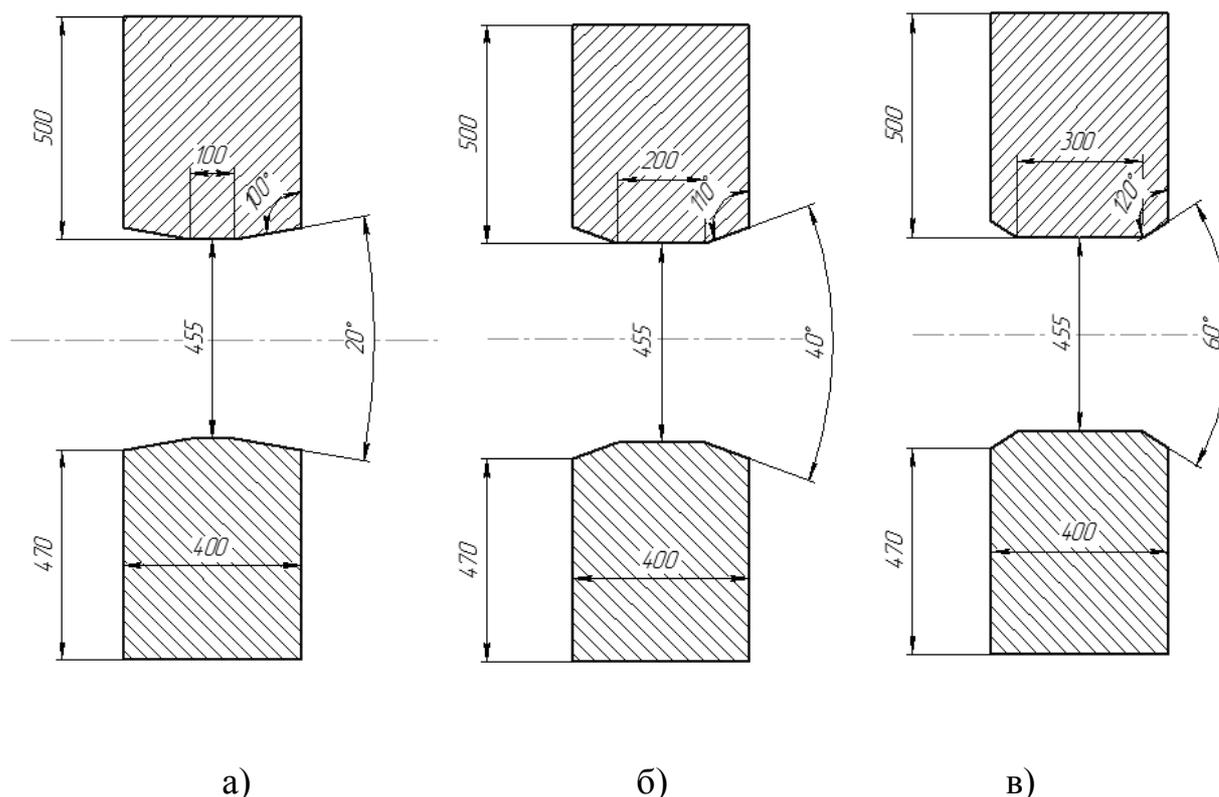


Рисунок 2.7 – Инструмент для протяжки с различной шириной деформирующей части и углами скосов: а – 10 °; б – 20 °; в – 30 °

Суммарная степень деформации заготовки составляла 20 %, 40 % и 60 %. При планировании численного эксперимента получили математическую модель относительного диаметра внутреннего отверстия ( $d_1 / D$ ) и неравномерности распределения деформации ( $\Delta \epsilon = \epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}$ ). Изменение относительного диаметра внутреннего отверстия зависит от четырёх факторов: отношения диаметров  $d_0 / D$  заготовки (X1), угла выреза бойков  $\alpha$  (X2), величины подачи  $a$  (X3) и степени обжатия при деформировании (X4). Исследуемая схема протяжки представлена на рисунке 2.8.

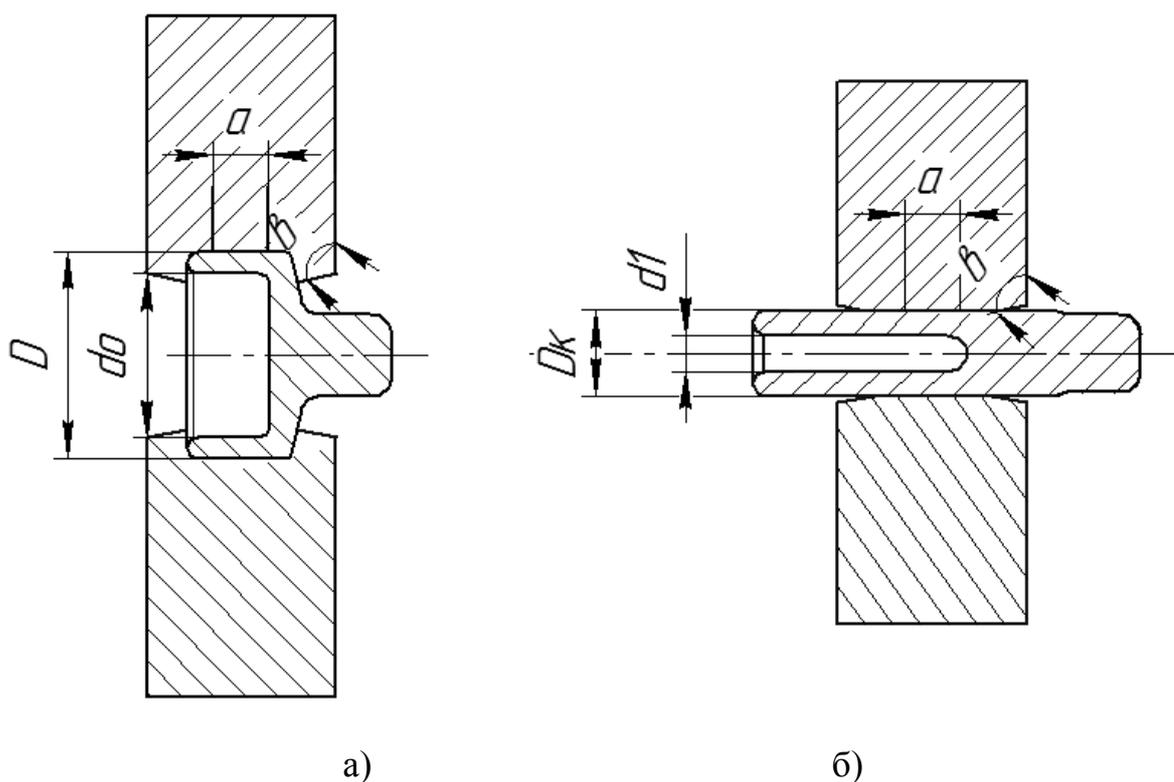


Рисунок 2.8 – Схема процесса протяжки на начальном (а) и завершающем (б) этапе

### 2.1.2 Планирование математического эксперимента

В результате исследования необходимо определить рекомендации для проектирования нового технологического процессаковки глухонных цилиндров без оправки. Процессковкипустотелыхпоковок без оправки характеризуется трёхмерным течением металла при протяжке. Протяжка заготовки вырезными бойками без оправки приводит к её удлинению, заковыванию внутреннего отверстия и увеличению толщины стенки. На формоизменениепустотелой заготовки в процессековки оказывают влияние форма исходной заготовки, режимы деформирования (подача, кантовка, обжатие) и геометрия

инструмента. Исходные данные для проектирования технологического процесса – наружный и внутренний диаметры поковки.

Расчет процесса протяжки пустотелых поковок без оправки представляет собой сложную исследовательскую задачу. Это вызвано влиянием большого числа факторов на данный процесс. Для реализации процесса моделирования необходимо выбрать значимые факторы. Анализ технологических процессов ковки пустотелых цилиндров показал, что основными факторами, влияющими на формоизменение заготовки в процессе деформации, являются: относительный диаметр отверстия в заготовке ( $d_0 / D$ ), угол выреза бойков ( $\alpha$ ) и относительная подача ( $a / D$ ). На формоизменение в процессе протяжки вырезными бойками также оказывает влияние величина суммарного обжатия заготовки ( $\varepsilon$ ). Предварительные расчеты показали, что свойства материала на процесс заковки внутреннего отверстия влияния не оказывают. Скорость деформирования, коэффициент трения постоянны и в процессе моделирования не меняются.

Основываясь на производственном опыте, интервал варьирования для первого фактора ( $d_0 / D$ ) выбран из условия максимального и минимального значения толщины стенки заготовки. Применение для ковки пустотелых заготовок с тонкой стенкой ( $d_0 / D > 0,8$ ) приведет к сплющиванию заготовки, при котором не будет происходить деформирование (обжатие) стенки. При значительных толщинах стенки пустотелых заготовок перед протяжкой ( $d_0 / D < 0,25$ ) будет происходить интенсивное заковывание отверстия при протяжке вырезными бойками. Поэтому интервалы варьирования первого фактора выбраны в этом диапазоне (табл. 2.1).

Эффективность протяжки заготовок зависит от угла выреза бойков. Интенсивная вытяжка будет происходить при угле выреза бойков  $\alpha = 90^\circ$ , однако эти бойки менее универсальные и требуется частая смена бойков при ковке при заданных обжатиях заготовки. Обеспечить универсальность вырезных бойков возможно за счет увеличения угла выреза. При углах выреза

бойков  $\alpha > 140^\circ$  схема ковки приближается к ковке плоскими бойками, что сопровождается интенсивным уширением и, соответственно, сплющиванием пустотелой заготовки, а не её вытяжкой. Исходя из данных ограничений, был выбран соответствующий интервал для этого фактора (см. табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Основные факторы и уровни их варьирования при проведении КЭ эксперимента по плану по типу ПФЭ  $3^4$

Факторы и интервалы их варьирования	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	
	$d_o/D$	$\alpha, ^\circ$	$\varepsilon, \%$	$\beta, ^\circ$	$a/D$
Интервал варьирования $\Delta X_i$	0,25	25	20	10	0,1
Нижний уровень $X_i = -1$	0,3	90	20	10	0,1
Средний уровень $X_i = 0$	0,55	115	40	20	0,2
Верхний уровень $X_i = +1$	0,8	140	60	30	0,3

Изменение диаметра отверстия в заготовке зависит от степени деформации (обжатия). На практике при ковке пустотелых поковок на оправке уков по толщине стенки поковки составляет 2,0...3,5. Этой величине укова

соответствует обжатие ( $\varepsilon = \frac{D_0 - D}{D_0} \cdot 100\%$ ) в диапазоне 20...60 %.

Интенсифицировать вытяжку при протяжке, а соответственно, снизить степень заковки отверстия в заготовке можно за счёт применения вырезных бойков со скосами. Угол скосов бойков ( $\beta$ ) также служит значимым фактором, он определяет величину подачи. Из опыта ковки плит плоскими бойками со скосами эффективный угол составляет 10...30 ° [121]. Задачей исследования также является определение эффективного угла скосов рабочих кромок бойков.

На удлинение и уширение при протяжке значительное влияние оказывает величина относительной подачи заготовки в бойки ( $a/D$ ). Для интенсификации вытяжки (удлинения при протяжке) следует применять малые подачи. Особенность ковки бойками заданной ширины, которые имеют скосы –

изменение длины рабочей горизонтальной полки бойков (см. рис. 2.7). Это, в свою очередь, приводит к изменению величины подачи. Превышение величины подачи длины горизонтальной полки бойков приведет к образованию волнистости и зажимам на поверхности поковки. При углах скосов бойков в интервале  $10^\circ$ ;  $20^\circ$ ;  $30^\circ$  длине горизонтальной полки бойка (см. рис. 2.7) будет соответствовать относительная подача ( $a / D$ ), равная 0,1; 0,2; 0,3, соответственно. Данный факт позволил установить, что два фактора (угол скоса бойков и величина подачи) связаны между собой и не могут выступать независимыми параметрами. Поэтому эти два фактора можно объединить в один параметр и разделить исследование на три схемы, при которых будет варьироваться угол скоса бойков (величина подачи).

Таким образом, выделены четыре основных фактора, влияющие на процессковки пустотелых поковок без оправки (см. табл. 2.1).

В качестве параметра оптимизации следует выбрать относительный конечный диаметр отверстия  $d_1 / D$  (где  $D$  – начальный наружный диаметр заготовки, см. рис. 2.8), так как этот показатель будет результирующим. Влияние выбранных факторов на параметр оптимизации оказывает нелинейный характер, поэтому в результате планирования эксперимента необходимо получить квадратичную модель.

Влияние вышеопределенных факторов на заковку отверстия поковки нелинейно, для ее построения необходимо более двух точек на каждый фактор. В этом случае целесообразнее провести планирование эксперимента при использовании плана второго порядка [122]. Для этого можно воспользоваться планом полнофакторного эксперимента по типу  $3^n$ . В данном случае число факторов  $n=4$  (см. табл. 2.1). В этом случае получаем высокую точность коэффициентов регрессии при факторном планировании [123, 124]. Чтобы реализовать этот план необходимо произвести  $3^4=81$  исследование. Коэффициенты уравнения регрессии представлены в таблице 2.2. План-матрица эксперимента приведена в таблице 2.3. Результаты проведения исследования по разработанному планированию эксперимента представлены в приложении А.

Таблица 2.2 – Коэффициенты уравнения регрессии

b0	b1	b2	b3	b4	b5
1,009	$-1,852 \cdot 10^{-3}$	$-1,852 \cdot 10^{-3}$	$-4,59 \cdot 10^{-3}$	$-1,54 \cdot 10^{-3}$	$9,718 \cdot 10^{-3}$
b12	b13	b14	b15	b23	b24
$-5,625 \cdot 10^{-4}$	$-1,187 \cdot 10^{-3}$	$-9,375 \cdot 10^{-4}$	$-1,687 \cdot 10^{-3}$	$-1,312 \cdot 10^{-3}$	$-5,625 \cdot 10^{-4}$
b25	b34	b35	b45	b11	b22
$-1,812 \cdot 10^{-3}$	$-2,188 \cdot 10^{-3}$	$-1,188 \cdot 10^{-3}$	$-1,875 \cdot 10^{-4}$	$-2,96 \cdot 10^{-4}$	$-3,538 \cdot 10^{-4}$
b33	b44	b55			
$-5,632 \cdot 10^{-4}$	$-3,754 \cdot 10^{-4}$	$-3,177 \cdot 10^{-4}$			

В последней колонке таблицы 2.3 указано среднее значение параметра оптимизации  $Y_{ug}$  (изменение относительного диаметра отверстия заготовки), расчет значений которых представлен в приложении Б. В соответствии с планом были проведены 81 численных экспериментов. Для более удобного представления 81 эксперимента было принято решение разбить полученные результаты на три таблицы по 27 опытов для каждого угла скосов бойков (см. приложение Б).

В случае дублирования опытов, условие эксперимента следует задавать матрицей  $X$ , содержащей только неповторяющиеся строки, и матрицей  $P$ , в которой учитывается число дублей

$$P = \begin{vmatrix} n_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & n_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & n_n \end{vmatrix}.$$

Коэффициенты уравнения регрессии можно определить по формуле [123]

$$B_i = (X_i^t \times P \times X_i)^{-1} \times (X_i^t \times P \times \bar{Y}_i),$$

где  $X_i$  – расширенная план-матрица в кодовых переменных;

$X_i^t$  – транспонированная матрица  $X_i$ ;

$\bar{Y}_i$  – вектор параметров оптимизации.

Таблица 2.3 – Расширенная матрица планирования математического эксперимента заданного угла  $\beta$

№	Кодовое обозначение			Натуральное обозначение			$Y_{ug}$
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$d_o/D$	$\alpha, ^\circ$	$\varepsilon, \%$	$d_1/D$
1	-1	-1	-1	0,3	90	20	
2	0	-1	-1	0,55	90	20	
3	+1	-1	-1	0,8	90	20	
4	-1	0	-1	0,3	115	20	
5	0	0	-1	0,55	115	20	
6	+1	0	-1	0,8	115	20	
7	-1	+1	-1	0,3	140	20	
8	0	+1	-1	0,55	140	20	
9	+1	+1	-1	0,8	140	20	
10	-1	-1	0	0,3	90	40	
11	0	-1	0	0,55	90	40	
12	+1	-1	0	0,8	90	40	
13	-1	0	0	0,3	115	40	
14	0	0	0	0,55	115	40	
15	+1	0	0	0,8	115	40	
16	-1	+1	0	0,3	140	40	
17	0	+1	0	0,55	140	40	
18	+1	+1	0	0,8	140	40	
19	-1	-1	+1	0,3	90	60	
20	0	-1	+1	0,55	90	60	
21	+1	-1	+1	0,8	90	60	
22	-1	0	+1	0,3	115	60	
23	0	0	+1	0,55	115	60	
24	+1	0	+1	0,8	115	60	
25	-1	+1	+1	0,3	140	60	
26	0	+1	+1	0,55	140	60	
27	+1	+1	+1	0,8	140	60	

Уравнение регрессии в общем виде

$$\begin{aligned}
 Y_{ug} = & B_1 + B_2 \cdot X_1 + B_3 \cdot X_2 + B_4 \cdot X_3 + B_5 \cdot X_1^2 + B_6 \cdot X_2^2 + \\
 & + B_7 \cdot X_3^2 + B_8 \cdot X_1^2 \cdot X_2^2 \cdot X_3^2 + B_9 \cdot X_1^2 \cdot X_2^2 \cdot X_3 + B_{10} \cdot X_1^2 \cdot X_2 \cdot X_3^2 + \\
 & + B_{11} \cdot X_1 \cdot X_2^2 \cdot X_3^2 + B_{12} \cdot X_1^2 \cdot X_2^2 + B_{13} \cdot X_2^2 \cdot X_3^2 + B_{14} \cdot X_1^2 \cdot X_3^2 + \\
 & + B_{15} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3^2 + B_{16} \cdot X_1 \cdot X_2^2 \cdot X_3 + B_{17} \cdot X_1^2 \cdot X_2 \cdot X_3 + B_{18} \cdot X_1^2 \cdot X_3 + \\
 & + B_{19} \cdot X_2^2 \cdot X_3 + B_{20} \cdot X_1 \cdot X_3^2 + B_{21} \cdot X_2 \cdot X_3^2 + B_{22} \cdot X_1 \cdot X_2^2 + B_{23} \cdot X_1^2 \cdot X_2 + \\
 & + B_{24} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + B_{25} \cdot X_1 \cdot X_2 + B_{26} \cdot X_1 \cdot X_3 + B_{27} \cdot X_2 \cdot X_3.
 \end{aligned}$$

Переход от условных параметров к натуральным проводится по следующим зависимостям:

$$X_1 = \frac{d_0/D - 0,55}{0,25}, \quad X_2 = \frac{\alpha - 115^\circ}{25^\circ}, \quad X_3 = \frac{\varepsilon - 40\%}{20\%}.$$

Подставляя коэффициенты (см. табл. 2.2), полученные при расчете в искомое уравнение регрессии, получаем математическую модель, описывающую влияние механических режимов ковки на изменение отверстия заготовки.

## 2.2 Методика экспериментальных исследований

Достоверность полученных теоретических результатов проверялась экспериментальными исследованиями. Проведение исследования процессов в производственных условиях на натуральных образцах экономически не оправданно. Альтернатива – проведение эксперимента в лабораторных условиях, которые основываются на законах подобия и моделирования. Процессы пластической деформации характеризуются сложностью протекающих явлений, которые зависят от геометрических факторов, структурных особенно-

стей материала, температуры и т. д. Проведение экспериментальных исследований в этом случае невозможно без применения методов планирования эксперимента и статистической обработки [125].

### **2.2.1 Моделирование процессов протяжки пустотелых поволоков без оправки**

Для соответствия явлений, которые протекают в натуральном образце и модели, необходимо удовлетворить основным условиям и законам подобия: геометрическому, силовому, реологическому и кинематическому.

Основной технологический параметр, необходимый для разработки технологических процессов протяжки без оправки – формоизменение в процессе деформирования. В результате экспериментальных исследований процессов протяжки без оправки необходимо установить влияние основных параметров на течение металла и силу в ходе деформирования, а также проверить результаты теоретического моделирования. Основные параметры, которые влияют на заковку отверстия при протяжке без оправки: степень деформации, соотношение размеров заготовки, величина подачи [127].

Для экспериментального моделирования процессов протяжки применяли свинцовые модели, у которого температура рекристаллизации  $\approx 25$  °С. Добавление в свинец 1 % сурьмы позволило приблизить механические характеристики модельного материала к свойствам стали 34ХНМ в горячем состоянии [127]. Наружный диаметр заготовок 44,5 мм, длина 26 мм, диаметр отверстия 13,25; 22,5; 32,5 мм (коэффициент подобия 1:22,5). Заготовки с отверстием были получены путем литья в форму со стержнем (рис. 2.9).



а)



б)

Рисунок 2.9 – Форма для получения заготовок (а), полученные заготовки (б)

Для проведения экспериментальных исследований были спроектированы и изготовлены бойки, материал бойков – сталь 30 (рис. 2.10, а). Для обеспечения взаимной параллельности бойков и их соосности при движении подвижной траверсы прессы использовался блок штампа с диагональным расположением направляющих узлов (рис. 2.10, б). Оснастка устанавливалась на гидравлический пресс МС-500 (рис. 2.10, в), усилием 500 кН. Скорость деформирования составляла 1 мм / с, исходя из условия кинематического подобия (средняя скорость деформирования крупных поковок составляет 20...40 мм / с).



а)



б)



в)

Рисунок 2.10 – Бойки (а); оснастка для протяжки (б); экспериментальная установка (в)

В процессе протяжки замерялись геометрические размеры образцов и сила деформирования на каждой стадии протяжки с шагом 10 % [128, 129]. А также проводились замеры объема отверстия поковки посредством заполнения его жидкостью из лабораторного волюметра. По известному объему и глубине отверстия определялись площадь и средний диаметр отверстия в заготовке в процессековки без оправки.

## Выводы по разделу 2

1. Совершенствование технологических процессовковки пустотелых заготовок предполагает проведение теоретических и экспериментальных исследований, которые позволят установить рекомендации для проектирования новых технологических процессовковки цилиндров без оправки. Основное условие проведения исследований – учет технологических особенностейковки.

2. Теоретические и экспериментальные исследования процессовковки должны учитывать базовые положения теории ОМД. В качестве теоретического метода использован МКЭ для определения НДС заготовки в процессековки. Были выбраны следующие факторы, влияющие на формоизменение заготовки в процессековки без оправки: относительный диаметр отверстия в заготовке ( $d_0 / D$ ), угол выреза бойков ( $\alpha$ ), относительная подача ( $a / D$ ) и величина суммарного обжатия заготовки ( $\varepsilon$ ). Разработана методика моделирования процессовковки МКЭ.

3. Спроектирована специальная оснастка (вырезные бойки со скосами) для интенсификации процесса вытяжки при протяжке. Предложенный деформирующий инструмент снижает интенсивность заковки отверстия пустотелой заготовки при ковке без оправки.

4. Для верификации результатов теоретического исследования формоизменения разработана методика экспериментального определения размеров отверстия при протяжке на свинцовых образцах при комнатных температурах. Предложенная методика заключалась в определении среднего диаметра отверстия по известному объёму и глубине отверстия.

Результаты исследований 2-го раздела опубликованы в работах [119, 121, 125].

### **3 ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ИНСТРУМЕНТА И ЗАГОТОВОК НА ТЕПЛОВОЕ И ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛА**

#### **3.1 Тепловое и деформированное состояния металла заготовки при ковке пустотелых заготовок вырезными бойками**

На кафедре ОМД ДГМА была предложена новая технология изготовления полых цилиндров без оправки [119], которая заключается в прошивке заготовки и ее обжатии вырезными бойками, причем заготовка имеет цапфу для удерживания манипулятором, прошивка происходит не насквозь, а окончательная ковка поковок происходит без оправки внутри. Использование этого способа и специальных механических режимов ковки позволяет изготавливать цельнокованные полые заготовки без оправки. Однако на сегодняшний день способ остаётся неисследованным теоретически и экспериментально, более того отсутствуют рекомендации для промышленного внедрения данного способа [130].

Формоизменение пустотелой заготовки в процессе ковки без оправки зависит от параметров НДС. НДС, в свою очередь, зависит от геометрии инструмента и режимов ковки. Процесс безоправочной ковки пустотелых заготовок характеризуется увеличением толщины стенки заготовки. Поэтому для установления механизма заковки отверстия необходимо провести исследования влияния ковки пустотелой заготовки вырезными бойками. Методика проведения исследования представлена в п. 2.1 [131].

Перед определением деформированного состояния металла заготовки необходимо установить ее тепловое состояние. Тепловое состояние заготовки позволит установить количество её подогревов. Распределение температур в объёме заготовке было установлено с использованием МКЭ.

Анализ результатов распределения температур в объеме заготовки после обжатия на 20 % позволил установить, что градиент температур не выходит за пределы температурного интервалаковки для данных соотношений размеров поковки (рис. 3.1). Полученные результаты позволили установить, что одного подогрева достаточно для реализации процессаковки пустотелых заготовок без оправки. Полученные результаты объясняются отсутствием отвода тепла на оправку, которая в базовом технологическом процессе охлаждается водой. Это позволяет расширить технологические возможности процессаковки пустотелых заготовок за счет увеличения количества обжатий и проходов за один подогрев заготовки.

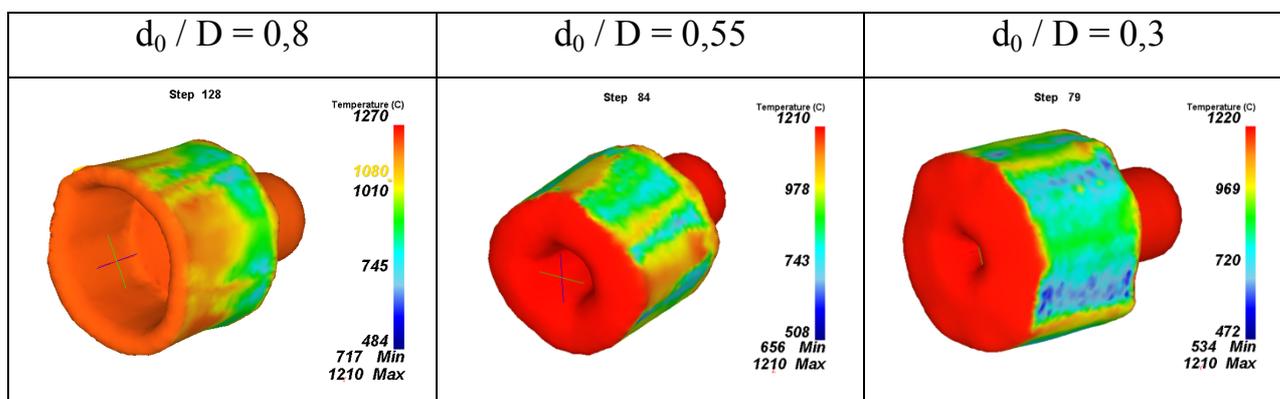


Рисунок 3.1 – Распределение температур для различных диаметров отверстия заготовок

### 3.2 Заковка отверстия заготовки при ковке вырезными бойками

При протяжке всегда происходит уменьшение площади поперечного сечения и увеличение длины заготовки. Это условие должно сохраняться и для протяжки пустотелых заготовок. Следовательно, при увеличении начальной площади поперечного сечения заготовки (для малых соотношений  $d_0 / D$ )

и при одинаковой степени деформации заготовки длинна заготовки после протяжки будет больше (выполнение закона постоянства объема в процессе пластической деформации) [132, 133].

Моделирование процессаковки пустотелых заготовок без оправки вырезными бойками с углом  $120^\circ$  с подачей  $0,5$  от диаметра заготовки (рис. 3,2) подтвердило предположение о том, что в результате деформирования вырезными бойками происходит заковывание отверстия заготовки (рис. 3.3). При этом, величина заковки отверстия состоит из двух составляющих: уменьшения диаметра отверстия за счет уменьшения наружного диаметра заготовки, а также за счет увеличения толщины стенки пустотелой заготовки. Методика проведения исследований рассмотрена в п.п. 2.1.

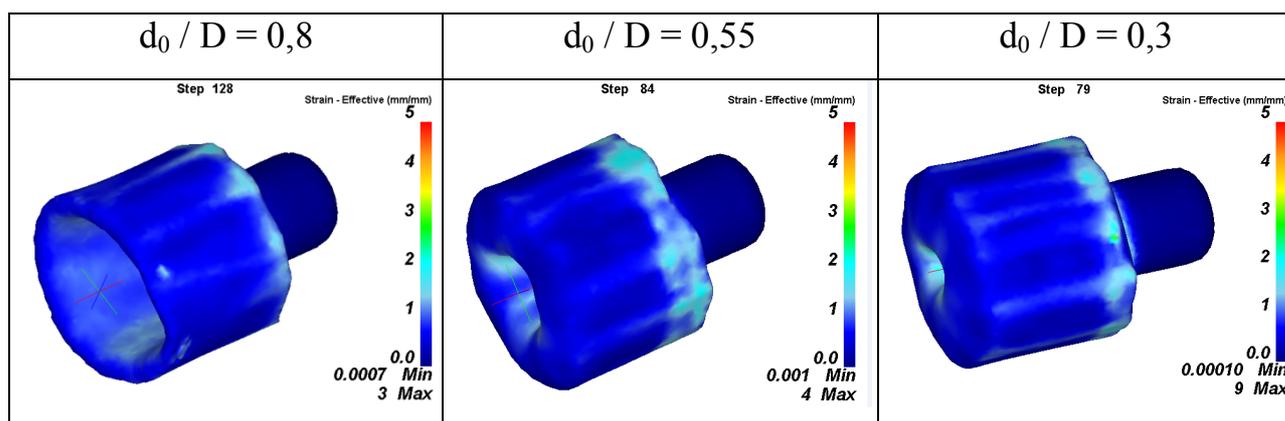


Рисунок 3.2 – Распределение деформаций для различных диаметров отверстия заготовок

При условии, что заготовки обжимались на одинаковую степень деформации ( $\varepsilon = 20\%$ ), с постоянным начальным диаметром ( $D = 1000$  мм), степень заковки отверстия определяется увеличением толщины стенки. В результате теоретических исследований процесса протяжки без оправки вырезными бойками без скосов установлено влияние относительного диаметра отверстия заготовки ( $d_0 / D$ ) на заковку отверстия (рис. 3.3) и относительное удлинение заготовки  $\psi = (L_1 - L_0) / L_0$  (рис. 3.4). Было установлено, что с уве-

личением диаметра отверстия исходной заготовки (уменьшением толщины стенки исходной заготовки) увеличивается конечный диаметр отверстия поковки (см. рис. 3.3) [134].

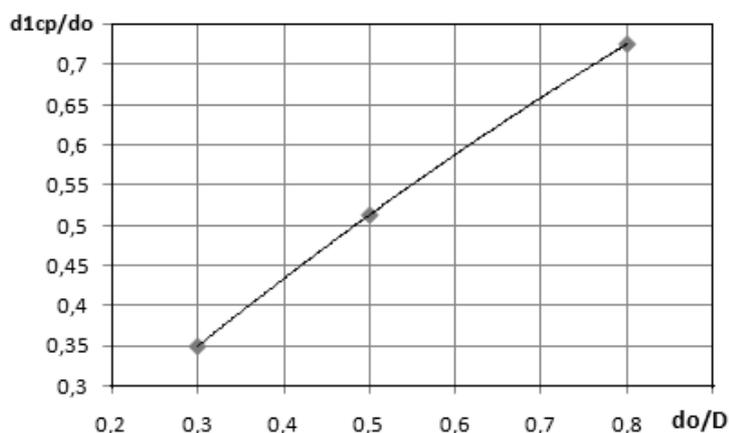


Рисунок 3.3 – Влияние относительного диаметра отверстия заготовки на степень заковки отверстия при обжатии на 20 % вырезными бойками

Однако при этом происходит уменьшение относительного удлинения заготовки ( $\psi$ ), что противоречит выполнению условия постоянства объема заготовки (при уменьшении заковки отверстия должно увеличиваться удлинение). Этот факт потребовал дальнейшего исследования и анализа.

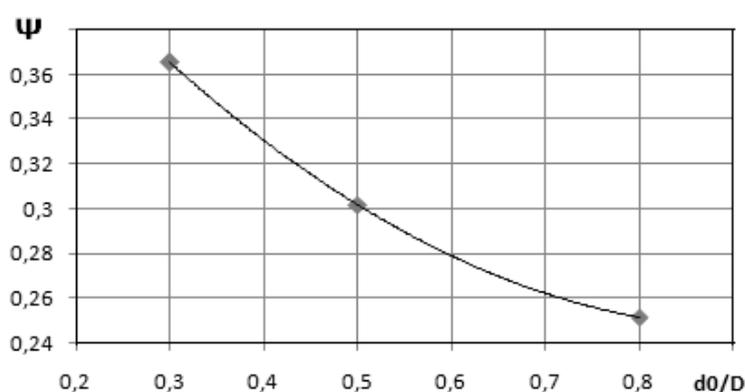


Рисунок 3.4 – Влияние относительного диаметра отверстия заготовки на относительное удлинение заготовки при обжатии на 20 % вырезными бойками

В этой связи было дополнительно установлено влияние относительного диаметра заготовки на относительную толщину стенки (рис. 3.5) после обжата на 20 %. При соотношении  $d_0 / D = 0,55$  наблюдается максимальное значение интенсивности утолщения стенки (рис. 3.5).

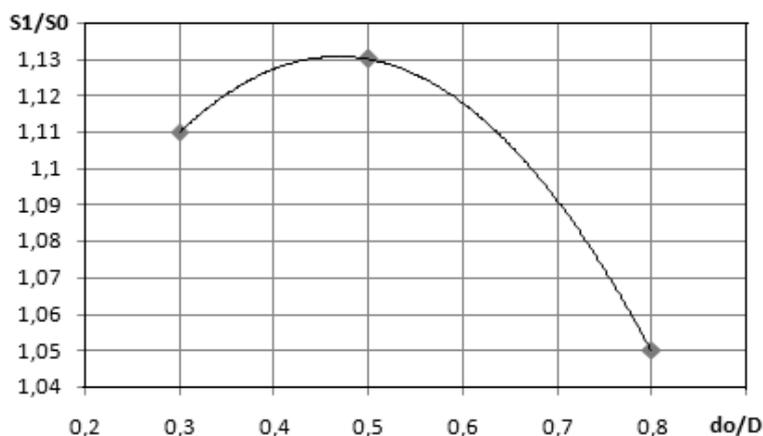


Рисунок 3.5 – Влияние относительного диаметра отверстия заготовки на изменение толщины стенки поковки при обжате на 20 % вырезными бойками

Согласно полученным результатам, относительная толщина стенки меняется от 1,05 до 1,13 (изменение максимум 7 %), что находится в пределах погрешности измерений (рис. 3.5). Полученная зависимость не может служить объективной оценкой, что требует установления адекватной оценки полученных результатов.

Полученные результаты объясняются разными объемами заготовок при разных диаметрах отверстия (толщинах стенки). При увеличении диаметра отверстия (тонкой стенке) заковка отверстия и удлинение меньше (см. рис. 3.3; 3.4), чем при уменьшении диаметра отверстия (толстой стенке). Это объясняется различной величиной объема заготовки, который участвует в процессе деформации. Поэтому оценка удлинения заготовок с разными объемами является неадекватной, а степень изменения диаметра отверстия заготовки не учитывает интенсивность удлинения для разных стенок при постоянной деформации.

В этой связи дальнейшее исследование необходимо проводить для заготовок с постоянным объемом. Поэтому заготовки с меньшей толщиной стенки имеют большую длину и наоборот (см. п. 2.2).

Оценку заковки отверстия заготовки, для различных диаметров отверстий, необходимо проводить на основании показателя, который будет учитывать интенсивность уменьшения диаметра отверстия – коэффициент интенсивности удлинения, который определяется отношением изменения площади конечной поковки и начальной заготовки к обжатой площади поперечного сечения заготовки:

$$f = \frac{F_0 - F_K}{F_{обж}} = \frac{(D^2 - d_0^2) - (D_K^2 - d_1^2)}{D^2 - D_K^2}, \quad (3.1)$$

где  $D, D_K$  – наружный диаметр исходной и протянутой заготовок, соответственно;

$d_0, d_1$  – диаметр отверстий заготовки и поковки, соответственно.

Формула (3.1) показывает интенсивность (скорость) удлинения в зависимости от обжатия наружного диаметра заготовки. Другими словами формула показывает долю обжатой площади заготовки, которая идет на увеличение длины поковки. При  $f \rightarrow 0$ , когда площадь сечения практически не изменяется удлинение заготовки также стремиться к нулю. При  $f \rightarrow 1$ , когда изменение площади заготовки в процессековки равно площади обжатия заготовки ( $F_0 - F_K = F_{обж}$ ), все обжатие приводит к увеличению удлинения заготовки.

Протяжка пустотелых заготовок классическими вырезными бойками не способствует интенсивному удлинению заготовки, а наоборот способствует интенсивной заковке отверстия пустотелой заготовки. Увеличение диаметра отверстия в пустотелой заготовке способствует снижению удлинения (рис. 3.6). Это объясняется тем, что при больших диаметрах отверстия (тон-

кой стенке) металлу «легче» течь в радиальном направлении, нежели в осевом. В этой связи необходимо совершенствовать схемуковки пустотелых заготовок без оправки для увеличения интенсивности удлинения металла заготовки, а соответственно, уменьшения величины заковки за счет уменьшения интенсивности увеличения толщины стенки пустотелой заготовки [135].

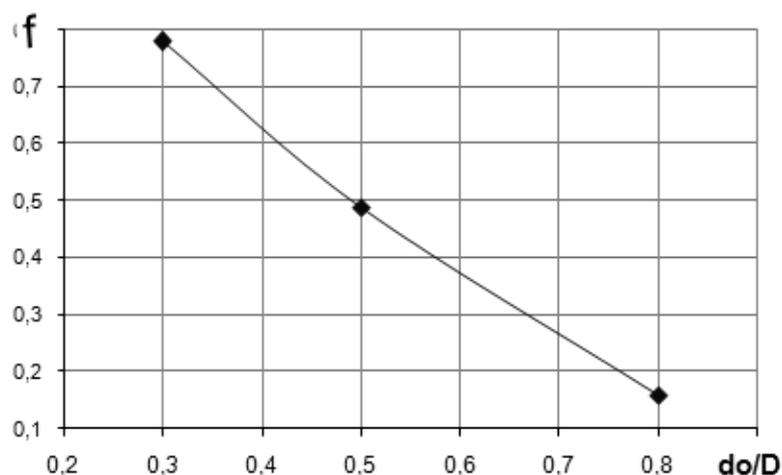


Рисунок 3.6 – Влияние относительного диаметра отверстия заготовки на интенсивность удлинения поковки при обжатии на 20 % вырезными бойками

### 3.3 Совершенствование способаковки пустотелых заготовок за счет применения вырезных бойков со скосами

В результате проведенных предварительных исследований процесса протяжки вырезными бойками было установлено, что данная схема деформирования приводит к интенсивной заковке отверстия поковки.

Уменьшить степень заковывания отверстия в поковке можно за счет интенсификации удлинения при протяжке. Из теории ОМД известно, увеличить вытяжку при протяжке можно за счет применения вырезных бойков со скошенными кромками, уменьшения подачи и обжатия. В результате была

разработана новая конструкция вырезных бойков со скосами (рис. 3.7). Заготовки протягивались вырезными бойками с углами выреза  $\alpha = 90^\circ$ ,  $115^\circ$ ,  $140^\circ$  и различной длиной горизонтальной полки деформирующей части, которая определяет величину подачи  $a = 100; 200; 300$  мм, относительная подача  $0,1D; 0,2D; 0,3D$ , соответственно. Степень деформации (обжатие  $\varepsilon$ ) находилась в диапазоне  $20 \dots 60\%$ . Обоснование факторов, влияющих на формоизменение, и механических режимов деформирования рассмотрены в п. 2.1.2 (см. табл. 2.2) [136].

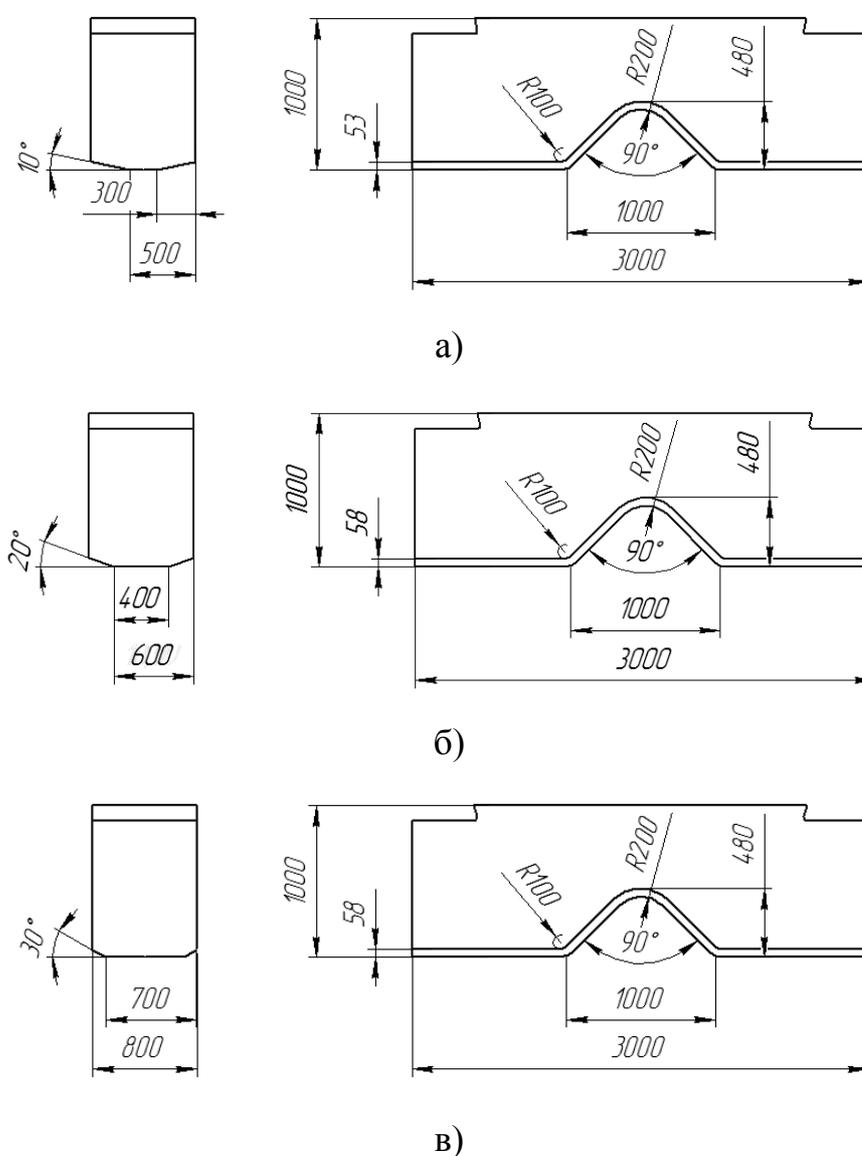


Рисунок 3.7 – Инструмент для протяжки с различными углами скосов и шириной деформирующей части  $0,1D$  (а);  $0,2D$  (б);  $0,3D$  (в)

### 3.3.1 Исследование теплового состояния металла заготовки

Процесс протяжки без оправки должен обеспечить уменьшение интенсивности охлаждения заготовки в процессе деформирования за счет исключения контакта заготовки и водоохлаждаемой оправки. Конечно-элементное моделирование позволило установить распределение температур в теле пустотелой заготовки в процессе протяжки вырезными бойками со скосами без применения оправки (рис. 3.8). Анализ полученных результатов позволил установить, что градиент температур по сечению заготовки послековки не выходит за границы температурного интервала стали. Таким образом, предложенный новый способковки без оправки позволяет производить окончательнуюковку без дополнительного подогрева, что расширяет технологические возможности и снижает затраты наковку.

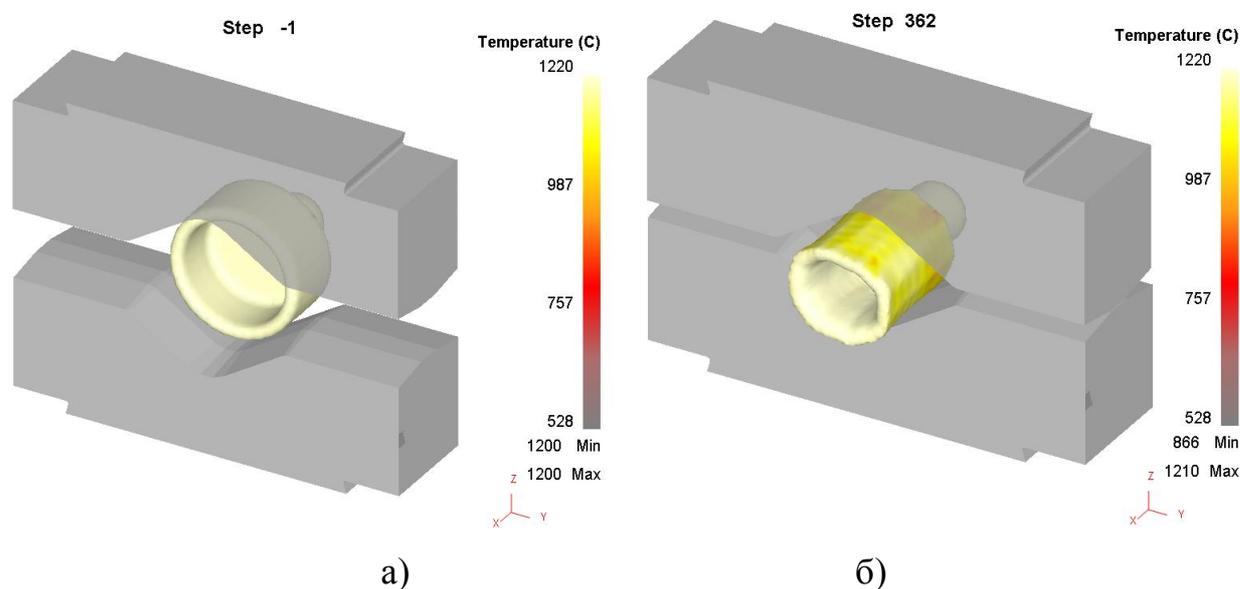


Рисунок 3.8 – 3D модель процесса протяжки пустотелых заготовок без оправки вырезными бойками со скосами до (а) и поле температур в заготовке послековки без оправки (б)

### 3.3.2 Исследование деформированного состояния металла заготовки

Деформированное состояние исследовалось при помощи МКЭ в программном пакете Deform 3D. Цель данного исследования – установить эффективную схему протяжки пустотелых цилиндров с дном, которая обеспечивает максимальное удлинение поковки, высокое качество поверхности и наиболее благоприятное распределение деформаций для равномерной проработки структуры металла [137].

На рисунках 3.9 – 3.17 представлены результаты распределения накопленной интенсивности деформаций в продольном сечении заготовок полученных в процессе ковки пустотелой заготовки, с относительными диаметрами поволоков  $d_0 / D = 0,3; 0,55; 0,8$ , вырезными бойками с углами выреза  $\alpha = 90^\circ; 115^\circ; 140^\circ$  и углами скосов вырезных бойков  $\beta = 10^\circ; 20^\circ; 30^\circ$  [138].

#### 3.3.2.1 Ковка заготовок с толстой стенкой ( $d_0 / D = 0,3$ )

Анализ полученных результатов распределения деформаций при угле выреза бойка  $\alpha = 90^\circ$  и разных углах скосов вырезов бойков (степень деформации за проход 5 %) позволил установить, что при ковке пустотелых заготовок без оправки с данными параметрами максимальная деформация сосредоточена в периферийных зонах заготовки на границах контакта поковки с верхним и нижним вырезным бойком (рис. 3.9). Это объясняется тем, что малые обжатия не способствуют глубокому проникновению пластических деформаций в стенке заготовки. Особенно эта закономерность выражена для суммарного обжатия 60 %.

Максимальные деформации возникают при ковке бойками с углом ско-  
сов  $\beta = 30^\circ$  и достигают значения 9,38 единиц (рис. 3.9, в).

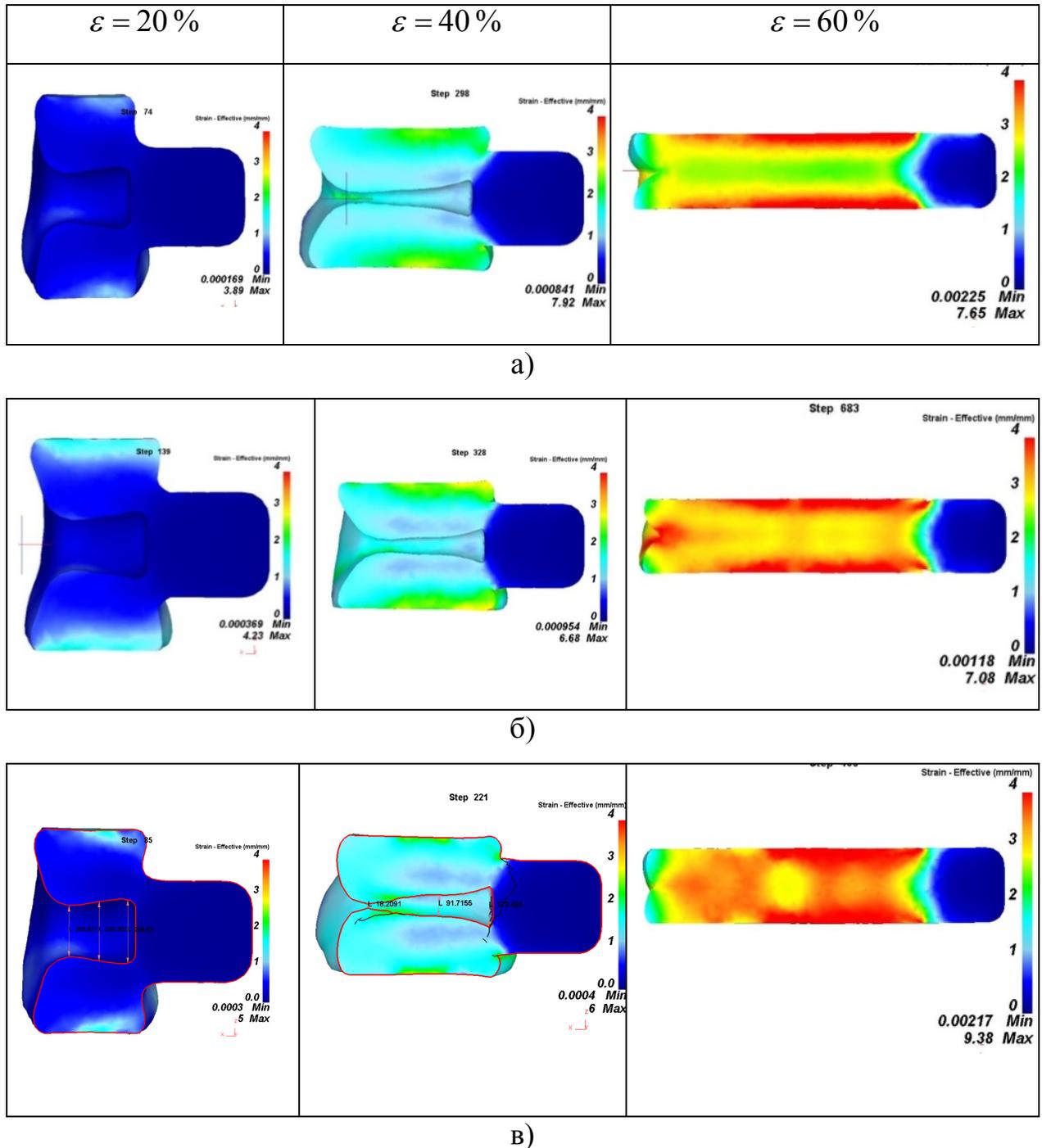


Рисунок 3.9 – Распределение интенсивности деформаций в продольном сечении пустотелых поковок с относительным диаметром отверстия  $d_0 / D = 0,3$  и углом выреза бойков  $\alpha = 90^\circ$  при различных степенях обжатия и углах ско-сов выреза бойков:  $\beta = 10^\circ$  (а);  $\beta = 20^\circ$  (б);  $\beta = 30^\circ$  (в)

Это объясняется максимальными шагами подачи по сравнению с другими схемами деформирования. Локализация максимальных деформаций объясняет образование неравномерного торца заготовки, который вытянут в верхней кромке поковки. Отверстие заготовки заковывается при обжатиях больше 40 %, что ограничивает применение схемы ковки пустотелых заготовок без оправки при толстой стенке ( $d_0 / D = 0,3$ ).

Неравномерность распределения деформаций в объеме заготовки для рассматриваемых схем ковки имеет близкий градиент деформаций и составляет  $\Delta\epsilon = 7,0 \dots 9,3$  единиц.

Увеличение угла выреза бойков до  $\alpha = 115^\circ$  (рис. 3.10) приводит к тому, что максимальные деформации возникают при ковке бойками с углом скосов  $\beta = 20^\circ$  и достигают значения 13,6 единиц (см. рис. 3.10, б). Равномерное распределение деформации при обжатии 60 % соответствует схеме ковки бойками со скосами  $\beta = 10^\circ$ , ( $\Delta\epsilon \approx 4,0$ ). Это объясняется малой величиной подачи, что уменьшает зону затрудненной деформации из-за уменьшения площади контакта металла заготовки с инструментом (см. рис. 3.10, а). При этом происходит полная заковка отверстия заготовки уже при обжатии заготовки на 40 %. Поэтому увеличение угла выреза бойков для толстостенных заготовок приводит к увеличению степени заковки отверстия. Более того, заковка отверстия по длине не постоянная. Меньшая степень заковки происходит со стороны дна поковки. Это объясняется подпором стенки дна заготовки в процессе ковки без оправки.

Дальнейшее увеличение угла выреза бойков ( $\alpha = 140^\circ$ ) приводит к тому, что градиент деформаций достигает значения 12,6 единиц для угла скосов  $\beta = 20^\circ$  (рис. 3.11, б). Полученные результаты распределения деформаций в объеме заготовки аналогичны полученным для угла выреза бойков в  $115^\circ$ . В этом случае также происходит полная заковка отверстия после обжатия более 40 %.

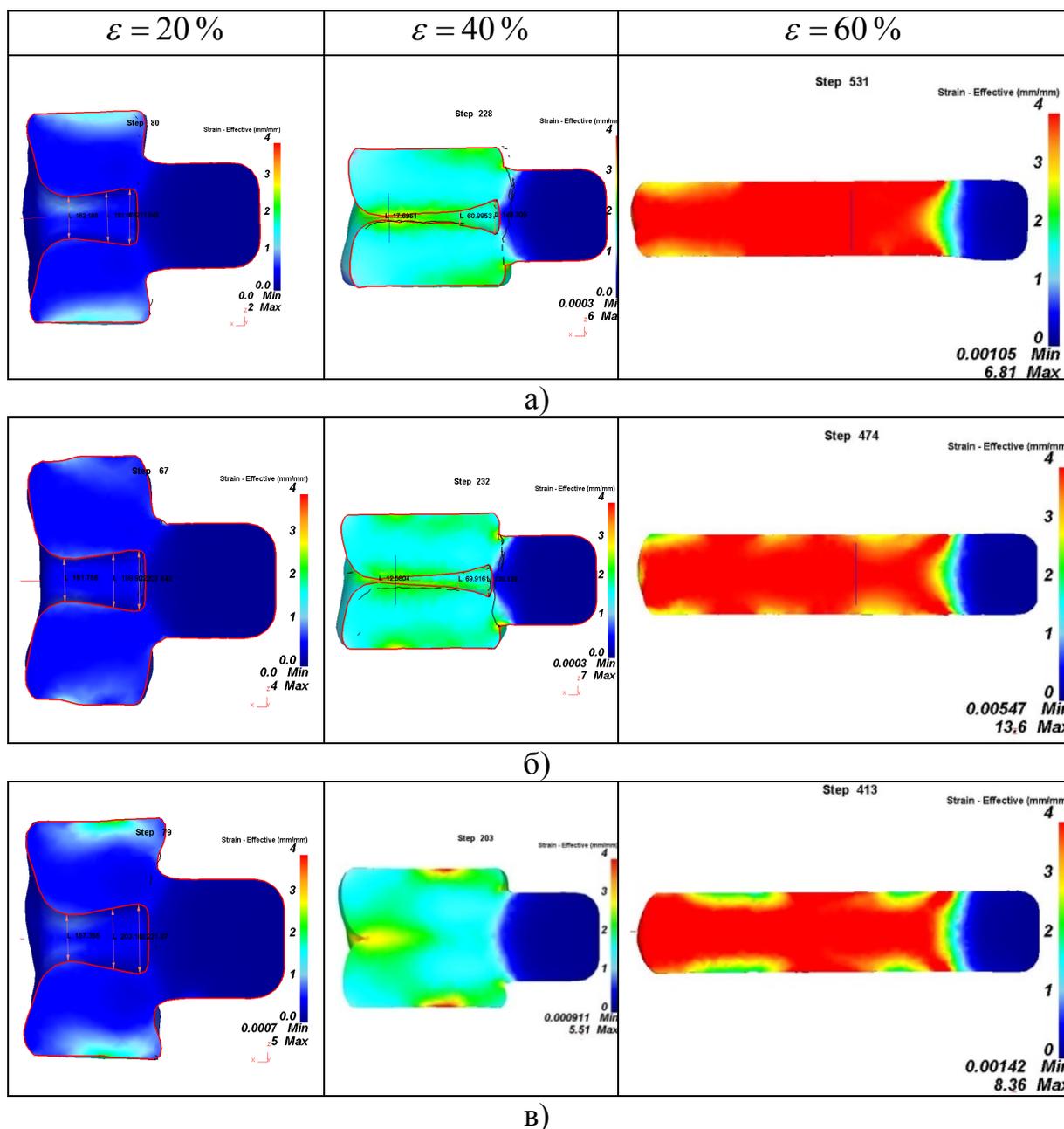


Рисунок 3.10 – Распределение интенсивности деформаций в продольном сечении пустотелых поковок с относительным диаметром отверстия  $d_0 / D = 0,3$  и углом выреза бойков  $\alpha = 115^\circ$  при различных степенях обжатия и углах скосов выреза бойков:  $\beta = 10^\circ$  (а);  $\beta = 20^\circ$  (б);  $\beta = 30^\circ$  (в)

На основании проведенного предварительного анализа полученных результатов было установлено, что для относительного диаметра отверстия заготовки  $d_0 / D = 0,3$  рациональным с точки зрения равномерного

распределения деформаций является угол выреза бойков  $\alpha = 115^\circ$  при угле скосов  $\beta = 10^\circ$ . Однако, заковка отверстия для этой схемы деформирования не позволяет получать глухонные цилиндры, поэтому применение толсто-стенных заготовок не рационально для получения заданных поковок.

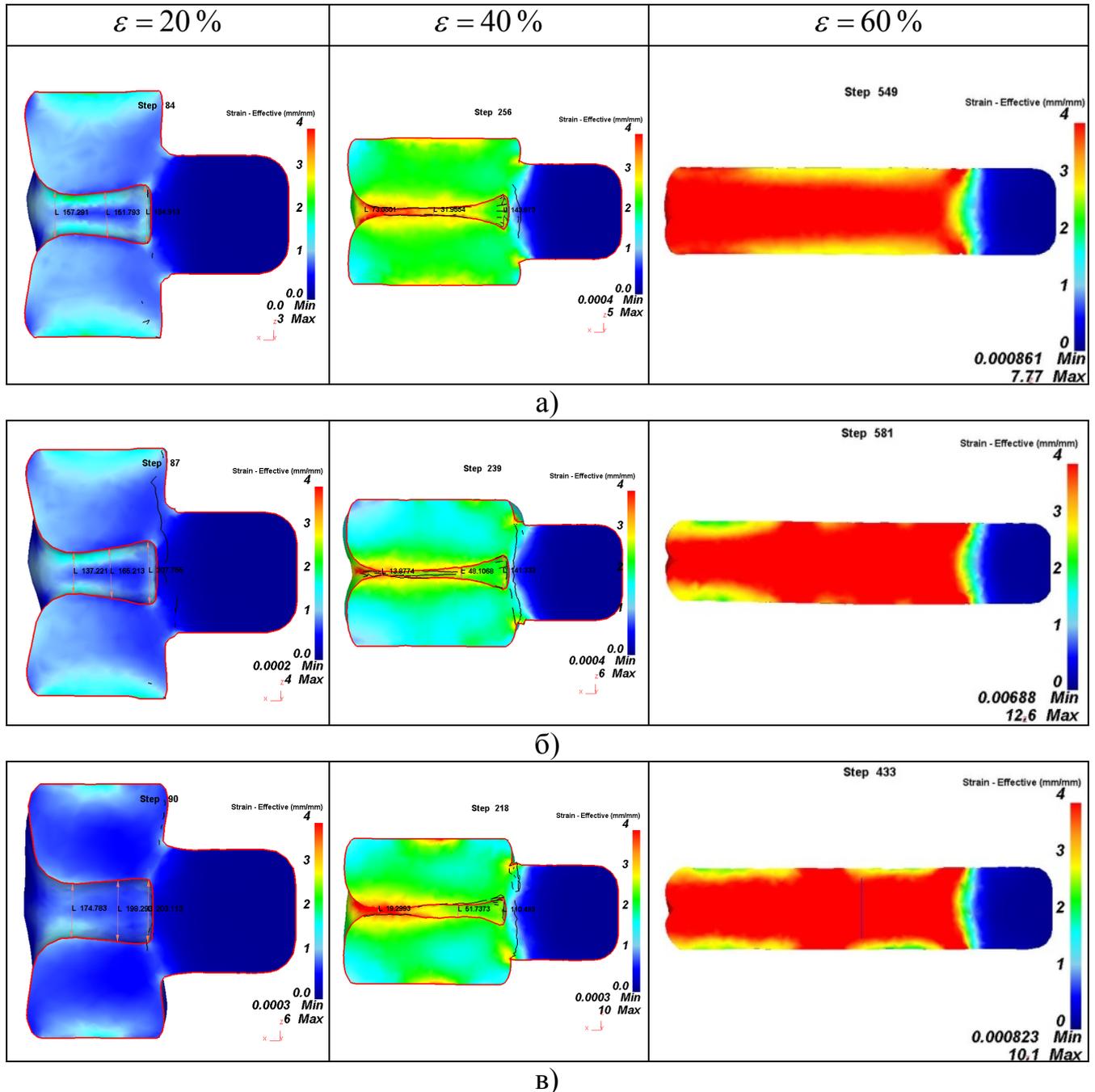


Рисунок 3.11 – Распределение интенсивности деформаций в продольном сечении пустотелых поковок с относительным диаметром отверстия  $d_0 / D = 0,3$  и углом выреза бойков  $\alpha = 140^\circ$  при различных степенях обжатия и углах скосов выреза бойков:  $\beta = 10^\circ$  (а);  $\beta = 20^\circ$  (б);  $\beta = 30^\circ$  (в)

### 3.3.2.2 Ковка заготовок со средней стенкой ( $d_0 / D = 0,55$ )

Уменьшить степень заковки отверстия заготовки можно за счёт увеличения его исходного диаметра. Однако, при постоянном наружном диаметре заготовки с увеличением диаметра отверстия будет уменьшаться толщина стенки пустотелой заготовки. Это приведет к изменению параметров НДС заготовки, а соответственно удлинению и заковке отверстия.

При увеличении диаметра отверстия заготовки до  $d_0 / D = 0,55$  и угле вырезов бойков  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 3.12) установлено, что минимальный градиент распределений деформаций возникает при ковке бойками с углом скосов  $\beta = 20^\circ$ , и достигает значения  $\Delta \epsilon = 5,65$  единиц (рис. 3.12, б). Максимальный градиент накопленных деформаций возникает при ковке бойками со скосами  $\beta = 30^\circ$  (рис. 3.12, в). Поэтому можно сделать вывод, что увеличение толщины стенки пустотелой заготовки способствует повышению равномерности распределения деформаций. Полученные результаты объясняются увеличением объема металла стенки, который деформируется. При малых подачах (см. рис. 3.12, а) максимальные деформации сосредотачиваются в периферийных слоях заготовки.

Как и предполагалось, при уменьшении толщины стенки (увеличении диаметра отверстия) снижается степень заковки отверстия. Чем меньше длина деформирующей полки на бойках (меньше величина подачи), тем меньше заковывается осевое отверстие. Следовательно, при малых подачах происходит интенсивное удлинение заготовки за счёт уменьшения глубины проникновения пластических деформаций вглубь стенки. При увеличении подачи сильнее искажается форма отверстия в поковке. Отверстие со стороны дна заготовки заковывается меньше. Уменьшить искажение отверстия поковки можно за счёт применения дна сферической формы.

Противоположный торец заготовки сильно искажается с образованием торцевой сферичности («бахромы»), которая увеличивает расход металла.

Исправить торцевую сферичность можно за счёт рациональной последовательности кантовок и обжатий.

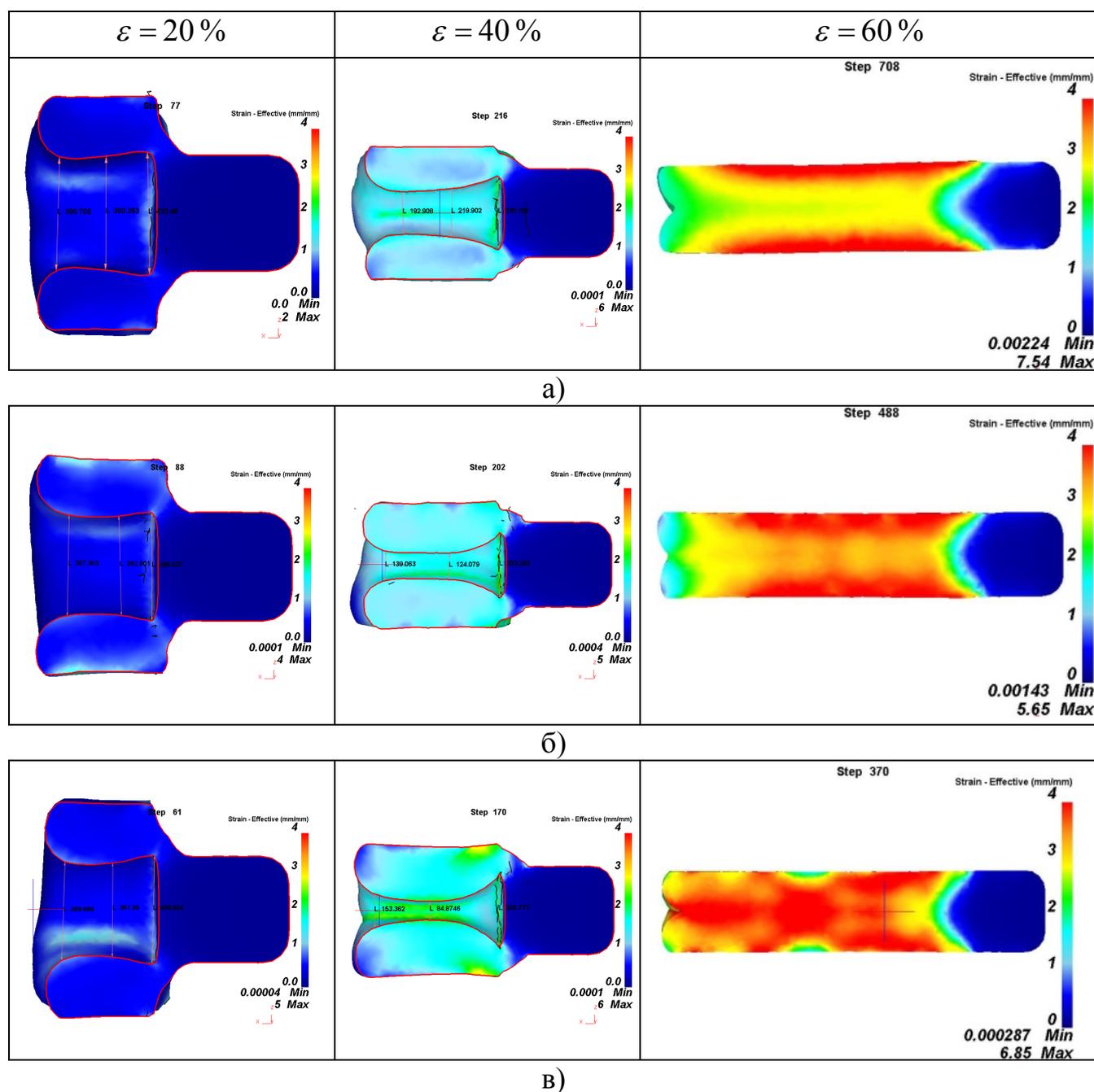


Рисунок 3.12 – Распределение интенсивности деформаций в продольном сечении поковок с относительным диаметром отверстия  $d_0 / D = 0,55$  и углом выреза бойков  $\alpha = 90^\circ$  при различных степенях обжатия и углах скосов выреза бойков:  $\beta = 10^\circ$  (а);  $\beta = 20^\circ$  (б);  $\beta = 30^\circ$  (в)

Увеличение угла выреза бойков до  $\alpha = 115^\circ$  (рис. 3.13) приводит к увеличению неравномерности распределения деформаций по сравнению с углом  $\alpha = 90^\circ$ . Это объясняется большей величиной уширения, а соответственно, менее глубоким проникновением зоны пластической деформации в глубину стенки заготовки.

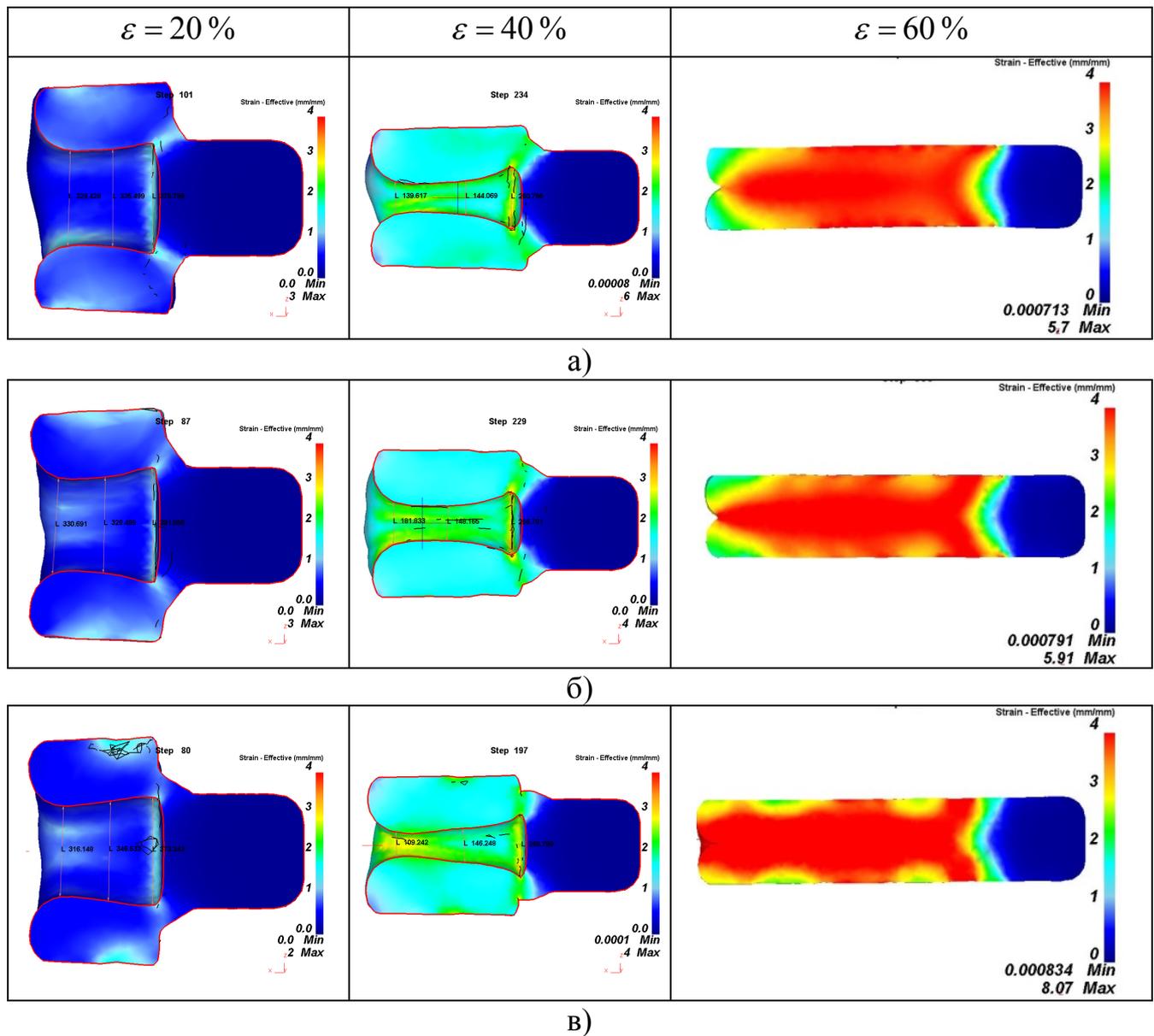


Рисунок 3.13 – Распределение интенсивности деформаций в продольном сечении поковок с относительным диаметром отверстия  $d_0 / D = 0,55$  и углом выреза бойков  $\alpha = 115^\circ$  при различных степенях обжатия и углах скосов выреза бойков:  $\beta = 10^\circ$  (а);  $\beta = 20^\circ$  (б);  $\beta = 30^\circ$  (в)

При этом также после обжатия заготовки на 60 % происходит полная заковка отверстия. Увеличенный угол выреза бойков при увеличении подачи способствует уменьшению степени заковки отверстия (см. рис. 3.13, б).

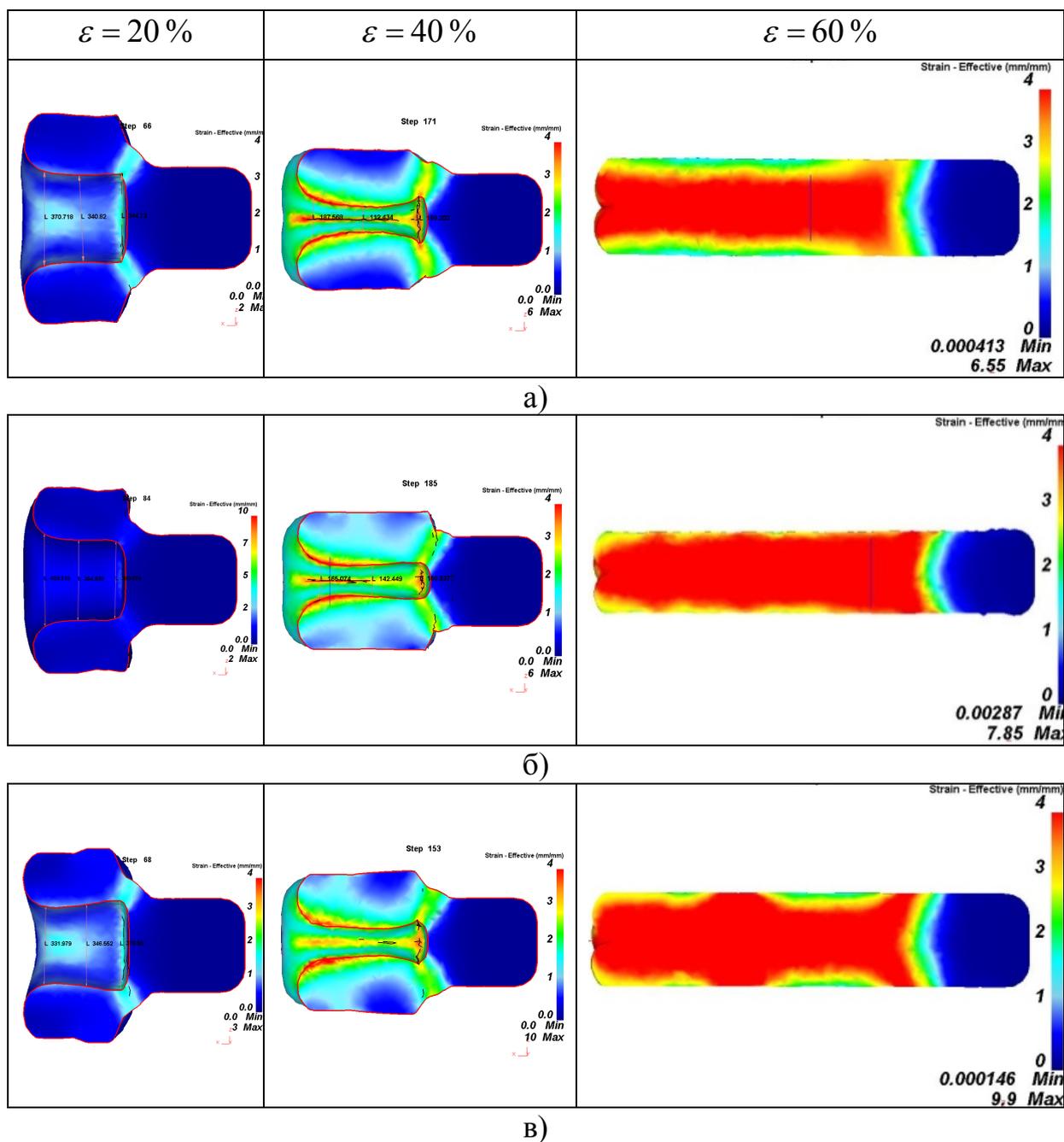


Рисунок 3.14 – Распределение интенсивности деформаций в продольном сечении поковок с относительным диаметром отверстия  $d_0 / D = 0,55$  и углом выреза бойков  $\alpha = 140^\circ$  при различных степенях обжатия и углах скосов выреза бойков:  $\beta = 10^\circ$  (а);  $\beta = 20^\circ$  (б);  $\beta = 30^\circ$  (в)

Дальнейшее увеличение угла выреза бойков до  $\alpha = 140^\circ$  для среднего диаметра отверстия заготовки  $d_0 / D = 0,55$  (рис. 3.14) приводит к тому, что максимальные деформации возникают при ковке бойками с углом скосов  $\beta = 30^\circ$  и достигают значения 9,9 единиц (рис. 3.14, в). Для данных схем деформирования более равномерное распределение деформации наблюдается при ковке бойками со скосами  $\beta = 20^\circ$  – средним шагом подачи (рис. 1.14, б).

### 3.3.2.3 Ковка заготовок с тонкой стенкой ( $d_0 / D = 0,8$ )

Проведенные выше исследования позволили установить, что уменьшение толщины стенки пустотелой заготовки за счёт увеличения диаметра отверстия снижает степень заковки отверстия. В этой связи представляет интерес исследование формоизменения заготовки при дальнейшем увеличении диаметра отверстия.

Анализ результатов процессаковки тонкостенных заготовок  $d_0 / D = 0,8$  вырезными бойками с углом выреза  $\alpha = 90^\circ$  (рис. 3.15) позволил сделать вывод, что деформация при обжатии 40 % распределяется в теле заготовки равномерно. Однако при обжатиях 60 % градиент деформаций в стенке и дне поковки отличается – максимальные деформации локализуются со стороны дна цилиндра. При этом деформации сосредотачиваются в периферийных слоях. Это объясняется тем, что бойки со скосами не способствуют глубокому проникновению зоны пластической деформации к оси заготовки. Максимальный градиент деформаций возникает при ковке бойками с углом скосов  $\beta = 20^\circ$  и достигает значения 11,5 единиц (рис. 3.15, б). Высокий уровень накопления пластических деформаций в теле заготовки с высокой равномерностью их распределения наблюдается при использовании бойков с углами скосов  $\beta = 10^\circ$  (рис. 3.15, а), поэтому можно рассматривать эту схему для разработки технологического процессаковки пустотелых заготовок без

оправки. При протяжке происходит увеличение толщины стенки заготовки, однако полной заковки отверстия при уковах, равных 2,5 не наблюдается. Особенно эта закономерность характерна для схем протяжки с малыми подачами (рис. 3.15, а), которые составляют 0,1D. Что выгодно отличает данную схему деформирования от рассматриваемых ранее.

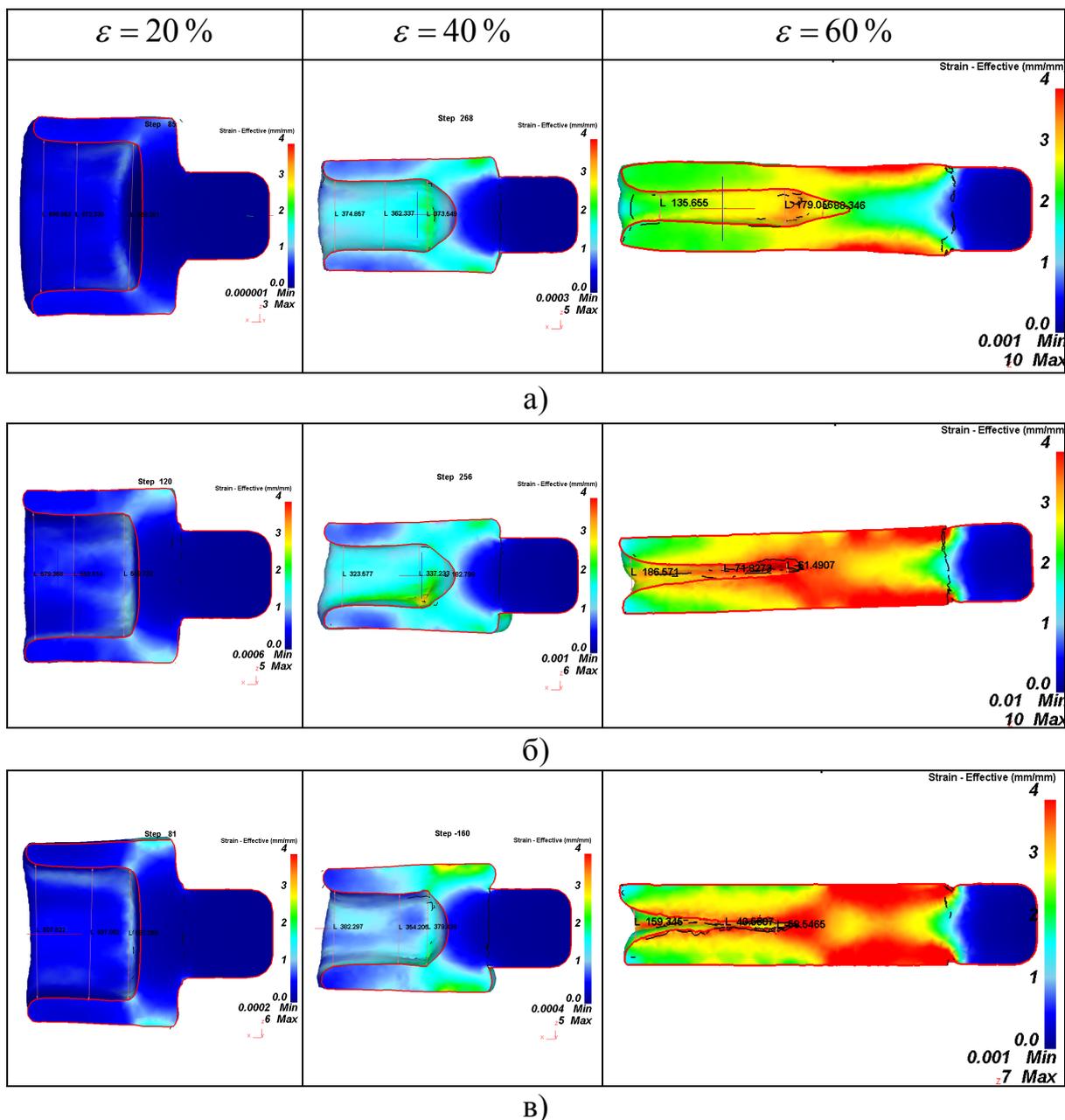


Рисунок 3.15 – Распределение интенсивности деформаций в продольном сечении пустотелых поковок с относительным диаметром отверстия  $d_0 / D = 0,8$  и углом выреза бойков  $\alpha = 90^\circ$  при различных степенях обжатия и величинах подач: 0,1D (а); 0,2D (б); 0,3D (в)

Для схемыковки с малыми подачами отсутствие оправки не приводит к образованию значительной разнотолщинности стенки заготовки, превышающей требования чертежа поковки. Однако следует отметить изменение формы дна заготовки в процессе протяжки. Увеличение подачи приводит к большей степени заковки отверстия и искажению его формы (см. рис. 3.15, б, в). Это объясняется глубоким проникновением зоны пластической деформации при увеличении подачи. Ковка глухонных заготовок приводит к увеличению толщины дна в процессековки, что также следует учитывать при разработке технологического процесса получения таких поковок.

При увеличении угла вырезов бойков до  $\alpha = 115^\circ$  происходит более равномерное распределение деформаций при обжатии на 40 %, чем для других углов выреза (рис. 3.16). Увеличение обжатия до 60 % приводит к локализации максимальных деформаций на внутренней поверхности отверстия для исследуемых схемковки и достигает значения 10,9 единиц (рис. 3.16, в). Это объясняется проникновением зоны пластических деформаций на глубину, которая соответствует диаметру отверстия заготовки. Однако, более равномерно деформации распределяются для подач 0,1D, ( $\Delta\epsilon \approx 5,7$  рис. 3.16, а).

Также при протяжке с данным углом выреза и скоса бойков отсутствие оправки позволит получить минимальную заковку отверстия, особенно при малых величинах подачи (см. рис. 3.16, а). Волнистость поверхности отверстия не превышает величину припуска на механическую обработку, что позволит получить заданные размеры поковки без оправки. Полученные результаты позволяют рекомендовать данную схему для дальнейшего экспериментального ее исследования.

При увеличении угла выреза  $\alpha = 140^\circ$  (рис. 3.17) наибольшая деформация металла заготовки сосредоточена в центральных частях поковки. Высокую равномерность распределения деформаций обеспечивают схемыковки с суммарными обжатиями 40 % (см. рис. 3.17). Максимальные деформации возникают при ковке бойками с углом скосов  $\beta = 30^\circ$  и достигают значения

10,6 единиц (рис. 3.17, в), это объясняется большими подачами по сравнению с другими схемами и соответственно глубоким проникновением зоны пластической деформации в осевом направлении.

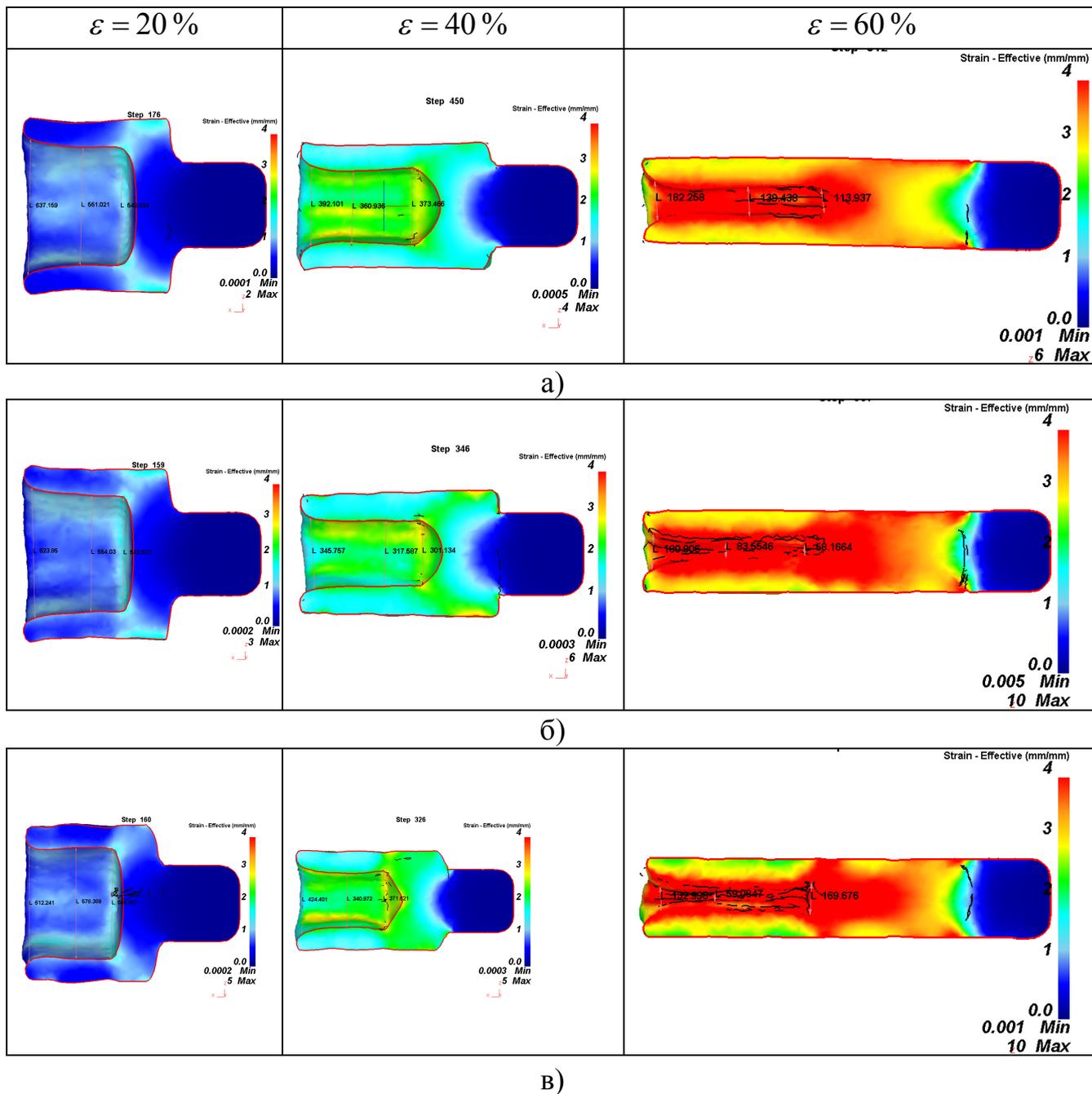


Рисунок 3.16 – Распределение интенсивности деформаций в продольном сечении поковок с относительным диаметром отверстия  $d_0 / D = 0,8$  и углом выреза бойков  $\alpha = 115^\circ$  при различных степенях обжатия и величинах подач: 0,1D (а); 0,2D (б); 0,3D (в)

Высокий уровень накопленных пластических деформаций в теле заготовки с большей равномерностью их распределения наблюдается при использовании бойков с углами скосов  $\beta = 20^\circ$  (см. рис. 3.17, б).

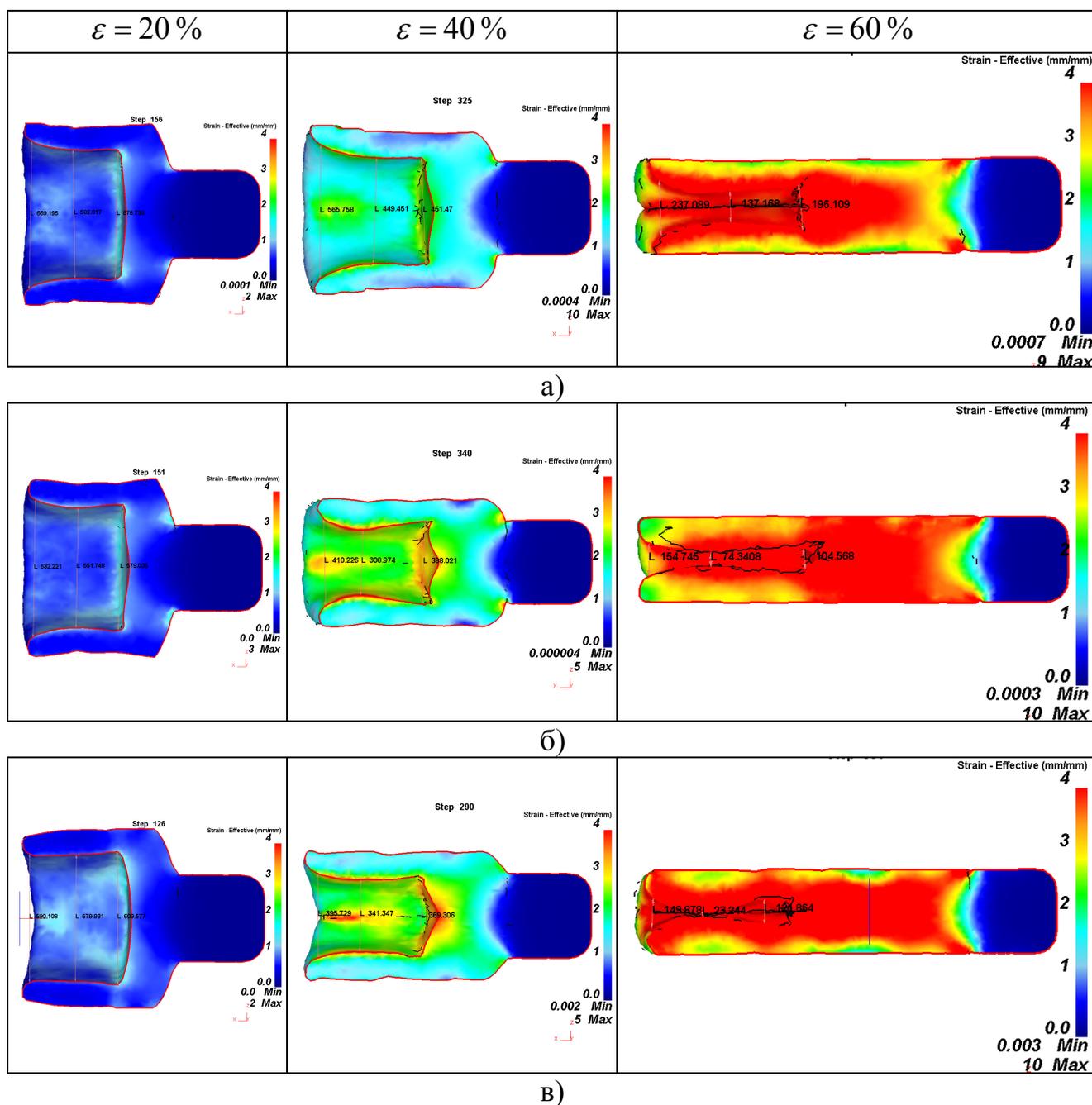


Рисунок 3.17 – Распределение интенсивности деформаций в продольном сечении пустотелых поковок с относительным диаметром отверстия  $d_0/D = 0,8$  и углом выреза бойков  $\alpha = 140^\circ$  при различных степенях обжатия и величинах подачи: 0,1D (а); 0,2D (б); 0,3D (в)

### 3.3.3 Исследование механизма заковки отверстия пустотелой заготовки

Применение нового способаковки пустотелых заготовок исключает применение оправки, что будет приводить к заковке отверстия пустотелой заготовки и увеличению толщины стенки поковки. Это усложняет проектирование технологического процесса, поэтому необходимо количественно установить влияние размеров заготовки и геометрии инструмента на заковку отверстия цилиндра [139].

Для адекватной оценки механизма заковки был введен показатель интенсивности удлинения заготовки ( $f$ ). Этот показатель учитывает интенсивность (скорость) заковки отверстия в зависимости от различной площади сечения исходной заготовки (толщины стенки). Для разных толщин стенок исходной заготовки будет разным объем металла, участвующий в деформации, что будет существенно влиять на заковку отверстия.

На рисунках 3.18 – 3.35 представлены графики изменения конечного диаметра отверстия пустотелых заготовок в зависимости от степени деформации ( $\epsilon = 20; 40; 60 \%$ ), исходного диаметра отверстия ( $d_0 / D = 0,3; 0,55; 0,8$ ), при ковке вырезными бойками с углами выреза  $\alpha = 90^\circ; 115^\circ; 140^\circ$  и углом скоса вырезных бойков  $\beta = 10^\circ; 20^\circ; 30^\circ$ .

#### 3.3.3.1 Ковка вырезными бойками со скосами с подачей $a = 0,1D$

Протяжка бойками с углом выреза  $90^\circ$  с подачами, равными  $0,1D$ , обеспечивает заковку отверстия при увеличении степени обжатия заготовки (рис. 3.18). Однако величина заковки уменьшается с увеличением диаметра отверстия заготовки ( $d_0$ ).

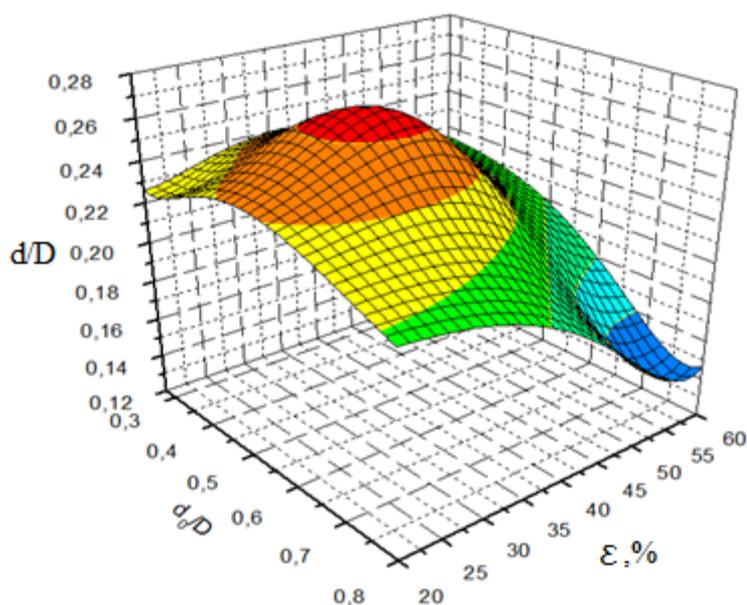


Рисунок 3.18 – Степень заковки отверстия при протяжке пустотелых заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 90^\circ$  и углами скосов  $\beta = 10^\circ$

Оценить интенсивность удлинения заготовки («скорость») можно после анализа тех результатов, что представлены на рисунке 3.19. Полученные результаты позволили установить, что преимущественное влияние на удлинение поковки оказывает исходный диаметр отверстия заготовки.

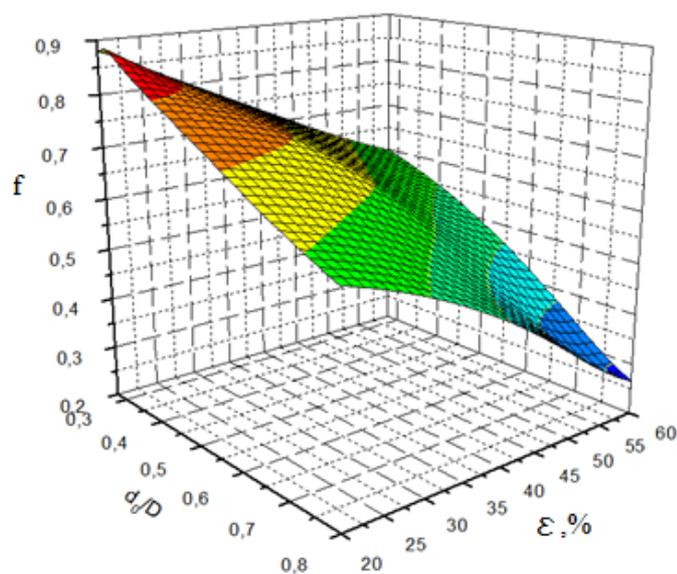


Рисунок 3.19 – Интенсивность удлинения заготовки при протяжке заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 90^\circ$  и углами скосов  $\beta = 10^\circ$

Однако интенсивность удлинения заготовки отверстия уменьшается при увеличении степени обжатия заготовки, что является важным научным наблюдением и не было известно ранее (рис. 3.19).

Таким образом, для получения поковок с большим диаметром отверстия необходимо применять заготовки с большим внутренним диаметром.

Увеличение угла выреза бойков до  $\alpha = 115^\circ$  приводит к схожим результатам по уменьшению диаметра отверстия поковки при увеличении степени обжатия и уменьшению толщины стенки (рис. 3.20). При этом величина конечного относительного диаметра ( $d_0 / D$ ) меньше, чем для угла выреза  $\alpha = 90^\circ$  (см. рис. 3.18), при одинаковых условиях деформирования.

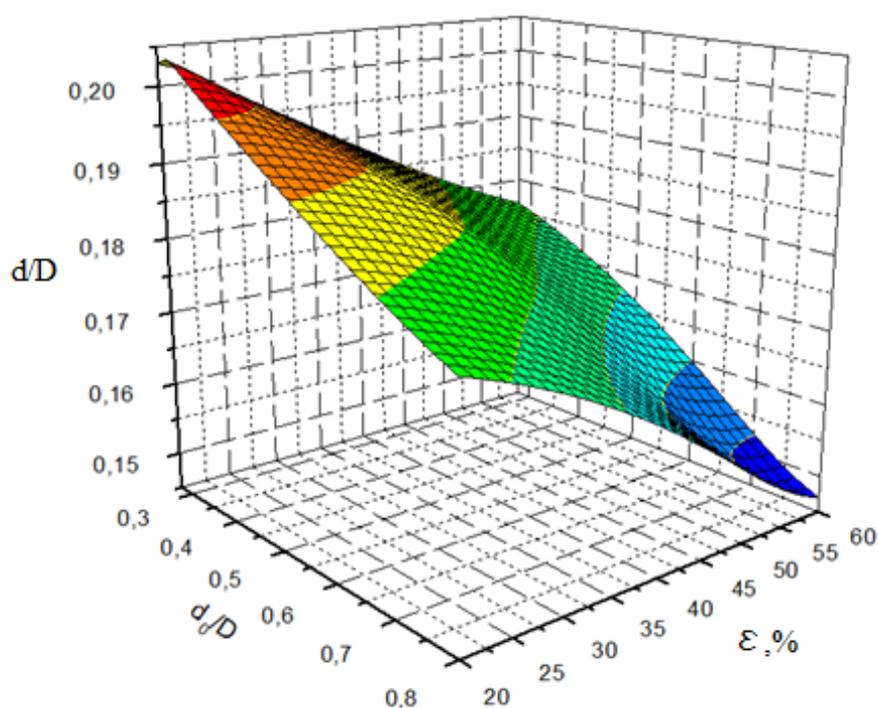


Рисунок 3.20 – Степень заковки отверстия при протяжке пустотелых заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 115^\circ$  и углами сколов  $\beta = 10^\circ$

Интенсивность удлинения заготовки ( $f$ ) для данной геометрии инструмента преимущественно зависит от исходного относительного диаметра ( $d_0 / D$ ), чем от степени обжатия (рис 3.21). Полученные результаты позволя-

ют сделать вывод, что степень заковки увеличивается, а интенсивность удлинения заготовки одинакова при разных значениях обжатия, т. е. диаметр заковывается практически с постоянной скоростью (см. рис. 3.20 и 3.21).

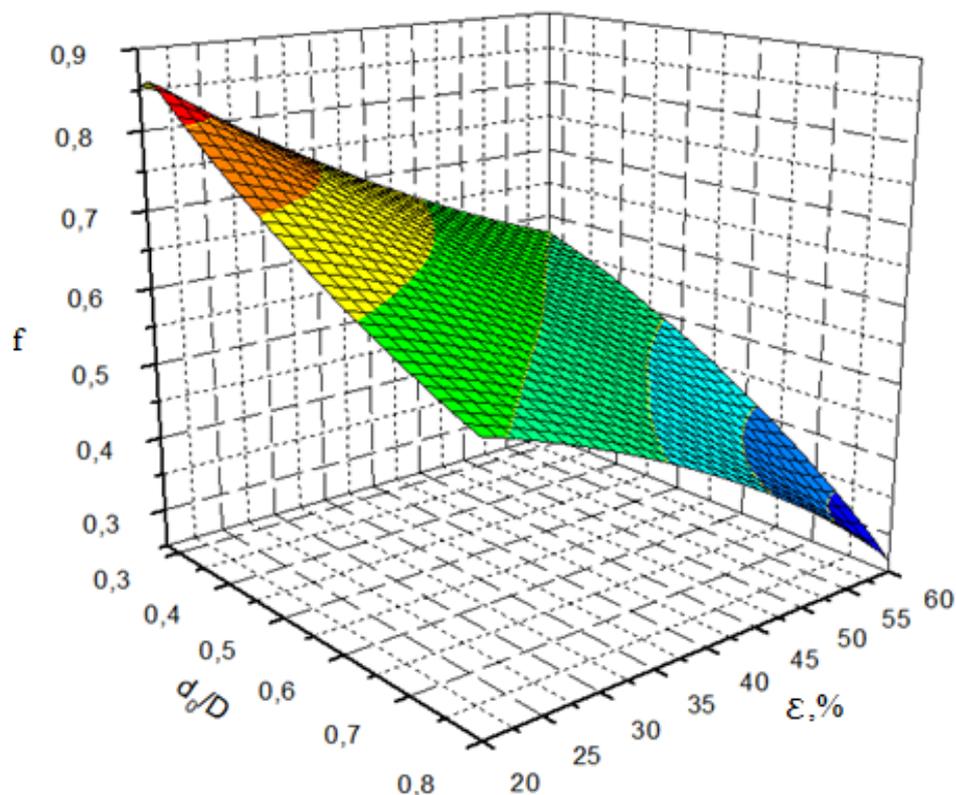


Рисунок 3.21 – Интенсивность удлинения заготовки при протяжке пустотелых заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 115^\circ$  и углами скосов  $\beta = 10^\circ$

При угле выреза  $\alpha = 140^\circ$  степень заковки отверстия уменьшается (рис. 3.22) особенно при начальном относительном диаметре  $d_0/D > 0,4$ . Эти результаты соответствуют интенсивности удлинения заготовки, которая уменьшается с уменьшением толщины стенки заготовки и увеличении степени обжатия (рис. 3.23). Полученная закономерность объясняется тем, что большие углы выреза бойков способствуют увеличению уширения, а соответственно, уменьшению набора толщины стенки при одинаковых обжатиях. С другой стороны, увеличение уширения приводит к увеличению числа

нажимов, проходов и кантовок, что повышает трудоемкостьковки. При этом будет происходить охлаждение заготовки, что потребует назначение дополнительного её подогрева.

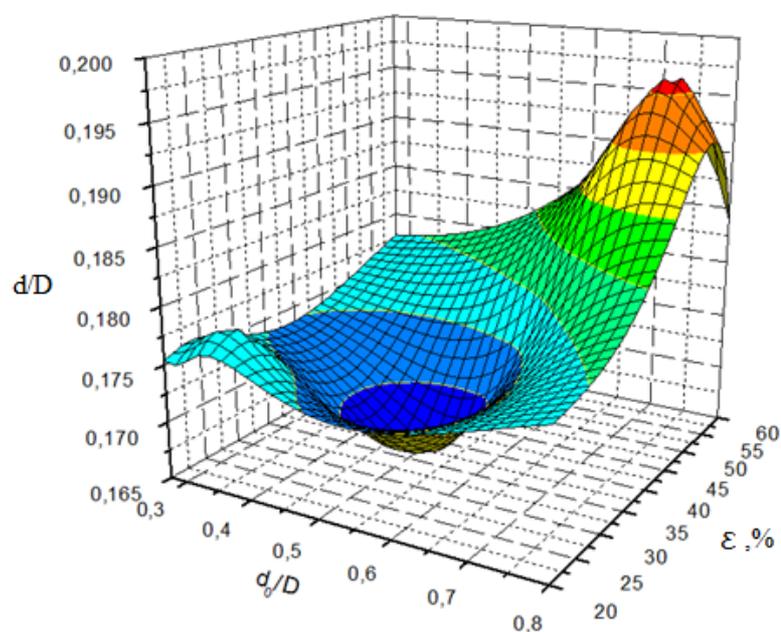


Рисунок 3.22 – Степень заковки отверстия при протяжке пустотелых заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 140^\circ$  и углами скосов  $\beta = 10^\circ$

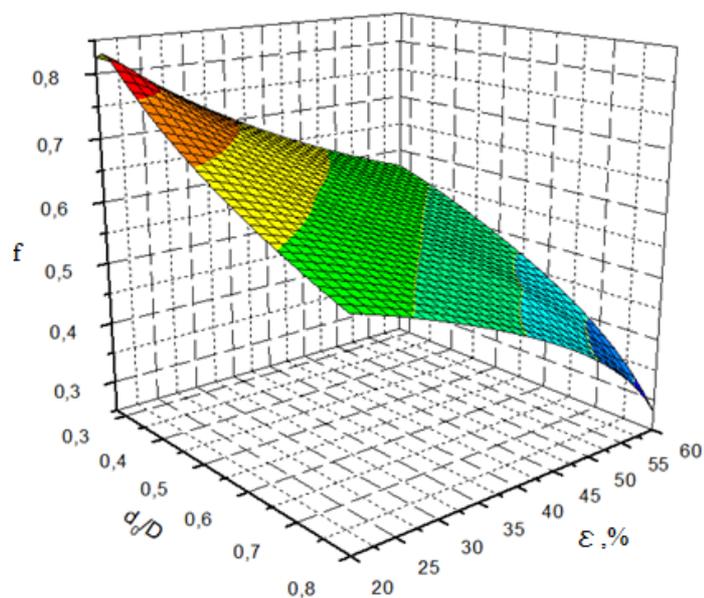


Рисунок 3.23 – Интенсивность удлинения заготовки при протяжке заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 140^\circ$  и углами скосов  $\beta = 10^\circ$

### 3.3.3.2 Ковка вырезными бойками со скосами с подачей $a = 0,2D$

Увеличение подачи до  $0,2D$  ( $\beta = 20^\circ$ ) приводит к сложному характеру изменения степени заковки отверстия при разных обжатиях и толщинах стенки (рис. 3.24).

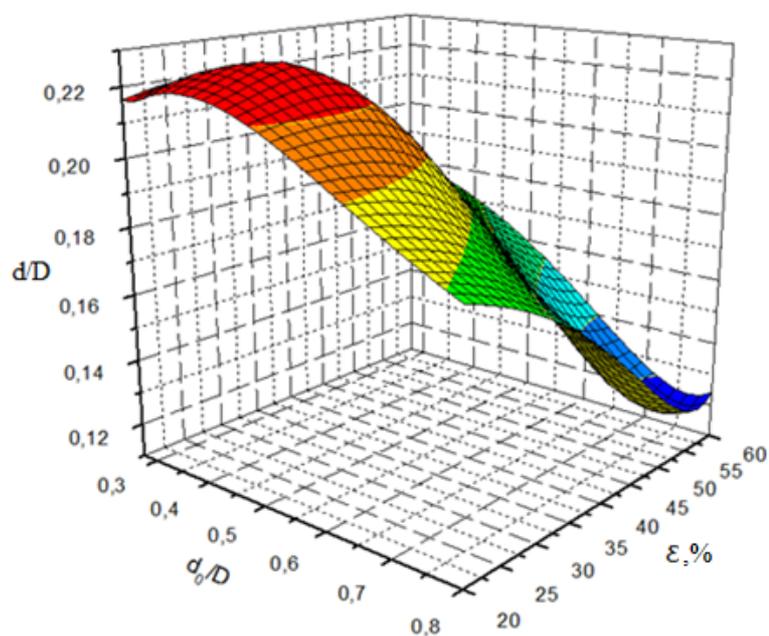


Рисунок 3.24 – Степень заковки отверстия при протяжке пустотелых заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 90^\circ$  и углами скосов  $\beta = 20^\circ$

При степени деформации 60 %, для соотношений  $d_0 / D = 0,3$  происходит полная заковка отверстия, а для соотношения  $d_0 / D = 0,8$  происходит максимальное удлинение поковки.

Интенсивность удлинения заготовки при этом угле выреза и величине подачи (рис. 3.25) аналогичная предыдущим схемам деформирования (см. рис. 3.21; 3.23). При этом также при одинаковых толщинах стенки степень обжатия не оказывает заметного влияния на интенсивность удлинения заготовки. Т. е. «скорость» заковки отверстия одинакова при разных обжати-

ях для данных соотношений размеров заготовки. Увеличение угла выреза бойков до  $115^\circ$  при относительных подачах  $0,2D$  не изменяет механизм заковки отверстия при протяжке (рис. 3.26, 3.27) по сравнению с углом  $\alpha = 90^\circ$  (см. рис. 3.24 и 3.25).

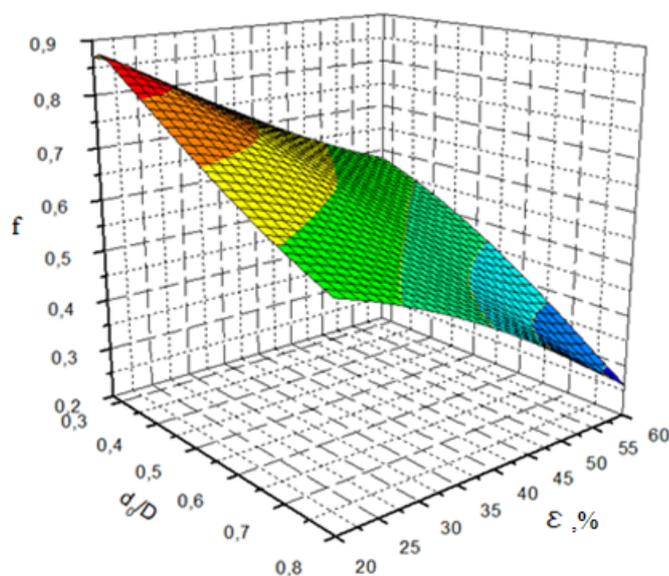


Рисунок 3.25 – Интенсивность удлинения заготовки при протяжке заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 90^\circ$  и углами скосов  $\beta = 20^\circ$

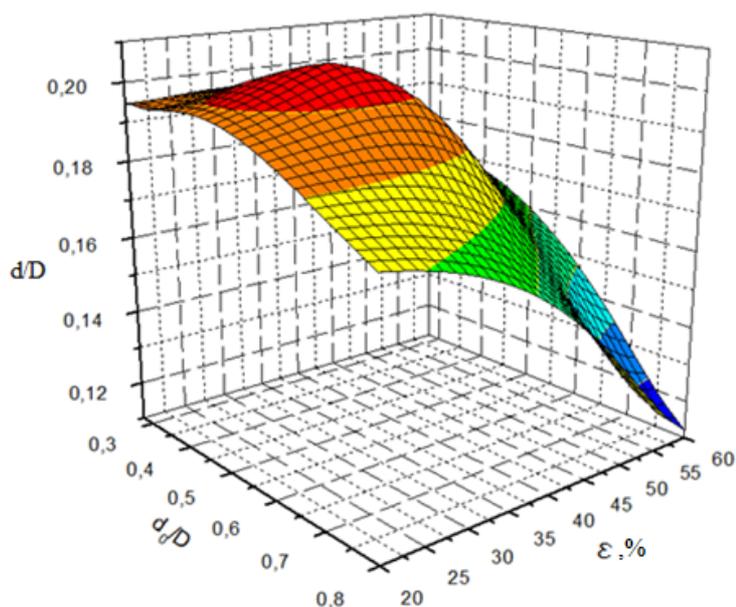


Рисунок 3.26 – Степень заковки отверстия при протяжке пустотелых заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 115^\circ$  и углами скосов  $\beta = 20^\circ$

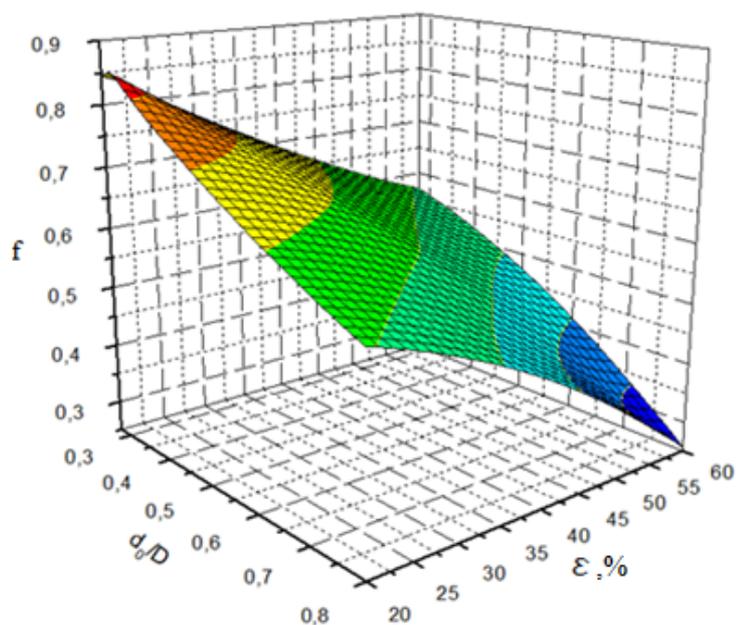


Рисунок 3.27 – Интенсивность удлинения заготовки при протяжке пустотелых заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 115^\circ$  и углами скосов  $\beta = 20^\circ$

Аналогичные результаты наблюдаются и при дальнейшем увеличении угла выреза бойков  $\alpha = 140^\circ$  (рис. 3.28, 3.29).

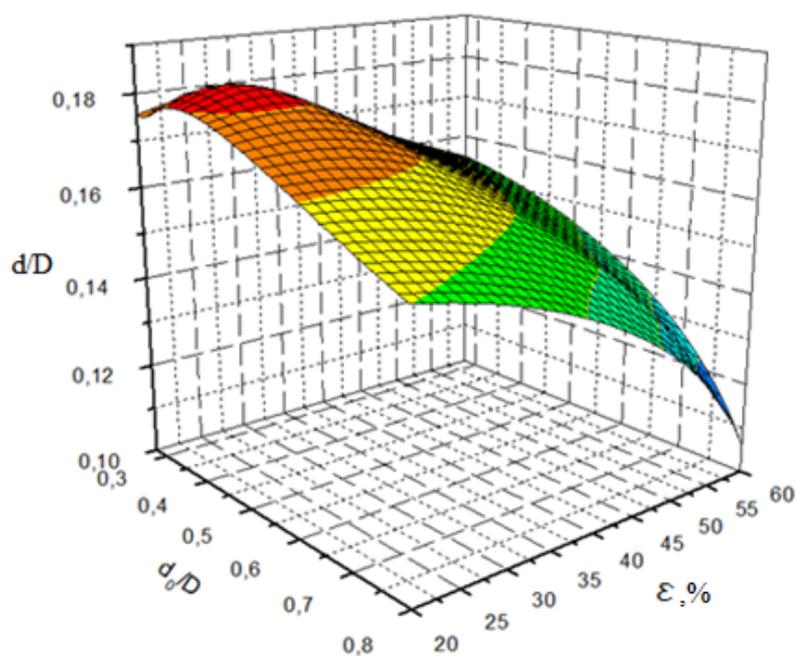


Рисунок 3.28 – Степень заковки отверстия при протяжке пустотелых заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 140^\circ$  и углами скосов  $\beta = 20^\circ$

Это позволяет сделать вывод, что при подачах больше  $0,1D$  НДС металла заготовки не изменяется и отверстие заковывается с одинаковой степенью и одинаковой интенсивностью (см. рис. 3.28, 3.29).

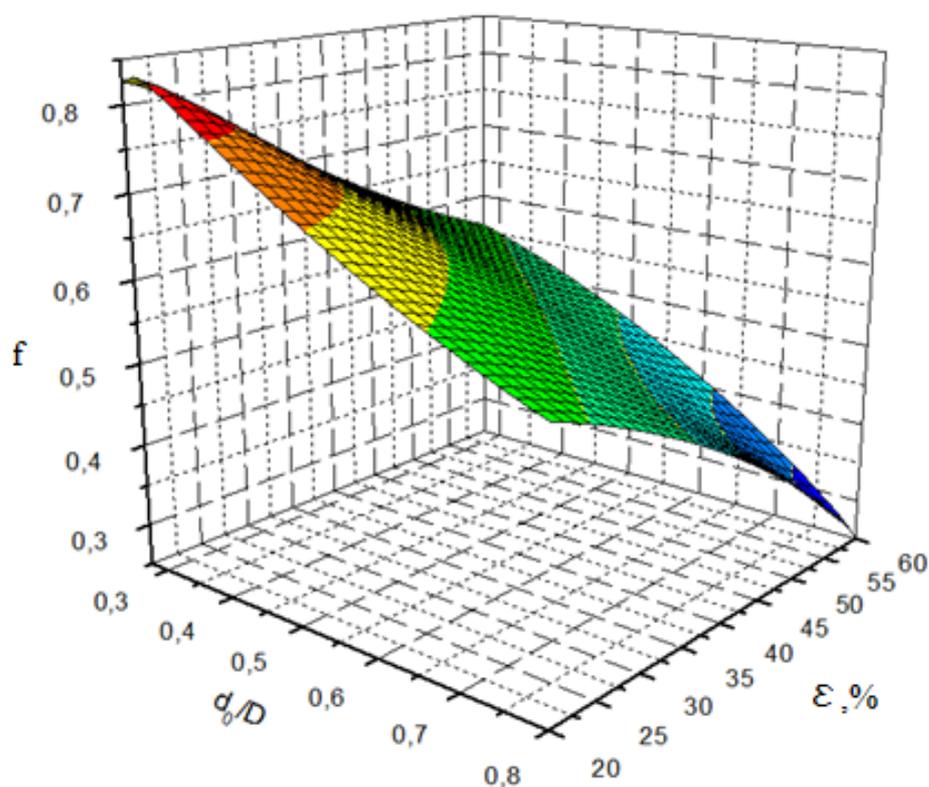


Рисунок 3.29 – Интенсивность удлинения заготовки при протяжке пустотелых заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 140^\circ$  и углами скосов  $\beta = 20^\circ$

Полученные результаты позволяют сделать вывод о нерациональности дальнейших исследований при увеличении угла вырезов бойков. Это, в свою очередь, позволяет дать рекомендации по эффективной геометрии инструмента, которая способствует интенсивной вытяжке заготовки и уменьшенной заковке отверстия. Угол вырезов бойков должен быть менее  $140^\circ$ , угол скосов вырезов бойков не более  $20^\circ$ . Величина подачи должна быть минимальной и находится в диапазоне  $0,1 \dots 0,3$  диаметра заготовки.

### 3.3.3.3 Ковка вырезными бойками со скосами с подачей $a = 0,3D$

Основной задачей исследования являлось установление схемы деформирования, которая обеспечивает интенсивную вытяжку заготовки и минимальную заковку отверстия. Это условие необходимо для расширения технологических возможностей процесса безоправочной ковки при внедрении способа в производства. Для этого необходимо исследовать формоизменение пустотелой заготовки при безоправочной ковке с подачами  $0,3D$ . Однако дальнейшее увеличение подачи не способствует уменьшению степени заковки отверстия (рис. 3.30 – 3.35). Поэтому увеличение подачи будет приводить к схеме ковки обычными вырезными бойками без скосов.

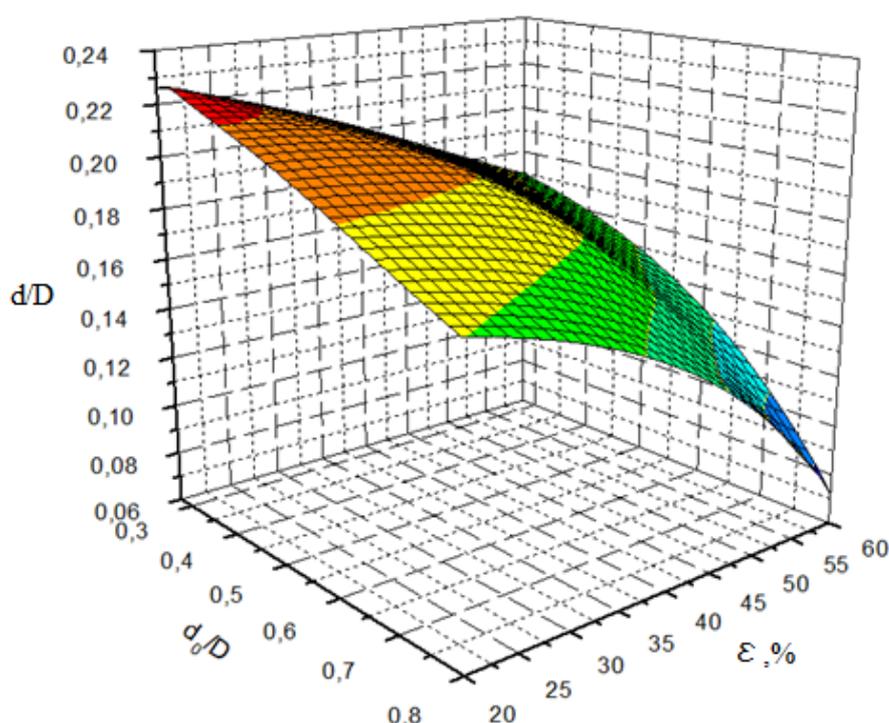


Рисунок 3.30 – Степень заковки отверстия при протяжке пустотелых заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 90^\circ$  и углами скосов  $\beta = 30^\circ$

Анализ результатов по интенсивности удлинения заготовки в процессе протяжки без оправки бойками с углом выреза  $\alpha = 90^\circ$  (см. рис. 3.31) позволил установить, что с увеличением степени обжатия интенсивность удлинения снижается и происходит заковка отверстия (см. рис. 3.30).

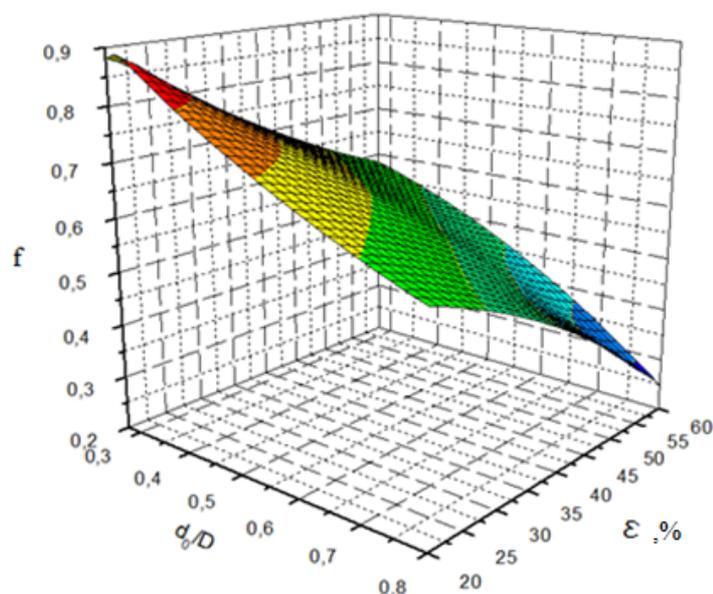


Рисунок 3.31 – Интенсивность удлинения заготовки при протяжке заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 90^\circ$  и углами скосов  $\beta = 30^\circ$

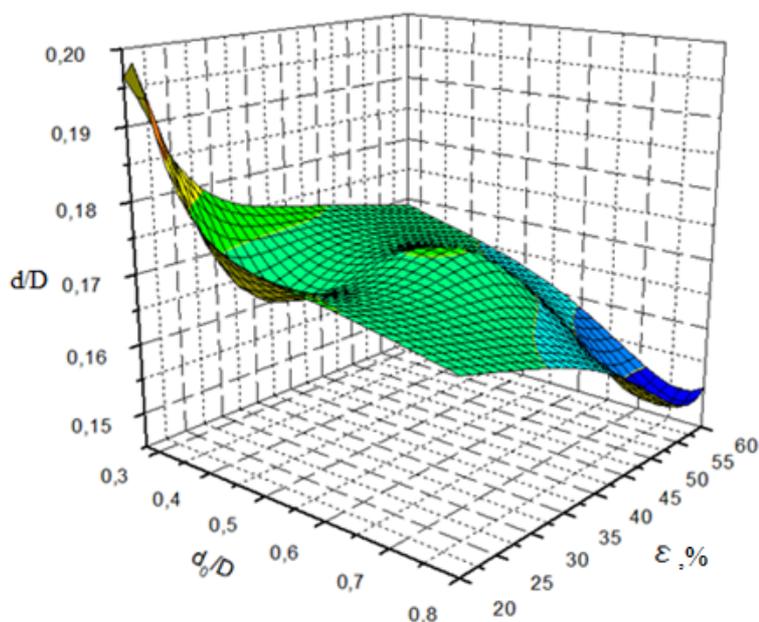


Рисунок 3.32 – Степень заковки отверстия при протяжке пустотелых заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 115^\circ$  и углами скосов  $\beta = 30^\circ$

Аналогичные результаты получаются при увеличении угла вырезов бойков до  $115^\circ$  (см. рис. 3.32, 3.33).

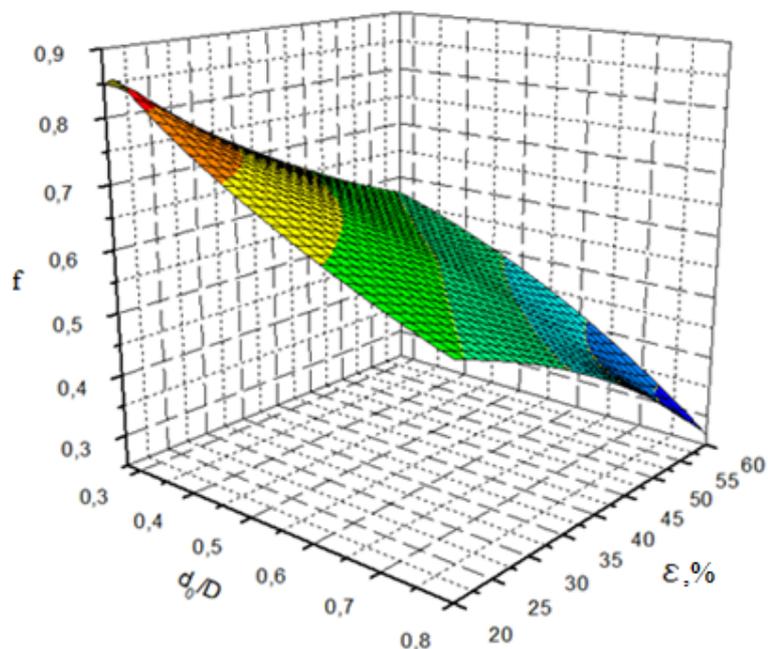


Рисунок 3.33 – Интенсивность удлинения заготовки при протяжке заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 115^\circ$  и углами скосов  $\beta = 30^\circ$

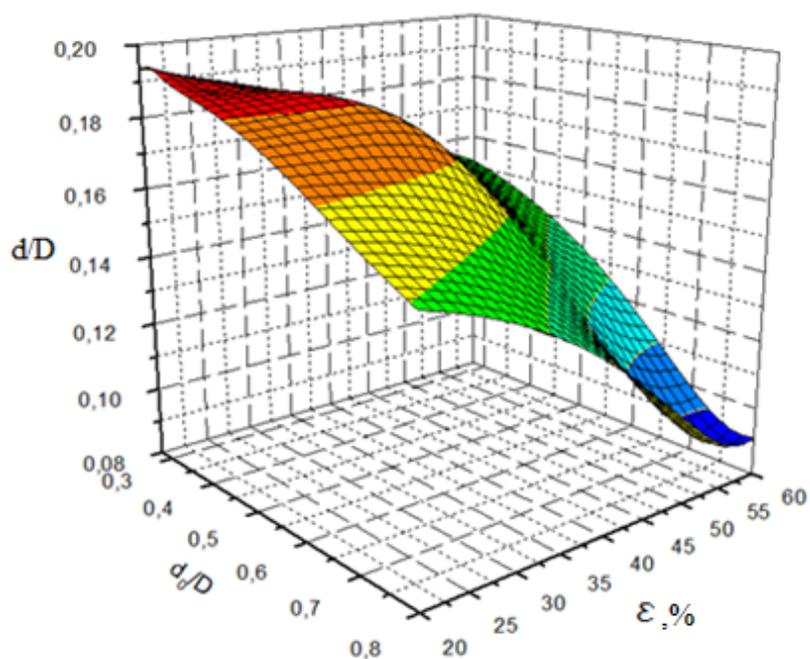


Рисунок 3.34 – Степень заковки отверстия при протяжке пустотелых заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 140^\circ$  и углами скосов  $\beta = 30^\circ$

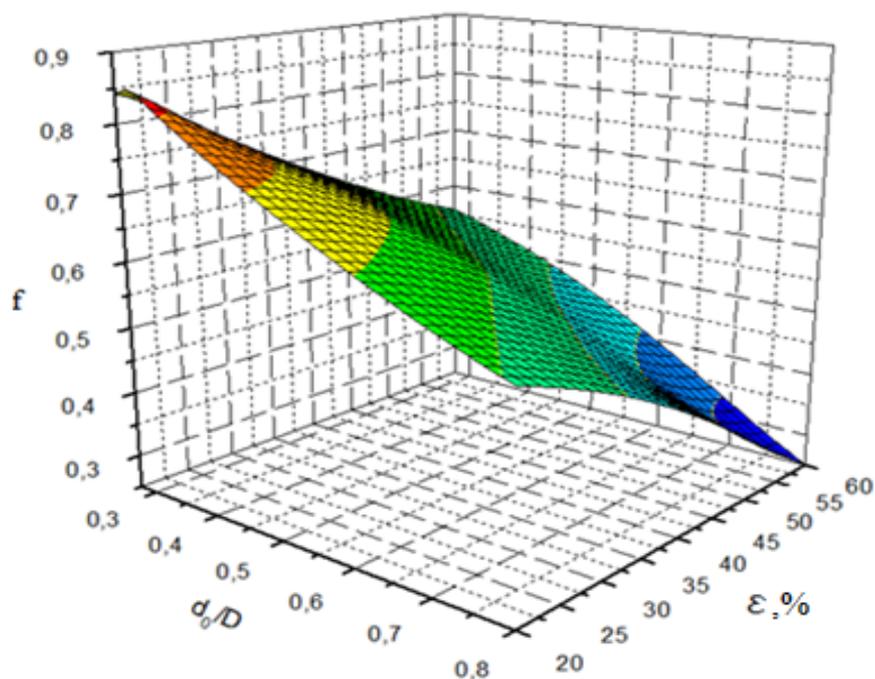


Рисунок 3.35 – Интенсивность удлинения заготовки при протяжке пустотелых заготовок бойками с углом выреза  $\alpha = 140^\circ$  и углами скосов  $\beta = 30^\circ$

### Выводы по разделу 3

1. Теоретические исследования процессовковки пустотелых заготовок без оправки позволили установить, что с увеличением диаметра отверстия удлинение заготовки увеличивается и уменьшается степень заковки отверстия. Это объясняется тем, что при тонких стенках заготовки объем металла, участвующий в деформации, меньше, а соответственно меньшее количество металла течет на заковку отверстия.

2. Общей закономерностью для исследуемых схемковки является то, что интенсивность удлинения заготовки изменяется незначительно при различных обжатиях для постоянных соотношений размеров заготовки.

3. При подачах больше  $0,2D$  не происходит значительного качественного и количественного изменения зависимости степени заковки отверстия и интенсивности удлинения заготовки. Это позволяет определить рекомендуемую подачу для интенсивной вытяжки заготовки и уменьшения степени заковки отверстия. Рекомендуемая подача должна быть в диапазоне  $(0,1 \dots 0,2)D$ .

4. На основании анализа результатов теоретических исследований деформированного состояния металла заготовки и механизма заковки отверстия цилиндра была выбрана эффективная схема, в которой вырезные бойки имели угол выреза  $115^\circ$  и ширину деформирующей части  $0,1D$ , геометрические параметры заготовки  $d_0 / D = 0,8$ . В данной схеме при протяжке преимущественно течение металла происходило вдоль оси заготовки, что способствует интенсивному удлинению поковки и не полной заковке отверстия, а так же равномерному распределению деформаций и высокому качеству поверхности поковки по сравнению с другими способами протяжки.

Результаты исследований 3-го раздела опубликованы в работах [130–139].

## **4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОВКИ БЕЗ ОПРАВКИ ПУСТОТЕЛЫХ ЦИЛИНДРОВ**

Теоретическое исследование МКЭ процессов протяжки глухондных цилиндров бойками со скосами позволило установить рациональную геометрию инструмента, которая обеспечивает интенсивную вытяжку при протяжке, меньшее заковывание отверстия и отсутствие наружных поверхностных дефектов.

Цель данного экспериментального исследования – проверить достоверность полученных теоретических результатов. Теоретическое исследование процесса ковки глухондных поковок требует экспериментальной верификации полученных результатов.

Основной технологический параметр, необходимый для разработки технологических процессов протяжки без оправки – степень заковки отверстия в процессе деформирования [140–142]. В результате экспериментальных исследований процессов протяжки без оправки необходимо установить влияние размеров исходной заготовки (относительный диаметр отверстия), геометрии инструмента (углы вырезов и скосов бойков) и механические режимы ковки (степень деформации, и подача) на течение металла в ходе деформирования.

### **4.1 Исследование формоизменения заготовки в процессе протяжки вырезными бойками**

Деформирование заготовок вырезными бойками проводилось на свинцовых образцах. Наружный диаметр пустотелых заготовок  $D = 45$  мм, диаметр отверстия  $d_{\text{отв}} = 34$  мм, длина заготовок  $l_0 = 27$  мм, относительная по-

дача  $0,1D$ . Протяжка производилась до диаметра  $D = 27$  мм. Бойки закреплялись в специальном пакете штампа. В ходе проведения эксперимента выполнялись замеры изменения поперечного сечения отверстия [130, 131].

Подготовленные свинцовые образцы протягивались в вырезных бойках с углом выреза  $\alpha = 115^\circ$  и подачей  $0,1D$ . Эти параметры выбраны по результатам исследований как наиболее эффективные с точки зрения максимальной вытяжки при протяжке и качества поверхности заготовки (п. п. 3.3.2.1). Деформирование осуществлялось поэтапно, с обжатием за проход 10 % от диаметра образца. Протяжка осуществлялась следующим образом: проход  $\rightarrow$  кантовка на  $90^\circ \rightarrow$  проход  $\rightarrow$  кантовка на  $90^\circ \rightarrow$  проход  $\rightarrow$  кантовка на  $45^\circ \rightarrow$  проход. При такой схеме ковки на конечном этапе получилась заготовка, имеющая в поперечном сечении форму многоугольника близкого к кругу. Для данной геометрии инструмента в процессе протяжки на поверхности поковки не образуются зажимы и металл течет интенсивно вдоль оси заготовки. По окончании процесса деформирования поковка имеет поверхность, близкую к цилиндрической.

Полученные результаты экспериментальных исследований сравнивались с теоретическими результатами для возможности оценки достоверности результатов теоретических исследований.

На рисунке 4.1 представлена таблица, сравнивающая результаты экспериментальных и теоретических исследований при протяжке вырезными бойками с углом выреза  $\alpha = 120^\circ$  (без скосов) заготовок с геометрическими параметрами  $d_0 / D = 0,3; 0,55; 0,8$ . Изменения размеров заготовок в процессе экспериментального исследования представлены в таблице 4.1 [131].

Для анализа полученных теоретических и экспериментальных данных были построены графики интенсивности удлинения ( $f$ ) (рис. 4.2), относительного утолщения стенки ( $S_1 / S_0$ ) (рис. 4.3) и относительного изменения диаметра заготовки ( $d_{1cp} / D$ ) (рис. 4.4).

Согласно полученным результатам установлено, что с увеличением диаметра отверстия удлинение заготовки увеличивается, а соответственно,

уменьшается степень заковки отверстия (см. рис. 4.2). Это объясняется тем, что при тонких стенках заготовки объем металла, участвующий в деформации меньше, а соответственно меньшее количество металла течет на заковку отверстия [134].

Результаты по удлинению заготовки в процессековки, полученные МКЭ, примерно на 10...15 % больше экспериментальных (см. рис. 4.2). При этом увеличение толщины стенки заготовки более интенсивно происходит в экспериментальных образцах (см. рис. 4.3).

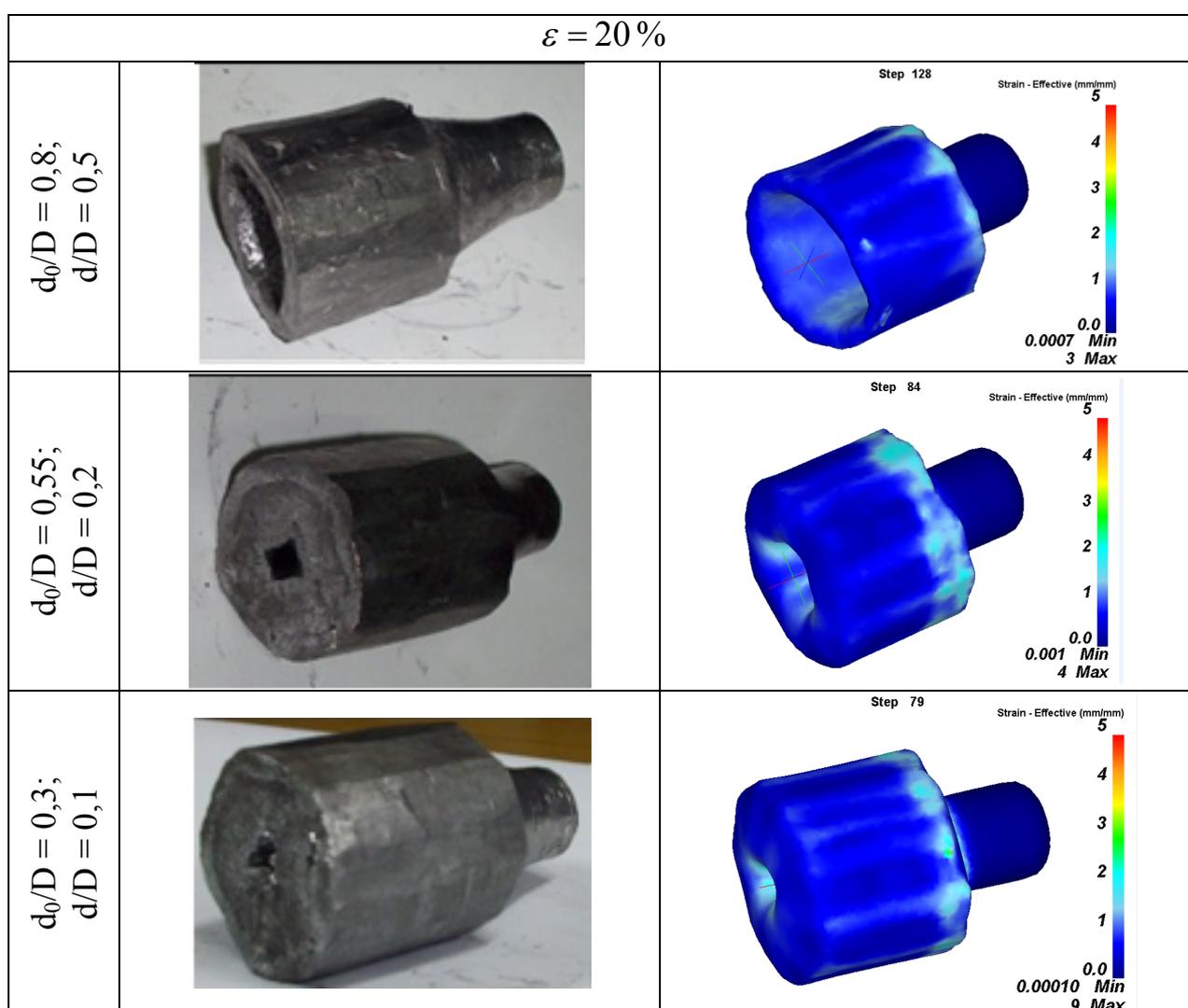


Рисунок 4.1 – Сопоставление экспериментальных и теоретических результатов формоизменения заготовки, после протяжки на 20 % вырезными бойками

Таблица 4.1 – Условия и результаты протяжки без оправки вырезными бойками без скосов

$\alpha$ , град	$\beta$ , град	$a / D$ , %	$\varepsilon = \Delta D / D$	$d_0 / D$	$l_0$ , мм	$d_0^{cp}$ , мм	$h_0$ , мм	$D$ , мм	$V_0^{отв}$ , мм <sup>3</sup>	$D_1$ , мм	$V_1$ , мм <sup>3</sup>	$l_1$ , мм	$d_1^{cp}$ , мм	$S_1 = (D_1 - d_1) / 2$	$\varphi = (l_1 - l_0) / l_0$	$d^{cp} / D$				
120°	90°	$\approx 0,63$	20 %	0,8	26	32,5	30	44,5	24874	36,5	11800	34	21,8	7,3	0,23	0,5				
0,55				11922					37								2000	33	8,8	0,21
0,3				341					36,8								600	31,5	4,7	0,18

Полученные результаты позволили установить, что с увеличением относительного диаметра отверстия исходной заготовки  $d_0 / D$  до 0,6 увеличивается толщина стенки поковки  $S_1 / S_0$ . Дальнейшее увеличение диаметра отверстия ( $d_0 / D > 0,6$ ) приводит к снижению толщины стенки.

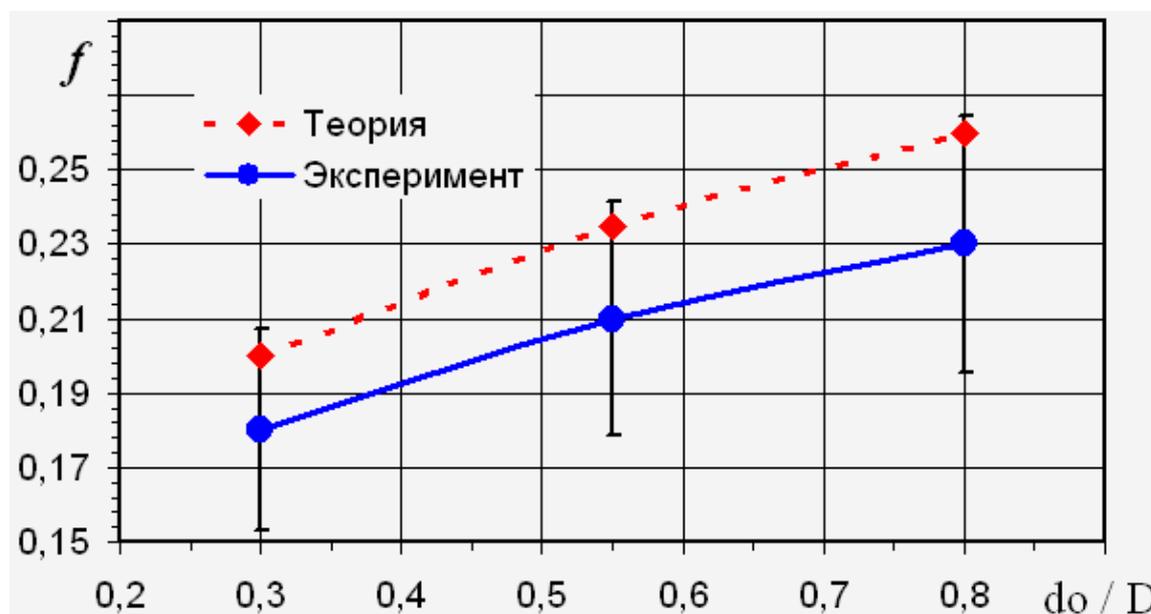


Рисунок 4.2 – Влияние относительного диаметра отверстия исходной заготовки на интенсивность удлинения поковки в процессе протяжки без оправки

Экспериментальные и теоретические результаты показали наличие максимума утолщения стенки при относительном диаметре отверстия в заготовке, равного 0,6 (см. рис. 4.3). Это позволяет сделать вывод о неэффективности данных соотношений размеров заготовки дляковки без оправки, вследствие интенсивного увеличения толщины стенки заготовки. Отклонение теоретических и экспериментальных значений составляет 4...6 %.

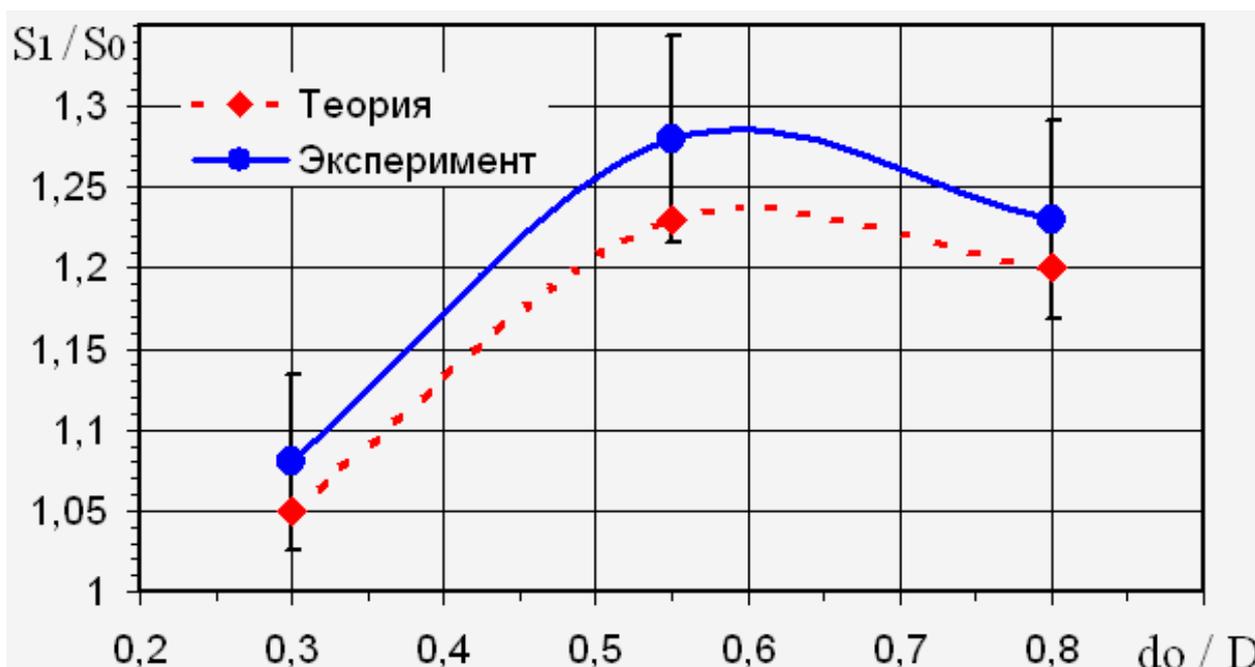


Рисунок 4.3 – Влияние относительного диаметра отверстия исходной заготовки на изменение толщины стенки в процессе протяжки без оправки

Достоверность теоретических результатов МКЭ подтверждает анализ результатов заковки отверстия в зависимости от диаметра отверстия в заготовке (рис. 4.4) в процессе протяжки без оправки. Погрешность теоретических данных от экспериментальных составляет 10...15 %. Установленные закономерности имеют похожий характер изменения. Эти закономерности позволяют установить конечный диаметр отверстия в поковке. С увеличением начального диаметра отверстия увеличивается конечный диаметр отверстия поковки [138].

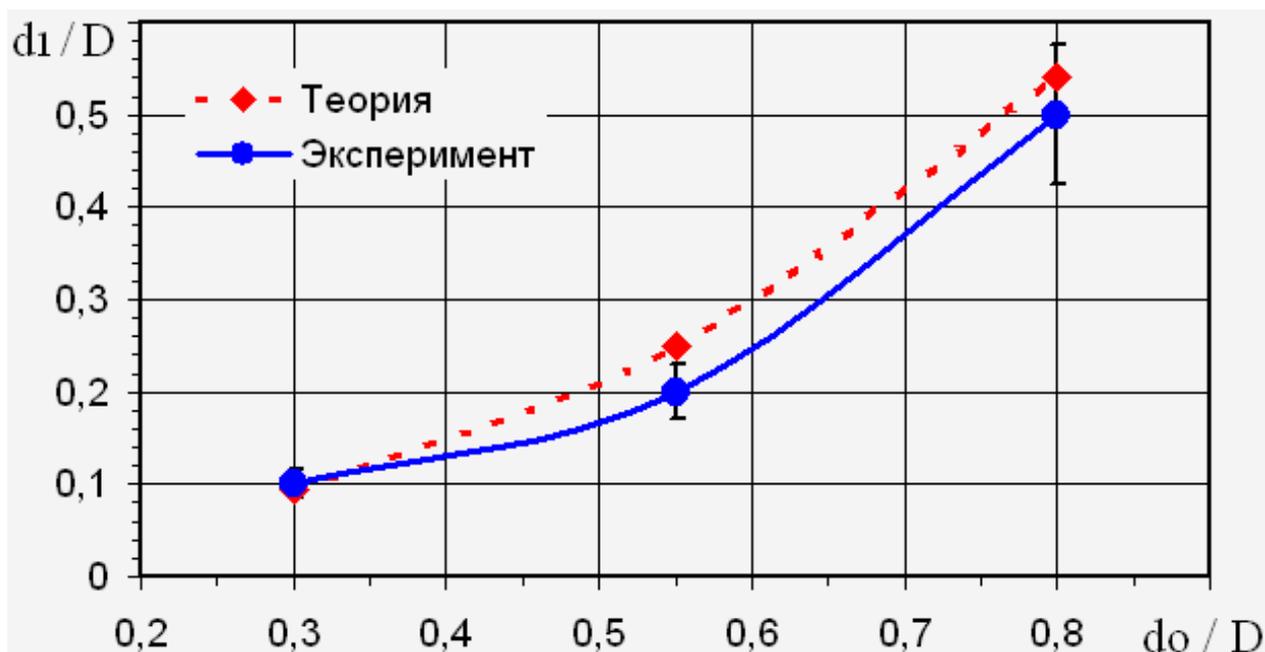


Рисунок 4.4 – Влияние относительного диаметра отверстия исходной заготовки на заков отверстия в процессе протяжки без оправки

#### 4.2 Исследование формоизменения заготовки в процессе протяжки вырезными бойками со скосами

После проведения теоретических исследований была определена эффективная схема протяжки с наибольшим удлинением заготовки, наименьшей заковкой внутреннего отверстия. Эта схема протяжки бойками с углом выреза  $\alpha = 115^\circ$ , углом скосов бойков  $\beta = 10^\circ$  и относительным диаметром заготовки  $d_0 / D = 0,8$ . Необходимо проверить достоверность полученных теоретических данных, сравнив их с экспериментальными.

Для этого проводились экспериментальные исследования на свинцовых моделях с использованием законов геометрического и физического подобия (методика проведения описана в п. 2.2). После протяжки пустотелых заготовок без оправки на различную степень деформации производили сопоставление полученных результатов (рис. 4.5).

Изменения размеров заготовок в процессе экспериментального исследования представлены в таблице 4.2.

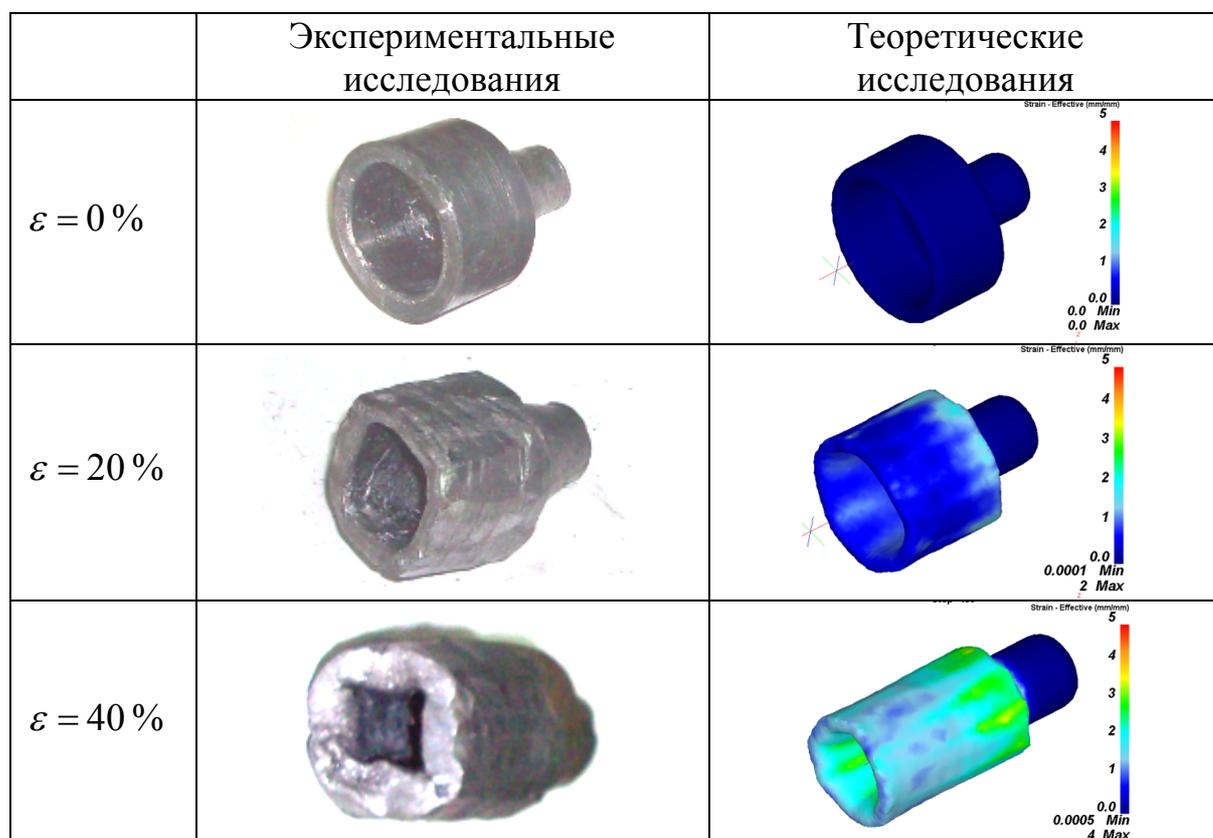


Рисунок 4.5 – Сопоставление экспериментальных и теоретических результатов формоизменения, после протяжки на 40 % вырезными бойками

Таблица 4.2 – Размеры заготовок до и после протяжки без оправки вырезными бойками со скосами

$\alpha$ , град	$\beta$ , град	$a / D$ , %	$\varepsilon = \Delta h / D$	$d_0 / D$	$l_0$ , мм	$d_0^{cp}$ , мм	$h_0$ , мм	$D$ , мм	$V_0^{отв}$ , мм <sup>3</sup>	$l_1^{cp}$ , мм	$D_1$ , мм	$V_1$ , мм <sup>3</sup>	$h_1$ , мм	$d_1^{cp}$ , мм	$S_1 = (D_1 - d_1) / 2$ ,	$\varphi = (l_1 - l_0) / l_0$	$d^{cp} / D$
115°	10°	10	40 %	0,8	27	34	32	45	25000	49,3	27	5000	48,7	11,4	7,8	0,8	0,25
			35 %							40,5	29	7100	46	14	0,5	0,31	
			20 %							32	36	1770	38,3	24,3	5,85	0,19	0,54

На рисунках 4.6–4.7 сравниваются результаты экспериментальных и теоретических исследований при протяжке вырезными бойками со скосами.

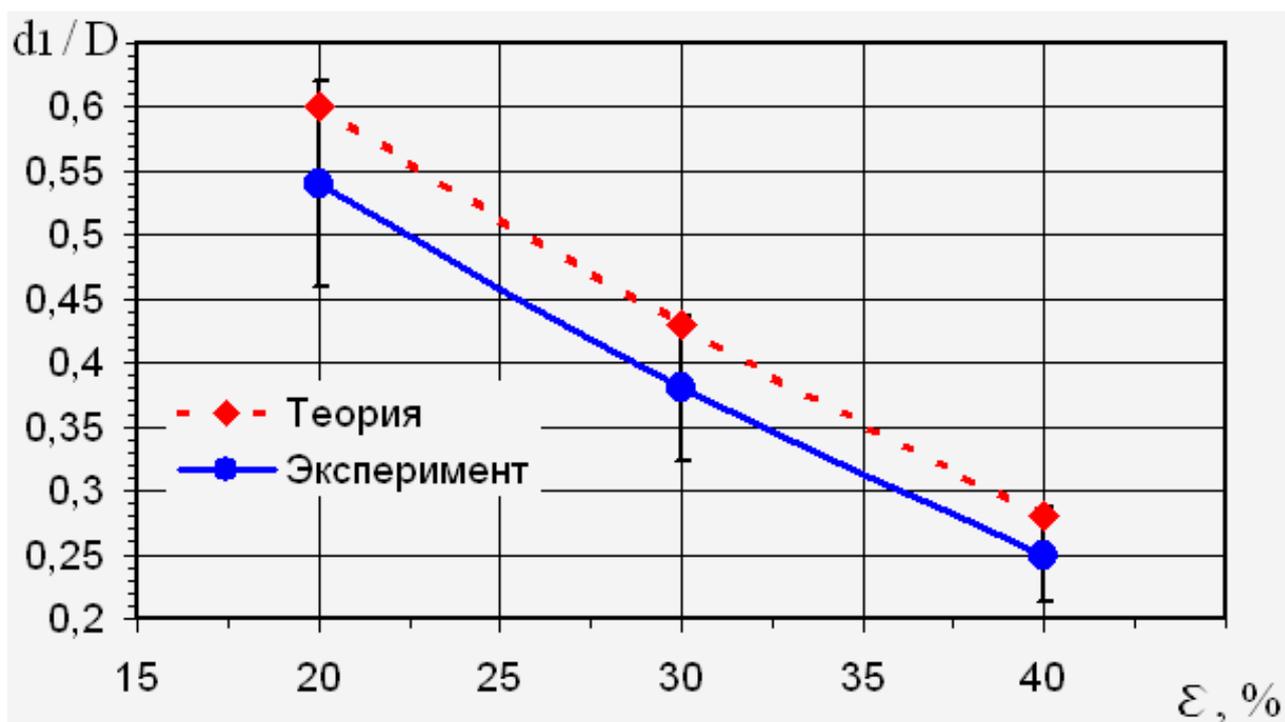


Рисунок 4.6 – Влияние степени деформации на заков отверстия в процессе протяжки без оправки

Для анализа полученных теоретических и экспериментальных данных были построены графики изменения относительного диаметра отверстия от степени деформации (см. рис. 4.6), и графики влияния степени деформации на интенсивность удлинения заготовки в процессе протяжки (см. рис. 4.7) [143].

Анализ полученных результатов позволил установить, что с увеличением степени деформации (обжатия заготовки) степень заковки отверстия увеличивается по линейной зависимости (см. рис. 4.6), что было установлено ранее теоретическими исследованиями. Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили достоверность теоретических данных по измене-

нию размеров отверстия при протяжке вырезными бойками со скосами без оправки с погрешностью 10...15 %.

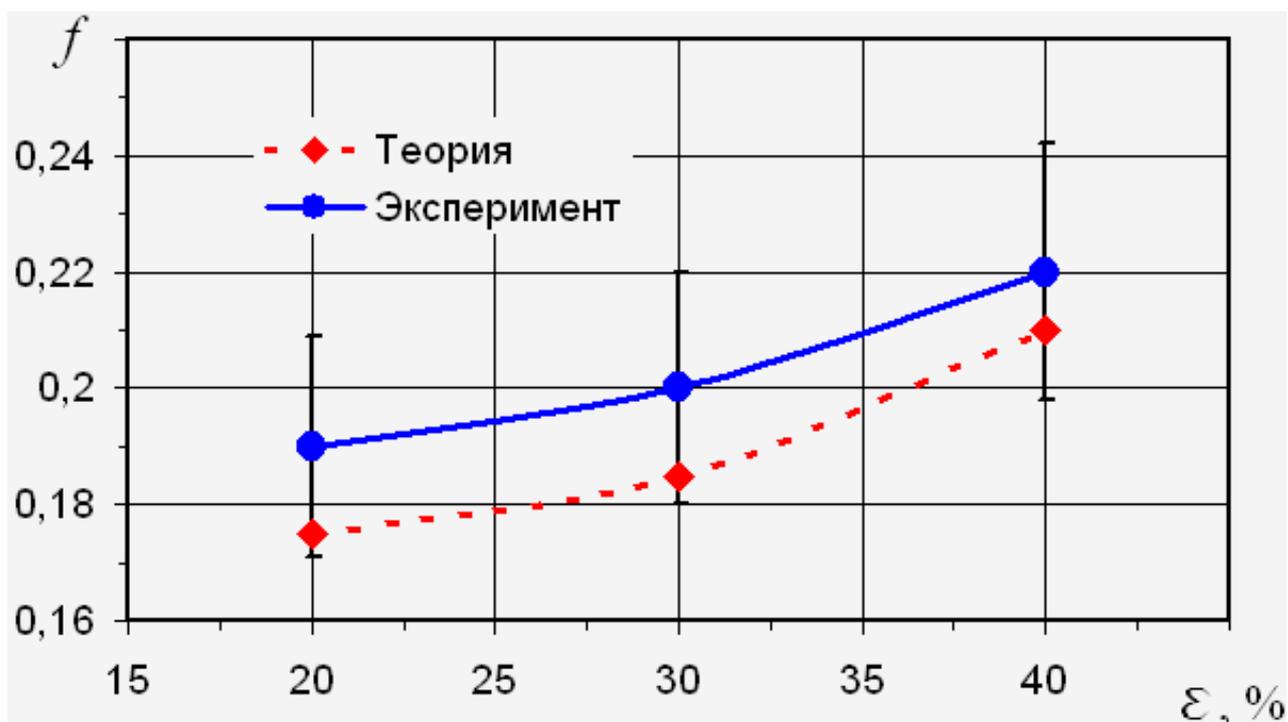


Рисунок 4.7 – Влияние степени деформации на интенсивность удлинения в процессе протяжки без оправки

При увеличении степени деформации интенсивность удлинения увеличивается (см. рис. 4.7). Это приводит к тому, что при обжатии увеличивается толщина стенки заготовки, что усложняет течение металла внутрь. С другой стороны, при уменьшении наружного диаметра уменьшается зазор между бойками, что уменьшает течение металла поперёк оси заготовки. Эти условия приводят к тому, что металлу легче течь вдоль оси заготовки. Этим и объясняется увеличение интенсивности удлинения. Погрешность теоретических и экспериментальных данных составляет 5...8 %.

## Выводы по разделу 4

1. С увеличением степени деформации при протяжке без оправки относительный диаметр отверстия уменьшается линейно, а интенсивность удлинения возрастает линейно (см. рис. 4.6–4.7). Это приводит к тому, что происходит увеличение толщины стенки.

2. Результаты экспериментальных исследований по формоизменению заготовки в процессе ковки без оправки подтверждают результаты теоретического исследования с погрешностью 4...13 %. Объясняется это тем, что в результате протяжки конечная форма отверстия в поковке имеет форму отличную от цилиндрической, что и объясняет погрешности замеров диаметра отверстия заготовки в ходе теоретических исследований.

3. С уменьшением диаметра отверстия исходной заготовки  $d_0 / D$  увеличивается толщина стенки поковки  $S_1 / S_0$ . Экспериментальные результаты, как и теоретические, показали наличие максимума утолщения стенки при относительном диаметре отверстия в заготовке, равного 0,6. Это позволяет сделать вывод о неэффективности данных соотношений размеров заготовки для ковки без оправки. Отклонение экспериментальных данных от теоретических составляет максимум 5%. Полученные зависимости имеют одинаковый характер изменения.

4. Экспериментальные результаты по интенсивности удлинения заготовки в процессе ковки без оправки примерно на 5...8 % меньше теоретических, полученных МКЭ. При этом увеличение удлинения заготовки более интенсивно происходит в экспериментальных образцах.

Результаты исследований 4-го раздела опубликованы в работах [125, 131, 134, 138, 143].

## **5 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОСНАСТКИ ПРОЦЕССОВ КОВКИ БЕЗ ОПРАВКИ ПУСТОТЕЛЫХ ПОКОВОК**

### **5.1 Рекомендации и методика для проектирования новых ресурсосберегающих технологических процессов ковки без оправки**

Результаты, полученные после проведения теоретических и экспериментальных исследований, позволили разработать новый технологический процесс ковки глухонных цилиндров. Отличие данного технологического процесса от существующего заключается в исключении применения оправки при протяжке пустотелых цилиндрических поковок с дном [119]. Для применения данной технологии изготовления глухонных цилиндров на производстве требуется разработка рекомендаций и методики проектирования процесса.

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований позволил установить закономерности напряженно-деформированного состояния полых заготовок в процессе протяжки вырезными бойками со скосами и разработать рекомендации для проектирования технологического процесса ковки полых заготовок с дном [121, 125].

Любой технологический процесс ковки имеет несколько последовательных этапов: составление чертежа поковки, выбор слитка и его формы, разработка режимов нагрева и выбор кузнечных операций. Масса слитка рассчитывается как сумма масс: поковки, угара, отходов, прибыльной и донной частей. Масса поковки рассчитывается через ее объем. Припуски на деталь определяются по ГОСТам. Масса угара металла зависит от режима нагрева и подогрева. В общем случае масса слитка определяется [15]:

$$M_{сл} = \frac{M_{пок} + M_{отх}}{K_{в.г}},$$

где  $M_{пок}$  и  $M_{отх}$  – масса поковки и отхода, соответственно.

Изготовление пустотелых глухонных поволок по новой технологии предполагает несквозную прошивку, поэтому масса отхода равна нулю.

Коэффициент выхода годного [15]:

$$K_{в.г} = \frac{100\% - (П + Д + У)}{100\%},$$

где П – процент прибыльной части слитка (10...15 %);

Д – процент донной части слитка (1...3 %);

У – угар, принимается от 2 до 4 %.

Разработка технологических переходовковки глухонных цилиндров состоит из следующих основных этапов: определения кузнечных операций, последовательности их применения, применяемого инструмента и термомеханических режимов деформирования. Вышеперечисленные параметры зависят непосредственно от формы и размеров изготавливаемой поковки.

Одной из основных особенностей нового технологического процесса является геометрия вырезного бойка. Чтобы получить благоприятное напряженно-деформированное состояние для более интенсивной вытяжки заготовки, как показали результаты, полученные после проведения теоретического и экспериментального исследования, необходимо применять вырезные бойки с углом выреза  $\alpha = 115^\circ$ , углом скоса  $\beta = 10^\circ$  и шириной деформирующей кромки 100...300 мм (рис. 5.1) [130–136].

Идея применения вырезных бойков со скосами заключается в том, что такая геометрия деформирующего инструмента обеспечивает возникновение пластических деформаций в поверхностных слоях заготовки (зона пластической деформации при ковке не проникает вглубь заготовки) и благодаря не-

большим подачам течение металла происходит вдоль оси заготовки, что обеспечивает ее удлинение и исключает интенсивную заковку отверстия.

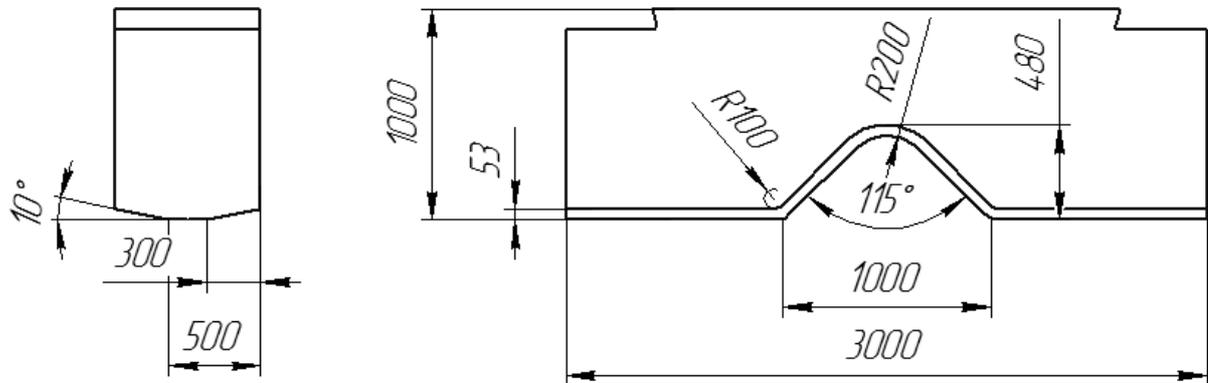


Рисунок 5.1 – Эскиз вырезного бойка со скосом для прессы 100 МН

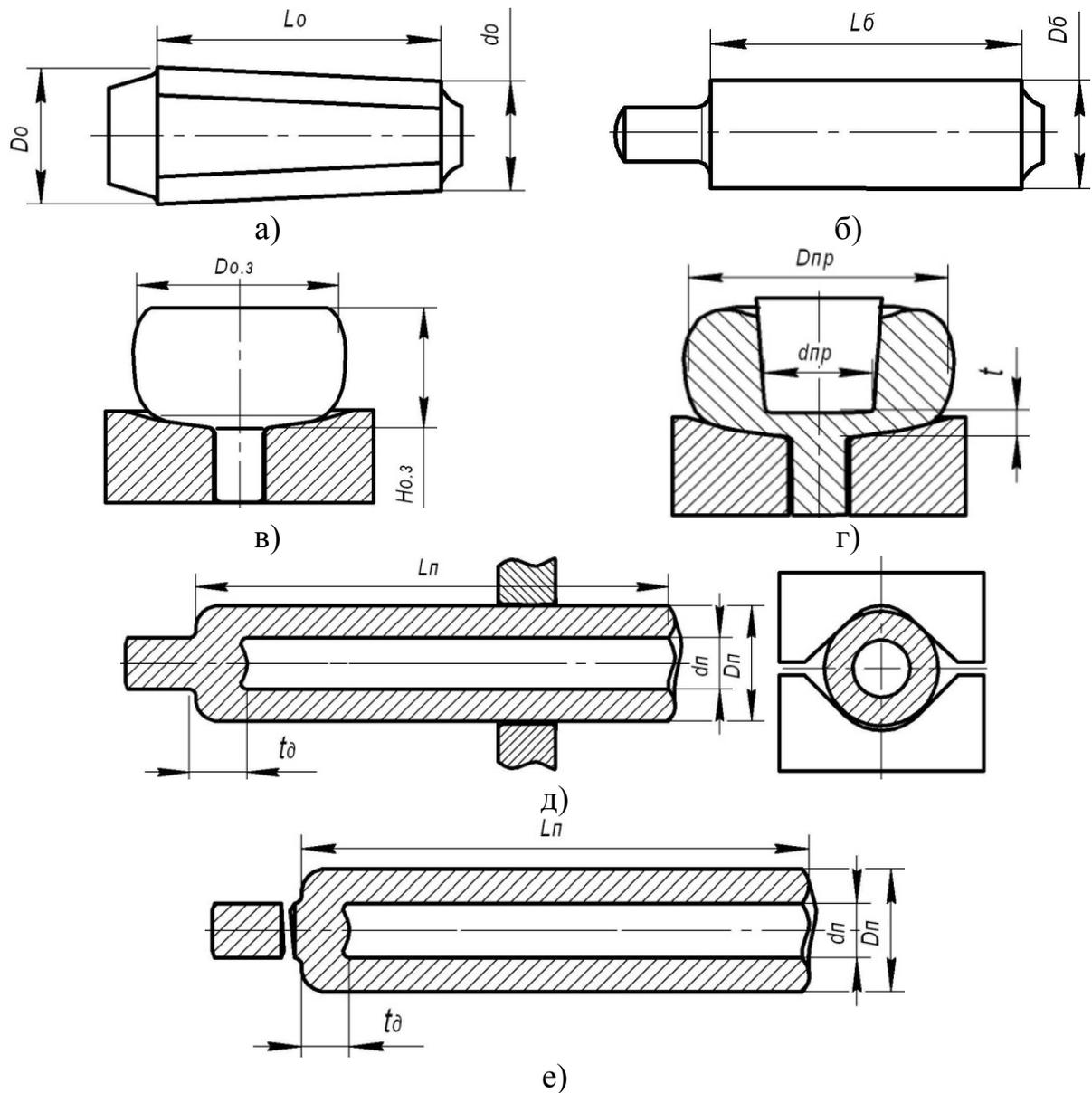
Для обеспечения высокого качества поверхности и исключения образования зажимов при протяжке вырезными бойками было установлено, что обжатие должно составлять не более 10 % от диаметра заготовки, подача 10 %.

Более высокое и равномерное распределение деформаций в заготовке и ее интенсивное удлинение обеспечивает протяжка заготовки в вырезных бойках по схеме: проход → кантовка на  $90^\circ$  → проход → кантовка на  $90^\circ$  → проход → кантовка на  $45^\circ$  → проход.

Новый технологический процесс изготовления глухонных цилиндров включает следующие технологические операции (рис. 5.2):

- нагрев до ковочной температуры слитка (рис. 5.2, а);
- оттяжка цапфы под диаметр нижней осадочной плиты для удержания заготовки во время последующейковки;
- обкатка граней слитка до диаметра  $D_6$  (рис. 5.2, б);
- осадка верхней плоской плитой до высоты Но.з (рис. 5.2, в);
- несквозная прошивка сплошным прошивнем с образованием перемычки  $t = (0,5...0,9) \times t\hat{d}$ , где  $t\hat{d}$  – толщина дна поковки для формирования будущей полости цилиндра (рис. 5.2, г);
- протяжка вырезными бойками со скосами (рис. 5.2, д).

Сплошной прошивень выдавливается из заготовки при протягивании за счет его конусной поверхности, на которую давят осевые силы при ковке. Более того, на первом этапе протяжки прошивень выполняет функцию оправки и уменьшает степень заковки отверстия.



а – кузнечный слиток; б – слиток после биллетировки; в – осадка слитка;  
 г – заготовка после несквозной прошивки; д – протяжка заготовки  
 вырезными бойками со скосами без оправки; е – рубка цапфы

Рисунок 5.2 – Технологические переходыковки цилиндров без оправки

После удаления прошивня заготовка направляется на подогрев, после чего она протягивается до диаметра поковки  $D_n$  (см. рис. 5.2, д). После протягивания полой заготовки с дном без оправки рубится цапфа (рис. 5.2, е). Способ позволяет исключить дополнительные операции: заковывание дна или его заваривание.

Отсутствие оправки способствует заковке отверстия пустотелой заготовки и увеличению толщины стенки поковки, что усложняет проектирование технологического процесса. В этой связи необходимо установить начальные размеры заготовки ( $d_0 / D$ ) от окончательных поковочных размеров ( $d / D$ ) и степени деформации ( $\varepsilon$ ). Полученная графическая зависимость (рис. 5.3) позволяет определять необходимые начальные размеры пустотелой заготовки для получения требуемых конечных размеров поковки, при ковке вырезными бойками с углом выреза  $115^\circ$ , углом скосов выреза  $\beta = 10^\circ$  и подачей 100..300 мм.

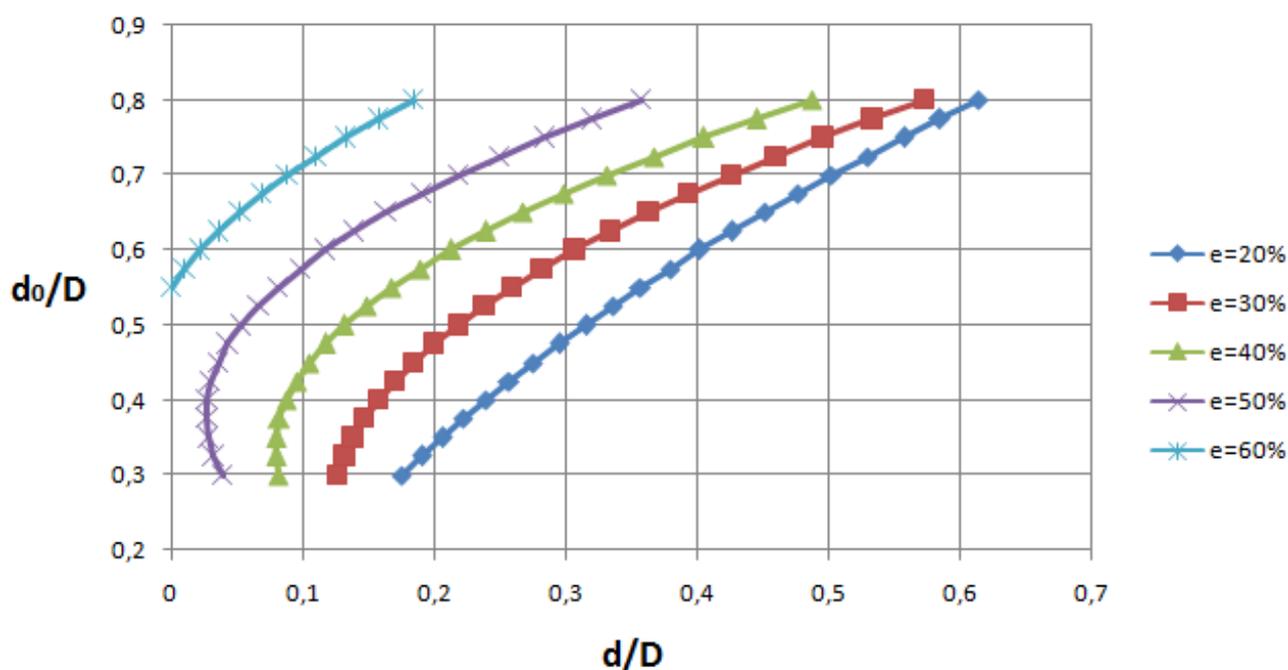


Рисунок 5.3 – Номограмма для определения диаметра отверстия в исходной заготовке до операции протяжки без оправки

## 5.2 Технологический процесс изготовления длинномерных пустотелых заготовок со сквозным отверстием без оправки

В связи с ростом потребностей тяжелого и, особенно, энергетического машиностроения увеличивается спрос на изготовление пустотелых поковок длиной до 15,0 м и более. В то же время технологические процессыковки пустотелых длинномерных поковок типа труб обеспечивают получение их длиной до 7...8 м путем вытяжки на конической оправке осаженной и прошитой заготовки. Более того, длинномерные пустотелые поковки с диаметром отверстия менее 350 мм на практике получить невозможно, так как в этом случае происходит искривление оправки, что делает невозможным её удаление из поковки.

Длинномерные поковки изготовить общепринятым способом практически невозможно из-за короткой длины рабочей части оправки и большого объема выполняемых работ в последнем выносе, что приведет к преждевременному охлаждению заготовки и недокованных на ней участков. Кроме того, изготовление таких длинных поковок протяжкой на удлинённых оправках обусловлено значительным увеличением их массы до 150...200 тонн, а также усложняется снятием поковки с оправки. В этой связи разработанный в работе способковки пустотелых заготовок без оправки может быть применен дляковки длинномерных пустотелых заготовок.

В основу разработки нового технологического процесса изготовления длинномерных пустотелых заготовок поставлена задача повышения эффективностиковки за счет создания благоприятных условий деформирования металла заготовки без использования оправок. Эта задача решается за счет технического приема, заключающегося в том, что заготовку обжимают до поковочных размеров в два этапа. Пример технологииковки пустотелой поковки цилиндра длиной до 15,0 м приведен в таблице 5.1.

Масса поковки ( $M_{\text{ПОК}} = 33000$  кг), масса слитка ( $M_{\text{СЛ}} = 51600$  кг), материал – сталь 35. Эскиз поковки представлен на рисунке 5.4.

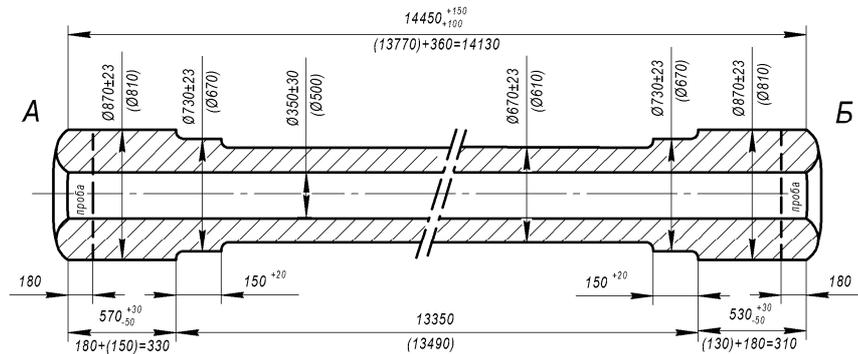
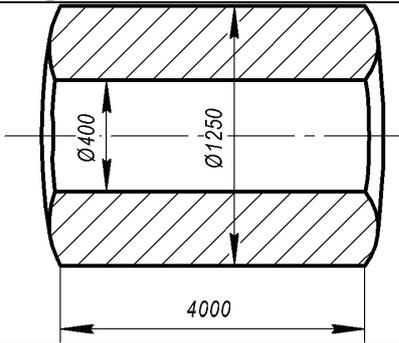
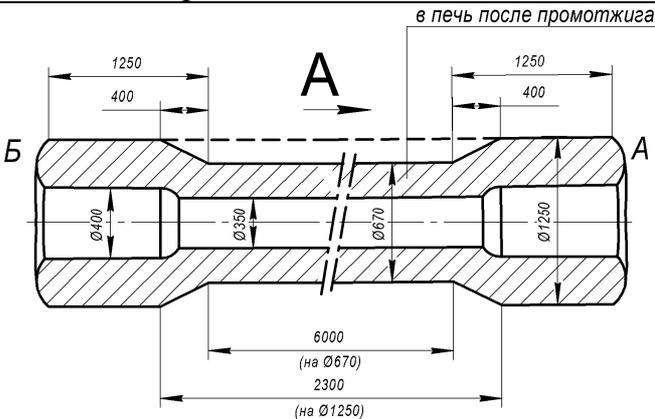
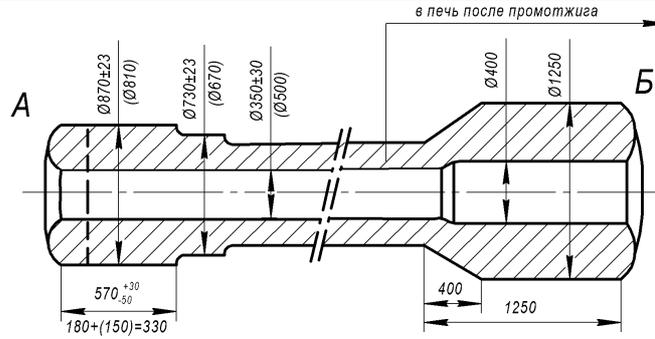


Рисунок 5.4 – Эскиз поковки

Таблица 5.1 – Технологический процессковки длинномерного полого цилиндра без оправки

I нагрев	Интервалковки 1240...800°C
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Выдать слиток из печи.</li> <li>2. Взять манипулятором.</li> <li>3. Сбиллетировать донную часть с утолщением.</li> <li>4. Отрубить поддон.</li> <li>5. Развернуть.</li> <li>6. Сбиллетировать остальную часть на <math>\text{Ø}1390</math>.</li> <li>7. Вырубить блок.</li> <li>8. Посадить в печь.</li> </ol>	<p>Technical drawing of a long cylindrical forging with a diameter of 1390 and a length of 3250. The drawing shows a cross-section with a diameter of 1390 and a length of 3250. The drawing is labeled with '50' and '3250'.</p>
II нагрев	Интервалковки 1240...800°C
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Выдать заготовку из печи.</li> <li>2. Взять гибкой скобой.</li> <li>3. Установить на плиту.</li> <li>4. Присадить по высоте.</li> <li>5. Осадить сферической плитой до <math>H=1700</math>.</li> <li>6. Прошить пустотелым прошивнем <math>\text{Ø}550/330/300</math> мм.</li> <li>7. Обрезать заусенец.</li> <li>8. Взять заготовку на дорн <math>\text{Ø}500/600</math>.</li> <li>9. Выровнять стенки.</li> <li>10. Посадить в печь.</li> </ol>	<p>Technical drawing of a long cylindrical forging with a diameter of 1850 and a height of 1700. The drawing shows a cross-section with a diameter of 1850 and a height of 1700. The drawing is labeled with 'Ø1850' and '1700'.</p>

Продолжение таблицы 5.1

<p>III нагрев</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Выдать заготовку из печи.</li> <li>2. Установить на нижний вырезной боек.</li> <li>3. На дорне <math>\text{Ø}400/500</math> раскатать на <math>\text{Ø}1250</math>.</li> <li>4. Снять с дорна.</li> <li>5. Выправить по оси.</li> </ol>	<p>Интервал ковки <math>1240\dots 800^\circ\text{C}</math></p> 
<p>IV нагрев</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Выдать заготовку из печи.</li> <li>2. Подать к прессу и установить на нижний боек.</li> <li>3. Заковать и обжать середину на <math>\text{Ø}670</math>, <math>L=6000</math>.</li> <li>4. Выправить по оси.</li> <li>5. Отправить в т/отдел на промежуточный отжиг.</li> </ol>	<p>Интервал ковки <math>1240\dots 800^\circ\text{C}</math></p> <p>в печь после промотжига</p> 
<p>Промежуточный отжиг</p>	
<p>V нагрев</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Выдать заготовку из печи.</li> <li>2. Подать к прессу.</li> <li>3. Заковать и протянуть конец «А» на <math>\text{Ø}870</math> с переходом на <math>\text{Ø}730</math> и <math>\text{Ø}670</math>.</li> <li>4. Выправить по оси.</li> <li>5. Концом «Б» посадить в печь.</li> </ol>	<p>Интервал ковки <math>1240\dots 800^\circ\text{C}</math></p> <p>в печь после промотжига</p> 
<p>VI нагрев</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Заковать и протянуть конец «Б» на <math>\text{Ø}870</math> с переходом на <math>\text{Ø}730</math> и <math>\text{Ø}670</math>.</li> <li>2. Выправить по оси.</li> </ol>	<p>Интервал ковки <math>1240\dots 800^\circ\text{C}</math></p> <p>(см. эскиз поковки)</p>

На первом этапе раскатывают заготовку на дорне диаметром более 350 мм до минимально возможной толщины стенки. На втором этапе нагревают и обжимают поочередно концевые участки заготовки, полученной на предыдущем переходе, до поковочных размеров без оправки.

Таким образом, за счет перераспределения объемов деформации металла в последних выносах создана возможность обеспечить благоприятные условия деформирования металла заготовки по всей ее длине, что позволяет произвести отковку длинномерных цилиндров общей длиной в 2 раза больше, чем протяжкой их существующим способом без применения оправки.

### **5.3 Технологический процесс изготовления полых цилиндрических поковок с безоправочным устранением внутренней конусной поверхности**

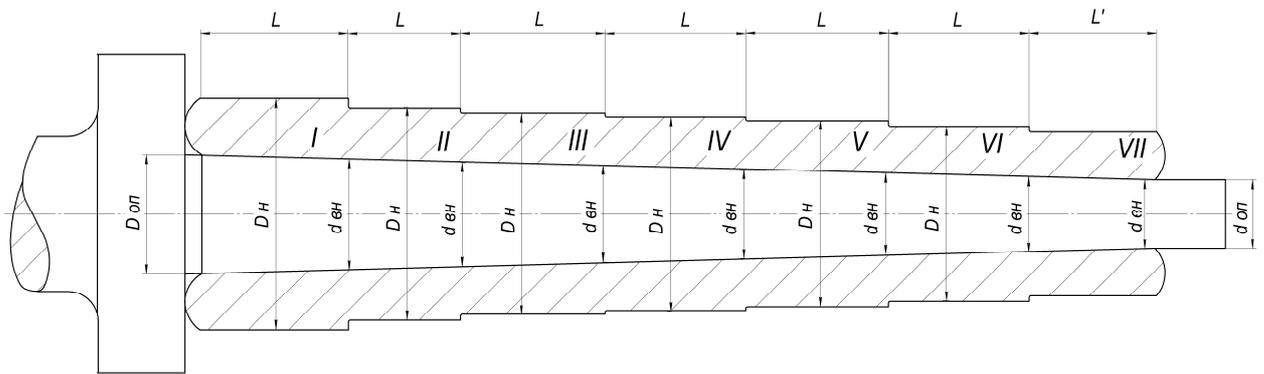
Как известно, крупные полые поковки типа цилиндров изготавливаются по общепринятому способу свободной ковкой на гидравлических прессах путем прошивки, раскатки заготовки на цилиндрическом дорне и протяжки на конической оправке [144]. Недостатком этого способа изготовления полых цилиндрических поковок является повышенный расход металла по внутреннему ее диаметру из-за наличия конусной внутренней поверхности, вызванной ковкой заготовки на конусной оправке в последнем выносе.

В основу разработки нового технологического процесса изготовления полых цилиндрических поковок положена задача – создать способ изготовления полых цилиндрических поковок с устранением внутренней конусности поверхности, отличающийся меньшей трудоемкостьюковки заготовки и обеспечивающий благоприятные условия деформирования металла до получения цилиндрической поковки.

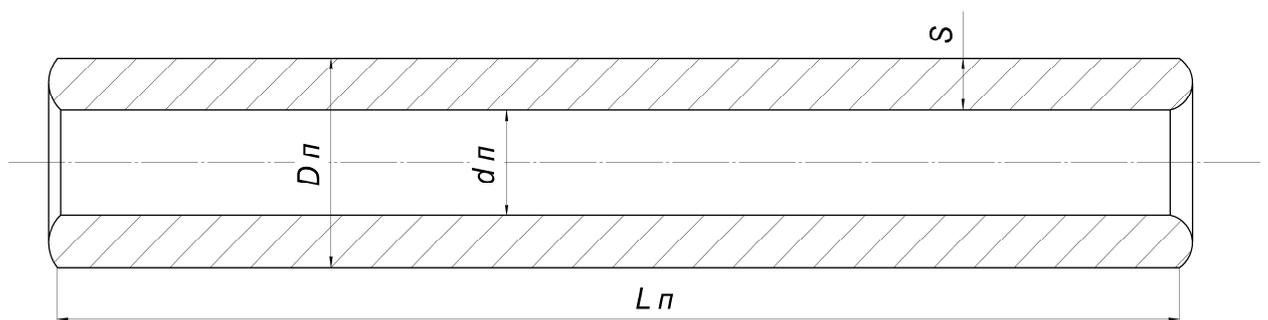
Эта задача решается за счет того, что протяжкой на конической оправке формируют заготовку до получения ступенчатой формы по наружной ее поверхности в виде последовательно уменьшающихся в диаметре уступов, что значительно упрощает процесс протяжки по сравнению с известным способом и тем самым обеспечивается снижение трудоемкостиковки в изготов-

лении поковок типа цилиндров. Кроме того, осуществляют формирование уступов с припусками, близкими к заданной конусности оправки. При последующем обжати их без оправки в последнем выносе происходит заков внутреннего отверстия, при котором в первую очередь часть металла переходит во внутреннюю конусную полость заготовки. После заполнения ее внутренней и наружная поверхности приобретают цилиндрическую форму.

На рисунке 5.5, а показана многоступенчатая заготовка после окончательной протяжки на конической оправке; на рисунке 5.5, б – цилиндрическая полая заготовка, полученная после безоправочного обжима.



а)



б)

Рисунок 5.5 – Способ получения цилиндрической полой заготовки, полученной после безоправочного обжима

Способ и последовательность технологических расчетов осуществляется следующим образом. В начале заготовку предварительно протягивают на конической оправке с диаметром большего типоразмера по сравнению с применяемой оправкой при окончательной ее протяжке после осадки, прошивке и предварительной раскатке (технологические переходы ковки не показаны).

Затем осуществляют окончательную протяжку заготовки на конической оправке с заданными размерами, при которой по наружной поверхности придают ступенчатую форму с уменьшением диаметров на каждом уступе (см. рис. 5.5). При этом длину уступа ( $L$ ) принимают равной ширине используемого бойка. Например, на прессе усилием 100 МН ширина бойка  $B=800$  мм. Длина последнего уступа ( $L'$ ) зависит от раскроя металла и может быть больше или меньше ширины применяемого бойка.

Далее определяют внутренние диаметры заготовки ( $d_{\text{вн}}$ ), полученные на той части оправки, на которой осуществляется протяжка уступов по наружному диаметру, исходя из конусности оправки [133]:

$$d_{\text{вн}} = D_{\text{оп}} - (n \cdot L)/K,$$

где  $D_{\text{оп}}$  – диаметр у бурта оправки;

$n$  – количество обжатых уступов;

$L$  – длина уступа;

$K$  – конусность стандартной оправки ( $K = 1:80$ ).

После этого определяют наружные диаметры уступов ( $D_{\text{н}}$ ) с учетом суммарных припусков, предназначенных для закова внутренней конической поверхности до получения цилиндрической формы по приведенной ниже формуле [133]:

$$D_{\text{н}} = d_{\text{н}} + 2S + (d_{\text{вн}} - d_{\text{оп}}),$$

где  $d_{\text{п}}$  – внутренний диаметр поковки после заковки;

$S$  – минимальная толщина стенки поковки;

$(d_{\text{вн}} - d_{\text{оп}})$  – разность между внутренним диаметром заготовки (оправки), соответствующим для данного уступа, и меньшим диаметром оправки  $d_{\text{оп}}$ .

В результате назначения таких припусков наружная поверхность заготовки приближается по образующей к внутренней конической ее поверхности, что обеспечивает благоприятные условия деформирования металла в последнем выносе. После этого обжимают заготовку без оправки в вырезных или комбинированных бойках с шириной, перекрывающей длину уступов, до заданного наружного и внутреннего диаметров поковки с величиной обжатия за ход пресса 45...15 мм. В процессе обжатия (закова) происходит изменение заготовки с конической внутренней полости до получения цилиндрической формы при незначительном удлинении заготовки.

Пример отковки пустотелой поковки цилиндра приведен в таблице 5.2. Масса поковки ( $M_{\text{ПОК}}=12300$  кг), масса слитка ( $M_{\text{СЛ}}=19200$  кг), материал – сталь 35.

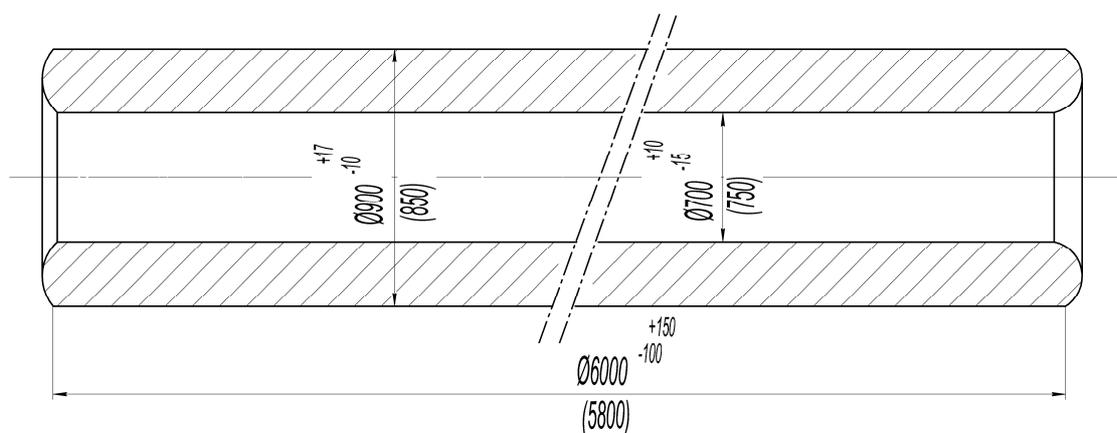
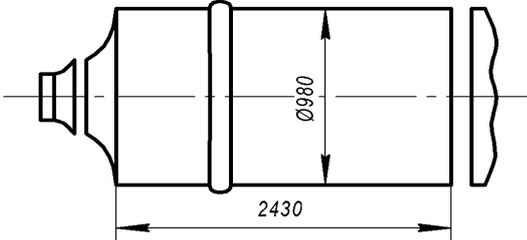
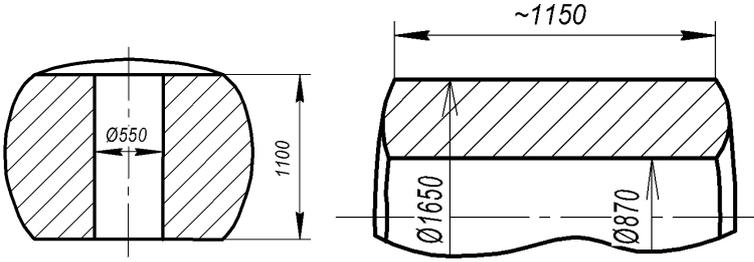
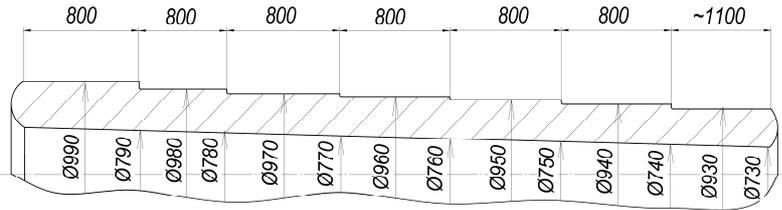


Рисунок 5.6 – Эскиз поковки

Таблица 5.2 – Технологический процессковки полых цилиндрических поковок с устранением внутренней конусной поверхности

Наименование операций	Эскизы переходов
<ol style="list-style-type: none"> <li>Сбиллетировать слиток на <math>\varnothing 980</math> мм с утолщением.</li> <li>Вырубить блок с разворотом.</li> <li>Посадить в печь.</li> </ol>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>Осадить блок сферической плитой до <math>H=1100</math> мм.</li> <li>Прошить пустотелым прошивнем <math>\varnothing 550/300/270</math> мм.</li> <li>Раскатать на дорне до <math>\varnothing_{\text{вн}}=870</math> мм.</li> <li>Посадить в печь.</li> </ol>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>Одеть заготовку на оправку <math>\varnothing 800/700</math> мм.</li> <li>Протянуть заготовку согласно эскизу.</li> <li>Снять с оправки, выправить по оси.</li> <li>Посадить в печь.</li> </ol>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>Взять заготовку манипулятором и кантователем.</li> <li>Легкими обжатиями 45...15 мм заковать до поковочных размеров без оправки.</li> <li>Выправить по оси.</li> <li>Маркировать.</li> <li>Передать в термоотдел.</li> </ol>	<p>(см. эскиз поковки)</p>

Таким образом, предлагаемая схемаковки полых поковок типа цилиндров устраняет коническую поверхность на внутреннем диаметре поковки, а также значительно уменьшает трудоемкостьковки заготовки по сравнению с известными способами.

#### 5.4 Технологический процесс изготовления тонкостенных длинномерных труб на гидравлических прессах

Широкое распространение в кузнечно-прессовом производстве получил способковки полых поковок типа цилиндров и труб протяжкой с оправкой, при котором производят протяжку заготовки на конической оправке с внутренним водяным охлаждением [146]. По данному способу ковку длинных цилиндров ведут попеременно с разных концов, чтобы не допускать преждевременного охлаждения концов заготовки и облегчить снятие поковки с оправки, а сам процесс ковки является сложным и трудоемким.

В изготовлении полых цилиндрических поковок на тонкостенных изделиях увеличивают ковочный припуск до получения ее стенки не менее 100 мм (см., например ГОСТ 7062–90, п. 18), т. е. изделие с чистовой толщиной стенки закрывается напусками металла, что приводит к увеличению расхода металла и трудоемкости их изготовления. Следовательно, изготовить известным способом полые цилиндры толщиной менее 100 мм и длиной до 8,0 м практически невозможно вследствие сложности снятия оправки с поковки из-за интенсивного охлаждения заготовки в последнем выносе.

В основу разработки нового технологического процесса поставлена задача – повысить эффективность ковки длинных цилиндров при одновременном уменьшении толщины их стенки за счет создания благоприятных условий деформирования металла заготовки, а, следовательно, сокращения расхода металла. Эта задача решается за счет того, что заготовку в последнем выносе протягивают не по всей длине, а только на отдельной ее части с диаметрами меньших размеров, и ведут ковку последовательно по частям. При этом после каждого поочередного обжатия отдельных участков поковки на заданные размеры по сечению и промежуточной длине примерно 2,0 м, перемещают заготовку на длину, соответствующую длине предыдущего обжатого участка поковки, что повышает эффективность ковки. В результате это-

го обеспечиваются благоприятные условия деформирования металла, а также возможность сбросить повышенное температурное поле заготовки для отковки поковок с толщиной стенки менее 100 мм и, соответственно, протягивать их значительно длиннее, а, следовательно, сокращает расход металла по сравнению с известным способом при изготовлении поковок на водоохлаждаемых оправках.

В результате обжатия заготовки по частям с ограниченной рабочей длиной внутренняя ее поверхность приобретает ступенчатую форму в виде чередующихся участков с коническими поверхностями и уступами, образованными в месте перехода от одного участка к другому, высота которых определяется как разность диаметров внутри поковки между наибольшим и наименьшим ее диаметрами. При этом коническая внутренняя поверхность на чередующихся участках имеет меньшие размеры диаметров и короче по длине, в отличие от известного способа, что также уменьшает расход металла и трудоемкость при механической обработке.

Основным преимуществом предлагаемой схемыковки при изготовлении полых цилиндрических поковок является то, что в процессе вытяжки сравнительно длинных поковок в случае охлаждения металла до температуры окончанияковки возможно производить подогрев незаконченных поковок до температуры металла 950...1000 °С. Такое продолжениековки поковок в последнем выносе может быть использовано при изготовлении поковок из высоколегированных сталей и сплавов, у которых ограничена величина обжатий за один ход прессы и за один вынос. На рисунке 5.7, а показана предварительно протянутая заготовка на конической оправке; на рисунке 5.7, б – окончание обжатия заготовки (оправка применяется только для удерживания заготовки); на рисунке 5.7, в – цилиндрическая полая заготовка, полученная после протяжки без оправки.

По сравнению с известным способомковки полых поковок типа цилиндров, были определены технико-экономические преимущества предложенного решения:

- упрощена схема снятия оправки с откованной части заготовки;
- расширилась возможностьковки цилиндров с толщиной ее стенки менее 100 мм, что позволяет получить исходную поковку большей длины;
- сокращены потери металла за счет уменьшения напусков на стенке поковки и конической внутренней поверхности поковки. Примерковкипустотелой поковки цилиндра приведен в таблице 5.3.

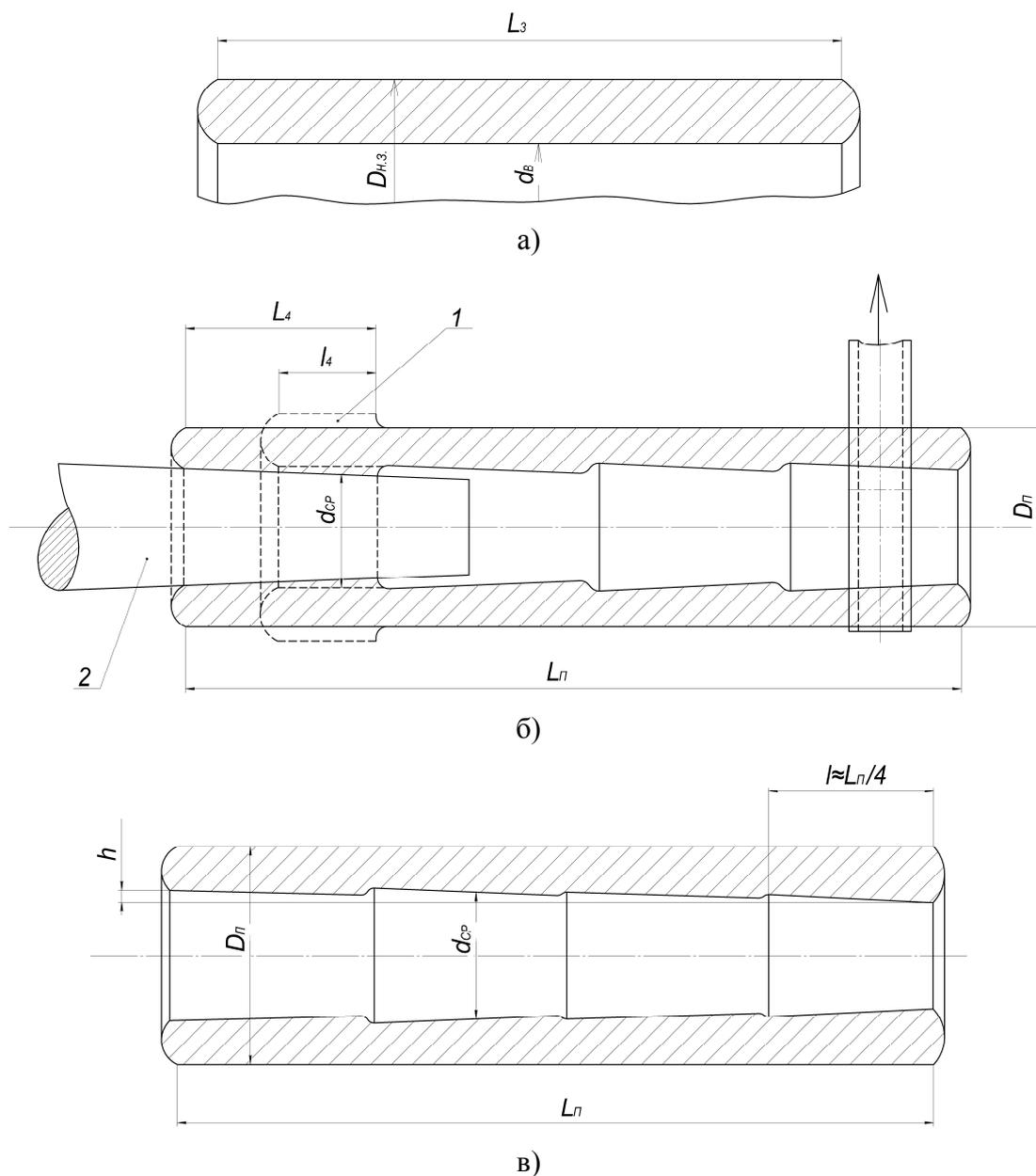


Рисунок 5.7 – Способ окончательнойковки тонкостенных цилиндров без оправки

Масса поковки ( $M_{\text{П}} = 14000$  кг), масса слитка ( $M_{\text{СЛ}} = 22000$  кг), материал – сталь 35. Эскиз поковки представлен на рисунке 5.8.

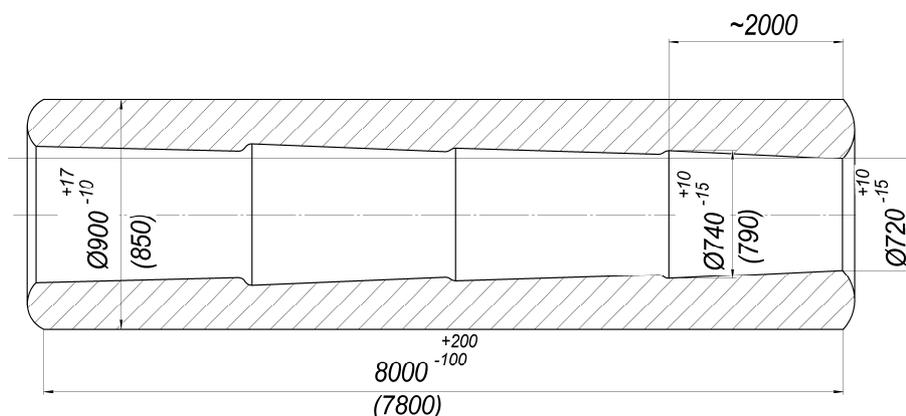
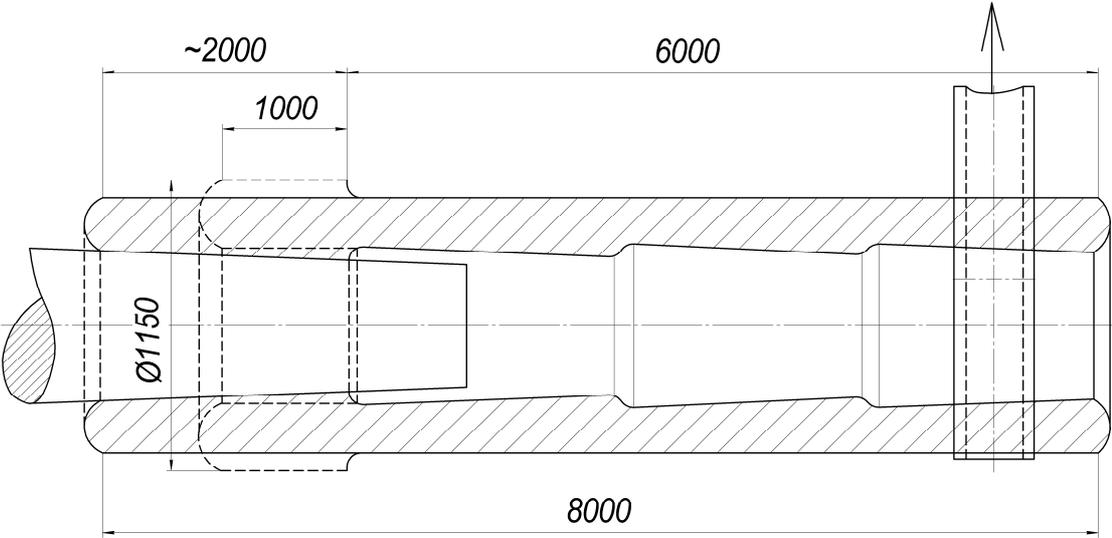


Рисунок 5.8 – Эскиз поковки

Таблица 5.3 – Технологический процессковки полых тонкостенных длинномерных труб на гидравлических прессах

Наименование операций	Эскизы переходов
<ol style="list-style-type: none"> <li>Сбиллетировать слиток с утолщением.</li> <li>Вырубить блок с разворотом.</li> <li>Посадить в печь.</li> </ol>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>Осадить блок сферической плитой до <math>H=1200</math> мм.</li> <li>Прошить пустотелым прошивнем <math>\text{Ø}550/300/270</math> мм.</li> </ol>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>Раскатать на дорне на <math>\text{Ø}1150</math> мм, <math>l=4000</math> мм.</li> <li>Снять с дорна.</li> <li>Посадить в печь.</li> </ol>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>Установив торец заготовки на тонкий конец оправки <math>\text{Ø}730</math> мм.</li> <li>Прихватить с торца заготовки <math>l=1000</math> мм, заковать и протянуть на <math>\text{Ø}900</math> мм, <math>L=2000</math> мм.</li> <li>Сдвинуть заготовку от обжатого уступа на <math>L=2000</math> мм, прихватить на заготовке <math>l=1000</math> мм, заковать и протянуть на <math>\text{Ø}900</math> мм, <math>L=2000</math> мм.</li> </ol>	

Продолжение таблицы 5.3

	
<p>4. Сдвинуть заготовку от обжатого уступа с общей длиной <math>l=4000</math> мм на <math>L=2000</math> мм, прихватить на заготовке <math>l=1000</math> мм, заковать и протянуть на <math>\text{Ø}900</math> мм, <math>l=2000</math> мм (эскизы переходов средней части заготовки не показаны).</p> <p>5. Переместить заготовку от обжатого уступа с общей длиной <math>l=6000</math> мм на <math>L=2000</math> мм, заковать и протянуть остальную часть заготовки (<math>l=1000</math> мм) на <math>\text{Ø}900</math> мм, <math>L=2000</math> мм.</p> <p>6. Выправить по оси.</p> <p>7. Маркировать.</p> <p>8. Передать в термоотдел.</p>	<p>(см. эскиз поковки)</p>

### 5.5 Технологический процесс изготовления пустотелых цилиндров с заковом дна

В номенклатуре многих предприятий тяжелого машиностроения имеются полые изделия со ступенчатой формой по наружному и внутреннему диаметрам. Ковка таких поковок производится с напуском металла со стороны уступа внутреннего диаметра, и изготавливаются они методом протяжки на

стандартных оправках. В процессе протяжки заготовки на оправке не представляет особых трудностей выполнить по наружному её диаметру ступенчатую форму поковки, в то время как по внутреннему диаметру происходит формирование гладкой формы отверстия с диаметром, равным наружному диаметру оправки. Дляковки цилиндров с диаметром чистового отверстия свыше 1250 мм, согласно ГОСТ 7062-90, необходимо иметь стандартные оправки диаметром от 1150 до 1400 мм. При этом изготовление таких оправок диаметром 1150 мм и более связано со значительными трудозатратами, так как они имеют значительную массу; для их транспортировки необходимо иметь оборудование большей грузоподъёмности, которым не всегда располагают кузнечно-прессовые цехи. В связи с указанными обстоятельствами дляковки крупных поковок типа цилиндров не всегда предоставляется возможность выполнить отверстие в поковке с требуемыми размерами в соответствии с ГОСТ 7062-90. Вышеотмеченные недостатки приводят к увеличению расхода металла и трудоемкости при механообработке полых поковок типа цилиндров. Учитывая сложную конфигурацию поковки (рис. 5.9) и особенности технологического процесса её изготовления, задача совершенствования технологического процесса производства крупных поковок типа цилиндров со ступенчатой формой по наружному и внутреннему диаметрам решается в два этапа:

– на первом этапе рассматривается возможность изготовления полых цилиндров со ступенчатой формой по наружному диаметру путём раскатки заготовки на оправке (дорне) до получения поковочных размеров;

– на втором этапе – формирование ступенчатой формы поковки по внутреннему диаметру путём закова одной из ступеней заготовки.

Суть раскатки поковок ступенчатой формы на первом этапе заключается в том, что в процессе предварительной протяжки производят формирование ступеней поковки на стандартной оправке. При этом заготовке придаётся форма, аналогичная форме поковки, а в процессе раскатки форма заготовки

не меняется до получения поковочных размеров, изменяются только диаметры раскатываемых ступеней и их длина.

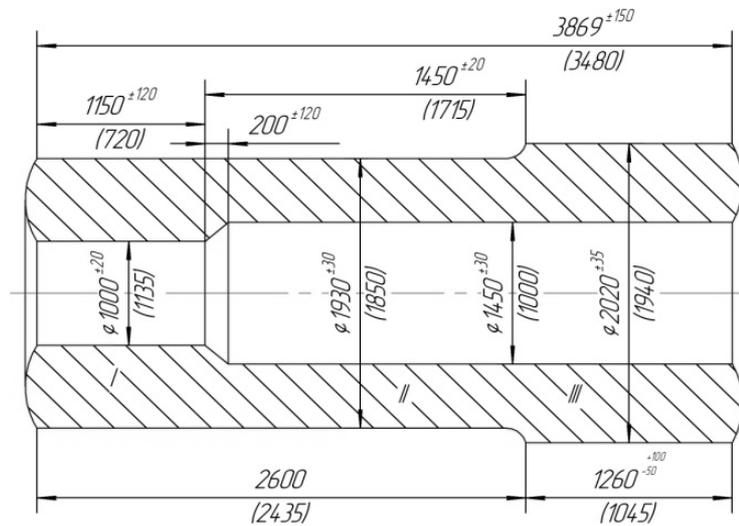


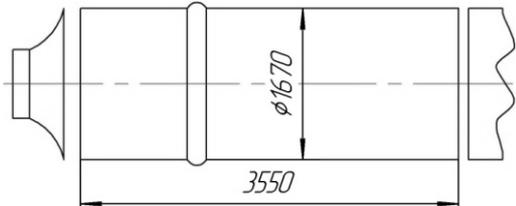
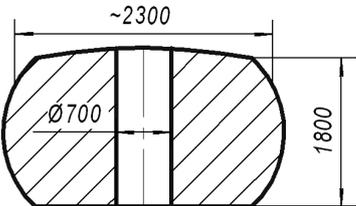
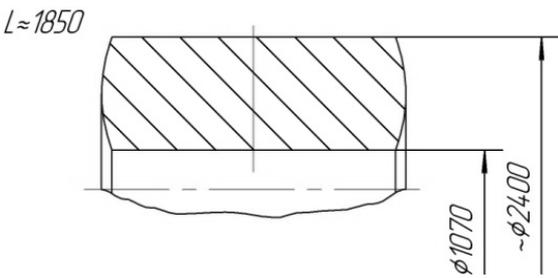
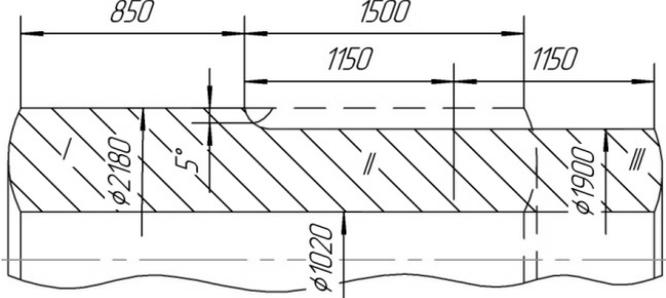
Рисунок 5.9 – Эскиз поковки

При разработке технологииковки поковок под ступенчатую раскатку необходимо учитывать уширение по диаметрам и длине заготовки из расчёта, что при раскатке внутреннего диаметра на каждые 300 мм уширение наружного диаметра составляет 100 мм, а по длине – до 10 мм.

На втором этапе осуществляют формирование ступенчатой формы поковки по внутреннему диаметру путём закова без оправки одной из ступеней заготовки. При этом сечение заготовки до закова должно быть в 1,6...1,8 раза больше сечения после закова. При закове большое влияние имеет толщина стенки, причём, чем больше толщина стенки, тем больше металла течёт в длину, т. е. требуется большее сечение для закова. Поэтому расчёт размеров заготовки на данном этапековки является одним из важных моментов закова концевого участка поковки. Сочетание операций ступенчатой раскатки заготовки с последующим заковом концевого участка до получения выступа по внутреннему диаметру поковки позволяет получить поковку новой конфигурации, приблизив её по форме и размерам к чистовым размерам детали. Это в значительной мере сокращает расход металла и трудоёмкость ме-

ханообработки по сравнению с предыдущим способом изготовления полых поковок типа цилиндров. Кроме того, по предложенному решению при изготовлении крупных поковок типа цилиндров исключается необходимость в изготовлении тяжеловесных оправок, а также расширяет номенклатуру изготовления поковок, как по конфигурации, так и по диаметрам. Новый технологический процессковки поковок типа корпуса гидроцилиндра приведен в таблице 5.4. Масса поковки ( $M_{\text{пок.}}=52500$  кг), масса слитка ( $M_{\text{сл.}}=82000$  кг), материал – сталь 45.

Таблица 5.4 – Новый технологический процессковки поковки «Корпус гидроцилиндра»

Наименование операций	Эскизы переходов
1. Сбиллетировать слиток с разворотом. 2. Вырубить блок с разворотом. 3. Посадить в печь.	
1. Осадить блок сферической плитой до $H=1800$ мм. 2. Прошить пустотелым прошивнем $\varnothing 700 / 400$ мм. 3. Посадить в печь.	
1. Выровнять стенки раскаткой на дорне до $\varnothing_{\text{ВН}} = 1070$ мм. 2. Посадить в печь.	
1. Протянуть на $\varnothing 2180$ мм, $l \approx 2500$ мм. 2. Разметить и подсесть. 3. Обжечь участки II и III на $\varnothing 1900$ мм, $l \approx 2300$ мм. 4. Разметить.	

Продолжение таблицы 5.4

<p>5. Обжать середину с утолщением на <math>\varnothing 1810</math> мм, <math>l \approx 1200</math> мм.</p> <p>6. Выправить по оси.</p> <p>7. Посадить в печь.</p>	
<p>1. Установить бойки шириной <math>B = 1200</math> мм.</p> <p>2. Раскатать последовательно части I–II–III согласно эскизу с величиной обжатия 40...50 мм за ход прессы.</p> <p>3. Править эллипс.</p> <p>4. Заковать концы в меру (участок I на <math>\varnothing 2300</math> мм, участок III на <math>\varnothing 2020</math> мм), выправить по оси.</p>	
<p>1. Выдать заготовку из печи.</p> <p>2. Участок I равномерными обжатиями заковать и протянуть в меру на <math>\varnothing 1930</math> мм.</p> <p>3. Обжать утолщения в меру на <math>\varnothing 1930</math> мм.</p> <p>4. Выправить по оси.</p> <p>5. Маркировать.</p> <p>6. Передать в термоотдел.</p> <p>7. Контроль СТК.</p>	<p style="text-align: center;">СМ. ЭСКИЗ ПОКОВКИ</p>

Следует отметить, что в номенклатуре многих заводов имеются пустотелые поковки типа цилиндров со сравнительно небольшими диаметрами до 100 мм на концевых участках поковки. В этих случаях рационально такие концевые участки поволоков заковывать в вырезных бойках равномерными

обжатыми до нуля без оправки, т. е. до соприкосновения стенок поковки по внутреннему их диаметру (рис. 5.10 и 5.11).

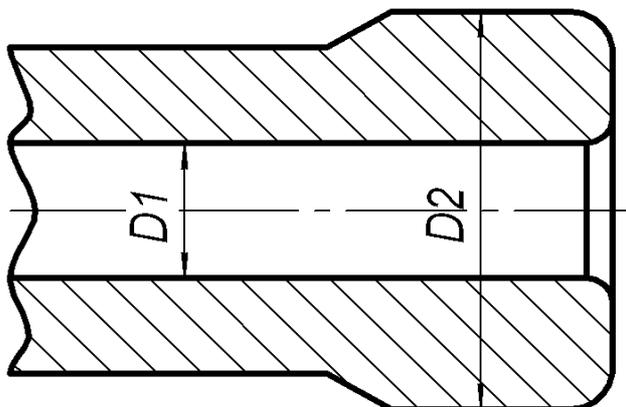


Рисунок 5.10 – Сечение до закова

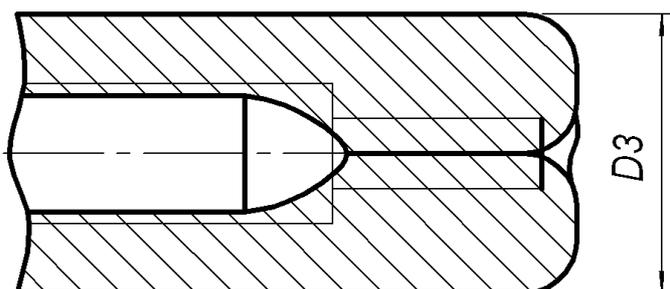


Рисунок 5.11 – Сечение после закова

Для полного закова отверстия сечение фланца заготовки определяется исходя из нижеследующего равенства, полученного из условия постоянства объёма дна [133]:

$$\frac{0,785(D_2^2 - D_1^2)}{0,785D_3^2} = 2,2...2,3$$

Это в значительной мере уменьшает расход металла и трудоёмкость их механообработки и повышает качество изготавливаемых изделий.

## 5.6 Промышленная апробация процессаковки без оправки

При длине поковок 6 000 мм и диаметре отверстия 350 мм с толщиной стенки 80 мм применение оправки осложнено её значительным разогревом, а соответственно, искривлением в процессе деформирования. Это в свою очередь приведет к невозможности извлечения оправки из поковки.

Более того, толщина стенки пустотелой заготовки менее 100 мм будет приводить к интенсивному охлаждению заготовки на оправке, что потребует увеличения числа нагревов пустотелой заготовки. В этой связи целесообразным представляется ковка пустотелой заготовки без оправки.

Используя разработанные рекомендации по процессуковки пустотелых заготовок без оправки были разработаны новые технологические процессыковки и произведена апробация в производственных условиях ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» при ковке 2 поковок «Труба». Материал слитка – сталь 15Х1М1Ф и 16ГС, масса слитков 21 000 кг.

После осадки вырубленного из слитка блока (рис. 5.12) заготовка прошивалась сплошным прошивнем (рис. 5.13).



Рисунок 5.12 – Осадка блока



Рисунок 5.13 – Прошивка осаженной заготовки

После раскатки на дорне (рис. 5.14) производилась ковка трубы без оправки (рис. 5.15).



Рисунок 5.14 – Предварительная раскатка для увеличения внутреннего диаметра

Для протяжки использовались вырезные бойки с величиной подачи 0,1 от диаметра заготовки. Полученная поковка представлена на рисунке 5.16.



Рисунок 5.15 – Протяжка вырезными бойками



Рисунок 5.16 – Полученная поковка

Ковка без оправки привела к увеличению волнистости на внутренней поверхности, что потребовало назначения на эту поверхность двойного припуска на механическую обработку. Однако полученная пустотелая заготовка соответствует требованиям чертежа поковки.

Отсутствие оправки снизило интенсивность охлаждения заготовки, что позволило произвести ковку пустотелой заготовки за один нагрев. Послековки и нормализации с отпуском были определены механические свойства на тангенциальных образцах и проведен ультразвуковой контроль (табл. 5.5 и 5.6).

Таблица 5.5 – Результаты механических испытаний на заготовке «Труба» из стали 15X1M1Ф после нормализации с отпуском

Положение образца	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	УЗК
		$\geq 314$	491–657	$\geq 18$	50	$\geq 39,2$
Тангенциальное	от 341 до 460	от 552 до 646	от 19 до 26	от 70 до 77	от 123 до 277	Соответствует

Таблица 5.6 – Результаты механических испытаний на заготовке «Труба» из стали 16ГС после нормализации с отпуском

Положение образца	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	УЗК
		$\geq 294$	$\geq 491$	$\geq 18$	40	$\geq 58,9$
Тангенциальное	от 307 до 359	от 494 до 540	от 23 до 31	от 65 до 76	от 189 до 277	Соответствует

Полученные механические свойства и результаты по УЗК соответствуют требованиям заказчика. Это подтверждает положительное влияние нового технологического процессаковки пустотелых заготовок на качество получаемой продукции. В результате проведенного промышленного апробирования были подтверждены разработанные в работе рекомендации по определению диаметра в исходной заготовке. Припуск по внутреннему отверстию поковки послековки без оправки не превышал двойного припуска. При этом была

устранена конусность внутреннего отверстия. В итоге поковка, откованная без оправки, по массе отличалась на 3 % от массы поковки откованной по базовой технологии. Таким образом, увеличенный припуск по внутренней поверхности отверстия (за счёт волнистости), перекрывает конусность отверстия.

В результате внедрения новых технологических процессовковки цилиндров без оправки был получен экономический эффект: на ПАО «НКМЗ» с учетом долевого участия составил 576 000 грн. по уровню цен 2015 г, а на ПАО «ЭМСС» 175 000 грн. по уровню цен 2014 г. Расчет экономического эффекта приводится в приложении В.

### **Выводы по разделу 5**

1. Обобщены результаты исследований для проектирования новых технологических процессовковки пустотелых заготовок без оправки вырезными бойками со скосами. Разработана методика проектирования технологических процессовковки, которая заключается в определении диаметра отверстия в заготовке перед протяжкой без оправки в зависимости от диаметра отверстия в поковке и степени деформации.

2. Подтверждены в производственных условиях рекомендации по геометрии оснастки и механическим режимамковки для реализации технологического процессаковки без оправки пустотелых заготовок. Ковку без оправки целесообразнее производить вырезными бойками с углом выреза  $115^\circ$  и углами скосов  $10^\circ$ . Величина подачи должна составлять 0,1 от диаметра заготовки, обжатие за нажим не более 10 %, а последовательностьковки: проход  $\rightarrow$  кантовка на  $90^\circ$   $\rightarrow$  проход  $\rightarrow$  кантовка на  $90^\circ$   $\rightarrow$  проход  $\rightarrow$  кантовка на  $45^\circ$   $\rightarrow$  проход.

3. Разработаны новые технологические процессыковки пустотелых заготовок без оправки с применением в качестве деформирующего инструмента вырезных бойков со скосами.

4. Апробация результатов исследований в производственных условиях ПАО «НКМЗ» позволила подтвердить разработанные рекомендации по формоизменению пустотелой заготовки в процессековки без оправки вырезными бойками со скосами. На ПАО «НКМЗ» внедрена новая технологияковки пустотелых заготовок без оправки. В результате на 25...30 % повысилась производительность процессаковки, за счет получения цельнокованых заготовок, а число нагревов снизилось на 15...25 % за счёт снижения скорости охлаждения приковке без оправки. Качество полученных поковок соответствует требованиям заказчика.

5. Установленные в работе решения расширили технологические возможности процессаковки пустотелых заготовок с дном и со сквозным отверстием. Экономический эффект от внедрения новых технологических процессовковки пустотелых заготовок на ПАО «НКМЗ» с учетом долевого участия составил 576 000 грн. по уровню цен 2015 г., а на ПАО «ЭМСС» 175 000 грн. по уровню цен 2014 г.

Результаты исследований 5-го раздела опубликованы в работах [119, 121, 125, 130–136].

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основании литературного обзора было установлено, что существует востребованность в получении цельнокованных пустотелых заготовок с дном. Такие поковки на сегодняшний день изготавливаются сварнокованными. Наличие сварного шва со стороны дна детали снижает усталостную прочность детали, что существенно снижает её срок службы. Способыковки без оправки пустотелых заготовок на гидравлических прессах применимы крайне редко. Это обусловлено отсутствием технологических рекомендаций по формоизменению заготовки в процессековки без оправки. Необходимо установить влияние размеров заготовки и геометрии инструмента на заковку отверстия в процессековки без оправки. Разработана методика исследований для определения размеров отверстия при протяжке пустотелых заготовок без оправки. Предложенная методика заключалась в определении среднего диаметра отверстия по известному объёму и глубине отверстия.

2. Теоретические исследования позволили установить, что с увеличением исходного диаметра отверстия удлинение заготовки в процессе протяжки увеличивается и уменьшается степень заковки отверстия. Рекомендуемая подача для интенсивной вытяжки заготовки и уменьшения степени заковки отверстия должна быть в диапазоне  $(0,1...0,2)D$  от диаметра заготовки. Предложен новый параметр оценки интенсивности удлинения поковки, который позволил оценить степень заковывания осевого отверстия на основе изменения площади поперечного сечения пустотелой заготовки в процессековки.

3. С использованием МКЭ была установлена эффективная геометрия инструмента, в которой вырезные бойки имели угол выреза  $115^\circ$ , угол сколов выреза  $10^\circ$  и ширину деформирующей части  $0,1D$ . Данная схемаковки способствует минимальной заковке отверстия, а так же равномерному распределению деформаций.

4. Экспериментальные исследования позволили установить, что с увеличением степени деформации при протяжке без оправки интенсивность удлинения уменьшается за счет утолщения стенки пустотелой заготовки. Максимум утолщения стенки наблюдается при относительном диаметре отверстия в заготовке, равного 0,6. Это позволяет сделать вывод о неэффективности данных соотношений размеров заготовки дляковки без оправки. Экспериментальные данные по интенсивности удлинения заготовки в процессековки без оправки примерно на 5...8 % меньше теоретических, полученных МКЭ. При этом увеличение удлинения заготовки более интенсивно происходит в экспериментальных образцах.

5. Подтверждены в производственных условиях рекомендации по геометрии оснастки и формоизменению пустотелой заготовки приковке без оправки вырезными бойками. Ковку без оправки целесообразнее производить вырезными бойками со скосами. Была спроектирована специальная конструкция вырезных бойков с углом выреза  $115^\circ$  и углами скосов  $10^\circ$ . Разработана методика проектирования технологических процессовковки, которая заключается в определении диаметра отверстия в заготовке перед протяжкой без оправки в зависимости от диаметра отверстия в поковке и степени деформации. Проверены в производственных условиях рекомендации по механическим режимамковки, а именно величина подачи должна составлять 0,1 от диаметра заготовки, обжатие за нажим не более 10 %, а последовательностьковки: проход  $\rightarrow$  кантовка на  $90^\circ \rightarrow$  проход  $\rightarrow$  кантовка на  $90^\circ \rightarrow$  проход  $\rightarrow$  кантовка на  $45^\circ \rightarrow$  проход.

6. Внедрена новая технологияковки пустотелых заготовок без оправки. В результате на 25...30 % повысилась производительность процессаковки, а число нагревов снизилось на 15...25 %. Установленные в работе решения расширили технологические возможности процессаковки пустотелых заготовок с дном и со сквозным отверстием. Качество полученных поковок соответствует требованиям заказчика. Суммарный экономический эффект от

внедрения новых технологических процессовковки пустотелых заготовок с учетом долевого участия составил 751 000 грн. по уровню цен 2015 г.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Baoguang, S. A novel technique for reducing macrosegregation in heavy steel ingots / S. Baoguang, K. Xiuhong, L. Dianzhong // J. Materials Processing Technology. – 2010. – № 210. – P. 703–711.
2. Research on Charging Combination Based on Batch Weight Fit Rule for Energy Saving in Forging / Zhu Baiqing, Lu Haixing, Tong Yifei, Li Dongbo, Xia Yong // Mathematical Problems in Engineering. – Volume 2015. – Article ID 531756, 9 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/531756>.
3. Kun, Chen. Strain function analysis method for void closure in the forging process of large sized steel ingot / Kun Chen, Yitao Yang, Guangjie Shao // Computational Materials Science. – № 51 (2012). – P. 72–77.
4. Неравномерность распределения показателей напряженно-деформированного состояния при ресурсосберегающих режимах протяжки заготовок с обкаткой в комбинированных бойках / В. В. Кухарь, Е. Ю. Балалаева, О. А. Тузенко, О. В. Василевский // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія : Технічні науки / ВНАУ. – Вінниця : ВНАУ, 2015. – Випуск 1 (89), Том 1. – С. 22–26. – ISSN 2306-756X.
5. Чухлеб, В. Л. Основные предпосылки управлением качеством продукции и их возможная реализация в условиях ОАО "Днепрспецсталь" / В. Л. Чухлеб, А.Н. Тумко, А. В. Ашкелянец // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение К. НТУУ «КПИ». – 2011. – № 62. – С. 146–149.
6. Дослідження впливу осадки і протяжки на механічні властивості та структуру поковок / В. Л. Чухліб, В. О. Гринкевич, А. В. Ашкелянец, Д. С. Олійник, А. І. Старосек // Вісник Національного технічного університету "ХПІ" : зб. наук. пр. / НТУ "ХПІ". – Харків, 2013. – № 42. – С. 205–209.

7. Askelianets A. Analysis of theoretic research of the ring tapered tool penetration with subsequent upsetting in the lining ring while manufacturing a disc with shoulder / A. Askelianets // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 4. – С. 70–75.

8. Управление качеством поковок ответственного назначения в условиях ПАО «Днепроспецсталь» / В. А. Гринкевич, В. Л. Чухлеб, А. Н. Тумко, А. В. Ашкелянец // Обработка металлов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 33. – С. 75–80.

9. Антощенко, Ю. М. Влияние внешних зон на формоизменение заготовки при ковке / Ю. М. Антощенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 2001. – № 6. – С. 19–21.

10. Антощенко, Ю. М. Исследование формоизменения полой заготовки при протяжке на оправке / Ю. М. Антощенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 2001. – № 4. – С. 3–6.

11. Сидоров, А. Н. Распределение напряжений в очаге деформации при ковке плоскими бойками сплошных и полых цилиндрических заготовок / А. Н. Сидоров, Ю. М. Антощенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1996. – № 9. – С. 32–34.

12. Ростовщиков, В. А. Технология и оборудование для формообразования полых длинномерных поковок горячим радиальным обжатием / В. А. Ростовщиков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 6. – С. 10–13.

13. Голышев, И. В. Ротационная ковка полых цилиндрических заготовок : дис. ...канд. техн. наук :05.03.05 / Голышев Игорь Владимирович. – Тула, 2008. – 139 с. – 04200851335.

14. Пасечник, Н. В. Обеспечение прочностной надежности металлургических машин – основа модернизации металлургического комплекса России / Н. В. Пасечник, И. А. Сурков // интернет-сайт Международного Союза «Металлургмаш». – Июль 2007 г.

<http://www.metallurgmash.ru/publications/nadezhnost.html>.

15. Усовершенствованная технология изготовления трубных поковок / Я. М. Охрименко, В. П. Троицкий, А. Н. Веремеевич, Б. Г. Восходов, Л. А. Лбов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1979. – № 2. – С. 5–8.
16. Шевакин, Ю. Ф. Производство труб / Ю. Ф. Шевакин, А. З. Глейберг. – М. : Metallurgiya, 1968. – 440 с.
17. Изготовление поковок профилированных по внутренней поверхности ковкой на гидравлических прессах / В. Д. Арефьев, А. Ю. Петунин, Э. Л. Рогожин, Г. С. Рябцев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1981. – № 3. – С. 16–18.
18. Повышение качества при производстве труб большого диаметра из слитков / А. В. Пакало, Б. Н. Березовский, В. Д. Арефьев, С. И. Данилин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 6. – С. 27–28.
19. Жбанков, Я. Г. Исследование процессаковки крупногабаритных труб прошивкой / Я. Г. Жбанков // Обработка материалов давлением – 2015. – № 2 (41). – С. 1–6. – ISSN 2076-2151.
20. Wu, Y. Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process / Yunjian Wu, Xianghuai Dong, Qiong Yu // International Journal of Mechanical Sciences. – 93 (2015). – P. 102–110.
21. Технология изготовления толстостенных труб большого диаметра из стали 0X18H12T / С. И. Данилин, В. Н. Лебедев, Г. И. Валетова, А. И. Мохов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1967. – № 5. – С. 13–15.
22. Использование слитков новой конструкции при производстве поковок толстостенных труб большого диаметра из аустенитных сталей / А. И. Зубков, А. И. Мохов, В. Д. Арефьев, А. Ю. Петунин, А. В. Пакало, В. П. Барсуков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1983. – № 12. – С. 8–9.
23. Способковки цилиндров с глухим дном / Ф. Н. Голиков, А. П. Юровских, Р. Ш. Рубин, И. С. Катков // Кузнечно – штамповочное производство. – 1970. – № 4. – С. 46–47.

24. Производство труб большого диаметра из углеродистых центробежнолитых заготовок на горизонтальном гидравлическом прессе / А. С. Чукмасов, Ю. Г. Соловьев, В. Н. Лебедев, Н. С. Пищик, К. А. Токарев, А. И. Мохов, С. И. Данилин, Л. Е. Шелудкер // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 10. – С. 32–33.

25. Кобелев, О. А. Изготовление толстостенных трубных поковок и заготовок для производства плит / О. А. Кобелев, В. А. Тюрин // Кузнечно – штамповочное производство. – 2008. – № 1. – С. 27–30.

26. Sizek, H. W. Radial Forging / H. W. Sizek // Metalworking : Bulk Forming. – 2005. – С. 172–178.

27. Белов, Ю. М. Повышение износостойкости кузнечно-прессовых бойков / Ю. М. Белов, В. А. Красавчиков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 3. – С. 7–11.

28. Производство толстостенных труб из бесприбыльных слитков / В. Н. Лебедев, В. М. Коровина, П. И. Варакин, А. И. Гринюк // Кузнечно-штамповочное производство. – 1965. – № 6. – С. 7–10.

29. Кальченко, П. П. Пути сокращения расхода металла при изготовлении сплошных цилиндрических поковок / П. П. Кальченко, Е. Д. Качура // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 3. – С. 15–16.

30. Пат. 1017421 А СССР, В 21J 5/00. Способ изготовления полых цилиндрических поковок / Савкин В. А., Сташук Е. К., Борисов В. П., Быков В. П., Бабаскин А. А., Кальченко П. П. (СССР); заявитель и патентообладатель Научно-производственное объединение по технологии машиностроения «ЦНИИТМАШ» (СССР). – 3360643/25-27; заявл. 04.12.1981; опубл. 15.05.1983, Бюл. № 18. – 3 с. : ил.

31. Сидоров, Н. Е. Ковка полых длинных цилиндров из легированной стали / Н. Е. Сидоров // Кузнечно-штамповочное производство. – 1964. – № 12. – С. 38–39.

32. Касатонов, В. Ф. Усовершенствование технологии ковки полых поковок на прессах / В. Ф. Касатонов, Г. А. Матросов, А. Г. Салтыков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1966. – № 4. – С. 44–45.

33. Пасько, А. Н. Математическое моделирование в процессах ротационной ковки / А. Н. Пасько, О. А. Ткач, Л. В. Муравлева // Известия ТулГУ. Технические науки. Технологии и оборудование для обработки металлов давлением – 2009. – № 3. – С. 195–199.

34. Пасько, А. Н. Влияние технологических параметров на толщину стенки заготовки при ротационной ковке / А. Н. Пасько, О. А. Ткач // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 2. Ч. 2. – 2010. – С. 70–74.

35. Ghaei, A. Finite element modelling simulation of radial forging of tubes without mandrel / A. Ghaei, M. R. Movahhedy, A. Karimi Taheri // Materials & Design. – 2008. – № 29. – P. 867–872.

36. Лазоркин, В. А. Качество поковок, изготавливаемых радиальной ковкой на гидравлическом ковочном прессе / В. А. Лазоркин, Р. В. Яценко, Ю. В. Мельников // Кузнечно-штамповочное производство. ОМД. – 2005. – № 5. – С. 8–11.

37. Пат. 2438826<sup>(13)</sup>С2 Россия, В21К 21/00 (2006/01), В21J 1/04 (2006.01). Способ изготовления полых поковок / Володин А. М., Сорокин В. А., Лазоркин В. А., Петров Н. П., Рахманин А. В., Петров П. Н. (RU); заявитель и патентообладатель Открытое Акционерное общество "Тяжпрессмаш" г. Рязань (RU). – 2010112083/02; заявл. 29.03.2010; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1. – 6 с.

38. Розенблат, Э. З. Изготовление поковок для трубных заготовок большого диаметра из стали X5M (12X5MA) / Э. З. Розенблат // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. – № 12. – С. 40–41.

39. Зубков, А. И. Влияние технологических параметров на условия протяжки толстостенных труб большого диаметра / А. И. Зубков, В. Д. Арефьев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1975. – № 9. – С. 10–12.

40. Опыт изготовления биметаллических толстостенных труб большого диаметра / А. И. Зубков, В. Н. Лебедев, А. И. Мохов, В. Д. Арефьев, А. Ю. Петунин, Д. П. Долинин, Г. И. Капланов, А. В. Пакало // Технологияковки и объемной штамповки. – 1983. – № 4. – С. 2–3.

41. Влияние типа слитков на качество кованной трубной заготовки из стали ЭИ756 (12Х11В2МФ) / Р. Д. Мининзон, Ф. В. Мурин, М. И. Синельников, В. П. Борисов, Е. И. Малиновский, С. Г. Чернявская, К. П. Устин, С. А. Иодковский // Кузнечно-штамповочное производство. – 1967. – № 1. – С. 44–46.

42. Тюрин, В. А. Ковка полых заготовок на РОМ / В. А. Тюрин, Г. П. Жигулев, А. М. Володин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1993. – № 1. – С. 10–12.

43. Ковка полых заготовок бойками с непрямолинейным фронтом подачи / В. А. Тюрин, В. И. Куролес, Ю. М. Антощенков, Б. А. Деревянко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – № 7. – С. 8–10.

44. Пасько, А. Н. Моделирование многопереходного процесса ротационной ковки / А. Н. Пасько, О. А. Ткач // Известия ТулГУ. Технические науки. Технологии и оборудование для обработки металлов давлением. – 2010. – № 3. – С. 69–73.

45. Пасько, А. Н. Особенности процесса ротационной ковки цилиндрической заготовки без оправки / А. Н. Пасько, О. А. Ткач // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2009. – С. 141–145.

46. Исследование технологии ковки поковок из полых слитков / И. Г. Цыгура, П. Д. Доронько, Г. С. Гребенюк, С. И. Коваль, И. М. Алымов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1974. – № 9. – С. 1–3.

47. Яковлев, С. П. Математическое моделирование процесса ротационной ковки конических заготовок / С. П. Яковлев, А. Н. Пасько, О. В. Сорвина // Кузнечно-штамповочное производство. – 2000. – № 9. – С. 24–26.

48. Антощенко, Ю. М. Интенсификацияковки – протяжки полых заготовок / Ю. М. Антощенко, В. А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 2. – С. 11–13.

49. Fan, L. 3D finite element modeling and analysis of radial forging processes / Lixia Fan, Zhigang Wang, He Wang // Journal of Manufacturing Processes. – 16 (2014). – P. 329–334.

50. Совершенствование технологии изготовления трубных поковок методом протяжки на ступенчатой оправке / А. В. Пакало, Е. Д. Горохов, В. Д. Арефьев, И. Н. Лебединский // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 12. – С. 8–10.

51. Пакало, А. В. Совершенствование технологии изготовления полых поковок методом прошивки-протяжки / А. В. Пакало, В. Д. Арефьев, А. Ю. Петунин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1983. – № 11. – С. 33.

52. A vertical automated forging center for the plastic deformation of continuously-cast ingots / S. P. Burkin, E. A. Korshunov, V. L. Kolmogorov, N. A. Babailov, V. M. Nalesnik // Journal of Materials Processing Technology. – 1996. – № 58. – P. 170–173.

53. Новый технологический процесс производства полых поковок / И. Н. Потапов, В. П. Троицкий, Р. Г. Шарафутдинов, Ю. Н. Буленков, И. Е. Косматенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 6. – С. 13–15.

54. Антощенко, Ю. М. Результаты промышленнойковки полых заготовок инструментом с непрямолинейным фронтом подачи / Ю. М. Антощенко // Кузнечно-штамповочное производство. – 2001. – № 7. – С. 26–27.

55. Каргин, Б. С. Сравнение производительности при протяжке пустотелых поковок на оправке комбинированными и вырезными бойками / Б. С. Каргин, Е. С. Котова / Вісник приазовського державного технічного університету. Сер. :Технічні науки. – 2013. – № 27. – С. 49–52.

56. Картель, Г. А. Возможности и преимущества технологии радиальнойковки для получения высокоточных и упрочненных деталей типа «цилиндр» из сталей и сплавов / Г. А. Картель // ЗАО «ЭЛКАМ-НЕФТЕМАШ». – 2010–2011. – С. 1–6.

57. Пат. RU 2421295<sup>(13)</sup>С1 Россия, В21К 21/00 (2006/01), В21J 1/04 (2006.01). Способ изготовления полых поковок / Володин А. М., Лазоркин В. А., Сорокин В. А., Петров Н. П., Никитин В. В. (RU); заявитель и патентообладатель Открытое Акционерное общество "Тяжпрессмаш" г. Рязань (RU). – 2009136728/02; заявл. 05.10.2009; опубл. 20.06.2011, Бюл. № 17. – 5 с.

58. Пат. RU 2493931<sup>(13)</sup>С2 Россия, В21К 21/00 (2006/01), В21J 7/04 (2006.01), В21J 12/00 (2006.01), В21J 3/00 (2006.01). Способ изготовления прецизионных труб и радиально-ковочная машина для его осуществления / Лазоркин В. А., Лазоркин Д. В. (UA); заявитель и патентообладатель Лазоркин В. А., Лазоркин Д. В., Запорожье (UA). – 2011143199/02; заявл. 27.04.2013, Бюл. № 23; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27, – 14 с., ил.

59. Новые технологии и оборудование для радиальнойковки слитков / А. М. Володин, В. А. Лазоркин, В. А. Сорокин, Н. П. Петров, А. С. Богдановский // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – № 10. – С. 22–27.

60. Rotary swaging forming process of tube workpieces / Qi Zhang, Kaiqiang Jin, Dong mu, Pengju Ma, Jie Tian // 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014. – Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. – Procedia Engineering. – 81 (2014). – P. 2336–2341.

61. Determination of strain field and heterogeneity in radial forging of tube using finite element method and microhardness test / M. Sanjari, P. Saidi, A. Karimi Taheri, M. Hossein-Zadeh // Materials and Design. – 38 (2012). – P. 147–153.

62. Wang, Z. G. The theory analysis and numerical simulation for the radial forging process of gun barrel / Z. G. Wang // Nanjing University of Science and Technology. – 2011. – P. 28–30.

63. Розов, Ю. Г. Развитие научных основ и разработка процессов холодного деформирования трубчатых изделий с профилированной внутренней поверхностью : автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук : спец. 05.03.05 «Процессы и машины обработки давлением» /Розов Юрий Георгиевич. – Краматорск, 2015. – 44 с.

64. Розов, Ю. Г. Технологии изготовления прецизионных трубчатых изделий холодным пластическим деформированием : Монография / Ю. Г. Розов. – Херсон : Изд-во ХНТУ, 2013. – 336 с.

65. Розов, Ю. Г. Аналіз технології виготовлення трубчатих виробів із сталі 20X17H2 гідропресуванням на гладкій оправці / Ю. Г. Розов, В. В. Піманов, Д. Б. Шкарлута // Вісник НТУУ «КПІ». – 2012. – № 64. – С. 234–238.

66. Latest Development in Railway Axle and Thick-Walled Tube forging on a Hydraulic Radial Forging Machine Type SMX / Frederik Knauf, Paul-Josef Nieschwitz, Albrecht Holl, Hans Pelster, Rolf Vest // 18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. – Pittsburgh, PA, USA. – September 12–15, 2011. – P. 215–220.

67. Koppensteiner, R. Optimizing Tooling And Pass Design For Effectiveness On Forged Product / Robert Koppensteiner, Zack Tang // 18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. – Pittsburgh, PA, USA. – September 12–15, 2011. – P. 225–229.

68. Sheu, J.-J. Optimum die design for single pass steel tube drawing with large strain deformation / Jinn-Jong Sheu, Su-Yi Lin, Cheng-Hsien Yu // 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014. – Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan. – Procedia Engineering. – 81 (2014). – P. 688–693.

69. Jaouen, O. From Hollow Ingot to Shell with a Powerful Numerical Simulation Software Tool / O. Jaouen, F. Costes, P. Lasne, M. Barbelet // 18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. – Pittsburgh, PA, USA. – September 12–15, 2011. – P. 513–518.

70. Li ,Y. Numerical simulation and experimental study on the tube sinking of a thin-walled copper tube with axially inner micro grooves by radial forging / Yong Li, Ting He, Zhixin Zeng // Journal of Materials Processing Technology. – 213 (2013). – P. 987–996.

71. Comparison of radial forging between the two- and three-split dies of a thin-walled copper tube during tube sinking / Yong Li, Jinlong Huang, Guangwen Huang, Wei Wang, Jucong Chen, Zhixin Zeng // Materials and Design 56 (2014). – P 822–832.

72. Pantalé, O. Influence of the Constitutive Flow Law in FEM Simulation of the Radial Forging Process / Olivier Pantalé, Babacar Gueye // Journal of Engineering, Volume 2013, Article ID 231847, 8 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/231847>.

73. Kowalski, J. Experimental Investigation Of The Strain State In The Ring-Forging Process / J. Kowalski, B. Hoderny // Journal of Mechanical Working Technology, 14 (1987). – P 309–324.

74. Forging of Heavy Products for Nuclear Fuel Containers / Anthony Pastore, Evelyne Guyot, Jonathan Dairon, Mickael Lemoine // 18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. – Pittsburgh, PA, USA. – September 12–15, 2011. – P 244-247.

75. Banaszek, G. Theoretical and laboratory modelling of the closure of metallurgical defects during forming of a forging / G. Banaszek, A. Stefanik // Journal of Materials Processing Technology. – № 177 (2006). – P 238–242.

76. Ameli, A. A parametric study on residual stresses and forging load in cold radial forging process / A. Ameli, M. R. Movahhedy // Int J Adv Manuf Technol. – № 33 (2007). – P 7–17.

77. A conical mandrel tube drawing test designed to assess failure criteria / C. Linardon, D. Favier, G. Chagnon, B. Gruez // *Journal of Materials Processing Technology*. – 214 (2014). – P. 347–357.

78. Comparison Of The Various Technological Ways Of Heavy Wall Forged Hollow Products / Lev Medovar, Arun Kumar, Ashok Kumar Sharma, Ganna Stovpchenko, Lebed Vitalii, Neeraj Borwankar // 18th International Forgemasters Meeting. Market and Technical Proceedings. – Pittsburgh, PA, USA. – September 12–15, 2011. – P 129–133.

79. Khayatzadeh, S. A Simulation of Hollow and Solid Products in Multi-Pass Hot Radial Forging Using 3D-FEM Method / S. Khayatzadeh, M. Poursina, H. Golestanian // *Int J Mater Form* (2008) Suppl 1: 371–374.

80. Study of void closure in hot radial forging process using 3D nonlinear finite element analysis / J. Chen, K. Chandrashekhara, C. Mahimkar, S. N. Lekakh, V. L. Richards // *Int J Adv Manuf Technol*. – № 62 (2012). – P. 1001–1011.

81. Кальченко, П. П. Новые технологические процессыковки крупных прессовых поковок. : монография / П. П. Кальченко, О. Е. Марков. – Краматорск : ДГМА, 2014. – 100 с. – ISBN 978-966-379-692-5.

82. А. с. 1017421 СССР, МПК В 21 J 5/00. Способ изготовления полых цилиндрических поковок / В. А. Савкин, Е. К. Стащук, В. П. Борисов, В. П. Быков, А. А. Бабаскин, П. П. Кальченко (СССР). – № 3360643/25–27; заявл. 04.12.81; опубл. 15.05.83, Бюл. № 18. – 3 с. : ил.

83. Уменьшение металлоемкости сложнопрофилированных полых изделий получаемых ковкой / И. А. Грачев, В. Н. Злыгорев, Я. М. Чикота, Я. Г. Жбанков // *Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 2 (39). – С. 75–80.

84. Multi-objective optimization of die geometry in ingot forging / Peter Christiansen, Paulo A. F. Martins, Niels Bay, Jesper Henri Hattel // *Proceeding 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP 2014, 19-24 October 2014, Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan* // *Procedia Engineering* 81 (2014). – P. 2457–2462 [doi:10.1016/j.proeng.2014.10.350](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.350)

85. The effect of strain distribution on microstructural developments during forging in a newly developed nickel base super alloy / Buckingham R. C., Argyrakis C., Hardy M. C., Biroasca S. // *Materials Science & Engineering*. – A654 (2016). – P. 317–328. [doi:10.1016/j.msea.2015.12.042](https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.12.042).

86. Анищенко А. С. Разработка технологии кольцераскатки титановых поковок с повышенной коррозионно-усталостной прочностью / А. С. Анищенко, В. В. Кухарь, А. Г. Присяжный // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА*. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 272–277.

87. Розробка автоматизованої методики апроксимації діаграм рекристалізації для вибору термомеханічних режимів кування, що підвищують експлуатаційні властивості поковок валів / В. В. Кухар, О. О. Тузенко, О. Ю. Балалаєва, О. В. Василевський // *Вісник Вінницького політехнічного інституту / ВНТУ*. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – № 2. – С. 123–130. – ISSN 1997-9266.

88. О необходимости учета влияния режимов деформации на механические свойства поковок в условиях ОАО «Арселормиттал Кривой Рог» / Д. Ю. Ключев, В. Л. Чухлеб, И. С. Прокопенко, А. В. Ашкелянец // *Разработка рудных месторождений*. – 2011. – № 94. – С. 202–204.

89. Формирование прогнозируемых показателей качества поковок в условиях ОАО «Арселормиттал Кривой Рог» / В. Л. Чухлеб, Д. Ю. Ключев, И. С. Прокопенко, А. В. Ашкелянец // *Обработка металлов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1. – С. 103–106.

90. Развитие методов расчета режимов ковки для повышения качества поковки / В. Л. Чухлеб, Д. Ю. Ключев, И. С. Прокопенко, А. В. Ашкелянец // *Теоретичні і прикладні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз: міжнародна науково-технічна конференція, 30 травня – 2 червня 2011 р.* – Вінниця, 2011. – С. 89–90.

91. Analysis of laminated crack defect in the upsetting process of heavy disk-shaped forgings / Minting Wang, Dongying Li, Fan Wang, Xinliang Zang, Xuetong Li, Hong Xiao, Fengshan Du, F. C. Zhang, Zhengyi Jiang // *Engineering*

Failure Analysis. – № 59. – 2016. – P. 197–210.  
[doi:10.1016/j.engfailanal.2015.10.005](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.10.005).

92. Cracking mechanisms in large size ingots of high nickel content low alloyed steel / Matthieu Bitterlin, Abdelhalim Loucif, Nicolas Charbonnier, Mohammad Jahazi, Louis-Philippe Lapierre-Boire, Jean-Benoit Morin // Engineering Failure Analysis. – № 68. – 2016. – P. 122–131.  
[doi:10.1016/j.engfailanal.2016.05.027](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.05.027).

93. Dobrzański, L. A. Influence of hot-working conditions on a structure of high-manganese austenitic steels / Dobrzański L. A., Grajcar A., Borek W. // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – № 29/2. – 2008. – P. 139–142.

94. Hippenstiel, F. Recent developments in gear steels for use in power generation plants / F. Hippenstiel, K.-P. Johann // Forgemasters Meeting, Santander, Spain, (3–7 Nov. 2008). – 2008.

95. Gonzalez J. R. Fem simulation of the new radial forging device process at Sidenor / J. R. Gonzalez, P. F. David, J. Gordon // Proc. 17th IFM 2008, November, 3–7. Santander. Spain. – P. 237–243.

96. Banaszek, G. A comprehensive numerical analysis of the effect of relative feed during the operation of stretch forging of large ingots in profiled anvils / Banaszek G., Szota P. // Journal of Materials Processing Technology. – № 169. – 2005. – P. 437–444. [doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.03.018](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.03.018).

97. Meng, F. Methodology of the shape optimization of forging dies / Meng F., Labergere C., Lafon P. // International Journal of Material Forming. – Vol. 3 (2010). – P. 927–930. ISSN 1960-6206. [DOI: 10.1007/s12289-010-0920-z](https://doi.org/10.1007/s12289-010-0920-z).

98. Numerical and experimental investigations on the extension of friction and heat transfer models for an improved simulation of hot forging processes / Behrens B. A., Alasti M., Bouguecha A., Hadifi T., Mielke J., Schäfer F. // International Journal of Material Forming. – Vol. 2 (2009). – P. 121-124. ISSN 1960-6206. [DOI: 10.1007/s12289-009-0618-2](https://doi.org/10.1007/s12289-009-0618-2).

99. Attia, M. F. Nonlinear analysis of frictional thermo-viscouselastic contact problem using FEM / Attia M. F., El-Shafei A. G., Mahmoud F. F. // Int. J. Appl. Mechanics. – № 6 (3), 26 pp. <http://dx.doi.org/10.1142/S1758825114500288>.

100. The effect of forging temperature on microstructure and mechanical properties of in situ TiC/Ti composites / Ma Feng-cang, Lu Wei-jie, Qin Ji-ning, Zhang Di, Ji Bo // Mater. and Des. – 2007. – № 28. – C. 1339–1342. [doi:10.1016/j.matdes.2006.02.004](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.02.004).

101. Finite element modelling of forging and other metal forming processes / Chenot, J.-L., Fourment L., Ducloux R., Wey E. // International Journal of Material Forming. – Vol. 3 (2010). – P. 359–362. ISSN 1960-6206. [DOI: 10.1007/s12289-010-0781-5](https://doi.org/10.1007/s12289-010-0781-5).

102. Modelling of Damage during Hot Forging of Ingots / Christiansen P., Jesper H. Hattel, Niels Bay, Paulo A. F. Martins. // The 5th International Conference, Czech Republic (2013).

103. Baoguang, S. A novel technique for reducing macrosegregation in heavy steel ingots / S. Baoguang, K. Xiuhong, L. Dianzhong // J. Materials Processing Technology. – 2010. – № 210. – P. 703–711. [doi:10.1016/j.jmatprotec.2009.12.010](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.12.010).

104. Investigation on the void closure efficiency in cogging processes of the large ingot by using a 3-D void evolution model / Chao Feng, Zhenshan Cui, Mingxiang Liu, Xiaoqing Shang, Dashan Sui, Juan Liu // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – № 237. – P. 371–385. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.06.030>.

105. Nakasaki, M. Application of hydrostatic integration parameter for free-forging and rolling / M. Nakasaki, I. Takasu, H. Utsunomiya // J. Mater. Process. Technol. – 2006. – № 177. – P. 521–524. [doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.04.102](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.102).

106. Internal void closure during the forging of large cast ingots using a simulation approach / Lee Y.S., Lee S.U., Van Tyne C. J., Joo B. D., Moon Y. H. /

J. Mater. Process. Technol. – 2011 (6). – P 1136–1145.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.017>.

107. Physical modeling of the upsetting process in open-die press forging / E. Erman, N. M. Medei, A. R. Roesch, D. C. Shah // J.Mech. Working Tech. – 1989. – № 19. – P. 195–210. [doi:10.1016/0378-3804\(89\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0378-3804(89)90004-1).

108. Mitani, Y. Analysis of rotor shaft forging by rigid-plastic finite element method / Y. Mitani, V. Mendoza, K. Osakada // J. Mater. Process. Technol. – 1991. – № 27. – P. 137–149. [doi:10.1016/0924-0136\(91\)90049-K](https://doi.org/10.1016/0924-0136(91)90049-K).

109. Analysis of forging effect and closing of internal cavities in free forging by rigid-plastic finite element method / Y. Fukui, J. Yonezawa, Y. Yamaguchi, A. Nagata, O. Tsuda // J. Jpn. Soc. Technol. Plast. – 1980. – № 21. – P. 975–982.

110. Saby, M. A geometry-dependent model for void closure in hot metal forming / Michel Saby, Pierre-Olivier Bouchard, Marc Bernacki // Finite Elements in Analysis and Design. – 2015. – № 105. – P. 63–78.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2015.07.003>.

111. Dudra, S. P. Analysis of void closure in open-die forging / Dudra S. P., Im Y. T. // Int. J. Mach. Tools Manuf. – 1990. – № 30. – P. 65–75.  
[doi:10.1016/0890-6955\(90\)90042-H](https://doi.org/10.1016/0890-6955(90)90042-H).

112. Optimization of open die forging of round shapes using FEM analysis / Choi S. K., Chun M. S., Van Tyne C. J., Moon Y. H. // J. Mater. Process Technol. – 2006. – № 172. – P. 88–95. [doi:10.1016/j.jmatprotec.2005.09.010](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.010).

113. Development of forging process design to close internal voids / Kakimoto H, Arikawa T, Takahashi Y, Tanaka T, Imaida Y. // J Mater Process Tech – 2010. – № 210 (3). – P. 415–422.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.022>.

114. Chen, Ming-Song. Numerical simulation and experimental verification of void evolution inside large forgings during hot working / Ming-Song Chen, Y. C. Lin // International Journal of Plasticity. – 2013. – № 49. – P. 53–70.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijplas.2013.02.017>.

115. A criterion for void closure in large ingots during hot forging / Xiao-Xun Zhang, Zhen-Shan Cui, Wen Chen, Yan Li // Journal of materials processing technology. – 2009. – № 209. – P. 1950–1959. [doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.04.051](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.051).

116. Three-dimensional finite element analysis of multi-stage hot forming of railway wheels / Gangopadhyay T., Ohdar R. K., Pratihari D. K., Basak I. // Int J Adv Manuf Tech. – 2011. – № 53 (1-4). – P. 301-312. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-010-2810-4>.

117. Ma Q. Prediction of deformation behavior and microstructure evolution in heavy forging by FEM / Ma Q, Lin Z-q, Yu Z-q. // Int J Adv Manuf Tech. – 2009. – № 40(3-4). – P. 253-260. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-007-1337-9>.

118. Fluhner, J. Deform 3D User's Manual Version 6.0 / J. Fluhner // Scientific Forming Technologies Corporation, Columbus, OH (2006).

119. Пат. 86881 Україна, МПК(2013.01) В 21 J 5/00. Спосіб кування порожнистих циліндрів з дном / Марков О. Є., Маркова М. О.; Краматорськ. – № u201309697; заявл. 05.08.13; опубл. 10.01.14, Бюл. № 1. – 5 с. : іл.

120. Simulation of 42CrMo steel billet upsetting and its defects analyses during forming process based on the software Deform-3D / Zhang Z. J., Dai G. Z., Wu S. N., Dong L. X., Liu L. L. // Materials Science and Engineering: A 499 (1-2), 2009. – P. 49–52. [doi: 10.1016/j.msea.2007.11.135](https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.135).

121. Розподіл інтенсивності деформацій при куванні бойками з випуклим профілем / І. С. Алієв, М. О. Маркова, В. М. Злигорєв, Ю. О. Ячмінь // Вісник НТУ «ХПІ». Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків : НТУ «ХПІ», 2015. – № 47 (1166). – С. 7–10.

122. Красовский, Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Мн. : Изд-во БГУ им. В. И. Ленина, 1982. – 302 с.

123. Новик, Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение; София : Техника, 1980. – 304 с., ил.

124. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 278 с.

125. Алиев, И. С. Исследование процессовковки бойками выпуклой геометрии с интенсивными пластическими деформациями / И. С. Алиев, М. А. Маркова, В. Н. Злыгорев / Вісник НТУУ «КПІ». Секція машинобудування. – № 75 (2015). – С. 125–130.

126. Кухарь В. В. Экспериментальные исследования режимов кузнечной протяжки заготовок с обкаткой в комбинированных бойках / В. В. Кухарь, О. В. Василевский // Вісник Національного технічного університету “ХПІ” : зб. наук. пр. / НТУ “ХПІ”. – Харків, 2013. – Темат. вип. : Нові рішення в сучасних технологіях, № 43 (1016). – С. 139–148.

127. Tolkushkin, A. Development and computer modeling of a new forging technology of forgings such as slabs and plates / Tolkushkin A., Panin E., Talmazan V. // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 51, 4, 2016. – P. 443–450.

128. Simulation of void defect evolvment during the forging of steel ingot / Chen K., Yang Y. T., Liu K. J., Shao G. J. // Adv Mat Res. – 2010. – 97-101:3079-3084. [doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.3079](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.3079).

129. Kim, Y.D. Efficient forging process to improve the closing effect of the inner void on an ultra-large ingot / Kim Y. D., Cho J. R., Bae W. B. // J Mater Process Tech. – 2011. – 211(6). – P. 1005-1013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.001>.

130. Градиент деформаций при получении полых заготовок с применением интенсивных пластических деформаций / М. А. Маркова, Ю. Г. Розов, Е. А. Мкртчян, П. И. Ризак // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. трудов. – Краматорск, 2015. – № 1 (16Е). – С. 67–73.

[http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vesnik/№1\(16E\)\\_2015/article/10.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№1(16E)_2015/article/10.pdf)

131. Маркова, М. А. Заковка отверстия при ковке бойками с выпуклым рабочим профилем / М. А. Маркова, В. Н. Злыгорев, П. И. Ризак // Вестник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2015. – № 1 (34). – С. 57–63. – ISSN 1993-8322.

132. Маркова, М. А. Исследование деформированного состояния заготовки при протяжке полых поковок без оправки бойками со скосами / М. А. Маркова // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. трудов. – Краматорск, 2014. – № 3 (15E). – С. 75–82.

[http://www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vesnik/№3\(15E\)\\_2014/article/15.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/№3(15E)_2014/article/15.pdf)

133. Маркова, М. А. Качество укороченных слитков с направленной кристаллизацией / М. А. Маркова, Л. В. Таган, Ю. О. Ячмень // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве: материалы IV МНТК, 30 сентября – 4 октября 2013 г. – Краматорск : ДГМА, 2013. – С. 156–157. Тезисы МНК. Дк-01-2011.

134. Механизм заковки отверстия при ковке без оправки / М. А. Маркова, Ю. Г. Розов, Е. А. Мкртчян, А. Е. Сомкин // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 186–192. – ISSN 2076-2151.

135. Маркова, М. А. Новый инструмент для получения пустотелых заготовок методами интенсивных пластических деформаций / М. А. Маркова, Ю. О. Ячмень, А. В. Алтухов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 36. – С. 116-120.

136. Схемы ковки крупных поковок с интенсивными пластическими деформациями / М. А. Маркова, Р. С. Недодай, А. О. Шарун, К. Л. Чуева // Тези. Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції «Важке

машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку». – 23–24 вересня 2014 р. – Краматорськ : ДДМА, 2014. – С. 61. – ISBN 978-966-379-640-6.

137. Mathematical modeling of stress-deformed state of metal while flattening of the straddle profiled metal / A. Zavhorodnii, S. Nastoyasha, M. Markova // 14th International Conference RaDMI 2014: Proceedings on CD-ROM. – Topola, Serbia, 2014. – Vol. 1. – P. 305-309. – ISSN 978-86-6075-047-3.

138. Маркова, М. А. Формоизменение полых поковок в процессе протяжки без оправки бойками со скосами / М. А. Маркова, П. И. Ризак // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 2 (39). – С. 81–87. – ISSN 2076-2151.

139. Development of a new process for forging plates using intensive plastic deformation / O. E. Markov, A. V. Perig, M. A. Markova, V. N. Zlygoriev // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology – 2016. – Vol. 83. – № 9–12. – P. 2159 – 2174. – DOI: [10.1007/s00170-015-8217-5](https://doi.org/10.1007/s00170-015-8217-5).

140. Дослідження технологічного процесу кування крупних опорних валів без осадження [Електронний ресурс] / М. О. Маркова, В. М. Семенов, Л. В. Таган // Научный вестник ДГМА : сб. науч. трудов. – Краматорск, 2013. – № 2 (12Е). – С. 79–85. – Режим доступа : [www.nbuuv.gov.ua/e-journals/VDDMA/2010\\_1/article%5C10MOEUIR.pdf](http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/VDDMA/2010_1/article%5C10MOEUIR.pdf).

141. Застосування комбінованої пластичної деформації зі зсувом при куванні крупних заготовок // Алієва Л. І., Жбанков Я. Г., Маркова М. А., Таган Л. В. / Тези доповідей загальноуніверситетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. Секція «Машинобудування». Підсекція «Механіка пластичності матеріалів та ресурсозберігаючих процесів». – Київ: НТТУ «КПІ», 2014. – С. 66–67.

142. Комбинированная пластическая деформация со сдвигом для получения крупных заготовок / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, М. А. Маркова, Л. В. Таган // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – №3 (36). – С. 3–9. – ISSN 2076-2151.

143. Маркова, М. А. Заковка отверстия в процессековки без оправки / М. А. Маркова, В. Н. Злыгорев // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів, 25–26 листопада, Тернопіль : Тернопільській національний технічний університет ім. І. Палюя, 2015. – С. 178–179.

144. Тарновский, И. Я. Свободная ковка на пресах / Тарновский И. Я., Трубин В. Н., Златкин М. П. – М. : Машиностроение, 1967. – С. 311–312.

Семенов, Е. И. Ковка и объемная штамповка / Е. И. Семенов. – М. : Высшая школа, 1972. – С. 66–67.

## Приложение А

### Результаты замеров осевого отверстия

Таблица А.1 – Значения диаметров отверстия для различных схем деформирования

	$\varepsilon, \%$	$d_{1вн}$	$d_{2вн}$	$d_{3вн}$	$d_{ср}$
$d/D = 0,3;$ $\alpha = 90^\circ;$ $\beta = 10^\circ$	20%	241,2	201,9	232,8	225,3
	40%	92,6	93,5	93,9	93,33333
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,3;$ $\alpha = 90^\circ;$ $\beta = 20^\circ$	20%	229	190,4	229,8	216,4
	40%	108,57	59,37	167,28	111,74
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,3;$ $\alpha = 90^\circ;$ $\beta = 30^\circ$	20%	229,8	200,97	254,7	228,49
	40%	67,3	37,2	174,42	92,97333
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,55;$ $\alpha = 90^\circ;$ $\beta = 10^\circ$	20%	426,51	375,09	423,51	408,37
	40%	254,06	192,9	332,26	259,74
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,55;$ $\alpha = 90^\circ;$ $\beta = 20^\circ$	20%	383,27	351,81	396,81	377,2967
	40%	168,07	118,75	301,53	196,1167
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,55;$ $\alpha = 90^\circ;$ $\beta = 30^\circ$	20%	369,14	342,86	406,41	372,8033
	40%	156,7	85,79	326,83	189,7733
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,8;$ $\alpha = 90^\circ;$ $\beta = 10^\circ$	20%	715,5	671,6	665,37	684,1567
	40%	388,53	362,76	221,86	324,3833
	60%	169	178,65	89,7	145,7833
$d/D = 0,8;$ $\alpha = 90^\circ;$ $\beta = 20^\circ$	20%	598,44	553,27	559,52	570,41
	40%	354,66	319,18	183,77	285,87
	60%	214,15	74,8	81,56	123,5033
$d/D = 0,8;$ $\alpha = 90^\circ;$ $\beta = 30^\circ$	20%	609,56	590,42	580,66	593,5467
	40%	377,16	346,86	289,34	337,7867
	60%	150,23	27,5	37,74	71,82333
$d/D = 0,3;$ $\alpha = 115^\circ;$ $\beta = 10^\circ$	20%	232,7	167,5	213,2	204,4667
	40%	50,86	19,98	151,57	74,13667
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,3;$ $\alpha = 115^\circ;$ $\beta = 20^\circ$	20%	218,63	152,21	214,86	195,2333
	40%	63,8	33,5	146,92	81,40667
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,3;$ $\alpha = 115^\circ;$ $\beta = 30^\circ$	20%	212,79	156,8	230,7	200,0967
	40%	0	0	0	0
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,55;$ $\alpha = 115^\circ;$ $\beta = 10^\circ$	20%	372,19	322,35	378,36	357,6333
	40%	146,16	118,14	272,02	178,7733
	60%	0	0	0	0

Продолжение таблицы А.1

	$\varepsilon, \%$	$d_{1BH}$	$d_{2BH}$	$d_{3BH}$	$d_{cp}$
$d/D = 0,55;$ $\alpha = 115^\circ;$ $\beta = 20^\circ$	20%	340,19	313,68	388,85	347,5733
	40%	196,2	149,4	247,55	197,7167
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,55;$ $\alpha = 115^\circ;$ $\beta = 30^\circ$	20%	348,36	316,02	377,01	347,13
	40%	151,14	100,59	267,58	173,1033
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,8;$ $\alpha = 115^\circ;$ $\beta = 10^\circ$	20%	624,77	551,51	530,3	568,86
	40%	394,1	343,13	358,76	365,33
	60%	169,84	129,24	141,67	146,9167
$d/D = 0,8;$ $\alpha = 115^\circ;$ $\beta = 20^\circ$	20%	628,48	575,08	560,35	587,97
	40%	365,59	318,79	284,97	323,1167
	60%	176,66	100,14	60,1	112,3
$d/D = 0,8;$ $\alpha = 115^\circ;$ $\beta = 30^\circ$	20%	578,97	579,17	572,57	576,9033
	40%	403,88	346,08	289,8	346,5867
	60%	195,14	102,04	157,12	151,4333
$d/D = 0,3;$ $\alpha = 140^\circ;$ $\beta = 10^\circ$	20%	191,7	134,68	198,88	175,0867
	40%	73,95	27,7	141,19	80,94667
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,3;$ $\alpha = 140^\circ;$ $\beta = 20^\circ$	20%	179,39	136,71	208,99	175,03
	40%	62,78	16,75	141,35	73,62667
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,3;$ $\alpha = 140^\circ;$ $\beta = 30^\circ$	20%	202,34	172,98	209,82	195,0467
	40%	45,57	26,21	109,5	60,42667
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,55;$ $\alpha = 140^\circ;$ $\beta = 10^\circ$	20%	386,17	340,79	344,36	357,1067
	40%	188,65	115,71	196,76	167,04
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,55;$ $\alpha = 140^\circ;$ $\beta = 20^\circ$	20%	408,31	354,2	334,29	365,6
	40%	185,65	143,27	160,1	163,0067
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,55;$ $\alpha = 140^\circ;$ $\beta = 30^\circ$	20%	349,1	320,38	380,11	349,8633
	40%	188,3	122,34	198,44	169,6933
	60%	0	0	0	0
$d/D = 0,8;$ $\alpha = 140^\circ;$ $\beta = 10^\circ$	20%	682,1	578,28	581,54	613,9733
	40%	566,73	449,88	445,8	487,47
	60%	215,26	138,67	198,84	184,2567
$d/D = 0,8;$ $\alpha = 140^\circ;$ $\beta = 20^\circ$	20%	627,58	553,61	580,91	587,3667
	40%	395,86	320,58	388,1	368,18
	60%	135,96	73,73	108,6	106,0967
$d/D = 0,8;$ $\alpha = 140^\circ;$ $\beta = 30^\circ$	20%	585,93	582,38	612,4	593,57
	40%	312,02	225,06	228,72	255,2667
	60%	146,64	22,7	102,9	90,74667

## Приложение Б

### Матрица планирования теоретического исследования

Таблица Б.1 – Матрица планирования эксперимента в кодовых и натуральных обозначениях факторов, для бойков со скосами  $\beta=10^\circ$

N	Кодовое обозначение			Натуральное обозначение			$y_{ug}$		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$d_o/D$	$\alpha, ^\circ$	$\varepsilon, \%$	$d_1/D$	L	t
1	-1	-1	-1	0,3	90	20	0,23	456,7	40,3
2	0	-1	-1	0,55	90	20	0,41	442,5	87,6
3	+1	-1	-1	0,8	90	20	0,68	618,3	202,8
4	-1	0	-1	0,3	115	20	0,2	422,2	28,1
5	0	0	-1	0,55	115	20	0,36	400,9	76,1
6	+1	0	-1	0,8	115	20	0,57	659,1	194,7
7	-1	+1	-1	0,3	140	20	0,18	382,5	38,9
8	0	+1	-1	0,55	140	20	0,36	368,7	90,1
9	+1	+1	-1	0,8	140	20	0,61	589,1	193,8
10	-1	-1	0	0,3	90	40	0,09	743,6	47,2
11	0	-1	0	0,55	90	40	0,26	636,9	99,2
12	+1	-1	0	0,8	90	40	0,32	913	238,2
13	-1	0	0	0,3	115	40	0,07	644,4	50,2
14	0	0	0	0,55	115	40	0,18	639,9	94,7
15	+1	0	0	0,8	115	40	0,37	916,3	269,6
16	-1	+1	0	0,3	140	40	0,08	627,8	55,1
17	0	+1	0	0,55	140	40	0,17	528,8	97,6
18	+1	+1	0	0,8	140	40	0,49	740,5	226,1
19	-1	-1	+1	0,3	90	60	0	1499	1352
20	0	-1	+1	0,55	90	60	0	1363	1361
21	+1	-1	+1	0,8	90	60	0,15	1516	513,8
22	-1	0	+1	0,3	115	60	0	1554	1514
23	0	0	+1	0,55	115	60	0	1327	1289
24	+1	0	+1	0,8	115	60	0,15	1424	525,4
25	-1	+1	+1	0,3	140	60	0	1303	1254
26	0	+1	+1	0,55	140	60	0	1287	1235
27	+1	+1	+1	0,8	140	60	0,18	1310	677,2

Таблица Б.2 – Матрица планирования эксперимента в кодовых и натуральных обозначениях факторов, для бойков со скосами  $\beta=20^\circ$

N	Кодовое обозначение			Натуральное обозначение			$y_{ug}$		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$d_o/D$	$\alpha, ^\circ$	$\varepsilon, \%$	$d_1/D$	L	t
1	-1	-1	-1	0,3	90	20	0,22	441,1	23,2
2	0	-1	-1	0,55	90	20	0,38	426,2	68,9
3	+1	-1	-1	0,8	90	20	0,57	657,8	185,7
4	-1	0	-1	0,3	115	20	0,2	422,9	21,18
5	0	0	-1	0,55	115	20	0,35	375,8	84,4
6	+1	0	-1	0,8	115	20	0,59	651,1	205,9
7	-1	+1	-1	0,3	140	20	0,18	411,9	37,7
8	0	+1	-1	0,55	140	20	0,37	373,6	89,1
9	+1	+1	-1	0,8	140	20	0,59	601,1	206,8
10	-1	-1	0	0,3	90	40	0,11	733,1	33
11	0	-1	0	0,55	90	40	0,2	685,9	78,8
12	+1	-1	0	0,8	90	40	0,29	888,2	226,3
13	-1	0	0	0,3	115	40	0,08	715	40,06
14	0	0	0	0,55	115	40	0,02	643,9	87,2
15	+1	0	0	0,8	115	40	0,32	889,6	252,4
16	-1	+1	0	0,3	140	40	0,07	632,3	39,96
17	0	+1	0	0,55	140	40	0,16	550,5	83,8
18	+1	+1	0	0,8	140	40	0,37	864,8	300,6
19	-1	-1	+1	0,3	90	60	0	1479	1421
20	0	-1	+1	0,55	90	60	0	1440	1422
21	+1	-1	+1	0,8	90	60	0,12	1579	742,1
22	-1	0	+1	0,3	115	60	0	1464	1434
23	0	0	+1	0,55	115	60	0	1381	1345
24	+1	0	+1	0,8	115	60	0,11	1577	726,1
25	-1	+1	+1	0,3	140	60	0	1518	1470
26	0	+1	+1	0,55	140	60	0	1408	1382
27	+1	+1	+1	0,8	140	60	0,11	1506	710,4

Таблица Б.3 – Матрица планирования эксперимента в кодовых и натуральных обозначениях факторов, для бойков со скосами  $\beta=30^\circ$

N	Кодовое обозначение			Натуральное обозначение			$Y_{ug}$		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$d_o/D$	$\alpha, ^\circ$	$\varepsilon, \%$	$d_1/D$	L	t
1	-1	-1	-1	0,3	90	20	0,23	406,2	27
2	0	-1	-1	0,55	90	20	0,37	398,7	86,8
3	+1	-1	-1	0,8	90	20	0,59	636,6	194,4
4	-1	0	-1	0,3	115	20	0,25	413,9	31
5	0	0	-1	0,55	115	20	0,35	387	98,9
6	+1	0	-1	0,8	115	20	0,58	635,8	205,4
7	-1	+1	-1	0,3	140	20	0,20	411,2	75,4
8	0	+1	-1	0,55	140	20	0,35	365,3	92,5
9	+1	+1	-1	0,8	140	20	0,59	601,4	209,4
10	-1	-1	0	0,3	90	40	0,09	745,9	24,1
11	0	-1	0	0,55	90	40	0,19	633,9	93,6
12	+1	-1	0	0,8	90	40	0,34	883,9	218,3
13	-1	0	0	0,3	115	40	0	654,9	616,5
14	0	0	0	0,55	115	40	0,17	604,2	107,3
15	+1	0	0	0,8	115	40	0,35	874,7	277,7
16	-1	+1	0	0,3	140	40	0,06	649,6	27,6
17	0	+1	0	0,55	140	40	0,17	525,9	101,5
18	+1	+1	0	0,8	140	40	0,26	985,5	416,6
19	-1	-1	+1	0,3	90	60	0	1481	1447
20	0	-1	+1	0,55	90	60	0	1420	1367
21	+1	-1	+1	0,8	90	60	0,07	1561	776
22	-1	0	+1	0,3	115	60	0	1450	1444
23	0	0	+1	0,55	115	60	0	1372	1313
24	+1	0	+1	0,8	115	60	0,15	1565	772,4
25	-1	+1	+1	0,3	140	60	0	1434	1405
26	0	+1	+1	0,55	140	60	0	1422	1397
27	+1	+1	+1	0,8	140	60	0,09	1515	814,9

## **Приложение В**

Акты внедрения результатов работы на

ПАО «НКМЗ» и ПАО «ЭМСС»

ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО  
**НОВОКРАМАТОРСЬКИЙ  
 МАШИНОБУДІВНИЙ  
 ЗАВОД**  
 ПАТ «НКМЗ»



ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
**НОВОКРАМАТОРСКИЙ  
 МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ  
 ЗАВОД**  
 ПАО «НКМЗ»

вул. Орджонікідзе 5, м. Краматорськ, Донецька область, 84305, Україна, тел. +38 (03264) 7-88-00,  
 факс +38 (03264) 7-22-49 телетайп, 330171, e-mail: ztm//nkmz.donetsk.ua, www.nkmz.com, код ЄРДПОУ 05763599

№

На №

від

## АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Комісія у складі представників ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (НКМЗ): головний інженер ПАТ «НКМЗ» О. І. Волошин, начальник бюро крупних поковок к.т.н. І. А. Грачов, начальник ковальсько-пресового цеха М. В. Олешко та представників Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА): проректор з наукової роботи, управління розвитком та міжнародних зв'язків М. А. Турчанні, заступник завідувача кафедри ОМТ, к.т.н., доцент П. Б. Абхарі склали цей акт в тім, що в результаті проведених спільних наукових досліджень та опитно-промислових апробацій на ПАТ «НКМЗ» у рамках науково-практичного договору о співдружності аспірантами кафедри ОМТ В. М. Злигоревим та М. О. Марковою впроваджені на ПАТ «НКМЗ» наступні результати наукових робіт:

1. Удосконалені ресурсозберігаючі технологічні процеси кування великогабаритних поковок відповідального призначення зі злитків (опорних валів, порожніх валів, дисків та ін.) які передбачають використання операції осадження. Запропоновані нові процеси покращують проробку литої структури металу злитка та сприяють заварюванню внутрішніх дефектів металургійного походження при менших значеннях коефіцієнтах укова за рахунок кування поковок бойками з випуклими профілем. Розроблена нова схема деформації змінює напружено - деформований стан металу злитка, що виключає появу розтягуючи напружень в процесі кування.
2. Рекомендації з розробки нових енергозберігаючих технологічних процесів кування крупних поковок, креслення оснащення та механічні режими кування.

Нові технологічні процеси кування забезпечили підвищення якості великогабаритних поковок та зменшення відсотка браку на 30...40 %, що дозволило забезпечити зниження витрат при виготовленні крупних поковок. Механічні властивості деталей покращилися в середньому на 8...11 %.

15 001249 \*

Акт призначений для спеціалізованих вчених рад з захисту кандидатських дисертацій та не є основою для висунення фінансових вимог.

### НКМЗ

Начальник бюро крупних поковок, к.т.н.

 I. А. Грачов

Начальник ковальсько-пресового цеха

 М. В. Олешко  
«Затверджую»

Головний інженер ПАТ «НКМЗ»

 О.І. Волошин  


### ДДМА

Заст. зав. кафедри ОМТ, к.т.н.

 П. Б. Абхари

«Затверджую»

Проректор з наукової роботи, управління розвитком та міжнародних зв'язків

 М. А. Турчанін  


**ПАТ «НКМЗ»**  
**Розрахунок економічного ефекту**

**Тема: «Вдосконалені ресурсозберігаючі технологічні процеси кування великогабаритних поковок відповідального призначення зі злитків, які передбачають операцію осадження»**

**Анотація**

*Мета:* Забезпечення якості поковок за рахунок спрямованої інтенсивної проробки центральної зони великогабаритних злитків.

*Проблема:* Основну частку в собівартості виготовлення великогабаритних поковок (60 ÷ 80%) становлять витрати металургійного виробництва. Значною мірою на рівень цих витрат впливають особливості реалізації технологічних процесів і стан обладнання, кваліфікація персоналу та т.п. Рішення задачі забезпечення конкурентоспроможності продукції передбачає як зниження витрат на виготовлення, так і підвищення якості. Так, пріоритетним є зниження браку по внутрішнім дефектам, що виявляються при УЗК.

*Рішення:* Впровадити у виробництво вдосконалені ресурсозберігаючі технологічні процеси кування великогабаритних поковок відповідального призначення. Запропоновані нові техпроцеси покращують проробку вихідної литої структури металу злитка і сприяють дробленню і заварюванню внутрішніх дефектів металургійного походження при менших значеннях коефіцієнтів укову за рахунок раціонального використання ефекту зсувних деформацій. Розроблені нові схеми деформації змінюють напружено-деформований стан металу злитка.

**Розрахунок економічного ефекту:**

Розрахунок заснований тільки на економії витрат від браку (витрати на поповнення), без урахування підвищення рівня якості за новою технологією при загальній відповідності вимогам, що пред'являються до якості продукції поковок при проведенні УЗК.

Розрахунок економічного ефекту проведено за період з 1.04.14 по 1.04.15.

*Вихідні дані:*

Порівняльні дані по впровадженню нових технологічних процесів кування.

Таблиця 1.

Номенклатура, яку досліджують			За традиційною технологією			За новою технологією з осадженням профільованої заготовки		
Найменування	Марка сталі	Мзл, т	Кіл-ть, шт	Обсяг забракованої продукції за результатами УЗК		Кіл-ть, шт	Обсяг забракованої продукції за результатами УЗК	
				шт	%		шт	%
Балер	40ХН2МА	91,0	-	-	-	3	-	-
Вал ротора	AiSi4142	40,7	1	1	100	1	-	-
Вал	20ГС	88,2	1	1	100	1	-	-
Валок	50ХГМ	151,3	1	1	100	3	1	33,3
	70Х3ГНМФ	57,4	5	-	-	5	-	-
		59,2	5	-	-	6	-	-
		65,5	3	1	33,3	2	-	-
	75ХМФ	68,6	8	-	-	3	1	33,3
90ХФ	57,4	4	-	-	1	-	-	
ВСЬОГО			28	4	<b>14,29</b>	25	2	<b>8,00</b>

Зведені дані за результатами впровадження нових техпроцесів кування.

Таблиця 2.

Найменування	Стан	Кіл-ть злитків, шт	Σ Мзл., т	
			т	%
Кування за пропонованою технологією	брак	2	219,9	11,62
	придатні	23	1672,3	88,38
ВСЬОГО		25	1892,2	50,73
Кування за традиційною технологією	брак	4	345,7	18,81
	придатні	24	1492,4	81,19
ВСЬОГО		28	1838,1	49,27
	брак	6	565,6	15,16
	придатні	47	3164,7	84,84
РАЗОМ		53	3730,3	100,00

**Зниження рівня браку склало:**

$$\Delta B = (1 - B1/B) \times 100 = (1 - 11,62/18,81) \times 100 = 38,22 \%, \text{ де}$$

$B$  – фактичний рівень браку за звітний період за традиційною технологією;

$B1$  – фактичний рівень браку за звітний період за новою технологією.

**Розрахунковий обсяг браку на поковках, виготовлених за новою технологією, з урахуванням фактичного рівня браку за традиційною технологією склав:**

$$M_{\text{зл бр вир}}^1 = \Sigma M_{\text{зл вир}} \times B/100 = 1892,2 \times 18,81/100 = 355,7 \text{ т, де}$$

$M_{\text{зл бр вир}}^1$  – розрахунковий обсяг браку при виробництві поковок за період впровадження нових технологій кування з урахуванням фактичного рівня браку за традиційною технологією;

$\Sigma M_{\text{зл вир}}$  – фактичний обсяг рідкої сталі для виробництва поковок за новою технологією.

**Економія рідкої сталі за рахунок впровадження нової технології склала:**

$$\Delta M_{\text{зл}} = M_{\text{зл бр вир}}^1 - M_{\text{зл бр вир}} = 355,7 - 219,9 = 135,8 \text{ т, де}$$

$M_{\text{зл бр вир}}$  – фактичний обсяг браку при виробництві поковок за новою технологією.

**Економічний ефект від впровадження нової технології склав:**

$$E = \Delta M_{\text{зл}} \times C = 135,8 \times 13813,5 = 1875873,3 \text{ грн, де}$$

$C$  – середня собівартість рідкої сталі для виготовлення поковок за СП-1 за 7 міс. 2015 р.

Головний металург

Начальник ПЕВ

В. Ф. Шумаков

Т. В. Краска

«Затверджую»

Технічний директор  
ПАО «Енергомашспецсталь»



О.А. Селютін

**Акт впровадження результатів спільних науково-дослідних робіт  
Донбаської державної машинобудівної академії  
на ПАТ «Енергомашспецсталь»**

В результаті проведених спільних наукових досліджень докторанта кафедри «Обробка металів тиском» Алієвої Л.І. та аспіранта Маркової М.А. впроваджені на ПАТ «Енергомашспецсталь» наступні результати:

- нові технологічні прийоми в вигляді елементів штампування в процесах кування крупних поковок складних форм та розроблені на їх основі технології, що забезпечує підвищення точності, зменшення металоємності та розширення номенклатури виробів які виготовляються на заводі;

- рекомендації та нові технологічні процеси виготовлення порожнистих виробів типу циліндрів із глухим та наскрізним дном куванням, що забезпечують отримання високоякісних поковок із зменшеною металоємністю;

10-15%, за рахунок зменшення величини напусків, підвищення точності поковок. Це в цілому дозволило знизити матеріальні витрати на виробництво крупних поковок типу дисків на 5–10%.

Реальний економічний ефект становив 350 тис. грн. за рівнем цін на грудень 2014 року. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 1100 тис. грн. за рівнем цін на грудень 2014 року.

Акт призначений для спеціалізованих вчених рад з захисту докторських та кандидатських дисертацій та не є основою для висунення фінансових вимог.

Розрахунок економічного ефекту не наводиться, так як містить елементи комерційної таємниці ПАТ «Енергомашспецсталь».

**ПАО «Енергомашспецсталь»**

Начальник центральної заводської лабораторії



А.М. Коломоєць

Начальника ковальського-пресового цеху



В.В. Панов

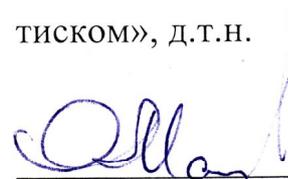
**ДДМА**

Проректор з наукової роботи та зовнішніх зв'язків проф., д.т.н.



І.С. Алієв

Проф. кафедри «Обробка металів тиском», д.т.н.



О.С.Марков

## **Приложение Г**

Акты про внедрение и использование результатов  
диссертационной работы в НИР и учебный процесс ДГМА

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з наукової роботи  
управління розвитком та  
міжнародних зв'язків  
д.т.н., проф. М. А. Турчанин



  
«10» травня 2016

**АКТ ПРО ВИКОРИСТАННЯ**  
розробок дисертаційної роботи  
аспірантки кафедри «Обробка металів тиском»  
**Маркової Марини Олександрівни**  
у науково-дослідних роботах ДДМА

Матеріали кандидатської дисертаційної роботи аспіранта кафедри «Обробка металів тиском» Донбаської державної машинобудівної академії Маркової М.О., а саме:

– закономірності розподілу параметрів НДС пустотілої заготовки в процесі протягування без оправки залежно від різних вихідних співвідношень розмірів заготовки, ступеня обтиснення, величини подачі й геометрії інструмента, що дозволило встановити схему кування з рівномірним розподілом деформацій у тілі заготовки;

– запропонований параметр оцінки інтенсивності подовження заготовки, який дозволяє оцінити ступінь заковування осевого отвору через зміну площі поперечного перерізу пустотілої заготовки в процесі кування;

– вплив величини подачі, кутів вирізів і кутів скосів вирізних бойків на формозміну отвору пустотілої заготовки, що дозволило встановити ефективну геометрію інструмента, режими кування й розробити нову схему деформування без оправки з мінімальним заковуванням отвору

були використані у ДДМА при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт, передбачені планами Міністерства освіти і науки України в період 2011–2016 р.р № держреєстрації:

– 0111U006174 «Розробка та дослідження технологічних способів і процесів пластичного деформування виробів складних конфігурацій підвищеної якості з нових матеріалів»;

– 0112U001244 «Удосконалення ресурсозберігаючих процесів та устаткування послідовного локального деформування куванням, прокаткою та волочінням виробів складної форми зі спеціальних матеріалів» наказ № 1241 від 28.10.11;

– 0113U000608 «Розробка ресурсозберігаючих процесів деформування виробів із конструкційних та спеціальних матеріалів на основі регулювання кінематики пластичної течії»

– 0116U003614 «Розробка та дослідження технологічних процесів та оснащення для виготовлення куванням довгомірних пустотілих заготовок».

Довідка призначена для надання в спеціалізовану раду Д. 12.105.01 при Донбаській державній машинобудівній академії.

Начальник науково-дослідного сектору



О.Я. Белицька

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Перший проректор  
Донбаської державної  
машинобудівної академії  
А.М. Фесенко



« 12 » травня 2016

**АКТ**  
**про впровадження результатів дисертаційної роботи**  
**аспірантки Маркової Марини Олександрівни на тему**  
**«Удосконалення технологічних процесів виготовлення пустотілих поковок на**  
**основі способу кування без оправки»**  
**у навчальний процес**

Члени комісії у складі декана факультету «Інтегрованих технологій та обладнання», професор кафедри зварювального виробництва, к.т.н. Гринь О. Г. та заступника завідувача кафедри «Обробка металів тиском», доцент, к.т.н. Абхари П. Б. склали цей акт про те, що кафедрою обробки металів тиском Донбаської державної машинобудівної академії в період 2014–2016 р.р. Марковою М. О. були впроваджені у навчальний процес методичні матеріали, що увійшли до лекцій, практичних та лабораторних робіт наступних дисциплін: «Технологія кування», «Кування крупних поковок», «Ресурсозберігаючі технології кування». В наведених дисциплінах використані результати теоретичних та експериментальних досліджень, які були виконані аспіранткою М. О. Марковою при підготовці дисертаційної роботи:

- – новий спосіб деформування пустотілих заготовок без оправки вирізними бойками зі скосами, який розширює технологічні можливості процесу кування;
- – методику проектування технологічних процесів кування, яка полягає у визначенні діаметра отвору в заготовці перед протягуванням без оправки залежно від діаметру отвору в поковці й ступеня деформації;
- – нові технологічні процеси, механічні режими деформування й геометрія деформуючого інструмента для кування пустотілих заготовок без оправки, які дозволяють інтенсифікувати процес протягування й забезпечують рівномірний розподіл деформацій у тілі поковки.

Науково-практичні розробки, отримані Марковою М. О. при виконанні кандидатської дисертаційної роботи, використані в методичних вказівках з курсового та дипломного проектування на кафедрі ОМТ, а також використовуються в НДР студентів та магістрів кафедри.

Заст. зав. кафедри ОМТ,  
доц. к.т.н.

П.Б. Абхари

Декан факультету «Інтегрований технологій  
та обладнання», професор кафедри  
зварювального виробництва, к.т.н.

О. Г. Гринь