

Донбасская государственная машиностроительная академия

На правах рукописи

ЗЛЫГОРЕВ ВИТАЛИЙ НИКОЛАЕВИЧ

УДК 621.735.3-416

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
КОВКИ КРУПНЫХ ПОКОВОК НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
СПОСОБА ОСАДКИ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК

Специальность: 05.03.05 – процессы и машины обработки
давлением

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Марков Олег Евгеньевич

Краматорск – 2016

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 МЕТОДЫ РАСЧЕТА, СПОСОБЫ ОСАДКИ, ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОКОВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ (состояние вопроса)	13
1.1 Современные тенденции в разработке и проектировании процессов ковки поковок ответственного назначения.....	13
1.2 Способы формообразующей осадки для получения дисков.....	17
1.3 Способы осадки при ковке валов и плит	20
1.4 Применяемые методы расчета процессов ковки крупных поковок	29
1.4.1 Теоретические исследования в процессах ковки	29
1.4.2 Экспериментальные исследования процессов ковки поковок ответственного назначения	32
1.5 Направления совершенствования технологических процессов и инструмента для ковки поковок ответственного назначения.....	33
Выводы по разделу 1	35
2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	37
2.1 Методика теоретических исследований процессов профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок	37
2.1.1 Исследование процессов профилирования выпуклыми бойками	41
2.1.2 Методика определения размеров осевого дефекта в процессе осадки четырехлучевых заготовок	44
2.1.3 Методика определения показателя напряженного состояния	47
2.1.4 Методика определения интенсивности логарифмических деформаций.....	48
2.2 Методика экспериментальных исследований.....	49

	3
2.2.1 Экспериментальное оборудование	49
2.2.2 Материалы для моделирования	52
2.2.3 Исследование механизма заковывания дефектов на свинцовых и стальных моделях.....	54
Выводы по разделу 2	59
3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОФИЛИРОВАНИЯ И ОСАДКИ ЧЕТЫРЕХЛУЧЕВЫХ ЗАГОТОВОК	61
3.1 Напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе ее профилирования выпуклыми бойками	61
3.1.1 Влияние формы выпуклых радиусных бойков на распределение интенсивности деформации и степень закрытия осевого дефекта.....	61
3.1.2 Влияние формы выпуклых бойков с клиновым профилем на распределение интенсивности деформаций и степень закрытия осевого дефекта	64
3.2 Напряженно-деформированное состояние заготовки и заковка осевого дефекта в процессе осадки четырехлучевых заготовок	66
3.2.1 Закрытие дефекта в процессе осадки заготовки	66
3.2.2 Исследование напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе осадки четырехлучевых заготовок	73
3.2.3 Исследование теплового состояния заготовки в процессе осадки четырехлучевых заготовок	78
3.3 Смещение точек осевой зоны слитка и НДС заготовки в процессе профилирования на четырехлучевое сечение заготовок и их последующей осадки.....	80
Выводы по разделу 3	88
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОФИЛИРОВАНИЯ И ОСАДКИ ЗАГОТОВОК С ЧЕТЫРЕХЛУЧЕВЫМ СЕЧЕНИЕМ	91

4.1 Экспериментальные исследования процессов профилирования четырёхлучевых заготовок на свинцовых моделях.....	91
4.1.1 Деформированное состояние при профилировании заготовок выпуклыми бойками	92
4.1.2 Распределение деформаций при профилировании выпуклыми бойками с углом 120 °	95
4.1.3 Закрытие осевых дефектов при профилировании выпуклыми бойками.....	100
4.1.4 Силовые параметры при профилировании выпуклыми бойками.....	102
4.2 Экспериментальные исследования закрытия осевых дефектов в процессе профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок на свинцовых моделях	103
4.3 Экспериментальные исследования закрытия осевых дефектов в процессе профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок на стальных моделях..	106
Выводы по разделу 4.....	111

5 ПРОМЫШЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И АПРОБАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОСАДКИ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК НА ЧЕТЫРЕХЛУЧЕВОЕ СЕЧЕНИЕ	113
5.1 Промышленно-экспериментальное исследованиековки вала с применением осадки профилированной заготовки, полученной выпуклым бойком на плоской плите	113
5.2 Промышленно-экспериментальное исследованиековки с применением осадки профилированной заготовки, полученной двумя выпуклыми бойками	124
5.3 Промышленно-экспериментальное исследованиековки пустотелого диска с применением осадки профилированной заготовки.....	131
5.4 Промышленнаяковка поковок ответственного назначения сложной формы с применением осадки четырёхлучевой заготовки	137
Выводы по разделу 5.....	147
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ	149

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	152
Приложение А. Базовый технологический процесс ковки опорного валка горячей прокатки.....	176
Приложение Б. Технологический процесс ковки опорного валка горячей прокатки выпуклым бойком на плоской плите	180
Приложение В. Чертёж выпуклого бойка.....	184
Приложение Г 1. Заключение УЗК 1-го опорного валка, полученного по базовому технологическому процессу ковки	185
Приложение Г 2. Заключение УЗК 2-го опорного валка, полученного по базовому технологическому процессу ковки	186
Приложение Г 3. Заключение УЗК 1-го опорного валка, полученного по новому технологическому процессу ковки	187
Приложение Д. Новый техпроцесс ковки опорного валка двумя выпуклыми бойками	188
Приложение Е. Заключение УЗК опорного валка, полученного по новому технологическому процессу ковки	192
Приложение Ж. Карта фиксации поковки, соответствующей эксперименту 2–Э–13.....	193
Приложение И 1. Заключение УЗК поковки «Левая часть вала» чертеж 692с – 874, полученного по базовому технологическому процессу ковки	194
Приложение И 2. Заключение УЗК поковки «Левая часть вала», полученного по новому технологическому процессу ковки с прожимом на четырехлучевую заготовку	195
Приложение К. Акты внедрения результатов диссертационной работы.....	196

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В современных условиях для Украины важно развитие экспортно-ориентированных отраслей промышленности. Значительный объём экспорта Украины обеспечивает тяжелое и энергетическое машиностроение. Конкурирование на международных рынках требует повышение качества и снижение себестоимости производимой продукции.

Все детали машин в тяжелом и энергетическом машиностроении относятся к изделиям ответственного назначения и получают способами горячего пластического деформирования. Размеры и масса этих деталей предполагают их получение ковкой. В качестве заготовок дляковки используются слитки. Кузнечные слитки характеризуются низким качеством, вызванным наличием литой структуры и дефектами металлургического происхождения (осевая рыхлость). Для проработки литой структуры и заковывания осевых пустот слитка поковки ответственного назначения должны изготавливаться с коэффициентом укова больше 2,5...3,0. Заданную степень деформации литой заготовки можно обеспечить только с применением операции осадки слитка. Однако в последних работах отечественных и зарубежных исследователей было установлено, что операция осадки цилиндрических заготовок (сбиллетированных слитков) не способствует закрытию осевых дефектов кузнечных слитков. Это объясняется неблагоприятным деформированным состоянием в процессе осадки цилиндрической заготовки. Радиальное течение металла при осадке приводит к появлению растягивающих деформаций в осевой зоне заготовки. Это, в свою очередь, приводит к появлению внутренних разрывов, которые сложно устранить ковкой (протяжкой) на последующих операциях. Более того, в процессе осадки цилиндрических заготовок вследствие образования бочкообразной боковой поверхности заготовки возникают растягивающие напряжения, которые приводят к образованию продольных поверхностных трещин.

Исключить применение операции осадки из всех технологических процессовковки не всегда возможно. Это обусловлено сложностью полученияпоковок с поперечным сечением большим, чем сечение слитка, а также требованиями заказчика по коэффициенту укова.

Изменить напряженно-деформированное состояние в процессе осадки можно за счёт применения заготовок специальной формы. Эта форма заготовок должна обеспечивать появление сжимающих напряжений и деформаций в дефектной осевой зоне слитка (для заковывания пустот металлургического происхождения) и боковой поверхности заготовки (для исключения образования продольных трещин). Таким образом, в технологический процессковки должна быть добавлена операция для профилирования кузнечного слитка на специальный профиль. Профилирование слитка должно обеспечивать такую форму заготовки, которая будет снижать уровень растягивающих напряжений в осевой зоне в процессе осадки.

В литературе известны способы осадки заготовок с вогнутой боковой поверхностью. Вогнутая боковая поверхность способствует появлению сжимающих напряжений в осевой зоне и боковой поверхности осаживаемой заготовки. Однако такой профиль заготовки операциямиковки получить сложно, поэтому способы осадки заготовок с вогнутой боковой поверхностью не получили широкого распространения в промышленности.

В этой связи совершенствование процессовковки на основе применения нового способа осадки профилированных заготовок для повышения качества крупных поковок ответственного назначения за счёт заковки осевых дефектов, исключения образования поверхностных трещин и повышения проработки структуры металла в объёме заготовки представляет значительное научное и практическое значение, что подтверждает актуальность темы диссертационной работы.

Связь с научными программами, планами, темами. Результаты работы направлены на решение задач, поставленных в Программе научно-технического развития Донецкой области на период до 2020 года (решение

областного Совета от 22.03.2002 г, номер 3 / 25-656). Диссертационная работа выполнена в рамках задач, соответствующих научному направлению «Развитие ресурсосберегающих процессов обработки давлением на основе создания новых технологических способов и методик анализа закономерностей пластического деформирования» научной школы кафедр «Обработка металлов давлением» (ОМД) и «Механика пластического формоизменения» (МПФ) Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА). Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы (НИР) ДГМА (№ госрегистрации 0115U004736), а также в рамках НИР, проводимых на ПАТ «Новокраматорский машиностроительный завод», при выполнении которых автор принимал участие как исполнитель.

Цель работы состоит в повышении качества крупных поковок ответственного назначения за счёт заковки осевых дефектов и повышения проработки структуры металла в объёме заготовки на основе применения нового способа осадки профилированных заготовок.

Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

– провести анализ основных показателей качества крупных поковок ответственного назначения базовых технологических процессовковки и обосновать направления дальнейшего их совершенствования;

– разработать методику проведения теоретических и экспериментальных исследований процессов профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок;

– установить влияние операции профилирования цилиндрической заготовки на четырёхлучевое сечение с различными геометрическими параметрами на напряженно-деформированное состояние и заковку осевых дефектов на этапе профилирования, что позволит спроектировать специальную кузнечную оснастку;

– оценить влияние геометрии четырёхлучевых заготовок на напряженно-деформированное состояние и заковку осевых дефектов в процессе осадки

профилированных заготовок, что позволит установить эффективную схему деформирования;

– провести проверку полученных теоретических результатов экспериментальными исследованиями изменения размеров осевых дефектов при профилировании и осадки заготовок;

– разработать новый научно-обоснованный способ осадки профилированных заготовок, который повышает качество поковок ответственного назначения;

– на основе проведенных комплексных теоретических и экспериментальных исследований разработать технологические и конструкторские рекомендации по проектированию технологических процессовковки по новым схемам деформирования и инструмента для профилирования слитков, разработать методику для проектирования процессов профилирования и осадки заготовок, которая позволит повысить качество получаемых поковок;

– провести промышленную апробацию новых технологических процессов с применением осадки четырёхлучевых заготовок и внедрить их в производство.

Объектом исследования являются технологические процессыковки крупных поковок.

Предметом исследования выступают параметры напряженно-деформированного состояния, закономерности изменения размеров осевых дефектов в процессе профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок, а также геометрия деформирующего инструмента.

Методы исследования. Теоретические исследования напряженно-деформированного состояния заготовки и закрытия осевых дефектов производились с использованием метода конечных элементов (МКЭ). Проверка достоверности полученных теоретических результатов производилась экспериментальными исследованиями в лабораторных и производственных условиях. Экспериментальные исследования базировались на законах подобия и моделирования процессов горячего пластического деформирования на свин-

цовых и стальных образцах. Обработка результатов исследований производилась с использованием методов статистики. Достоверность установленных научных результатов, выводов и рекомендаций обеспечена использованием современных методов моделирования, подтверждена экспериментальными исследованиями и промышленной апробацией.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые на основе метода конечных элементов установлены закономерности изменения размеров осевого дефекта в процессе профилирования четырёхлучевых заготовок с различной глубиной, углами и радиусами скруглений вогнутых граней, что позволило установить рациональную геометрию деформирующего инструмента для интенсификации закрытия осевого дефекта;

2. Впервые установлены параметры напряженно-деформированного состояния в процессе осадки четырёхлучевой заготовки с различной глубиной и углом вогнутых граней, что позволило выбрать схему деформирования, обеспечивающую высокий уровень сжимающих напряжений в осевой дефектной зоне слитка;

3. Впервые установлены закономерности смещения точек осевой зоны заготовки при профилировании выпуклыми бойками и последующей осадки, что позволило разработать эффективный способ ковки крупных слитков;

4. Получили дальнейшее развитие представления о силовых параметрах процесса осадки профилированных на четырёхлучевое сечение заготовок, что позволило уточнить расчеты по выбору оборудования и режимов деформирования.

Практическую ценность диссертационной работы представляют следующие её основные результаты:

– предложен новый способ осадки четырёхлучевых заготовок, который повышает качество крупных поковок ответственного назначения;

– разработаны технологические рекомендации для проектирования новых процессовковки с применением операции осадки четырёхлучевых заготовок;

– разработана методика проектирования процессовковки крупных поковок с применением операции профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок, которая позволяет определить геометрию деформирующего инструмента и режимовковки для максимальной заковки осевых дефектов;

– разработана новая конструкция выпуклых бойков с клиновым профилем, применение которой повышает равномерность проработки структуры за счет равномерного распределения деформаций и повышает уровень сжимающих напряжений в осевой зоне заготовки при профилировании и осадке;

– спроектированы и внедрены новые технологические процессыковки крупных поковок с применением операций профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок, которые повысили качество поковок.

Экономический эффект от внедрения новых технологических процессовковки крупных поковок с применением операции осадки четырёхлучевых заготовок на ПАО «НКМЗ» с учетом долевого участия автора составил 1 875 873 грн. по уровню цен 2015 г.

Научно-исследовательские результаты диссертации используются в учебном процессе кафедры ОМД ДГМА при изучении дисциплин «Технологияковки» и «Ковка крупных поковок», а также при выполнении студентами курсовых, дипломных проектов и магистерских работ.

Личный вклад соискателя. Все основные научно-практические результаты установлены автором самостоятельно. При проведении научно-исследовательских работ, результаты которых опубликованы в соавторстве, автором поставлены задачи исследований, выполнены теоретические исследования, проведен анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований, сформулированы выводы и разработаны рекомендации для совершенствования технологических процессовковки крупногабаритных поковок. Автор принимал участие в планировании и проведении эксперимен-

тальных исследований, а также во внедрении результатов работы в производство. 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): XII–XIII МНТК «Достижения и проблемы развития технологий и машин обработки давлением» (Краматорск, 2015–2016); IV МНТК НКМЗ (Краматорск, НКМЗ, 2005); XXI International Conference on Metallurgy and Materials «METAL 2012» (Brno, Czech Republic, 2012 р.); XVII МНТК, посвященная 80-летию ПАО «НКМЗ» «Достижения и проблемы развития технологий и машин обработки давлением» (Краматорск, НКМЗ, 2014); V МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», присвячена 115-річчю підготовки спеціалістів в області ОМТ (Київ: НТТУ «КПІ», 2014); VII МНТК «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии» (Харьков: НТУ ХПИ, 2015); IV МНТК молодых ученых та студентів (Тернопіль, 2015); а также на ежегодных научных семинарах ДГМА (2015–2016 гг.) и объединенном научном семинаре по ОМД ДГМА (2016 г.).

Публикации. Материалы диссертационной работы опубликованы в 19 печатных работах, из них 9 научных статей в 9 специализированных изданиях МОН Украины; 2 статьи в зарубежных изданиях; 1 монография; 1 статья в другом издании; 3 тезиса докладов на МНТК. Новые технические решения защищены 3 патентами Украины.

1 МЕТОДЫ РАСЧЕТА, СПОСОБЫ ОСАДКИ, ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОКОВОК ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ (состояние вопроса)

1.1 Современные тенденции в разработке и проектировании процессов ковки поковок ответственного назначения

Тенденции развития металлургического производства направлены на разработку новых технологических процессов ковки крупных поковок, гарантирующих получение высокого качества и низкой себестоимостью [1 – 4]. Получение поковок с высоким комплексом механических свойств оценивается уковом, который отвечает за предполагаемое качество поковок [5 – 7].

На сегодняшний день при изготовлении заготовок ответственного назначения ковкой применяют специальные способы деформирования: широкие бойки, ковку с протяжкой выпуклыми бойками, макросдвигами и т. п. [8 – 10]. Снизить себестоимость и повысить качество кованных заготовок возможно при условии внедрения новых ресурсосберегающих технологий [11 – 12].

В работе Baiqing Zhu и соавторов [13] показано, что в настоящее время существуют различные способы ковки поковок ответственного назначения. Существующие способы отличаются видом применяемых кузнечных операций, термомеханических режимов ковки, проектирования специального деформирующего инструмента [14; 15].

Качество крупных поковок существенно зависит от использования операций осадки и протяжки, и резервы совершенствования технологических процессов ковки не исчерпаны.

При рассмотрении новых технологийковки особый интерес вызывает исследование и совершенствование основной операцииковки – осадки.

L. A. Dobrzański и соавторами [16] показано, что за последние годы значительно возросла потребность в крупных поковках, которые предполагают применение операции осадки. Контроль таких деталей производится по механическим свойствам, макроструктуре, остаточным напряжениям и степени зернистой неоднородности металла в объеме. При этом существующие технологические процессыковки крупных поковок не обеспечивают получения стабильного высокого качества.

Исследования Н. Kakimoto и соавторов [17] позволили установить, что для устранения осевой пористости слитка необходимо провести предварительную его протяжку. Авторами установлен параметр для оценки закрытия пустот в процессековки. Этот параметр учитывает напряженное состояние и гидростатическое напряжение в заготовке при осадке. Осадка вдоль оси слитка без предварительной протяжки осевую пористость не уменьшает. Авторами не исследовано влияние геометрии деформирующего инструмента на равномерность проработки структуры поковок.

Одним из основных факторов, по мнению С. Куп и соавторов [18], определяющий проработку структуры поковки и ее свойства, является общая величина деформации при ковке (коэффициент укова). Однако сравнивать различные варианты технологических процессов изготовления поковок по проработке литой структуры необходимо по данным распределения накопленной величины интенсивности деформаций по сечению поковки. Это не было сделано в работе [18].

Характерными дефектами для кованных заготовок, которые претерпевают операцию осадки, является несплошность осевой зоны поковки, определяемая ультразвуковым контролем (УЗК) (рис. 1.1). Причиной образования осевой несплошности металла может служить операция осадки цилиндрического биллета.

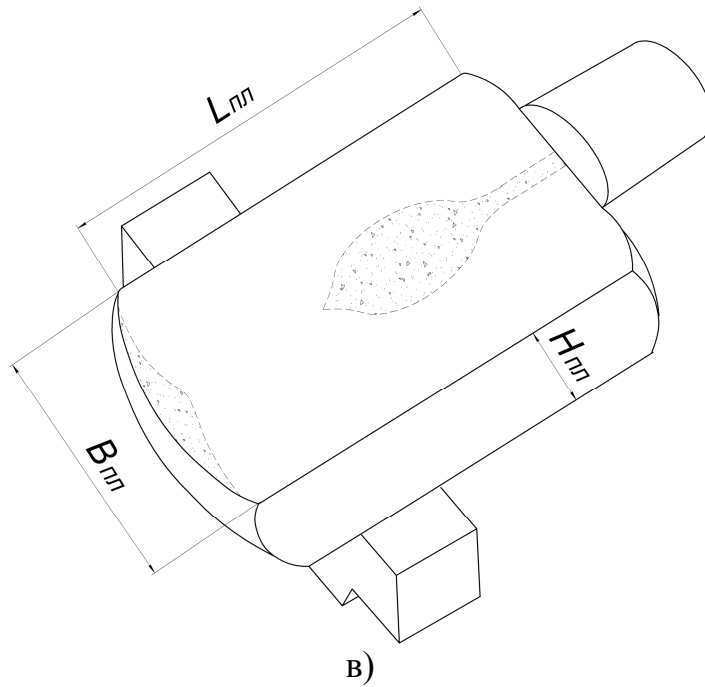
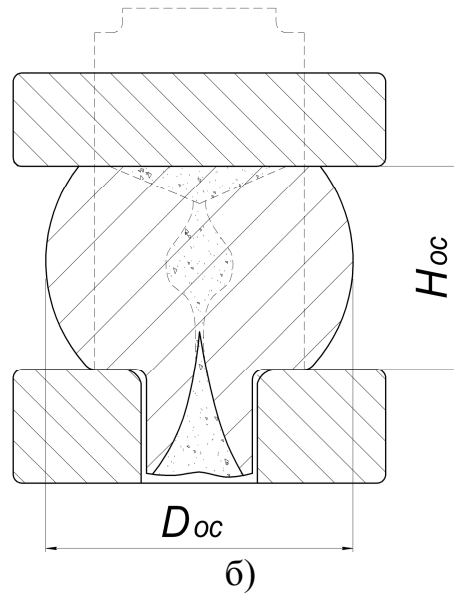
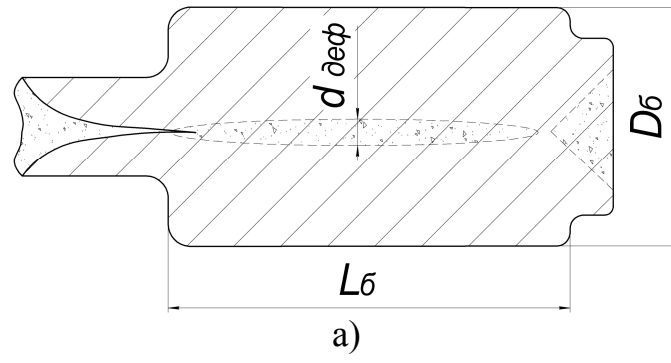


Рисунок 1.1 – Схема изменения формы осевого дефекта при ковке валов через плиту

При осадке цилиндрической заготовки происходит интенсивное радиальное течение металла, что способствует увеличению размеров осевой зоны (см. рис. 1.1, б). Дальнейшая протяжка плоскими или вырезными бойками не обеспечивает полного заковывания осевой рыхлости (см. рис. 1.1, в). Это подтверждается результатами УЗК.

По мнению Y. S. Lee [19], чрезмерное расширение ликвационной зоны в средней части слитка может быть причиной неудовлетворительного качества детали после механической обработки. Однако авторами работы не исследованы способы профилирования заготовки выпуклым инструментом для изменения НДС заготовки в процессе последующей осадки.

Согласно результатам исследователей, представленных в работах [20, 21], осадка применяется для проработки литой структуры с целью повышения ударной вязкости сплава и снижения анизотропии механических свойств. Однако результаты исследований в работах [20, 21] показывают существенное снижение равномерности распределения деформаций в процессе осадки. Авторами не предложены способы, которые повышают равномерность распределения деформаций.

Авторы работ [22, 23] установили, что операция осадки применяется как дополнительная операция, которая назначается для увеличения коэффициента улова (по требованию заказчика), а не для улучшения проработки внутренней структуры металла. Исследователями не предложены новые способы протяжки взамен операции осадки.

Осадку с последующей протяжкой обеспечивает высокую равномерность распределения деформаций вдоль оси заготовки, как это было установлено Z. J. Zhang и соавторами [24], по сравнению со схемой протяжки вырезными бойками, что подтверждает эффективность операции осадки. Однако авторами не исследовались НДС схем осадки предварительно профилированных заготовок.

1.2 Способы формообразующей осадки для получения дисков

Разработка и проектирование новых процессовковки дисков направлены на поиск рациональных способов осадки для повышенной проработки структуры металла. Тенденции совершенствования процессовковки разрабатывались следующими ведущими отечественными и зарубежными учёными: Ю. М. Антощенковым, Л. П. Беловой, В. А. Дурыниным, П. В. Камневым, Б. С. Каргиным, О. А. Кобелевым, В. П. Кривошеевым, В. В. Кухарем, О. Е. Марковым, Я. М. Охрименко, Г. А. Пименовым, Л. Н. Соколовым, И. Я. Тарновским, В. Н. Трубиным, В. А. Тюриным, В. Л. Чухлебом, W.V. Вае, J.R. Cho, Y.D. Kim, C. Labergere, P. Lafon, F. Meng, M. Nakasaki, I. Takasu, и другими.

В поковках дисков основная локализация внутренних дефектов обнаруживается в осевой зоне. Это вызвано соответствующим напряженно-деформированным состоянием в этой зоне в процессе осадки. Применением операций осадки и протяжки повышается равномерность механических свойств, но при этом повышается трудо- и энергоёмкость процессовковки.

F. Hippenstiel в своей работе [25] отмечает, что рост объемов производства поволоков высокого качества требует развития и внедрения новых ресурсосберегающих технологических процессовковки поволоков ответственного назначения с низкими затратами на ковку. Однако в работе не исследовались новые схемы осадки заготовок, которые позволяют снизить силу деформирования. Снизить силу осадки при ковке дисков можно за счёт деформирования секционным инструментом [26].

Michel Saby и соавторы предложили оригинальную модель для закрытия пустот, которая учитывает геометрию и ориентацию пустот, а также деформированное состояние заготовки [27]. Модель была разработана и проверена на основе большого числа численных экспериментов МКЭ. Однако крупные слитки имеют внутренние дефекты, такие как осевая пористость, которая

лучше моделируется осевым отверстием. Таким образом, полученная в работе модель не является универсальной для моделирования процессовковки.

И. О. Катковым и соавторами предложен способ и оснастка для осадки дисков с бобышкой [28; 29]. Осадка производится с применением разгонки поля диска. Ограничением этого метода осадки является то, что инструмент не перекрывает поле диска, остаются непродеформированные участки с образованием зажимов, что приводит к увеличению расхода металла.

Dudra и Im МКЭ изучили закрытие осевых дефектов при осадке заготовок плоскими плитами с различной геометрией [30]. На основе численного анализа авторы установили, что степень деформации оказывает большее влияние на закрытие пустот, чем гидростатическое напряжение. Полученные результаты противоречат известным данным других исследователей [18], которые утверждают, что степень закрытия осевых дефектов зависит от напряженно-деформированного состояния в поковках.

Повысить проработку структуры поковок дисков можно, используя способ, предполагающий усеченную биллетировку и осадку заготовки. При биллетировке торцам заготовки придают форму усеченного конуса [31]. Сложность способа заключается в получении конических торцов заготовки.

Основными дефектами поковок дисков являются несплошности в осевой зоне размером до 7 мм, определяемые ультразвуковым контролем [32]. По мнению авторов, появление этих дефектов объясняется неблагоприятным НДС при осадке цилиндрических заготовок за счёт появления радиального течения металла, которое приводит к внутренним разрывам металла заготовки.

М. Накасаки и соавторы исследовали влияние гидростатического давления как параметра для оценки проработки структуры [33]. Поэтому эффективной оценкой заковки осевых дефектов является уровень сжимающих напряжений в осевой зоне. Однако М. Накасаки в своей работе не рассматривал напряженное состояние заготовки в результатековки выпуклыми бойками. Повысить уровень сжимающих напряжений в процессе осадки, чтобы ис-

ключить образование внутренних разрывов можно за счёт осадки в кольцах [34].

С целью снижения силы осадки Л. Н. Соколов разработал способ осадки заготовок секционным инструментом и установил закономерности изменения силы в процессе горячего деформирования с паузами [35]. Окончательную правку поковки производят плоскими плитами.

Ming-Song Chen и Y.C. Lin изучали механизмы закрытия внутренних дефектов, имеющих сферическую форму в процессековки [36]. Авторы исследовали влияние размеров пустот и соотношения их сторон на их закрытие. Было установлено, что напряженно-деформированного состояния вокруг внутренних дефектов, является основным фактором, влияющим на закрытие пустот. Предложена модель для прогнозирования изменений закрытия пустот в крупных заготовках в процессековки, которая была основана на результатах конечноэлементного моделирования. Основным недостатком этого исследования является использование искусственных дефектов сферической формы, а осевые дефекты слитков имеют продолговатую форму.

Одним из прогрессивных методов повышения механических свойств дисков является биллетирование на выпуклую или вогнутую бочку. Осадка такой заготовки способствует повышению равномерности распределения деформаций и заковки осевых дефектов слитков [37; 38].

Р. Рех и Э.А. Иванов в своих работах [39; 40] исследовали деформированное состояние в процессе осадки образцов цилиндрической формы при различных степенях осадки. Установлена зависимость механизма накопления микроповреждений на бочке заготовки. В статьях [41; 42] разработаны рекомендации, которые способствуют повышению качества и точности крупных поковок

Christiansen и др. [43] в своей работе сравнивали два способа моделирования поведения осевой пористости слитка в процессековки, которые учитывали накопление повреждений в пластически деформируемом теле, на основе использования модели пористого материала. Полученные результаты

позволили установить, что нижний угол выреза бойков должен быть в диапазоне $90^\circ - 120^\circ$ для лучшей заковки осевой рыхлости слитка. Однако исследованные схемы не обеспечивают равномерное распределение деформаций в теле заготовки. При ковке крупных поковок из слитков очень важно обеспечить равномерное распределение деформаций, чтобы гарантировать высокий уровень механических свойств.

В процессе осадки для заваривания внутренних дефектов слитка в осевой зоне необходимо обеспечить состояние неравномерного всестороннего сжатия. На сегодняшний день применяемые способы осадки не обеспечивают высокий уровень сжимающих напряжений в месте расположения осевой рыхлости слитка для повышения плотности металла поковки [44].

В последние годы количество крупных поковок, изготовленных из слитков, повышается. Это в первую очередь связано с увеличением мощности тяжелых машин. Однако качество производимых поковок не всегда соответствует требованиям заказчика. Низкое качество производимых крупных поковок объясняется низким качеством исходных слитков [45 – 48].

1.3 Способы осадки при ковке валов и плит

Постоянное увеличение в мире потребности в крупных заготовках для изготовления деталей ответственного назначения требует совершенствование и разработку новых технологических процессовковки массивных поковок [49; 50]. Среди изделий заводов тяжелого машиностроения примерно 72 % составляют валы. Эти поковки применяются для получения деталей прокатных валков, роторов и др. Эти детали относятся к особо ответственным, и к их свойствам предъявляются высокие требования по изотропности механических свойств, внутреннему строению и пр. Все эти детали проверяются УЗК [51].

Среди продукции зарубежных производителей деталей ответственного назначения поковки типа валов составляют более 63 % выпускаемой продукции [52].

При ковке гладких валов брак по УЗК достигает 10 % [53]. По мнению авторов работы, брак по УЗК объясняется процессом осадки слитков с неоднородной структурой. В результате эта структура прорабатывается неравномерно и в недостаточной степени [54]. Более того, при осадке цилиндрических заготовок плоскими плитами происходит увеличение размеров осевой рыхлости слитка. Анализ применяемых технологических процессовковки заготовок с применением операции осадки позволил установить, что базовая схема ихковки не гарантирует высокую проработку структуры слитка и обеспечение заданных свойства полученных деталей.

Причина обнаружения УЗК внутренних дефектов объясняется тем, что в теле слитка располагается осевая пористость, средние размеры которой достигают 6...8 % от диаметра литой заготовки [55], глубина залегания этих дефектов составляет 55...65 % высоты слитка. В процессе осадки осевая рыхлость слитка не заковывается, что отрицательно влияет на качество кованых заготовок.

Анализы результатов УЗК кованых валов массой более 90 т, полученные В. А. Дурьининым и Ю. П. Солнцевым, подтверждают похожие проблемы, связанные со снижением уровня механических свойств [8].

R.C. Buckingham и соавторы [56] исследовали влияние распределения деформаций при ковке плоскими бойками на склонность к рекристаллизации и ее влияние на механические свойства. Было установлено, что изменение микроструктуры в значительной степени зависит от величины локальной деформации, которая была накоплена в процессековки. Зоны с низкой накопленной деформацией показали частичную рекристаллизацию. Однако в работе не исследовано влияние операции протяжки бойками с выпуклой геометрией, на распределение деформаций в поковках.

Известен ряд работ, в которых освещены проблемы совершенствования

технологических процессовковки для изготовления высококачественных деталей ответственного назначения. Так в работе В. А. Тюрина предложена классификация способов протяжки, что дала возможность разработать новую научнообоснованную концепцию проектирования ресурсосберегающих процессовковки крупных поковок [57].

Инструмент дляковки, предложенный в работах [58 – 60], применялся дляковки поковок на гидравлических ковочных прессах. Устройство состоит из четырех бойков, которые имеют наклонные поверхности для обеспечения всестороннейковки заготовок при ходе траверсы прессы вниз.

Следует отметить, что распределение деформаций в кованных заготовках может вызывать образование трещин во время или после процессаковки. Bitterlin и др. [61] определили возможную причину, которая вызывает растрескивание послековки крупных слитков. Анализ полученных результатов показал, что разрушение может быть вызвано вследствие неравномерной проработки структуры металла, что способствует проникновению кислорода к границам зерен и приводит к их хрупкости при охлаждении. Однако авторы работы не исследовали влияние уровня деформации на динамику образования трещин на боковой поверхности кованных заготовок. Важно добавить, что исследование процессаковки требует оценки максимальной величины напряжений в теле заготовки.

А. И. Потапов [62] изучил влияние способаковки цилиндрических заготовок различными бойками на заковку дефектов слитка от величины коэффициента укова. В результате было установлено, чтоковка плоскими бойками через квадрат или вырезными ромбическими бойками способствует интенсивной заковке внутренних пустот в заготовках, нежеликовка в комбинированных бойках. Было также выявлено, что при обкатке заготовки с квадратным поперечным сечением на круглое сечение плоскими бойками происходит разрыхление осевой части поковки. Для интенсивной заковки осевой рыхлости слитка необходимо применять большие подачи заготовок (0,5...0,75 от диаметра заготовки).

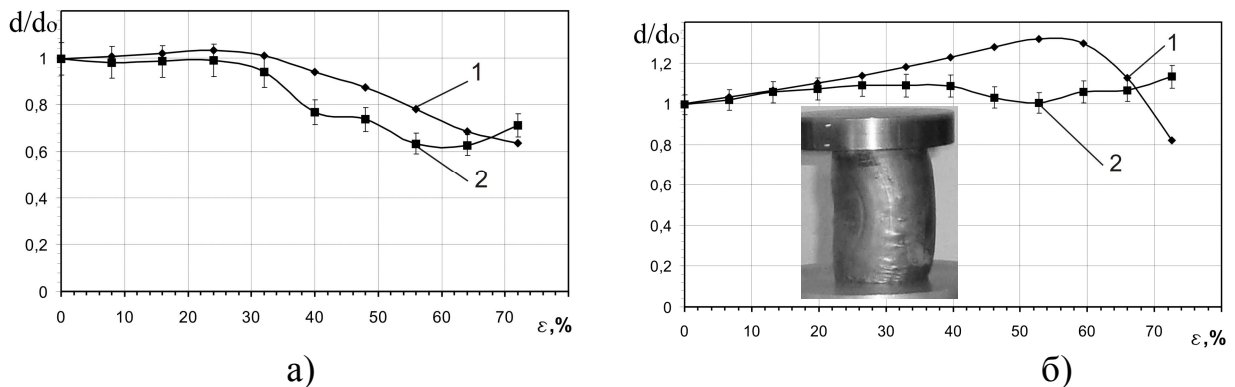
А. Tolkushkin и др. [63] в своей работе моделировали новые технологииковки таких деталей, как плиты и пластины, в бойках с выпуклой геометрией. В результате моделирования были установлены параметры напряженно-деформированного состояния заготовки в процессековки бойками со специальной геометрией. Полученные результаты распределения деформацийсравнивались с данными для базового процессаковки. Авторы предложилиновый процессковки без операции осадки за счет протяжки заготовок бойковс выпуклой геометрией. Однако предлагаемый способковки может быть применён только дляковки плит и пластин. Поковки плиты и пластины составляют приблизительно от 10 до 15% всехкованных заготовок в машиностроении.

Новые процессыковки крупных заготовок ответственного назначения были исследованы К. Chen и др. [64]. В работе установлено, что рациональным углом вырезных бойков с точки зрения повышения уровня сжимающих напряжений в теле заготовки и обеспечении универсальности кузнечного инструмента является угол, равный 135° . Похожие результаты, подтверждающие рациональность использования вырезных бойков с углом 140° приковке валов были установлены Ю. М. Антощенковым [65]. Однако проблема улучшения однородности распределения деформаций приковке с применением процесса профилирования заготовки не исследована в данной работе.

G. Banaszek в своей работе [66] исследовал влияние геометрических параметров бойков на заковку осевых дефектов в заготовках. На основании проведенных исследований были предложены бойки выпуклой формы. Исследования О. Е. Маркова и др. позволили установить влияние гидростатического давления на заковку осевых дефектов [67]. В работе было выявлено, что результирующие размеры внутренних дефектов напрямую зависят от среднего напряжения в процессековки (рис. 1.2).

Изготовление заготовок ответственного назначения по новому способупредложено в работах [68; 69]. Этот способ предполагаетковку цилиндрической заготовки верхним выпуклым бойком с радиусной геометрией со сле-

дующей последовательностью кантовок: 180° , 90° , 180° . Спрофилированная таким способом заготовка на четырехлучевое сечение проходит дальнейшую ковку вырезными бойками с получением недокова, имеющего в сечении форму эллипса. Применение выпуклого и вырезного бойков позволяет обеспечить в осевой зоне повышенный уровень сжимающих напряжений. Данный способ позволяет повысить качество поковок при малых коэффициентах укова $\approx 2,5$.



1 – теоретические данные; 2 – экспериментальные данные

Рисунок. 1.2 – Изменение диаметра осевой рыхлости в процессе осадки плоскими плитами низких (а) и высоких (б) цилиндрических заготовок

В работе G. Дуја и соавторов установлено, что при ковке поковок ответственного назначения для обеспечения равномерной проработки структуры следует применять вырезные бойки с ромбическим вырезом [70].

В своей работе [71] G. Vanaszek установил, что для интенсивной проработки литой структуры необходимо применение инструмента с выпуклой геометрией. Y. Kim и соавторы исследовали последовательное влияние операций осадки и протяжки при ковке валов из крупных слитков на проковку металла [72]. Был предложен новый способ осадки. В рассматриваемых работах предложен специальный деформирующий инструмент, который не является универсальным. Однако авторы работы не исследовали влияние формы

инструмента на закрытие пустот в процессековки с выпуклыми бойками. Поэтому следует разрабатывать универсальный кузнечный инструмент, что является важной научной и практической задачей.

На сегодняшний день известны конструкции бойков сложной геометрии, что в результате повышает площадь зоны пластической деформации. Так по результатам исследований Я.М. Охрименко [73] разработан деформирующий инструмент с выпуклой рабочей поверхностью. А.А. Мишулин и соавторы в работе [74] разработали боёк с выпуклой гиперболической формой. А. Н. Дубковым на основании проведенных исследований предложено использовать боёк с призматическим выступом [75]. Предложенный инструмент снижает силу деформирования, однако не способствует повышению равномерности распределения деформаций.

Исследования С.А. Балужева позволили установить, что при одинаковой величине коэффициента укова величина деформации в осевой зоне заготовки, полученной профилированием на трехлучевое сечение, на 50 % выше, чем после протяжки цилиндрического биллета [76]. Полученные результаты объясняются влиянием подпора внутренних слоев заготовки вогнутыми гранями при ковке после профилирования. В результате трудоемкостьковки снизилась на 25 %, снизилось количество нагревов с 3 до 2, что позволило снизить расход природного газа на 35 % и в 2 раза снизить угар [77].

Повышение качества поковок, по результатам исследований А.И. Мохова и соавторов, обеспечивается за счет профилирования заготовки на четырёхлучевое сечение выпуклым бойком. Это позволило снизить трудоемкостьковки [78]. По предложенному способу откована серия поковок. Результаты УЗК позволили установить, что внутренних дефектов не обнаружено. Ковка заготовок с четырёхлучевым сечением в вырезных бойках обеспечила требуемые механические свойства при укове в 2 раза меньшем, чем при базовой технологии.

Способковки выпуклым инструментом, предложенный Л. Н. Соколовым, используется также при ковке плит [79]. В отличие отковки валов способ предполагает прожим слитка с двух сторон, что, в свою оче-

редь, увеличивает уширение заготовки и обеспечивает возможность получения широких плит без осадки.

М. Я. Белкиным и В.П. Кривошеевым предложен способковки, который позволяет повысить проковку осевой зоны слитка за счёт применения обжатия заготовки бойками с выпуклым рабочим профилем [80]. Заготовка предварительно должна быть протянута на плиту с соотношением $B / H = 1,4 \dots 2,1$.

Исследования В. А. Дурынина и соавторов [8] позволили разработать схемуковки, которая обеспечивает проработку внутренних слоёв заготовки. Достижение обозначенного технического эффекта достигается, посредством протяжки верхним выпуклым и нижним вырезным бойками.

У. Li предлагает повысить производительность процессаковки за счёт использования специального инструмента, позволяющего осуществлять высокопроизводительную протяжку заготовок [81]. Однако исследуемый процесс сложно применять при изготовлении поковок более 45 тонн.

Ф. Meng и соавторами [82] установлено, что совершенствование геометрии рабочей поверхности бойков является эффективным средством увеличения пластической проработки металла заготовок. Однако в работе не исследован процессковки выпуклыми бойками с клиновым профилем.

В работе [83] предложены прогрессивные способыковки сплошных цилиндрических заготовок ответственного назначения, которые могут использоваться для изготовления валов с использованием операции протяжки бойками специальной геометрии. Но эти способы ограничиваются изготовлением сплошных заготовок без осадки и дляковки валов с диаметром бочки, превышающим диаметр слитка, не могут быть использованы.

Устройство, представленное в работе J.Chen [84], использовано приковке заготовок на радиально-обжимных машинах. Установлено влияние новой конструкции деформирующего инструмента на закрытие пустот в процессе радиальнойковки. Однако предложенная схема деформации приводит к интенсивному удлинению заготовки. Этот аспект не позволяет накапливать

деформации с высоким уровнем в теле заготовке в процессековки по предложенному способу.

В работе J. R. Gonzalez и соавторов [85] показано, что если применять бойки с выпуклой поверхностью, то достигается значительное накопление пластических деформаций высокого уровня в осевой зоне заготовки. Боек с выпуклой поверхностью предложен в работе Li, Y. и соавторов [86]. В предложенных работах не исследовано влияние бойков с выпуклой клиновой геометрией на распределение деформаций в теле заготовки.

Naizabekov и др [87] установили, что дальнейшее совершенствование технологических процессов производства высококачественных поковок требует проектирование и разработку новых способов получения кованных заготовок. Chao Feng и соавторы [88] пришли к выводу, что улучшение качества, повышение точности и производительности процессовковки требует решения основных технологических задач. Было также отмечено в работе [89], что существует необходимость разработки и внедрения новых передовых технологий для производства кованных заготовок за счет использования удлиненных слитков.

Операцию осадки можно использовать с дополнительными операциями для увеличения коэффициента укова, но эта операция не способствует закрытию внутренних пустот, как это было установлено Fukui Y. [90]. Однако исследователи не предлагают заменить процесс осадки операцией протяжки.

Minting Wang и др. исследовали механизм формирования трещины во время осадки крупных дискообразных поковок на основе использования МКЭ [91]. Авторы также получили диаграмму распределения напряженного состояния в процессе осадки. Установлено, что большие степени деформации заготовки даже при условии всестороннего неравномерного сжатия, приводят к расслоению металла и образованию внутренних трещин. Таким образом, операция осадка цилиндрических заготовок не приводит к повышению качества кованных деталей. Более того, авторы не исследовали закрытие осевых дефектов слитка в процессе осадки.

Анализ литературного обзора позволил сделать вывод, что применяемые процессы ковки крупных поковок с осадкой сбиллетированного слитка не гарантируют получение требуемого качества получаемых поковок по УЗК даже при высоких коэффициентах уковах за счёт неполной заковки осевых дефектов слитков. Операция осадка не приводит к полному закрытию пустот. Это объясняется неблагоприятным напряженно-деформированным состоянием в осевой зоне заготовки. Таким образом, обзор литературы показал, что существует реальная технологическая проблема и необходимость разработки новых процессов ковки, которые обеспечивают закрытие осевых дефектов слитков. Было установлено, что известные опубликованные литературные источники содержат недостаточно информации о закрытии пустот в процессе протяжки заготовки. Особенно это относится к новым процессам протяжки, например, профилированию заготовки выпуклыми бойками. Операция профилирования меняет форму поперечного сечения заготовки. В этом случае заготовка приобретает поперечное сечение с вогнутыми гранями. В результате, последующий процесс ковки вызывает изменение напряженно-деформированного состояния заготовки. Вогнутые грани приводят к появлению сжимающих напряжений в теле заготовки. Установленное напряженно-деформированное состояние должно способствовать закрытию пустот. Однако данных в литературе о напряженном состоянии и закрытия пустот в процессе осадки профилированных заготовок нет. Это обстоятельство требует проведения новых специальных исследований для установления влияния формы заготовки на закрытие осевых дефектов в процессе осадки заготовок.

Можно сделать вывод, что изменение формы или профиля осаживаемой заготовки является перспективным направлением снижения уровня растягивающих напряжений в заготовке в процессе осадки, что будет способствовать повышению качества крупных поковок за счёт заковки внутренних дефектов слитков.

1.4 Применяемые методы расчета процессовковки крупныхпоковок

1.4.1 Теоретические исследования в процессахковки

Для проектирования новых технологических процессов производства заготовок из слитков необходимо знать напряженно-деформированное состояние заготовки и силовые параметры в процессековки [92]. На сегодняшний день в теории обработки металлов давлением применяется ряд методов определения НДС, формоизменения и силовых параметров деформирования [93]. На распределение НДС в теле заготовки в процессековки значительное влияние оказывает поле температур [94].

При теоретическом исследовании процессов ОМД большое распространение получил энергетический метод. Применительно к процессамковки этот метод был широко развит уральскими исследователями. На сегодняшний день известны компьютерные программы на основе энергетических методов [95]. Также разрабатываются новые теоретические методы решения вариационных задач для исследования операций ОМД [96–98], которые подтверждаются экспериментальными исследованиями.

Решение задач ОМД связано с учетом нелинейности свойств металла заготовки. На сегодня известны итерационные методы линеаризации нелинейных задач на основе конечноэлементного подхода. При решении также используют метод гидродинамических приближений, метод переменной вязкости и др. [99].

С каждым годом всё большее распространение получает метод конечных разностей [100] для определения скоростей деформаций [101]. Ограничение метода – изменение формы заготовки в процессе деформирования, а соответственно и порядка дальнейшего решения.

Как отмечает В. А. Behrens, популярным теоретическим методом исследования процессов ОМД является МКЭ [102]. Этот метод применим

для определения НДС металла заготовки [103]. Разработка новых технологических процессовковки невозможна без применения МКЭ. В последнее время МКЭ применяется для исследования структурных изменений в процессековки и термической обработки [104].

Метод позволяет решать нелинейные задачи физики [105, 106], определять проработку структуры в процессе деформации и прогнозировать микроструктуру металла и размеров зёрен [107]. Таким образом, в последнее время для определения формоизменения в процессах обработки металлов давлением получил широкое распространение МКЭ [108–113].

У. Wu и соавторами разработана модель для определения осевой деформации металла в процессе радиальнойковки, которая позволяет прогнозировать энергосиловые параметрыковки в зависимости от величины обжатия [114]. Авторами установлено влияние осевой подачи заготовки и степени обжатия на искажение отверстия поковки. Полученная модель не позволяет определить НДС заготовки с учетом процессов релаксации напряжений, снижает точность результатов и требует уточнения механических свойств материала.

В результате исследований L. Fan и соавторов была разработана 3D-модель метода конечных элементов (МКЭ) процесса радиальнойковки пустотелой заготовки на оправке и установлено НДС металла в процессековки [115]. Доказано, что угол кантования заготовки не оказывает влияние на формоизменение поковки. Однако разработанные модели применимы только дляковки пустотелых заготовок.

М. Sanjagi и соавторы исследовали МКЭ влияние формы кузнечного инструмента на НДС металла заготовки в процессековки [116]. Установлено, что для получения заготовки с минимальной неоднородностью механических свойств необходимо использовать бойки с выпуклой радиусной кромкой. Однако более универсальным инструментом является выпуклые бойки с цилиндрическим пояском, так как выпуклая радиусная деформирующая кромка

приведет к образованию волнистой поверхности заготовки и увеличит припуск на механическую обработку.

Z. G. Wang установил, что процессковки длинномерных заготовок на радиально-ковочных машинах позволяет повысить прочностные свойства металла [117]. Разработана 3D модель для определения деформации металла в радиальном, окружном и осевом направлениях. Однако в работе не установлено влияние схемы деформирования на образование текстуры металла, которая приводит к анизотропии механических свойств, а соответственно, к снижению срока службы поковок ответственного назначения.

В литературе встречаются решения МКЭ по оптимизации процессов обкатки заготовок с квадратным поперечным сечением для гладких валов, роторов и др. [118]. Были исследованы различные величины подач заготовки и углы кантовок. Однако полученные результаты не относятся к процессу осадки, а только применимы для операции протяжки.

Развиты подходы построения САПР процессаковки ступенчатых валов [119], которые основаны на объектно-ориентированном программировании. МКЭ позволяет определить с высокой точностью технологические режимыковки [120].

Так в работах Л. А. Рябичевой, Д.А. Усатюка [121; 122] на примере процесса осадки с применением МКЭ исследовано НДС в заготовке. Для моделирования процессов ОМД используются современные программные продукты, которые позволяют моделировать трёхмерные задачи с высокой степенью достоверности [123–126].

С использованием МКЭ можно исследовать кинематику заковки внутренних дефектов в процессахковки [127]. Высокий уровень разработанных программных модулей позволил с применением МКЭ моделировать изменение микроструктуры стали [128].

Можно сделать вывод, что широкое использование моделирования МКЭ процессов и операций ОМД делает этот метод конкурентным по сравнению с другими теоретическими методами исследования [129–133]. Резуль-

таты моделирования МКЭ с высокой точностью совпадают с экспериментальными данными [134], поэтому исследование параметров НДС и закрытия осевых дефектов в работе следует производить этим методом.

В ходе моделирования МКЭ горячих процессов деформирования, в ряде случаев, возникают проблемы, которые связаны с нелинейностью механических свойств металла. На сегодняшний день известны различные методы учета реологических свойств металлов и сплавов (Copetti и Fernandez) [135]. Часть этих задач решается в упругопластической постановке (Atanasovska и др.) [136]. Этот подход требует дополнительных вычислительных ресурсов. Более полный учет механических характеристик во время горячей деформации повышает точность моделирования. Это особенно важно при моделированииковки крупных слитков. При ковке крупных слитков в момент пауз между обжатиями происходит разупрочнение материала. Эти релаксационные процессы приводят к снижению напряжения течения. Учет этих процессов позволит определить силы деформирования с высокой точностью. В результате это позволит точно выбрать оборудование для деформации [137, 138].

1.4.2 Экспериментальные исследования процессовковки поковок ответственного назначения

Экспериментальные исследования процессовковки поковок ответственного назначения можно проводить на реальных поковках в заводских условиях и на уменьшенных моделях из стали или свинца. При этом необходимо обеспечить одинаковые кинематические условия деформирования модели и прототипа.

Определить НДС металла заготовки в процессековки можно экспериментальным методом оптически чувствительных покрытий [139; 140]. Огра-

ничество метода – малые степени деформации, которые могут выдержать покрытия из-за малой их пластичности, а также сложность проведения эксперимента и получение результатов с высокой погрешностью. Определить НДС металла в процессахковки на свинцовых моделях можно с использованием метода штифтов [141 – 145]. Один из трудноустраняемых дефектов слитка – осевая рыхлость. Приблизительно этот дефект можно моделировать отверстием, выполненным в осевой зоне образца. Цель операцийковки – заковка этих пустот. Исследования динамики заковывания осевой рыхлости представлены в работах [146, 147]. Проектирование новых технологических процессовковки поковок ответственного назначения требует информации о динамике заковки осевых пустот слитка при деформировании по новым схемам. Экспериментальные методы применяются для исследования НДС металла как в натуральных поковках, так и на уменьшенных геометрически подобных моделях. При исследовании деформированного состояния большую популярность среди ученых получил метод координатных сеток [148–150]. Этот метод исследования применяется для верификации результатов распределения деформаций, полученных МКЭ [151].

1.5 Направления совершенствования технологических процессов и инструмента дляковки поковок ответственного назначения

В литературе известны работы, в которых предлагается исключить операцию осадки из технологического циклаковки крупных поковок [152, 153]. Для этого С. Б. Каргин предлагает перед протяжкой производить обжатие слитка на трехлучевое сечение комбинированными бойками с цилиндрическими выступами [154 – 156]. Предлагаемый способ повышает равномерность проработки структуры и степень заковывания осевых дефектов

[157, 158]. Однако исключение операции осадки не позволяет получать поковки с поперечным сечением больше, чем сечение слитка.

Получение заданных размеров поковок без осадки возможно за счетковки укороченных слитков плоскими бойками с применением промежуточного профилирования выпуклыми бойков, как это было предложено О. Е. Марковым [159].

Однако исключение осадки по этому способу не позволяет обеспечить требования заказчика по коэффициенту укова [160–161]. Более того, применение новых укороченных слитков ($H/D < 1,0$) с направленной кристаллизацией требует переоснащения существующего на заводах тяжелого машиностроения парка изложниц.

Анализ состояния вопроса позволил установить, что дальнейшее совершенствование и проектирование новых технологических процессовковки поковок ответственного назначения возможно на базе результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Известные способыковки крупных поковок требуют снижения затрат на ковку и повышение качества получаемых заготовок. Требования к крупным заготовкам, из которых впоследствии изготавливаются детали ответственного назначения, с каждым годом повышаются. Такая тенденция в условиях жесткой конкуренции на европейских и азиатских рынках будет сохраняться [162].

В результате продолжают изготавливаться уникальные ковочные гидравлические прессы усилием от 150 до 180 МН (КНР, Корея и др.). Увеличиваются также массы слитков (до 650 т), из которых будут коваться крупные поковки ответственного назначения.

Повышение технико-экономических показателей металлургического производства может быть достигнуто только за счет проведения комплексных мероприятий, которые позволят изменить подходы к проектированию кузнечных операций для изготовления крупных поковок ответственного назначения [163].

Основным направлением в вопросе разработки новых техпроцессов ковки является применение операций профилирования заготовок и использования специального кузнечного инструмента. Оценками эффективности разрабатываемых процессов являются условия повышения сплошности внутренних слоёв заготовки за счет повышения уровня сжимающих напряжений в осевой зоне и обеспечения равномерной проработки структуры.

Выводы по разделу 1

1. Литературный обзор показал, что резервы для проектирования новых технологических процессов ковки не исчерпаны – ряд исследований посвящены разработке новых технологических процессов ковки поковок высокого качества, отличающихся методами, способами и методиками проведения исследований.

2. Существующие процессы ковки поковок ответственного назначения не всегда соответствуют требованиям заказчика по механическим свойствам и ультразвуковому контролю. Применяемые кузнечные операции не обеспечивают повышения качества крупных поковок, что делает производимую продукцию неконкурентоспособной. Необходимо совершенствовать, с точки зрения повышения качества, кузнечные операции. Представляет интерес проектирование новых способов деформирования, которые заключаются в профилировании кузнечных заготовок перед осадкой.

3. Развитие металлургического производства связано с повышением качества кованных заготовок на основе внедрения новых технологий ковки. Одно из направлений совершенствования технологических процессов ковки – профилирование заготовки перед осадкой. Профилирование заготовки позволит изменить НДС металла заготовки в процессе осадки с целью интенсификации заковки осевых дефектов слитка и снижения уровня растягивающих на-

пряжений на поверхности заготовки для исключения образования поверхностных трещин. Совершенствование операцийковки требует проведение комплексных исследований для определения рациональной геометрии спрофилированной заготовки. На сегодняшний день нет рекомендаций по геометрическим параметрам спрофилированной заготовки перед осадкой, которые бы позволили интенсифицировать степень заковки осевых дефектов и повысить равномерность проработки структуры металла.

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Методика теоретических исследований процессов профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок

Обзор литературы показал, что качество крупных поковок определяется степенью заковывания осевой рыхлости слитка. Увеличить степень заковывания осевых дефектов металлургического происхождения можно за счет повышения уровня сжимающих напряжений в центральной зоне поковки. Одним из перспективных способов повышения уровня сжимающих напряжений в процессе осадки является профилирование цилиндрической заготовки на четырёхлучевое сечение и последующая её осадка. Вогнутые грани заготовки в процессе осадки обеспечивают подпор её внутренних слоёв, что снижает уровень растягивающих напряжений в осевой и периферийной зонах. Цель данного раздела – разработать методику проведения исследований формоизменения, распределения деформаций и напряжений при профилировании заготовки выпуклыми бойками и последующей осадки четырёхлучевых заготовок [164].

Исследование процессовковки крупных поковок – сложный процесс ввиду уникальности исследуемых заготовок по размерам и затратам. Это требует проведения комплексных теоретических и экспериментальных исследований перед апробацией предложенного способаковки в производственных условиях.

Чтобы разработать рекомендации по проектированию технологических процессовковки поковок ответственного назначения с применением нового способа осадки, необходимо установить напряженно-деформированное состояние (НДС) заготовок. Для проведения таких исследований целесообразно использовать методы, позволяющие с достаточной точностью моделировать

процессыковки. К таким методам относится метод конечных элементов (МКЭ), который зарекомендовал себя, как точный инструмент для проведения подобного рода исследований и позволяет получать результаты с высокой степенью достоверности [164].

Проведение исследований и обработку полученных данных целесообразно проводить, используя планирование экспериментов [165, 166].

При решении задачи МКЭ исследуемая область разбивается на большое число малых по размеру элементов, которые называют конечными. Конечные элементы взаимодействуют между собой в ограниченном количестве точек – эти точки называются узлами конечных элементов. Искомая функция в задачах пластичности – это конечное перемещение или скорости перемещения узлов сетки, которые аппроксимируются в этих элементах полиномами. Основная задача расчета – найти неизвестные перемещения узлов конечных элементов, а по известным перемещениям определить деформации и напряжения [167–169].

Решение задачи в общем случае сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений вида

$$\{F\} = [K] \{U\},$$

где U – неизвестный вектор перемещений в узлах конечных элементов;

K – матрица жесткости, которая зависит от свойств материала и координат узлов конечных элементов;

F – известный вектор внешних нагрузок в узлах конечных элементов.

Процедура МКЭ для решения задач теории пластичности с использованием существующих программных продуктов заключается в следующей последовательности:

- анализ исходных данных и выбор расчетной схемы (объемная, осесимметричная);
- задание геометрической формы и размеров заготовки и деформи-

рующего инструмента;

– выбор типов используемых конечных элементов и разбивка заготовки на элементы;

– задание физических свойств исследуемого материала заготовки;

– вычисления программой выходных параметров (температуры, деформаций, скоростей деформаций, напряжений, сил).

В качестве программной реализации МКЭ применялся программный продукт DEFORM 3D, которая основана на так называемых формулах теории течения. Заготовка принимается как жесткопластическое тело. Основные соотношения метода, которые используются в DEFORM 3D, включают уравнения, выраженные формулами [170]:

Условие, учитывающее равновесия системы

$$\sigma_{ij,j} = 0.$$

Условие несжимаемости

$$v_{i,j} = 0,$$

где v_i – компоненты тензора скоростей.

Уравнение связи компонент скоростей деформаций и напряжений

$$S_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\dot{\bar{\epsilon}}} \dot{\epsilon}_{ij},$$

где $\dot{\epsilon}_{ij}$, σ_{ij} – компоненты скоростей деформаций и напряжений;

S_{ij} – компоненты девиатора напряжений.

Кривая течения задана уравнением

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

где $\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T$ – интенсивности деформаций и скоростей деформаций;
 T – температура.

В программе процесс разбивки области на конечные элементы, составление и решение систем уравнений осуществляется автоматически, что значительно упрощает моделирование [171].

Кривые упрочнения дают зависимость величины напряжения, которые действуют в пластично деформируемом теле при линейном напряженном состоянии, от величины деформации. Так как напряжения, которые вызывают пластическую деформацию, зависят от многих факторов, в том числе от температурно-скоростных условий деформирования, то кривые упрочнения для каждого металла и сплава следует устанавливать для конкретных температурно-скоростных условий деформирования [172, 173].

Геометрия для моделирования процесса создавалась в графической программе Solid Works. Каждый инструмент и заготовка создавались по отдельности в трёхмерном состоянии и сохранялись в формате «.stl». После создания геометрии, в препроцессоре пакета DEFORM 3D задавались граничные условия.

Позиционирование заготовки и инструмента задавалось вручную перемещением объектов моделирования на заданные расстояния. Количество шагов расчета составляло 100 за один нажим. После задания граничных условий проводилось моделирование процесса деформирования. Заданная степень деформации выдерживалась посредством задания расстояния между деформирующим инструментом, когда необходимо остановить расчёт [174].

2.1.1 Исследование процессов профилирования выпуклыми бойками

Литературный обзор процессов осадки позволил установить, что для профилирования цилиндрических заготовок перед осадкой целесообразно применение выпуклых бойков (рис. 2.1; 2.2). Вначале необходимо установить влияние на НДС заготовки в процессе профилирования выпуклыми бойками. После этого необходимо определить НДС заготовки в процессе осадки спрофилированных четырёхлучевых заготовок. Выпуклые бойки для профилирования могут иметь радиусную геометрию или клиновой профиль [175]. В исследовании принимались следующие соотношения размеров заготовки и выступов инструмента $D/D_{заг} = 0,25; 0,5; 1,0$. Диаметр вымтупа менее 0,25 и более 1,0 диаметра заготовки на практике не применяются. Схема профилирования заготовки на четырёхлучевое сечение радиусными бойками представлена на рисунке 2.1.

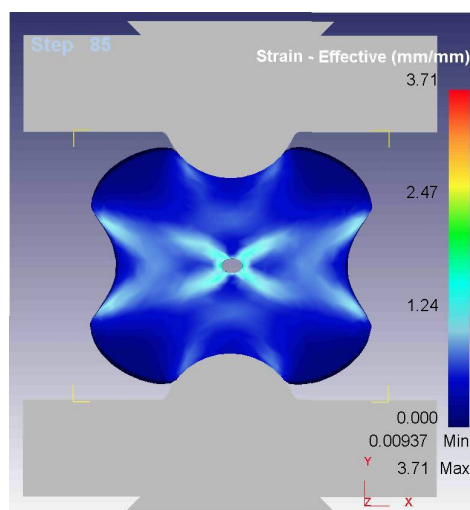
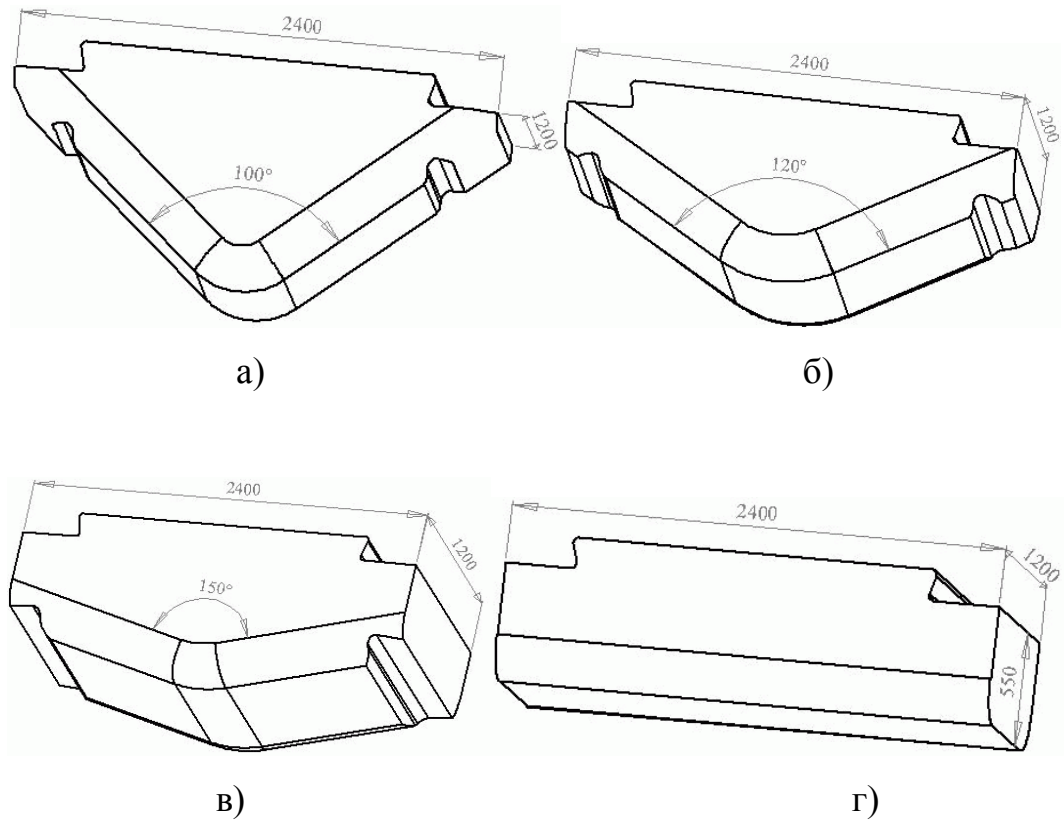


Рисунок 2.1 – Схема профилирования цилиндрической заготовки на четырёхлучевое сечение выпуклым инструментом радиусной геометрии

Дополнительно моделировались способы профилирования выпуклыми бойками с клиновой формой выступа, углы 100° , 120° , 150° и 180° (рис. 2.2). Степень деформации заготовки составляла 25 %. Диаметр заготовки составлял

$D = 1\ 000$ мм (в первом исследовании без осадки) и $D = 1\ 500$ мм (во втором исследовании с осадкой после профилирования).



а – выпуклый боек (угол 100°); б – выпуклый боек (угол 120°);

в – выпуклый боек (угол 150°); г – плоский боек (угол 180°)

Рисунок 2.2 – Чертежи выпуклых и плоских бойков

Схема профилирования цилиндрических заготовок выпуклыми бойками с клиновым профилем на четырёхлучевое сечение представлена на рисунке 2.3.

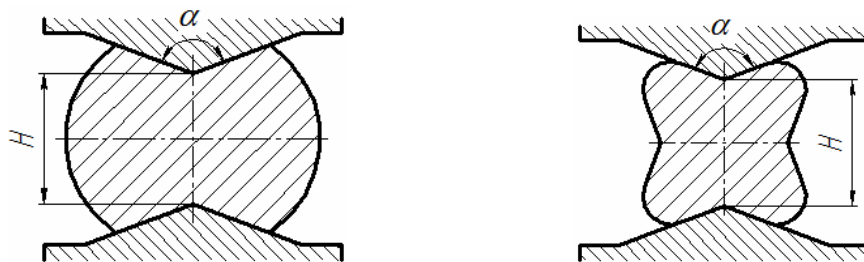


Рисунок 2.3 – Переходы профилирования цилиндрических заготовок на четырёхлучевое сечение

Исходные данные для моделирования: температура нагрева заготовки – 1200°C, температура бойков – 20°C, коэффициент трения между бойками и слитком в пересчёте на условие трения по Зибелю составлял 0,35. Кривые упрочнения дают зависимость величины напряжения, которое действует в пластично деформируемом теле при линейном напряженном состоянии, от величины деформации. Так как напряжения, которые вызывают пластическую деформацию, зависят от многих факторов, в том числе от температурно-скоростных условий деформирования, то кривые упрочнения для каждого металла и сплава необходимо устанавливать для заданных температурно-скоростных условий деформирования. Материал заготовки 34ХНМ, кривая упрочнения материала при различных температурах приведена на рисунке 2.4. Модуль Юнга 206000 МПа. В исследовании коэффициент Пуассона равен 0,3. Количество элементов, на которые разбита заготовка, принималось 62000. Осевая пористость слитка моделировалась осевым отверстием со стороны прибыльной части, диаметр которого составлял 10 % от диаметра заготовки, с глубиной проникновения в тело моделируемого слитка на 50 %. Оставшаяся часть заготовки без отверстия служит для возможности исследования внутренних напряжений и распределения интенсивности деформаций по сечению слитка [176].

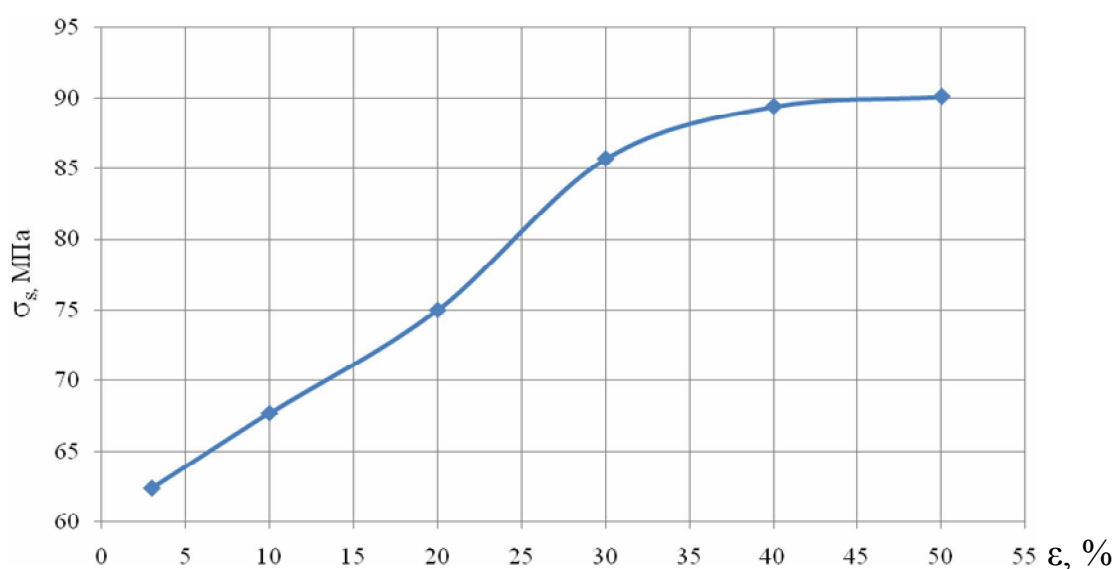


Рисунок 2.4 – Кривая упрочнения стали 34ХНМ при температуре 800 °C

2.1.2 Методика определения размеров осевого дефекта в процессе осадки четырёхлучевых заготовок

Теоретическое исследование механизма изменения размеров осевого дефекта при осадке проводилось с применением конечно-элементного моделирования. Результатами расчёта являются распределение деформаций и средних напряжений в теле заготовки, а также изменение формы и размеров осевого дефекта в процессе осадки. Степень деформации заготовки при осадке составляла 50 %, как рекомендуемая величина при осадке слитков для получения достаточной проработки структуры металла. Заготовка для теоретических исследований имела следующие геометрические параметры: максимальный диаметр $D = 1500$ мм и длина $L = 1500$ мм ($H/D = 1$). Диаметр осевого искусственного дефекта $d_{\text{одеф}} = 0,1D$ (рис. 2.5), который моделирует максимально возможный осевой дефект в слитках. Перед осадкой заготовка имела вогнутые грани с углами α , равными 120° , 150° , 180° (табл. 2.1). Относительная глубина вогнутых граней заготовки (d/D) варьировался в пределах 0,75; 0,80; 0,85. Материал заготовки – сталь 34ХНМ, начальная температура проведения процесса $T = 1200$ °С, коэффициент трения 0,35, сетка содержит 60000 элементов, скорость движения плоской осадочной плиты – 20 мм / сек [177, 178].

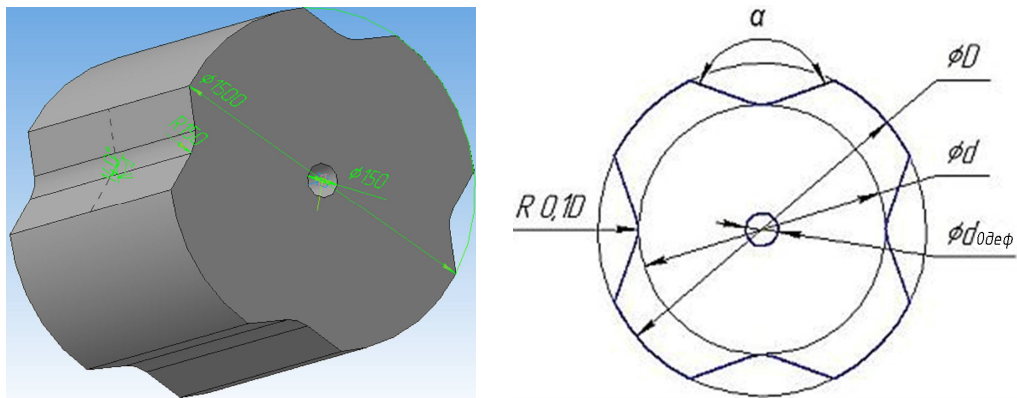
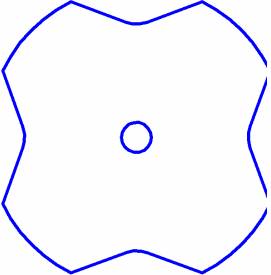
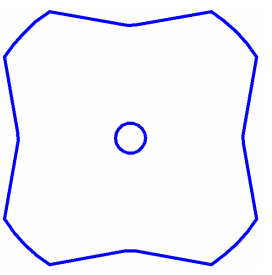
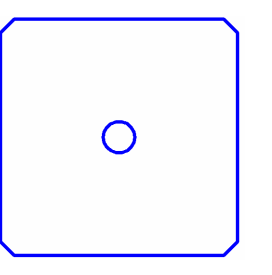
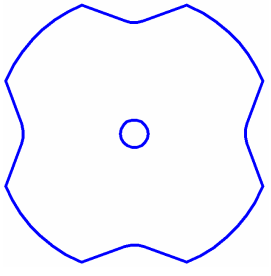
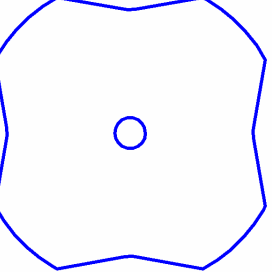
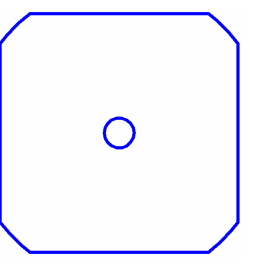
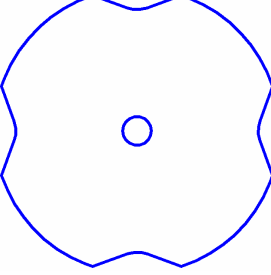
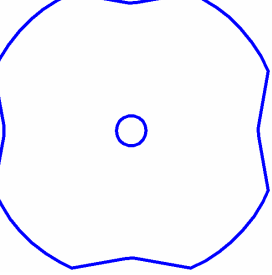
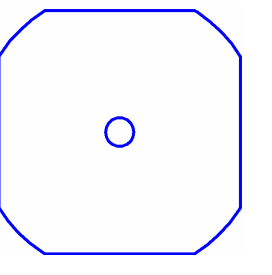


Рисунок 2.5 – 3D модель и поперечное сечение четырёхлучевой заготовки

Таблица 2.1 – Сечения четырёхлучевых заготовок

	$\alpha = 120^\circ$	$\alpha = 150^\circ$	$\alpha = 180^\circ$
$d/D = 0,75$			
$d/D = 0,8$			
$d/D = 0,85$			

Для определения размеров осевого дефекта в процессе осадки четырехлучевой заготовки, на границе дефекта были расставлены 13 контрольных точек от торца заготовки до линии горизонтальной симметрии (рис. 2.6). Координаты данных точек после моделирования осадки являются исходными значениями для дальнейшего расчета среднего объема дефекта. Средний объем дефекта рассчитывался следующим образом. Дефект после моделирования осадки был условно разбит на множество объемных фигур, представляющих собой форму усеченных конусов, вершинами которых служат контрольные точки. Из программы DEFORM 3D извлечены значения перемещения этих точек. При расчете был найден объем дефекта верхней половины заготовки. Принимаем, что нижняя часть заготовки симметрична верхней и значение объема для нее равно искомому.

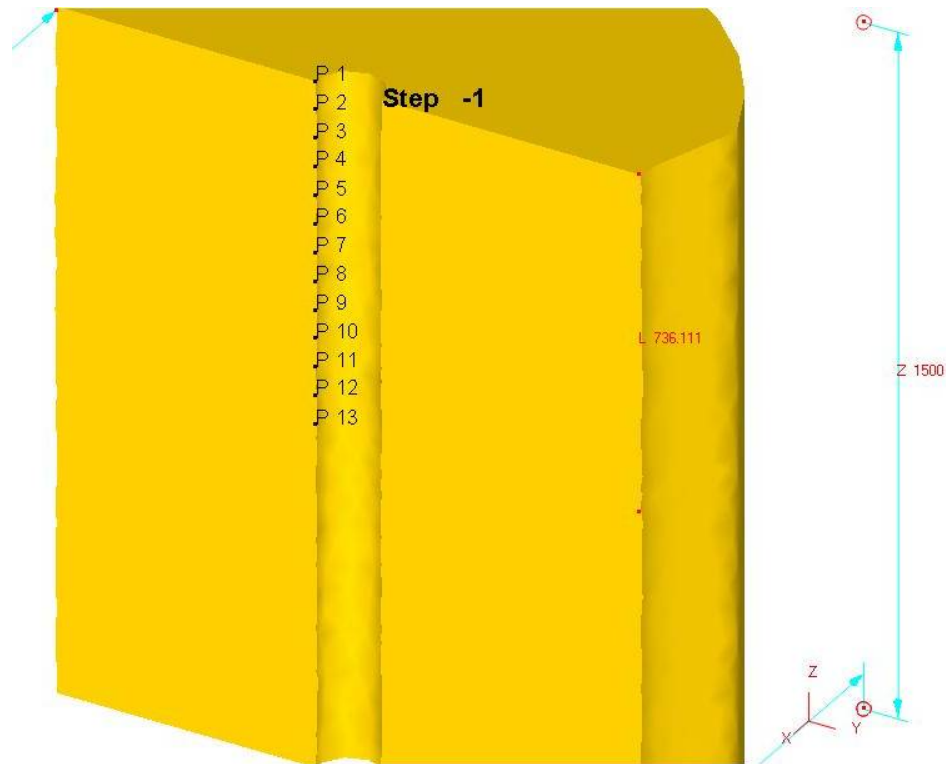


Рисунок 2.6 – Расстановка контрольных точек на границе дефекта до осадки четырёхлучевой заготовки

Формула для определения объема металла, заполнившего дефект:

$$V_{\text{деф}} = \frac{\pi}{3} * ((Z2 - Z1) * (X2^2 + X1^2 + X2 * X1) + (Z3 - Z2) * (X3^2 + X2^2 + X3 * X2) + (Z4 - Z3) * (X4^2 + X3^2 + X4 * X3) + (Z5 - Z4) * (X5^2 + X4^2 + X5 * X4) + (Z6 - Z5) * (X6^2 + X5^2 + X6 * X5) + (Z7 - Z6) * (X7^2 + X6^2 + X7 * X6) + (Z8 - Z7) * (X8^2 + X7^2 + X8 * X7) + (Z9 - Z8) * (X9^2 + X8^2 + X9 * X8) + (Z10 - Z9) * (X10^2 + X9^2 + X10 * X9) + (Z11 - Z10) * (X11^2 + X10^2 + X11 * X10) + (Z12 - Z11) * (X12^2 + X11^2 + X12 * X11))$$

где Z_i – координаты точки i по оси Z ;

X_i – координаты точки i по оси X .

Средний диаметр дефекта

$$D_{\text{деф}} = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot V_{\text{деф}}}{(H_0 - V_{\text{инстр}} \cdot t_{\text{ход}}) \cdot \pi}}$$

где $t_{\text{ход}}$ – время движения инструмента, сек;

$V_{\text{инстр}}$ – скорость движения инструмента, принята 20 мм/сек;

H – высота заготовки на текущем ходу, мм;

k – коэффициент, который учитывает расчет на половине высоты, $k=2$.

По результатам вычисления среднего объема дефекта составлен график зависимости изменения относительного диаметра дефекта от относительной степени деформации заготовки для каждого проведенного теоретического эксперимента.

2.1.3 Методика определения показателя напряженного состояния

На границе искусственного дефекта на середине высоты модели заготовки устанавливается контрольная точка P1, по которой будет вестись дальнейшее отслеживание искомых параметров (рис. 2.7). Для текущего эксперимента исследуется напряженное состояние Stress-Effective и Stress-Mean. Имея координаты точки в центре заготовки из DEFORM 3D, выводятся значения σ_i и σ_{cp} для текущего шага.

Показатель напряженного состояния

$$П_{\sigma} = \frac{3\sigma_{cp}}{\sigma_i},$$

где σ_{cp} – среднее напряжение (Stress-Mean), МПа;

σ_i – интенсивность напряжений (Stress-Effective), МПа.

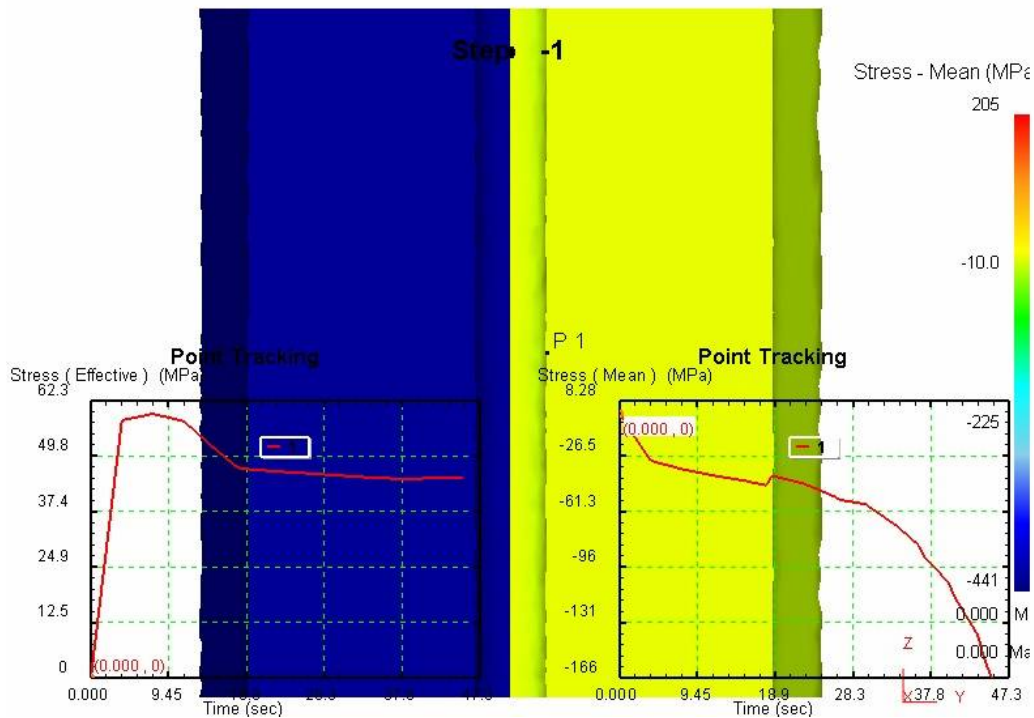


Рисунок 2.7 – Расположение контрольной точки для определения напряженного состояния

По результатам исследования построены графики зависимости показателя напряженного состояния заготовки от относительной степени её осадки для различных геометрических параметров заготовки с вогнутыми гранями.

2.1.4 Методика определения интенсивности логарифмических деформаций

Напряженно-деформированное состояние заготовки определяется после осадки её на 50 % [179]. По всей высоте заготовки вдоль искусственного осевого дефекта расставлены 19 контрольных точек. Далее с помощью функции в DEFORM 3D Point Tracking построены графики зависимости деформации от времени движения главного инструмента. После обработки получен-

ных значений с помощью программного продукта Excel, построен график распределения интенсивности логарифмических деформаций по высоте заготовки. Методика расстановки точек для функции Point Tracking показана на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Расстановка контрольных точек для определения интенсивности логарифмических деформаций в осевой зоне заготовки

2.2 Методика экспериментальных исследований

2.2.1 Экспериментальное оборудование

Определение компонент деформаций с достаточной точностью позволяет проверить корректность постановки задачи и установить границы применимости соответствующих теоретических решений [180]. Иногда экспериментальный способ является единственно возможным и достоверным. Использование методов планирования эксперимента позволяет получать необходимую информацию о процессе с минимальными капитальными затратами

[181]. При проведении экспериментов, как в лабораторных, так и в производственных условиях широко пользуются геометрическими методами исследования напряженно-деформированного состояния. Одним из них является метод координатных или делительных сеток, разновидности которого применяли в своих исследованиях С. И. Губкин, Я. А. Фридман, И. М. Павлов, В. С. Смирнов, Г. А. Смирнов-Аляев и многие другие. Простота и точность метода координатных сеток является его главным достоинством.

Целью экспериментальных исследований процессовковки являлась проверка возможности использования и эффективности предлагаемой технологической схемы, полученной на основании теоретических исследований. Кроме того, результаты данных экспериментальных исследований, наряду с обобщением опыта промышленного внедрения, будут использованы для оценки эффективности предложенных технических решений и разработанных практических рекомендаций. С целью исследования нового процессаковки на базе лаборатории кафедры ОМД ДГМА была создана специальная установка, представленная на рисунках 2.9.



Рисунок 2.9 – Испытательная машина MS-500 базе кафедры ОМД ДГМА

Для эксперимента были изготовлены специальные бойки. Бойки крепятся в штампе (рис. 2.10). Штамп устанавливается на испытательную машину модели МС-500 силой 500 кН, скорость деформирования 2 мм / сек.

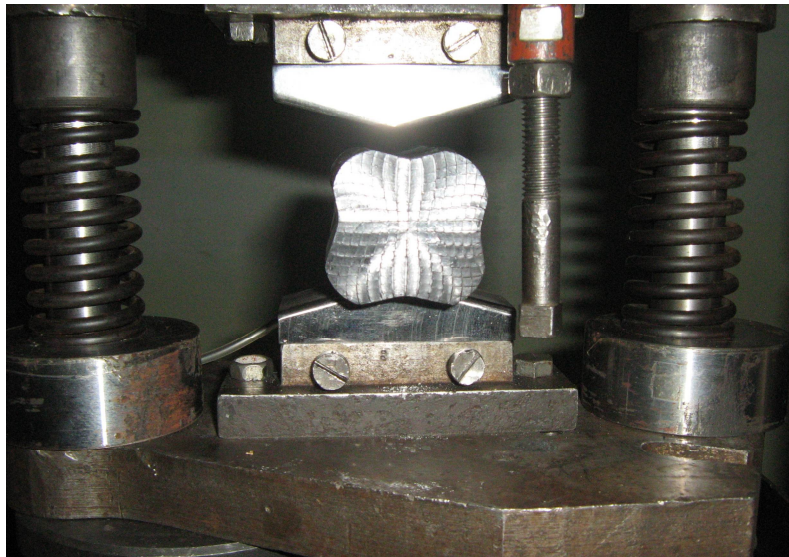


Рисунок 2.10 – Общий вид экспериментальной оснастки

Измерение силы протяжки в лабораторных условиях производили при помощи месдоз с кольцевым упругим элементом при помощи тензометрических датчиков сопротивления. Измерительные цепи силы протяжки тарировали путем имитационного нагружения месдоз силой известной величины на гидравлическом прессе МС 500 (см. рис. 2.9). Относительная погрешность показаний регистрирующих приборов при многократных тарировочных нагрузках и разгрузках не превысила $\pm 9,5\%$. Запись текущих во времени значений всех регистрируемых параметров, за исключением параметров сечения заготовки, а также их последующую расшифровку осуществляли при помощи ПЭВМ путем аналогово-цифрового преобразователя АЦП–ADC16–32, обеспечивающего возможность измерения по 16 дифференцированным каналам. Входной сигнал в этом случае оцифровывался шестнадцатитбитным аналого-цифровым преобразователем с частотой до 100 кГц и возможностью усиления в диапазоне 1...1000.

Обработку результатов экспериментальных исследований, а также оценку степени соответствия полученных теоретических и эмпирических решений производили с использованием общепринятых методов теории вероятности и математической статистики [165, 166].

2.2.2 Материалы для моделирования

Чтобы сохранить подобие физико-механических свойств, целесообразно изготавливать модель заготовки из материала природы. Однако это не всегда является обязательным условием, поэтому для выявления общих закономерностей процессов пластического формоизменения часто выбирают материал модели отличным от материала природы. Для исследования процессов горячей обработки металлов в лабораторных условиях рекомендуется использовать свинец, так как этот металл хорошо обрабатывается, пластичен, имеет низкую температуру рекристаллизации ($\approx 20^\circ\text{C}$) и плавления ($\approx 330^\circ\text{C}$). Для этого материала можно реализовать полный металлургический цикл. Путем введения в свинец небольшого количества сурьмы (до 5 %) или теллура (до 0,5 %) можно изменять механические характеристики модельного материала в достаточно широких пределах. Для проведения экспериментальных исследований были отлиты свинцовые заготовки цилиндрической формы диаметром 50 мм и высотой 70 мм, относительная подача $\psi = l_0 / D = 0,5$. С целью определения распределения деформаций на торце заготовки была нанесена координатная сетка с шагом 3 мм (рис. 2.11, а). С противоположной стороны заготовки в осевой её зоне высверливалось отверстие диаметром 5 мм, которое имитировало осевой дефект слитка (рис. 2.11, б). После этого производилось деформирование полученных заготовок выпуклым инструментом (рис. 2.12), угол выпуклых бойков с клиновым профилем составлял 120° , 150° и 180° . В процессе профилирования выполнялись замеры поперечного сечения имитируемого дефекта, а также силы в ходе процесса протяжки.

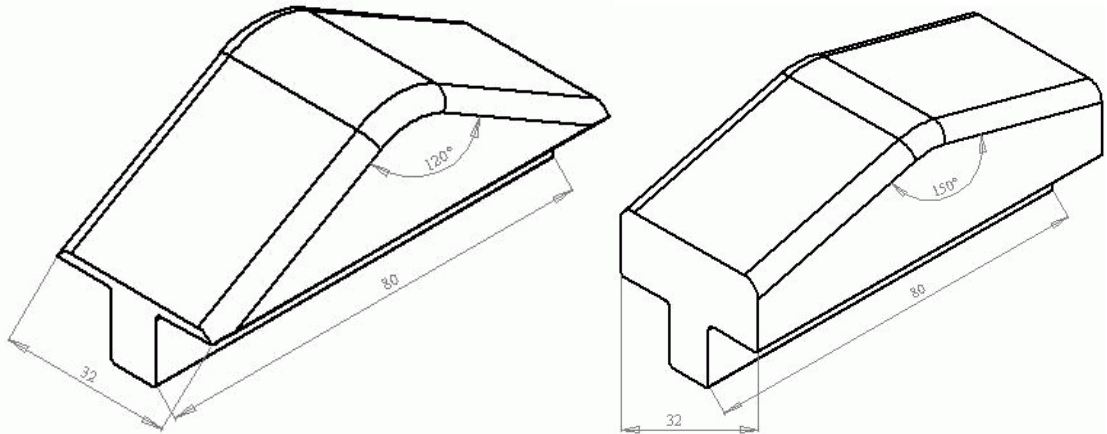


а)

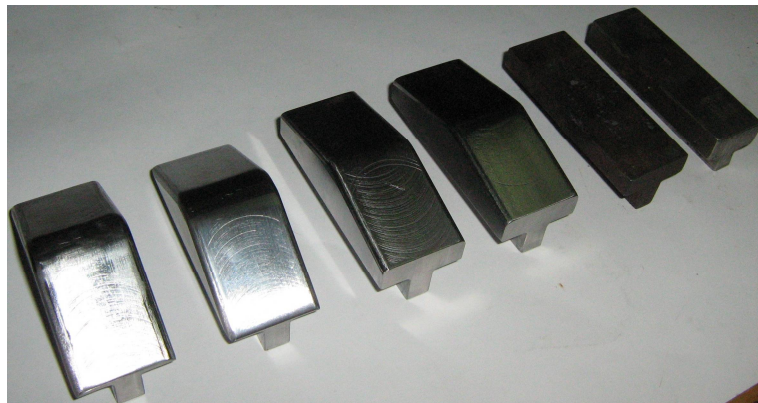


б)

Рисунок 2.11 – Образцы с сеткой (а) и осевым дефектом (б) на торце цилиндрической заготовки



а)



б)

Рисунок 2.12 – Эскиз (а) и фотографии (б) выпуклых бойков с клиновым профилем

Относительное обжатие в каждом проходе составляло 5 %, суммарное на обе стороны 20 %. После каждого прохода осуществляли кантовку заготовки на 90°. После четного прохода производили замеры заготовки (рис. 2.13). По полученным данным строились экспериментальные графики изменения поперечного сечения имитируемого дефекта и силы процесса профилирования.

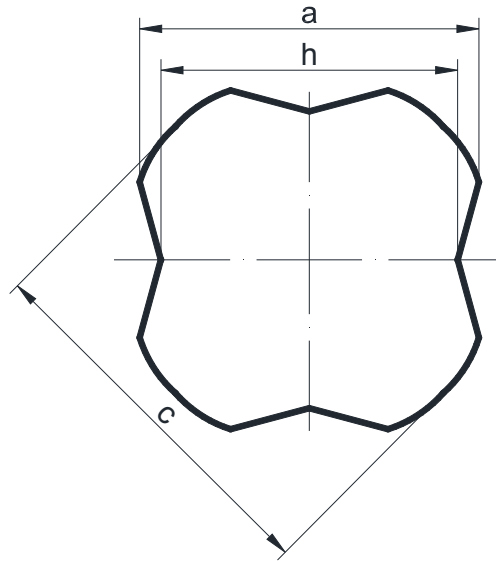


Рисунок 2.13 – Параметры сечения заготовок после профилирования выпуклыми бойками

2.2.3 Исследование механизма заковывания дефектов на свинцовых и стальных моделях

Заковывание осевых дефектов слитка в процессековки является гарантией повышения качества крупных поковок. Существующие методики определения механизма заковки дефектов предполагают разрезку заготовки после деформации. В этом случае для установления влияния степени обжатия и геометрии инструмента необходимо изготовить большое количество образцов, что влечёт за собой повышение капитальных затрат на проведение экс-

периментальных исследований. В этой связи была дополнительно разработана специальная методика неразрушающего контроля измерения размеров осевого дефекта для комплексной оценки влияния процессов профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок на закрытие внутренних пустот.

Методика заключалась в сверлении осевого отверстия в свинцовой заготовке диаметром 10 % от диаметра заготовки [182]. Полученное отверстие соединялось при помощи гибкого шланга (рис. 2.14) с мерным лабораторным вальюметром. Полученная система заполнялась водой. Изменение объема дефекта в процессе профилирования и осадки приводит к изменению уровня жидкости в вальюметре. По объёму вытесненной жидкости и текущей высоте заготовки определялся средний диаметр дефекта [183]. Диаметр свинцовых заготовок 50 мм, диаметр отверстия 5 мм. Соотношение H / D заготовки составляло 1,5. Цилиндрические заготовки протягивались выпуклыми бойками с углом 120° , 140° и 150° . Суммарная степень деформации за 4 прохода при профилировании на четырёхлучевую заготовку выпуклыми бойками составляла 20 %.

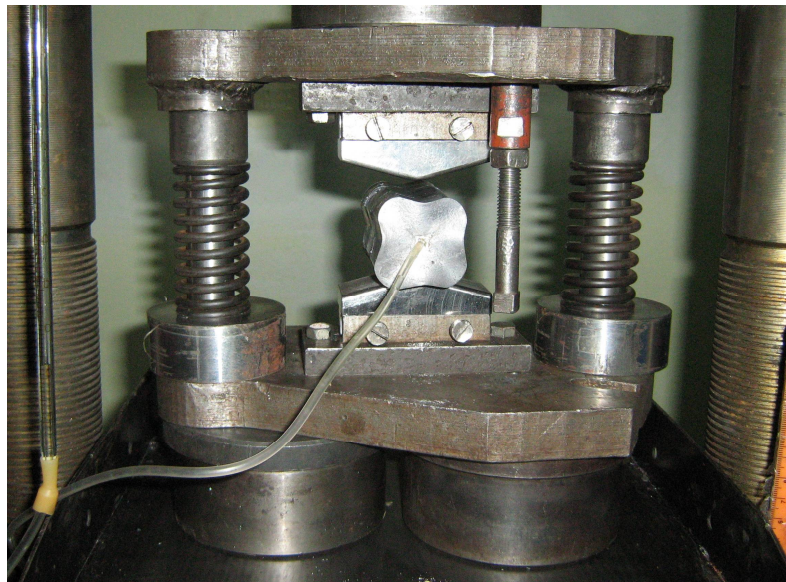


Рисунок 2.14 – Исследование процесса заковки осевого дефекта при профилировании заготовок

После профилирования полученные заготовки осаживались плоскими плитами (рис. 2.15) на степень деформации 70 % с поэтапным фиксированием (каждые 5 мм) изменения объема дефекта.

На основе проведенных экспериментов необходимо выявить влияние профилирования на четырёхлучевую заготовку выпуклыми бойками с клиновым профилем, с дальнейшей осадкой плоскими плитами, на заковывание искусственного дефекта. Установить интенсивность заковки искусственного дефекта при профилировании и осадке четырёхлучевых заготовок с различной геометрией вогнутых граней можно с использованием свинцовых образцов с искусственным осевым дефектом. Степень заковывания искусственного дефекта оценивали по уменьшению его размеров.

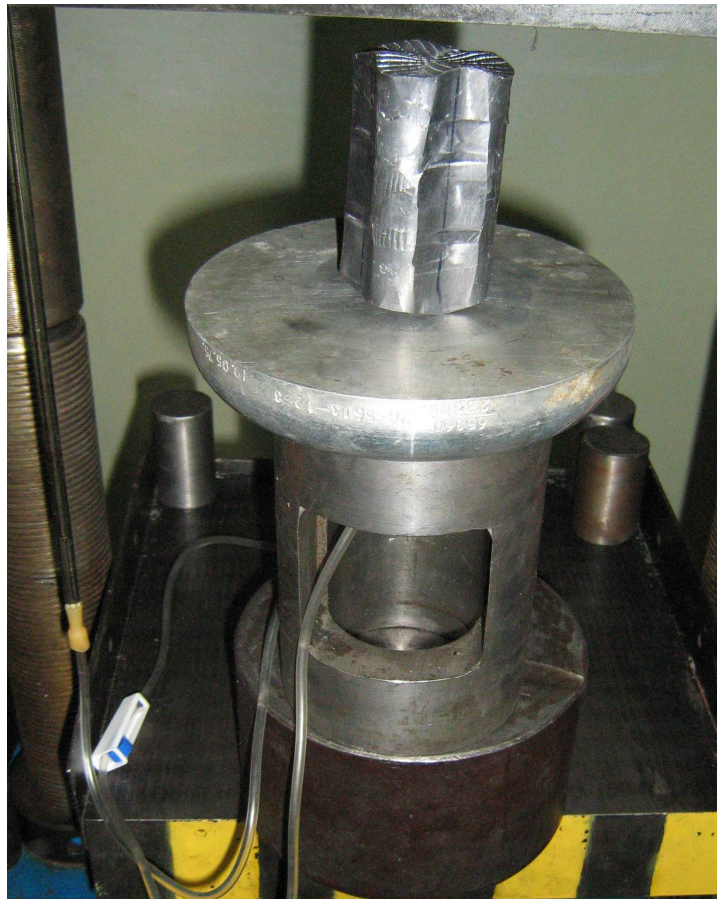


Рисунок 2.15 – Исследование процесса заковки осевого дефекта по объему вытесненной жидкости в процессе осадки

Для сопоставления механизма заковки осевого дефекта по новому способу осадки четырёхлучевых заготовок проводилось дополнительное исследование процесса осадки цилиндрической заготовки. Диаметры и высота заготовок, а также механические режимы деформирования были идентичны для возможности сопоставления полученных результатов.

Проверка достоверности полученных результатов механизма заковки дефекта на свинцовых образцах производилась проверочным экспериментом на моделях из стали 34ХНМ и 70Х3ГНМФ (рис. 2.16). Осевая рыхлость слитка моделировалась отверстием диаметром 4 мм на 3/4 длины заготовки (см. рис. 2.16). Степень деформации при профилировании заготовки составляла 20 %.

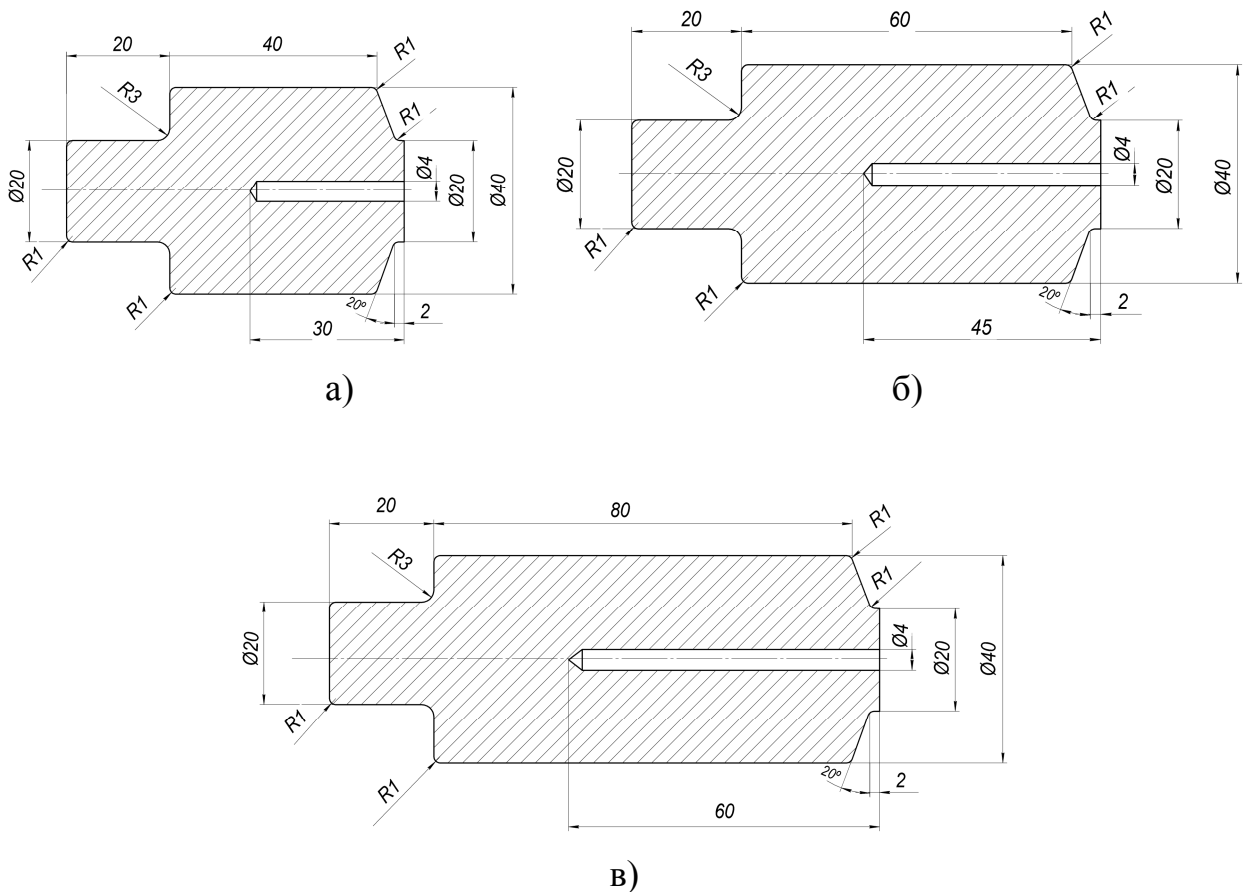


Рисунок 2.16 – Эскизы заготовок с различным соотношением H / D (а – в) и модели из стали с искусственным осевым дефектом

Образцы (рис. 2.17) нагревались в электрической печи до температуры 1200 °С и профилировались выпуклыми бойками с клиновым профилем, после чего производилась осадка профилированных заготовок плоскими плитами (рис. 2.18).

После деформирования заготовки охлаждались в печи при температуре 500°С, чтобы не произошло изменение структуры металла. В месте сверления производили разрезку заготовки для проведения металлографических исследований. После шлифовки и полировки заготовки производили макроструктурное исследование, чтобы выявить степень заковки осевого дефекта.



Рисунок 2.17 – Стальные заготовки до нагрева

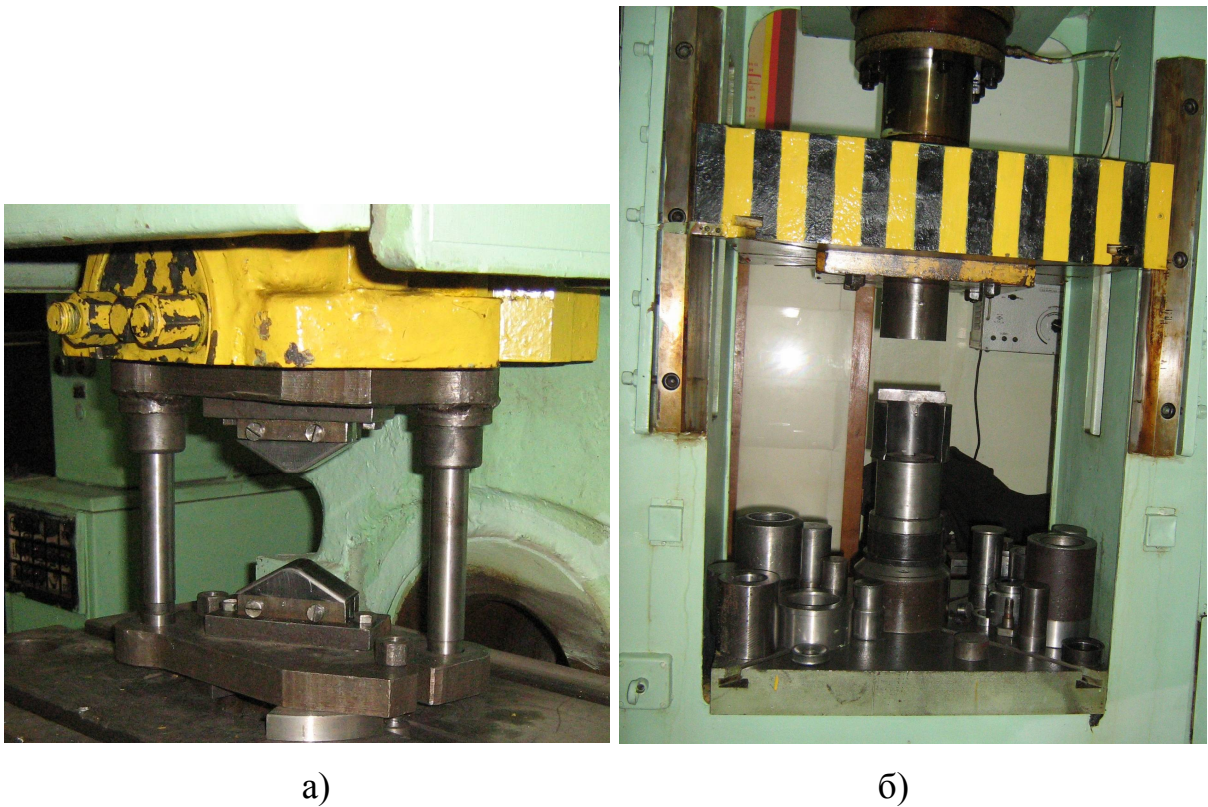


Рисунок 2.18 – Фото оборудования и оснастки для профилирования (а) и осадки заготовок (б)

Выводы по разделу 2

1. Теоретическим методом исследования выбран МКЭ, который дает возможность получить результаты исследования формоизменения и НДС с приемлемой точностью. Особенности метода: универсальность, широкие возможности; в нем объединены механика сплошного тела и современные методы численного анализа. В качестве программного обеспечения для проведения теоретического исследования выбрана программа DEFORM 3D. В ней возможно исследование распределения температур, напряжений, деформаций, необходимых для осуществления процесса профилирования и осадки инструментом с различной геометрией.

2. Разработана специальная методика моделирования процессов профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок на основе МКЭ для выявления эффективной схемы деформирования, которая обеспечивает появление в осевой зоне сжимающих напряжений и заковку дефектов.

3. Для экспериментального метода исследования процесса осадки профилированных на четырёхлучевое сечение заготовок разработана методика моделирования на свинцовых и стальных моделях с высверленным осевым отверстием, моделирующим осевую рыхлость. Для определения распределения деформаций в сечении заготовки использовался метод координатных сеток.

4. Экспериментальные исследования предполагают проведение лабораторных (в условиях кафедры ОМД ДГМА) и натурных исследований (в условиях завода ПАО «НКМЗ»). В качестве методов исследования использовались: метод координатных сеток, методы геометрического и физического моделирования. Промышленные экспериментальные исследования заковки осевых дефектов слитков производились на основании данных ультразвукового контроля.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОФИЛИРОВАНИЯ И ОСАДКИ ЧЕТЫРЁХЛУЧЕВЫХ ЗАГОТОВОК

3.1 Напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе её профилирования выпуклыми бойками

3.1.1 Влияние формы выпуклых радиусных бойков на распределение интенсивности деформаций и степень закрытия осевого дефекта

Литературный обзор позволил установить, что для повышения уровня пластических деформаций в теле поковки с равномерным их распределением необходимо применениековки выпуклыми бойками. Очевидно, что равномерное распределение пластических деформаций возможно только при ковке заготовки с симметричным сечением. Такому сечению соответствует четырёхлучевая форма заготовки. Четырёхлучевое сечение заготовки с вогнутыми гранями можно получить выпуклыми радиусными бойками или выпуклыми бойками с клиновым профилем. Геометрия выпуклого инструмента будет влиять не только на НДС металла заготовки в процессе осадки, но и в процессе её профилирования. В этой связи необходимо установить влияние бойков с радиусным и клиновым выступом на формоизменение и заковывание осевых дефектов. Профилирование радиусными бойками позволит определить эффективные радиусы скругления выпуклых бойков.

Цель исследования на первом этапе – определение НДС в процессе профилирования цилиндрической заготовки выпуклыми радиусными бойками с диаметрами выступов бойков ($D/D_{заг} = 0,25; 0,5; 1,0$, где D и $D_{заг}$ – диаметр заготовки и инструмента); на втором этапе – определение НДС в процессе профилирования цилиндрической заготовки выпуклыми бойками с

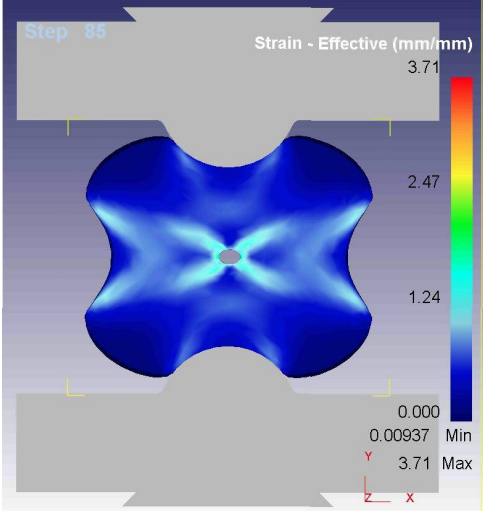
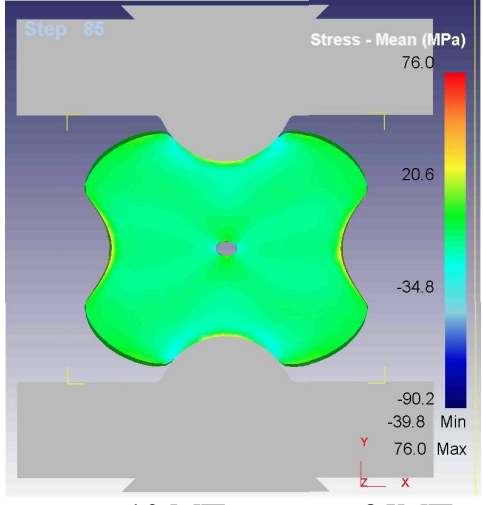
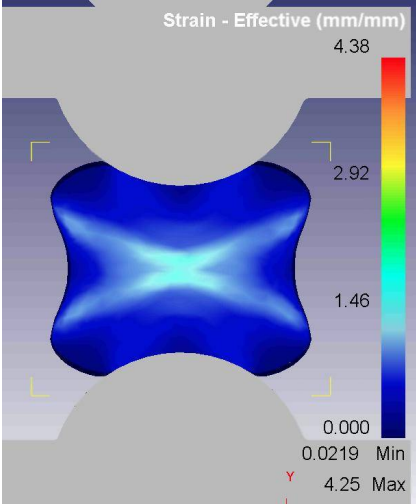
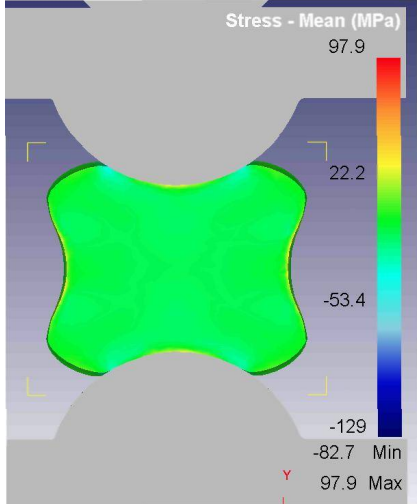
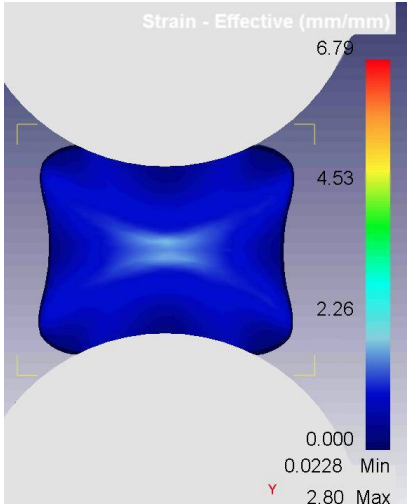
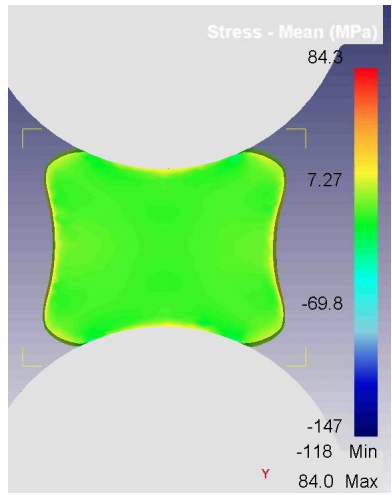
клиновым профилем (углы 100° ; 120° ; 180°). Дополнительно исследовался механизм заковки осевого дефекта для исследуемых способов. Методика теоретических исследований рассмотрена в п. 2.1.

В конечно-элементном моделировании НДС исследовались влияния следующих параметров заготовки и инструмента: 1 – диаметр выступа инструмента равен четверти диаметра заготовки $D = \frac{D_{\text{заг}}}{4} = 250$ мм; 2 – диаметр выступа инструмента равен половине диаметра заготовки $D = \frac{D_{\text{заг}}}{2} = 500$ мм; 3 – диаметр выступа инструмента равен диаметру заготовки $D = D_{\text{заг}} = 1000$ мм.

Профилирование выпуклыми бойками с диаметром выступа $D = \frac{D_{\text{заг}}}{4}$. После обжатия исследуемыми радиусными бойками на величину $\varepsilon = 25\%$ закрытие осевого дефекта происходит примерно на 50% (табл. 3.1, 1-й столбец, 1-я строка). Неравномерность распределения логарифмических деформаций в этом случае составляет $\Delta\varepsilon = 1,47$. Средние напряжения в месте расположения осевого дефекта и периферийных слоях – растягивающие ($\sigma_{\text{срц}} = 10$ МПа и $\sigma_{\text{срп}} = 25$ МПа, соответственно) (см. табл. 3.1, 2-й столбец, 1-я строка). Напряженное состояние объемного неравномерного растяжения в осевой зоне объясняет слабую заковку осевого дефекта.

Профилирование выпуклыми бойками с диаметром выступа $D = \frac{D_{\text{заг}}}{2}$. Увеличение диаметра выступа бойков незначительно увеличивает неравномерность распределения деформаций по сечению профилированной заготовки $\Delta\varepsilon = 1,55$ (табл. 3.1, 1-й столбец, 2-я строка). Средние напряжения в центральной зоне – сжимающие ($\sigma_{\text{срц}} = -26$ МПа), на периферии – растягивающие ($\sigma_{\text{срп}} = 22$ МПа). Можно сделать вывод, что с увеличением диаметра выпуклых радиусных бойков происходит резкое повышение уровня сжимающих напряжений в осевой зоне, что способствует полной заковке осевого дефекта (табл. 3.1, 2-я строка).

Таблица 3.1 – НДС и заковка осевого дефекта при профилировании выпуклыми радиусными бойками

	Интенсивность деформаций	Средние напряжения
$D = D_{3ar} / 4$	 <p>$\Delta e = 1,47, d_{деф}/d_{деф0}=0,5$</p>	 <p>$\sigma_{срц} = 10 \text{ МПа}, \sigma_{срп} = 25 \text{ МПа}$</p>
$D = D_{3ar} / 2$	 <p>$\Delta e = 1,55, d_{деф}/d_{деф0}=0$</p>	 <p>$\sigma_{срц} = -26 \text{ МПа}, \sigma_{срп} = 22 \text{ МПа}$</p>
$D = D_{3ar}$	 <p>$\Delta e = 2,45, d_{деф}/d_{деф0}=0$</p>	 <p>$\sigma_{срц} = -45 \text{ МПа}, \sigma_{срп} = 7 \text{ МПа}$</p>

Профилирование выпуклыми бойками с диаметром выступа $D = D_{заг}$. Дальнейшее увеличение диаметра выступа инструмента приводит к увеличению неравномерности распределения пластических деформаций в теле заготовки $\Delta\epsilon = 2,45$ (см. табл. 3.1, 1-й столбец, 3-я строка). Это объясняется увеличением зоны затрудненной деформации под верхним выпуклым бойком за счет увеличения площади контакта заготовки и инструмента и, соответственно, локализацией максимальных деформаций в осевой зоне. При этом в большей степени повышается уровень сжимающих напряжений в осевой зоне $\sigma_{ср_ц} = -45$ МПа, с одновременным уменьшением растягивающих напряжений в периферийных слоях четырёхлучевой заготовки $\sigma_{ср_п} = 7$ МПа (см. табл. 3.1, 2-й столбец, 3-я строка). Полученное НДС способствует полной заковке осевого дефекта на этапе профилирования заготовки на четырёхлучевое сечение.

3.1.2 Влияние формы выпуклых бойков с клиновым профилем на распределение интенсивности деформаций и степень закрытия осевого дефекта

НДС и закрытие осевых дефектов слитков при профилировании на четырёхлучевое сечение выпуклыми радиусными бойками зависит от диаметра выступа бойков относительно диаметра заготовки (см. п. 3.1.1). Более универсальным кузнечным инструментом служат выпуклые бойки с клиновым профилем. Определение эффективного угла клина выпуклых бойков позволит спроектировать универсальный инструмент, который будет подходить для профилирования заготовок различного диаметра. Потому цель данного исследования – определение эффективного угла, который обеспечивает равномерное распределение деформаций и заковку осевых дефектов.

Профилирование выпуклыми бойками с клиновым профилем и углом рабочей поверхности 100° (см. табл. 3.2, 1-я строка). Эта схема деформирования приводит к большей неравномерности распределения деформаций $\Delta\epsilon$ в теле заготовки величиной $\Delta\epsilon = 3$, (рис. 3.1, кривая 1), чем ковка плоскими бойками. Однако данное деформированное состояние не способствует полному закрытию осевого дефекта (см. табл. 3.2, 1-я строка), его размер уменьшается примерно на 42% ($d_{\text{деф1}}/d_{\text{деф0}} = 0,58$). Можно утверждать, что для этой схемы деформирования нет достаточного уровня локализации деформаций в области расположения осевого дефекта для его закрытия. Для этой схемы деформирования также характерно низкое значение показателя жесткости схемы напряженного состояния в осевой зоне, который составляет $\text{П}\sigma \approx -1,5$ после 5-й кантовки и прохода (рис. 3.2, кривая 1). Можно отметить высокую равномерность распределения средних напряжений в теле заготовки с уровнем $\sigma_{\text{срп}} \approx -55$ МПа (рис. 4.21 б). Средние напряжения с уровнем порядка $\sigma_{\text{срп}} = 73$ МПа возникают на поверхности заготовки в месте внедрения острия клина бойка (см. табл. 3.2, 1-я строка) обеспечивая в этом месте значительные растягивающие напряжения.

Профилирование выпуклыми бойками с клиновым профилем и углом рабочей поверхности 120° (табл. 3.2, 2-я строка). Увеличение угла приводит к изменению НДС. Снижается неравномерность распределения деформаций $\Delta\epsilon \approx 1,75$ (рис. 3.1, кривая 2). Однако при этом максимальные деформации локализуются в месте расположения осевого дефекта. Для этой схемы деформирования уровень средних напряжений (табл. 3.2, 2-я строка) в осевой зоне составляет $\sigma_{\text{срп}} \approx -71$ МПа, а показатель жесткости схемы НС $\text{П}\sigma \approx -1,8$, после обжатия до высоты в средней части до 1265 мм (рис. 3.2, кривая 2). Данное НДС приводит к полному закрытию осевого дефекта на всей его длине после обжатия цилиндрической заготовки на 35%. Уровень средних напряжений на поверхности заготовки в месте острия бойка составляет $\sigma_{\text{срп}} \approx 62$ МПа, что свидетельствует о появле-

нии растягивающих напряжениях за счёт расклинивания металла.

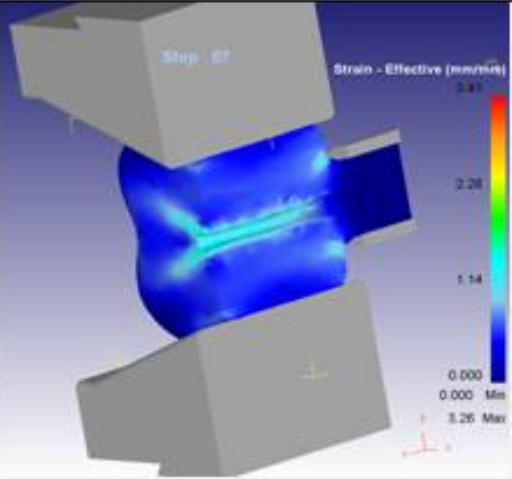
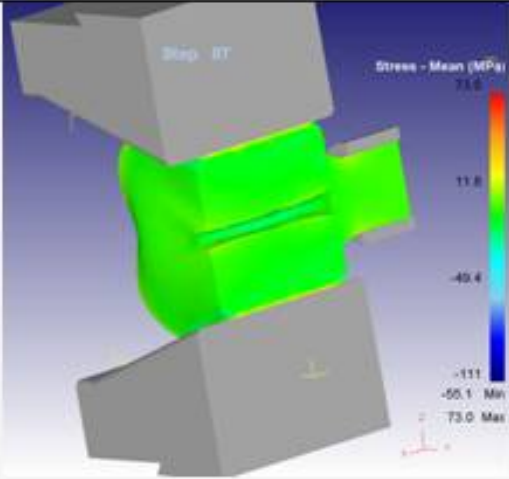
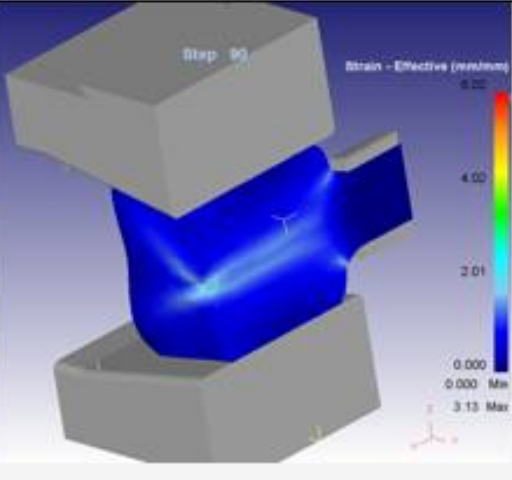
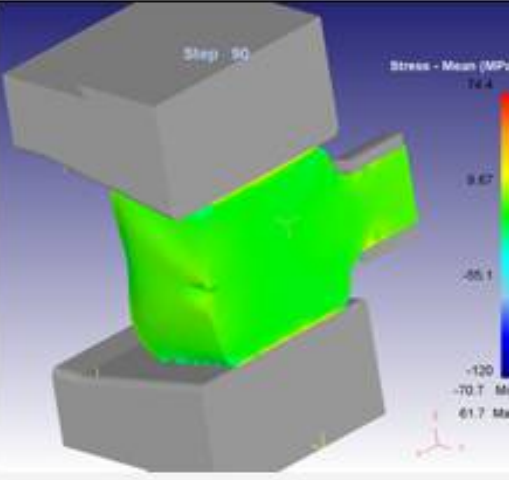
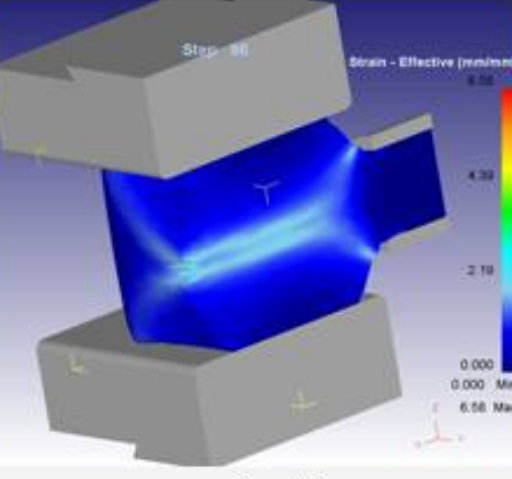
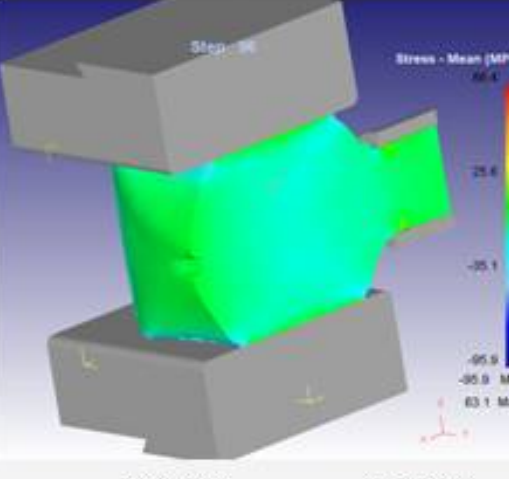
Профилирование плоскими бойками (угол рабочей поверхности 180°) (табл. 3.2, 3-я строка). Ковка цилиндрической заготовки плоскими бойками с кантовкой на 90° реализуется по схеме протяжки через квадрат. Результаты распределения деформаций в теле заготовки совпадают с известными в литературе данными. Зоны заготовки, контактирующие с инструментом, остаются недеформированными. Основные деформации возникают по диагоналям квадратного сечения заготовки величиной больше 2,0 (см. табл. 3.2, 3-я строка). При этом схема характеризуется высокой неравномерностью распределения деформаций в объёме заготовки ($\Delta\epsilon \approx 2,75$) (рис. 3.1, кривая 3). Максимальные деформации локализуются в центральной осевой зоне заготовки с уровнем $\approx 3,0$. При этом уровень средних напряжений (см. табл. 3.2, 3-я строка) в теле заготовки составляет $\sigma_{\text{ср}} = -96$ МПа, что соответствует состоянию сжатия. Показатель жесткости схемы напряженного состояния $\Pi\sigma \approx -2,1$ (рис. 3.2, кривая 3). Это обеспечивает интенсивное закрытие осевого дефекта. По мере уменьшения величины обжатия после каждой кантовки для придания заготовки квадратного поперечного сечения показатель жесткости схемы НС снижается примерно на 10 %.

3.2 Напряженно-деформированное состояние заготовки и заковка осевого дефекта в процессе осадки четырёхлучевых заготовок

3.2.1 Закрытие дефекта в процессе осадки заготовки

После анализа существующих технологических процессов ковки установлено, что примерно 80...90 % технологических процессов предполагают использование осадки, которая применяется для увеличения диаметра заготовки и повышение уклова.

Таблица 3.2 – НДС и заковка осевого дефекта при профилировании выпуклыми бойками с клиновым профилем

	Интенсивность деформаций	Среднее напряжение
Бойки с углом 100°	 <p>$\Delta e = 3,0; d_{деф1}/d_{деф0} = 0,58$</p>	 <p>$\sigma_{срп} = 73 \text{ МПа}; \sigma_{срц} = -55,1 \text{ МПа}$</p>
Бойки с углом 120°	 <p>$\Delta e = 1,75; d_{деф1}/d_{деф0} = 0$</p>	 <p>$\sigma_{срп} = 61,7 \text{ МПа}; \sigma_{срц} = -70,7 \text{ МПа}$</p>
Бойки с углом 180°	 <p>$\Delta e = 2,75; d_{деф1}/d_{деф0} = 0$</p>	 <p>$\sigma_{срп} = 63,1 \text{ МПа}; \sigma_{срц} = -95,9 \text{ МПа}$</p>

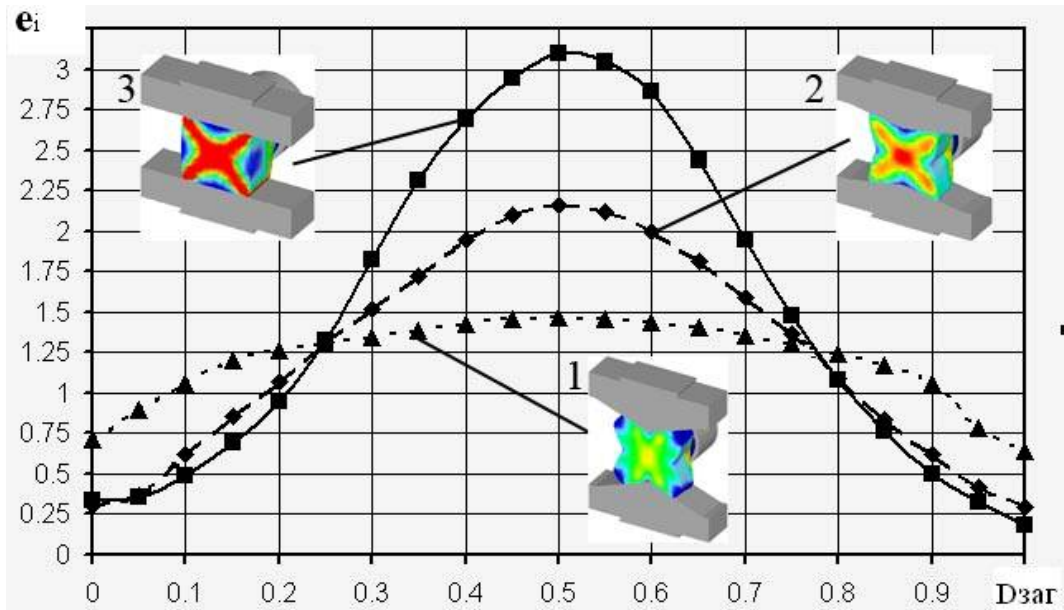


Рисунок 3.1 – Распределение интенсивности логарифмических деформаций по диаметру при угле клина бойков: 1 – 100°; 2 – 120°; 3 – 180°

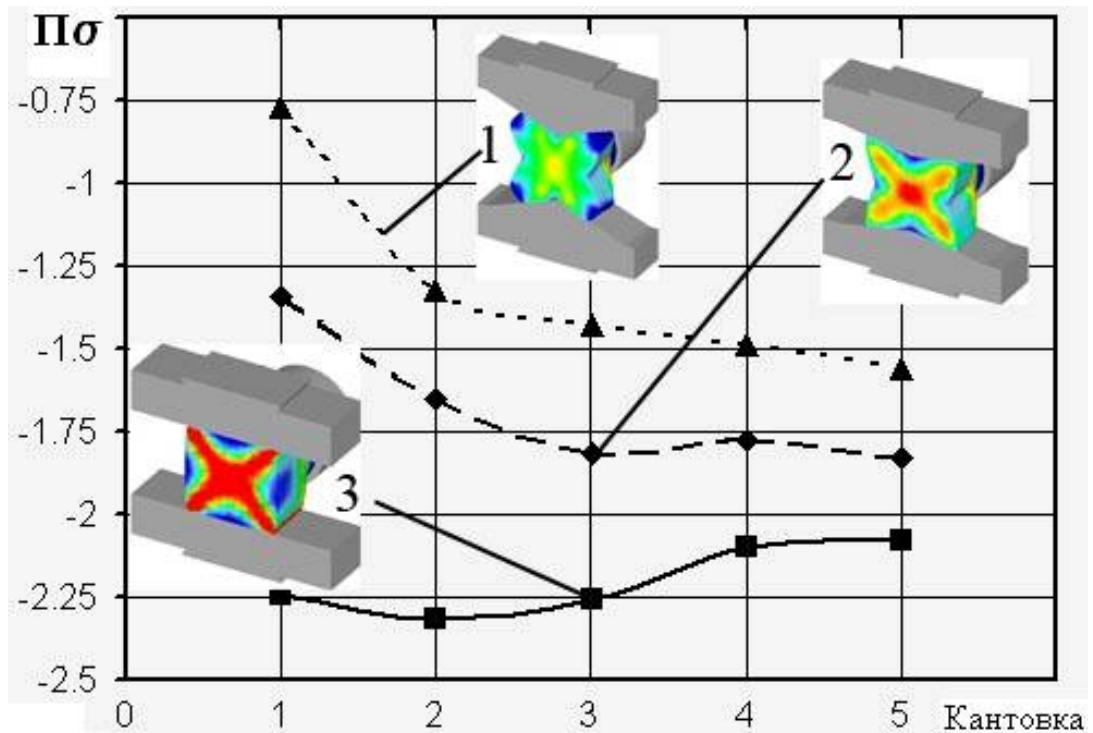


Рисунок 3.2 – Показатель жесткости схемы напряженного состояния в зависимости от числа кантовок на 90° в осевой зоне при угле клина бойков: 1 – 100°; 2 – 120°; 3 – 180°

Повысить уровень сжимающих напряжений в осевой зоне заготовки можно за счет обеспечения подпора ее боковой поверхности. Перспективным направлением профилирования слитка перед осадкой является получение заготовки с вогнутым поперечным сечением протяжкой выпуклыми клиновыми бойками [19].

Формирование вогнутых граней в заготовке перед осадкой повысит равномерность распределения деформаций и обеспечит подпор в осевой зоне в процессе осадки. Этот вопрос на сегодняшний день не исследован и нет конкретных рекомендаций по рациональной геометрии таких заготовок перед осадкой.

Цель исследования – определение эффективной геометрии профилированных заготовок с вогнутым поперечным сечением, которая обеспечивает закрытие осевых дефектов в процессе осадки.

Проведенные в работе исследования (п. 3.1) позволили установить, что рациональной геометрией бойков для профилирования являются выпуклые бойки с клиновым профилем, которые имеют радиус скругления равный примерно половине радиуса заготовки. Угол клина бойков, равный 100° , в дальнейших исследованиях не рассматривается, так как не обеспечивает максимальной заковки осевого дефекта.




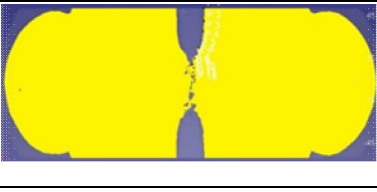
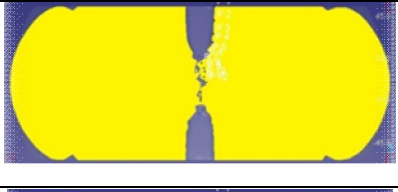
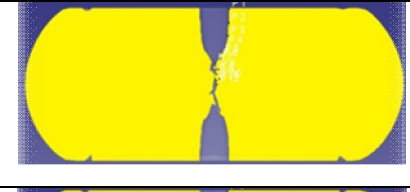
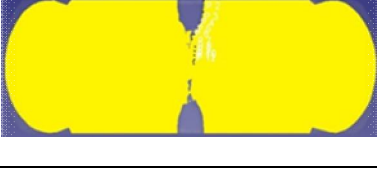
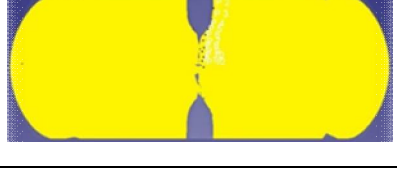
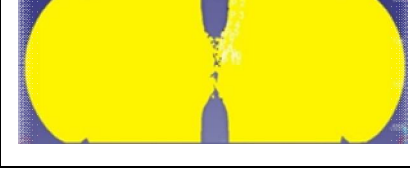
На НДС в процессе осадки профилированной заготовки также оказывает влияние глубина вогнутых граней. В исследовании варьировались угол вогнутых граней α в диапазоне 120° , 150° и 180° и относительной их глубиной d/D в диапазоне 0,75; 0,80; 0,85. Подробно методика рассмотрена в п. 2.1.2. Применяемые на сегодняшний день способы осадки не гарантируют получение поковок высокого качества. Крупногабаритные поковки, претерпевающие осадку, в большинстве случаев не соответствуют требованиям заказчика по УЗК. Это объясняется остатками осевой рыхлости в поковках. Поэтому получение количественной оценки заковывания осевой рыхлости в процессе осадки профилированных заготовок – актуальная научная проблема.

Результаты изменения размеров и формы осевого дефекта в процессе осадки четырёхлучевых заготовок с различными углами (α) и их глубиной (d / D) представлены в таблице 3.3. Эти результаты позволяют качественно оценить заковку дефекта.

На основании анализа полученных результатов исследования процесса осадки четырёхлучевых заготовок были сделаны выводы: во всех экспериментах наблюдается закрытие дефекта на середине высоты заготовки; интенсивность закрытия дефекта выше при осадке заготовок, профилированных бойками с углами $120^\circ \dots 150^\circ$ при глубине вогнутых граней $d / D = 0,85$ (табл. 3.3).

Заготовки, прокованные протяжкой на квадратное сечение плоскими бойками ($\alpha = 180^\circ$) и заготовки, профилированные на глубину $d / D = 0,75$, показали худшие результаты по закрытию осевого дефекта в сравнении с осадкой профилированных на четырёхлучевое сечение заготовок. Полученные результаты можно объяснить НДС заготовки в процессе осадки (п. 3.2.2). Количественное сравнение степени закрытия осевого дефекта после осадки на 50 % профилированных заготовок с различной глубиной вогнутых граней и их углом представлено на рисунке 3.3, при разной степени деформации – на рисунке 3.4. Средний диаметр осевого дефекта, рассчитанный через его объем и высоту осаженной заготовки, зависит от глубины вогнутых граней четырёхлучевой заготовки. Глубина вогнутых граней больше 20 % ($d / D = 0,75 \dots 0,80$) не способствуют заковке осевых дефектов заготовки в процессе осадки, особенно при углах больше 150° (рис. 3.3, кривая 3). При угле вогнутых граней 150° и 180° (полученная после профилирования плоскими бойками) глубина вогнутых граней заготовки d / D оказывает большее влияние на закрытие дефекта. Это объясняется уменьшением подпора вогнутых граней при приближении формы заготовки к призматической. Для угла вогнутых граней 120° с увеличением глубины граней степень закрытия дефекта увеличивается (см. рис. 3.3, кривая 1).

Таблица 3.3 – Закрытие осевого дефекта при осадке для схем с различными геометрическими параметрами профилированных заготовок

d/D	$\alpha = 120^\circ$	$\alpha = 150^\circ$	$\alpha = 180^\circ$
0,75			
0,80			
0,85			

Влияние глубины вогнутых граней при осадке имеет большее влияние на закрытие дефекта, чем угол клиновых бойков, в которых протянута заготовка.

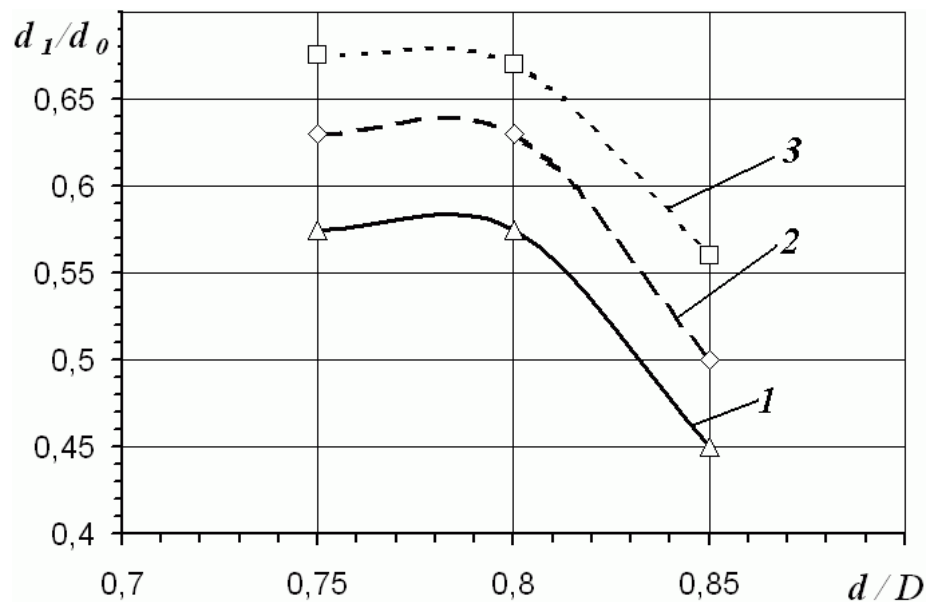
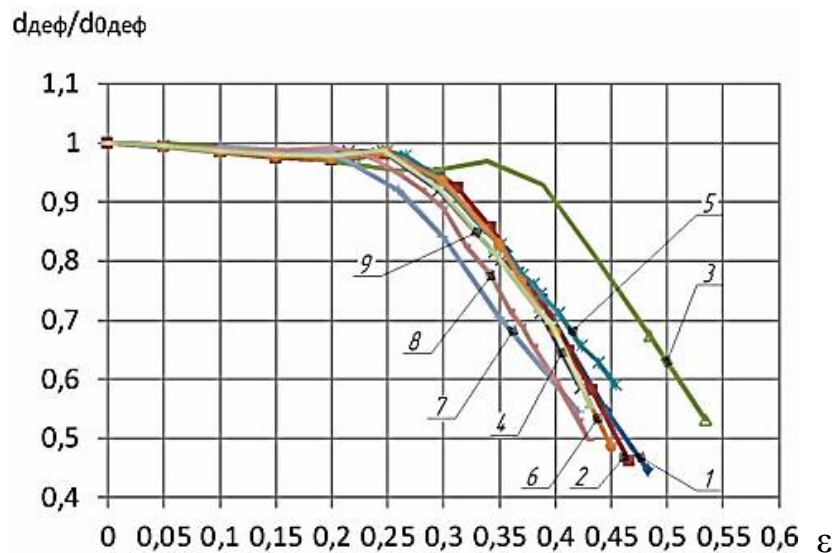


Рисунок 3.3 – Изменение относительного диаметра дефекта после осадки на 50 % в зависимости от величины вогнутых граней для различных углов вогнутых граней заготовки: 1 – $\alpha = 120^\circ$; 2 – $\alpha = 150^\circ$; 3 – $\alpha = 180^\circ$

Эффективная геометрия четырёхлучевой заготовки с точки зрения заковки осевых дефектов при осадке – угол вогнутых граней $\alpha = 120^\circ$ и глубина вогнутых граней $d / D = 0,85$ (см. рис. 3.3, кривая 1).

Для разработки эффективных технологических режимовковки представляет интерес зависимости размеров осевых дефектов от степени деформации при осадке (рис. 3.4). В этой связи для количественной оценки степени закрытия осевого дефекта были рассчитаны данные по изменению величины относительного диаметра дефекта от степени деформации (рис. 3.4). Общая закономерность полученных результатов моделирования для различных профилей заготовок: закрытие дефектов начинается после осадки на 25 %; интенсивность закрытия осевого дефекта для различных профилей заготовок отличается максимум на 10 %. При степени деформации 40 % наименьшее значение относительного диаметра дефекта $d_{\text{ср.деф}} / d_{\text{деф0}}$ составляет 0,6 (что означает закрытие осевого дефекта на 40 %) для схемы с $d / D = 0,85$ и $\alpha = 120^\circ$. А наименее эффективная схема с параметрами $d / D = 0,75$ и углом 180° .



1 – $d / D = 0,75$, $\alpha = 120^\circ$; 2 – $d / D = 0,75$, $\alpha = 150^\circ$; 3 – $d / D = 0,75$, $\alpha = 180^\circ$;

4 – $d / D = 0,8$, $\alpha = 120^\circ$; 5 – $d / D = 0,8$, $\alpha = 150^\circ$; 6 – $d / D = 0,8$, $\alpha = 180^\circ$;

7 – $d / D = 0,85$, $\alpha = 120^\circ$; 8 – $d / D = 0,85$, $\alpha = 150^\circ$; 9 – $d / D = 0,85$, $\alpha = 180^\circ$

Рисунок 3.4 – Относительный диаметр дефекта в зависимости от степени осадки заготовок с разными геометрическими параметрами граней

Результаты исследований совпадают с полученными выше (см. рис. 3.3). Для остальных геометрических параметров заготовки, среди которых цилиндрическая заготовка – дефект закрывается с одинаковой интенсивностью. Рекомендуемая степень деформации, при которой будет происходить заковка осевых дефектов, составляет не менее 50 %. Можно выделить нерациональную геометрию заготовки, которая обеспечивает минимальную заковку осевого дефекта (на 10 %) после осадки на 40 % (см. рис. 3.4, кривая 3). Это заготовка, которая была профилирована плоскими бойками на квадратное сечение (призматическая заготовка).

3.2.2 Исследование напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе осадки четырёхлучевых заготовок

В табл. 3.4 и 3.5 представлены результаты распределения интенсивности логарифмических деформаций и средних напряжений в продольном сечении заготовки после осадки на 50 %. Осадка профилированных заготовок с различной формой вогнутого поперечного сечения приводит к распределению деформаций, аналогичных процессу осадки цилиндрических образцов. Максимальные деформации ($\epsilon_i > 1,0$) локализуются в осевой зоне на середине высоты заготовки, а минимальные деформации ($\epsilon_i \approx 0$) в торцевых зонах заготовки, контактирующих с инструментом. Зона пластических деформаций качественно и количественно совпадает для различных параметров вогнутого поперечного сечения. Это позволяет сделать вывод о слабом влиянии формы поперечного сечения заготовки с вогнутым профилем на деформированное состояние (табл. 3.4). Однако осадка профилированных заготовок с вогнутым поперечным сечением приводит к изменению напряженного состояния металла заготовки в осевой зоне. Максимальные сжимающие напряжения ($\sigma_{cp} = -70$ МПа) возникают в месте расположения дефекта при углах вогнутых граней α , равных 120° , и глубине вогнутых граней 15 % (см. табл. 3.5).

Таблица 3.4 – Распределение интенсивности логарифмических деформаций для схем осадки профилированных заготовок

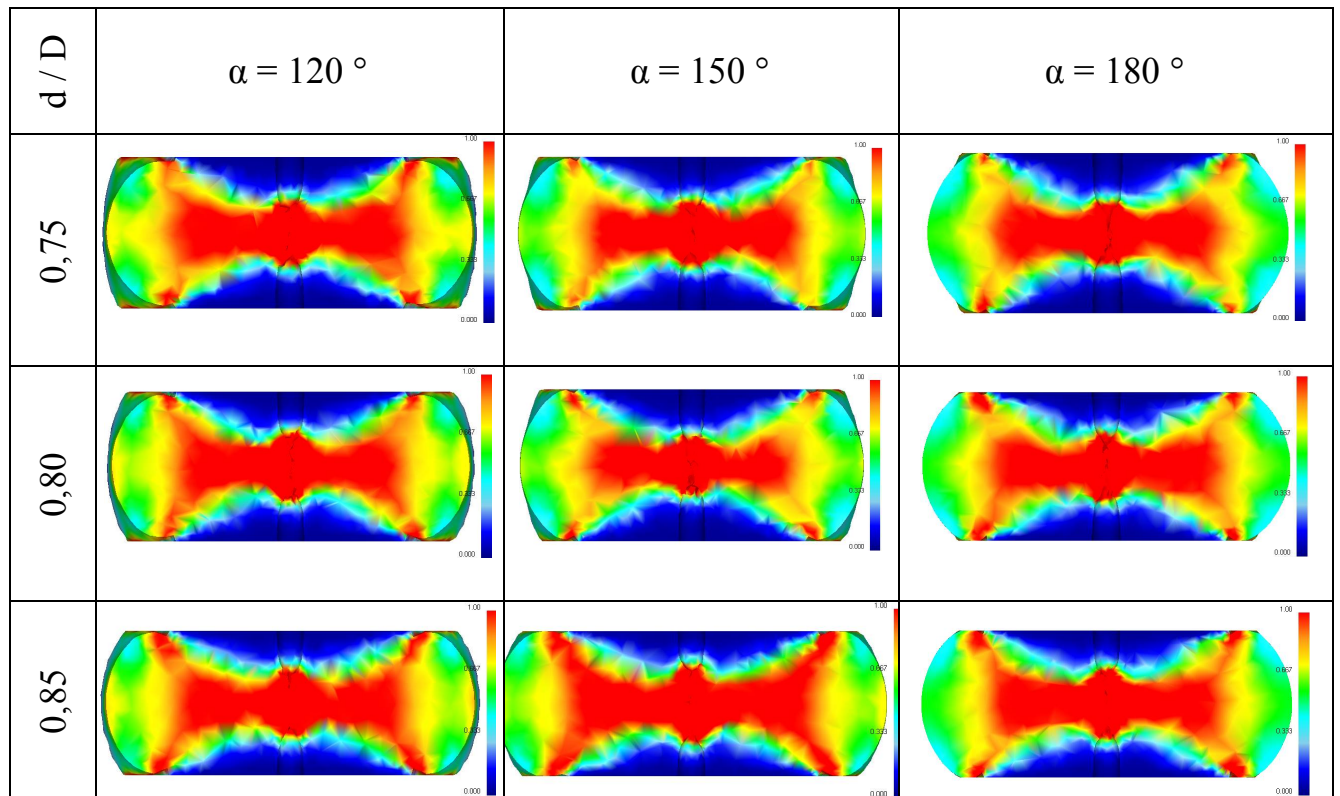
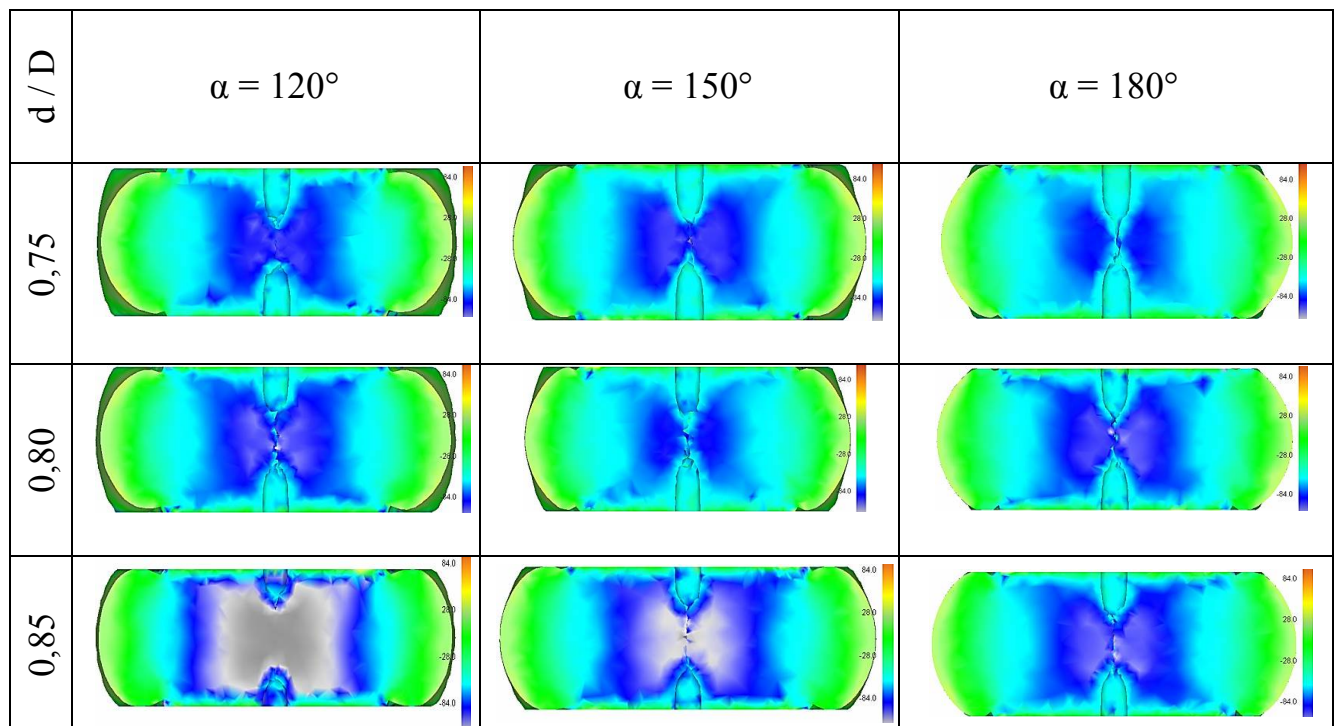


Таблица 3.5 – Распределение средних напряжений для схем осадки профилированных заготовок



Увеличение угла вогнутых граней и их глубины способствуют снижению уровня и площади зоны сжимающих средних напряжений. Исследуемые схемы характеризуются преобладанием сжимающих напряжений в теле заготовки, за исключением периферийной боковой зоны, которая имеет форму бочки (см. табл. 3.5).

На рисунке 3.5 представлены количественные результаты распределения интенсивности логарифмических деформаций в центре заготовки при степени деформации 50 %. Анализ полученных закономерностей выгодно отличает одну схему осадки из всех представленных. Этой схеме осадки соответствует угол вогнутых граней 120° , а их глубина 20% ($d/D = 0,8$) от диаметра заготовки.

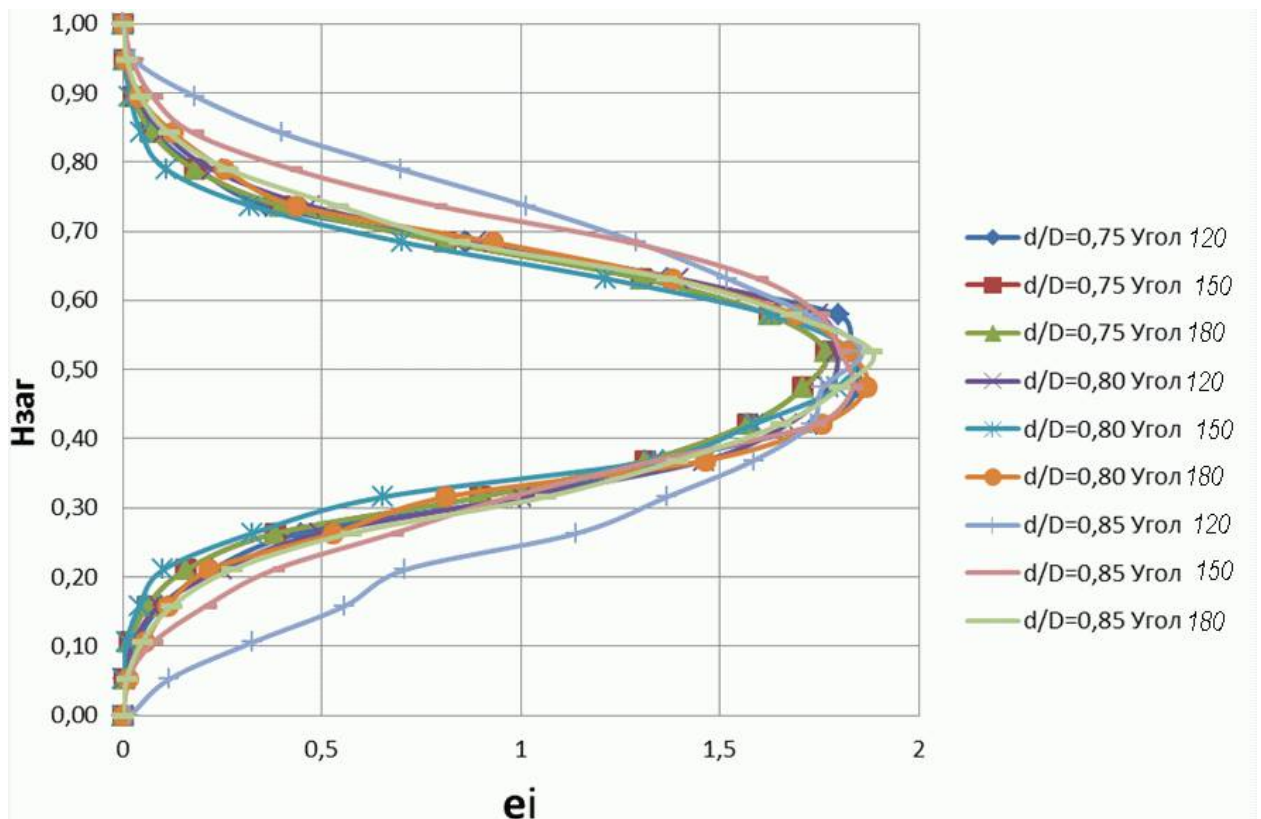


Рисунок 3.5 – Распределение интенсивности логарифмических деформаций по высоте после осадки заготовки на 50 % с различными параметрами профилированных четырехлучевых заготовок

Вогнутый профиль оказывает влияние на напряженное состояние заготовки в процессе осадки. Вогнутые грани заготовки должны повысить уровень сжимающих напряжений в теле заготовки. Для оценки уровня сжимающих напряжений можно использовать показатель жесткости схемы напряжённого состояния.

В п. 3.2.1 проведен анализ формоизменения осевого дефекта и определено, что максимальная интенсивность его закрытия происходит в процессе осадки четырёхлучевых заготовок со следующими геометрическими параметрами: соотношение $d / D = 0,85$, угол бойка, которым производилось профилирование заготовки, составляет $\alpha = 120^\circ$. Эти результаты объясняются соответствующим напряженным состоянием в осевой зоне заготовки в процессе осадки. Показатель жесткости схемы напряженного состояния ($\Pi\sigma = 3\sigma_{cp} / \sigma_i$) со знаком «минус» свидетельствует о преобладании сжимающих напряжений в осевой зоне заготовки, что способствует заковке осевых дефектов (рис. 3.6).

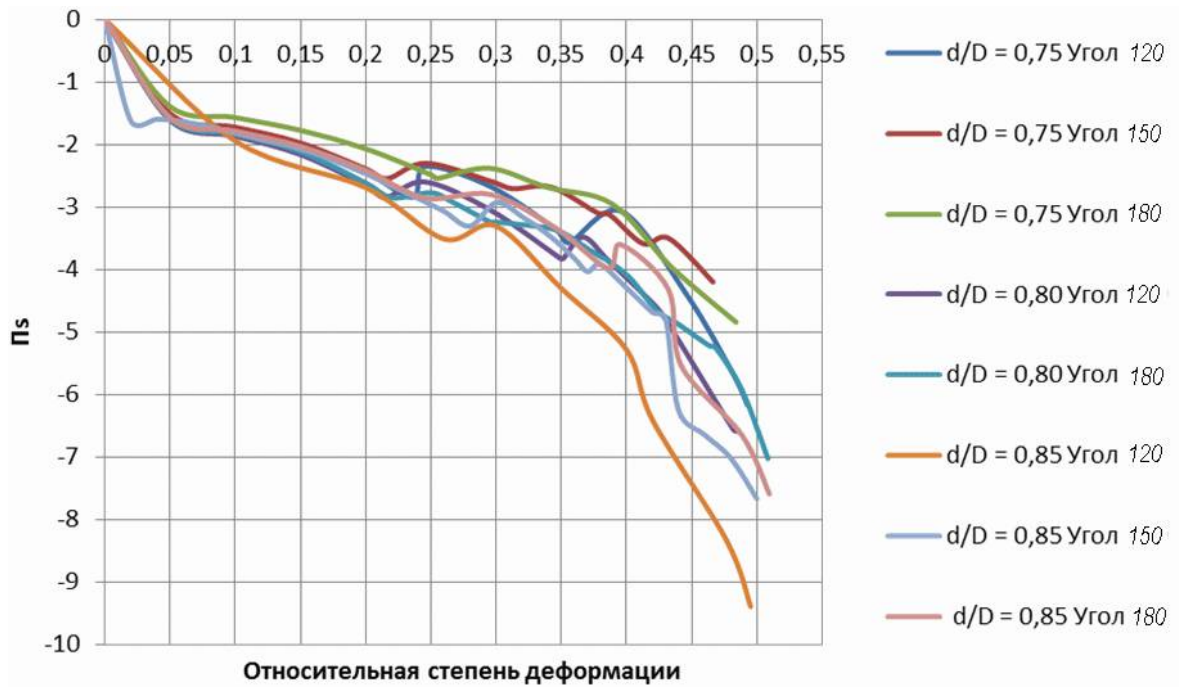


Рисунок 3.6 – Показатель жесткости схемы напряженного состояния в процессе осадки для заготовок с различными параметрами вогнутых граней

Общей закономерностью процесса осадки заготовок с вогнутым поперечным сечением является увеличение уровня сжимающих напряжений в осевой зоне при увеличении степени деформации (см. рис. 3.6). Можно отметить, что заготовка с параметрами $d / D = 0,85$ и $\alpha = 120^\circ$ имеет максимальный уровень сжимающих напряжений ($P\sigma = -9,4$) при степени осадки $\varepsilon = 0,5$. Минимальное значение показателя напряженного состояния $P\sigma = -4,2$ ($d / D = 0,75$, $\alpha = 150^\circ$, $\varepsilon = 0,46$). Напряженное состояние в этом случае приводит к малому закрытию дефекта (см. рис. 3.6). Уменьшение значения $P\sigma$ прямо пропорционально уменьшению угла вогнутых граней от 180° до 120° и уменьшению их глубины d / D от $0,85$ до $0,75$. Усреднив полученные значения, можно сформировать группы по показателю схемы напряженного состояния (табл. 3.6).

Таблица 3.6 – Результаты исследования напряженного состояния

Группа по показателю схемы напряженного состояния	Значения $P\sigma$	Степень деформации ε	Глубина во- гнутых гра- ней d / D	Угол вогнутых граней $\alpha, ^\circ$
Цилиндрический об- разец	-7,9	0,49	-	-
Наименьший показа- тель $P\sigma$	-4,2	0,47	0,75	150
	-4,8	0,48	0,75	180
Среднее значение $P\sigma$	-6,2	0,49	0,75	120
	-6,5	0,50	0,80	180
	-6,6	0,49	0,80	120
	-7,0	0,51	0,80	150
Наибольший показа- тель $P\sigma$	-7,6	0,51	0,85	180
	-7,7	0,50	0,85	150
	-9,4	0,50	0,85	120

Дополнительно для определения рациональной схемы осадки четырёхлучевых заготовок проанализируем значение интенсивности логарифмических деформаций в центральной зоне заготовки (табл. 3.7).

Таблица 3.7 – Упорядоченный по возрастанию показатель интенсивности логарифмических деформаций для исследуемых схем при осадке на 50%

Показатель интенсивности деформаций ϵ_i (по возрастанию)	Высота осажённой заготовки, мм	Высота контрольной точки от нижней плиты	Параметры исследования ($d / D, \alpha$)
1,76675	785	413	$d/D=0,75$ Угол 150
1,76675	785	413	$d/D=0,75$ Угол 180
1,795118	776	408	$d/D=0,80$ Угол 120
1,801954	749	394	$d/D=0,85$ Угол 150
1,823443	755	397	$d/D=0,80$ Угол 180
1,828423	760	400	$d/D=0,75$ Угол 120
1,829176	803	423	$d/D=0,80$ Угол 150
1,857351	780	409	$d/D=0,85$ Угол 120
1,832917	767	403	$d/D=0,85$ Угол 180

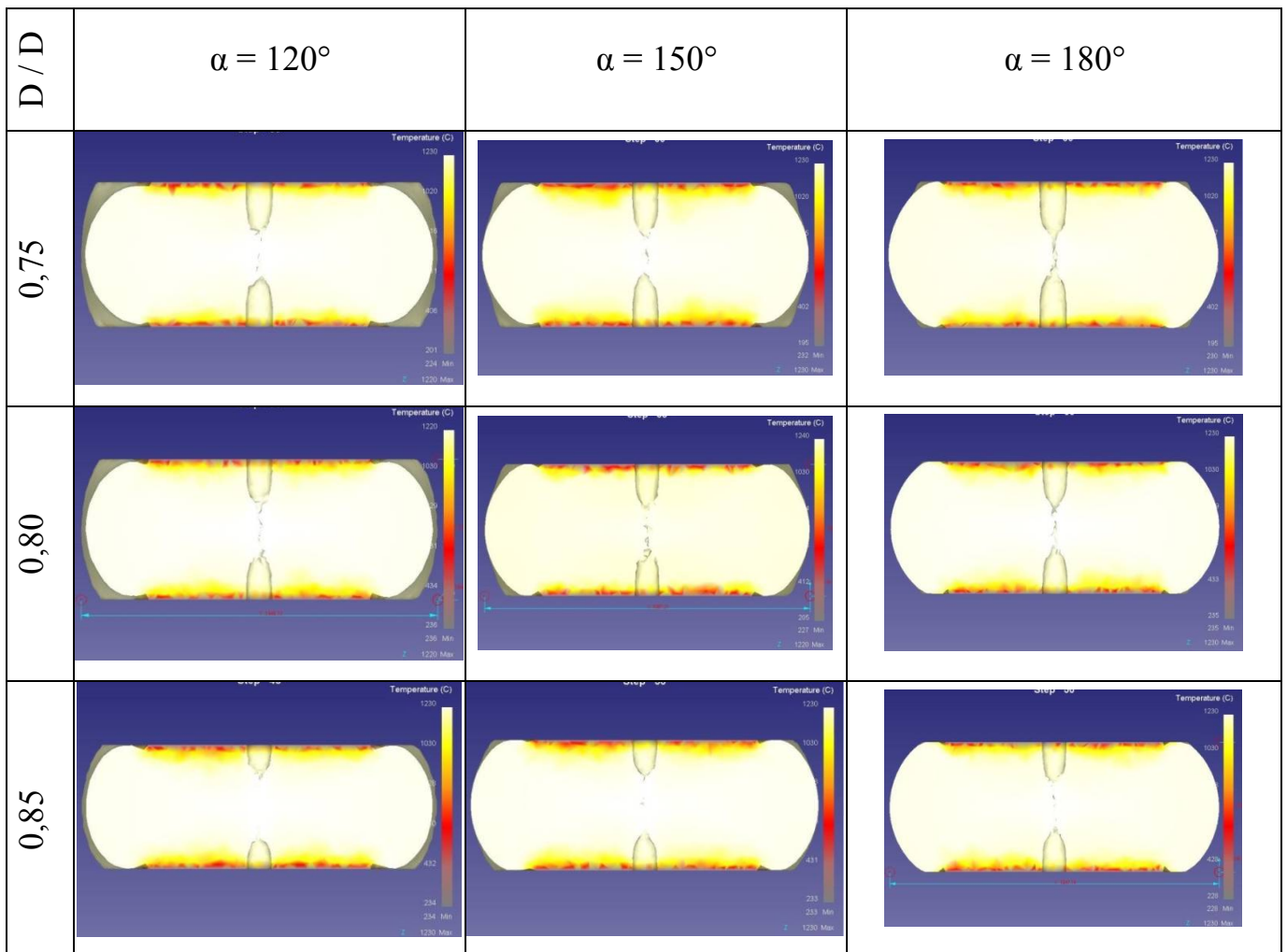
Максимальные значения показателя интенсивности логарифмических деформаций ϵ_i наблюдаются у образцов с $d / D = 0,85$, угол 120 °.

3.2.3 Исследование теплового состояния заготовки в процессе осадки четырёхлучевых заготовок

Разработка нового технологического процессаковки невозможна без исследования теплового состояния заготовки в процессе осадки заготовок специальной формы. Распределение температурных полей в теле заготовки

влияет на силовой и деформационный режим, а также на исчерпание ресурса пластичности материала. Для упрощения исследования достаточно проследить изменение температуры по сечению заготовки. В таблице 3.8 представлен характер распределения температуры заготовки после осадки на 50 % плоскими плитами. Рассматривая схемы осадки заготовок с разными относительными размерами выпуклостей бойков, установили, что температура заготовки в процессе деформирования находится в рамках температурного интервалаковки. Распределение температур в исследуемых схемах одинаково, следовательно, охлаждение заготовки в процессе осадки оказывает одинаковое влияние на НДС и далее не исследуется.

Таблица 3.8 – Распределение температур для схем для схем осадки профилированных заготовок



3.3 Смещение точек осевой зоны слитка и НДС заготовки в процессе профилирования на четырёхлучевое сечение заготовок и их последующей осадки

Проведенные выше исследования позволили установить эффективную геометрию инструмента и режимов обжатия, которые способствуют закрытию осевых дефектов в процессе профилирования и осадки спрофилированных на четырёхлучевое сечение заготовок. Такая схема деформирования реализуется при профилировании выпуклыми бойками с углами в диапазоне $120^\circ \dots 150^\circ$ со степенью обжатия в диапазоне 10 ... 20%. При этом, процессы профилирования и осадки были реализованы по отдельности. Разрабатываемый новый технологический процесс ковки валов предполагает последовательное применение операций профилирования и осадки, что в комплексе окажет влияние на НДС в теле заготовки и заковывание осевого дефекта. В этой связи было проведено исследование для установления комплексного влияния операций профилирования и осадки четырёхлучевой заготовки. Для определения совместного влияния операций профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок были исследованы три угла клина выпуклых бойков 120° , 150° и 180° . Угол клина бойков был скруглен радиусом 600 мм. Ширина выпуклых бойков составляла 1200 мм. Обжатие за проход 5 % от диаметра заготовки. Диаметр биллета составлял 1500 мм, а его длина 2250 мм. Расчетная схема процесса ковки представлена на рисунке 3.7.

После профилирования на четырёхлучевую заготовку и осадки на 50 % были установлены смещения трёх выбранных точек по высоте заготовки (P1, P2, P3) относительно её оси, чтобы оценить степень раскрытия или закрытия осевых дефектов при ковке по новой технологии (рис. 3.8). Исследуемые точки расставлялись от оси заготовки на расстоянии 5 % от радиуса заготовки. Это позволило промоделировать максимальные размеры осевой рыхлости слитка.

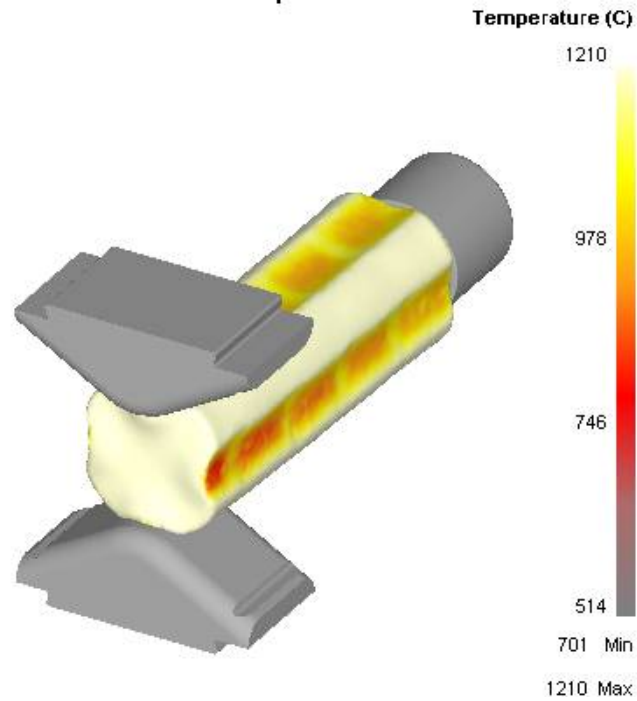


Рисунок 3.7 – Расчетная схема процесса профилирования четырёхлучевых заготовок

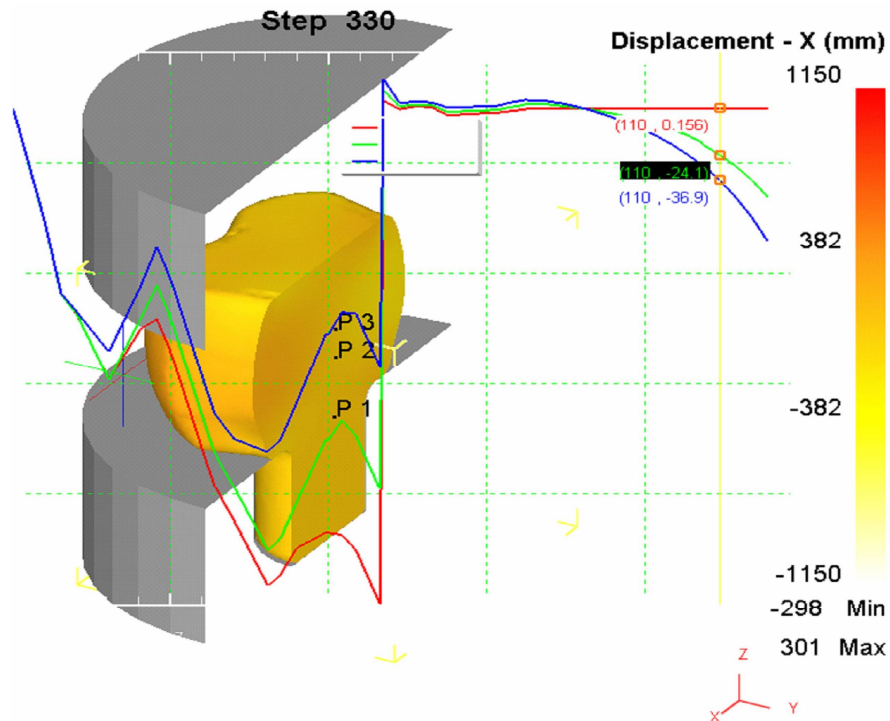


Рисунок 3.8 – Расчетная схема процесса осадки на 50 % четырёхлучевой заготовки с полем распределения перемещения точек по сечению в направлении оси X

После обобщения полученных результатов смещения осевых точек заготовки для различных углов вогнутых граней и степеней обжатий были установлены количественные показатели (рис. 3.9). Для универсальности полученных результатов текущее абсолютное смещение точек было отнесено к их исходному положению (d_1 / d_0). Анализ полученных результатов позволил установить, что минимальное смещение точек от оси заготовки (минимальное раскрытие осевой рыхлости) обеспечивает схема осадки четырёхлучевой заготовки, которая была предварительно спрофилирована бойками с углом 120° на глубину 10 % (рис. 3.9, кривая 3). Максимальное смещение – схема осадки четырёхлучевой заготовки, которая была предварительно спрофилирована плоскими бойками (рис. 3.9, кривая 1).

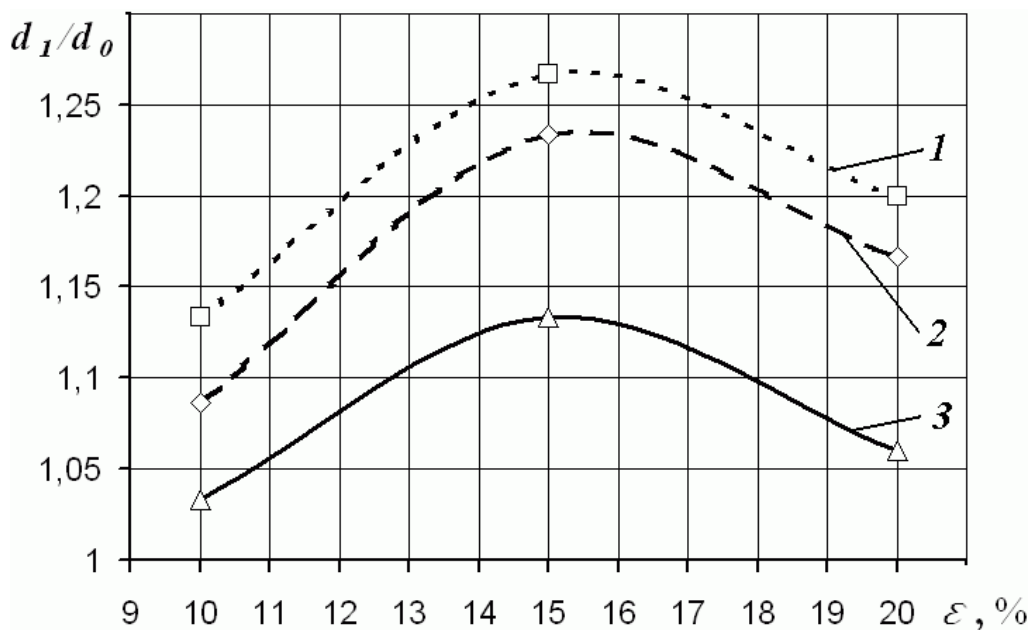


Рисунок 3.9 – Относительное смещение точек осевой зоны слитка в процессе профилирования осадки на 50 % в зависимости от степени обжатия и угла вогнутых граней: 180° (1); 150° (2) и 120° (3), соответственно

Полученные результаты объясняются влиянием на смещение точек осевой зоны подпора от вогнутых граней. Влияние угла бойков на величину смещения точек осевой зоны описывается практически линейной зависимостью (рис. 3.10). Полученные результаты позволили сделать вывод, что

осадка четырёхлучевых заготовок, которые были предварительно получены протяжкой выпуклыми бойками с углом 120° , является эффективной схемой деформирования. При этом степень обжатия должна составлять 10 % (рис. 3.10, кривая 1). Полученные результаты по геометрии инструмента, режимам профилирования и осадки могут служить окончательными рекомендациями при проектировании предлагаемых новых процессовковки поковков валов. Объяснить полученные результаты можно на основании данных показателя схемы напряженного состояния в исследуемых точках для рассматриваемых схем деформирования. Для этого были рассчитаны с применением программы DEFORM 3D средние напряжения (Stress-Mean, рис. 3.11 а) и интенсивность напряжений (Stress-Effective, рис. 3.11 б). Было установлено изменение показателя жесткости схемы напряженного состояния после осадки спрофилированной заготовки в зависимости от различных степеней обжатий при профилировании и углов клина выпуклых бойков (рис. 3.12, 3.13).

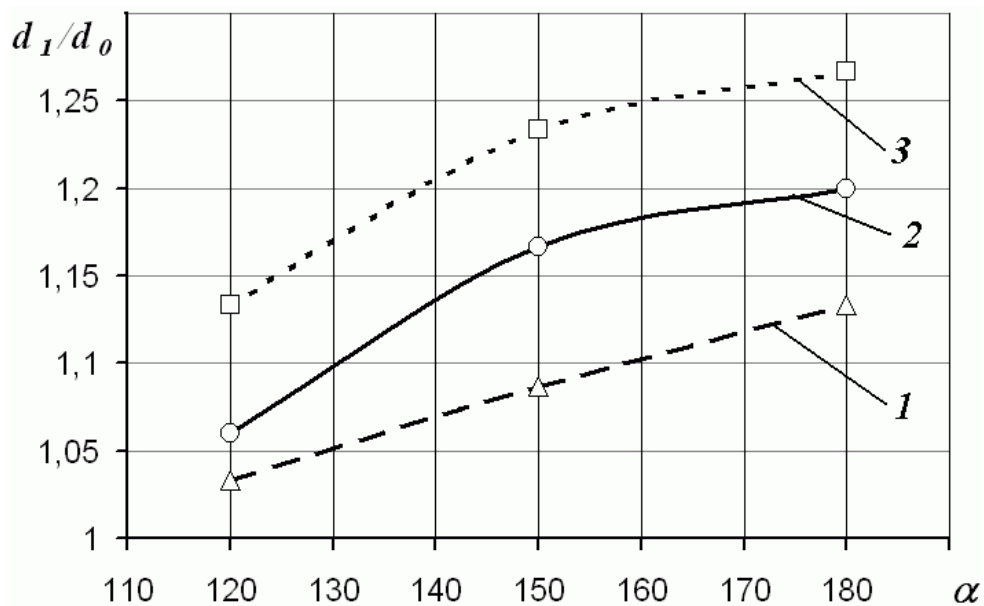
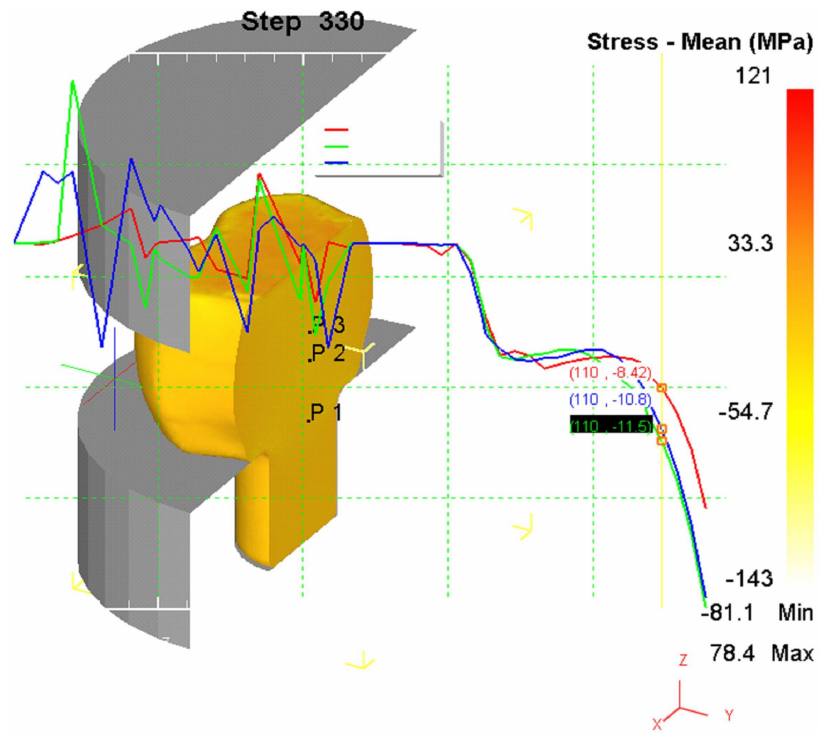
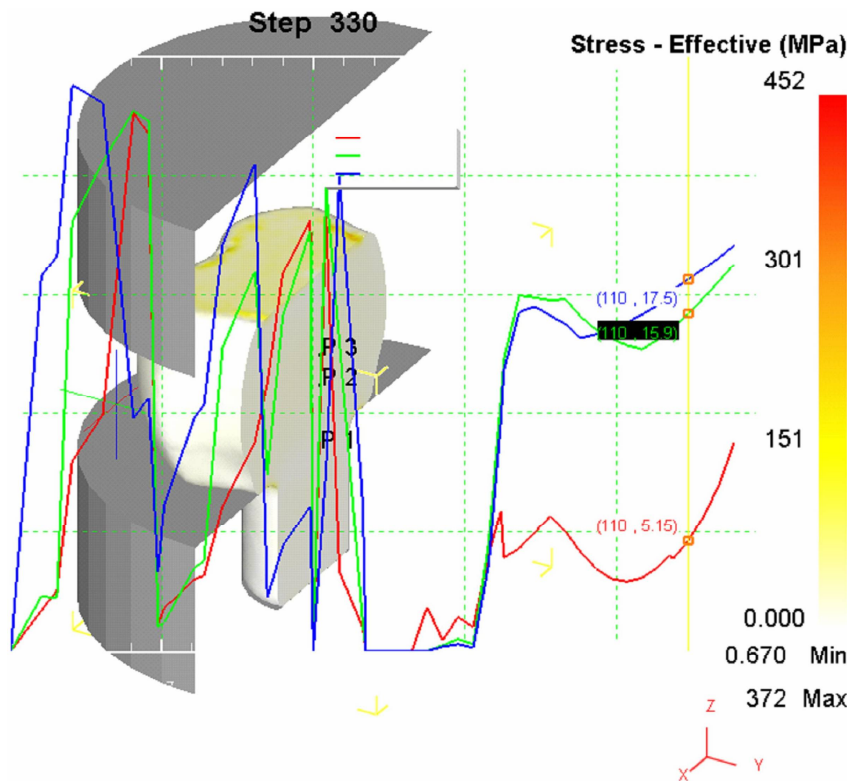


Рисунок 3.10 – Относительное смещение точек осевой зоны слитка в процессе профилирования и осадки на 50 % в зависимости от угла вогнутых граней и степени обжатия: 10 % (1); 15 % (2) и 20 % (3), соответственно



a)



б)

Рисунок 3.11 – Расчетная схема процесса осадки на 50 % четырёхлучевой заготовки с полем распределения средних напряжений (а) и интенсивности напряжений (б)

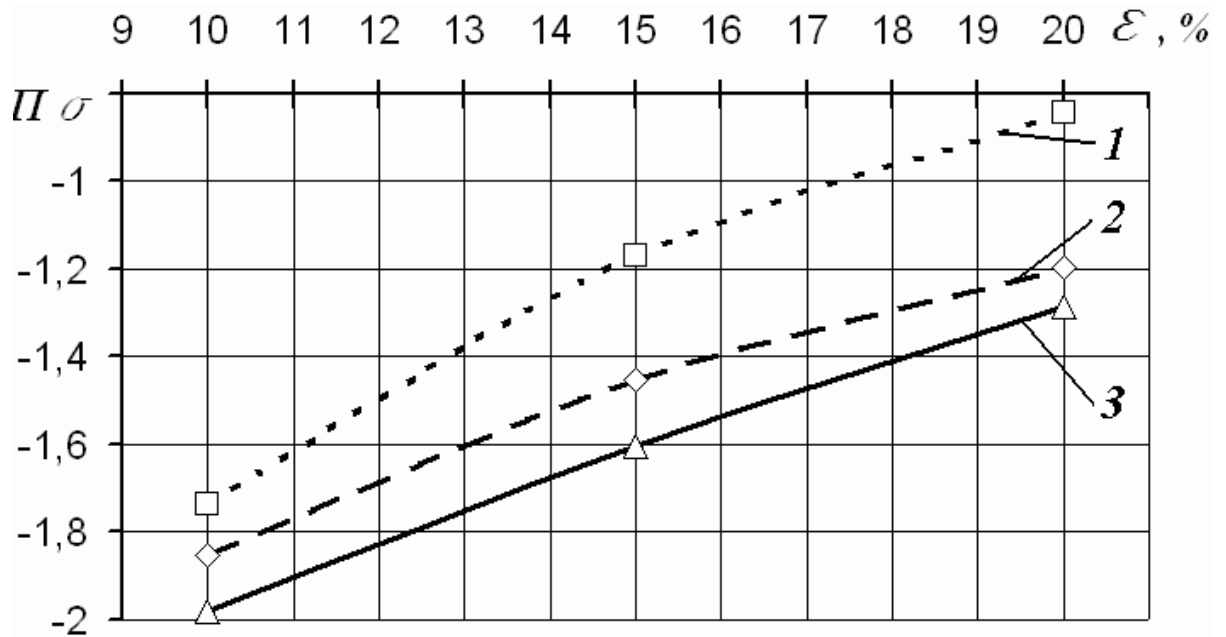


Рисунок 3.12 – Показатель жесткости схемы напряженного состояния осевой зоны в зависимости от степени обжатия и угла вогнутых граней: 180 ° (1); 150 ° (2) и 120 ° (3), соответственно

Анализ полученных результатов позволил установить, что увеличение глубины и угла вогнутых граней практически прямо пропорционально уменьшает показатель жёсткости схемы напряженного состояния в осевой зоне. Высокий уровень сжимающих напряжений обеспечивает осадка четырёхлучевых заготовок с глубиной вогнутых граней 10 % от диаметра исходной заготовки и углом вогнутых граней 120 ° (см. рис. 3.13, кривая 1). Полученные данные подтверждают полученные выше рекомендации по геометрии применяемого инструмента и режимам профилирования.

Важным параметром при выборе эффективного способа осадки является сила деформирования. Осадка является самой энергоёмкой кузнечной операцией, по силе которой выбирают гидравлический пресс. Процесс осадки характеризуется увеличением площади поперечного сечения заготовки и упрочнением материала в процессе деформирования. Это в свою очередь способствует увеличению силы осадки. Предлагаемая схема осадки четырёхлучевых заготовок является новой и не изученной. В этой связи установления

влияния профиля четырёхлучевой заготовки на силовые параметры процесса осадки представляют важную научно-практическую задачу. Для исследуемых профилей четырёхлучевых заготовок были установлены зависимости влияния углов клина бойков и степеней обжатий при профилировании на силу осадки (рис. 3.14, 3.15).

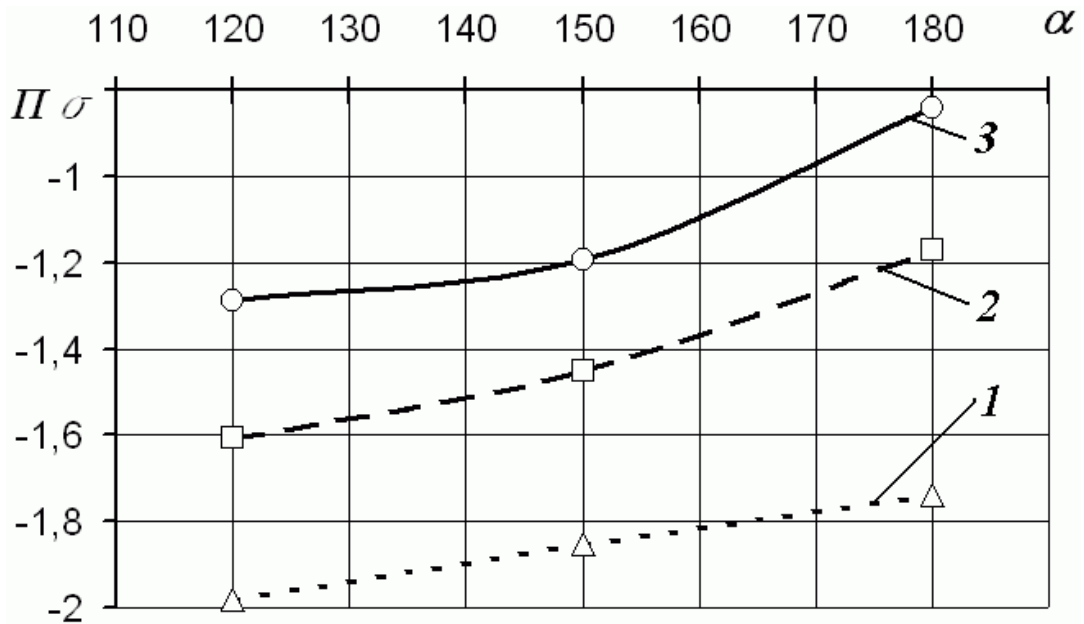


Рисунок 3.13 – Показатель жесткости схемы напряженного состояния осевой зоны в зависимости от угла вогнутых граней и степени обжатия: 10 % (1); 15 % (2) и 20 % (3), соответственно

Анализ полученных результатов позволил установить, что сила деформирования минимальна при осадке заготовок с квадратным поперечным сечением ($\alpha = 180^\circ$), которые получены протяжкой биллета плоскими бойками (рис. 3.14, кривая 1). Формирование вогнутых граней в заготовке повышает силу деформирования (рис. 3.14, кривые 2 и 3). Это объясняется тем, что при осадке заготовок с вогнутыми гранями происходит подпор течению металла в радиальном направлении, что и увеличивает напряженное состояние в осевой зоне заготовки. С увеличением глубины вогнутых граней при профили-

ровании сила осадки снижается, что объясняется уменьшением площади поперечного сечения заготовки при увеличении степени обжатия (рис. 3.14).

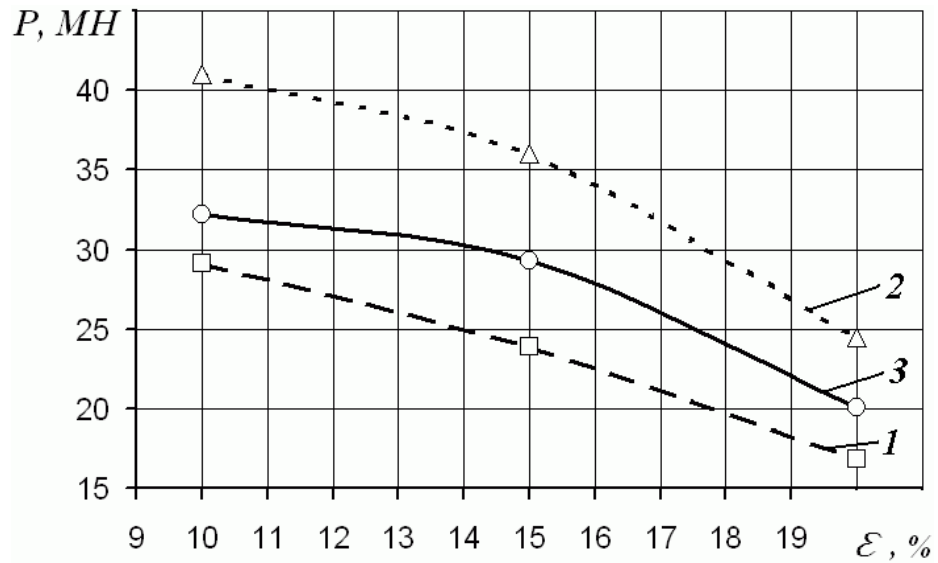


Рисунок 3.14 – Сила осадки ($\varepsilon = 50\%$) четырёхлучевых заготовок в зависимости от обжатия при профилировании и углов вогнутых граней: 180° (1); 150° (2) и 120° (3), соответственно

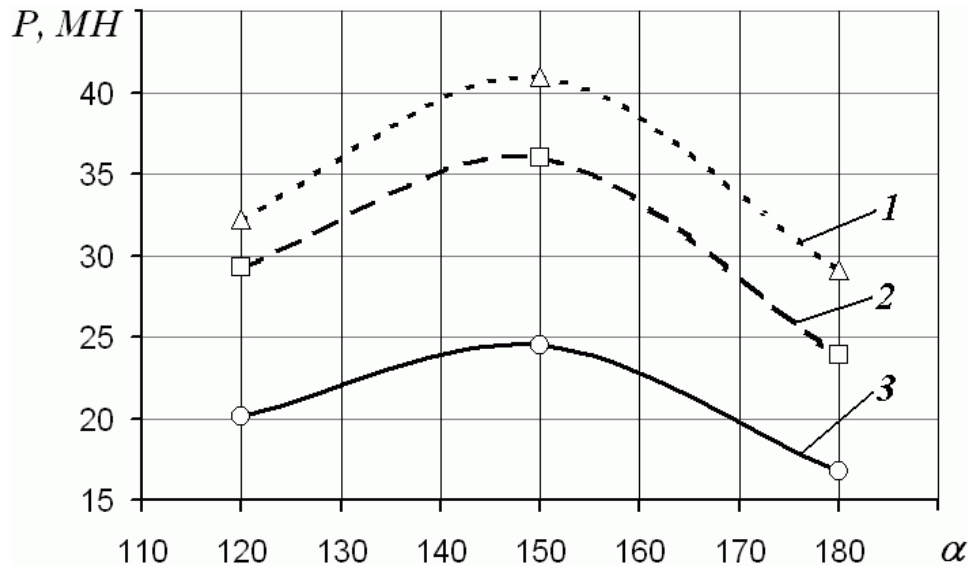


Рисунок 3.15 – Сила осадки ($\varepsilon = 50\%$) четырёхлучевых заготовок в зависимости от угла вогнутых граней и обжатия при профилировании: 10% (1); 15% (2) и 20% (3), соответственно

Увеличение угла вогнутых граней не пропорционально увеличивает силу осадки (см. рис. 3.15). Полученные зависимости имеют максимум при угле вогнутых граней в 150° . Это позволяет исключить из рекомендаций этот угол вогнутых граней.

Выводы по разделу 3

1. Получение профилированной заготовки выпуклыми радиусными бойками характеризуется увеличенной неравномерностью распределения деформаций при увеличении степени обжатия заготовки. Равномерность распределения деформаций увеличивается при протяжке выпуклыми радиусными бойками с диаметром выступа в диапазоне $0,5 \dots 1,0$ диаметра заготовки. Это объясняется увеличением площади контакта заготовки и инструмента. При этом зона пластической деформации составляет 50% площади поперечного сечения. Наибольшая эффективность проработки заготовки выражена при обжатиях слитка на четырехлучевую заготовку, при этом неравномерность распределения деформаций снижается до $\epsilon = 0,15 \dots 0,2$. При протяжке выпуклыми радиусными бойками сила процесса деформирования увеличивается в зависимости от соотношения $D / D_{заг}$, за счет увеличения площади контакта инструмента с заготовкой и обеспечения более жёсткой схемы напряжённого состояния. При профилировании цилиндрической заготовки выпуклыми радиусными бойками на поверхности возникают растягивающие средние напряжения, а в осевой части заготовки – сжимающие.

2. Ковка выпуклыми бойками с углом, равным 120° , исключает образование застойных зон под деформирующим инструментом, что способствует проработке поверхностных и центральных слоёв заготовки. Обратная закономерность характерна дляковки плоскими бойками ($\alpha = 180^\circ$), в этом случае зона пластической деформации сосредотачивается только в центральных сло-

ях заготовки из-за наличия значительных зон затрудненной деформации со стороны действия инструмента. Установлено, что схемы профилирования на четырёхлучевое сечение выпуклыми бойками с клиновым профилем повышают уровень сжимающих напряжений в осевой зоне заготовки, что способствует закрытию осевого дефекта заготовки при обжатии (ϵ) на 20 %. Закрытие дефекта при ковке бойками с углом 180° (плоские) происходит преимущественно за счет смыкания стенок дефекта. Анализ деформированного состояния показал, что ковка плоскими бойками ($\alpha = 180^\circ$) через квадрат характеризуется наличием значительной зоны затрудненной деформации.

3. Было установлено, что на закрытие внутренних дефектов и распределение НДС в процессе осадке заготовок с различной геометрией определяющим параметром является соотношение размеров d/D . Для заготовок, имеющих соотношение $d/D = 0,85$, при осадке плоскими плитами наблюдается интенсивное закрытие осевого дефекта. Чем больше глубина вогнутых граней в заготовке, тем меньше заковывается дефект и меньший уровень сжимающих напряжений в осевой зоне заготовки. При уменьшении угла вогнутых граней повышается уровень сжимающих напряжений в осевой зоне. Определен эффективный профиль заготовки для заковывания осевого дефекта. Осевой дефект в процессе осадки интенсивнее закрывается при углах вогнутых граней $\alpha = 120^\circ \dots 150^\circ$ и их глубине $d/D = 0,8 \dots 0,85$. Эти параметры могут быть рекомендованы как эффективные с точки зрения повышения качества осевой зоны слитка в процессе осадки. Установлено, что закрытие дефектов начинается после осадки профилированных заготовок на 25 %; интенсивность закрытия осевого дефекта для различных профилей заготовок отличается максимум на 10 %. Рекомендуемая степень деформации, при которой будет происходить заковка осевых дефектов составляет не менее 50 %.

4. Минимальное смещение точек от осевой зоны заготовки обеспечивает схема осадки четырёхлучевой заготовки, которая была предварительно спрофилирована бойками с углом 120° на глубину 10%. Максимальное смещение точек от оси заготовки – схема осадки четырёхлучевой заготовки, ко-

торая была предварительно спрофилирована плоскими бойками. Влияние угла бойков на величину смещения точек осевой зоны описывается практически линейной зависимостью. Таким образом, осадка четырёхлучевых заготовок, которые были предварительно получены протяжкой выпуклыми бойками с углом 120° , является эффективной схемой деформирования. При этом степень обжатия при профилировании должна составлять 10%.

5. Увеличение глубины и угла вогнутых граней практически прямо пропорционально уменьшает жёсткость схемы напряженного состояния в осевой зоне. Высокий уровень сжимающих напряжений обеспечивает осадка четырёхлучевых заготовок с глубиной вогнутых граней 10% от диаметра исходной заготовки и углом граней 120° .

6. Сила деформирования минимально при осадке заготовок с квадратным поперечным сечением, которые получены протяжкой биллета плоскими бойками ($\alpha = 180^\circ$). Формирование вогнутых граней в заготовке повышает силу деформирования. Это объясняется тем, что при осадке заготовок с вогнутыми гранями происходит подпор течению металла в радиальном направлении, что и увеличивает напряженное состояние в осевой зоне заготовки. С увеличением глубины вогнутых граней при профилировании сила осадки снижается, что объясняется уменьшением площади поперечного сечения заготовки при увеличении глубины вогнутых граней. Увеличение угла вогнутых граней не пропорционально увеличивает силу осадки. Полученные зависимости имеют максимум при угле вогнутых граней 150° . Это позволяет исключить из рекомендаций этот угол выпуклых бойков.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОФИЛИРОВАНИЯ И ОСАДКИ ЗАГОТОВОК С ЧЕТЫРЁХЛУЧЕВЫМ СЕЧЕНИЕМ

4.1 Экспериментальные исследования процессов профилирования четырёхлучевых заготовок на свинцовых моделях

Как было установлено в работах [171, 172] в процессе осадки цилиндрических заготовок в осевой зоне заготовки возникает НДС, которое приводит к увеличению размеров осевой пористости кузнечной заготовки [173]. Проведенное теоретическое исследование позволило установить, что изменить НДС в процессе осадки возможно за счёт изменения геометрии заготовки, которая может быть получена профилированием слитка (биллета) перед осадкой. Теоретические исследования позволили установить, что осадка профилированных заготовок способствует увеличению степени заковки осевых дефектов заготовок.

Достоверность результатов теоретического исследования необходимо проверить экспериментальными исследованиями. Экспериментальные исследования производились на свинцовых моделях с нанесенной в экваториальном сечении координатной сеткой, а также стальных моделях с искусственным осевым дефектом. Методика проведения исследований была рассмотрена в п. 2.2.

Полученные в 3 разделе результаты позволили установить, что заковка осевых дефектов и накопление деформаций в металле поковки происходит в процессе профилирования заготовки и её последующей осадки. На первом этапе исследований определяем влияние процесса профилирования цилиндрической заготовки выпуклыми бойками на распределение деформаций и закрытие осевых дефектов. Далее необходимо установить влияние профиля четырёхлучевой заготовки на закрытие осевых дефектов

в процессе осадки. По результатам теоретического исследования с использованием МКЭ была установлена эффективная геометрия четырёхлучевых заготовок для осадки, которые были предварительно получены профилированием. Угол вогнутых граней заготовки составлял $120^\circ \dots 150^\circ$, а обжатие – 20 %. Целью экспериментальных исследований являлось проверка полученных теоретических результатов.

В процессе исследования устанавливалось влияние на деформированное состояние заготовки в процессе профилирования следующих параметров – угла выпуклых бойков α , и степени обжатия ε . Для определения деформированного состояния на торце заготовки наносилась квадратная координатная сетка с шагом 3 мм (см. рис. 2.11, а).

4.1.1 Деформированное состояние при профилировании заготовок выпуклыми бойками

Угол 120° и радиус скругления $0,1D$. После поэтапной протяжки цилиндрических заготовок были получены координатные сетки для четырёхлучевых заготовок, представленных на рисунке 4.1.

Полученные деформированные сетки на этапе профилирования заготовки выпуклыми бойками свидетельствуют о повышении равномерности распределения деформаций в центральных и периферийных слоях заготовки (см. рис. 4.1), а именно, искажение ячеек происходит по всему сечению, отсутствуют зоны затрудненных деформаций. Это объясняется появлением активных сил трения при ковке-протяжке выпуклыми бойками, а следовательно, уменьшением размеров непродеформированной зоны под инструментом (как в случае протяжки плоскими бойками).

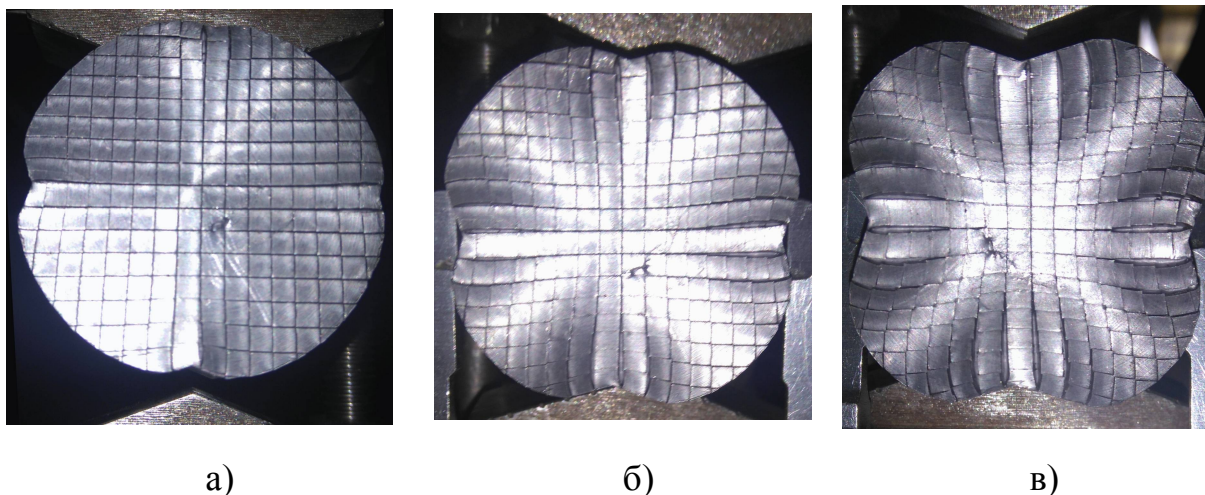


Рисунок 4.1 – Координатные сетки, полученные после обжатия свинцовых заготовок с четырёх сторон на различную степень деформации: а – обжатие 10 %; б – обжатие 15 %; в – обжатие 20 % выпуклыми бойками с углом 120° и с радиусом скругления клина бойков $0,1D$

При ковке плоскими бойками поверхностные зоны заготовки остаются недеформированными, а максимальные деформации возникают только в центральной зоне, что приводит к высокой неравномерности распределения деформаций в объёме заготовки. Таким образом, обжатия для исследуемых схемковки выпуклыми бойками с углом 120° и малыми радиусами скругления выступов бойков способствуют повышению равномерности распределения деформаций, за счёт уменьшения площади застойной зоны при ковке четырёхлучевой заготовки.

С увеличением степени обжатия повышается неравномерность распределения пластических деформаций в теле заготовки – максимальные деформации возникают под острой кромкой бойков. Более того, внедрение в заготовку выпуклых бойков с острой кромкой способствует образованию резкого перехода, что при последующей осадке может приводить к появлению поверхностных зажимов, что подтверждает результаты, полученные в п. 3.2. В этой связи дальнейшие исследования целесообразнее проводить бойками со скругленным клином выпуклого бойка.

Угол 120° и радиус скругления $0,5D$. Как это было установлено в п. 3.1 эффективный радиус скругления кромок выпуклых бойков – $0,5$ радиуса заготовки. Обжатие заготовки на величину 5% не приводит к получению четырёхлучевой заготовки с явно выраженными вогнутыми гранями, поэтому в исследованиях степень обжатия заготовки выпуклыми бойками составляла 10% и 20% . Увеличение радиуса скругления выпуклых бойков исключает перерезание поверхностных слоев заготовки и повышает равномерность распределения деформаций (рис. 4.2). Обжатие 20% способствует проникновению зоны пластических деформаций до центральных слоёв заготовки (рис. 4.2, б).

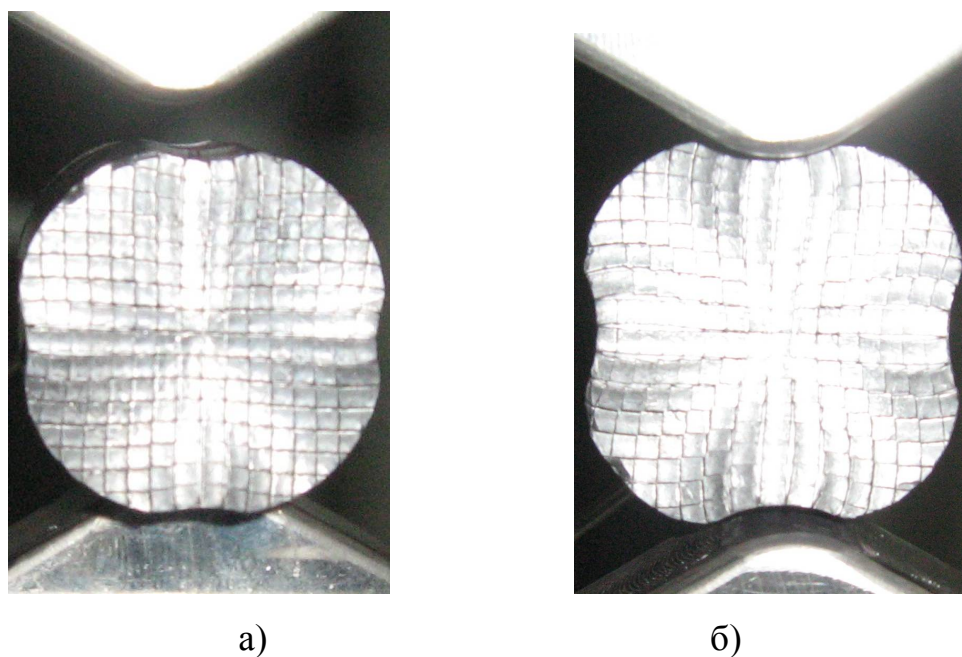


Рисунок 4.2 – Координатные сетки, полученные после обжатия свинцовых заготовок с четырёх сторон на 10% (а) и 20% (б) выпуклыми бойками с углом 120° и с радиусом скругления клина бойков $0,5D$

Угол 150° и радиус скругления $0,5D$. Увеличение угла клина выпуклых бойков не повышает равномерность распределения деформаций по сечению заготовки (рис. 4.3).

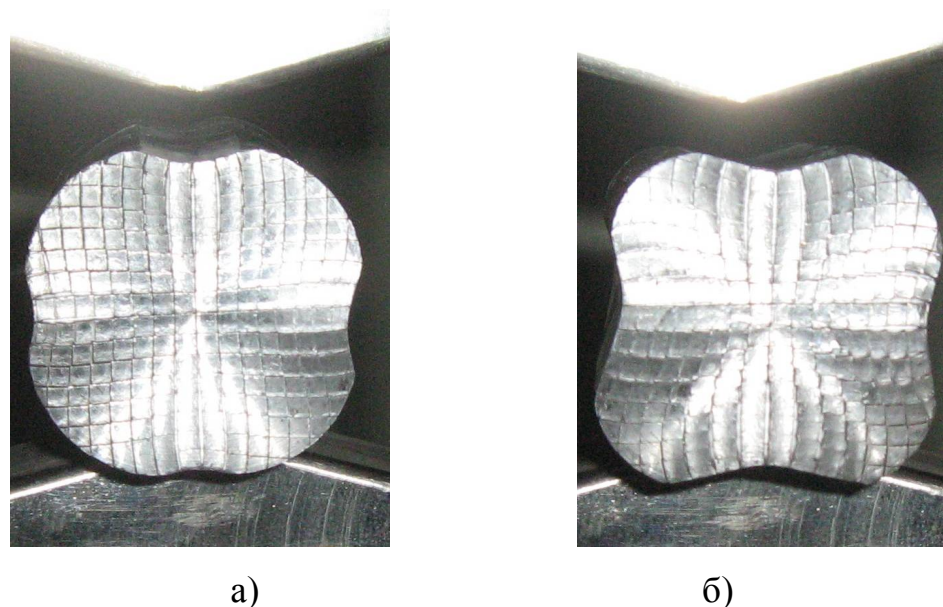


Рисунок 4.3 – Координатные сетки, полученные после обжатия свинцовых заготовок с четырёх сторон на 10 % (а) и 20 % (б) выпуклыми бойками с углом 150° и с радиусом скругления клина бойков $0,5D$

Это объясняется уменьшением длины дуги скругления, а соответственно, выпуклые бойки получаются с более острой кромкой, по сравнению с предыдущими параметрами, что повышает накопление деформаций под выпуклой кромкой бойка, особенно при обжатии 20 % (рис. 4.3, б). Таким образом, эффективная геометрия выпуклых бойков – угол 120° и радиус скругления $0,5D$.

4.1.2 Распределение деформаций при профилировании выпуклыми бойками с углом 120°

Проведенные выше исследования позволили установить, что эффективный угол выпуклых бойков, с точки зрения равномерного распределения деформаций и закрытия осевых дефектов, составляет 120° . Данное утверждение позволяет дать конкретную рекомендацию по эффективному углу

бойков для проектирования рациональной геометрии инструмента. Поэтому исследовалось деформированное состояние заготовки при её профилировании на четырехлучевое сечение бойками с углом 120° . При этом было принято решение уменьшить дробность проходов (5 % за проход) и увеличить суммарное обжатие до 35 % с целью получения более подробной информации о распределении деформаций в теле заготовки. Методика проведения исследований аналогична использованной ранее (см. п. 2.2). После каждого прохода фиксировались геометрические параметры заготовок и силовые характеристики процесса протяжки выпуклыми бойками. Геометрические параметры заготовок представлены в таблице 4.1 (см. рис. 2.11, а).

Таблица 4.1 – Режимы протяжки и геометрические параметры сечения заготовок (протяжка цилиндрической заготовки выпуклыми бойками – исходный диаметр 60 мм; исходная длина – 70,8 мм)

Проход	Обжатие за проход, мм	a, мм	c, мм	h, мм	L _{min} , мм	L _{max} , мм
1	2,5		60,7	58,3	71	74
2	2,5	58,77	61,26	56,14	70	77
3	2,5	58,65	61,04	52,6	71	82
4	2,5	57,68	62,95	51,03	72	87
5	2,5	56,48	64,5	47,94	74	89,54
6	2,5	55,3	64,99	45,85	76,5	94,32
7	2,5	53,48	66,41	43,22	80,4	103,35
8	2,5	52,8	67,46	40,46	86,4	111
9	2,5	50,6	66,93	38,35	92,5	119
10	2,5	45,8	66,07	36,16	102,8	130,6
11	2,5	48,8	56,6	35,8	102,8	130,7
12	2,5	49,2	53,33	35,8	102,8	130,7
13	2,5	47,5	50,99	36,34		132

Формы деформированных сеток на торцевых поверхностях представлены на рисунке 4.4. Поэтапное изменение координатной сетки в процессе деформирования со степенями обжатия за проход 5 % от диаметра заготовки, по предложенной схеме, позволяет проследить деформационную проработку объема заготовки.

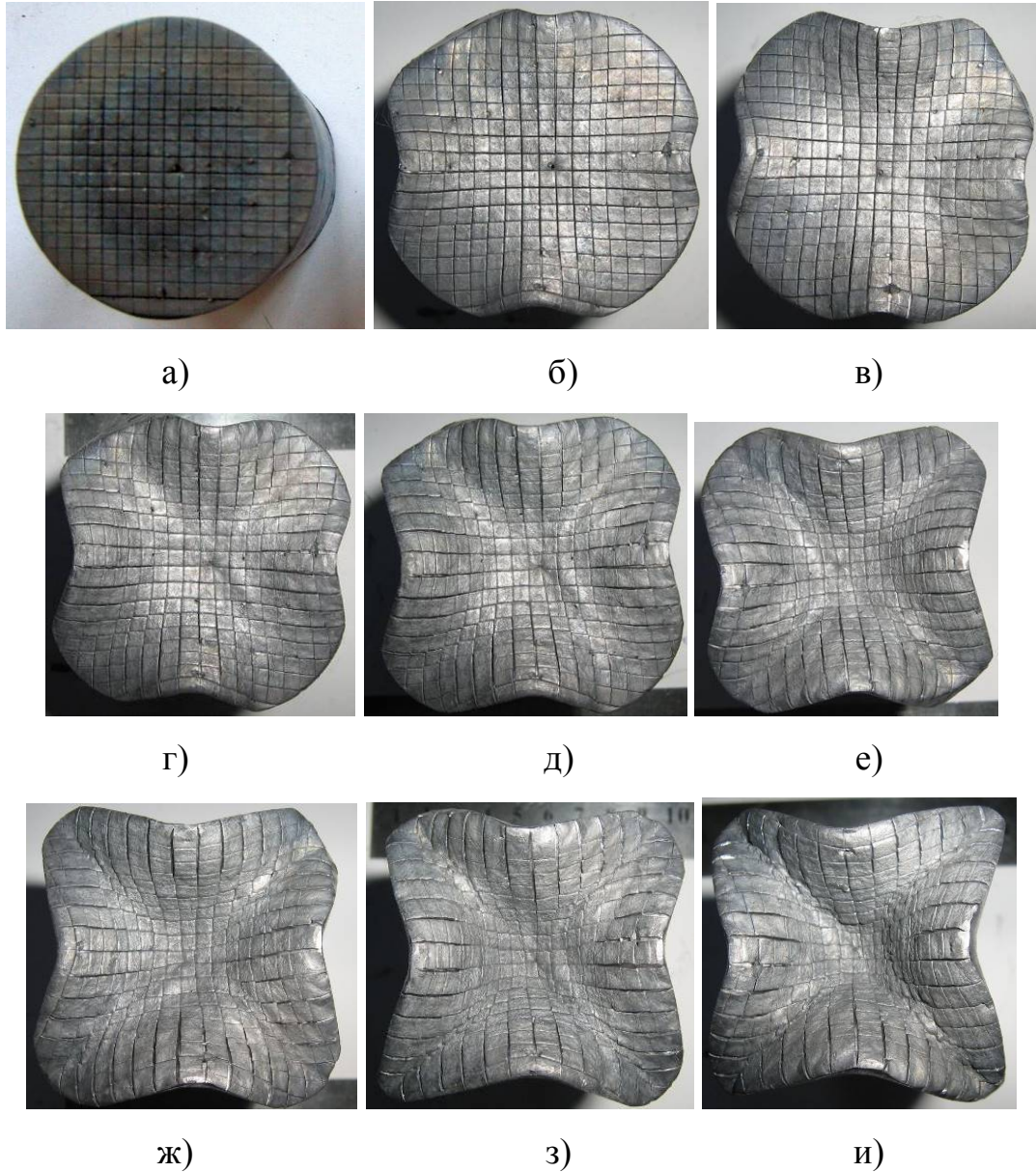


Рисунок 4.4 – Поэтапное изменение координатной сетки в процессе профилирования выпуклыми бойками с углом 120°

(а – перед профилированием; б – после 1-го прохода; в – после 2-го прохода; г – после 3-го прохода; д – после 4-го прохода; е – после 5-го прохода; ж – после 6-го прохода; з – после 7-го прохода; и – после 8-го прохода)

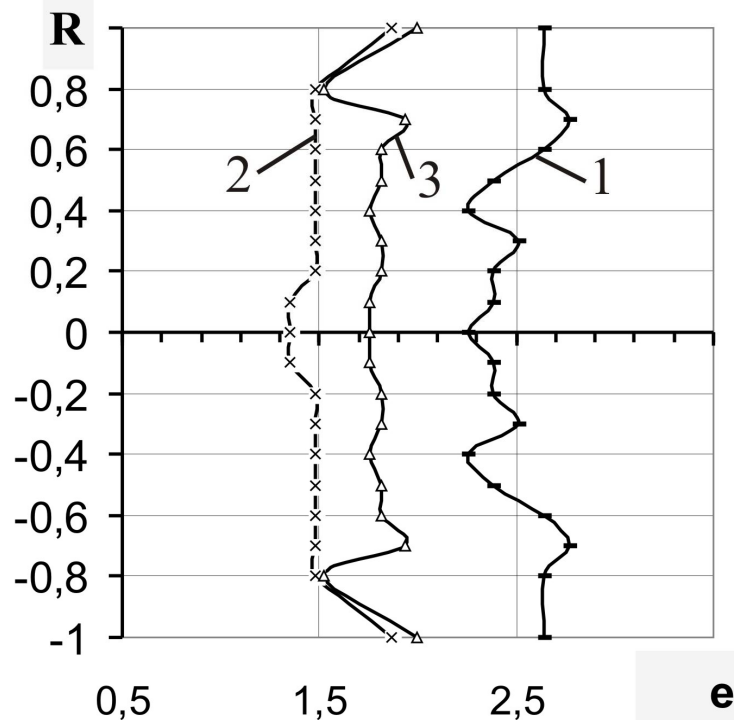
После профилирования операциями ковки цилиндрической заготовки происходит искажение координатной сетки по всему сечению заготовки, что объясняется уменьшением размеров зон затрудненной деформации под выпуклыми бойками (см. рис. 4.4, б). Преимущественную проработку претерпевают объемы заготовки, которые располагаются под выпуклым инструментом.

Протяжка выпуклыми бойками усиливает обозначенный эффект с постепенным проникновением деформаций к осевой зоне заготовки (см. рис. 4.4, в – и). В результате происходит равномерное распределение деформаций высокого уровня в сечении заготовки, о чём свидетельствует сильное искажение координатной сетки по всему сечению заготовки уже после 8-го прохода (см. рис. 4.4, и). О закономерностях распределения деформаций в процессе протяжки выпуклыми бойками можно судить по искажению координатной сетки (см. рис. 4.4). На первом проходе деформации локализируются под выпуклыми кромками бойков (в периферийных слоях заготовки). По мере увеличения степени обжатия заготовки (2-й и последующие проходы) деформации постепенно проникают в средние слои заготовки.

Это объясняется увеличением площади контакта заготовки с инструментом и более глубокому проникновению зоны пластической деформации к центру. После 4-го прохода максимальное искажение координатной сетки наблюдается в центре заготовки (см. рис. 4.4, е). При этом происходит искажение координатной сетки в местах контакта инструмента с заготовкой (в местах формирования вогнутого профиля).

После обмера координат узлов деформированной сетки была рассчитана интенсивность распределения логарифмических деформаций по высоте заготовки в месте прожима выпуклыми бойками (рис. 4.5). Полученные результаты позволяют количественно оценить распределение деформаций в теле заготовки после ковки выпуклыми бойками. Количественная оценка распределения деформаций по сечению заготовки (см. рис. 4.5) позволила установить, что для рассматриваемых значений обжатий неравномерность рас-

пределения деформаций по сечению примерно одинакова и составляет $\Delta e \approx 0,6$ (см. рис. 4.5).



1 – обжатие 20 %; 2 – обжатие 10 %; 3 – обжатие 15 %

Рисунок 4.5 – Распределение интенсивности деформаций по высоте заготовки

Уровень накопленных деформаций по сечению составляет $\approx 2,5$ единиц, что свидетельствует о высокой проработке внутренней структуры. После обжатия заготовки на 10 % уровень деформаций в осевой зоне ниже ($e = 1,3$), чем в поверхностной ($e = 1,9$) (см. рис. 4.5; эпюра 2). Неравномерность распределения деформаций составляет $\Delta e = 0,6$, а для обжатия 20 % – $\Delta e = 0,4$. Для этого обжатия в осевой зоне уровень деформаций меньше, чем в периферийной на расстоянии $0,5 \dots 0,8$ радиуса заготовки. Уровень накопленных деформаций в поверхностных слоях и осевых составляет $\approx 2,6 \dots 2,7$ (см. рис. 4.5; эпюра 1). Анализ проведенных исследований подтверждает результаты теоретических исследований, а именно, эффективной геометрией выпуклых бойков для равномерного распределения деформаций при профилировании на четырёхлучевую заготовку является угол в 120° .

4.1.3 Закрытие осевых дефектов при профилировании выпуклыми бойками

Деформированное состояние по изменению координатной сетки не является достаточным для определения влияния схемы ковки на закрытие осевых дефектов.

На закрытие осевых дефектов также значительное влияние оказывает напряженное состояние в теле заготовки при профилировании. Оценить напряженное состояние внутри свинцовой заготовки экспериментальными методами сложно. Более того, в этом случае будет установлена опосредованная оценка влияния схемы профилирования на закрытие внутренних дефектов через напряженное состояние. В этой связи целесообразнее исследовать изменение размеров искусственных осевых дефектов в процессе профилирования четырёхлучевой заготовки. Для этого в заготовке было просверлено отверстие диаметром 5,0 мм, которое моделировало осевой дефект заготовки (см. рис. 2.11, б). Профилирование производилось выпуклыми бойками с углами 120° , 150° и 180° с различными степенями обжатия (10 %, 15 % и 20 %).

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволили установить, что профилирование на четырёхлучевое сечение выпуклыми бойками с углом 120° и степенью обжатия 20 % способствует закрытию осевых искусственных дефектов на 80 % (рис. 4.6). Это объясняется повышением уровня сжимающих напряжений при увеличении обжатия заготовки и подпором вогнутых граней в поперечном направлении.

Количественная оценка степени закрытия осевого дефекта при профилировании бойками с различными углами для степеней обжатия равных 10 %, 15 % и 20 % представлена на рисунке 4.7.

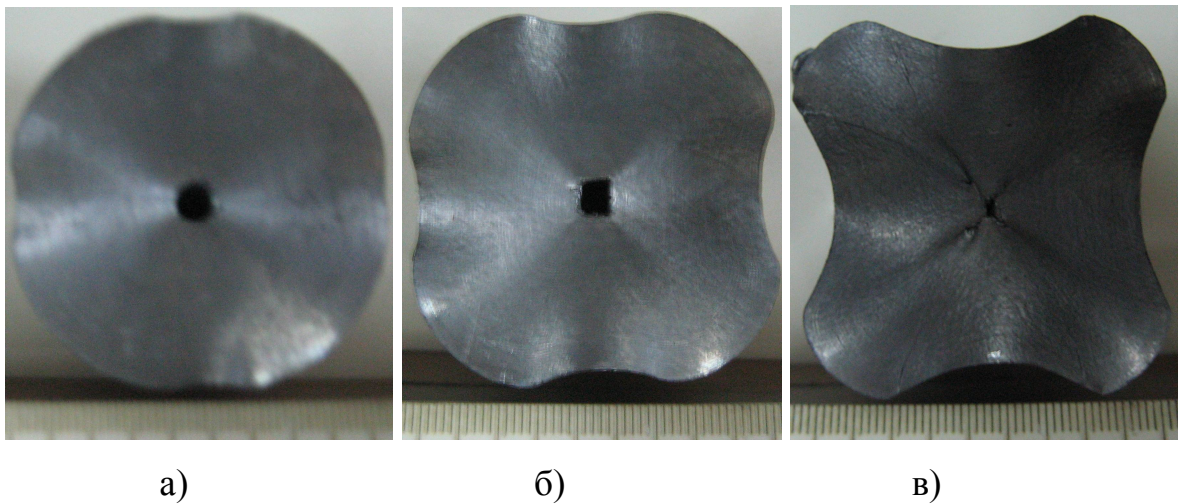


Рисунок 4.6 – Изменение размеров осевого дефекта после профилирования с четырёх сторон на различную степень деформации: а – обжатие 10 %; б – обжатие 15 %; в – обжатие 20 % выпуклыми бойками с углом 120°

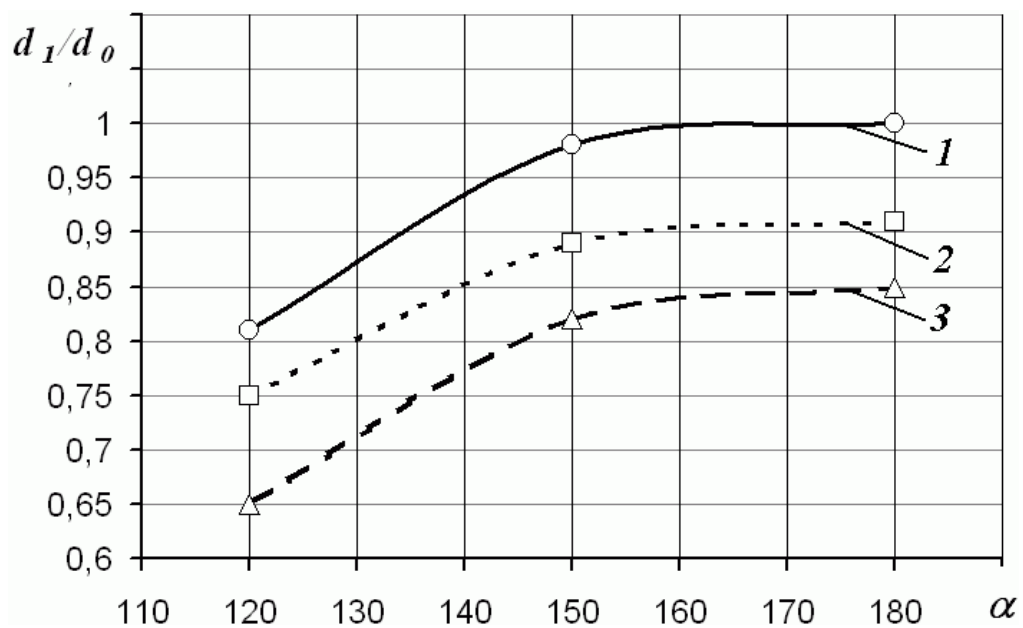


Рисунок 4.7 – Относительный диаметр дефекта после профилирования на четырёхлучевое сечение бойками с различными углами и степенью обжатия: 1 – обжатие 10 %; 2 – обжатие 15 %; 3 – обжатие 20 %

При профилировании цилиндрической заготовки выпуклыми бойками с различными углами и степенью обжатия 10 % не происходит полного закрытия дефекта (см. рис. 4.7, кривая 1). Степень обжатия 20 % при угле 120°

обеспечивает максимально возможное закрытие дефекта для рассматриваемых схем профилирования (см. рис. 4.7, кривая 3). Это объясняется увеличением уровня сжимающих напряжений при формировании глубоких вогнутых граней со скругленными углами. Таким образом, можно сделать вывод, что чем больше степень обжатия заготовки при профилировании, тем с большей интенсивностью закрывается осевой дефект. В этой связи, угол в 120° является эффективным при профилировании на четырёхлучевое сечение для заковки осевых дефектов литых заготовок. Полученные результаты по закрытию осевых дефектов при профилировании соответствуют теоретическим данным (см. табл. 3.2).

4.1.4 Силовые параметры при профилировании выпуклыми бойками

При увеличении угла выпуклости бойка и степени деформации возрастает сила протяжки при профилировании на четырёхлучевое сечение. Это объясняется увеличением площади контакта заготовки с инструментом при увеличении степени обжатия (ϵ) цилиндрической заготовки выпуклыми бойками. Для угла в 120° происходит снижение интенсивности роста силы профилирования выпуклыми бойками (рис. 4.8). Это объясняется протяжкой более острым инструментом из рассматриваемых схем профилирования. В этом случае металл заготовки переходит на наклонные стенки выпуклых бойков, что снижает силы трения (вертикальная составляющая сил трения совпадает с приложением силы деформирования), возникают так называемые активные силы трения. Увеличение угла выпуклых бойков, вплоть до плоских (угол 180°), способствует значительному увеличению силы профилирования с увеличением степени обжатия. Это объясняется увеличением площади контакта заготовки с инструментом.

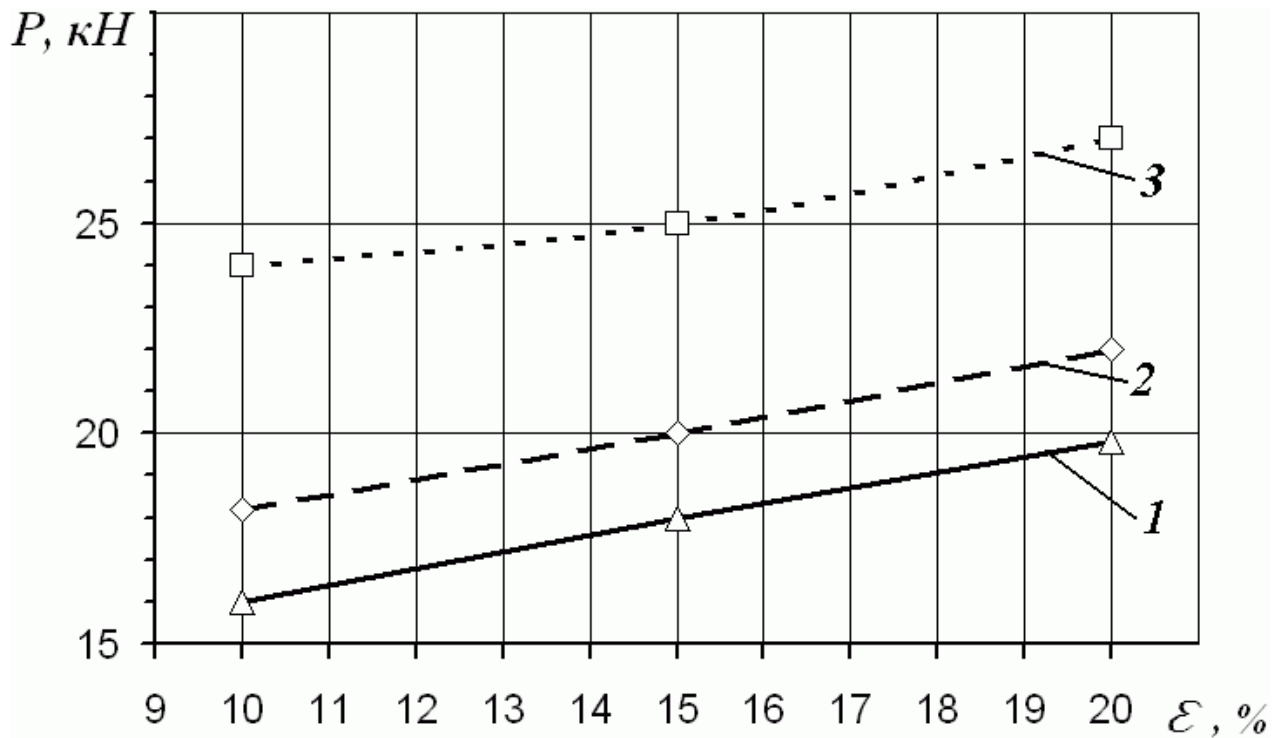


Рисунок 4.8 – Сила деформирования при профилировании заготовки на четырёхлучевое сечение при различных степени обжатия и углах бойков: 120 ° (1); 150 ° (2) и 180 ° (3)

4.2 Экспериментальные исследования закрытия осевых дефектов в процессе профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок на свинцовых моделях

С целью уменьшения количества экспериментальных исследований предварительно были по отдельности промоделированы процессы протяжки заготовок выпуклыми бойками с различными углами клина и степенями обжатия при профилировании и осадки заготовок с такими же параметрами. Полученные результаты необходимо проверить, совместив в комплексе операции профилирования и осадки.

Предварительное профилирование цилиндрической заготовки на четырёхлучевое сечение производилось для изменения НДС заготовки в процессе осадки с целью повышения уровня сжимающих напряжений и заковки осевых дефектов. При этом профилирование заготовки на четырёхлучевое сечение дополнительно будет способствовать закрытию осевых дефектов (см. п. 4.1.3). Методика проведения исследований механизма заковки осевого дефекта в процессе осадки представлена в п. 2.2. Заготовка после осадки с подсоединенным гибким шлангом для фиксирования вытеснения жидкости представлена на рисунке 4.9.



Рисунок 4.9 – Исследование закрытия осевого дефекта в процессе профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок

Результаты исследования степени закрытия осевых дефектов в процессе осадки свинцовых заготовок цилиндрической формы и с различным четырёхлучевым сечением (углами вогнутых граней), представлены на рисунке 4.10. Анализ полученных результатов позволил установить, что при осадке цилиндрической заготовки диаметр искусственного осевого дефекта вплоть до осадки на 30 % увеличивается на 5 % (см. рис. 4.10, кривая 1).

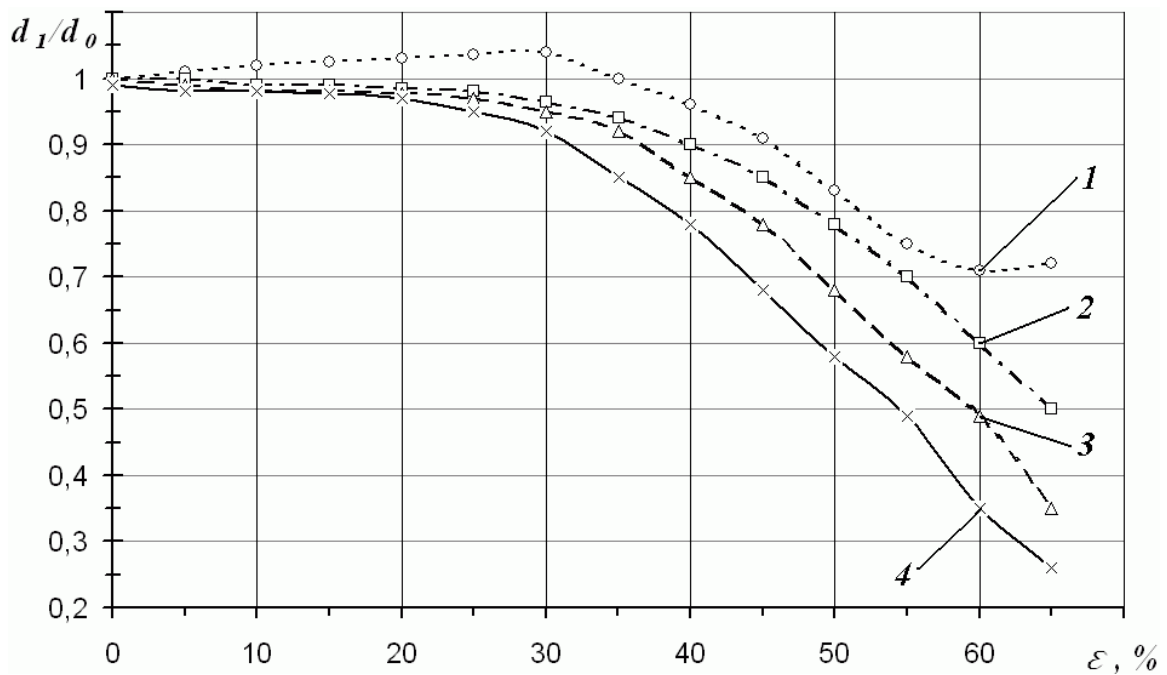


Рисунок 4.10 – Изменение размеров осевого дефекта в процессе осадки цилиндрической заготовки (1) и профилированных на четырёхлучевое сечение заготовок с углами вогнутых граней 150° , 140° и 120° (кривые 2, 3 и 4, соответственно)

Дальнейшая осадка на 60 % способствует уменьшению размеров осевого дефекта на 25 ... 30 %. Полученные результаты подтверждают низкую эффективность процесса осадки цилиндрических заготовок с точки зрения заковывания осевых дефектов.

Профилирование заготовки на четырёхлучевое сечение выпуклыми бойками с углом 150° с обжатием 20 % увеличивает степень заковки осевого дефекта, по сравнению с осадкой цилиндрических заготовок (см. рис. 4.10, кривая 2).

Уменьшение угла клина выпуклых бойков (до 140° и 120°) способствует увеличению степени заковывания осевого дефекта в процессе осадки (см. рис. 4.10, кривые 3 и 4, соответственно). Осадка четырёхлучевых заготовок плоскими плитами более чем на 50 % способствует интенсивному закрытию осевого дефекта при угле вогнутых граней 120° (см. рис. 4.10, кри-

вая 4). Это объясняется повышением уровня сжимающих напряжений в центральной зоне заготовки при уменьшении угла вогнутых граней, как это было установлено в теоретическом исследовании (см. рис. 3.6).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что интенсивное закрытие осевого дефекта в процессе осадки четырёхлучевой заготовки происходит при деформации ε более 25 % (см. рис. 4.10, кривая 4), что совпадает с данными, полученными ранее в теоретическом исследовании (см. рис. 3.4). После осадки на 60 % средний диаметр дефекта уменьшается на 65 % (см. рис. 4.10, кривая 4).

Сопоставление механизмов закрытия осевого дефекта в процессе осадки цилиндрических и четырёхлучевых заготовок позволяет сделать вывод об эффективности предлагаемого нового способа осадки. В случае осадки четырёхлучевых заготовок интенсивность заковки осевого дефекта выше. Эффективный угол вогнутых граней заготовки – 120° , глубина вогнутых граней – 20 %.

4.3 Экспериментальные исследования закрытия осевых дефектов в процессе профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок на стальных моделях

Полученные результаты по формоизменению и закрытию осевых дефектов на свинцовых моделях проверялись исследованиями на стальных образцах (сталь 34ХНМ и 70ХЗГНМФ). Исследованию подвергались образцы с различным соотношением $H/D = 1,5; 2,0; 2,5$ для оценки влияния относительной высоты заготовки на степень закрытия осевого дефекта при ковке по новой технологии стальных образцов. Методика проведения исследований рассмотрена в п. 2.2. После нагрева заготовок до температуры 1200° производилось их профилирование выпуклыми бойками (рис. 4.11, а) с углом

120 °, 150 ° и 180 ° (плоские бойки) с суммарным обжатием за два прохода, равным 20 %. Стальная заготовка после профилирования представлена на рисунке 4.12. После профилирования производилась их осадка на 50 % (см. рис. 4.11, б). Выбранная степень деформации при осадке наиболее распространённая при производстве крупных поковок. Послековки и охлаждения (рис. 4.13) производилась разрезка заготовок для замеров осевого дефекта (рис. 4.14).

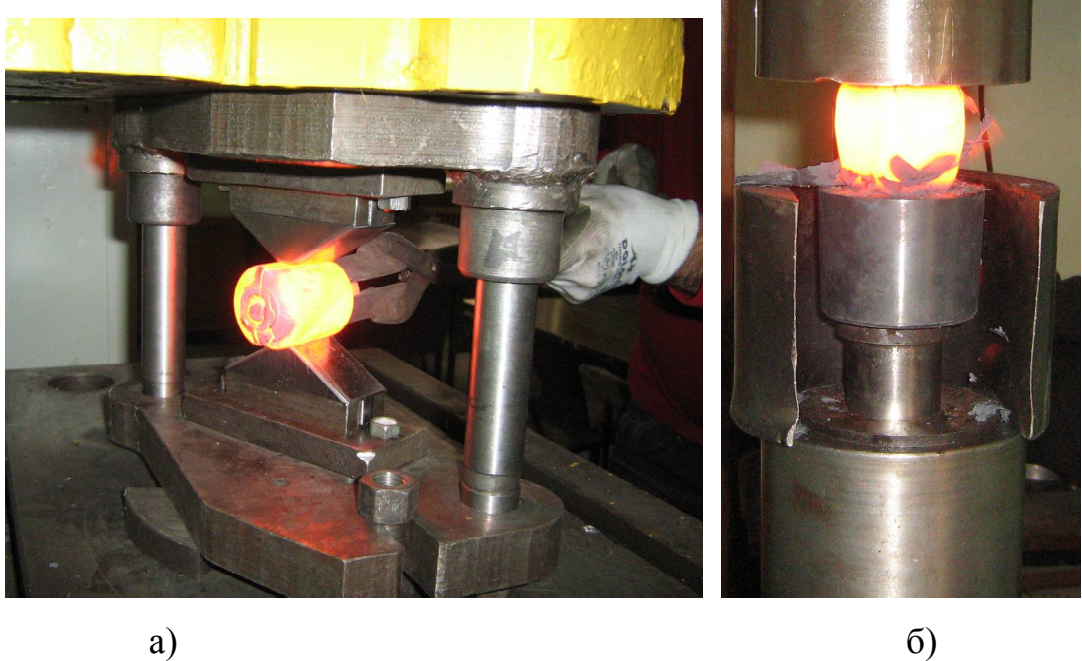


Рисунок 4.11 – Процесс профилирования стальных заготовок на четырёхлучевое сечение (а) и их последующая осадка на 50 % (б)



Рисунок 4.12 – Стальная модель после профилирования



Рисунок 4.13 – Заготовки с соотношением $H/D = 1,5; 2,0; 2,5$ после профилирования бойками с углом 120° и их последующей осадки



Рисунок 4.14 – Заготовки с четвертным вырезом до осевой зоны

После шлифовки и полировки плоскостей среза проводилось исследование следов осевого дефекта после осадки. Осадка профилированных заготовок с $H/D = 1,5; 2,0; 2,5$ выпуклыми бойками с углом 120° со степенью обжатия 20 % на две стороны позволила установить степень заковки осевого отверстия (рис. 4.15). В результате исследований было установлено, что угол вогнутых граней 120° в процессе осадки заготовок с $H/D = 1,5$ и $2,0$ обеспечивает полную заковку осевых дефектов (см. рис. 4.15, а и б).

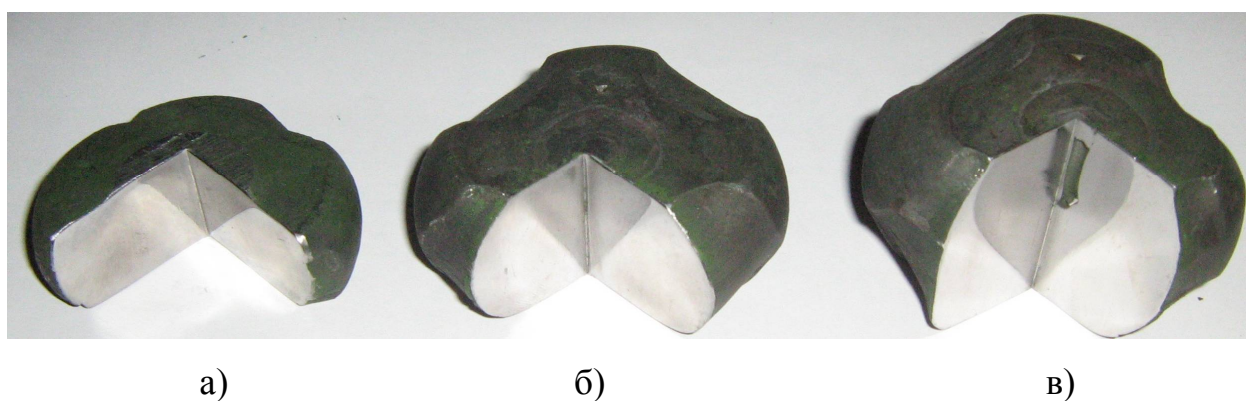


Рисунок 4.15 – Форма осевого дефекта после осадки на 50 % профилированных заготовок с H/D : 1,5 (а); 2,0 (б); 2,5 (в) выпуклыми бойками с углом 120° и обжатию при профилировании 20 %

Увеличение угла выпуклых бойков до 150° снижает степень заковки осевых дефектов для различных соотношений высот заготовок (рис. 4.16). Полученные результаты объясняются снижением уровня растягивающих напряжений при увеличении угла выпуклых бойков, что подтверждает результаты теоретических исследований и результатов моделирования на свинце.

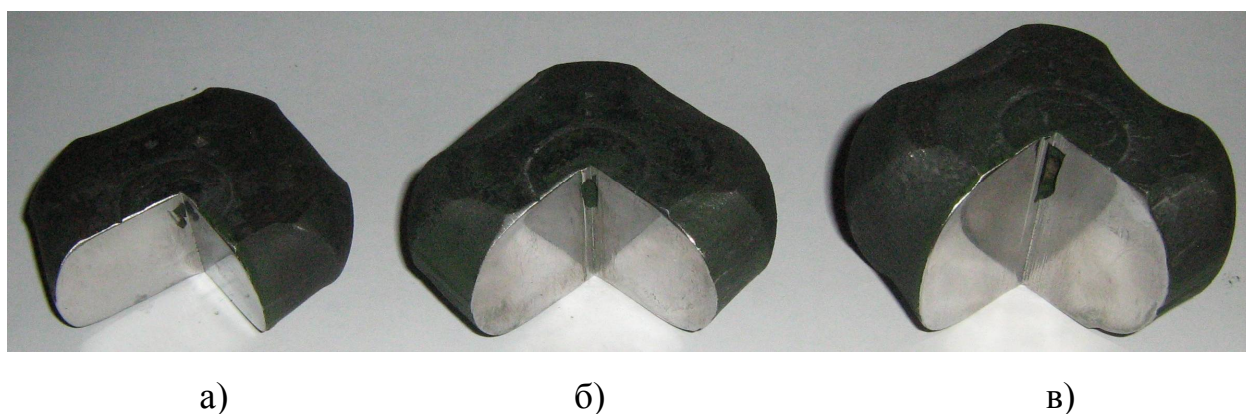


Рисунок 4.16 – Форма осевого дефекта после осадки на 50 % профилированных заготовок с H/D : 1,5 (а); 2,0 (б); 2,5 (в) выпуклыми бойками с углом 150° и обжатию при профилировании 20 %

Осадка призматических заготовок, полученных профилированием плоскими бойками (180°) также не способствует полному закрытию осевого дефекта (рис. 4.17).

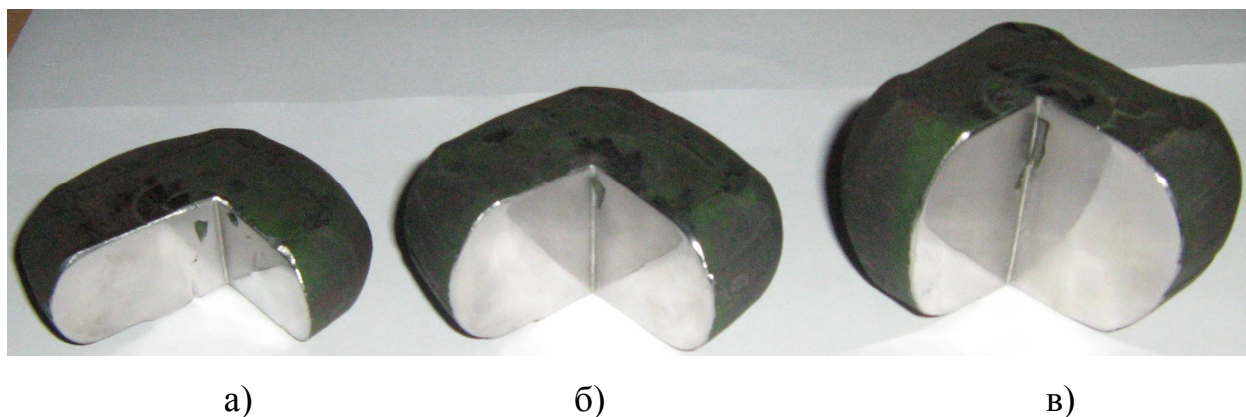


Рисунок 4.17 – Форма осевого дефекта после осадки на 50 % профилированных заготовок с H/D : 1,5 (а); 2,0 (б); 2,5 (в) выпуклыми бойками с углом 180° и обжатием при профилировании 20 %

Для сравнения полученных результатов по закрытию осевых дефектов проводилось исследование процесса осадки цилиндрических заготовок без операции профилирования (базовая технология). Цилиндрические образцы после осадки на 50 % с относительной высотой (H/D) 1,5; 2,0; 2,5 представлены на рисунке 4.18. Осевые дефекты после осадки сохраняются во всех трёх образцах. Размеры осевых дефектов больше, чем после осадки профилированных заготовок. Характерной особенностью полученных результатов является то, что дефекты не заковываются даже для низких заготовок ($H/D = 1,5$). Осаженные образцы имеют сильновыраженную бочкообразную боковую поверхность. Полученные результаты позволили подтвердить, что осадка цилиндрических заготовок не способствует заковыванию осевых дефектов в процессе осадки для различных относительных высот заготовок.

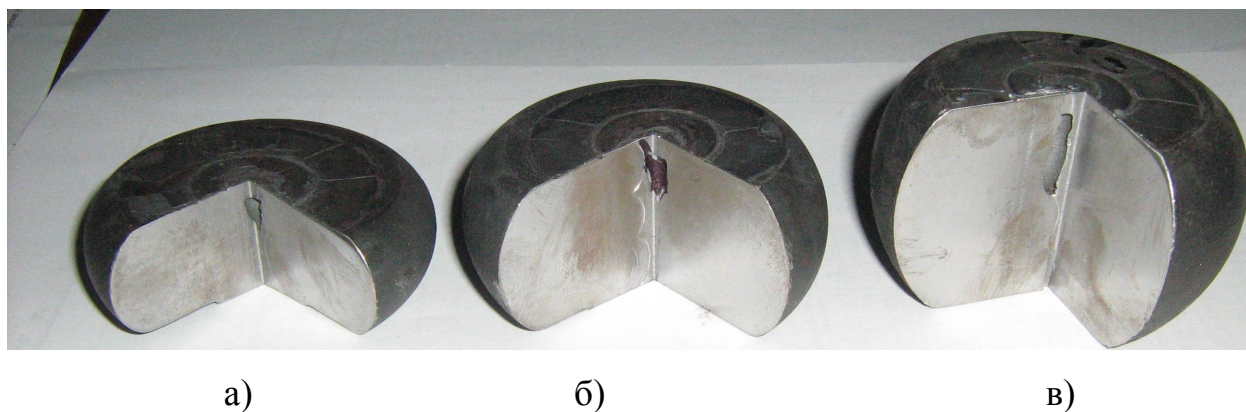


Рисунок 4.18 – Форма осевого дефекта после осадки на 50 % цилиндрических заготовок с H/D : 1,5 (а); 2,0 (б); 2,5 (в)

Полученные результаты исследований позволили установить, что для исследуемых схем полное закрытие осевого дефекта происходит после осадки заготовок, которые были спрофилированы бойками с углом 120° при относительной высоте $H/D = 2,0$ (см. рис. 4.15, б). Частичное закрытие дефекта происходит при осадке высоких заготовок (см. рис. 4.15, в).

Выводы по разделу 4

1. В результате экспериментальных исследований на моделях была подтверждена рациональная геометрия выпуклых бойков и механические режимы профилирования заготовки на четырёхлучевое сечение, установленная при теоретических исследованиях. Предложенная геометрия инструмента способствует равномерному распределению деформаций высокого уровня в объеме заготовки. Полученные результаты послужили рекомендациями для проектирования выпуклых бойков и технологических переходов профилирования цилиндрических заготовок на четырёхлучевое сечение, а именно: угол выпуклых бойков – 120° , обжатие бойками – 20 %.

2. Исследования заковки осевых дефектов при профилировании на свинцовых и стальных образцах на четырёхлучевое сечение соответствуют теоретическим результатам, полученным с использованием МКЭ, с погрешностью 6...12 %. Анализ деформированных сеток, полученных МКЭ и методом координатных сеток, подтвердил достоверность результатов деформированного состояния в объеме металла заготовки с ошибкой в 5...11%.

3. В процессе осадки четырёхлучевой заготовки интенсивное закрытие осевого дефекта происходит при деформации ϵ более 25 %, что подтверждает данные, полученные ранее в теоретическом исследовании. После осадки на 60 % средний диаметр дефекта уменьшается на 65 %..

4. Металлографические исследования позволили сделать вывод, что профилирование выпуклыми бойками с углом 120° гарантирует заковку осевых дефектов заготовки. Изменение геометрических параметров заготовки в процессе профилирования стальных моделей при температурахковки соответствуют размерам свинцовых моделей, что подтверждает достоверность результатов моделирования. В результате проведенного моделирования на свинцовых и стальных образцах подтверждена эффективность операции профилирования цилиндрической заготовки на четырёхлучевое сечение перед операцией осадки, в сравнении с осадкой цилиндрических заготовок. Полученные рекомендации были использованы при проведении натурных промышленно-экспериментальных исследований в условиях ПАО «НКМЗ» при ковке крупногабаритных поковок ответственного назначения.

5 ПРОМЫШЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И АПРОБАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ОСАДКИ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ЗАГОТОВОК НА ЧЕТЫРЁХЛУЧЕВОЕ СЕЧЕНИЕ

5.1 Промышленно-экспериментальное исследованиековки вала с применением осадки профилированной заготовки, полученной выпуклым бойком на плоской плите

Экспериментальные исследования процесса осадки профилированных заготовок на свинцовых и стальных моделях показали рациональность предложенного способа осадки с точки зрения равномерного распределения деформаций и заковки осевых дефектов. Эти результаты требуют подтверждения на натуральных стальных заготовках. Анализ НДС металла в процессе осадки профилированной заготовки на моделях очевидно не достаточен, чтобы сделать окончательный вывод об эффективности предлагаемого нового способаковки. Для полной оценки влияния нового способа деформирования на качество детали необходимо проследить всю технологическую цепочку получения опорного вала, начиная от операции биллетировки и заканчивая получением ступенчатой поковки на натуральных образцах [184]. Сопоставление технико-экономических показателей для новой технологииковки необходимо проводить с существующим способомковки данных поковок. В этой связи были проведены исследования новых технологических процессовковки опорных валов из стали 70Х3ГНМФ в условиях кузнечно-прессового цеха ПАО «НКМЗ» на производственных заказах.

Обязательным условием сравнения базового и новых процессовковки является соответствие химического состава сталей исследуемых поковок. Это обусловлено тем, что качество крупных поковок определяется не только схемойковки, но и строением исходного кузнечного слитка, строение кото-

рого зависит от химического состава [185]. Сравнительные данные фактического химического состава слитков для поковок по базовому варианту (Б-1, Б-2) и новому (экспериментальному) технологическому процессу (Э-1, Э-2) на заказ 5534456 представлены в таблице 5.1. В таблице выделены показатели, которые незначительно превышают требования к данным поковкам и являются удовлетворительными. Незначительно превышено содержание водорода в слитках, которые будут коваться по базовой технологии. В среднем химический состав сталей для исследуемых слитков отличается на 3 ...6 %, что не противоречит закону физического моделирования. По каждому способу (базовому и новому) были откованы по две поковки (карты фиксации 8363, 8394 и 8364, 8404, соответственно). Технологические картыковки опорного вала из слитка массой 57 400 кг по базовой и новой технологии представлены в приложениях А и Б. Эскиз детали опорного вала горячей прокатки 672с - 242 представлен на рисунке 5.1.

Базовый технологический процессковки опорного вала массой 40 600 кг производится из слитка массой 57 400 кг. Слиток отлит сифонным способом с вакуумированием. После первого нагрева слитка до температуры 1150 °С производится оттяжка цапфы под отверстие осадочной плиты и обкатка тела слитка для придания ему цилиндрической формы (рис. 5.2, левый столбец, приложение А). После подогрева производится осадка билета сферической вогнутой плитой за 8 нажимов с паузами 15 ...20 с до Ø2250 мм (степень деформации $\varepsilon = 50 \%$).

Таблица 5.1 – Химический состав стали 70Х3ГНМФ

№ фиксации	№ плавки	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Al	Cu	P	S	H ₂ , ppm
8363 Б-1	613140370	0,65	0,49	1,01	2,73	0,46	0,51	0,11	0,006	0,22	0,014	0,005	2,3
8364 Э-1	613140382	0,67	0,57	1,00	2,78	0,44	0,51	0,12	0,007	0,24	0,013	0,003	1,6
8394 Б-2	613140396	0,7	0,49	0,95	2,8	0,39	0,52	0,12	0,006	0,19	0,015	0,004	2,1
8404 Э-2	613140405	0,67	0,57	0,96	2,78	0,34	0,49	0,12	0,006	0,22	0,015	0,006	1,8
По чертежу		0,65-0,75	0,4-0,6	0,9-1,3	2,7-3,3	≤0,5	0,5-0,7	0,1-0,3			≤0,015	≤0,015	≤2,0

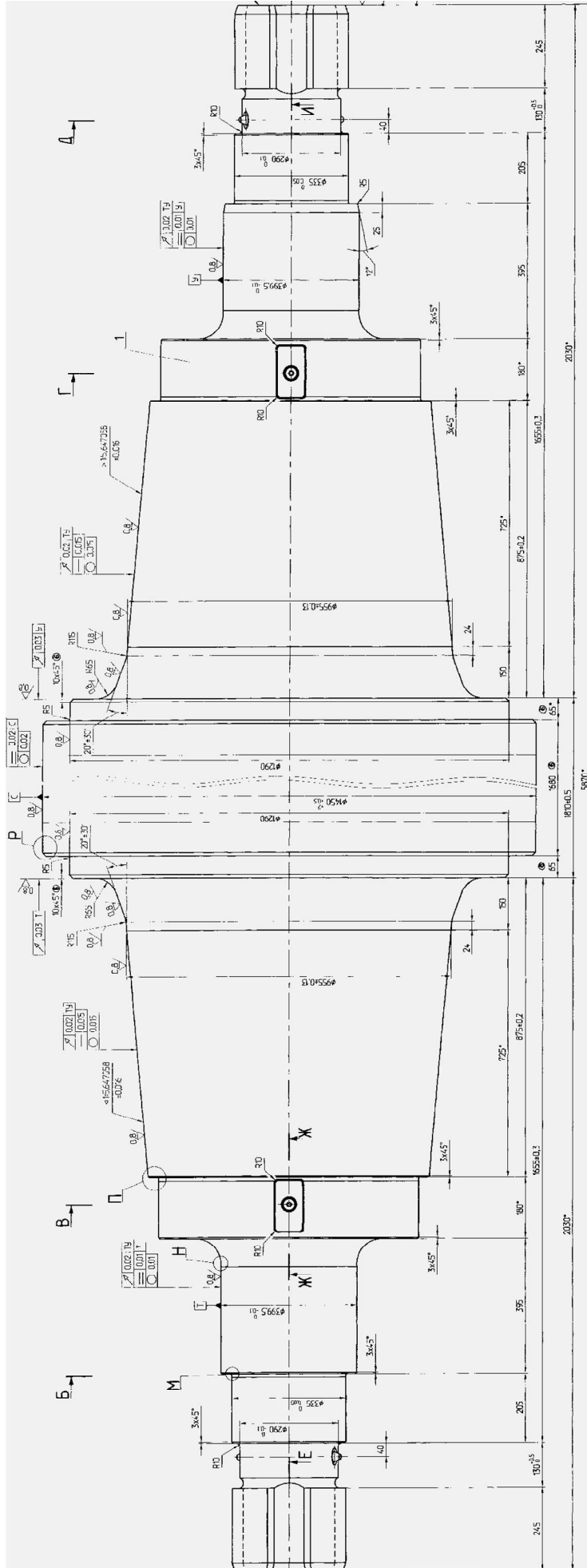


Рисунок 5.1 – Чертёж опорного вала горячей прокатки 672с – 242

Осаженная заготовка протягивается плоскими бойками по схеме круг → квадрат → восьмигранник → круг до $\varnothing 1700$ мм. В третьем и четвертом нагревах производится ковка ступеней вала комбинированными и вырезными бойками.

Отличие нового (исследуемого) технологического процесса от базового состоит в применении операции профилирования биллета выпуклым бойком на нижней плоской плите с обжатием 150 мм (10 %) и кантовкой с четырёх сторон (рис. 5.2, правый столбец, приложение Б) до получения вогнутого поперечного сечения (четырёхлучевая заготовка). Чертёж бойка представлен в приложении В. Боёк спроектирован в соответствии с полученными рекомендациями. Во втором нагреве, после осадки сферической плитой, заготовка приобретает сечение, близкое к квадратному, со стороной ≈ 1850 мм (степень деформации $\varepsilon \approx 50$ %). После осадки на боковой поверхности заготовки отсутствует бочкообразность, что свидетельствует об изменении напряженно-деформированного состояния в сторону более жесткой схемы деформации и в повышении уровня сжимающих напряжений на боковой поверхности и в осевой зоне заготовки. В результате снизилось трещинообразование на боковой поверхности в процессе осадки. Далее полученная заготовка протягивается на квадратное сечение с размерами 1700 x 1700 мм плоскими бойками в направлении ребер четырёхлучевой заготовки. Процесс ковки представлен на рисунке 5.3. Дальнейшие операции аналогичны базовому технологическому процессу. Ограничение данного технологического процесса заключается в уменьшении глубин вогнутых граней с 150 мм до ≈ 100 мм после кантовки заготовки на 180° и прожиме выпуклым бойком с противоположной стороны биллета на плоской плите. Это приводит к несимметричности заготовки и возможной потере устойчивости в процессе осадки при допусках соотношения H/D заготовки (рис. 5.4).

Сопоставление базового и нового технологического процесса ковки заготовки «Опорный валок» на АКК 100 МН представлено на рисунке 5.2. Анализ соответствующих технологических процессов ковки позволяет сде-

лать вывод, что трудоемкостьковки по новому технологическому процессу превышает в 1,7 ... 1,8 раза базовый технологический процесс. Однако количество нагревов соответствует базовому технологическому процессу.

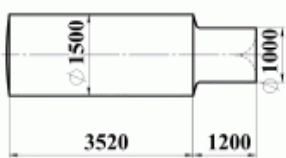
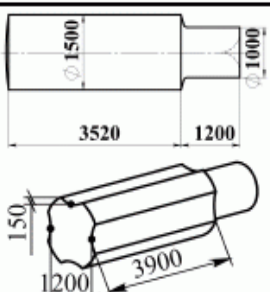
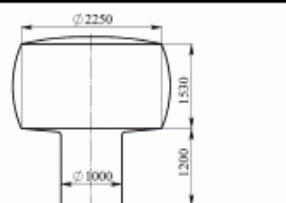
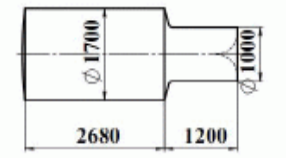
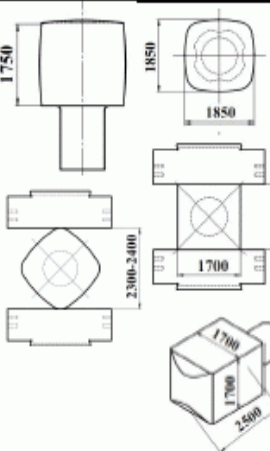
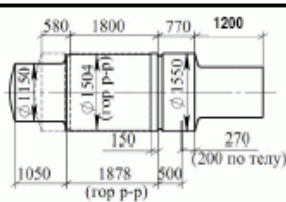
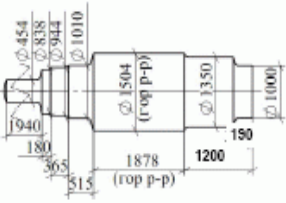
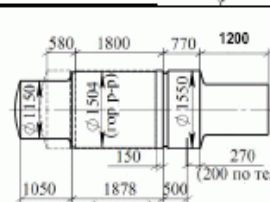
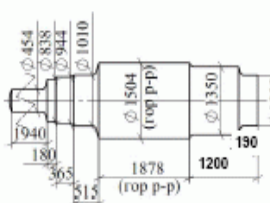
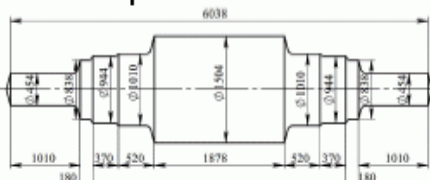
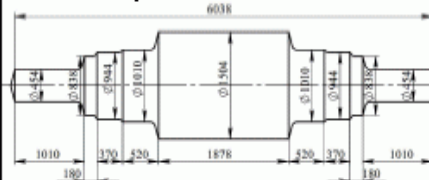
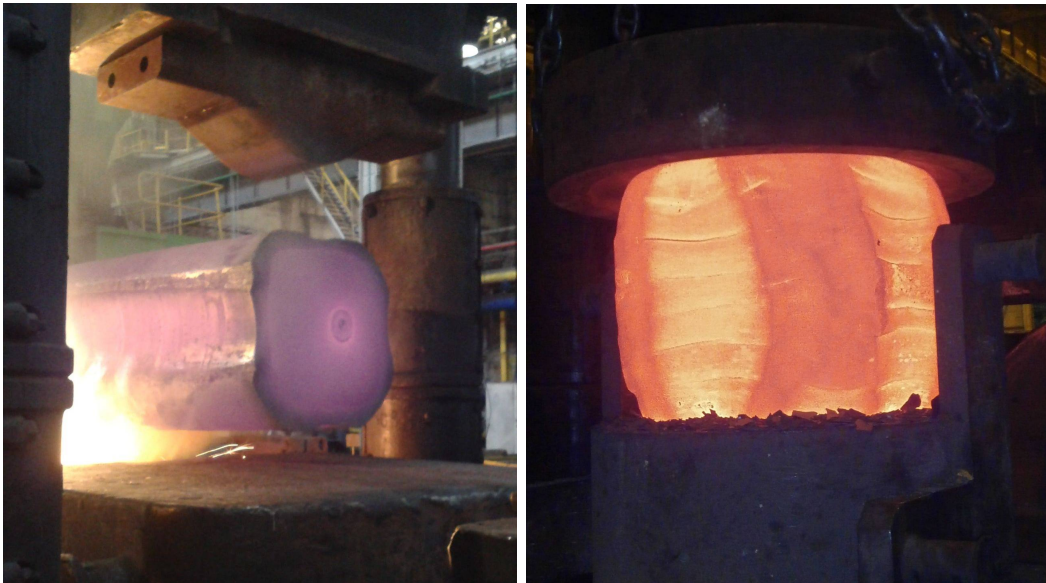
Традиционная технология					Новая технология					
Описание	Эскизы	Уков	Трудоемкость		Описание	Эскизы	Уков	Трудоемкость		
			План	Факт				План	Факт	
										8363
I Нагрев 1. Билетировка		1,15 бил	44	55	55	I Нагрев 1. Билетировка 2. Прокат прифилерованной заготовки под осадку. 	1,15 бил 1,1 прок	59	100	155
II Нагрев 1. Осадка цилиндрической заготовки сферической плитой. 2. Протяжка заготовительная.	 	2,3 ос 1,75 прот	66	75	60	II Нагрев 1. Осадка "хрестообразной" заготовки сферической плитой. 2. Протяжка заготовительная через квадрат по ребрам. 	2,2 ос 1,18 прот	73	130	180
III Нагрев 1. Протяжка на раскрой. 2. Протяжка бошки вмеру. 3. Протяжка донной шейки вмеру.	 	1,3 б 14,3 д.ш. 1,6 пр.ш.	155	135	165	III Нагрев 1. Протяжка на раскрой. 2. Протяжка бошки вмеру. 3. Протяжка донной шейки вмеру.  	1,66 б 18,2 д.ш. 2,0 пр.ш.	155	335	160
IV Нагрев 1. Протяжка прибыльной шейки вмеру.		9,0 пр.ш.	60	70	68	IV Нагрев 1. Протяжка прибыльной шейки вмеру. 	9,0 пр.ш.	60	70	100
ИТОГО		2,28 б 25,0 ш	325	335	348		1,96 б 21,5 ш	347	635	695

Рисунок 5.2 – Сравнение базового и нового процессаковки



а)

б)

Рисунок 5.3 – Процесс профилирования билета выпуклым бойком на плите (а) и осадки профилированной четырёхлучевой заготовки (б)



Рисунок 5.4 – Потеря устойчивости при осадке заготовок с несимметричным профилем

Повышенная трудоемкость нового (экспериментального) техпроцесса объясняется: введением дополнительной операции прожима выпуклым бойком на плоской плите (подача заготовки производилась столом прессы); сложностью кантовки заготовки на нижней плоской плите (без использования манипулятора); увеличением времени на смену инструмента; а также от-

сутствием опыта проведения новой кузнечной операции. Однако для нового технологического процесса была снижена величина коэффициента укова (как базового показателя качества будущей поковки и затрат на ковку) с 2,28 до 1,96 для бочки и с 25,0 до 21,5 для шеек валка. Снижение трудоемкостиковки для нового технологического процесса возможно за счет прожима выпуклым бойком не на плите, а с применением пары ответных выпуклых бойков, что будет рассмотрено ниже (см. п. 5.2).

Основное требование, которое предъявляется к крупным поковкам – это их внутреннее качество. Качество крупных поковок определяется комплексом механических свойств, оговариваемых заказчиком, и отсутствием внутренних дефектов металлургического происхождения слитка, как исходной заготовки дляковки. Поэтому полученные поковки обязательно подвергаются УЗК. К поковкам опорных валков предъявляются высокие требования по УЗК в разных зонах, которые регламентируются европейским стандартом SEP 1921. Согласно требований заказчика, полученная деталь должна отвечать следующим требованиям по зонам (рис. 5.5):

I зона – поверхность бочки и шейки на глубине $(0,9 \dots 1,0)R$ должна соответствовать классу D / d (эквивалентный диаметр одиночных дефектов не должен превышать 3 мм, а в скоплениях – меньше 2 мм);

II зона – на глубине $(0,6 \dots 0,9)R$ металл должен соответствовать классу C / c для бочки (эквивалентный диаметр одиночных дефектов не должен превышать 7 мм, а в скоплениях – меньше 5 мм), для шейки должна соответствовать классу C / c (эквивалентный диаметр одиночных дефектов не должен превышать 5 мм, а в скоплениях – меньше 3 мм);

III зона – на глубине $(0 \dots 0,6)R$ металл должен соответствовать для бочки классу A / a (эквивалентный диаметр одиночных дефектов не должен превышать 14 мм, а в скоплениях – меньше 10 мм), для шейки должна соответствовать классу B / b (эквивалентный диаметр одиночных дефектов не должен превышать 10 мм, а в скоплениях – меньше 7 мм).

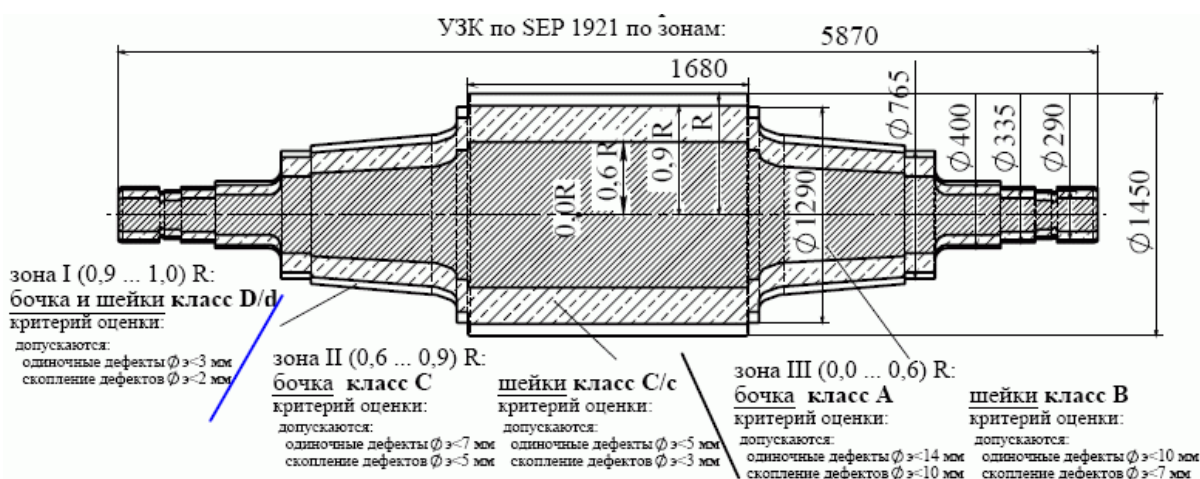
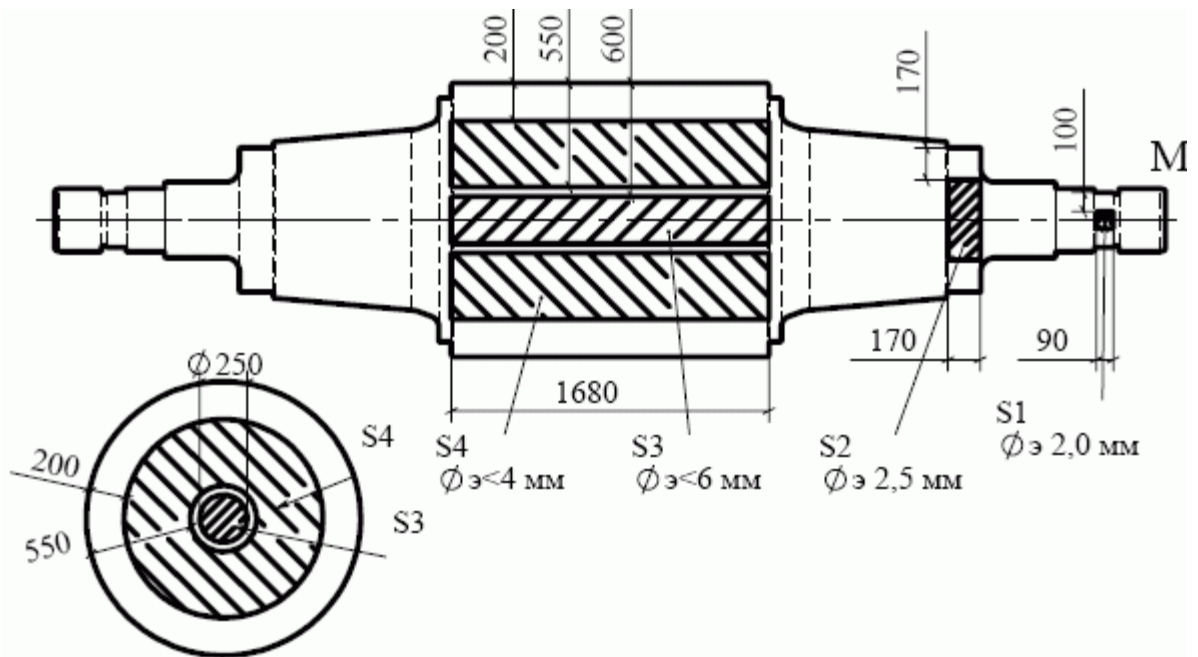


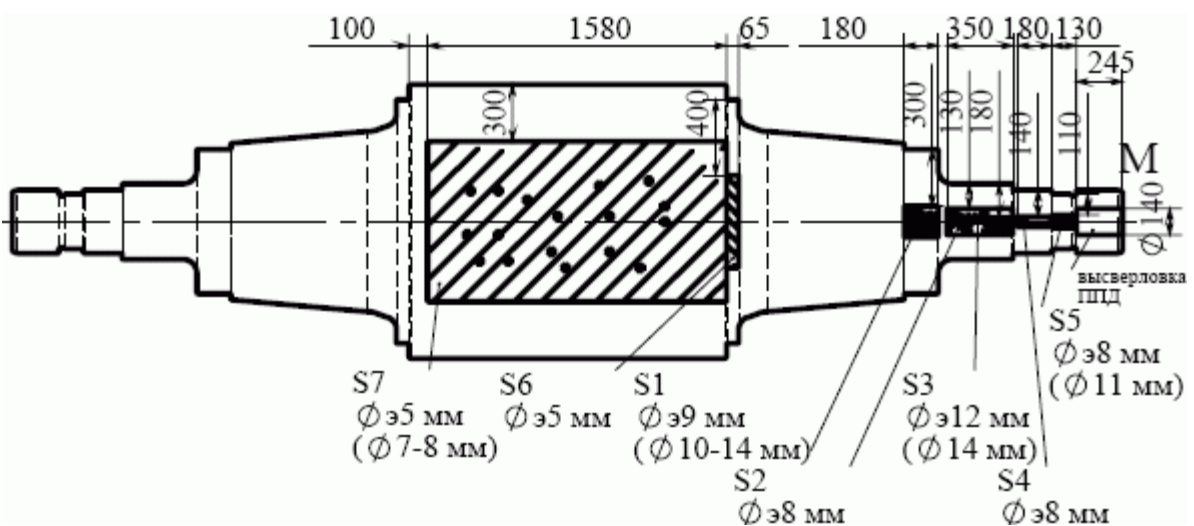
Рисунок 5.5 – Требования по УЗК в разных зонах заготовки «Опорный валок»

Для определения эффективности предлагаемого нового способа сопоставлять полученные результаты целесообразнее с результатами УЗК, характерными для базового способаковки опорных валков. На рисунке 5.16 представлены результаты УЗК двух поковок, откованных по базовой технологии с осадкой цилиндрической заготовки (биллета). Согласно заключения УЗК (приложение Г 1), обнаружено скопление дефектов: на участке S1 эквивалентным диаметром до 2,5 мм; на участке S2 эквивалентным диаметром до 2,0 мм; на участке S3 эквивалентным диаметром до 6,0 мм; на участке S4 эквивалентным диаметром до 4,0 мм. В остальной части вала внутренних дефектов с эквивалентным диаметром более 2,0 мм не обнаружено (рис. 5.6, а).

Аналогичные результаты УЗК (приложение Г 2), но с ещё большим уровнем обнаруживаемых дефектов со стороны прибыльной части и в осевой зоне детали, получены и во второй поковке, откованной также по базовой технологии (рис. 5.6, б). Как показали результаты теоретического исследования МКЭ, причина появления дефектов со стороны прибыльной шейки и осевой зоны слитка вызвана неблагоприятным НДС металла заготовки при осадке цилиндрической заготовки, полученной после биллетировки слитка (см. рис. 5.2).



а)



б)

Рисунок 5.6 – Результаты УЗК двух поковок, откованных по традиционной технологии: а – Б1 (карта фиксации 8363) и б – Б2 (карта фиксации 8394)

Полученный результат УЗК позволяет сделать вывод о низкой эффективности способа осадки цилиндрических заготовок, так как в этом случае не происходит заковка осевых дефектов слитков (более того они могут «раскрываться» от действия в этой зоне неблагоприятного деформированного со-

стояния). Увеличенные размеры дефектной осевой зоны при последующей ковке с применением операции протяжки не закрываются даже при коэффициенте укова в бочке, равного 2,3 (табл. 5.2). Этот факт соответствует данным, представленным в работе [60]. Таким образом, необходимо применять другие способы осадки или формы заготовок, которые повысят уровень сжимающих напряжений в осевой зоне слитка в процессе осадки.

Таблица 5.2 – Уков по участкам поковки для базового варианта

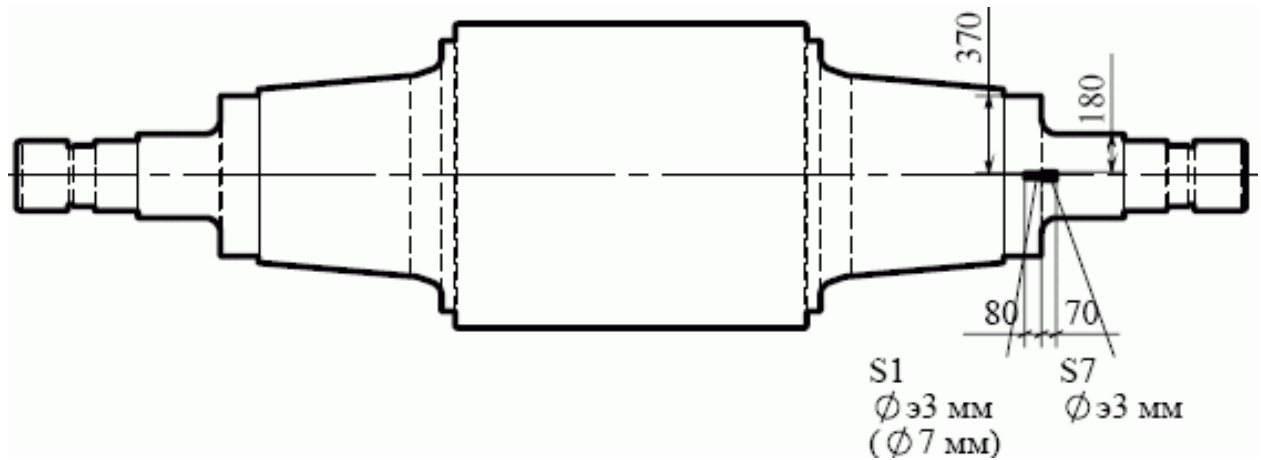
Уков	Базовый вариант					
	Бочка (min)			Шейки (max)		
	план	Б-1	Б-2	план	Б-1	Б-2
Осадка	2,28	2,28	2,28	25	25	25
Технологический	$2,28 \times 1,15 = 2,62$	2,62	2,62	$25 \times 1,15 = 26,15$	26,15	26,15

Результаты УЗКковки 2-х опорных валков по новому технологическому процессу представлены на рисунке 5.7. Согласно заключения УЗК (приложение Г 3) обнаружено скопление дефектов: в зонах S1 и S2 эквивалентным диаметром до 3,0 мм. В остальной части валка внутренних дефектов с эквивалентным диаметром более 2,0 мм не обнаружено (рис. 5.7, а).

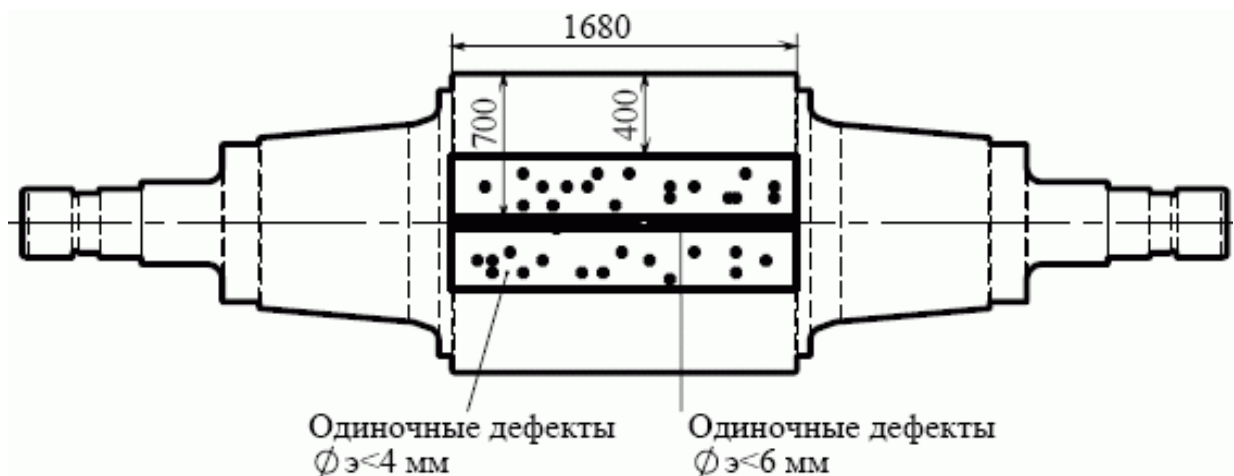
Результаты УЗК 2-ой поковки, откованной по той же технологии, аналогичны результатам по 1-ому валку (рис. 5.7, б). В осевой зоне бочки обнаруживаются одиночные дефекты с эквивалентным диаметром меньше 4,0 ... 6,0 мм, что намного меньше допустимых по размерам дефектов, оговоренных заказчиком (см. рис. 5.5).

Полученные результаты УЗК подтверждают высокую эффективность схемы осадки профилированной заготовки на заковку осевых дефектов слитка. При этом величина коэффициента укова в бочке и шейках меньше, чем в способековки по базовому варианту, и составляет в бочке 1,96 (табл. 5.3). Таким образом, результаты УЗК на натуральных поковках подтверждают результаты исследований о влиянии вогнутых граней на подпор осевой зоны в процессе осадки профилированного слитка. Вогнутые грани заготовки по-

вышают жесткость схемы напряженного состояния в осевой зоне в процессе осадки.



а)



б)

Рисунок 5.7 – Результаты УЗК двух поковок, откованных по новой технологии: а – Э1 (карта фиксации 8364) и б – Э2 (карта фиксации 8404)

Таблица 5.3 – Уков по участкам поковки для базового варианта

Эксперимент					
Бочка (min)			Шейки (max)		
план	Э-1	Э-2	план	Э-1	Э-2
1,96	2,29	2,26	21,5	21,66	20,9
1,96 x 1,15=2,26	2,64	2,6	21,5 x 1,15=24,76	24,9	24,03

5.2 Промышленно-экспериментальное исследованиековки с применением осадки профилированной заготовки, полученной двумя выпуклыми бойками

Апробация технологического процессаковки опорных валов с применением профилирования биллета на плоской плите показала, что в результате данного способа увеличивается трудоемкостьковки и происходит получение несимметричного четырёхлучевого сечения, что приводит к потере устойчивости заготовки при осадке (см. рис. 5.4). Обозначенное ограничение предложено устранить за счет использования двух выпуклых бойков с корректировкой выпуклой части инструмента (рис. 5.8), геометрия которой была установлена в результате теоретического исследования (см. п. 3.3) и подтверждена экспериментальным исследованием на свинцовых моделях (см. п. 4.1).

Предложенная схема деформирования направлена на получение симметричного профиля получаемой заготовки, что дополнительно снизит трудоемкостьковки-профилирования. Согласно предложенного способаковки выпуклыми бойками, была разработана новая концепция проектирования технологических процессовковки поковок типа опорных валов (приложение Д). Экспериментальное исследование производилось на производственном заказе 553471, согласно которого по новой и базовой технологиям были изготовлены по 3 поковки из стали 70Х3ГНМФ, химический состав которых соответствовал предыдущим исследованиям (см. табл. 5.1). Поковки, как и в предыдущих исследованиях, изготавливались из слитков массой 57 400 кг, что обеспечивало условие физического и химического подобия проводимых исследований. Сопоставление результатов нового технологического процесса производилось с данными, соответствующими базовому технологическому процессу. Согласно базового технологического процессаковки опорного вала слитки были отлиты сифонным способом с вакуумированием.



а)



б)



в)

Рисунок 5.8 – Выпуклый боек (а), процесс профилирования выпуклыми бойками (б) и осадка профилированной четырёхлучевой заготовки (в)

После первого нагрева слитка до температуры 1150 °С производилась оттяжка цапфы под отверстие осадочной плиты диаметром 1000 мм и обкатка тела слитка для придания ему цилиндрической формы диаметром 1500 мм. После подогрева производилась осадка билета сферической вогнутой плитой за 8 нажимов до $\text{Ø}2300$ мм. Осаженная заготовка протягивалась плоскими бойками на квадратное сечение со стороной 1650 x 1650 по схеме

круг → квадрат → восьмигранник → круг до $\varnothing 1600$ мм. Далее производилась ковка ступеней вала комбинированными и вырезными бойками.

Отличие нового технологического процесса состояло в применении операции профилирования биллета двумя выпуклыми бойками с обжатием 150 мм (10 % от диаметра) со стороны каждого бойка и кантовкой на 90° (приложение Д) до получения вогнутого поперечного сечения (четырёхлучевая заготовка) с расстоянием между вогнутыми гранями 1200 мм (рис. 5.8).

Во втором нагреве после осадки сферической плитой заготовка приобретает сечение, близкое к квадратному, со стороной ≈ 1950 мм (степень деформации $\varepsilon \approx 58\%$). После осадки на боковой поверхности заготовки отсутствовала бочкообразность, что свидетельствует об изменении напряженно-деформированного состояния в сторону более жесткой схемы деформации. Осаженная заготовка правилась плоскими бойками на квадратное сечение с размерами 1950 x 1950 мм. После кантовки на 45° заготовка ковалась в направлении ребер четырёхлучевой заготовки до получения в сечении восьмигранника. После смены нижнего плоского бойка на вырезной производилась обкатка на круг и ковка ступеней вала (операции аналогичны базовому технологическому процессу).

В результате по разработанному технологическому процессуковки с профилированием на четырёхлучевую заготовку и её последующей осадке было отковано 22 поковки опорных валов (табл. 5.4). Степень обжатия при профилировании выпуклыми бойками составляла в среднем 10 % на одну сторону от диаметра биллета. Применяемая степень обжатия была установлена на основании результатов теоретического и экспериментального исследований (см. п. 3.2). При экспериментальном исследовании на натуральных образцах производилось варьирование отношения H/D четырёхлучевой заготовки перед осадкой (как и при теоретическом исследовании) для установления влияния этого параметра на бочкообразование и заковку осевых дефектов крупных слитков. Соотношение H/D варьировалось в диапазоне 1,5; 2,5; 3,5 (см. табл. 5.4).

Полученные результаты по формоизменению и УЗК проверялись и сравнивались с соответствующими базовыми технологическими процессами данных поковок, изготавливаемых на ПАО «НКМЗ». Анализ результатов УЗК (см. табл. 5.4) реализованных технологических процессов ковки опорных валов с применением профилирования и осадки четырёхлучевых заготовок позволяет сделать вывод, что менее 5 % откованных поковок превышают требования Европейского стандарта SEP 1921 по размерам внутренних дефектов в прибыльной шейке (эквивалентный диаметр 11 мм против требуемых 10 мм). Превышает требования стандарта поковка, полученная в 13 эксперименте (2-Э-13, табл. 5.4) из стали 70ХЗГНМФ (приложение Е). Полученный эквивалентный диаметр 11 мм в шейке вала объясняется, согласно карты фиксации (приложение Ж), недоливом слитка (слиток поступил в цех с массой 57 400 кг вместо 59 200 кг) и попаданием подприбыльных дефектов (усадочной раковины) в тело слитка.

В остальных поковках осевых дефектов в бочке и шейках вала, которые превышают требования стандарта, не обнаружено, в отличие от базового технологического процесса (см. рис. 5.6). Полученные результаты подтверждают положительное влияние вогнутых граней профилированной заготовки на повышение уровня сжимающих напряжений в осевой зоне и заковке осевых дефектов в процессе осадки. Полученные поковки соответствовали техническим условиям заказчика. Для новых технологических процессов ковки были снижены величины коэффициентов укова поковки «Опорный валок» (как базового показателя качества будущей поковки и затрат на ковку) с 2,28 до 1,96 для бочки и с 25,0 до 21,5 для шеек вала. Полученные результаты подтверждают данные теоретического исследования с использованием МКЭ и экспериментальных результатов, полученных на свинцовых и стальных моделях. Таким образом, результаты УЗК на натуральных поковках подтверждают гипотезу влияния вогнутых граней на подпор осевой зоны в процессе осадки профилированного слитка на четырёхлучевое сечение.

Таблица 5.4 – Результаты ковки опорных валов с профилированием и осадкой четырёхлучевых заготовок

№ п/п	Марка стали	Мсл., т	Нагрев	Параметры ковки							УЗК	
				Операция	Обжатие на сторону		Осадка			УКОВ		
							Н/Дб	Н/Дтр	$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0}$ %	бочка		шейки
					мм	%						
1-Э-1	70ХЗГНМФ	57,4	I	Биллетировка								В112-37 +
				Прожим	150	10						
1-Э-2	70ХЗГНМФ	57,4	II	Осадка			2,58	3,09	58,6			В112-48 +
				Протяжка на квадрат						1,18	1,18	
			II a	Биллетировка						1,15	1,15	
				Прожим	150	10						
2-Э-3	90ХФ	57,4	I	Осадка			2,58	3,14	35,4			В111-242 +
				Протяжка на квадрат						1,2	1,2	
			II a	Исправление кривизны						1,14	1,14	
				Осадка			1,98		42,8			
2-Э-4	75ХМФ	68,6	I	Биллетировка						1,15	1,15	И14-121 бочка: Ø3 мм
				Прожим	150	9,4						
2-Э-5	75ХМФ	68,6	II	Осадка			2,66	3,3	56,3			И15-15 бочка: Ø5 пр.ш.: Ø3 мм
				Протяжка на квадрат						1,31	1,31	
3-Э-6	AlSi4142	40,7	I	Биллетировка						1,15	1,15	3В86-166 +
				Осадка			2,67		52,3			
				Прожим	250	13,2						
			II	Осадка			1,16	1,57	56,3			
				Протяжка на квадрат						1,7	1,7	
				III	Присадка с поддона			-		-		
Протяжка предварит.							1,21	1,21				
2-Э-8	70ХЗГНМФ	59,2	I	Биллетировка						1,15	1,15	В112-137 бочка: Ø11 мм пр.шейка: Ø6 мм
				Прожим	150	10						
			II	Осадка			2,6	3,25	56,4			
				Протяжка на квадрат						1,25	1,25	

Продолжение таблицы 5.4

№ п/п	Марка стали	Мсл., т	Нагрев	Параметрыковки							УЗК			
				Операция	Обжатие на сторону		Осадка			УКОВ				
							H/Dб	H/Dгр	$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0}$ %	бочка		шейки		
2-Э-9	70ХЗГНМФ	59,2	I	Биллетировка						1,15	1,15	В112-143 +		
				Прожим	150	10								
			II	Осадка			2,6	3,25	56,4					
				Протяжка на квадрат						1,25	1,25			
2-Э-10	70ХЗГНМФ	59,2	I	Биллетировка						1,15	1,15	В112-152 +		
				Прожим	150	10								
			II	Осадка			2,6	3	56,4					
				Протяжка на квадрат						1,12	1,12			
2-Э-11	70ХЗГНМФ	59,2	I	Биллетировка						1,15	1,15	В112-168 +		
				Прожим по биллету	150	10								
			II	Осадка			2,6	3,25	56,4					
				Протяжка на квадрат						1,25	1,25			
2-Э-12	70ХЗГНМФ	59,2	I	Биллетировка						1,15	1,15	В112-184 +		
				Прожим	150	10								
			II	Осадка			2,6	3,25	56,4					
				Протяжка на квадрат						1,25	1,25			
2-Э-13	70ХЗГНМФ	59,2	I	Биллетировка						1,15	1,15	В112-183 пр. шейка: Ø11 мм		
				Прожим	150	10								
			II	Осадка			2,6	3,25	56,4					
				Протяжка на квадрат						1,25	1,25			
5-Э-14	50ХГМ	151,3	I	Биллетировка						1,15	1,15	И14-139 бочка: ПДС (в центре L=960 мм)		
				Протяжка: пр. шейка						-	2,97			
				Прожим	200	8,9								
			II	Осадка			1,56	1,89	55,7					
Протяжка на восьмигранник							1,87	1,87						
5-Э-15	50ХГМ	151,3	I	Биллетировка						1,15	1,15	В111-252 бочка: ПДС д. шейка: Ø3,5 - 8		
				Протяжка: пр. шейка						-	2,97			
			II	Прожим	200	9,5								
				Осадка			1,67	2,06	55,7					
III	Протяжка на пластину						1,12	1,12						

Продолжение таблицы 54

№ п/п	Марка стали	Мсл., т	Нагрев	Параметрыковки							УЗК		
				Операция	Обжатие на сторо- ну		Осадка			УКОВ			
							Н/Дб	Н/Дтр	$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0}$ %	бочка		шейки	
5-Э-16	50ХГМ	151,3	I	Биллетировка						1,15	1,15	В112-185 бочка: Ø9 мм д.шейка: Ø8 -12 мм	
				Протяжка: пр.шейка						-	2,97		
			II	Прожим	270	12							
			III а	Осадка предва- рительно			1,65	2,17	27,0				
				Осадка					37,0				
III а	Протяжка на пластину						1,36	1,36					
2-Э-18	70ХЗГНМФ	57,4	I	Биллетировка						1,15	1,15	В113-1 +	
				Прожим	150	10							
			II	Осадка			2,6	3,25	59,0				
				Протяжка через диагональ						1,9	1,9		
2-Э-19	70ХЗГНМФ	57,4	I	Биллетировка						1,15	1,15	В112-191 бочка: Ø11 пр.шейка: Ø11 мм	
				Прожим	150	10							
			II	Осадка			2,6	3,25	59,0				
2-Э-20	70ХЗГНМФ	57,4	I	Биллетировка						1,15	1,15	В113-11 +	
				Прожим	150	10							
			II	Осадка			2,6	3,25	59,0				
6-Э-21	70ХЗГНМФ	65,5	I	Биллетировка						1,15	1,15	В112-191 бочка: Ø5 мм	
				Прожим	150	9,4							
			II	Осадка			2,4	2,95	60,5				
				Протяжка через диагональ						1,83	1,83		
				Прожим	150	8,6							
			III	Осадка			1,73	2,09	42,6				
Протяжка через диагональ							1,8	1,8					
6-Э-22	70ХЗГНМФ	65,5	I	Биллетировка						1,15	1,15	В112-196 бочка: Ø3,5-5 мм	
				Прожим	150	9,4							
			II	Осадка			2,4	2,95	60,5				
				Протяжка через диагональ						1,83	1,83		
				Прожим	150	8,6							
			III	Осадка			1,73	2,09	42,6				

5.3 Промышленно-экспериментальное исследованиековки пустотелого диска с применением осадки профилированной заготовки

Для поковок валов операция осадки применяется в качестве вспомогательной операции для увеличения площади поперечного сечения заготовки по отношению к площади поперечного сечения слитка, а также для увеличения коэффициента укова. Осадка в качестве формообразующей операцией применяется при ковке поковок типа дисков (поковки у которых соотношение $H / D < 1.0$). Для особо ответственных дисков применяется двойная осадка для накопления в теле заготовки деформаций высокого уровня и заварки осевых дефектов слитка. Как было установлено ранее, осадка цилиндрических заготовок характеризуется неблагоприятным НДС в осевой зоне заготовки (слитка), которая поражена дефектом металлургического происхождения – осевой рыхлостью. Это подтверждается данными ПАО «НКМЗ» и другими исследователями [60].

В качестве примера можно рассмотреть результаты базового технологического процессаковки заготовки для детали «Левая часть вала», которая соответствует по форме диску (рис. 5.9) [186]. Материал детали – сталь 20ГС, масса детали 29 345 кг. Поковка ковалась из слитка массой 88 200 кг на прессе АКК – 100.

Слиток отлит сифонным способом с вакуумированием. После первого нагрева слитка до температуры 1230 °С производится оттяжка цапфы под отверстие осадочной плиты диаметром 1000 мм и обкатка тела слитка для придания ему цилиндрической формы диаметром 1900 мм (рис. 5.10). После подгрева производится осадка билета сферической вогнутой плитой. Осаженная заготовка протягивается комбинированными бойками до Ø 1900 мм. В третьем нагреве производится осадка заготовки в нижнем кольце с отверстием Ø 1675 мм. Коэффициент укова по базовому технологическому процессуковки после двойной осадки составлял 4,35. Однако этот высокий ко-

эффицент укова не гарантировал получение заданного качества по внутренним дефектам согласно результатам УЗК (приложение И1). УЗК показал наличие внутренних дефектов в конической части детали (на середине высоты поковки), эквивалентный диаметр которых составляет 5,0 ... 8,8 мм, что превышает требования заказчика.

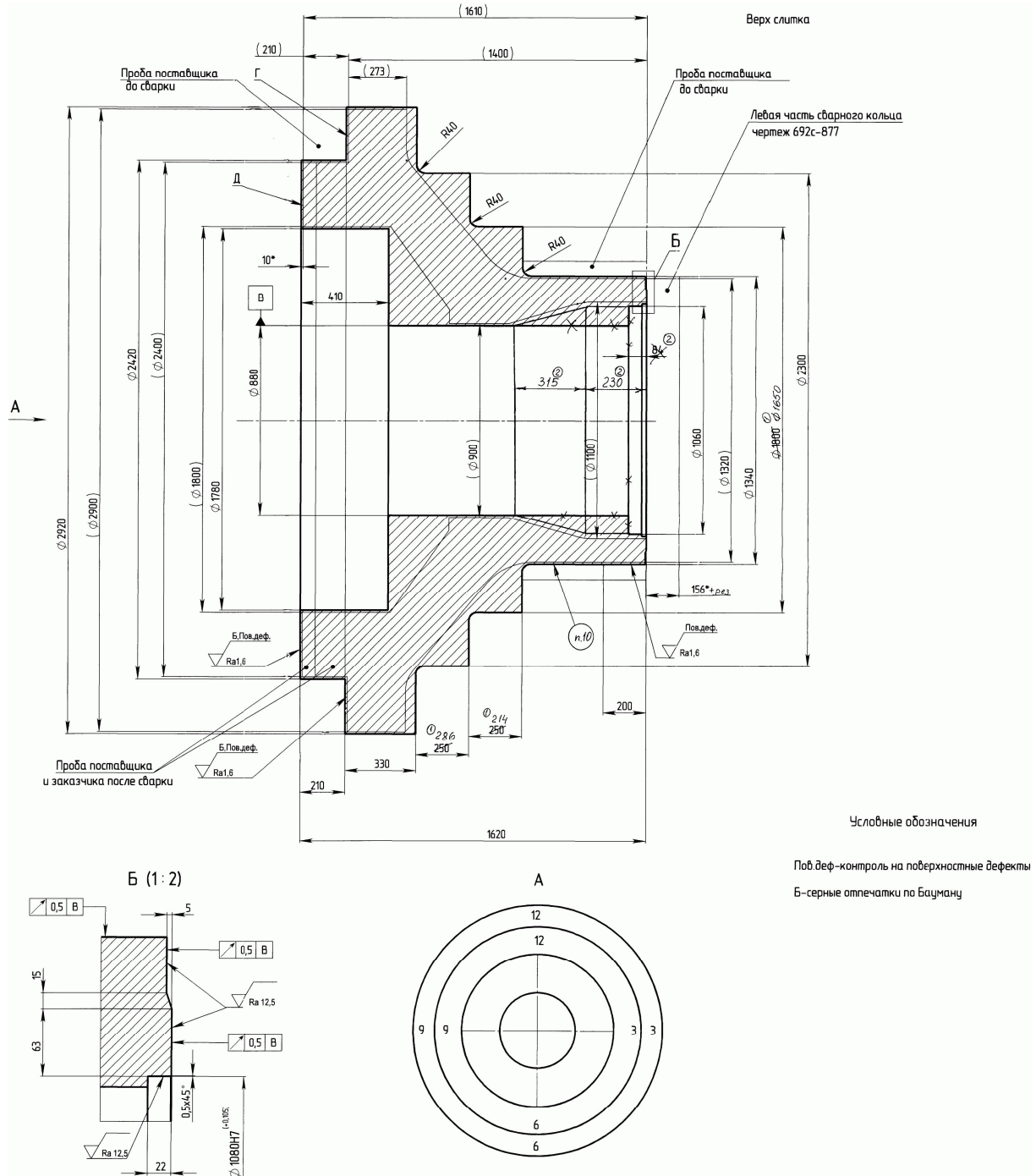


Рисунок 5.9 – Эскиз расчетной заготовки «Левая часть вала», номер чертежа детали 692с – 874

Традиционная технология				
Нагрев		Уков фланец/ступица	Трудоёмкость	
Описание	Эскизы		План	Факт
I Нагрев 1. Биллетировка		1,15 бил	84	70
II Нагрев 1. Осадка цилиндрической заготовки сферической плитой. 2. Протяжка заготовительная под осадку.		2,45 ос 2,41 / 3,01 прот	148	150
III Нагрев 1. Осадка в кольцо. 2. Прошивка отверстия.		2,42 / 1,02 ос	112	100
IV Нагрев 1. Отделка поверхности. 2. Калибровка отверстия.		1,02 ос	101	85

Рисунок 5.10 – Базовый процесс ковки поковки «Левая часть вала»

Дефекты располагаются со стороны осевой части слитка, что подтверждает неэффективность схемы двойной осадки цилиндрической заготовки на заковывание этих дефектов слитка (степень деформации при осадке составляла 60 %, коэффициент укова при осадке $\approx 1,9$). Эти дефекты также не удалось удалить операцией прошивкой пустотелым прошивнем диаметром 700 / 400 мм (см. рис. 5.10), что свидетельствует о значительном увеличении осевой пористости в процессе осадки. Заковать осевые дефекты слитка было предложено за счёт осадки заготовки с четырёхлучевым сечением, полученной профилированием выпуклыми бойками (рис. 5.11). Все остальные технологические операции соответствовали базовому технологическому процессуковки. После биллетировки слитка заготовка прожималась выпуклыми бойками с 4-х сторон с обжатием ≈ 10 % на сторону, после чего осаживалась вогнутой сферической плитой (степень деформации $\varepsilon \approx 60$ %). Полученная заготовка с сечением, близким к форме квадрата со сторонами 2500 x 2500 мм, протягивалась плоскими бойками по ребрам (см. рис. 5.11). Сопоставление базового и нового технологических процессов представлено в таблице 5.5.

Результаты УЗК откованной поковки «Пустотелый диск» по новому технологическому процессу (приложение И2) показали отсутствие внутренних дефектов, превышающих требования заказчика, что подтверждает эффективность нового технологического процессаковки повокотипа дисков с осадкой четырёхлучевой заготовки, полученной профилированием выпуклыми бойками. Результаты УЗК на натуральных поковках подтверждают теоретические данные о влиянии вогнутых граней на подпор осевой зоны в процессе осадки профилированного слитка на четырёхлучевое сечение. Вогнутые грани заготовки способствуют заковке осевых дефектов слитка в процессе осадки профилированной заготовки. Анализ соответствующих технологических процессовковки позволяет сделать вывод, что количество нагревов соответствует базовому технологическому процессу (табл. 5.5).

Новая технология				
Нагрев		Уков фланец/ступица	Трудоемкость	
Описание	Эскизы		План	ФАКТ
I Нагрев 1. Биллетировка 2. Прожим прифилированной заготовки под осадку.		1,15 бил	99	90
II Нагрев 1. Осадка "крестообразной" заготовки сферической плитой. 2. Протяжка заготовительная под осадку через квадрат по ребрам.		2,47 ос 2,21 / 2,75 прот	154	415
III Нагрев 1. Осадка в кольцо. 2. Прошивка отверстия.		2,42 / 1,02 ос	112	103
IV Нагрев 1. Отделка поверхности. 2. Калибровка отверстия.		1,02 ос	101	92

Рисунок 5.11 – Новый процессковки поковки «Левая часть вала»

Таблица 5.5 – Результаты ковки поковок «Левая часть вала» с профилированием и осадкой четырёхлучевых заготовок

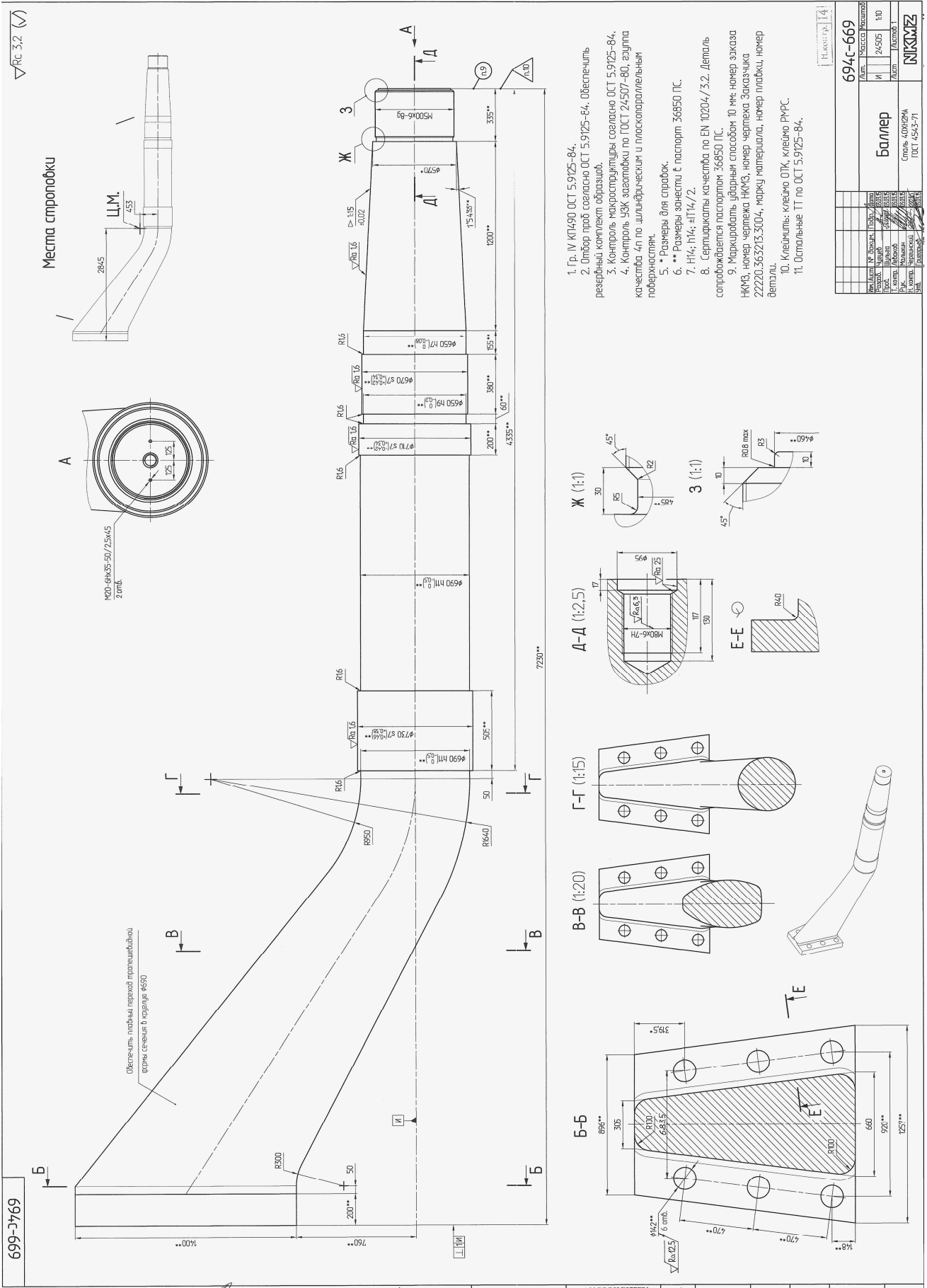
№ п/п	Марка стали	Мсл., т	Нагрев	Параметры ковки							УЗК	
				Операция	Обжатие на сторону		Осадка			УКОВ		
							Н/Дб	Н/Дтр	$\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0}$ %	бочка		шейки
					мм	%						
Базовый	20ГС	88,2	I	Биллетировка							1,15	П113-288 БРАК (протяженные зоны по всему периметру Ø2920)
			II	Осадка			1,88		59,4		2,46	
				Протяжка заготовительная							2,41	
			III	Осадка в кольце, прошивка			1,6		52,4		2,16 фланец / - ступица	
III а - IV	Осадка в кольце, прошивка, правка			0,56		34,8		1,53 фланец / 1,02 ступица				
4-Э-7	20ГС	88,2	I	Биллетировка							1,15	П114-237 + фланцевая часть: Ø5 - 5,5 мм (две зоны 50x60x10; 35x50x10)
				Прожим по биллету	200	10,5						
			II	Осадка			2,08	2,63	34,2		1,52	
				Осадка			1,16	1,33	38,5		1,63	
			II а	Протяжка на диаметр через диагональ							1,72	
			II б	Протяжка дополнительная							1,43	
			II в	Присадка			2,22		15,0		1,17	
Протяжка заготовительная								1,17				
III - IV	Осадка в кольце, прошивка			1,5				2,93 фланец / 1,02 ступица				

5.4 Промышленная ковка поковок ответственного назначения сложной формы с применением осадки четырёхлучевой заготовки

Среди крупных заготовок особое место занимают поковки ответственного назначения, которые имеют сложную форму, например баллер руля (рис. 5.12). Сложность формы таких деталей требует разработки специальных технологических процессовковки с высокой степенью проковки литой структуры слитка для повышения ударной вязкости стали, в том числе и при низких температурах. Эти детали должны обладать высокой сплошностью металла и отсутствием внутренних дефектов с размерами более 7 мм. Отсутствие внутренних дефектов обозначенного уровня требует обеспечение высокого коэффициента укова в цилиндрической части поковки ≈ 15 , что определяет применение операции осадки.

В результате промышленной апробации было установлено влияние процесса осадки четырёхлучевой заготовки на качество поковки «Баллер». Сопоставление полученных результатов целесообразно производить с базовым технологическим процессом аналогичной поковки, полученной с применением осадки цилиндрической заготовки плоскими плитами. Материал детали – 40ХН2МА, масса – 24 505 кг. В базовом и новом варианте масса поковки – 63 500 кг, а масса слитка – 91 000 кг. Слиток отлит сифонным способом с вакуумированием, геометрические параметры слитка представлены на рисунке 5.13. По базовой технологии было отковано 2 поковки, а по новому технологическому процессу 3 поковки [187].

Базовый технологический процесс предполагал биллетировку слитка с последующей его осадкой верхней плоской плитой (рис. 5.14). После протяжки осаженной заготовки на пластину с размерами 1700 x 2900 мм производится ковка участков поковки (рис. 5.15).



694с-669	
Мат. ПАСПОРТ	№10
И	24505
Лист	Листов 1
Сплав «ОПК»/РМРС	
ГОСТ 4543-71	
НКМЗ	

Рисунок 5.12 – Чертёж детали «Баллер», чертёж номер 694с – 669

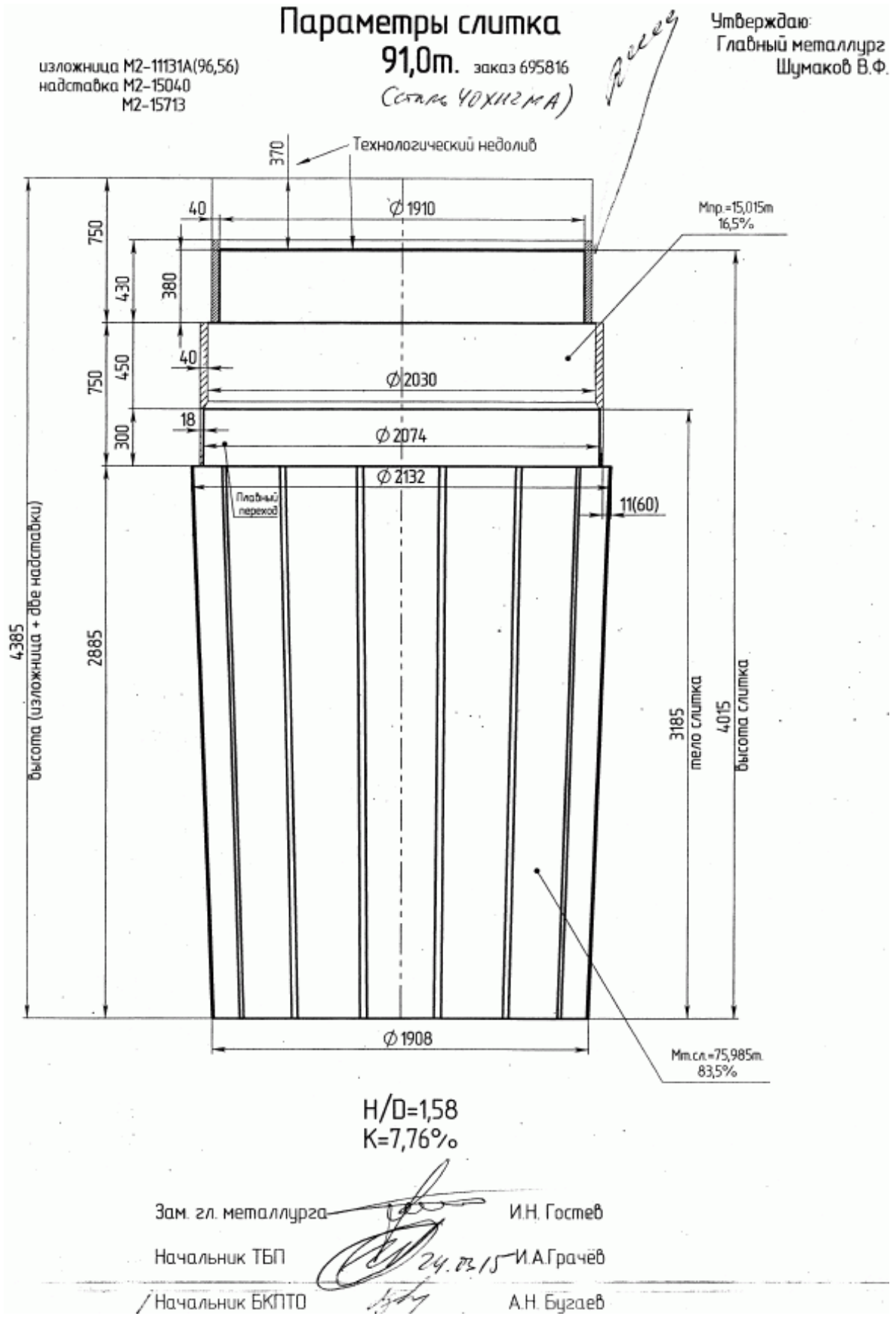


Рисунок 5.13 – Слиток массой 91 000 кг для поковки «Баллер»


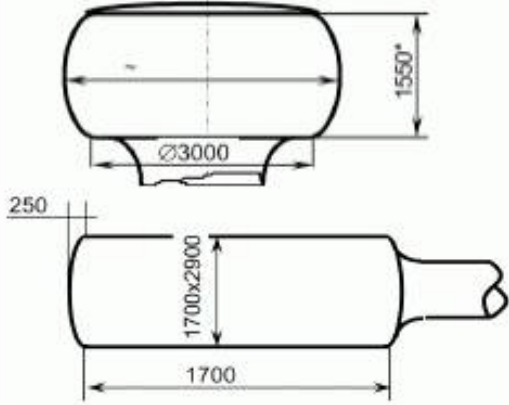
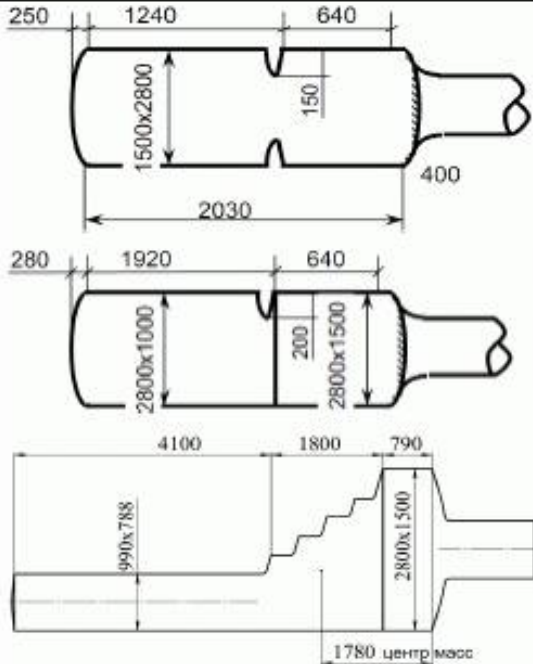
Традиционная технология					
Нагрев		Уков	Трудоемкость		
Описание	Эскизы		План	Факт	
				2151696	2151773
I Нагрев 1. Биллетировка		1,15 бил	96'	80'	95'
II Нагрев 1. Осадка цилиндрической заготовки плоской плитой. 2. Протяжка на пластину предварительная.		2,02 ос 1,33 прот	132'	110'	115'
III Нагрев 1. Протяжка на раскрой. 2. Подсечка. 3. Протяжка уступов на конусе вмеру. 4. Протяжка донного конца на пластину предварительно.		1,37 фл. 2,72 д. кон.	228'	257'	342'

Рисунок 5.14 – Базовый процессковки «Баллер»

Традиционная технология					
Нагрев		Уков	Трудоемкость		
Описание	Эскизы		План	Факт	
				2151696	2151773
IV Нагрев 1. Протяжка фланца вмеру. 2. Протяжка донного конца на восьмигранник предварительно. 3. Рубра прибыльного конца.		1,37 фл. 2,72 д.кон.	144'	100'	100'
V Нагрев 1. Протяжка донного конца вмеру. 2. Рубка с поддона. 3. Правка поковки.		2,72 д.кон.	122'	120'	68'
ИТОГО		4,15 б 44,56 ш	722'	667'	720'

Рисунок 5.14, лист 2

В отличие от базового технологического процессаковки баллера новый способ предполагает предварительное профилирование биллета выпуклыми бойками со степенью деформации при обжатии $\approx 10\%$ и последующую осадку четырёхлучевой заготовки до высоты ≈ 1550 мм (рис. 5.15), как и в базовом технологическом процессе. Окончательные формообразующие операцииковки совпадают с базовым технологическим процессом (см. рис. 5.14), чтобы установить влияние операции профилирования и осадки четырёхлучевой заготовки на заковку осевых дефектов слитка. Суммарная трудоёмкостьковки по базовому и новому технологическому процессу составила 720 мин и 772 мин соответственно. Процессковки баллера представлен на рисунке 5.16.

Новая технология				
Нагрев		Уков	Трудоемкость	
Описание	Эскизы		План	Факт
I Нагрев 1. Биллетировка 2. Прожим прифилерованной заготовки под осадку.		1,15 бил	156'	85'
II Нагрев 1. Осадка "крестообразной" заготовки плоской плитой. 2. Протяжка на пластину предварительная через квадрат по ребрам.		2,02 ос 1,33 прот	132'	165'

Рисунок 5.15 – Новый технологический процессковки поковки «Баллер» (отличительные операции)



Рисунок 5.16 – Окончательные переходыковки баллера по новому технологическому процессу

После окончательной термической обработки (рис. 5.17) был произведен УЗК и определены механические свойства полученной детали. УЗК показал отсутствие внутренних дефектов, которые превышают требования ГОСТ 24507-80 (табл. 5.6). Это позволяет сделать вывод о положительном влиянии схемы осадки четырёхлучевых заготовок при ковке поковок сложной конфигурации из особо крупных слитков.



Рисунок 5.17 – Деталь после окончательной термической обработки

Таблица 5.6 – Механические свойства и результаты УЗК деталей «Баллер»

№	№ фикс	Механические свойства							УЗК
		расположение пробы	σт, МПа	σв, МПа	δ, %	ψ, %	КСУ, Дж/см ² (+20°С)	твердость, НВ	
			≥490	≥658	≥12	≥35	≥45	212-269 факульт	Согласно ГОСТ 24507-80 гр. 4п (<Øэ7,2мм) по цилиндрическим и плоскопараллельным поверхностям
1	2151695	голова	565	807	15,8	44	50	243-285	дефектов Øэкв.2мм и более не обнаружено.
		хвост	605	824	13,8	40	48		
2	2151696	голова	562	769	20,5	48	52	230-281	
		хвост	607	796	18,8	45	49		
3	2151773	голова	578	828	15,2	39	53	230-253	
		хвост	614	840	13,2	37	51		

По новому технологическому процессу были также откованы 2 поковки для деталей «Баба верхняя» и «Баба нижняя». Материал – сталь А688, масса поковки 84,5 т и 74,4 т, соответственно. Массы применяемых слитков 118,0 т и 113,9 т, соответственно. После профилирования и осадки четырёхлучевой заготовки окончательную протяжку производили плоскими бойками с укладкой заготовки на ребро (рис. 5.18).



Рисунок 5.18 – Ковка четырёхлучевой заготовки плоскими бойками



а)

б)

Рисунок 5.19 – Деталь «Баба верхняя» (а) и «Баба нижняя» (б) после окончательной термической и механической обработок






Для полученных деталей определялись механические свойства и проводился УЗК. Полученные результаты (табл. 5.7) выше требований заказчика. Таким образом, операция профилирования перед осадкой способствует повышенной проработке литой структуры слитка и заковыванию внутренних дефектов.

Таблица 5.7 – Механические свойства и результаты УЗК деталей «Баба верхняя» и «Баба нижняя»

№	Наименование	№ фиксации	Механические свойства					Результаты УЗК	
			σт, МПа	σв, МПа	δ, %	ψ, %	КСУ, Дж/см ² (+20°С)		твёрдость заготовки после т/о, НВ
			315- 440	500- 650	≥11	≥27	≥34		167-235
1	баба нижняя	2151807	440	640	23	70	189 123	183-215	дефектов Øэкв.2мм и более не обнаружено
2	баба верхняя	2153736	430	581	23,8	70	145 140	170-186	

Обобщенные результаты внедрения новых технологических процессовковки с применением осадки четырёхлучевых заготовок для различных типовпоковок, развесов слитков и применяемых материалов представлены в таблице 5.8. Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы. Соответствие новых технологических процессов техническим требованиям заказчика по УЗК увеличилось с 59 % до 96 %, количество брака снизилось с 14 % до 4 %.

Таблица 5.8 – Обобщенные результаты внедрения новых технологических процессовковки

Марка стали	Номенклатура	УЗК требования	Процентная доля по объему		УЗК ФАКТ	Новая технология		УЗК ФАКТ				
			Млн.т	Млн.т		Млн.т	Млн.т					
20ГС	 Энергетическое машиностроение - Вал (левая часть)	ГОСТ 24507-80 гр. 2п (Ø2,5мм, Ø5мм)	62	88,2	1	-	Øэкс 5-8 мм; БРАК	62	88,2	1	+	соотв. ТТ
40ХН2МА	 Судостроение - Башпер	ГОСТ 24507-80 гр. 4п (Ø7,2мм)	-	-	-	-	-	63,5	91,0	3	+!!!	<Øэкс 2 мм>!!!
50ХГТМ	 Энергетическое машиностроение - Вал (левая часть)	EN 10228-3 по заказу б/экс: кл.4 (Ø2мм) 200 мм от поверхности; ост. кл.2 (Ø5мм); шейка: кл.3 (Ø3мм) 100 мм от поверхности 1921, гр.3 по заказу I (0,9-1,0)R - кл.D/A (Ø2мм); шейка: II (0,6-0,9)R - кл. C/c (Ø3мм); III (0,0-0,6)R - кл. B (Ø7мм); б/экс: II (0,6-0,9)R - кл. C (Ø5мм); III (0,0-0,6)R - кл. A	96,1	151,3	1	-	1 шт - Øэкс 6-16 мм; БРАК	96,1	151,3	2	+!!!	1 шт - <Øэкс 2 мм>!!! 1 шт - соотв. ТТ
70ХЗГНМФ	 Прокатные валки	EN10228-3, кл.3 (Ø3мм)	45,7	65,5	3	+	1 шт - соотв. ТТ	40,6	57,4	2	+	соотв. ТТ
75ХМФ		ОСТ 24.023.33-86, ТИ6142 (Ø3мм, Ø10мм)	41,3-41,9	54,7-59,2	3	+	соотв. ТТ	41,3-41,9	54,7-59,2	9	+!!!	2 шт - <Øэкс 2 мм>!!! 7 шт - соотв. ТТ
90ХФ			49,1	68,6	8	+	соотв. ТТ	49,1	68,6	2	+!!!	<Øэкс 2 мм>!!!
AISI 4142	 Энергетическое машиностроение - Вал ротора	ППП GE 0168892 И (Ø2мм, Ø3мм)	41,3	57,4	4	+	соотв. ТТ	49,1	68,6	1	-	скол при гр; БРАК
ИТОГО			1308	1892	28	64%		1308	1892	25	92%	
Качественный анализ реализации новой технологииковки крупных поковок с осадкой профилированных четырехлучевых заготовок.			397,0	1151,0	18	64%	62,84%	1163	1673	23	92%	88,38%
			431,4	631	10	36%	37,16%	1452	2199	2	8%	11,62%
			233,0	345,7	4	14%	18,81%	1452	2199	2	8%	11,62%

Выводы по разделу 5

1. Обобщены данные теоретических и экспериментальных исследований для проектирования и внедрения новых технологических процессовковки с применением операции осадки профилированных заготовок. Разработаны практические рекомендации для профилирования слитков на четырёхлучевое сечение и последующую их осадку. В производственных условиях изготовлена специальная конструкция бойков для профилирования на четырёхлучевую заготовку.

2. На ПАО «НКМЗ» спроектированы и внедрены новые технологические процессыковки крупных поковок с применением осадки четырёхлучевых заготовок. Полученные поковки соответствовали техническим условиям заказчика. Для новых технологических процессовковки были снижены величины коэффициентов укова поковки «Опорный валок» (как базового показателя качества будущей поковки и затрат на ковку) с 2,28 до 1,96 для бочки и с 25,0 до 21,5 для шеек валка. Полученные результаты УЗК подтверждают высокую эффективность схемы осадки профилированной заготовки на заковку и заварку осевых и подприбыльных дефектов слитка. Вогнутые грани заготовки повышают жесткость схемы напряженного состояния в осевой зоне в процессе осадки. Менее 5 % откованных поковок превышают требования Европейского стандарта SEP 1921 по размерам внутренних дефектов в прибыльной шейке (эквивалентный диаметр 11 мм против требуемых 10 мм). Таким образом, результаты УЗК на натуральных поковках подтверждают результаты теоретического исследования о влиянии вогнутых граней на подпор осевой зоны в процессе осадки профилированного слитка на четырёхлучевое сечение. Полученные результаты подтверждают влияние вогнутых граней профилированной заготовки на повышение уровня сжимающих напряжений в осевой зоне и заковке осевых дефектов в процессе осадки.

3. Новые технологические процессыковки повысили качество выпускаемой продукции, за счет повышения плотности металла осевой зоны слитка. Предложенные новые процессыковки повышают проработку литой структуры металла слитка и способствуют завариванию внутренних дефектов слитков при меньших значениях коэффициентов укова. Разработанные новые технологические процессыковки обеспечили повышение качества крупногабаритных поковок и снижение брака с 14 % до 4 %. Механические свойства деталей повысились в среднем на 8...11 %. Экономический эффект от внедрения новых технологических процессовковки крупных поковок на ПАО «НКМЗ» составил 1 299 873 грн. по уровню цен на 2015 г.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В работе решена важная научно-техническая задача совершенствования технологических процессовковки крупных поковок на основе применения способа осадки четырехлучевых заготовок, что позволило повысить качество поковок ответственного назначения за счет заковывания внутренних дефектов.

1. На основе литературного обзора было установлено, что существующие процессыковки поковок ответственного назначения не всегда соответствуют требованиям заказчика по УЗК. Одно из направлений совершенствования технологических процессовковки – профилирование заготовки перед осадкой. На основе литературного обзора были поставлены цели и задачи исследования. Разработаны специальные методики моделирования процессов профилирования и осадки четырехлучевых заготовок на основе МКЭ, а также методики исследования на свинцовых и стальных моделях с осевым отверстием, моделирующие осевую рыхлость, для выявления эффективной схемы деформирования, которая обеспечивает появление в осевой зоне сжимающих напряжений и заковку осевых дефектов.

2. На основе МКЭ было установлено, что профилирование выпуклыми бойками с углом 120° исключает образование значительных зон затрудненных деформаций под инструментом, что способствует проработке поверхностных и центральных слоёв заготовки. Установлено, что схемы профилирования на четырехлучевое сечение выпуклыми бойками с клиновым профилем повышают уровень сжимающих напряжений в осевой зоне заготовки, что способствует закрытию осевого дефекта заготовки при обжати на 20 %.

3. Конечно-элементное исследование процессов осадки четырехлучевых заготовок с различными углами и глубинами вогнутых граней позволили установить, что осевой дефект в процессе осадки закрывается интенсивнее при углах вогнутых граней $\alpha = 120^\circ \dots 150^\circ$ и глубине вогнутых граней

$d / D = 0,8 \dots 0,85$. Рекомендуемая степень осадки, при которой будет происходить заковка осевых дефектов, составляет не менее 50%.

4. Было установлено, что осадка четырёхлучевых заготовок, которые были предварительно получены протяжкой выпуклыми бойками с углом 120° на глубину 10 ... 20 %, обеспечивает минимальное смещение точек осевой зоны заготовки. Увеличение глубины и угла вогнутых граней практически прямо пропорционально уменьшает жёсткость схемы напряженного состояния в осевой зоне заготовки.

5. Формирование вогнутых граней при профилировании цилиндрической заготовки повышает силу деформирования. С увеличением глубины вогнутых граней сила осадки снижается. Угол вогнутых граней в диапазоне $145^\circ \dots 155^\circ$ обеспечивает максимум силы осадки. Это позволило исключить из рекомендаций этот угол бойков.

6. В результате экспериментальных исследований на моделях была подтверждена рациональная геометрия выпуклых бойков и механические режимы профилирования заготовки на четырёхлучевое сечение, а именно: угол выпуклых бойков – 120° , обжатие – 20 %. В процессе осадки четырёхлучевой заготовки интенсивное закрытие осевого дефекта происходит при деформации более 25 %. После осадки на 60 % средний диаметр дефекта уменьшается на 65 %. Исследования на стальных образцах позволили сделать вывод, что профилирование выпуклыми бойками с углом 120° и последующая осадка гарантирует заковку осевых дефектов заготовки.

7. Разработан новый способ и практические рекомендации для профилирования слитков на четырёхлучевое сечение и последующую их осадку. Спроектирована новая конструкция выпуклых бойков. Разработаны последовательность и методики составления новых технологических процессовковки с применением осадки четырёхлучевых заготовок. На ПАО «НКМЗ» внедрены новые технологические процессыковки крупных поковок с применением осадки четырёхлучевых заготовок. Разработанные новые технологические процессыковки обеспечили повышение качества крупногабаритных поко-

вок и снижение брака с 14 % до 8 %. Механические свойства деталей повысились в среднем на 8...11 %. Экономический эффект от внедрения новых технологических процессовковки крупных поковок на ПАО «НКМЗ» с учетом долевого участия составил 1 875 873 грн. по уровню цен на 2015 г. Результаты исследований внедрены в учебный процесс кафедры ОМД ДГМА.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Формирование прогнозируемых показателей качества поковок в условиях ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» / В. Л. Чухлеб, Д. Ю. Клюев, И. С. Прокопенко, А. В. Ашкелянец // *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 1 (26). – С. 103–106.
2. 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.
3. 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.
4. Чухлеб В.Л. Основы разработки рациональной технологииковки и исследование процесса протяжки с прогнозируемым уровнем качества поковок / В.Л. Чухлеб, Х. Дыя, А. Ковалек // *Metallurgy 2013. New technologies and achievements*, Czestochowa, 2013, №30. – с.109-122.
5. Дослідження впливу осадки і протяжки на механічні властивості та структуру поковок / В.Л. Чухліб, В.О. Гринкевич, Д.С. Олійник, А.І. Старосек, А.В. Ашкелянець, А.Ю. Борисенко // *Вісник Національного технічного університету України «ХПІ»*, 2013, № 42. – с. 205-209.
6. Василевский О. В. Исследование влияния величины обжатия на кинематические и энергосиловые характеристики при ковке цилиндрических заготовок в комбинированных бойках / О. В. Василевский, А. В. Грушко, В. В. Кухарь // *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 3 (32). – С. 44–48.

7. Дослідження впливу технологічних параметрів осадки на механічні властивості та структуру поковок зі сталі 20 / В.Л. Чухлеб, А.В. Ашкелянец, А. О. Ящук, О. Ю. Борисенко // Вестник НТУУ «КПИ». – 2012, № 66. – стр. 116-120.

8. Дурынин В. А. Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса стальных изделий из крупных поковок ответственного назначения / В. А. Дурынин, Ю. П. Солнцев. – СПб. : ХИМИЗДАТ, 2006. – 272 с. : ил. – ISBN 5-93808-127-0.

9. Дисперсионный анализ результатов исследования силовых режимов кузнечной протяжки заготовок с обкаткой в комбинированных бойках / Е. Ю. Балалаева, В. В. Кухарь, О. В. Василевский, О. А. Тузенко // Захист металургійних машин від поломок : міжвуз. зб. наук. пр. / ПДТУ. – Маріуполь, 2013. – Вип. 15. – С. 63–68.

10. Теоретическое определение параметров расчетной делительной сетки применительно к исследованию процесса протяжки заготовок в комбинированных бойках / В. В. Кухарь, О. А. Тузенко, Е. Ю. Балалаева, О. В. Василевский, С. А. Никольченко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 1 (40). – С. 68–74. – ISSN 2076-2151.

11. Экспериментальное исследование процессаковки углеродистой стали / В.Л. Чухлеб, А.Н. Тумко, А.В. Ашкелянец, О.А. Ярошенко // Сталь. – 2012, № 9. – стр. 60-62.

12. 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.

13. 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>.

14. Ameli A. A parametric study on residual stresses and forging load in cold radial forging process / Ameli A., Movahhedy M.R. // *Int J Adv Manuf Tech* 33(1-2):7-17. 2007. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-006-0453-2>

15. Тюрин В. А. Инновационные технологииковки / В. А. Тюрин // КИШП. ОМД. – 2006. – № 5. – С. 27–29.

16. 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, 139-142.

17. Development of forging process design to close internal voids / Kakimoto H, Arikawa T, Takahashi Y, Tanaka T, Imaida Y. // *J Mater Process Tech* 210(3):415-422. 2010. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.09.022>.

18. Strain function analysis method for void closure in the forging process of large sized steel ingot / Kun Chen, Yitao Yang, Guangjie Shao, Kejia Liu // *Computational Materials Science*, 51 (2012), pp. 72-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.011>.

19. 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 Tech* 211(6):1136-1145. 2011 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.017>.

20. 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](http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.12.010)

21. 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](http://dx.doi.org/10.1016/0378-3804(89)90004-1)

22. Kitamura K. Determination of local properties of plastic anisotropy in thick plate by small-cube compression test for precise simulation of plate forging / Kitamura K., Terano M. // CIRP Ann - Manuf Techn 63(1):293-296. (2014) <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.038>

23. 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](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(91)90049-K)

24. 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), 49–52. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.135>.

25. 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.

26. Савонькин М. Б. Исследование течения материала в отверстие при осадке цилиндрических заготовок плитами с осевым отверстием / М. Б. Савонькин, В. А. Тюрин // КИП. ОмД. – 2009. – № 9. – С. 9–12.

27. Michel Saby A geometry-dependent model for void closure in hot metal forming / Michel Saby, Pierre-Olivier Bouchard, Marc Bernacki // Finite Elements in Analysis and Design 105 (2015)63–78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.finel.2015.07.003>

28. А. с. 368924 СССР, МКИ В 021 к 1/32. Способковки заготовок типа дисков со ступицей / И. О. Катков, В. М. Манаев, В. Д. Сошин, В. Н. Трубин, С. Ф. Орлов, Н. Ф. Рудалев, В. Ф. Максименко, В. Н. Токарев (СССР). – № 1623459 / 25–27 ; заявл. 23.11.71 ; опубл. 08.01.73 ; Бюл. № 10. – 2 с. : ил.

29. А. с. 694273 СССР, МКИ В 021 J 13/02. Инструмент для разгонки полотна дисков / В. М. Манаев, И. С. Катков, Ю. П. Илюхин, В. Ф. Забудько (СССР). – № 2625994 / 25–27 ; заявл. 12.06.78 ; опубл. 30.10.79 ; Бюл. № 40. – 3 с. : ил.

30. Dudra, S.P. Analysis of void closure in open-die forging / Dudra, S.P., Im, Y.T., Int. // J. Mach. Tools Manuf. 30, 65–75. 1990. [doi:10.1016/0890-6955\(90\)90042-H](https://doi.org/10.1016/0890-6955(90)90042-H)

31. А. с. 1091972 СССР, МКИ В 021 J 5/00. Способ изготовления поковок / Б. А. Мигачев, А. И. Голомидов, Г. М. Гликин, В. П. Федотов, Н. М. Добыш, Е. В. Лысаченко (СССР). – № 3423367 / 25–27 ; заявл. 16.04.82 ; опубл. 15.05.84 ; Бюл. № 18. – 3 с. : ил.

32. Соколов В. Е. О природе волосовых трещин в поковках турбинных дисков из стали 34ХНЗМА / В. Е. Соколов, А. И. Потапов, Н. Н. Александрова // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 4. – С. 8.

33. 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)

34. Тюрин В. А. Стадийность процесса и потокораспределение при осадке плитами с осевым отверстием / В. А. Тюрин, М. Б. Савонькин // КШП. ОМД. – 2009. – № 3. – С. 17–20.

35. А. с. 1278092 СССР, МКИ Кл. 3 В 021 J 5/00. Способ осадки слитков / Л. Н. Соколов, В. Н. Ефимов, В. О. Кононенко, И. Я. Микаловская, П. А. Курбатова, В. В. Кривошеева (СССР). – № 3762986 / 25–27 ; заявл. 29.06.84 ; опубл. 23.12.86 ; Бюл. № 47. – 4 с. : ил.

36. Ming-Song Chen Numerical simulation and experimental verification of void evolution inside large forgings during hot working / Ming-Song Chen, Y.C Lin. // International Journal of Plasticity 49 (2013) 53–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijplas.2013.02.017>

37. Арефьев В. Д. Повышение качества поковок крупногабаритных дисков из стали 38Х2Н2МА // Кузнечно-штамповочное производство. – 1987. – № 9. – С. 13–15.

38. Голомидов А. И. Влияние способа профилирования на деформированное состояние металла заготовки после осадки / А. И. Голомидов,

Б. А. Мигачев, А. И. Потапов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1983. – № 12. – С. 69–71.

39.Рех Р. Достижения в области технологии свободнойковки // Черная металлургия. – 2007. –№ 3. – С. 50–56.

40.Иванова Э. А. Исследование формоизменения и поврежденности материала при осадке / Э. А. Иванова, А. А. Пасынков // Известия ТулГУ. – Тула. – 2005. – № 2. – С. 168–173. – (Серия : Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением).

41.Fortschritte beim Freiformschmieden in den letzten 25 Jahren / S. Sheikhi, R. Rech, F. Wahlers, D. Bokelmann, C. Wupperman / K. W. Bonfig, R. Notzel, K. J. Steingier // Stahl und Eisen. – 2010. – № 1. – P. 2–14.

42.Aksakal B. Determination of experimental axial and sideways metal flow in open die forging / B. Aksakal, F. H. Osman, A. N. Bramley // Material and Desing – 2008. – № 3. – P. 576–583.

43.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) 2457 – 2462 [doi:10.1016/j.proeng.2014.10.350](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.350)

44.Analysis of the cogging process for heavy ingots by finite element method and physical modeling method / J. R. Cho, W. B. Bae, Y. H. Kim, S. S. Choi, D. K. Kim // J. Mater. Process. Technol. – 1998. – № 80–81. – P. 161–165.

45.Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr₂Ni₄MoV forging ingot / Wang J., Fu P., Liu H., Li D., Li Y. // Mater. Design 35: 446-456. 2012 <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.056>

46.A criterion for void closure in large ingots during hot forging / Zhang X-X., Cui Z-S., Chen W., Li Y. // J Mater Process Tech 209(4):1950-1959. 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.051>

47. Zhbankov I.G. Forging of ingots without hot tops / Zhbankov I.G., Perig A.V. // Mater. Manuf. Process 28(3):229-235. 2013. <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2012.718472>

48. Zhbankov I.G. Intensive shear deformation in billets during forging with specially formed anvils / Zhbankov I.G., Perig A.V. // Mater. Manuf. Process 28(5):577-583. 2013. <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2013.763974>

49. Tanaka, Y. Development of high purity large forgings for nuclear power plants / Y. Tanaka, I. Sato // J. Nucl. Mater. – 2011. – № 417. – P. 854–859. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2010.12.305>

50. Тюрин В. А. Производство поковок ротора униполярного генератора // КИШП. ОМД. – 2000. – № 7. – С. 10–15.

51. Онищенко А. К. Единая теория и причины образования флокенов в сталях / А. К. Онищенко // КИШП. ОМД. – 2007. – № 1. – С. 8–11.

52. Park C.Y. A study of void crushing in large forgings: II. Estimation of bonding efficiency by finite-element analysis / Park C.Y., Yang D.Y. // J Mater Process Tech 72(1):32-41. 1997 [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00126-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00126-X)

53. Improvement of Plate's Shape for Ingots Upsetting / Oleg E. Markov, Natalia A. Rudenko, Igor A. Grachov, Aleksandar Ristovski, Vladimir Radojičić // Applied Mechanics and Materials, 2016. – Vol. 830. – P 141-150.

54. 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).

55. Тюрин В. А. Инновационные технологииковки 21 века / В. А. Тюрин, А. М. Овечкин // КИШП. ОМД. – 2001. – № 3. – С. 41–44.

56. 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) 317–328. [doi:10.1016/j.msea.2015.12.042](https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.12.042)

57.Тюрин В. А. Разновидности процессов кузнечной протяжки / В. А. Тюрин // КШП. ОМД. – 2009. – № 9. – С. 5–8.

58.Пат. 2314175, МПК В 21 J 13/02 (2006.01). Четырехбойковое ковочное устройство / Володин А. М., Лазоркин В. А., Петров Н. П., Никитин В. В. ; заявитель и патентообладатель ОАО «Тяжпрессмаш». – № 2005139668/02 ; заявл. 19.12.2005 ; опубл. 10.01.2008, Бюл. № 7.

59.Володин А. М. О достоинствах технологииковки слитков на гидравлических ковочных прессах в четырехбойковых ковочных устройствах / А. М. Володин, В. А. Лазоркин // КШП. ОМД. – 2009. – № 11. – С. 17–23.

60.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.

61.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) 122–131. [doi:10.1016/j.engfailanal.2016.05.027](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.05.027)

62.Потапов А. И. Выбор геометрии бойков и режима протяжки при изготовлении поковок валов / А. И. Потапов // КШП. ОМД. – 2009. – № 6. – С. 19–26.

63.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, 443-450.

64.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 97-101:3079-3084. (2010) <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.3079>.

65.Антощенко Ю. М. Оптимизация технологических параметровковки – протяжки / Ю. М. Антощенко // КШП. ОМД. – 2000. – № 12. – С. 8–10.

66. Banaszek, G. Theoretical and laboratory modelling of the closure of metallurgical defects during forming of a forging / G. Banaszek, A. Stefanik // J. Mater. Process. Technol. – 2006. – № 177. – P. 238–242.

67. Markov O. Development of Energy-saving Technological Process of Shafts Forging Weighting More Than 100 Tons without Ingot Upsetting / O. Markov, M. Oleshko, V. Mishina // Metallurgical and Mining Industry, 3. 2011, pp. 87-90.

68. А. с. 1161219 СССР, МКИ В 21 J 1/04. Способковки заготовок / А. Г. Пименов, В. Г. Зорин, А. А. Мишулин, Б. С. Литвак (СССР). – № 3340425 / 25–27 ; заявл. 18.09.81 ; опубл. 15.06.85 ; Бюл. № 22. – 3 с. : ил.

69. Белова Л. П. Ковка валов больших сечений / Л. П. Белова, А. Н. Дубков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1984. – № 11. – С. 8–9.

70. Dyja H. Modelling of shape anvils in free hot forging of long products / H. Dyja, G. Banaszek, S. Mroz // J. Mater. Process. Technol. – 2004. – P. 157–158, 131–137.

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

72. 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 Technol. 211(6):1005-1013. (2011) <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.01.001>

73. А. с. 218631 СССР, МКИ В 21 J 1/04. Способ протяжки крупных слитков / Я. М. Охрименко, В. Н. Лебедев, В. А. Тюрин (СССР). – № 1125215 / 25–27 ; заявл. 02.01.67 ; опубл. 17.05.68 ; Бюл. № 17. – 3 с.

74. А. с. 837530 СССР, МКИ В 21 J 5/00. Кузнечный боёк / А. А. Мишулин, Б. С. Литвак, И. Н. Панкратов (СССР). – № 2828916 / 25–27 ; заявл. 09.10.79 ; опубл. 15.06.81 ; Бюл. № 22. – 2 с.

75. Дубков А. Н. Исследование качества поковки, откованной из слитка с $H/D = 1$ стали 25ХНЗМФА / А. Н. Дубков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1977. – № 4. – С. 20–22.

76. Балуев С. А. Влияние формы слитка и технологии егоковки на качество поковок валков / С. А. Балуев, В. А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – № 1. – С. 7–10.

77. Мигачев Б. А. Экспериментальное исследование деформированного состояния при формоизменении заготовок с тrefообразным поперечным сечением / Б. А. Мигачев, В. П. Волков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1995. – № 10. – С. 5–7.

78. Повышение качества деформированного металла при ковке крупных поковок валов / А. И. Мохов, В. С. Максимук, А. Ю. Петунин, С. И. Данилин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1995. – № 5. – С. 5–7.

79. Соколов Л. Н. Ковка широких пластин без осадки слитков / Л. Н. Соколов, В. Н. Ефимов, М. И. Яковлев // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – № 2. – С. 23–24.

80. Белкин М. Я. Ковка крупных слитков через пластину с обжимом бойком с гиперболическим рабочим профилем / М. Я. Белкин, В. П. Кривошеев, Г. А. Пименов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – № 1. – С. 5–7.

81. 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. [doi:10.1016/j.matdes.2013.11.079](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.079)

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

83. Comparison of progressive schemes of the forging drawing for shafts manufacturing / O.E. Markov, N.A. Rudenko, Mirsad Taric, Veis Š. Šerifi // Metalurgia international. – 2013. Vol. 18. № 9. – P. 48 – 53.

84. 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. [DOI 10.1007/s00170-011-3876-3](https://doi.org/10.1007/s00170-011-3876-3)

85. 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.

86. 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiplas.2013.02.017>

87. Simulation of the new technology of forging of blanks such as slabs and plates made of ferrous metals and alloys / Naizabekov A., Lezhnev S., Krivtsova O., Tolkushkin A., Panin E. // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering.* Volume 62. Issue 2. 2014, P. 75-80. http://www.journalamme.org/vol62_2/6224.pdf

88. 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* 237 (2016) 371–385. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.06.030>

89. Modelling of Damage during Hot Forging of Ingots / Christiansen P., Jesper H. Hattel, Niels Bay, and Paulo A.F. Martins // *The 5th International Conference, Czech Republic* (2013). http://orbit.dtu.dk/files/58423663/Christiansen_P_T6.pdf

90. 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.

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, Jiang Z. // Engineering Failure Analysis 59 (2016) 197–210. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.10.005>

92. Vafaeseifat, A. Finite Element Simulation for Blank Shape Optimization in Sheet Metal Forming // Materials and Manufacturing Processes 2011, 1, 93-98.

93. Thermal-Elastic-Plastic Simulation of Internal Stress Field of Quenched Steel 40Cr Cylindrical Specimens by FEM / Liu, L.; Liao, B.; Li Q.; Wang Y.; Yang Q. // Materials and Manufacturing Processes 2011, 5, 732-739.

94. Марков О.Є. Зміна розмірів осьових дефектів при осадженні заготовок / Марков О.Є. // Обработка материалов давлением : сб. научн. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 4 (29). – С. 103-110. – ISSN 2076-2151.

95. Васильев К. И. Компьютерное моделирование процесса формоизменения цилиндрической заготовки при открытой осадке / К. И. Васильев, М. В. Соловьёв, Е. А. Королёва // КШП. ОМД. – 2005. – № 9. – С. 41–43.

96. Воронцов А. Л. Пластическое течение при осадке полых заготовок / А. Л. Воронцов // КШП. ОМД. – 2007. – № 1. – С. 3–8.

97. Воронцов А. Л. Общая теория контурной осадки / А. Л. Воронцов // КШП. ОМД. – 2008. – № 3. – С. 8–15.

98. Воронцов А. Л. Определение силовых и геометрических параметров контурной осадки / А. Л. Воронцов // КШП. ОМД. – 2008. – № 4. – С. 3–12.

99. Гринкевич В. А. Компьютерное моделирование процесса осадки при помощи модифицированного дискретного метода переменной вязкости / В. А. Гринкевич // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 351–353.

100. Гринкевич В. А. Краткий обзор современных методов решения краевых задач обработки металлов давлением и основные тенденции их развития / В. А. Гринкевич, В. Н. Данченко // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т. 5. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2002. – С. 113–115.

101. Гринкевич В. А. Экспериментально-расчетный метод решения краевых задач ОМД / В. А. Гринкевич, Г. Г. Шломчак, В. Н. Данченко // *Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т. 5. Пластична деформація металів.* – Дніпропетровськ : Системні технології, 2002. – С. 115–118.

102. 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), pp. 121-124. ISSN 1960-6206. [DOI: 10.1007/s12289-009-0618-2](https://doi.org/10.1007/s12289-009-0618-2)

103. Иванов К. М. Оценка точности упругопластического анализа метода конечных элементов / К. М. Иванов // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць.* – Краматорськ : ДДМА, 2002. – С. 57–62.

104. Just H. Blick in das Innere eines Freiformschmiedeprozesses / Hendrik Just // *Stahl und Eisen.* – 2006. – № 12. – P. 70–72.

105. 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. 2014. <http://dx.doi.org/10.1142/S1758825114500288>.

106. Three-Dimensional Nonlinear Finite Element Analysis of Hot Radial Forging Process for Large Diameter Tubes / Chen J., Chandrashekhara K., Richards V.L., Lekakh S.N. // *Mater. Manuf. Processes.* 25(7), 669–678. 2010. <http://dx.doi.org/10.1080/10426910903536790>.

107. 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. – С. 1339–1342. [doi:10.1016/j.matdes.2006.02.004](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.02.004)

108. 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 53(1-4): 301-312. (2011) <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-010-2810-4>.

109. Jafarzadeh, H. Numerical and Experimental Studies of Splines Produced by Injection Forging Process / Jafarzadeh, H., Zadshakoyan, M. // Materials and Manufacturing Processes. 5, 703–712. 2011. <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2010.496124>.

110. 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 40(3-4):253-260. (2009). <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-007-1337-9>.

111. Pantalé O. Influence of the constitutive flow law in FEM simulation of the radial forging process / Pantalé O., Gueye B. // Journal of Engineering 2013, Article ID 231847, 8 pp. (2013). <http://dx.doi.org/10.1155/2013/231847>.

112. Scarabello, D. FE modeling of large ingot hot forging / D. Scarabello, A. Ghiotti, B. Bruschi // Int. J. Mater. Form. 3 (Suppl. 1), 335–338. 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-010-0775-3>.

113. 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 (2011), pp.359-362. ISSN 1960-6206. [DOI: 10.1007/s12289-010-0781-5](http://dx.doi.org/10.1007/s12289-010-0781-5)

114. 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. [doi:10.1016/j.ijmecsci.2015.01.012](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.01.012)

115. 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.

116. 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.

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

118. Optimization of open die forging of round shapes using FEM analysis / S. K. Choi, M. S. Chun, C. J. Van Tyne, Y. H. Moon // J. Mater. Process. Technol. – 2006. – № 1. – P. 88–95.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.09.010>

119. Новый принцип разработки САПР ТПковки / А. В. Коновалов, С. В. Арзамасцев, О. Ю. Муйземнек, Д. С. Казанский, С. Д. Шалягин, П. Ю. Гагарин // КШП. ОМД. – 2007. – № 1. – С. 42–47.

120. Юст Х. Сущность процесса свободнойковки / Х. Юст // Черные металлы. – 2007. – № 5. – С. 46–48.

121. Рябичева Л. А. Математическое моделирование свободной осадки медной заготовки методом конечных элементов / Л. А. Рябичева, Д. А. Усатюк // Металл и литье Украины. – 2004. – № 11. – С. 35–38.

122. Рябичева Л. А. Применение метода термомеханических коэффициентов к анализу напряженно-деформированного состояния при горячей осадке // Л. А. Рябичева, Д. А. Усатюк // Вісн. Східноукраїнського нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2006. – № 6 (100). – Ч. 1. – С. 45–49.

123. Миленин А. А. Моделирование процессов трехмерной деформации неоднородных материалов с помощью метода конечных элементов / А. А. Миленин, В. Т. Подвисоцкий // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 21–23.

124. Усатюк Д. А. Совершенствование процесса деформирования и разработка поковок повышенной точности с использованием метода конечных элементов : дис... канд. техн. наук : 05.03.05 / Усатюк Дмитро Андрійович. – Луганск, 2007. – 210 с.

125. Биба Н. В. Применение программы моделирования процессов ОМД QFORM для обучения и исследовательской работы в университетах /

Н. В. Биба, Ю. А. Гладков, О. А. Белокуров // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії : тематич. зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 9–14.

126. Голенков В. А. Методы математического моделирования и новые задачи ОМД / В. А. Голенков, П. Г. Морев, С. Ю. Радченко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії : тематич. зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 15–19.

127. Condition of closing voids in solid cylinders during hot forging / C. Zhenshan, R Guangsheng, X. Binque, X. Chunguo, L. Giuhua // Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, China. Tsinghua Univ. Sci. and Technol. – 2003. – № 2. – P. 227–229.

128. Weides G. Optimisation of the forging process of profiled discs for low pressure turbine rotors by FEM simulation / G. Weides, N. Blaes, D. Bokelmann // 17 International Forgemasters Meeting, Santander, Spain, (3–7 Nov. 2008). – 2008.

129. Бочаров Ю. А. Второй Европейский семинар по моделированию процессов в обработке давлением / Ю. А. Бочаров, В. И. Балаганский // КШП. ОМД. – 2002. – № 9. – С. 38–41.

130. Данченко В. М. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы / В. М. Данченко – Днепропетровск : Системные технологии, 2005. – 448 с.

131. Кухарь В. Д. Моделирование разделительных операций ОМД методом конечных элементов / В. Д. Кухарь, А. В. Чистяков // КШП. ОМД. – 2002. – № 6. – С. 41–45.

132. Грешнов В. М. Применение теории пластичности изотропного материала с анизотропным упрочнением при математическом моделировании операций формообразования / В. М. Грешнов, А. М. Боткин, А. В. Напалков // Известия вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 1. – С. 27–30.

133. Дыя Х. Forge 3 в моделировании процессов обработки давлением / Х. Дыя // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т. 5. Пластична деформація металів. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2002. – С. 23–33.
134. Иванов К. М. Метод конечных элементов в технологических задачах ОМД : учеб. пособие / Иванов К. М., Шевченко В. С., Юргенсон Э. Е. – СПб. : ПИМаш, 2000. – 224 с.
135. Copetti, M. Finite element approximation to a contact problem for a nonlinear thermoviscoelastic beam / Copetti, M., Fernandez, J.J. // Math. Anal. Appl. 383(2), 506–521. 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmaa.2011.05.055>
136. Atanasovska, I. Rate independent plasticity – a material nonlinearity in finite element analysis / Atanasovska, I., Moncilovic, G., Olivera, E. // 11th Int. conf. RaDMI 2011. 1, 435–443. http://www.radmi.org/pdf/radmi_2011_voll.pdf
137. Analysis and FEM Simulation of Temperature Field in Wet Surface Grinding / Mao, C., Zhou, Z.,H., Ren, Y.H., Zhang, B. // Mater. Manuf. Processes. 25 (6), 399–406. 2010. <http://dx.doi.org/10.1080/10426910903124811>
138. Narayan, A. Investigation of Temperature Distribution in the Workpiece during Creep Feed Surface Grinding Using Finite Element Method / Narayan, A., Yadava, V. // Mater. Manuf. Processes. 27 (10), 1101–1109. 2012. <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2011.654154>
139. Машеков С. А. Математическая модельковки круглой заготовки специальными и комбинированными бойками / С. А. Машеков, Е. А. Зимаков, К. М. Илюхин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 9. – С. 39–40.
140. Методика проведения измерений деформированного состояния образца при ковке по методу ОЧП / В. К. Воронцов, С. А. Машеков, А. В. Котелкин, С. М. Дюсекенов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 9. – С. 19–20.
141. Найзабеков А. Б. Анализ деформированного состояния и качества заготовок при ковке / А. Б. Назайбеков, В. В. Исаенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1998. – № 2. – С. 17–20.

142. Опытковки крупногабаритных плит большой толщины / Л. П. Белова, Б. М. Шлякман, Ю. И. Рыбин, Л. О. Комова // КШП. ОМД. – 2001. – № 10. – С. 7–10.

143. Найзабеков А. Б. Исследование процесса деформирования заготовок в специальном инструменте без существенного изменения начальных размеров / А. Б. Найзабеков, С. Н. Лежнёв, А. Ж. Булебаева // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 6. – С. 23–25.

144. Найзабеков А. Б. Анализ качества металла, откованного в замковых бойках / А. Б. Найзабеков, А. А. Кулбажаева, Н. Ю. Шмидт // Известия вузов. Черная металлургия. – 2004. – № 2. – С. 27–30.

145. Ковка крупных плит без осадки слитков / И. С. Алиев, О. Е. Марков, В. М. Олешко, И. Г. Савчинский // Металлург. – Москва, 2004. – Спецвыпуск. – С. 35–37.

146. Соколов Л. Н. Влияние формы V-образных бойков на устранение осевых дефектов слитков при ковке крупных плит / Л. Н. Соколов, О. Е. Марков, В. М. Олешко // Известия ТулГУ. : сб. науч. трудов. В 2-х ч. – Тула, 2004. – Ч. 1. – С. 131–135. – (Серия : Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением).

147. The Influence of Block Shape on the Elimination of Axial Defects of Ingots when Forging Large Forged Pieces / I. S. Aliew, L. N. Sokolov, O. E. Markov, A. N. Lagutina, V. M. Oleshko // Nowe technologie i osiagniecia w metalurgii i inzynierii materialowej. – Czestochowa, 2004. – № 39. – P. 375–382.

148. Zhbakov Iaroslav G. Rational parameters of profiled workpieces for an upsetting process / Iaroslav G. Zhbakov, Oleg E. Markov, Alexander V. Perig // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – May 2014, Vol. 72, Issue 5-8. – Pp. 865-872. Access mode: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-014-5727-5>.

149. Марков О. Е. Разработка схемыковки валов с интенсивными пластическими деформациями / О. Е. Марков. // Вісник національного технічно-

го університету «ХП»: зб. наук. праць. – 2013. – № 43 (1016). – С. 162-169. – ISSN 2079-5459.

150. Марков О. Є. Модель урахування релаксації напружень у металі при гарячому деформуванні / О. Є. Марков . // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях: зб. наук. праць. – 2015. – № 47 (1056). – С. 81-87.

151. Markov O.E. Forging of Large Pieces by Tapered Faces / O.E. Markov // Steel in Translation. 42 (12): 808 – 810. (2012) <http://dx.doi.org/10.3103/S0967091212120054>.

152. Каргин С. Б. Построение полей линий скольжения при протяжке круглой заготовки двумя профилированными бойками / С. Б. Каргин, В. В. Кухарь, В.Ф. Левандовский // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА. 2011. – № 4(29). – С. 3–10.

153. Каргин С. Б. Анализ технологииковки валов из кованной трехлучевой заготовки / С. Б. Каргин, С. Б. Каргин, В. В. Лысенко, Р. С. Николенко // Инженерные системы : труды международного форума. – М., 2012. – С. 201–204.

154. Пат. 50412 Україна, МПК (2009) В 21 J 5/00. Пристрій для протяжки поковок / Каргін С. Б., Каргін Б. С., Титаренко А. В., Тихоненко Р. І., Семенова Н. В. (Україна). – № u200912274; заявл. 30.11.09; опубл. 11.06.10. – Бюл. № 11. – 4 с.

155. Пат. 52289 Україна, МПК (2009) В 21 J 5/00. Пристрій для ковальської протяжки / Каргін С. Б., Каргін Б. С., Кухар В. В., Тихоненко Р. І. (Україна). – № u201000628; заявл. 22.01.10; опубл. 25.08.10. – Бюл. № 16. – 2 с.

156. Пат. 57339 Україна, МПК (2011.01) В 21 J 5/00. Сокира ковальська для рубки гарячого металу / Каргін С. Б., Каргін Б. С., Ткачов Р. О., Вороніна Н. О., Лисенко В. В. (Україна). – № u201008651; заявл. 12.07.10; опубл. 25.02.11. – Бюл. № 4. – 4 с.

157. Пат. 63818 Україна, МПК (2011.01) В 21 J 5/00. Пристрій для протяжки злитків / Каргін С. Б., Каргін Б. С., Кухар В. В., Марков О. Є., Ковальова Я. О., Левандовський В. Ф. (Україна). – № u201102621; заявл. 09.03.11; опубл. 25.10.11. – Бюл. № 20. – 3 с.

158. Пат. 65460 Україна, МПК В 21 J 13/02 (2006.01). Вузол для протягання поковок / Каргін С. Б., Каргін Б. С., Кухар В. В., Марков О. Є., Левандовський В. Ф., Лисенко В. В. (Україна). – № u201105235; заявл. 26.04.11; опубл. 12.12.11. – Бюл. № 23. – 2 с.

159. Разработка конструкции профилированных бойков и элементов технологииковки трехлепестковой и четырехлепестковой заготовки для последующей протяжки / С. Б. Каргин, Б. С. Каргин, В. В. Кухарь, О. Е. Марков, Р. И. Тихоненко // Вестник ХПИ : сб. науч. тр. – Харьков, 2010. – № 17. – С. 81–85.

160. Расчет конфигурации бойков для проведения рациональной протяжки круглых поковок / С. Б. Каргин, Б. С. Каргин, В. В. Кухарь, О. Е. Марков // Збірник наукових праць : Серія : Технічні науки. – Вінниця : «ВНАУ». – 2010. – № 5. – С. 127–130.

161. Каргин С. Б. Теоретический анализ напряженно-деформированного состояния слитка при ковке на трехлепестковую заготовку / С. Б. Каргин, О. Е. Марков, В. В. Кухарь // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА. 2011. – № 1 (26). – С. 17–22.

162. Markov O. E. Improvement of plate's shape for ingots upsetting / Oleg E. Markov, Natalia A. Rudenko, Igor A. Grachov // 14th International Conference RaDMI 2014 : Proceedings on CD-ROM. – Topola, Serbia, 2014. – Vol. 1. – P. 268-276. – ISBN 978-86-6075-047-3.

163. Влияние формы бойков на устранение осевых дефектов слитков при ковке крупных поковок / Л. Н. Соколов, О. Е. Марков, В. М. Олешко, И. Г. Савчинский // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 290–295.

164. 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.

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

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

167. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд ; пер. с англ. А. А. Шестакова. – М. : Мир, 1979. – 392 с.

168. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация : пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган ; пер. с англ. под ред. Б. И. Квасова. – М. : Мир, 1986. – 318 с.

169. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – СПб. : ПИТЕР, 2004, – 560 с.

170. Марков О. Е. Deform – 3d для конечно-элементного моделирования процессовковки крупных слитков / О. Е. Марков // Инженерные системы – 2011 : междунар. науч.-практич. конф., г. Москва, 5–8 апреля 2011 г. – М. : РУДН, 2011. – С. 30–31.

171. Применение способа осадки слитков кольцами в процессахковки валов / И. С. Алиев, О. Е. Марков, М. В. Олешко, В. Н. Злыгорев // Обработка материалов давлением : сб. науч. трудов. – Краматорск : ДГМА, 2010. – № 2 (23). – С. 94–98. – ISSN 2076-2115.

172. Внедрение энергосберегающего технологического процессаковки крупных слитков без осадки / О. Е. Марков, В. М. Олешко, В. Н. Злыгорев, И. А. Грачев // КШП. ОМД. – Москва, 2011. – № 10. – С. 33–36.

173. Markov O. Investigation of the New Technological Process of Forging Large Shafts without Upsetting / O. Markov, V. Oleshko, V. Zligorev // METAL

2012: Proceedings on CD-ROM. – Brno, Czech Republic, 2012. –ISBN 978-80-87294-29-1. Available on Web site : <http://www.metal2012.com>

174. Элементы штамповки в процессахковки крупных поковок / Л. И. Алиева, Я. Г. Жбанков, В. Н. Злыгорев, Л. В. Таган // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2014. – №1(38). – С. 62–70.

175. 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. – Харьков : НТУ «ХПІ», 2015. – № 47 (1166). – С. 7–10.

176. Повышение качества крупных поковок за счет применения схемковки с интенсивными пластическими деформациями / О. Е. Марков, В. Н. Злыгорев, Н. А. Руденко, А. В. Коляденко // Научный вестник ДГМА. – 2015. – № 2(17E). – С. 115-119.

177. Формоизменение и напряженно-деформированное состояние заготовки при ковке с применением профилирования заготовки / О. Е. Марков, В. Н. Злыгорев, Н. А. Руденко, Ю. О. Ячмень // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. трудов. – Краматорск, 2015. – № 3 (18E). – С. 213–219. – ISSN 2219-7869.

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

179. A new process for forging shafts with convex dies. Research into the stressed state/ Oleg E. Markov , Alexander V. Perig, Vitalii N. Zlygoriev, Marina A. Markova, Alexander G. Grin // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. [DOI:10.1007/s00170-016-9378-6](https://doi.org/10.1007/s00170-016-9378-6).

180. Марков О.Е. Совершенствование технологииковки крупных плит V-образными бойками / О.Е. Марков, Е.А. Цветкова, В.Н. Злыгорев // IV междунар. науч.-практ. конф. НКМЗ. – Краматорськ, 2005. – С. 94–96.

181. Уменьшение металлоемкости сложнопрофилированных полых изделий, получаемых ковкой / И.А. Грачев, В.Н. Злыгорев, Я.М. Чикота, Я.Г. Жбанков // Обработка материалов давлением. – 2014. – № 2 (39). – С. 75-80

182. Усовершенствование технологического процесса производства полых поковок типа труб / В. Н. Злыгорев, И. А. Грачев, Я. М. Чикота, Я. Г. Жбанков // Тези доповідей V Міжнародної науково-технічної конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти», присвяченої 115-річчю підготовки спеціалістів в області ОМТ. – Київ: НТТУ «КП», 19–23 травня 2014 року. – С. 78–80.

183. 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.

184. Пат. 50416 Україна, МПК В 21 J 13/02 . Четырехбойковое ковочное устройство со сменными бойками / Шумаков В.Ф., Злигорев В.М., Грачов І.А., Бугайов О.М., Глинський В.М., Карасьов А.К. ; заявник та патентовласник Закрите акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод". – № u200912506 ; заявл. 03.12.2009 ; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 11. – 4 с. : іл.

185. Пат. 96572 Україна, МПК В 22 D 7/00, В 22 D 47/00 (2015.01). Спосіб одержання сифонних злитків / Шумаков В.Ф., Злигорев В.М., Грачов І.А., Бугайов О.М., Глинський В.М., Гур'єв А.А., Чикота Я. М. ; заявник та патентовласник Публічне акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод". – № u201409418 ; заявл. 26.08.2014 ; опубл. 10.02.2015, Бюл. № 3. – 4 с. : іл.

186. Пат. 106233 Україна, МПК F 16 H 55/06, С 21 D 9/32 (2006.01). Спосіб виготовлення вала-шестірні важконавантаженої відкритої зубчастої передачі /Волошин О.І., Злигорев В.М., Мартиненков С.Л., Петров А.Г., Ковальов Ю.М., Токарев О.О., Вовненко Є.М., Токарев Ю.О. ; заявник та патен-

товласник Публічне акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод". – № u201508821 ; заявл. 14.09.2015 ; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8. – 4 с. : іл.

187. Злыгорев В. Н. Совершенствование технологических процессовковки крупных поковок на основе разработки нового способа осадки четырёхлучевых заготовок : монография / В. Н. Злыгорев, О. Е. Марков // – Краматорск : ДГМА, 2016. – 148 с.

Приложение А

Базовый технологический процессковки опорного валка горячей прокатки

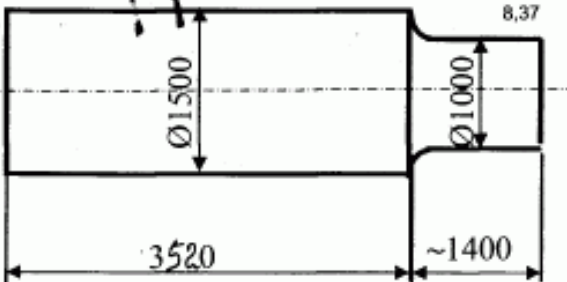
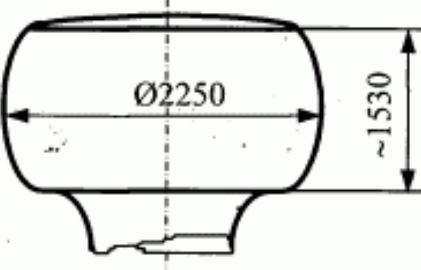
ЭЛИЯ		ОТХОДЫ «Б11-2»		з/л 18/45-14-1		Форма № 185	
НКМЗ		Технологический отдел главного металлурга					
Слиток принять в цех по инструкции ТИ 25021.00255				УТВЕРЖДАЮ: Сл. металлург завода			
Ковш-печь! Вакуум! Сифонная заливка!				<div style="text-align: center; font-size: 2em; font-weight: bold;">Н</div>			
Технологическая картаковки № 4-0178							
Наименование детали		Валок опорный N1;3					
Заказ 553456		Чертеж 672с-242-1		Спецификация 672с-242			
Марка стали	70ХЗГНМФ	Механические свойства металла (8901)		Пресс	10000 тс	Баланс металла	Килогр.
Хим. состав		ОСТ 24.013.04-90, 4954ТУ		Кол-во поковок	2 *	Слиток	57400
C= 0,65...0,75%	HSD ₆ =65...71 HSD _ш =42...48		Кол-во поковок из слитка		1	Поковка	40600
Mn= 0,90...1,30%	уровень мех. св-ств обеспечив. технологией изготовления		Раз. норм. врем.			Прибыль	12780
Si= 0,40...0,60%	Особые виды испытаний: УЗК по SEP 1921, гр.3 по зонам:		Расценок			Поддон	
Ni≤ 0,50%	шейки: I (0,9-1,0)R – кл. D/d (Ø2мм); II (0,6-0,9)R – кл. C/c (Ø3мм); III (0,0-0,6)R – кл. B (Ø4мм)		Темп. нач.ковки		1150°C	Обсечки	
Cr= 2,70...3,30%	бочка: I (0,9-1,0)R – кл. D/d (Ø2мм); II (0,6-0,9)R – кл. C (Ø5мм); III (0,0-0,6)R – кл. A		Темп. концаковки		830°C	Выдра	
Mo= 0,50...0,70%			Охлаж. послековки		в печи	Угар	4020
V= 0,10...0,30%			Уков.		2,66.	Год. ост.	510
P≤ 0,015%							5 ²⁵
S≤ 0,015%	Внимание!		Гомогенизирующий отжиг слитка!				
H ₂ ≤ 2,0ppm	Использовать изложницу от слитка Mсл=64,0т		2шт ковать по Т/К 4-0212 Э				
O ₂ ≤ 50ppm	Уменьшенные припуски						
N ₂ ≤ 80ppm							
Ковать в номинал!		5980 ⁺⁵⁰ ₋₀		6039			
6. Маркировать по ОСТ 24.013.20-90, 4327ТУ. 5. Размеры в скобках – обдирочные (+18мм – шейки, +10мм – бочка). 4. Мерительный инструмент: линейка, кронциркуль, пруток. 3. Выплавку трещин производить нагорячо в процессековки по ТИ 25021.00258 2. При работе руководствоваться инструкцией по ТБ № 23, 29, 114 1. Строповку и транспортировку производить согласно альбому типовых схем № 01, фиг. 6, 62							
Дата				Разработал технолог		Проверил	
27.02.14г.				Резник Е.А.		06.03.14	
				Согласовано с цехом		5,6	

Шрифты - Б по шриф. ГОСТ. сансл, гр.б.
 Шрифты СП193-0 + ШР.
 Шрифты СП193-0 + ШР.
 Шрифты СП193-0 + ШР.

«Поддон!»

Валок сопровождается паспортом 29331ПС

прибыль, маркировка!

Наименование операций и переходов	Заказ 553456	Чертеж 672с-242-1	Норма
Эскизы переходов и инструмент			
I нагрев	По инструкции ТИР5021.00257 Инт. ковки 1150-830°C		
<ol style="list-style-type: none"> 1. Выдать слиток из печи. 2. Взять манипулятором за прибыль. 3. Срезать остаток «сифона» и сбиллетировать на $\varnothing 1500$, $L \approx 4140$ с развор. 4. Обжать прибыль под плиту, прихватив $L=620$ мм (на $\varnothing 1500$), на $\varnothing 1000$, $L=1400$. 5. Посадить в печь. Контроль СТК.	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p>46,21 1,09 47,3</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>В процессековки удалять окалину!</p>  <p>$\varnothing 1500$</p> <p>3520</p> <p>$\varnothing 1000$</p> <p>~1400</p> <p>8,37</p> </div> <div style="margin-left: 10px; writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">44</div> </div> <p>Величина обжатия за ход пресса 100 мм – в началековки, 80...50 мм – в концековки.</p> <p>Бойки: 107, 103 Топор</p> <p>Строповка ф.29</p>		
II нагрев	Инт. ковки: 1150-830°C		
<ol style="list-style-type: none"> 1. Осадить до $\varnothing 2250$ сферической плитой. 2. Клещами подать к манипулятору. 3. Взять манипулятором за прибыль. 4. В плоских бойках протянуть на $\square 1750 \times 1750$ и 8мигранник с кантовкой на $<45^\circ$ в направлении от поддона к прибыли полной шириной бойка и на $\varnothing 1700$ в комбинированных бойках со сменой бойка. 5. Посадить в печь. Контроль СТК (Продолжение см. на вставке №1)	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p>45,29 (46,35)</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Осадить за 8 раз! Величина деформации за ход пресса: 350, 340, 280, 250, 230, 210, 190, 170 мм</p> <p>Пауза между ходами пресса 15..20с.</p> <p>Величина обжатия за ход пресса 200 мм – в началековки, 80...50 мм – в концековки</p>  <p>$\varnothing 2250$</p> <p>~1530</p> <p>$\varnothing 1700$</p> <p>2680</p> </div> <div style="margin-left: 10px; writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">66</div> </div> <p>В процессековки удалять окалину!</p> <p>Бойки: 107, 103, 128 Плиты: М2-15424, 153</p> <p>Строповка ф.29</p>		

Наименование операций и переходов	Эскизы переходов и инструмент	Норма				
<p>4. Сменить бойки.</p> <p>5. Обжать прибыльный конец в меру на $\varnothing 454$, L~1800.</p> <p>6. Отрубить поковку с разв, зачистить**.</p> <p>7. Выпрямить.</p> <p>8. Маркировать и передать в т/о.</p> <p>Контроль СТК.</p> <p>** - Отходы переработать и заготовить согласно распоряжению №1530 от 24.10.13 в соответствии с типовым техпроцессом № 4 и нормой времени ООТиЗ от 01.11.13</p> <table border="1" data-bbox="316 772 630 840"> <tr> <td>$M_{отв} = 4,14$ т</td> </tr> <tr> <td>$T_{отв}(0,06 \text{ час/т}) = 5,5$ мин</td> </tr> </table> <p>(Шифр 78)</p>	$M_{отв} = 4,14$ т	$T_{отв}(0,06 \text{ час/т}) = 5,5$ мин	<p><u>При обжатии шеек с прибыльной стороны слитка каждый уступ обязательно выполнять на всю длину до выхода бойка</u></p> <p><u>В процессековки удалять окалину!</u></p> <p><u>Обжатие за ход пресса не более 80 мм, подача ~ 2/3 ширины бойка</u></p> <p>Бойки: 102,107, вырезные Топор</p> <p>** - Отходы переработать и заготовить согласно распоряжению №1530 от 24.10.13 в соответствии с типовым техпроцессом № 4 и нормой времени ООТиЗ от 01.11.13</p> <table border="1" data-bbox="721 728 1034 795"> <tr> <td>$M_{отв} = 6,17$ т</td> </tr> <tr> <td>$T_{отв}(0,06 \text{ час/т}) = 29,6$ мин</td> </tr> </table> <p>(Шифр 78)</p> <p><u>(СМ. ЭСКИЗ ПОКОВКИ)</u></p>	$M_{отв} = 6,17$ т	$T_{отв}(0,06 \text{ час/т}) = 29,6$ мин	<p>60'</p> <p>Обработка 200314</p>
$M_{отв} = 4,14$ т						
$T_{отв}(0,06 \text{ час/т}) = 5,5$ мин						
$M_{отв} = 6,17$ т						
$T_{отв}(0,06 \text{ час/т}) = 29,6$ мин						

Приложение Б

Технологический процессковки опорного валка горячей прокатки выпуклым бойком на плоской плите

Италия ОТХОДЫ Б11-2 з/л 18/45-14-1 Форма № 185

НКМЗ **Технологический отдел главного металлурга**

Слиток принять в цех по инструкции ТИ 25021.00255

УТВЕРЖДАЮ:
Гл. металлург завода

Ковш-печь! Вакуум! Сифонная заливка! **Н**

Технологическая картаковки № 4-0212 Э

Наименование детали **Валок опорный 12,4** *Использовать изложницу от сл. 64,0т.*

Заказ **553456** Чертеж **672с-242-1** Спецификация **672с-242**

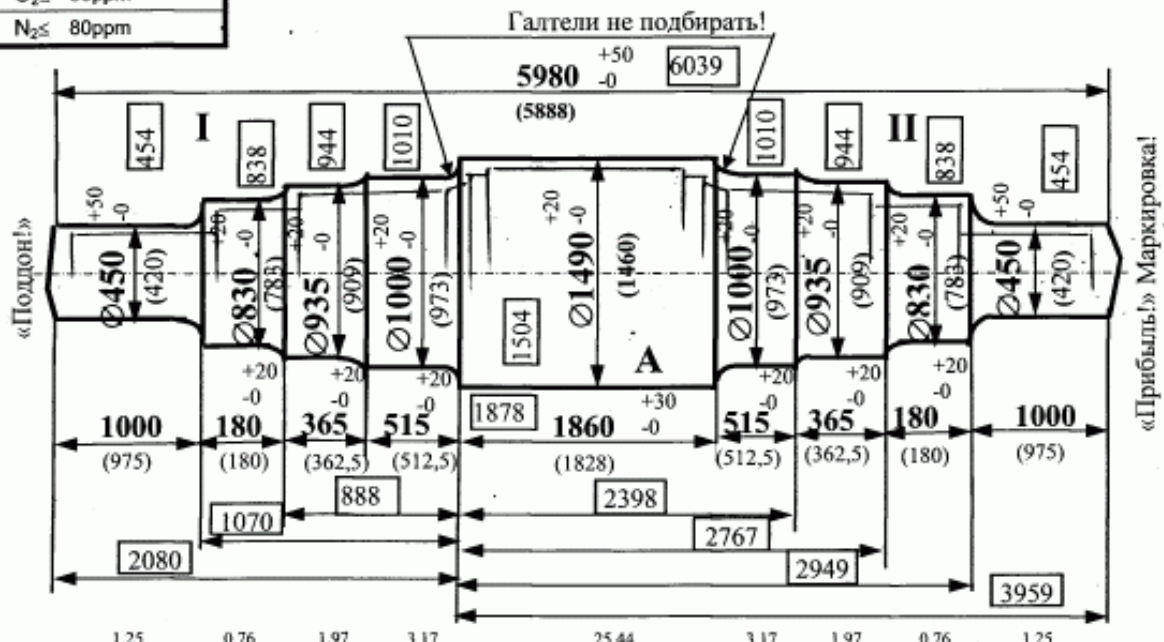
Марка стали	70ХЗГНМФ	Механические свойства металла (8901)	Пресс	10000 тс	Баланс металла	Килогр.	Проц.
Хим. состав	ОСТ 24.013.04-90, 4954ТУ		Кол-во поковок	2*	Слиток	57400	100,0
C= 0,65-0,75	уровень мех. св-тв обеспечив. технологией изготовления		Кол-во поковок из слитка	1	Поковка	40600	70,7
Mn= 0,90-1,30	HSDб=65-71 HSDш=42-48		Раз. норм. врем.		Прибыль	12780	22,3
Si= 0,40-0,60	Osобые виды испытаний		Расценок		Поддон		
Ni ≤ 0,50	УЗК по SEP 1921, гр.3 по зонам: шейки: I (0,9-1,0)R – кл. D/d (Ø2мм) II (0,6-0,9)R – кл. C/c (Ø3мм); III (0,0-0,6)R – кл. B (Ø7мм); бочка: I (0,9-1,0)R – кл. D/d (Ø2мм) II (0,6-0,9)R – кл. C (Ø5мм);		Темп. нач.ковки	1150°C	Обсечки		
Cr= 2,70-3,30	согл. изв. №8/193-14 от 21.05.14г. было на заказе 4шт, стало - 2шт. (основание - применение двух валков на заказ 553461, частичное аннулирование заказа)		Темп. концаковки	830°C	Выдра		
Mo= 0,50-0,70	Q ₂ ≤ 50ppm		Охлаж. послековки	в печи	Угар	4020	7,0
V= 0,10-0,30	N ₂ ≤ 80ppm		Уков	2,66	Год. ост.	510	54%

Слиток - 70 по ширин. выпр. раз. 1, 4, 3.
 Обработка слитка + 970. Обработка слитка + 970.

Валок сопровождается паспортом 29331ПС

Гомогенизирующий отжиг слитка!

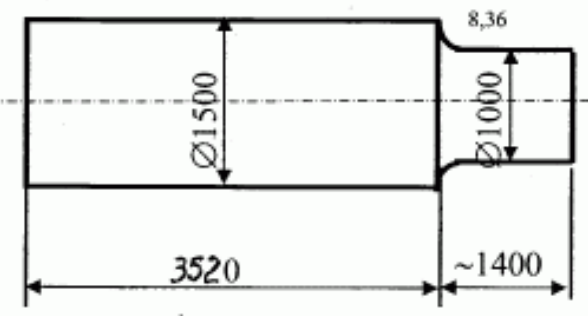
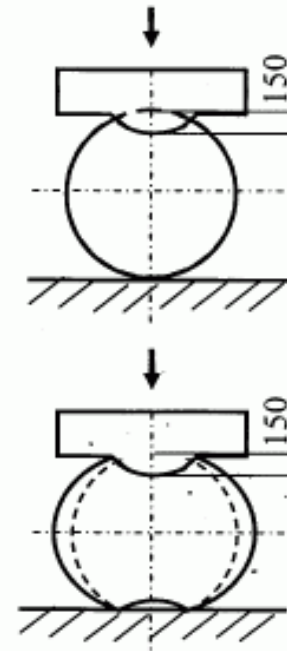
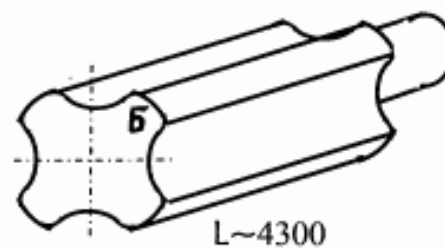
Ковать в номинал


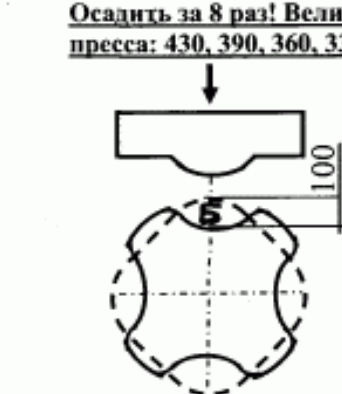
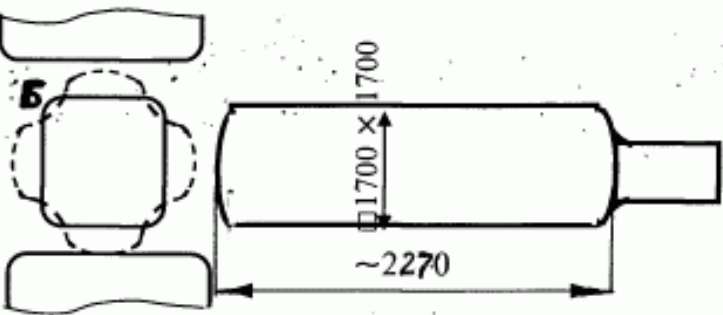


- * Остальные 2 поковки ковать по Т.К. № 4-0178
- 6. Маркировать по ОСТ 24.013.04-90, 4327ТУ.
- 5. Размеры в скобках – обдирочные (+18мм – шейки, +10мм – бочка).
- 4. Мерительный инструмент: линейка, кронциркуль, пруток.
- 3. Выплавку трещин производить нагорячо в процессековки по ТИ 25021.00258
- 2. При работе руководствоваться инструкцией по ТБ № 23, 29, 94, 112
- 1. Строповку и транспортировку производить согласно альбому типовых схем № 01, фиг. 8-62

Дата	Разработал технолог	Проверил	Согласовано с цехом
06.03.2014	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>	

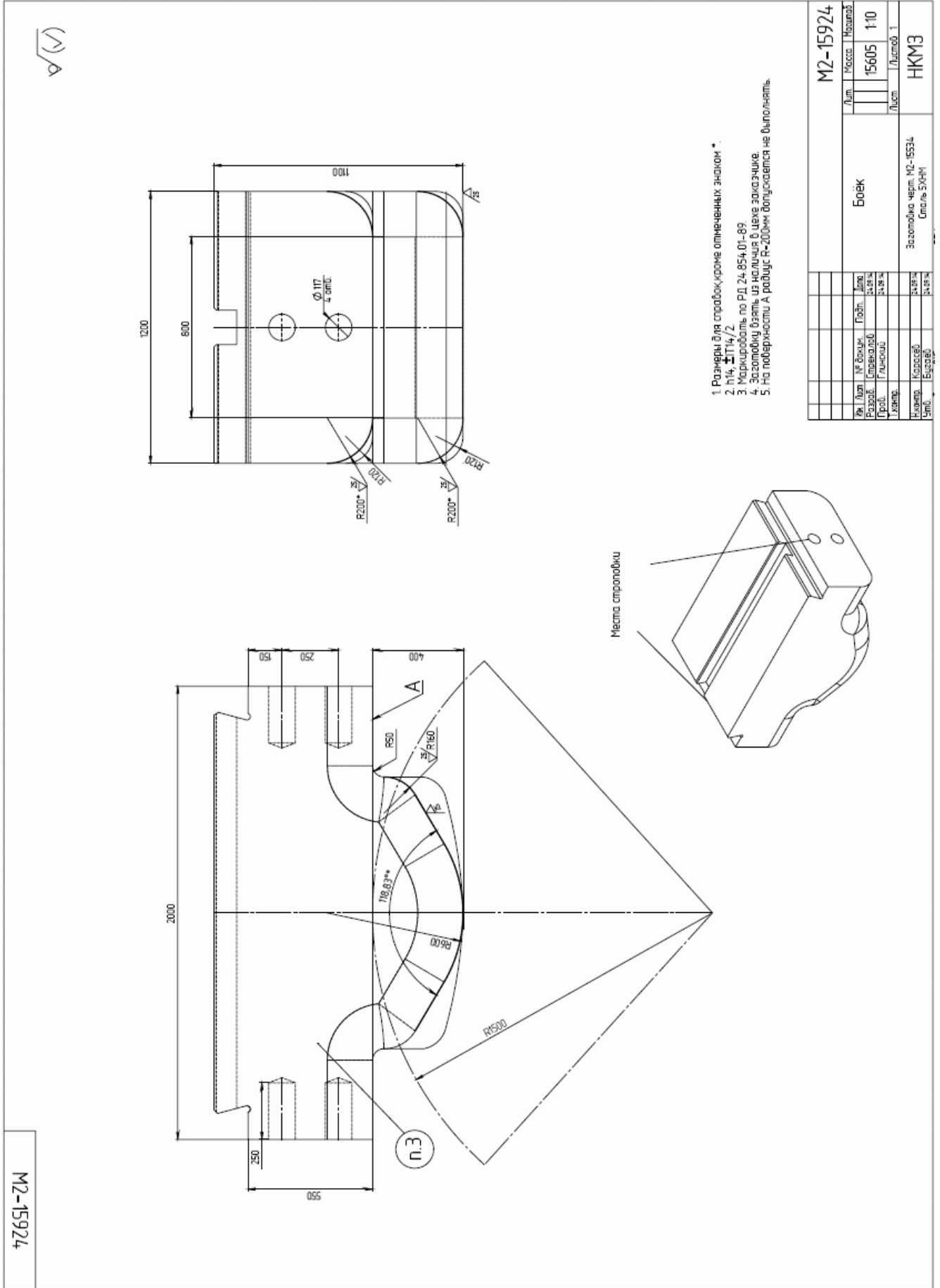
07.03.14 *[Signature]*

Наименование операций и переходов	Заказ 553456	Чертеж 672с-242-1	Норма
Эскизы переходов и инструмент			
I нагрев	По инструкции ТИ25021.00257 (46,21)47,3		Инт. ковки 1150°-830°С
<ol style="list-style-type: none"> 1. Выдать слиток из печи. 2. Взять манипулятором за прибыль. 3. Срезать остатки сифона. Сбиллетировать донную часть слитка на $\varnothing 1500$. 4. Развернуть. 5. Взять манипулятором за донный конец. 6. Сбиллетировать прибыльную часть слитка на $\varnothing 1500$, Лобц~4140. 7. Обжать прибыль под 12,3 плиту, прихватив $l \sim 620$ на $\varnothing 1500$. 8. Установить верхний спец. боек МЗ-25327 и нижнюю плоскую плиту 9. На плите верхним спец. бойком прожать на $h = 150$ по всей длине за 4 раза со смещением по плите. 10. Скантовать на $< 180^\circ$ и прожать на $h = 150$ по всей длине за 4 раза со смещением по плите. 11. Повторить операции 9, 10 скантовав на $< 90^\circ$ 12. Установить нижний вырезной боек. 13. Повторить операции 9÷11 в нижнем вырезном бойке прожимая на $h = 100$. 14. Посадить в печь. <p>Контроль СТК</p> <p>5 2/55 51448 310 8 4.1.37 15.12 ✓</p>	<p style="text-align: center;">В процессековки удалять окалину!</p>  <p>Величина обжатия за ход пресса 100мм – в началековки, 80...50мм – в концековки</p>   <p style="text-align: right;">Бойки: 107; 102; МЗ-25327 Плита 148 Топор Строповка ф.29</p> <p style="text-align: right; font-size: 2em;">59</p>		

Вставка № 1	Технологическая карта ковки № 4-0212	
Наименование операций и переходов	Заказ 553456	Чертеж 672с-242-1 Нор ма
	Эскизы переходов и инструмент ^а	
II нагрев	Инт.ковки 1150°-830°С	
<p>1. Осадить сферической плитой до $\square 1850 \times 1850$.</p> <p>2. Взять манипулятором за прибыль.</p> <p>3. Установить верхний спец. боек М3-25327 и нижнюю плоскую плиту</p> <p>4. На плите верхним спец. бойком прожать на $h=100$ по всей длине за 4 раза со смещением по плите.</p> <p>5. Скантовать на $<180^\circ$ и прожать на $h=100$ по всей длине за 4 раза со смещением по плите.</p> <p>6. Повторить операции 4, 5 скантовав на $<90^\circ$</p> <p>7. Установить нижний вырезной боек.</p> <p>8. Повторить операции 4÷6 в нижнем вырезном бойке.</p> <p>9. Сменить бойки на плоские.</p> <p>10. В <u>плоских бойках</u> протянуть на $\square 1700 \times 1700$ в направлении от поддона к прибыли <u>полной шириной бойка</u></p> <p>11. Посадить в печь.</p> <p>Контроль СТК</p> <p>(Продолжение см. на вставке №1)</p>	<p>(45,3) 46,35</p> <p>В процессековки удалять окалину!</p> <p>Вид А</p>  <p>Осадить за 8 раз! Величина деформации за ход прессы: 430, 390, 360, 330, 290, 260, 240, 220мм</p>   <p>Бойки: 107, 128, 102 Плиты: 154, М2-15424, 148 Клеши Строповка ф.29</p> <p>л. 2 - 250 М. 2 - 9,7</p> <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">73' (самостоятельно)</p> <p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Облачнов 110314</p>	

Наименование операций и переходов	Эскизы переходов и инструмент	Норма				
<p align="center">III нагрев</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Вставить в осадочную плиту и присадить на $h \sim 200$ (присадить «язык»). 2. Установить комбинир. бойки. 3. Взять манипулятором за прибыль. 4. Протянуть на $\varnothing 1550$, $L \sim 3150$. Прогладить на $\varnothing 1550$ Выдержать раскрой! 5. Разметить, подсечь с донной стороны. 6. Донный конец обжать на $\varnothing 1150$, $L \sim 1050$. 7. Развернуть. 8. Обжать бочку в меру с утолщ. 9. Разметить, подсечь с прибыли 10. Протянуть приб. конец на $\varnothing 1350$, отрубить излишек**. 13. Прогладить утолщение на бочке. 14. Развернуть. 15. Протянуть донный конец в меру на $\varnothing 1010$, $L \sim 1360$; на $\varnothing 944$, $L \sim 960$, на $\varnothing 838$, $L \sim 750$, на $\varnothing 454$, $L \sim 1940$ 16. Калибровать бочку в вырезных бойках. 17. Посадить в печь. Контроль СТК. 	<p>Инт. ковки: $1150^{\circ} - 830^{\circ}C$</p> <p>(44,38) 45,42</p> <p align="center">В процессековки удалятьокалину!</p> <p>эскиз №1</p> <p>$L_{\text{общ}} = 3150$ ($L_{\text{по телу}} = 3090$)</p> <p>эскиз №2</p> <p>** - Отходы переработать и заготовить согласно распоряжению №1530 от 24.10.13 в соответствии с типовым техпроцессом № 4 и нормой времени ООТиЗ от 01.11.13</p> <table border="1"> <tr> <td>$M_{\text{отх}} = 5,7 \text{ т}$</td> </tr> <tr> <td>$T_{\text{отх}}(0,08 \text{ час/т}) = 27,4 \text{ мин}$</td> </tr> </table> <p>(Шифр 78)</p> <p>Бойки: 102, 103, 107, Бойки вырезные Полуовал Топор Строповка ф. 6</p>	$M_{\text{отх}} = 5,7 \text{ т}$	$T_{\text{отх}}(0,08 \text{ час/т}) = 27,4 \text{ мин}$	<p>155' (сбо прибыли)</p> <p>часть прибыли</p>		
$M_{\text{отх}} = 5,7 \text{ т}$						
$T_{\text{отх}}(0,08 \text{ час/т}) = 27,4 \text{ мин}$						
<p align="center">IV нагрев</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Установить вырезные бойки $B=800$. 2. Обжать прибыльный конец в меру на $\varnothing 1010$, $L \sim 1340$, на $\varnothing 944$, $L \sim 940$, на $\varnothing 838$, $L \sim 720$, 3. Сменить бойки. 4. Обжать прибыльный конец в меру на $\varnothing 454$, $L \sim 1800$. 5. Отрубить поковку** с зачисткой*** и с разворотом. 6. Выправить. 7. Маркировать и передать в т/о. Контроль СТК. 	<p>Заготовку посадить в печь с $t=1150^{\circ}C$ выдержка 20...90 минут При условии обеспечения $t_{\text{шейки}} \geq 950^{\circ}C$</p> <p align="center"><u>При обжатии шеек с прибыльной стороны слитка каждый уступ обязательно выполнять на всю длину до выхода бойка</u> <u>Обжатие за ход пресса не более 80 мм,</u> <u>подача $\sim 2/3$ ширины бойка</u></p> <p align="center">В процессековки удалятьокалину!</p> <p align="center">(см. эскиз поковки)</p> <p>** - Отходы переработать и заготовить согласно распоряжению от 24.10.13 в соответствии с типовым техпроцессом № 4 и нормой времени ООТиЗ от 01.11.13</p> <table border="1"> <tr> <td>$M_{\text{отх}} = 6,17 \text{ т}$</td> </tr> <tr> <td>$T_{\text{отх}}(0,08 \text{ час/т}) = 29,6 \text{ мин}$</td> </tr> </table> <p>(Шифр 78)</p> <p>Бойки вырезные $B=800$ Бойки 107, 103 Топор *** - Отходы переработать и заготовить согласно распоряжения от 24.10.13 в соответствии с типовым техпроцессом № 4 и нормой времени ООТиЗ от 01.11.13</p> <table border="1"> <tr> <td>$M_{\text{отх}} = 1,14 \text{ т}$</td> </tr> <tr> <td>$T_{\text{отх}}(0,08 \text{ час/т}) = 5,5 \text{ мин}$</td> </tr> </table> <p>(Шифр 78)</p>	$M_{\text{отх}} = 6,17 \text{ т}$	$T_{\text{отх}}(0,08 \text{ час/т}) = 29,6 \text{ мин}$	$M_{\text{отх}} = 1,14 \text{ т}$	$T_{\text{отх}}(0,08 \text{ час/т}) = 5,5 \text{ мин}$	<p>60'</p>
$M_{\text{отх}} = 6,17 \text{ т}$						
$T_{\text{отх}}(0,08 \text{ час/т}) = 29,6 \text{ мин}$						
$M_{\text{отх}} = 1,14 \text{ т}$						
$T_{\text{отх}}(0,08 \text{ час/т}) = 5,5 \text{ мин}$						

Приложение В Чертеж выпуклого бойка



Приложение Г 1

Заклучение УЗК 1-го опорного валка, полученного по базовому технологическому процессуковки

Ф. 25 153-5

Заклучение И13-137

ультразвукового контроля

Деталь: Валок г/п (оконч.) после т/о и шлифовки

Заказчик: ОГМЕТ

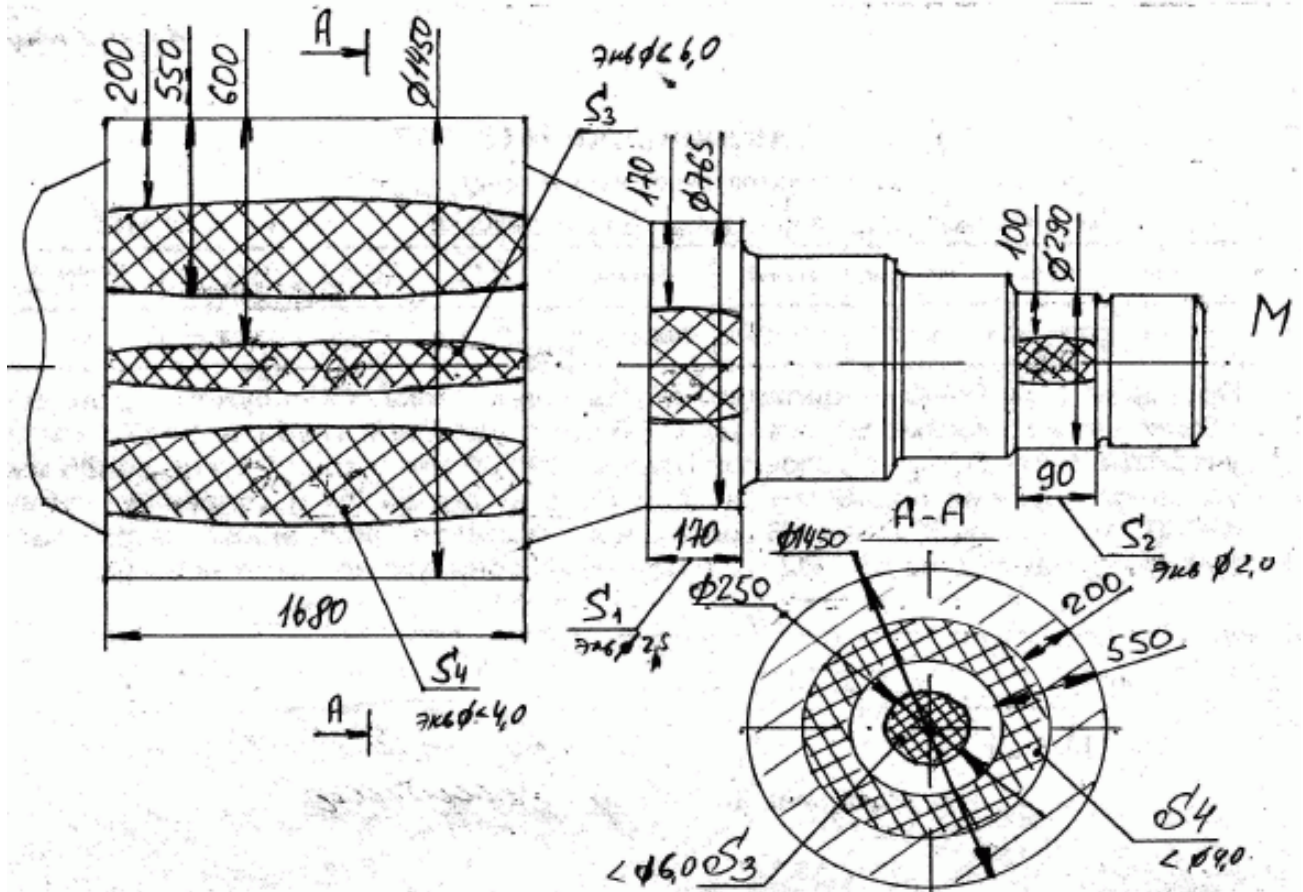
Заказ	Чертеж	Фиксация	Плавка	Материал	Тип дефектоск.	Частота, МГц	Угол ввода луча, °	Условная чувствит., мм
553456	672с-242-1	8363	613140370	70Х3ГНМФ	UFD-310	2	09, 45°	Ø2

Проведен УЗК бочки и цилиндрических шеек валка. Обнаружено скопление дефектов: на участке S1 экв. до Ø2,5 мм с условной глубины h=170 мм; на участке S2 экв. Ø2 мм с условной глубины h=100 мм; в зоне S3 экв. до Ø6 мм с условной глубины h=600 мм; в зоне S4 экв. до Ø4 мм с условной глубины h=200 мм до h=550 мм. В остальной проконтролированной части валка внутренних дефектов экв. Ø2 мм и более, не обнаружено. (смотри эскиз).

Дата 13.05.14

Дефектоскопист *Шевченко*

Начальник ЛНМК *Шевченко*



Приложение Г 2

Заключение УЗК 2-го опорного вала, полученного по базовому технологическому процессуковки

Ф. 25 153-5-5

-2

Заключение И14-17

ультразвукового контроля

на 2 листах лист 1

Деталь: Валок опорный после т/о и шлифовкиЗаказчик: Мх5 Для ОГМет

Заказ	Чертеж	Фиксация	Плавка	Материал	Тип дефектоск.	Частота, МГц	Угол ввода луча	Условная чувствит., мм
553456	672с-242сб	8394	613140396	70ХЗГНМФ	UFD-310	2	0°, 45°	Ø2

Проведен УЗК заготовки вала по цилиндрическим поверхностям. Обнаружены зоны скопления дефектов:

в зоне «S1» экв.Ø9 мм распространяющееся с min условной глубины h=300 мм, местами скопление достигает экв.Ø10+Ø14 мм;

в зоне «S2» экв.Ø8 мм с min условной глубины h=130 мм;

в зоне «S3» экв.Ø12 мм с условной глубины h=180 мм до h=200 мм, местами скопление достигает экв.Ø14 мм;

в зоне «S4» экв.Ø8 мм с условной глубины h=140 мм;

в зоне «S5» экв.Ø8 мм с min условной глубины h=110 мм, местами скопление достигает экв.Ø11 мм;

в зоне «S6» экв.Ø5 мм с условной глубины h=400 мм;

в зоне «S7» экв.Ø5 мм с условной глубины h=300 мм, местами скопление достигает экв.Ø7+Ø8 мм (смотри эскиз).

В остальной проконтролированной части вала внутренних дефектов экв.Ø2 мм и более, не обнаружено.

Смотри лист 2

25 153-5-5

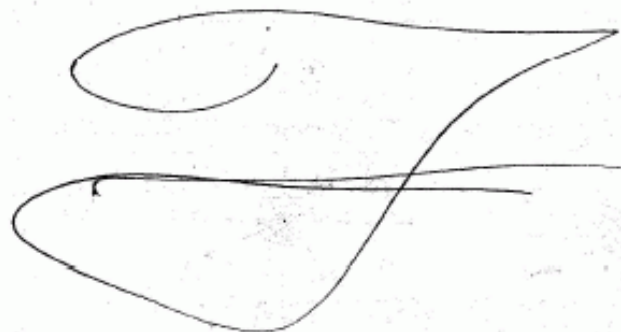
Заключение И14-17

ультразвукового контроля

на 2 листах лист 2

Деталь: Валок опорный после т/о и шлифовкиЗаказчик: Мх5 Для ОГМет

Заказ	Чертеж	Фиксация	Плавка	Материал	Тип дефектоск.	Частота, МГц	Угол ввода луча	Условная чувствит., мм
553456	672с-242сб	8394	613140396	70ХЗГНМФ	UFD-310	2	0°, 45°	Ø2



Дата 15.05.2014

Начальник лаборатории

Дефектоскопист Степанов Костенко

Приложение Г 3

Заклучение УЗК 1-го опорного вала, полученного по новому технологическому процессуковки

Ф. 25 153-5

Заклучение И14-15

ультразвукового контроля

Деталь: Валок г/п (оконч.) после т/о и шлифовки

Заказчик: ОГМЕТ

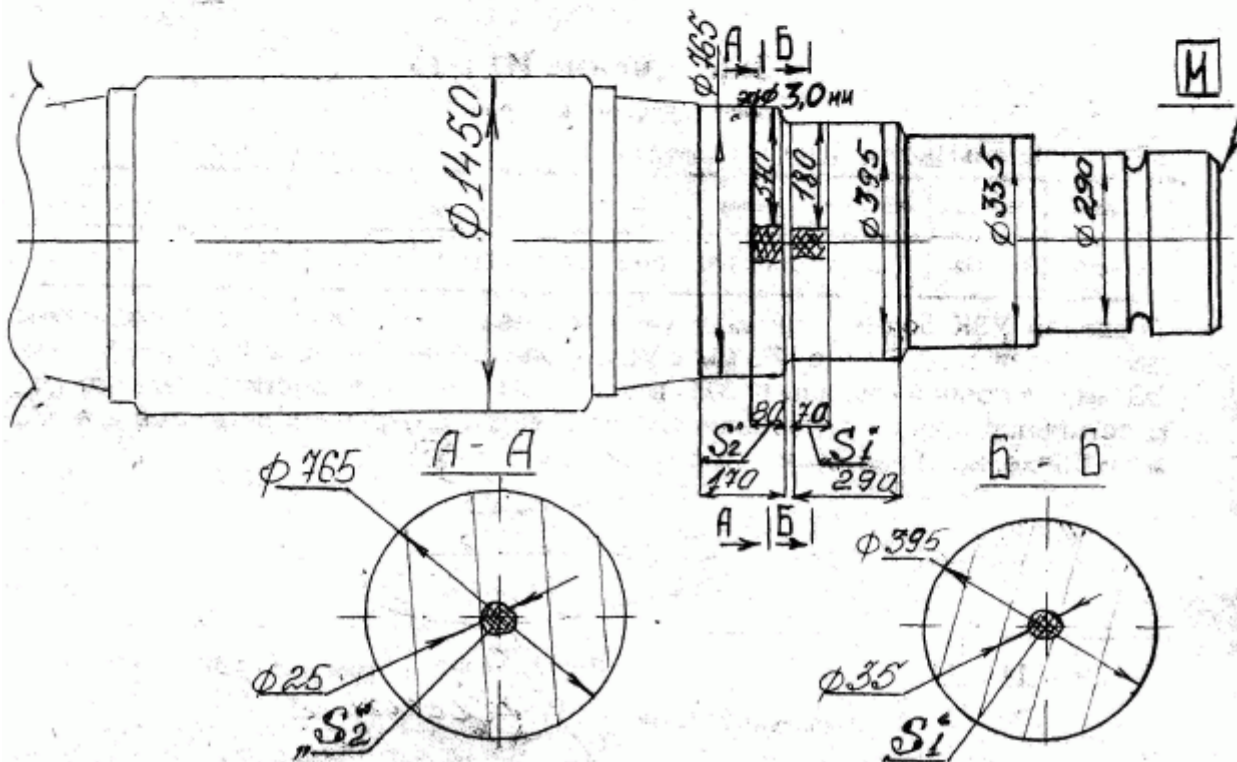
Заказ	Чертеж	Фиксация	Плавка	Материал	Тип дефектоск.	Частота, МГц	Угол ввода луча	Условная чувствит., мм
553456	672с-242-1	8364	613140382	70Х3ГНМФ	UFD-310	2	0°, 45°	Ø2

Проведен УЗК бочки и цилиндрических шеек вала. Обнаружено скопление дефектов: в зоне S1 экв. Ø3 мм с условной глубины h=180 мм; в зоне S2 экв. Ø3 мм с условной глубины h=370, в месте №1 скопление достигает экв. Ø7 мм. В остальной проконтролированной части вала внутренних дефектов экв. Ø2 мм и более, не обнаружено. (смотри эскиз).

Дата 14.05.14

Дефектоскопист Бугерова Кучерова

Начальник ЛНМК А.А. Сидоров



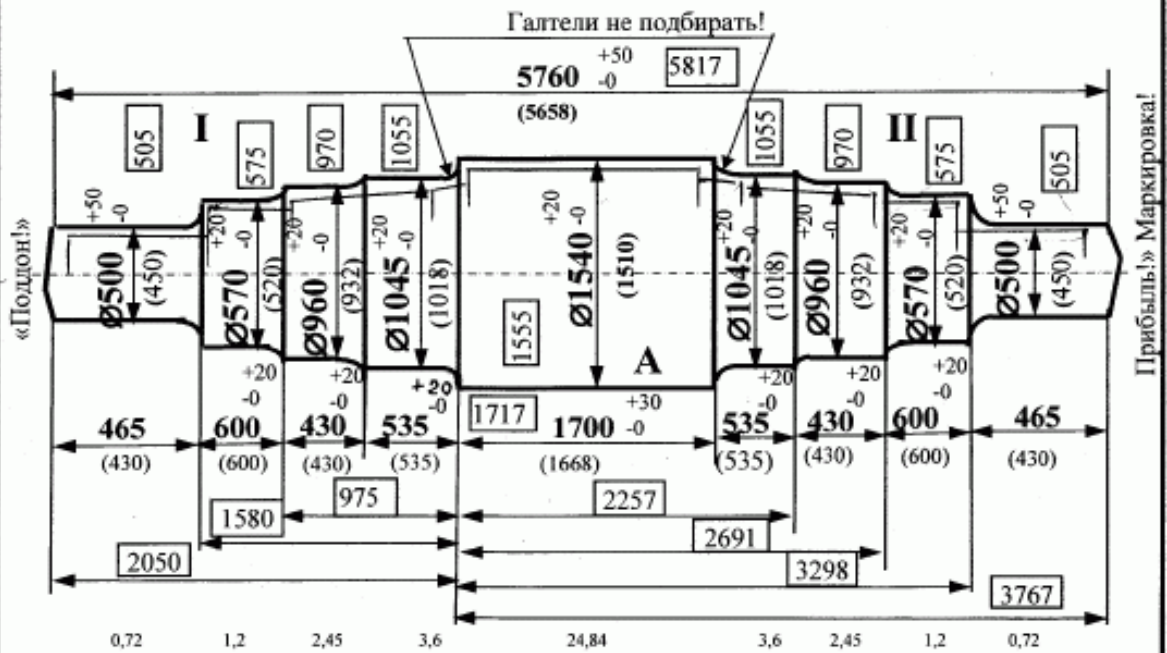
Приложение Д

Новый техпроцесс ковки опорного вала двумя выпуклыми бойками
 Темиртау ОТХОДЫ Б1 з/л 18/372-14-3 Форма № 185

НКМЗ		Технологический отдел главного металлурга						
Слиток принять в цех по инструкции ТИ 25021.00255		<i>Контроль ОТМед!</i>			УТВЕРЖДАЮ: Гл. металлург завода <i>З. Зиннуров</i> 24.02.15.			
Ковш-печь! Вакуум! Сифонная заливка!		Н						
Технологическая карта ковки № 5-0108 Э								
Наименование детали		Валок O-1500x1650			Использовать изложницу от сл. 64.0т.			
Заказ 553471		Чертеж 239с-626-06		Спецификация 553471				
Марка стали	70ХЗГНМФ	Механические свойства металла (8901)		Пресс	10000 тс	Баланс металла		
Хим. состав		ОСТ 24.013.20-90, 4954ТУ		Кол-во поковок	3	Слиток 57400		
C=	0,65...0,75			Кол-во поковок из слитка	1	Поковка 41300		
Mn=	0,90...1,30			Раз. норм. врем.		Прибыль 13230		
Si=	0,40...0,60	HSDб=60-65	HSDш=35-50	Расценки		Поддон		
Ni≤	0,50	Особые виды испытаний УЗК по ОСТ 24.023.22-81. Объем контроля в соответствии с ТИ 6142. (Ø3;10мм)		Темп. нач. ковки	<i>*1200°C</i> 1150°C	Обсечки		
Cr=	2,70...3,30			Темп. конца ковки	830°C	Выдра		
Mo=	0,60...0,80			Охлаж. после ковки	в печи	Угар	2870	5,0
V=	0,10...0,30			Уков	2,556	Год. ост.	5xO	6 ¹⁶
P≤	0,015							
S≤	0,015	Внимание!		<i>* Гомогенизирующий отжиг Т/К N271</i>				
H ₂ ≤	2,0ppm	Уменьшенные припуски		Ковать в номинал!				
O ₂ ≤	50ppm	<i>припуск по 25050 по 4/ч. 3</i>		<i>27.02.15</i>				
N ₂ ≤	80ppm	<i>Шариков С.И.</i>						

Ковать по т/к № 5-0107

Деталь сопровождается паспортом 34711НС

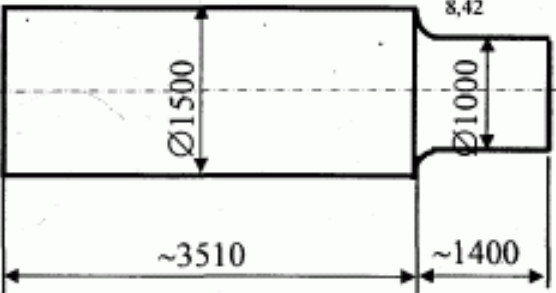
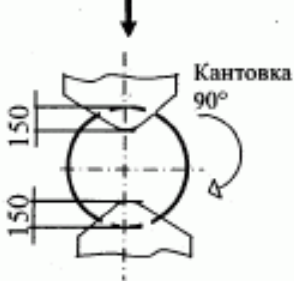
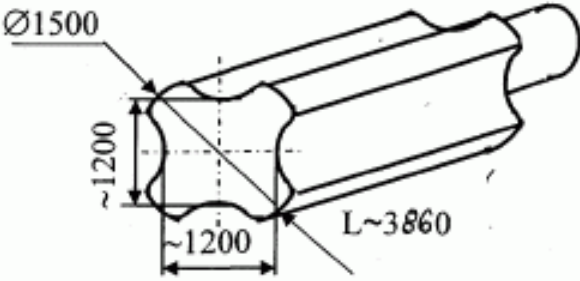


6. Маркировать по ОСТ 24.013.20-90, 4327ТУ.
5. Размеры в скобках – обдирочные (+10мм-бочка, +18мм-шейки).
4. Мерительный инструмент: линейка, кронциркуль, пруток.
3. Выплавку трещин производить нагорячо в процессе ковки по ТИ 25021.00258
2. При работе руководствоваться инструкцией по ТБ № 23, 29, 94, 112
1. Строповку и транспортировку производить согласно альбому типовых схем № 91, фиг. 6, 62

Кошек поковки при t=350-400°C

Дата	Разработал технолог	Проверил	Утвердил	Согласовано с цехом
20.02.15	<i>М. Иванская</i>	<i>Ю. Комарова</i>	<i>С. П. [Signature]</i>	

24.02.15 24.02.15 5-55 31 5.0

Наименование операций и переходов	Заказ 553471	Чертеж 239с-626-06
I нагрев	Эскизы переходов и инструмент	
	По инструкции ТИ25021.00257	Инт.ковки 1150° - 830° C
<ol style="list-style-type: none"> 1. Выдать слиток из печи. 2. Взять манипулятором за прибыль. 3. Срезать остатки сифона. Сбиллетировать и протянуть донную часть слитка на $\varnothing 1500$. 4. Развернуть. 5. Взять манипулятором за донный конец. 6. Сбиллетировать и протянуть прибыльную часть слитка на $\varnothing 1500$, Лобц~4130. 7. Обжать прибыль под плиту, прихватив $l \sim 620$ на $\varnothing 1500$, зачистить. 8. Развернуть. 9. Установить спец. бойки М2-15924 10. Взять манипулятором за прибыль. 11. Прожать $h = 150$ (с 2х сторон) по всей длине за 2 раза. 12. Скантовать на $\angle 90^{\circ}$ и прожать $h = 150$ (с 2х сторон) по всей длине за 2 раза. 13. Прожать, скантовав на $\angle 90^{\circ}$, и выдержать размер 1200. 14. Повторить операцию 13 еще 1 раз. 15. Посадить в печь. <p>Контроль СТК</p>	<p>46,213(47,26)</p> <p style="text-align: center;">В процессековки удалять окалину!</p>  <p>Величина обжатия за-ход прессы 100мм – в началековки, 80...50мм – в концековки</p>  	<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">76' сменяется местами</p> <p style="text-align: right;">Бойки: 104; 128, М2-15924 топор Строповка ф.29</p>

<p>Вставка № 1</p> <p>Наименование операций и переходов</p> <p>II нагрев</p> <ol style="list-style-type: none"> Осадить сферической плитой до $h \sim 1600$. Взять манипулятором за прибыль. В плоских бойках протянуть через диагональ на 2500 в направлении от поддона к прибыли полной шириной бойка. Установить нижний вырезной боек. Протянуть на $\varnothing 1600$, $L \sim 2920$. Прогладить на $\varnothing 1600$ Выдержать раскрой! Разметить, подсесть согласно эскизу. Донный конец обжать на $\varnothing 1200$, $L \sim 980$. Развернуть. Прогладить бочку в меру с утолщением. Разметить, подсесть с прибыли. Протянуть прибыльный конец на $\varnothing 1400$, отрубить излишек*, прогладить утолщение. <u>Калибровать бочку в вырезных бойках.</u> Выправить. Посадить в печь. Контроль СТК. 	<p>Технологическая картаковки № 5-0108 Э</p> <p>Заказ 553471 Чертеж 239с-626-06 Норм</p> <p>Эскизы переходов и инструмент</p> <p>Инт.ковки $1200^{\circ}-830^{\circ}\text{C}$ выдержка ≥ 15 часов</p> <p>45,29 (46,32) В процессековки удалять окалину!</p> <p>Вид А</p> <p>Осадить за 8 раз! Величина деформации за ход прессы: 350, 310, 280, 250, 230, 200, 180, 110мм</p> <p>Лт ~ 2850 (L ~ 2920) ~ 190 2,91т (~260) 3,98т</p> <p>Бойки: 103,107,128, вырезные Плиты: 154, M2-15424, Топор Строповка ф. 6</p> <p>* - Отходы переработать и заготовить согласно распоряжению №1530 от 24.10.13 в соответствии с типовым техпроцессом № 4 и нормой времени ООТнЗ от 01.11.13</p> <p>$M_{max} = 7,17\text{т}$ $T_{max}(0,08\text{час/т}) = 34,4$ мин (Шифр 78)</p>
--	---

Handwritten notes and calculations:

3,73
 $\frac{15,53}{2,24} = 6,93$
 $\frac{1,05}{1,15} = 0,91$
 $\frac{8,16}{1,19} = 6,86$
 $\frac{13,52}{1,02} = 13,25$
 $\frac{11,02}{1,13} = 9,75$
 $\frac{8,16}{1,19} = 6,86$
 $\frac{13,52}{1,02} = 13,25$
 $\frac{11,02}{1,13} = 9,75$
 $\frac{8,16}{1,19} = 6,86$
 $\frac{13,52}{1,02} = 13,25$
 $\frac{11,02}{1,13} = 9,75$

167

Наименование операций и переходов	Заказ 553471	Чертеж 239с-626-06		
III нагрев	Эскизы переходов и инструмент			
	Заготовку посадить в печь с $t=1150^{\circ}\text{C}$ выдержка 20...90 минут При условии обеспечения $t_{\text{шлеки}} \geq 950^{\circ}\text{C}$			
<ol style="list-style-type: none"> 1. Установить вырезные бойки В=800. 2. Обжать прибыльный конец в меру на $\varnothing 1055$, L~1790, на $\varnothing 970$, L~1480, на $\varnothing 575$, L~1770 3. Сменить бойки. 4. Обжать прибыльный конец в меру на $\varnothing 505$, L~1270. 5. Выправить. 6. Отрубить излишек**. 7. Посадить в печь. 8. Контроль СТК. 	<p style="text-align: center;"><u>При обжатии шеек с прибыльной стороны слитка каждый уступ обязательно выполнять на всю длину до выхода бойка</u></p> <p style="text-align: center;"><u>Обжатие за ход пресса не более 80 мм, подача ~ 2/3 ширины бойка</u></p> <p style="text-align: right;">Бойки вырезные В=800 Бойки 107, 102, Топор</p> <p style="font-size: small;">** - Отходы переработать и заготовить согласно распоряжения от 24.10.13 в соответствии с типовым техпроцессом № 4 и нормой времени ООТиЗ от 01.11.13</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td style="text-align: center;">M_{max}= 5,06 Т</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">T_{max}(0,08час/т)= 24,3 мин</td></tr> </table> <p style="text-align: center; font-size: x-small;">(Шифр 78)</p>		M _{max} = 5,06 Т	T _{max} (0,08час/т)= 24,3 мин
M _{max} = 5,06 Т				
T _{max} (0,08час/т)= 24,3 мин				
IV нагрев	Заготовку посадить в печь с $t=1150^{\circ}\text{C}$ выдержка 90...180 минут При условии обеспечения $t_{\text{шлеки}} \geq 950^{\circ}\text{C}$			
<ol style="list-style-type: none"> 1. Сменить вкладыш губок. 2. Установить вырезные бойки В=800. 3. Протянуть донный конец в меру на $\varnothing 1055$, L~1370; на $\varnothing 970$, L~980, на $\varnothing 575$, L~1560 4. Сменить бойки 5. Обжать донный конец в меру на $\varnothing 505$, L~1240 6. Выправить. 7. Отрубить излишек***. 8. Маркировать и передать в т/о 9. Контроль СТК. 	<p style="text-align: center;"><u>В процессековки удалять окалину!</u></p> <p style="text-align: center;">(см. эскиз поковки)</p> <p style="text-align: right;">Бойки вырезные В=800 Бойки 107, 103 Топор</p> <p style="font-size: small;">*** - Отходы переработать и заготовить согласно распоряжения от 24.10.13 в соответствии с типовым техпроцессом № 4 и нормой времени ООТиЗ от 01.11.13</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr><td style="text-align: center;">M_{max}= 1,17 Т</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">T_{max}(0,08час/т)= 5,6 мин</td></tr> </table> <p style="text-align: center; font-size: x-small;">(Шифр 78)</p>		M _{max} = 1,17 Т	T _{max} (0,08час/т)= 5,6 мин
M _{max} = 1,17 Т				
T _{max} (0,08час/т)= 5,6 мин				

68'

65'

С. С. Соловьев
 260215

Приложение Е

Заключение УЗК опорного валка, полученного по новому технологическому процессуковки

Заключение В112 - 183

Ф. 25.6.10-Г.1

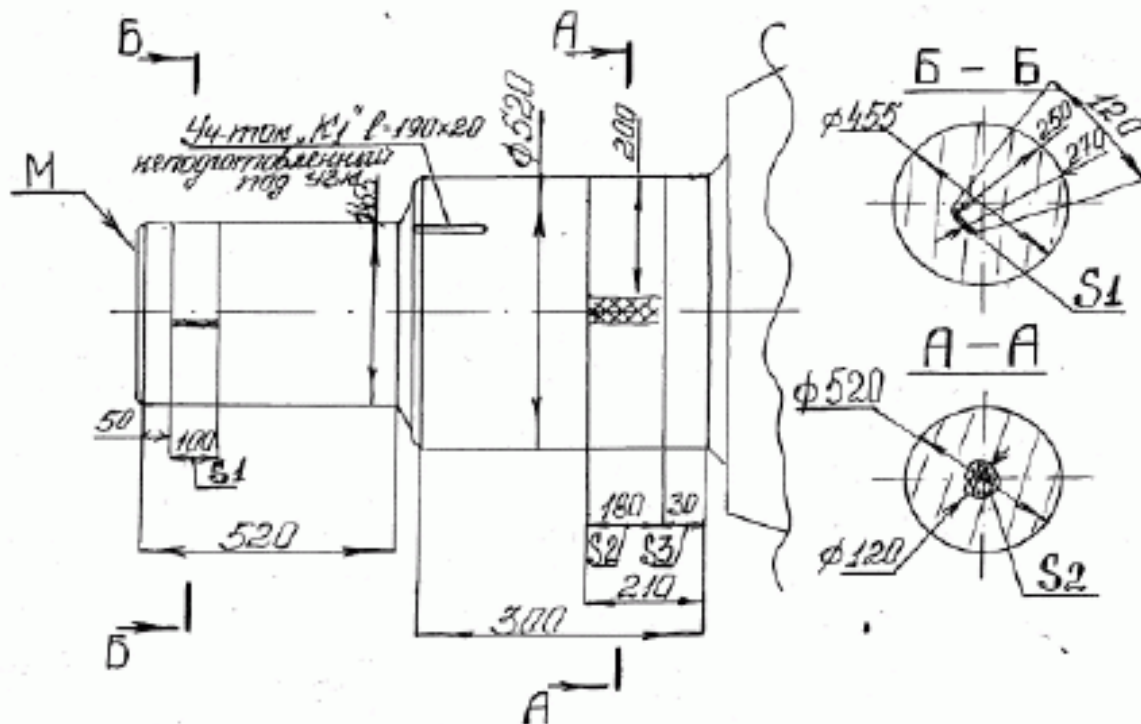
ультразвукового контроля

Деталь: Валок опорный О-1510*1650

Заказчик: Мх 5

Заказ	Чертеж	Фиксация	Плавка	Материал	Тип дефектоскопа	Частота, МГц	Угол ввода луча	Условия чувствит., мм
553468	627с-917-01-1	2151327	613150282	70Х3ГНМ Ф	UFD310	2	0,45	3; 10

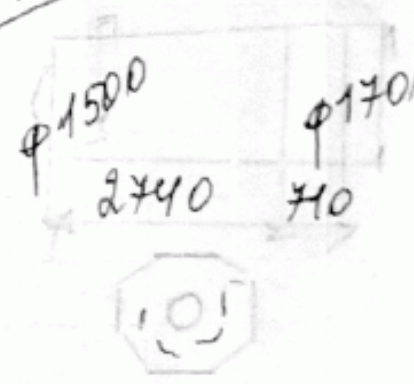
Проведен УЗК бочки и цилиндрических шеек валка за исключением участка "К1", неподготовленного под УЗК. Обнаружено скопление дефектов: на участке "S1" экв. ф11 мм с условной глубины $h=250$ мм до $h=270$ мм; на участке "S2" экв. ф11 мм с условной глубины $h=200$ мм; на участке "S3" скопление дефектов, местами экранирующее донный сигнал. Акустические сигналы на участке "S3" фиксируются с условной глубины $h=200$ мм. В остальной проконтролированной части валка внутренних дефектов, превышающих требования ТИ6142, не обнаружено.



Приложение Ж

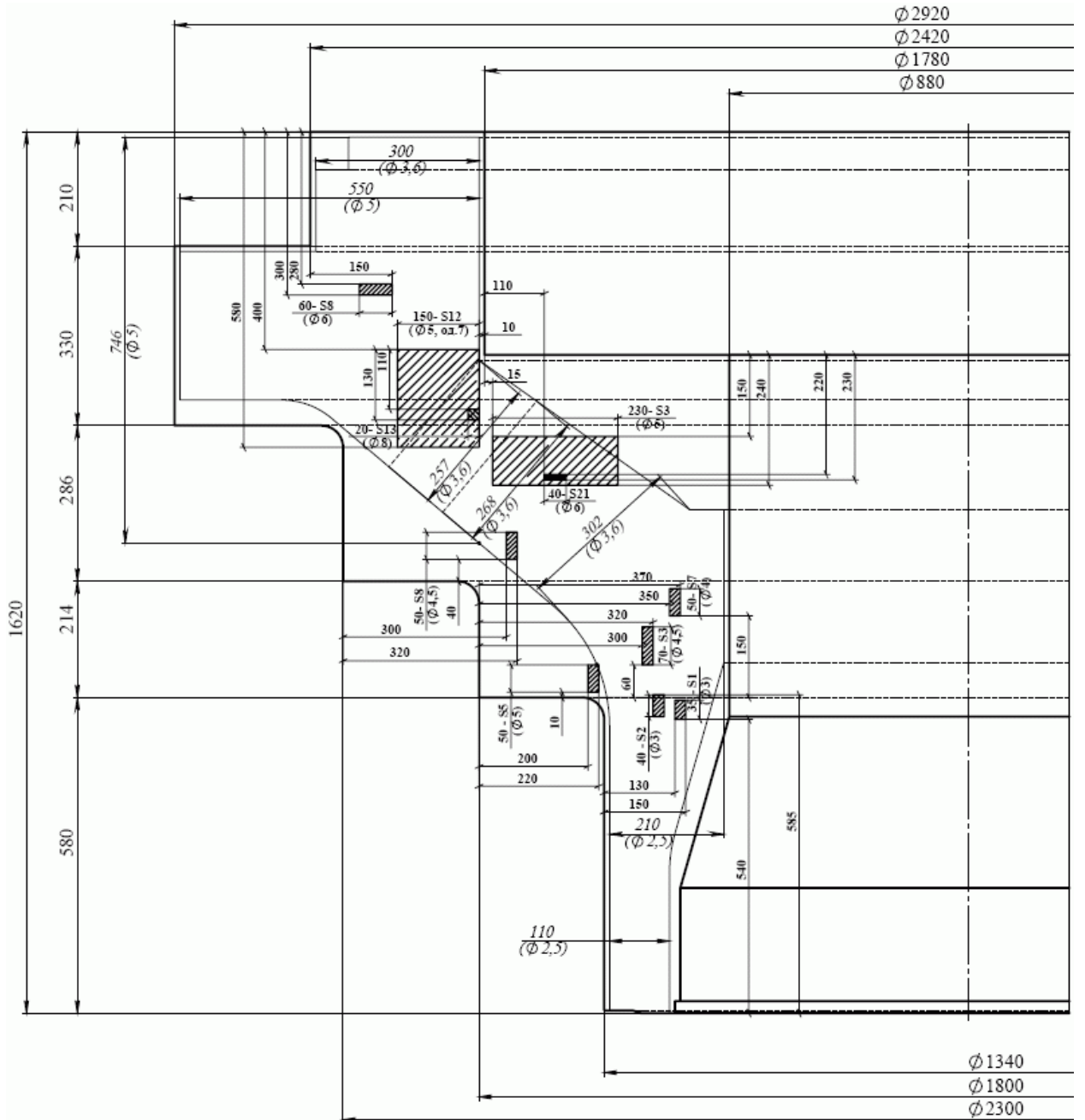
Карта фиксации поковки, соответствующей эксперименту 2-Э-13

№ 5 БИ-2
Форма № 250

ПАТ «НКМЗ» слу _____ цех _____	КАРТА № 915 1508 фиксация техпроцессаковки к техкарте № 5-0108Э	Заказ № 553421 Чертеж № _____ Позиц. № 239с-606-06 Кол-во на заказ _____		
Наименование детали: Валок				
Химанализ	Механ. свойства	Плавка № 613150340	Время пост слитка 6 ч 45	
с В келье		Слит. № бак	Т-ра пост слитка 500°	
По инструкции 5505000401р3		Марка ЖОХЗНД	Кодич. пок. 1	
На обдирку		Вес слит. 57,4 (586)	Подпись: Д. Яковлев	
Р	В	Дата пост слитка 7.03.15	Фиксат. _____	
Э С К И З П О К О В К И				
<p>МК</p>  <p>φ1500 2740 φ1700 101</p> <p>по краю оклейки раж войлоном, по толщ мелкая, гешуе: с торца дон. стороны пористость, спай, трещины.</p> <p>О. Яковлев 7.03.15</p> <p>МХ5-504</p>				
Масте		Бригадир	ОТК	
А. Ю. Тюменев		В. Башинка		
Дата сдачи	№ нарядов			
Расход металла в кг	Слиток	11 41300	Обсечки	Ковки
	Поковки		Угар	окончена
	Отход сверху		Итого	сл. Ж
	Отход снизу			4.03.15

Приложение И 1

Заключение УЗК поковки «Левая часть вала» чертёж 692с – 874, полученного по базовому технологическому процессуковки



Приложение И 2

Заключение УЗК поковки «Левая часть вала», полученного по новому технологическому процессуковки с прожимом на четырёхлучевую заготовку

Ф. 25 153-5-5

Заключение П114-237

ультразвукового контроля

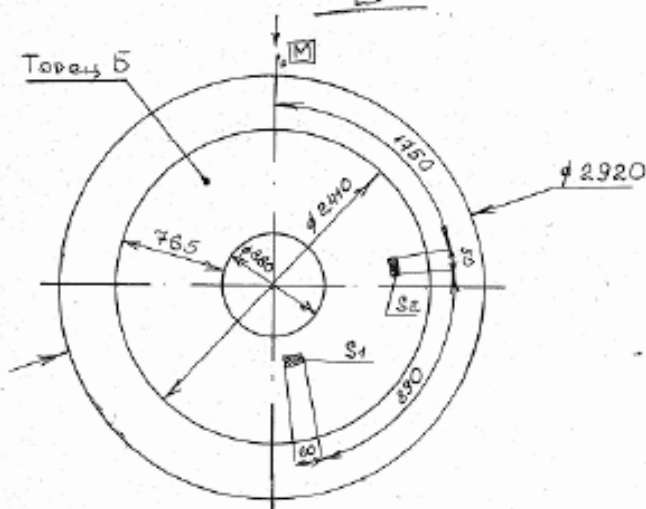
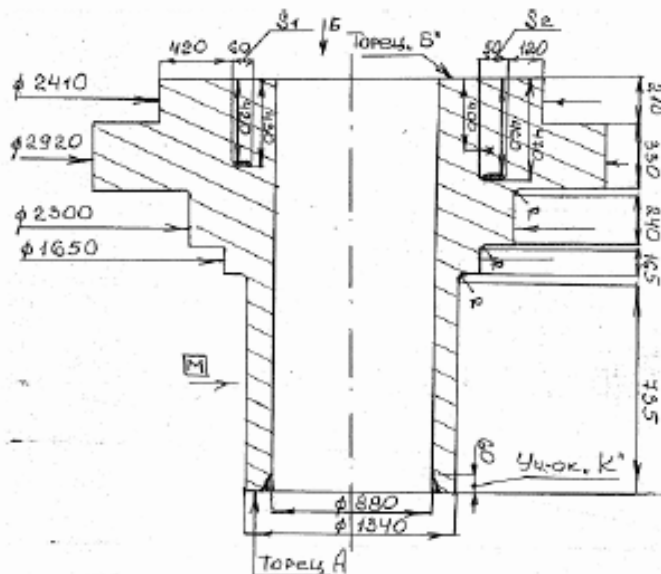
Деталь: Левая часть вала (заготовка)

Заказчик: Мх.7

Заказ	Чертеж	Фиксация	Плавка	Материал	Тип дефектоск.	Частота, МГц	Угол ввода луча	Условная чувствит., мм
825489	892с-874	214489	613141821	20ГС	UFD-310	2	0°, 45°	Ø2,5; Ø3,6; Ø5

Проведен УЗК заготовки левой части вала по цилиндрическим и торцевым поверхностям, кроме торца «А» и участка «К» неподготовленного под УЗК. При контроле по торцевой поверхности «Б» обнаружено скопление дефектов: в зоне «S1» (50x60 мм) экв.ф5,5 мм с условной глубины h=420 мм до h=430 мм; в зоне «S2» (35x50 мм) экв.ф5 мм с условной глубины h=460 мм до h=470 мм и на h=400 мм (смотри эскиз).

В остальной проконтролированной части заготовки внутренних дефектов, превышающих требования ГОСТ 24507-80 группа качества 2п, не обнаружено.



Дата 05.02.2015г.

Дефектоскопист _____ Костенко

Приложение К

Акты внедрения результатов диссертационной работы

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 (05264) 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 %.

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

НКМЗ

ДДМА

Начальник бюро крупних поковок, к.т.н.

І. А. Грачов

Заст. зав. кафедри ОМТ, к.т.н.

П. Б. Абхарі

Начальник ковальсько-пресового цеха

М. В. Олешко

«Затверджую»

«Затверджую»

Головний інженер ПАТ «НКМЗ»

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



О.І. Волошин



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 втрат 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
	70ХЗГНМФ	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	14,29	25	2	8,00

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:

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

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

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

Економія рідкої сталі за рахунок впровадження нової технології склала:

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

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

Економічний ефект від впровадження нової технології склав:

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

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
Перший проректор
Донбаської державної
машинобудівної академії
А.М. Фесенко



« 06 » травня 2016

АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи
аспіранта Злигорєва Віталія Миколайовича на тему
«Удосконалення технологічних процесів кування крупних поковок на основі
використання способу осадження профільованих заготовок»
у навчальний процес**

Члени комісії у складі декана факультету «Інтегрованих технологій та обладнання», професор кафедри зварювального виробництва, к.т.н. Гринь О. Г. та завідувача кафедри «Обробка металів тиском», професора, д.т.н. Алієва І. С. склали цей акт про те, що кафедрою обробки металів тиском Донбаської державної машинобудівної академії в період 2015–2016 р.р. Злигорєвим В. М. були впроваджені у навчальний процес методичні матеріали, що увійшли до лекцій, практичних та лабораторних робіт наступних дисциплін: «Ресурсозберігаючі технології кування», «Технологія кування», «Кування крупних поковок». В наведених дисциплінах використані результати теоретичних та експериментальних досліджень, які були виконані аспірантом В. М. Злигорєвим при підготовці дисертаційної роботи:

- новий спосіб осадження чотирипроменевих заготовок, який підвищує якість великогабаритних поковок відповідального призначення;
- методика проектування технологічних процесів кування великогабаритних поковок із застосуванням операції профілювання та осадження чотирипроменевих заготовок, яка дозволяє визначити геометрію деформуючого інструменту і режимів кування для максимального заковування осьових дефектів;
- нові технологічні процеси кування великогабаритних поковок із застосуванням операцій профілювання та осадження чотирипроменевих заготовок, які підвищили якість поковок.

Науково-практичні розробки, отримані Злигорєвим В. М. 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.

Зав. кафедри ОМТ,
проф. д.т.н.

І. С. Алієв

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

О. Г. Гринь