

Донбасская государственная машиностроительная академия

На правах рукописи

ЖБАНКОВ ЯРОСЛАВ ГЕННАДЬЕВИЧ

УДК 621.735.3-416

РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ ПРОЦЕССОВ
ГОРЯЧЕГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОВКИ КРУПНЫХ
ПОКОВОК

Специальность: 05.03.05 - процессы и машины обработки давлением

Диссертация на соискание ученой степени доктора
технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор

Алиев Играмотдин Серажутдинович

Краматорск – 2016

Содержание

| | Стр. |
|---|------|
| ВВЕДЕНИЕ | 8 |
| РАЗДЕЛ 1. ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ КОВКИ КРУПНЫХ ПОКОВОК И АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ | 18 |
| 1.1 Управление напряженно-деформированным состоянием заготов- ки в процессах ковки крупных поковок | 18 |
| 1.1.1 Состояние вопроса в процессах ковки крупных поковок.... | 18 |
| 1.1.2 Состояние вопроса в процессах ковки крупногабаритных валов и плит..... | 21 |
| 1.1.3 Состояние вопроса в процессах ковки крупногабаритных дисков | 32 |
| 1.1.4 Состояние вопроса в процессах ковки крупногабаритных колец | 39 |
| 1.1.5 Состояние вопроса в процессах ковки крупногабаритных труб..... | 46 |
| 1.2 Влияние горячей пластической деформации на структуру и свой- ства металла | 52 |
| 1.2.1 Структурные изменения | 52 |
| 1.2.2 Влияние деформации на свойства металла | 60 |
| 1.3 Теоретические исследования процессов горячего деформирования металлов | 63 |
| 1.4 Проблемы проектирования процессов ковки крупных поковок, постановка целей и задач исследований | 82 |
| Выводы | 94 |

| | |
|---|------------|
| РАЗДЕЛ 2. ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР МЕТОДОВ И НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КОВКИ КРУПНЫХ ПОКОВОК | 96 |
| 2.1 Расширение области проведения исследований на основании метода морфологических карт | 96 |
| 2.2 Разработка классификации процессов ковки крупных поковок и выбор направлений научных исследований | 105 |
| 2.3 Методы исследования процессов ковки крупных поковок | 124 |
| 2.3.1 Теоретические методы исследования процессов ковки крупных поковок | 124 |
| 2.3.2 Общая методика теоретического исследования процессов ковки | 126 |
| 2.3.3 Экспериментальные методы исследований процессов ковки крупных поковок | 127 |
| Выводы | 137 |
| РАЗДЕЛ 3. РАЗРАБОТКА И РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ | 138 |
| 3.1 Метод расчета технологической деформируемости с учетом восстановления пластичности во время пауз при горячем дробном деформировании | 138 |
| 3.2 Метод построения кривых течения металла по стандартным характеристикам | 146 |
| 3.3 Моделирование эволюции микроструктуры стали в процессах ковки крупных поковок..... | 164 |
| 3.3.1 Модель расчета эволюции микроструктуры металла..... | 164 |
| 3.3.2 Автоматизация расчета эволюции микроструктуры стали | 166 |
| 3.3.3 Примеры расчета эволюции микроструктуры стали в процессах ковки валов, плит и дисков | 168 |
| Выводы | 172 |

| | |
|---|------------|
| РАЗДЕЛ 4. УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕССЕ ПРОТЯЖКИ ВИДОИЗМЕНЕНИЕМ ФОРМЫ ИНСТРУМЕНТА | 174 |
| 4.1 Исследование процесса протяжки цилиндрической заготовки скошенными бойками | 174 |
| 4.2 Исследование процесса протяжки цилиндрической заготовки асимметричными комбинированными бойками | 194 |
| 4.3 Исследование процесса протяжки цилиндрической заготовки асимметричными вырезными бойками | 202 |
| 4.4 Исследование процесса протяжки заготовки ступенчатыми бойками | 210 |
| 4.4.1 Ковка цилиндрической заготовки | 210 |
| 4.4.2 Ковка заготовки с прямоугольным сечением | 218 |
| 4.5 Исследование процесса протяжки плит бойками со скосом | 235 |
| Выводы | 245 |
| РАЗДЕЛ 5. УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ЗАГОТОВКИ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА ПРОТЯЖКИ | 248 |
| 5.1. Управление НДС заготовки на основе регулирования температурного поля | 248 |
| 5.1.1 Исследование протяжки заготовки с симметричным неравномерным температурным полем | 248 |
| 5.1.2 Исследование протяжки заготовки с неравномерным несимметричным температурным полем | 277 |
| 5.1.3 Влияние теплового состояния заготовки из стали X12МФ на ее деформируемость | 283 |
| 5.2. Управление НДС заготовки на основе регулирования кинематики ее деформирования | 290 |

| | |
|--|------------|
| 5.2.1 Исследование дифференцированной протяжки заготовки ... | 290 |
| 5.2.2 Исследование режимов протяжки заготовок уменьшающих торцовую вогнутость | 296 |
| 5.2.3. Протяжка с паузами | 301 |
| Выводы | 312 |
| РАЗДЕЛ 6 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОВКИ ПОКОВОК ДИСКОВ | 315 |
| 6.1 Управление НДС заготовки варьированием ее формы и формы инструмента | 315 |
| 6.1.1 Исследование процесса ковки эксцентриков | 315 |
| 6.1.2 Предварительное профилирование заготовок перед осадкой | 322 |
| 6.1.3 Ковка дисков с выворотом коническим инструментом | 336 |
| 6.2 Управление НДС заготовки регулированием кинематики ее деформирования | 341 |
| 6.2.1 Профилирование заготовки разгонкой | 341 |
| 6.2.2 Осадка заготовок разгонкой | 351 |
| 6.3 Управление НДС заготовки регулированием ее температурного поля | 358 |
| 6.3.1 Осадка заготовок с неравномерным симметричным температурным полем | 358 |
| 6.3.2. Осадка заготовок с неравномерным температурным полем сложной формы | 371 |
| 6.3.3 Влияние теплового состояния на микроструктуру заготовки в процессе осадки плоскими плитами | 373 |
| Выводы | 375 |
| РАЗДЕЛ 7. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОВКИ ПОКОВОК ТИПА КОЛЕЦ И ТРУБ | 378 |
| 7.1 Управление НДС заготовки варьированием ее формы и формы инструмента | 378 |

| | |
|--|------------|
| 7.1.1 Исследование процесса ковки поковок типа конических колец | 378 |
| 7.1.2 Ковка труб из бесприбыльных слитков | 388 |
| 7.1.2.1 Осадка бесприбыльных слитков плоскими плитами | 388 |
| 7.1.2.2 Осадка бесприбыльных слитков вогнутыми плитами .. | 394 |
| 7.1.2.3 Осадка бесприбыльных слитков выпуклыми плитами ... | 402 |
| 7.1.2.4 Протяжка труб на оправке | 406 |
| 7.2 Управление НДС заготовки регулированием кинематики ее деформирования | 409 |
| 7.3 Управление НДС заготовки регулированием ее температурного поля | 414 |
| Выводы | 421 |
| РАЗДЕЛ 8. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОВКИ НА ОСНОВЕ НОВЫХ СПОСОБОВ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ | 424 |
| 8.1 Методика проектирования технологических процессов ковки крупных поковок | 424 |
| 8.1.1 Общие рекомендации | 424 |
| 8.1.2 Технологические рекомендации проектирования процессов ковки валов | 428 |
| 8.1.3 Технологические рекомендации проектирования процессов ковки плит | 430 |
| 8.1.4 Технологические рекомендации проектирования процессов ковки дисков | 431 |
| 8.1.5 Технологические рекомендации проектирования процессов ковки колец и труб | 434 |
| 8.2 Новые технологические процессы и оснастка для ковки крупных поковок | 435 |
| 8.3 Новые способы деформирования и их внедрение | 451 |

| | |
|--|-----|
| 8.3.1 Ковка поковок типа эксцентриков | 451 |
| 8.3.2 Ковка поковок типа дисков | 457 |
| 8.3.3. Ковка поковок типа валов | 465 |
| 8.3.4 Ковка полых поковок | 472 |
| Выводы | 478 |
| ВЫВОДЫ | 481 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 486 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А Механические свойства металлов и сплавов при различных температурно-скоростных условиях | 527 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б Результаты испытаний технологических проб | 547 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В Акты и справки по внедрению результатов дис- сертационной работы | 576 |

ВВЕДЕНИЕ

Развитие производства, обеспечивающего высокий уровень добавочной стоимости в экспортной продукции, является приоритетным направлением экономики Украины в современных условиях. Одной из таких высокотехнологичных отраслей являются тяжелое машиностроение и энергетическая промышленность. Развитие этих отраслей неразрывно связано с повышением качества и снижением себестоимости получаемой продукции на основе внедрения новых технологий и применяемого информационного и механического инструментария. Проведения таких мероприятий связано с необходимостью выполнением большого количества дополнительных научных изысканий в рассматриваемых областях.

Актуальность темы. Основная проблема развития современного тяжелого машиностроения заключается в повышении качества, получении уникальных механических свойств продукции и снижении материальных затрат в сочетании с приемлемыми эксплуатационными свойствами продукции. К наиболее распространенным типам деталей заготовительного производства машиностроительных предприятий относятся изделия типа роторов, валов, плит, колец, труб и дисков. Объем производства таких деталей достигает до 95% всей номенклатуры заготовительного производства предприятия тяжелого машиностроения.

В современных экономических условиях, при сокращении рынков сбыта отечественной продукции в странах ближнего зарубежья, возникает необходимость в поиске новых рынков сбыта, таких как, рынок стран ЕС. Требования к качеству продукции в западных странах традиционно высокие, кроме того мировой рынок активно снабжается продукцией Китая и Индии, которые предлагают приемлемое качество и низкую цену. В связи с этим остро становится вопрос повышения качества получаемой продукции при минимальной себестоимости. Решение данного вопроса неразрывно связано с внедрением новых ресурсосберегающих технологий, в том числе,ковки крупных поковок на заводах тяжелого машиностроения Украины.

Качество крупных поковок во многом определяется способомковки, который существенно влияет на такие свойства материала, как ударная вязкость, относительное удлинение и сужение. Способковки (инструмент и режим деформирования) влияет на заваривания внутренних пустот, образовавшихся в слитке при его кристаллизации. Для определенных групп материалов схемаковки играет определяющую роль при формировании микроструктуры материала. На данный момент существует ряд способовковки описанных выше групп поковок, однако их большое количество и противоречия в рекомендациях по их применению не позволяют с высокой степенью достоверности определиться с конкретными технологиями для определенных групп поковок. Это приводит к необходимости проведения большого числа дополнительных исследований в каждом конкретном случае.

Основная часть теоретических исследований проводятся на основе метода конечных элементов (МКЭ), который позволяет прогнозировать с высокой степенью достоверности параметры напряженно-деформированного состояния заготовки в процессековки. Однако этот метод основан на применении большого количества экспериментальных данных и не позволяет моделировать многие физико-химические процессы, сопровождающие горячее пластическое деформирование стали.

В связи с изложенным, дальнейшее развитие методов расчета и совершенствование технологических режимов, оснастки и заготовок дляковки крупных поковок является актуальной научной проблемой и имеет важное научно-практическое и народнохозяйственное значение для экономики Украины.

Связь с научными программами, планами, темами. Результаты работы направлены на решение задач, поставленных в Государственной программе развития и реформирования горно-металлургического комплекса Украины на период до 2011 года и в Программе научно-технического развития Донецкой области на период до 2020 года (постановление областного Совета от 22.03.2002 г., номер 3/25-656). Тема диссертационной работы соответствует научному направлению «Развитие ресурсосберегающих процессов обработки давлением

на основе создания новых технологических способов и методик анализа закономерностей пластического деформирования» научной школы кафедры «Обработка металлов давлением» (ОМД) Донбасской государственной машиностроительной академии (ДГМА) и соответствует приоритетному направлению развития науки и техники «Новейшие ресурсосберегающие технологии в энергетике, промышленности и агропромышленном комплексе». Работа выполнена в рамках госбюджетных научно–исследовательских работ (НИР), предусмотренных планами Министерства образования и науки Украины и выполненных на кафедре ОМД ДГМА (№ госрегистрации 0106U001619, 0111U000883, 0113U000608, 0115U003123, 0109U002664, 0106U003216, 0111U006174, 0115U004736, 0112U001244), а также в рамках хоздоговорной научно-исследовательской работы с ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (договора Х-14-2013, № 0113U004776). Автор был ответственным исполнителем при выполнении госбюджетной темы №0115U003123.

Цель и задачи исследования. Повышение технико-экономических параметров технологических процессовковки крупных поковок на базе развития научных основ процессов горячего пластического деформирования и совершенствование технологических способов и режимовковки.

Для достижения поставленной цели поставлены и решены следующие задачи:

- систематизировать схемыковки крупных поковок и их влияние на параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) заготовки и физические и механические изменения в материале, выделить основные факторы, влияющие на параметры НДС;
- составить классификации технологических схем процессовковки крупных поковок на основании выделенных факторов влияния на НДС заготовки;
- разработать новый подход к проектированию технологических процессовковки крупных поковок на основе применения новых методов расчета;

- разработать метод расчета технологической деформируемости с учетом восстановления пластичности в процессах горячего дробного деформирования металлов и сплавов, который позволяет моделировать сложные многопереходные процессыковки и прогнозировать возможные разрушения;
- адаптировать метод расчета эволюции микроструктуры металла в процессе горячего пластического деформирования к процессамковки крупныхпоковок, провести анализ и подобрать оптимальные параметры новых схемковки на основании данного метода;
- развить метод расчета механических свойств металлов в виде кривых течения для процессов горячего пластического деформирования на основе использования стандартных характеристик металла с целью увеличения эффективности использования МКЭ для моделирования процессовковки крупныхпоковок в производственных условиях;
- изучить особенности изменения параметров НДС заготовки и изменения микроструктуры в процессахковки валов и плит инструментом специальной формы и создать на их основе новые способыковки; разработать научно обоснованные рекомендации для проектирования технологических процессовковки валов и конструкции ковочного инструмента;
- получить зависимости, описывающие параметры НДС заготовки и особенности изменения микроструктуры в процессахковки дисков инструментом различной конфигурации по специальным термомеханическим режимам; разработать научно обоснованные рекомендации для проектирования процессовковки дисков;
- определить особенности формирования НДС заготовки в процессахковки колец и труб инструментом различной конфигурации по специальным термомеханическим режимам; разработать научно обоснованные рекомендации для проектирования технологических процессовковки колец и труб;
- разработать и внедрить в производство новые схемы деформирования и методики проектирования технологических процессовковки;
- разработать и передать в производство новые рекомендации для ис-

следования и создание новых ресурсосберегающих технологических процессовковки крупных поковок.

Объект исследования. Технологические процессы и оснасткаковки крупных поковок.

Предмет исследования. Закономерности процессов горячего пластического деформирования, методы расчета напряженно-деформированного состояния и способы интенсификации процессовковки крупных поковок.

Методы исследования. Математическое и физическое моделирование процессовковки выполнены с учётом основных положений теории пластичности, теории ОМД, механики деформируемого твёрдого тела, теории теплопроводности и вариационного исчисления. Для теоретических исследований был применен метод конечных элементов (МКЭ) для определения формоизменения, распределения температур, деформаций, напряжений и силовых характеристик процесса деформирования.

Экспериментальные исследования включали в себя моделирование в лабораторных условиях и натурные исследования в промышленных условиях, метод координатных сеток, методы измерения механических свойств, а также методы планируемого эксперимента и математической статистики. Промышленные исследования показателей качества крупных поковок производились на основании данных ультразвукового контроля.

Научная новизна полученных результатов.

- получил дальнейшее развитие метод оценки технологической деформируемости в процессах горячего дробного пластического деформирования, учитывающий эффект восстановления пластичности металла в технологических паузах, что позволило разработать рациональные режимыковки дисков и валов, которые обеспечивают повышенную деформируемость заготовки;

- получила дальнейшее развитие модель процесса горячего пластического деформирования, которая описывается аналитической зависимостью, позволяющей рассчитывать изменение напряжения течения металла под воздействием

температуры и скорости деформирования и основанной на использовании и обобщении стандартных механических характеристик металла;

- впервые на основе моделей оценки эволюции микроструктуры металла при горячей пластической деформации получены зависимости распределения величины зерна в объеме заготовки при ковке по новым схемам деформирования с управляемым течением металла, которые позволили установить рациональные режимыковки, обеспечившие повышение равномерности распределения механических свойств крупных поковок типа валов и дисков;

- впервые на основе метода конечных элементов установлены закономерности изменения компонент сдвиговых деформаций в процессах протяжки длинномерных поковок наклонными и ступенчатыми асимметричными бойками, которые интенсифицируют проработку литого металла, что позволило установить рациональные форму и размеры ковочного инструмента;

- впервые на основе результатов теоретических исследований процессовковки валов, установлены зависимости параметров напряженно-деформированного состояния заготовки от формы и градиента температурного поля, а также его расположения по отношению к деформирующему инструменту, что позволило предложить механизм управления деформационным полемковки и разработать рациональные режимы деформирования;

- получили дальнейшее развитие представления о влиянии термомеханического режима деформирования заготовок из карбидных малопластичных сплавов на пластичность металла, которые заключаются в установленных зависимостях деформируемости металла от технологических режимов обработки, особенностью которых является нагрев и выдержка заготовки при температуре превышающей верхнюю границу температурного интервалаковки и дифференцированнойковки с паузами;

- впервые на основе теоретических и экспериментальных исследований, получены аналитические зависимости, которые описывают формообразование заготовки и учитывают ее исходную форму, температурное поле, форму инструмента и кинематику его движения в процессах осадки, что позволило раз-

работать рациональные режимы ковки поковок типа дисков с минимальной величиной отклонений формы и неравномерности распределения деформаций.

- получили дальнейшее развитие закономерности формоизменения заготовки в процессах ковки полых поковок типа труб и профилированных колец, которые позволили предложить механизм перераспределения металла заготовки в заданных направлениях за счет согласования режимов обжатий и подач инструмента, а также варьирования параметров температурного поля, для повышения точности и расширения номенклатуры получаемых изделий.

Практическое значение полученных результатов. Практическую ценность диссертационной работы представляют следующие её основные результаты:

- классификации процессов ковки поковок типа валов, плит, дисков, колец и труб, полученные на основе применения метода морфологических карт и общего литературного анализа состояния вопроса в области ковки крупных поковок. Разработанные классификации позволили получить новые схемы ковки приведенных выше типов поковок;

- методики моделирования процессов горячего пластического деформирования, позволяющие наиболее полно исследовать процессы ковки крупных поковок с учетом таких физических процессов в металле как изменение размеров зерна и восстановление пластичности. Методика построения кривых течения металла по стандартным справочным характеристикам, позволяющая минимизировать подготовительный этап моделирования процессов горячего деформирования;

- новые способы ковки поковок типа валов и плит, основанные на применении новых форм инструмента, кинематического и температурного факторов, позволяющие повысить уровень проработки металла заготовки, обеспечить минимальную неравномерность распределения деформаций в заготовке и повышенную точность. Рекомендации по назначению геометрических параметров инструмента и температурно-скоростных условий деформирования заготовок;

- новые способы ковки поковок дисков, основанные на применении новых форм инструмента, кинематического и температурного факторов, позволяющие минимизировать неравномерность распределения деформаций в заготовке, повысить точность получаемых изделий и расширить номенклатуру. Рекомендации по назначению геометрических параметров инструмента и заготовки и температурно-скоростных условий деформирования заготовок;

- методики проектирования технологических процессов ковки поковок труб и колец. Рекомендации по назначению геометрических параметров инструмента и заготовки и температурно-скоростных условий деформирования заготовок протяжкой на оправке и раскаткой на дорне;

- алгоритм проектирования процессов ковки крупных поковок основанных типов, основанный на применении новых методов исследования процессов горячего пластического деформирования;

- разработаны, апробированы и внедрены новые технологические процессы ковки крупных валов, колец и дисков, которые позволяют повысить качество поковок, снизить количество брака и уменьшить их себестоимость за счет уменьшения количества переходов ковки, нагревов и времени подготовки производства. Разработаны и внедрены режимы ковки поковок из карбидной стали X12МФ, которые позволили существенно снизить количество брака на производстве. Суммарный экономический эффект от внедрения разработок составил 3220 тыс. грн.

Личный вклад соискателя. В диссертации не использованы научные идеи сотрудников, способствовавших её выполнению. Все теоретические и экспериментальные исследования и их результаты получены и обобщены автором самостоятельно. При проведении исследований, результаты которых опубликованы в соавторстве, автором определены идеология, постановка научных задач, выполнена разработка основных теоретических положений, математических моделей, алгоритмов и программ, проведён анализ результатов численной реализации, сформулированы выводы и разработаны рекомендации по совершенствованию технологий и оснастки для ковки крупных поковок из слитков. Ав-

тор принимал участие в планировании и проведении экспериментальных исследований, обработке и анализе полученных результатов, а также во внедрении результатов работы в производство.

При разработке технических решений участвовали сотрудники кафедры ОМД ДГМА, кафедры КШП «Приазовского государственного технического университета», ПАО «НКМЗ», ПАО «Энергомашспецсталь», что получило отражение в совместных статьях и патентах. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора відображено в анотації до списку опублікованих робіт.

Апробация результатов диссертации. Основные положения работы, научные и практические результаты докладывались на международных, всеукраинских и региональных научно-технических (НТК) и научно-практических конференциях (НПК), в том числе: международных НТК по проблемам исследования и совершенствования технологии и оборудования обработки давлением 2010-2015 гг. (Краматорск, ДГМА); XIII International Scientific Conference. «New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering» 2012 (м. Ченстохов, Польша); XII International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" 2012 (Vrnjačka Banja, Serbia); VIII, X и XI МНПК «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» 2010, 2012, 2013 (г. Краматорск, ДГМА); XI и XII МНТК «Высокие давления. Фундаментальные и прикладные аспекты», 2010, 2012 (г. Судак, ДонФТИ); МНТК «Теоретичні та прикладні задачі обробки металів тиском та автотехнічних експертиз», 2011 (г. Винница, ВНТУ); IX Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» 2012 (г. Москва, Россия); II МНТК «Машини і пластична деформація металів» 2012 (г. Запорожье, ЗНТУ); V МНПК «Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения» 2012 (г. Ростов-на-Дону, Росія); V Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» 2013 (г. Москва, Россия); VII МНПК «Научно-технический прогресс в металлургии» 2013 (г. Тимуртау, Казахстан); IV МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» 2013 (г. Киев, НТУУ «КПИ»); МНТК «Современные технологии обработки металлов давлением: моделирование, проектирование, производство» 2013

(г. Москва, Россия); МНТК посвященная 80-летию кафедры Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем» БГТУ «ВОЕНМЕХ» «Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением» 2014 (г. Санкт-Петербург, Россия); XVI МНТК «Прогрессивна техника, технологія та інженерна освіта» 2015 (г. Одесса); III и V НТК молодых специалистов «Энергомашспецсталь» 2011, 2013 (г. Краматорск), научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава ДГМА (2004-2015), на научном семинаре при специализированном совете Д.12.105.01 ДДМА 2014-2015 гг, научных семинарах НТУУ «КПИ» (г. Киев), Винницкого НТУУ и Национальной металлургической академии Украины (г. Днепропетровск).

Публикации. Материалы диссертационной работы опубликованы в 82 работах, из них 4 статьи в международных научных журналах, входящих в международную базу данных Scopus и имеют импакт-фактор более 1,0, 64 статьи в сборниках научных трудов из них 20 статья в зарубежных изданиях, 26 статей в специализированных изданиях Украины, 18 тезисов по материалам МНТК. Также материалы опубликованы в 1 учебном пособии с грифом МОН Украины и 1 коллективной монографии. Новые технические решения защищены 19 патентами Украины.

Представленные ниже результаты выполнены при заинтересованном содействии преподавателей и сотрудников факультета интегрированных технологий и оборудования ДГМА, сотрудников научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, которым автор искренне признателен за неоценимую помощь в организации работ, а также за весьма полезные советы и замечания, высказанные на всех этапах совместных обсуждений, от постановки задач до получения оценки результатов. Автор выражает глубокую благодарность научному консультанту, проф., д.т.н. И.С. Алиеву за обсуждение результатов исследований, данные советы и замечания; проф., д.т.н. Маркову О.Е. и проф., д.т.н. В.М. Михалевичу за консультации.

РАЗДЕЛ 1

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ КОВКИ КРУПНЫХ ПОКОВОК И АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

1.1 Управление напряженно-деформированным состоянием заготовки в процессах ковки крупных поковок

1.1.1 Состояние вопроса в процессах ковки крупных поковок

Процессы ковки крупных поковок позволяют получать качественные крупногабаритные изделия, используемые в энергетическом и тяжелом машиностроении. Основной вклад в развитие теории и технологии ковки крупных поковок сделали такие ведущие отечественные и зарубежные ученые как Ю.М. Антощенко, Л.П. Белова, А.Л. Воронцов, В.К. Воронцов, В.А. Гринкевич, М.Я. Дзугутов, В.А. Дурынин, В.Н. Ефимов, В.И. Залесский, М.Г. Златкин, В.Л. Калюжный, П.В. Камнев, Б.С. Каргин, А.В. Котелкин, О.А. Кобелев, В.П. Кривошеев, В.А. Лазоркин, С.А. Машеков, А.А. Мишулин, О.Е. Марков, А.Б. Найзабеков, А.К. Онищенко, Е.Д. Орлов, Я.М. Охрименко, Д.А. Павлик, В.А. Петров, Г.А. Пименов, Л.А. Рябичева, М.Б. Савонькин, Л.Н. Соколов, Ю.П. Солнцев, И.Я. Тарновский, В.Н. Трубин, В.А. Тюрин, Е.П. Унксов, И.П. Шелаев, В.А. Шелохов, G. Banaszek, H. Duja, C.Y. Park, D.Y. Yang, а также целый ряд других учёных.

Несмотря на большое количество исследований, проведенных выше перечисленными учеными, производство крупногабаритных изделий постоянно сталкивается с определенными трудностями. К таким трудностям можно отнести постоянно растущую конкуренцию на отечественном и мировом рынках, связанную с созданием новых технологий ведущими мировыми производителями подобной продукции. Новые технологии предполагают получение высококачественной продукции в короткие сроки с минимальной себестоимостью.

Для успешной конкуренции отечественной тяжелой промышленности

необходимо создание высокоэффективных инструментов в проектировании ресурсо- и энергосберегающих технологий производства крупногабаритных изделий. Необходима разработка методов и методик расчета и проектирования технологических процессовковки крупных поковок и создание на их основе новых способов получения конкурентной продукции.

Это неразрывно связано с анализом имеющихся на данный момент отечественных и зарубежных разработок в областиковки крупных поковок.

Классификации процессовковки поковок позволяют определиться с направлением дальнейших исследований, выявить неисследованные и перспективные приемыковки. Составлением классификаций ранее занимались Охрименко Я.М., Тюрин В.А. и др. [1, 2]. Однако они были не полными и включали в себя, в основном, только лишь разделение процессовковки по форме применяемого инструмента и заготовки.

На качествоковки оказывает большое влияние напряженно-деформированное состояние (НДС). Анализ многочисленных работ отечественных и зарубежных исследователей позволил разбить все факторы, влияющие на НДС заготовки в процессековки, на три группы: фактор формы, в который входит форма инструмента и заготовки, кинематический фактор и температурный фактор.

Фактор формы определяется формой инструмента и формой исходной заготовки. Так существует большое количество инструмента дляковки заготовок, это плоские бойки, комбинированные, вырезные, радиусные, выпуклые, бойки несимметричной формы и т.д. Практически всеми перечисленными бойками из одной и той же исходной заготовки можно получить одинаковое изделие, но НДС заготовки в процессековки везде будет различным. Применение того или иного инструмента обусловлено материалом исходной заготовки, его качеством, формой и необходимыми свойствами конечного изделия. Существуют и заготовки различных форм дляковки, это заготовки круглого сечения, например полученные в машинах непрерывного литья, это многогранные кузнечные слитки, слябовые слитки, трехлучевые слитки,

плоские слитки и т.д. Все рассмотренные слитки, кроме того, что имеют различное внутреннее строение (различную химическую, структурную ликвацию), обуславливают и различное НДС при ковке одним и тем же инструментом.

Кинематический фактор определяется кинематикой воздействия инструмента на заготовку и механическим режимом ковки заготовки. Наиболее распространенной кинематикой движения инструмента при ковке крупных поковок, а следовательно и его воздействия на заготовку, является линейное вертикальное перемещение деформирующего инструмента, которое реализуется на гидравлических ковочных прессах и ковочных молотах. Также достаточно часто встречается и всестороннее обжатие заготовки, которое присуще радиально ковочным машинам и устройствам. Такая кинематика движения инструмента обуславливает всестороннее сжатие заготовки, и применяется при ковке заготовок из малопластичных материалов, для получения поковок с малыми припусками. Кроме того, встречается и трехстороннее движение инструмента при ковке коленчатых валов, здесь совмещается вертикальное и горизонтальное движение инструмента. Сложная кинематика перемещения деформирующего инструмента встречается очень редко из-за сложности ее реализации. Различная кинематика движения инструмента обеспечивает и различное течение металла, и форму получаемого изделия. Механический режим также относится к кинематическому воздействию инструмента на заготовку. Так различная величина подачи заготовки в инструмент, ее обжатие, очередность кантовок являются эффективным инструментом в управлении деформированным состоянием заготовки. Ковка заготовок с паузами позволяет управлять и напряженным состоянием заготовки за счет ее разупрочнения.

Температурный фактор определяется температурным полем заготовки и ее температурным состоянием. Заготовка, подвергаемая деформированию, может быть нагрета выше температуры рекристаллизации (подавляющее большинство процессов ковки крупных поковок), она может быть условно

холодная, т.е. ее температура ниже температуры рекристаллизации (подвергаться специальному виду обработки) и может состоять из двух фаз жидкой и твердой (заготовки, получаемые в машинах непрерывного литья заготовок). Кроме того, заготовка может иметь различный вид температурного поля: однородное температурное поле, неоднородное симметричное с различным видом распределения температур по сечению и неоднородное несимметричное. Деформирование заготовок с описанными температурными полями в различных температурных состояниях будет обеспечивать различное НДС, что обусловлено значительным влиянием температуры на механические свойства металла.

Каждый из описанных выше факторов имеет значительное влияние на процессковки и на параметры качества получаемых изделий. Сочетание данных факторов позволит получить управляемые процессыковки крупных поковок, обеспечивающие требуемые параметры получаемых изделий. Кроме того выделение таких факторов облегчит создание наиболее емких классификаций и использование их для создания новых способовковки.

1.1.2 Состояние вопроса в процессахковки крупногабаритных валов и плит

Фактор формы. Форма инструмента. На течение металла при ковке, его деформированное состояние влияет множество факторов, основными из которых являются форма инструмента, заготовки, режимковки и температурное поле заготовки. Исследованию данных факторов уделено определенное внимание, как отечественными, так и зарубежными учеными. Так, например, в работах [3, 4] проведено исследованиековки в комбинированных бойках. Предложен способ, заключающийся в максимально допустимом обжатии заготовки с кантовками на 180^0 и 90^0 . Установлено, что предлагаемый процесс позволяет значительно снизить количество обжатий заготовки при ее ковке и повысить проработку центральной зоны заготовки.

В работе [5] рассмотрены комбинированные и вырезные бойки, их вли-

яние на интенсивность протяжки и распределение деформации. Исследование проведено на заготовках из стали 35, ковка осуществлялась в температурном интервале $900^{\circ}\text{C} - 1230^{\circ}\text{C}$. Установлено, что существенное влияние на интенсивность протяжки оказывает угол выреза бойков. Так с увеличением угла от 90° до 180° интенсивность протяжки будет уменьшаться в 4 раза для вырезных и в 2 раза для комбинированных бойков. Установлено, что степень вытяжки заготовки при ковке в вырезных бойках больше, чем при ковке в комбинированных, на 48 – 55%.

Большое внимание уделено и исследованию специальных конструкций бойков, их влиянию на параметрыковки. В работе [6] проведено моделирование операции протяжки бойками специальной формы - вырезными радиусными и трапецеидальными (рис. 1.1). Установлено, что вырезные трапецеидальные бойки обеспечивают более интенсивное удлинение заготовки и меньшую силу протяжки. Авторы установили, что наибольшая равномерность распределения интенсивности деформации по всему объему заготовки получается при ковке радиальными вырезными бойками. Однако они отмечают, что с точки зрения экономических показателей предпочтительной является ковка трапецеидальными бойками.

В работе [7] проведено исследование влияния относительной подачи заготовки, при ковке профилированными бойками на деформированное состояние заготовки. Бойки имеют плоскую форму со скосами с двух сторон. Ими установлено, что для наибольшей равномерности распределения деформаций и напряжений в заготовке бойки должны иметь скос равный 60° , ковка должна осуществляться с единичным обжатием 25% и относительной подачей 0,4. Они установили, что угол скоса бойков, влияет на такие параметрыковки, как относительное удлинение заготовки, силу протяжки и неоднородности распределения деформаций в заготовке.

В работах [8, 9] проведено моделирование процессаковки заготовки с дефектами металлургического происхождения в виде несплошностей. Исследовался процессковки цилиндрической заготовки с отверстиями располо-

женными в центральной части заготовки и на различном расстоянии от нее. Проведено исследованиековки в бойках различной конфигурации: вырезных радиальных несимметричных и вырезных трапецеидальных (см. рис. 1.1). На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований, установлено, что использование профилированных бойков, способствует уменьшению в заготовке внутренних дефектов в виде несплошностей и уменьшению неоднородности распределения деформаций по сечению заготовки.

Было установлено, что асимметрия формы бойков благоприятно влияет на закрытие металлургических дефектов уже на начальной стадииковки.

В работе [10] проведено исследованиековки заготовки вырезными бойками, у которых вырез имеет асимметричную форму как в поперечном так и в продольном направлении (рис. 1.2). Установлено, что протяжка, проводимая в ассиметричных бойках, обеспечивает лучшее качество паковок в сравнении с широко распространенными формами бойков.

Отечественными исследователями также было предложено немало специальных конструкций бойков дляковки крупных паковок. Так в работе [11] предложено устройство несимметричных комбинированных бойков. При деформировании такими комбинированными бойками (рис. 1.3) увеличивается несимметричность приложения внешних сил относительно заготовки за счет наклона рабочей поверхности верхнего бойка на угол α_3 . Применение такой конструкции бойков вызывает развитие в объеме заготовки дополнительных плоскостей сдвига, которые способствуют интенсификации проработки структуры металла и заварке внутренних дефектов.

Предложена специальная конструкция вырезных бойков дляковки [12]. Верхний и нижний бойки выполнены вырезными, их рабочие поверхности, расположены под разными углами к оси, проходящей через вершину угла выреза. При ковке данным инструментом, по предположению авторов, максимально однородно прорабатывается структура паковок.

В работе [13] предложены ступенчатые скрещивающиеся бойки. В

данном инструменте деформирующие участки расположены по вершинам выступов и основаниям впадин параллельно один другому и оси ковки. Выступы одного бойка расположены напротив впадин другого бойка. Это обеспечивает при ковке повышение качества поковок. При рабочем ходе инструмента выступы обжимают лишь часть поперечного сечения заготовки. Затем в действие включается участки впадин, и заготовка подвергается последующему обжатию.

В работе [14] предложен специальный инструмент дляковки в виде вырезного несимметричного бойка. Ковка такими бойками обеспечивает перераспределение зон локализованной и заторможенной деформации а, следовательно, улучшает проработку литой дендритной структуры.

В работе [15] предложили скошенные бойки со скрещивающимися рабочими поверхностями. Инструмент содержит верхний и нижний вырезные бойки. Боковые рабочие поверхности каждого бойка расположены крестнакрест. Заготовку подают под бойки и обжимают в вертикальном направлении. При воздействии на заготовку такими бойками происходит пластический сдвиг поворотом одной части очага деформации относительно другой, что позволяет избежать однонаправленного волокнообразования, а также снизить анизотропию металла поковки и улучшить проработку металла в зонах затрудненной деформации.

В работах [16, 17] описан процесс протяжки с непрямолинейным фронтом подачи. Установлено, что при ковке квадратной заготовки плоскими бойками образуются две пары плоскостей максимальных сдвигов, локализующихся попарно. После каждой кантовки на 90° и обжатия одного и того же участка заготовки, сдвиговые деформации изменяют свой знак, но действуют в тех же плоскостях. Из-за этого через некоторое количество кантовок и обжатий может произойти расслоение заготовки по этим плоскостям. Ковка слитков при больших подачах способствует развитию ковочного креста в плоскостях знакопеременных сдвигов.

Определено, что для интенсификации процесса протяжки и улучшения

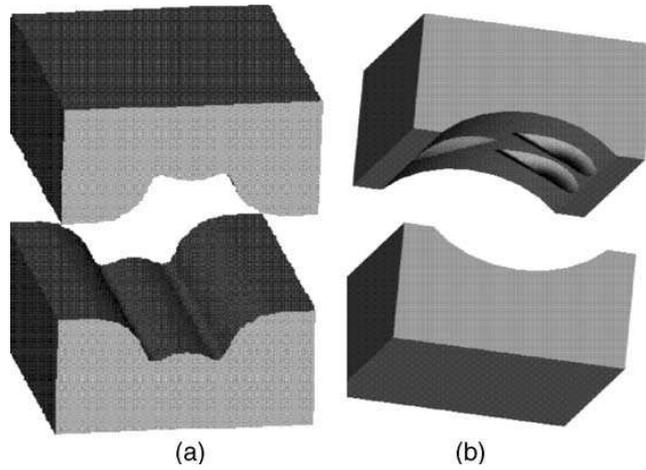
проработки металла целесообразно увеличивать количество и поверхность плоскостей сдвига, т.е. интенсифицировать сдвиговую деформацию по объему проковываемого металла.

В работах [18, 19] проведено исследование способаковки заготовок ступенчатыми в продольном сечении бойками (рис. 1.4) и определено условие развития сдвиговых деформаций. Авторы отметили, что с использованием ступенчатых бойков, возможно, достичь высокого качества изделий при минимальной вытяжке. Обеспечение высокого качества связано с развитием больших пластических деформаций за счет такого формоизменения, при котором отсутствует или слабо выражено течение металла в одном направлении. Такое течение обеспечивается при ковке передачей металла (сдвигом одной части заготовки относительно другой) и может быть реализовано ковкой в ступенчатых бойках.

В работе [20] предложено использовать дляковки поковок типа плит и пластин бойки с трапециевидными выступами и впадинами. Авторы установили, что применение таких бойков позволяет интенсифицировать логарифмические деформации сдвига по всему сечению заготовки путем локализации знакопеременных сдвиговых деформаций.

В работе [21] предложено дляковки поковок типа валов использовать плоские бойки со скосами (фасками), установлено, что применение такого инструмента обеспечит минимальную неравномерность распределения деформаций в объеме заготовки. На основании исследований предложено использовать бойки с углом скоса фаски, равным $20-30^{\circ}$ и длиной рабочей части бойка, равной $0,3-0,5$ от общей ширины, т.е. длина фаски равна $0,25-0,4$ ширины бойка. В работе [22] угол рекомендуется 20° , а длина рабочей части бойка $0,7$ ширины бойка. В патенте [23] указано, что для максимальной однородности механических свойств в изделии необходимо, чтобы бойки имели скос, равный половине бойка с углом $15-25^{\circ}$. Налицо явное противоречие.

Исследование напряженно-деформированного состояния заготовки при ковке в комбинированных, вырезных симметричных, несимметричных и



а – трапецидальные вырезные бойки; б – радиальные вырезные бойки
 Рисунок 1.1 - Бойки специальной формы

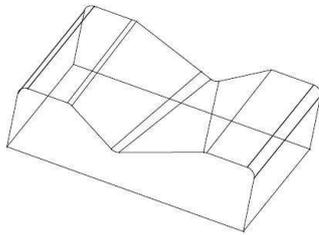


Рисунок 1.2 - Схема вырезного бойка асимметричной формы

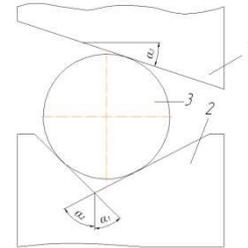


Рисунок 1.3 - Схема специальных комбинированных бойков

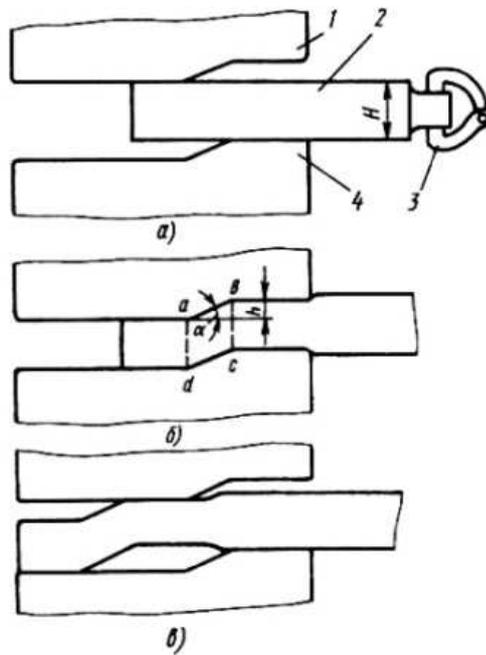


Рисунок 1.4 - Схемаковки в бойках со ступенчатой рабочей поверхностью

профилированных бойках (рис. 1.5) представлено в работах [24, 25]. Авторами оценена эффективность бойков определенных форм для изготовления длинномерных изделий.

Форма заготовки. Кроме конструкции инструмента на течение металла при ковке и качество поковок оказывает влияние и форма исходной заготовки. В работе [26] В.А. Тюрин привел различные типы форм заготовок дляковки крупных поковок и указал на эффективность применения таких заготовок для получения различных поковок. Он рассмотрел восьмигранный, плоский и трехлепестковый слитки. Тюрин В.А. показал, что применение на производстве трехлепесткового слитка массой 7 т, позволило исключить брак валков холодной прокатки, увеличить до 40 % местные деформации в осевой зоне поковки при уковке 1,5.

Как отмечено выше, большое внимание уделено исследованию процессов ковки заготовок инструментом различной формы, однако в большинстве случаев нет конкретных рекомендаций по расчету размеров инструмента для конкретных условий ковки, режимов ковки. Таким образом, дальнейшие исследования с использованием современного математического аппарата рассмотренных выше схем является целесообразным. Кроме того, в литературе мало внимания уделено ковке слитков специальных конфигураций из-за не высокого их распространения в производстве, что может сдерживаться отсутствием научно обоснованных рекомендаций по их применению. Практически полностью отсутствуют данные по ковке слитков специальных конфигураций в инструменте нетрадиционной формы, что также является дополнительным ресурсом совершенствования процессов ковки крупных поковок.

Кинематический фактор. Кинематика воздействия инструмента. В работе [27] предложен специальный инструмент для радиальной ковки (рис. 1.6). Инструмент содержит две пары расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях бойков с вырезами. Бойки имеют по две пары смещенных относительно друг друга вдоль продольной оси рабочих наклонных поверхностей. Каждая пара состоит из примыкающих друг к другу

длинной и короткой поверхностей. При смыкании бойков длинные рабочие поверхности образуют два расположенных крест-накрест ромба. В результате обеспечивается повышение производительности процесса и более интенсивная деформационная проработка литой структуры металла заготовок (см. рис. 1.6).

В.М. Сегал предложил инструмент дляковки металла, с продольным сдвигом заготовки [28, 29]. Инструмент, в котором верхний боек движется в двух направлениях (горизонтальном и вертикальном) позволяет повысить производительность работ и улучшить качество проработки металла. Исследования показали, что при ковке высоких полос продольный сдвиг приводит к благоприятному распределению напряжений и деформаций, что способствует качественной проковке материала и устраняет осевое разрушение, тогда как энергетические показатели процесса ухудшаются.

Известны схемыковки со сложной кинематикой движения инструмента для получения поковок кривошипных валов, где вертикальное движение траверсы прессы с главным деформирующим инструментом совмещается с горизонтальным перемещением дополнительного инструмента для вытяжки. Для такого способаковки применяются специальные штампы. В целом, исследования сложной кинематики перемещения инструмента, ее влияния на напряженно-деформированное состояние заготовки при ковке крупных поковок малочисленны вследствие сложности ее реализации на практике. Так широкое распространение нашла только лишь радиальная ковка в специальных машинах или устройствах, устанавливаемых на обычный гидравлический ковочный пресс. Интерес представляют новые схемыковки со сложной кинематикой перемещения инструмента сложной конфигурации, которая может быть реализована в специальных штампах либо на специализированном оборудовании, что также может дать толчок в создании оборудования нового типа.

Механический режим. Кроме конструкций инструмента в работах многих исследователей большое внимание уделено и режимамковки с учетом

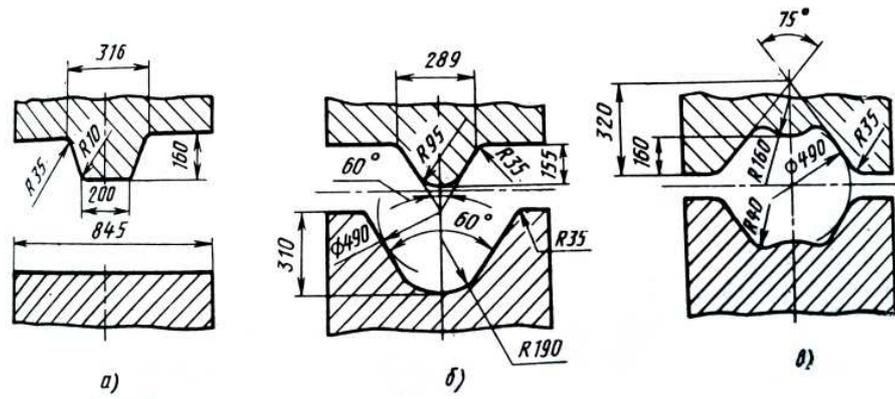
использования специального инструмента. Так в работе [30], рассматривая вопрос улучшения качества металла при продольной ковке отмечено, что качество поковок, изготавливаемых из слитков, определяется степенью местной деформации исходной литой структуры. Важнейшей задачей при этом является обеспечение равномерности распределения деформации в объеме поковки. Регулирование течения металла можно эффективно осуществлять путем варьирования формы заготовки. При этом форму заготовки целесообразно задавать ковкой за счет рациональной конфигурации инструмента. Рассмотрена ковка протяжкой бойками с выпуклой рабочей поверхностью и последующей правкой плоскими бойками, которая позволяет достичь большей проработки сечения слитка. Проведен эксперимент по ковке слитка массой 1,7 т из стали 30ХГСА по двум схемам (рис. 1.7), плоскими и выпуклыми бойками с уковами 2,5 и 6.

Установлено, что поковка, откованная выпуклыми бойками, имеет неравномерность распределения деформаций примерно в 4 раза меньше, чем поковка, откованная плоскими бойками.

В работах [31-33] рассмотрено влияние величины относительной подачи и обжатия заготовки плоскими бойками на ее напряженно-деформированное состояние и заковку внутренних дефектов в виде осевых пустот. В этих работах установлено, что протяжка заготовок с малыми относительными подачами до 0,5 в центральной части заготовки возникают растягивающие напряжения, не благоприятно влияющие на качество поковок, протяжка с относительной подачей более 0,6 приводит к появлению в центральной части заготовки всестороннего неравномерного сжатия. Кроме того, подача заготовки существенно влияет на распределение деформаций в ее продольном сечении, при малых подачах эта неравномерность меньше.

В этих работах также установлено влияние переходовковки, обусловленных определенной последовательностью кантовок, величиной обжатий и подач на напряженно-деформированное состояние заготовки.

Механический режимковки как параметр, которым возможно управ



а – плоские; б – комбинированные; в – вырезные

Рисунок 1.5 - Конструкции специальных бойков применяемые в экспериментальных исследованиях



Рисунок 1.6 - Схема инструмента для радиальнойковки

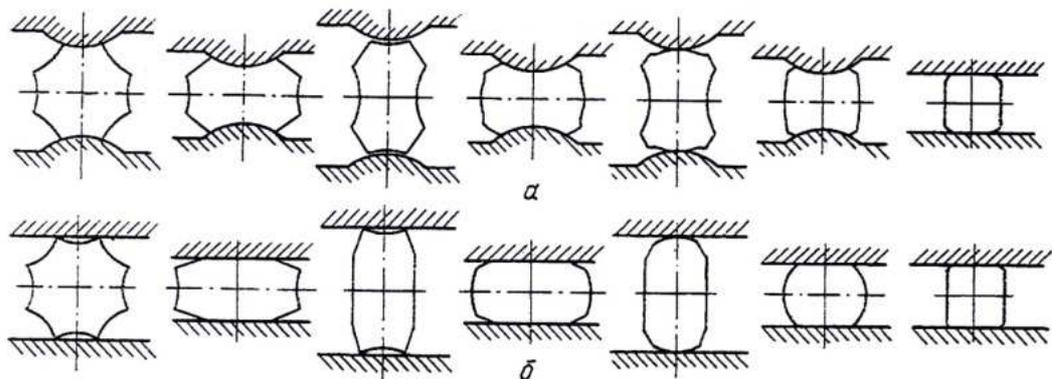


Рисунок 1.7 - Схематическое изображение контура поперечного сечения заготовки при протяжке между выпуклыми (а) и плоскими (б) бойками

лять напряженно-деформированным состоянием заготовки имеет широкие и перспективные возможности. Используя стандартный инструмент, имеющийся практически на каждом предприятии, где осуществляется ковка крупных поковок, возможно задавая определенные параметрыковки, такие как подача, обжатие, кантовки, возможно, получать в заготовках различные деформационные поля, иными словами управлять деформационным полем. Кроме того, возможно профилирование заготовки, т.е. получение промежуточной формы заготовки, обуславливающей определенное НДС заготовки в процессековки. Несмотря на то, что механические режимыковки исследовались и ранее, существуют и определенные белые пятна, так скажем, многие авторы отмечают, что практически невозможно получать однородное деформационное поле в заготовке, скажем при протяжке. Однако известным фактом является, то, что протяжка с большими обжатиями и подачами приводит к существенной проработке центральной части заготовки, а малые обжатия и подачи к проработке периферийных слоев заготовки. Таким образом, сочетание этих режимов протяжки на определенных этапахковки наверняка позволит получить равномерное деформационное поле в заготовке.

Температурный фактор. Температурное поле. Еще одним параметром, позволяющим управлять процессомковки является температурное поле заготовки. В работе [34] отмечено, что поле температур в заготовке в значительной мере влияет на структуру очага деформации заготовки, и как следствие, различное распределение деформаций. Исследован процессковки, основой которого является то, что при охлаждении нагретой заготовки образуется наружный слой металла с более высокими характеристиками прочности, чем в осевой зоне заготовки. При соблюдении определенных температур во внешних и внутренних слоях заготовки, обеспечение определенной толщины охлажденного слоя металла, достигаются благоприятные условия напряженного состояния металла, в осевой зоне удачно сочетающиеся с сосредоточением в ней наибольших деформаций при ковке.

Ковка заготовок с подстуженной поверхностью должна осуществляться

с небольшими единичными обжатиями, примерно равными 7%. Экспериментально показана эффективность данных способовковки с точки зрения проработки центральной части заготовки. В работе [35] отмечено, что при ковке вала из стали 60ХН, эффективным с точки зрения проковки осевой части заготовки и минимизации остаточных напряжений является деформирование охлажденной заготовки с небольшими обжатиями.

Температурный фактор обладает широкими возможностями в управлении НДС заготовки при ковке. В ранних работах отечественных ученых этот фактор слабо исследован из-за определенных проблем, связанных с математическим описанием неравномерного температурного поля в процессахковки крупных поковок и учета его влияния на НДС заготовки. Однако современный математический инструментарий более совершенный и позволяет учитывать неравномерное температурное поле в заготовках в процессахковки. Это обуславливает необходимость его исследования в сочетании с другими факторами управления НДС заготовки.

1.1.3 Состояние вопроса в процессахковки крупногабаритных дисков

Фактор формы. Форма инструмента. Существует большое количество инструмента для осадки заготовок: это плоские плиты, вогнутые, выпуклые, с отверстием симметричной и несимметричной формы. Практически всеми перечисленными плитами из одной и той же исходной заготовки можно получить одинаковое изделие, но НДС заготовки в процессековки будет различным. Применение того или иного инструмента обусловлено материалом исходной заготовки, его качеством, формой и необходимыми свойствами конечного изделия.

Традиционным и наиболее распространенным способом осадки являетсяковка плоскими плитами (рис. 1.8) [36-37]. Исследованию данного способа осадки посвящены многочисленные исследования отечественных и зарубежных исследователей. Основными особенностями данного способа осадки является большая неоднородность деформаций в заготовке, что приводит к

бочкообразованию, механической и структурной неоднородности изделия.

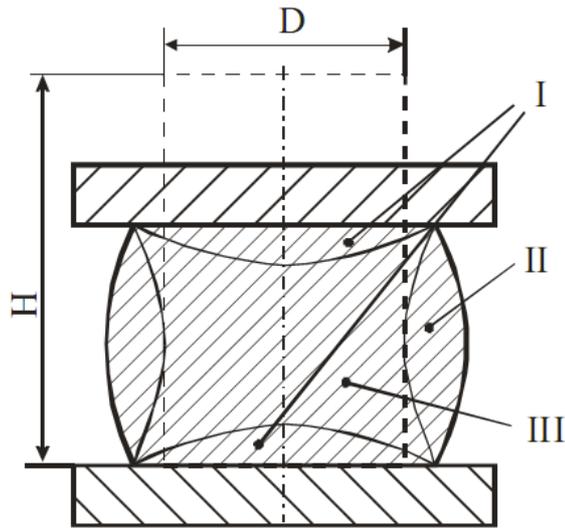
Для решения тех или иных проблемковки дисков осадкой предложен ряд технологических решений в виде инструмента различной конфигурации [38-42] рис. 1.9 – 1.12. Это полые плиты сложного профиля, плоские плиты с выступом, выпуклые плиты с отверстием, выпукло-вогнутые плиты и т.д.

Форма заготовки. Существуют и заготовки различных форм для осадки: это заготовки круглого сечения, например полученные в машинах непрерывного литья, это многогранные кузнечные слитки, слябовые слитки, трехлучевые слитки, плоские слитки и т.д. Все рассмотренные слитки, кроме того, что имеют различное внутреннее строение (различную химическую, структурную ликвацию), обуславливают различное НДС при ковке одним и тем же инструментом.

Известно применение заготовок различной формы: формы усечённого конуса [43] рис. 1.13, заготовка с вогнутыми гранями поперечного сечения [44] рис. 1.14, заготовка с квадратной формой поперечного сечения [45] рис. 1.15, заготовка с вогнутой боковой поверхностью [46] рис. 1.16.

В патенте [47] предлагается осадка заготовки, имеющей форму цилиндра с двумя коническими уступами на концах. Таким образом, в процессе осадки в первую очередь будут деформироваться торцы поковки, будет образовываться вогнутая боковая поверхность и уменьшится зона затрудненной деформации в конечном изделии. Согласно рекомендаций, данных в патенте, длина каждого конического участка заготовки должна иметь длину, равную 0,27 диаметра средней части заготовки, а диаметр конических концов заготовки равен 0,73 диаметра средней части заготовки. В патенте [48] описан тот же способ, однако рекомендации по назначению размеров заготовки противоположные: длина конического участка заготовки 0,75 диаметра ее средней части, меньший диаметр конца заготовки 0,25 диаметра средней части. Наблюдается абсолютное противоречие.

Кинематический фактор. *Кинематика воздействия инструмента.* Кинематический фактор определяется кинематикой воздействия инструмента на



I – зона затрудненной деформации; II – зона средней деформации; III – зона интенсивной деформации

Рисунок 1.8 - Зоны деформации при осадке

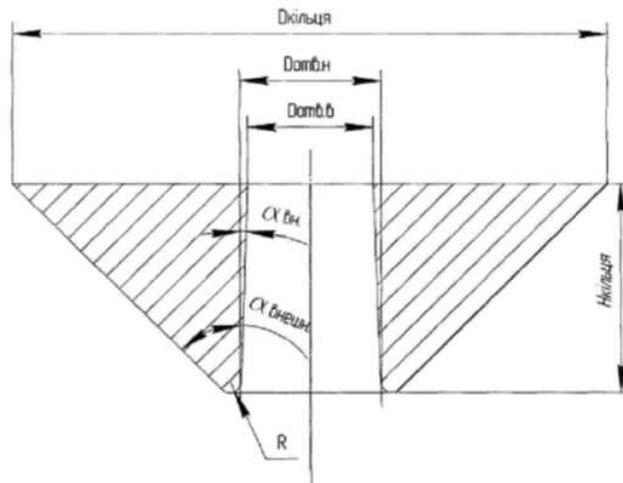


Рисунок 1.9 - Схема «врезного» конусного кольца

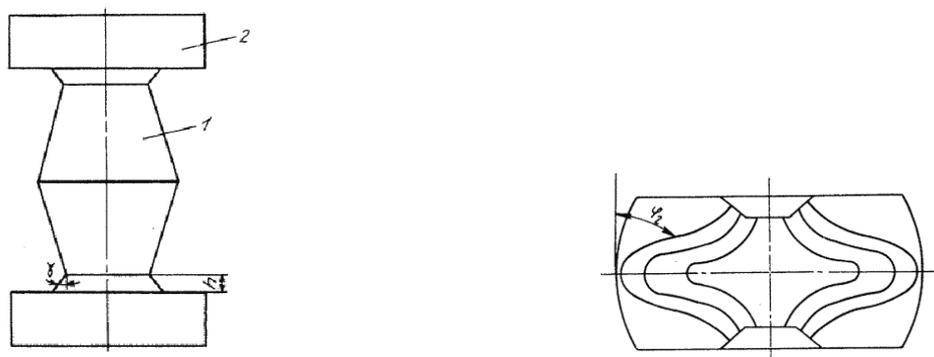


Рисунок 1.10 - Схема деформирования с плитами с коническими выступами

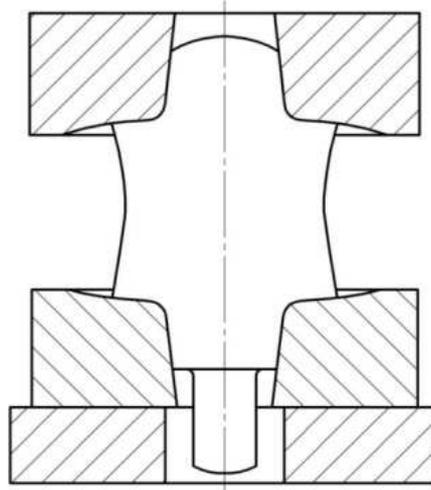


Рисунок 1.11 - Осадка вогнутыми плитами с отверстием

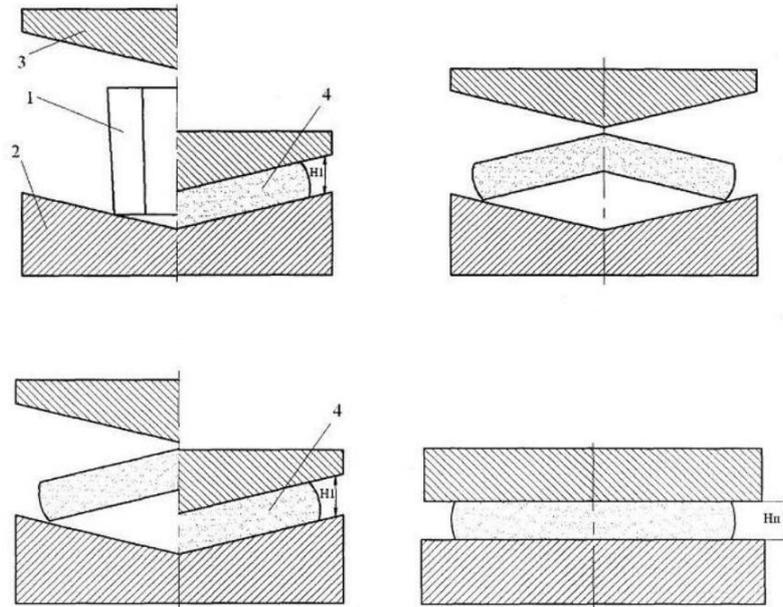


Рисунок 1.12 - Схема осадки заготовки коническими плитами

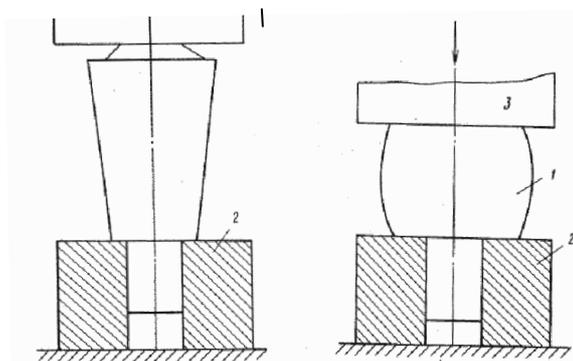


Рисунок 1.13 - Схема проработки структуры в осевой зоне

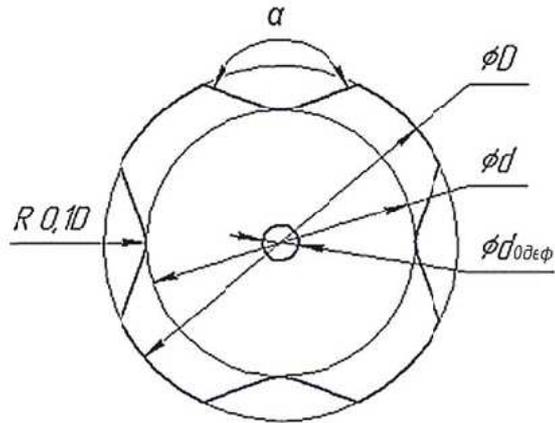


Рисунок 1.14 - Схема поперечного сечения заготовки и с вогнутым поперечным сечением

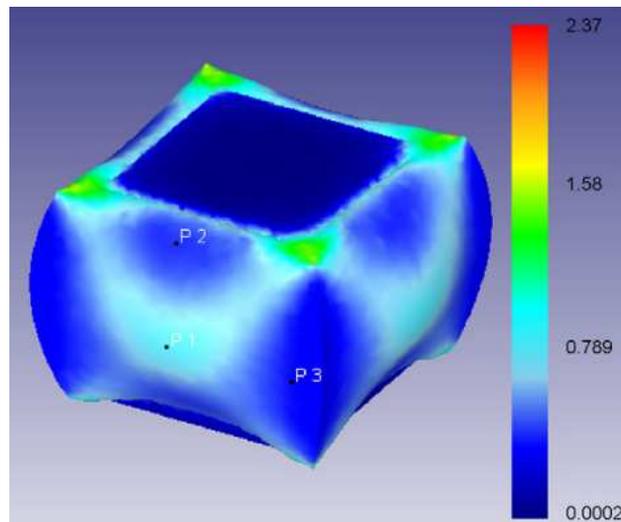


Рисунок 1.15 - Распределение деформаций в осажённой заготовке

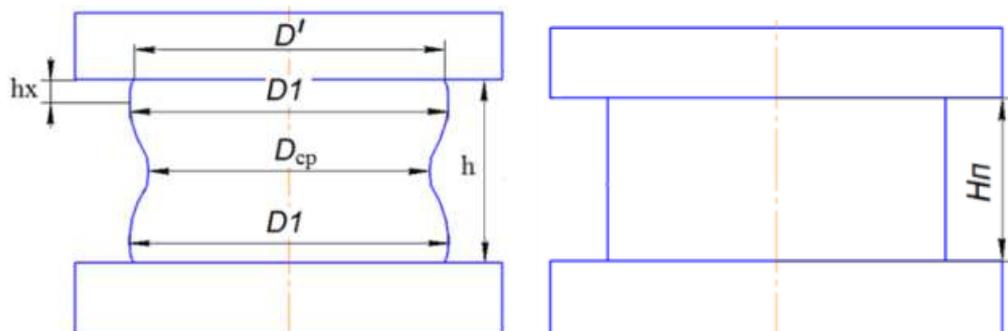


Рисунок 1.16 - Схема осадки цилиндрической заготовки с вогнутой боковой поверхностью

заготовку и механическим режимом осадки заготовки. Сложная кинематика перемещения деформирующего инструмента встречается очень редко, из-за сложности ее реализации. Различная кинематика движения инструмента обеспечивает и различное течение металла, и форму получаемого изделия.

Выше описан способ осадки разгонкой, который осуществляется последовательными обжатиями и подачами заготовки. В работах [49, 50] предложен способ разгонки с последовательным вращением бойка либо стола прессы с нижней плитой и заготовкой. Данный способ позволяет уменьшить величину отклонения формы поперечного сечения заготовки, получаемой осадкой.

В работе [51] предложен способ осадки со сдвигом (рис. 1.17). Повышение качества изделий достигается тем, что осадку заготовок осуществляют между двумя параллельными плитами с одновременным приложением к заготовке осевой силы и силы сдвига в плоскости, перпендикулярной оси заготовки. При этом сила сдвига прилагается путем кругового перемещения одной из плит относительно другой (рис. 1.17).

В работе [52] исследован способ осадки с кручением. Процесс заключается в том, что вместе с линейным перемещением инструмента в процессе осадки осуществляется и вращательное движение осадочных плит. По мнению авторов, данный способ приводит к уменьшению силы деформирования и уменьшению неоднородности распределения деформаций. Это приводит к уменьшению выпуклости бочки в процессе осадки.

Механический режим. Механический режим процесса осадки также оказывает существенное влияние на НДС заготовки в процессе осадки. Так в работе [53] проведено исследование процесса осадки заготовки с паузами. Известно, что в процессе деформирования металл упрочняется, увеличивается сопротивление деформации, что приводит в процессе осадки к значительному увеличению технологической силы. Также известно, что при изотермической выдержке деформированного металла происходит перегруппировка дислокаций, частичное восстановление кристаллической решетки металла и

уменьшение числа дефектов, что приводит к разупрочнению и как следствие к снижению технологической силы.

Механический режим имеет значительное влияние на НДС заготовки в процессах осадки разгонкой. Величина подачи или поворота заготовки (инструмента) будет оказывать определяющее влияние на параметры формоизменения.

Температурный фактор. Одно из наибольших влияний на параметры осадки в процессахковки крупных поковок имеет температура заготовки и ее распределение по объему. Основная масса процессов осадки осуществляется при нагреве заготовки до температуры выше температуры рекристаллизации, это делается с целью максимального снижения сопротивления деформации и увеличения пластичности. Известны примеры деформации заготовки, нагретой ниже температуры рекристаллизации с целью увеличения прочностных характеристик получаемых изделий.

В работах [54, 55] приведено исследование процессаковки заготовки с охлажденной поверхностью, основой которого является то, что при охлаждении нагретой заготовки образуется наружный слой металла с более высокими характеристиками прочности по сравнению с характеристиками осевой зоны заготовки. При соблюдении определенных температур во внешних и внутренних слоях заготовки, обеспечении определенной толщины охлажденного слоя металла достигаются благоприятные условия напряженного состояния металла в осевой зоне, удачно сочетающиеся со сосредоточением в ней наибольших деформаций при ковке.

В работе [56] исследован процесс осадки форсировано нагретого слитка. Повышенное сопротивление деформации глубинных слоев позволяет более эффективно прорабатывать поверхностную зону слитка для создания пластичной оболочки.

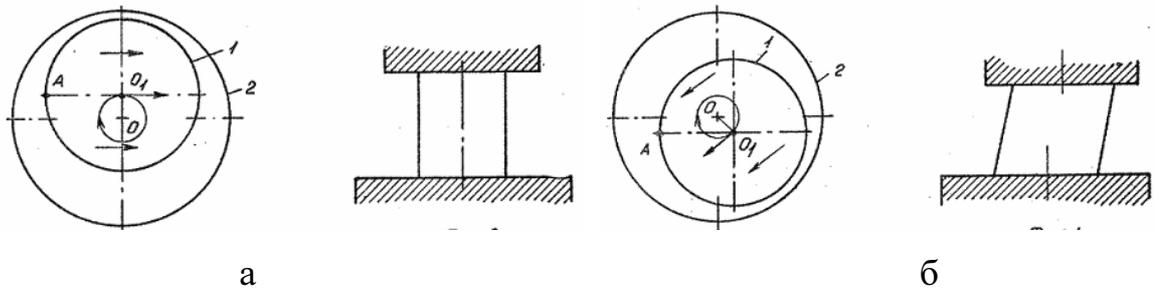
1.1.4 Состояние вопроса в процессахковки крупногабаритных колец

Фактор формы. Форма инструмента. Кольца ковкой получают за счет раскатки осаженной и прошитой заготовки. Обычно раскатка осуществляется плоским бойком, на цилиндрическом дорне, установленном на двух опорах. Раскатка сопровождается малыми обжатиями и проворачиванием дорна для поворота заготовки. Интенсификация процесса раскатки является весьма актуальной задачей, которой занимается большое количество исследователей. Для повышения эффективности процессов раскатки предлагается применение множества решений приведенных в работах [57 - 66] и представленных на рис. 1.18 – 1.24.

Форма заготовки. Исходной заготовкой для раскатки колец является кузнечный слиток различных конфигураций. Часто используется обычный кузнечный слиток [67], в этом случае технологияковки кольца включает в себя осадку и прошивку, что, несомненно, накладывает на конечный продукт в виде кольца определенное поле деформаций и влияет на НДС заготовки в процессековки.

Более приемлемым является применение бесприбыльного кузнечного слитка, использование которого существенно снижает металлоемкость получаемых колец при достижении приемлемого качества. Технологияковки колец из бесприбыльного слитка также предполагает осадку и прошивку заготовки, кроме того со стороны прибыльной части слитка в поковке делается дополнительный припуск на механическую обработку для удаления некачественного металла [67].

Известны примеры использования полых слитков для получения поковок типа колец и труб [68, 69]. Использование таких слитков позволяет существенно сократить количество технологических переходовковки, так отпадает необходимость в осадке и прошивке, уменьшается количество нагревов. Все это ведет к существенному снижению себестоимости изделия. Кроме того НДС такой заготовки в процессе раскатки будет существенно отличаться от НДС заготовки, полученной из бесприбыльного или обычного кузнечного



а – начальное положение осаживающих плит; б – положение плит во время деформирования

Рисунок 1.17. Схема осадки заготовки со сдвигом

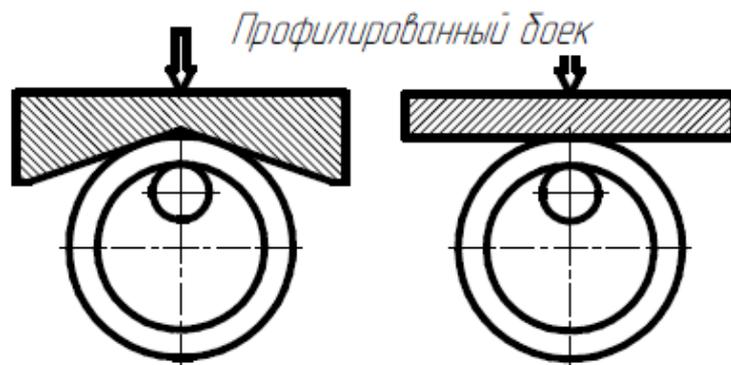


Рисунок 1.18 - Схема раскатки колец плоским и вырезным бойками

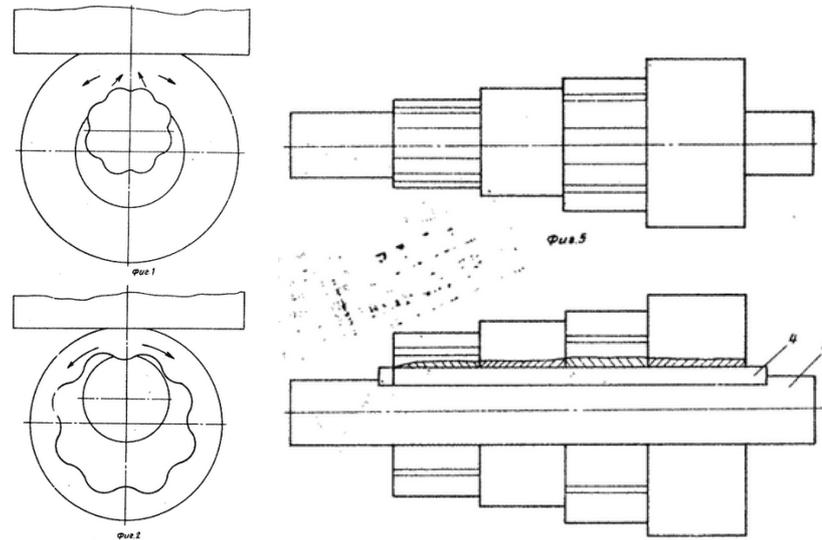


Рисунок 1.19 - Схема процесса раскатки кольца на специальной оправ-

ке

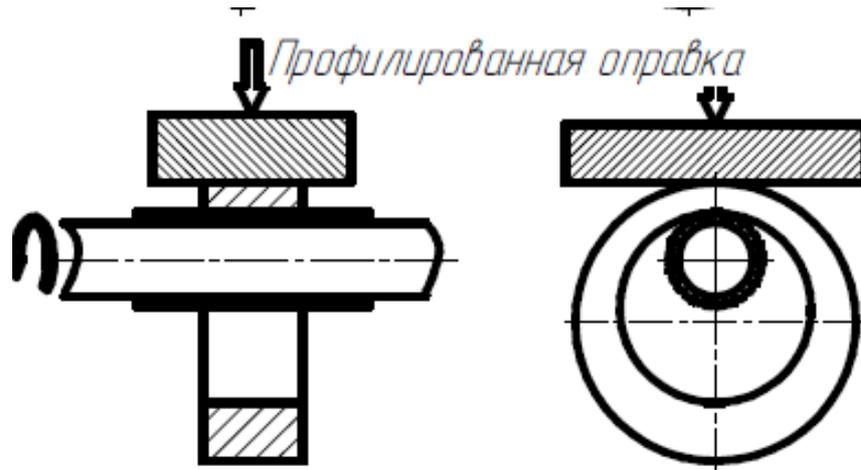


Рисунок 1.20 - Схема раскатки несимметричного кольца

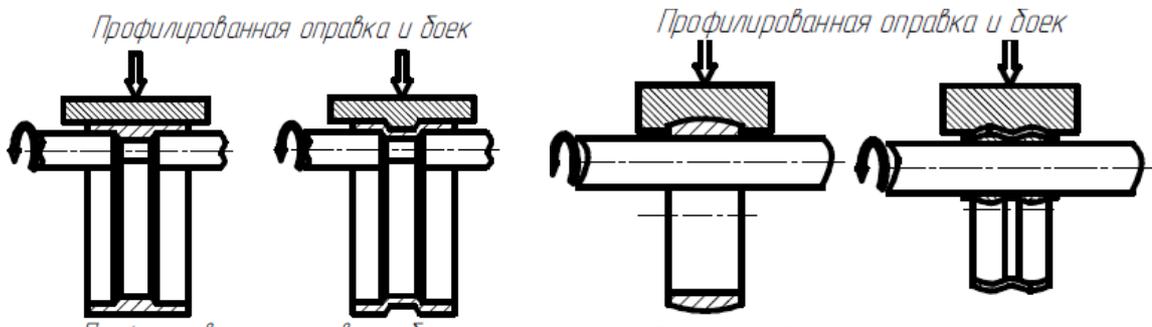


Рисунок 1.21 - Схема раскатки сложно профилированных колец

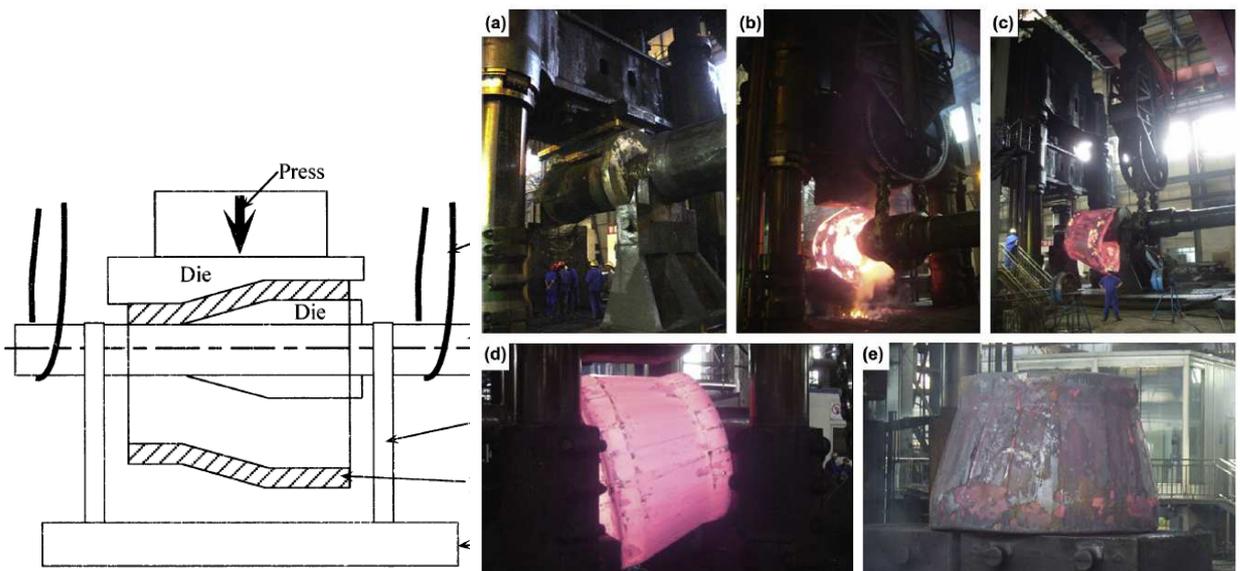


Рисунок 1.22 - Схема раскатки конических колец

слитка, т.к. на нее не будут наложены поля деформаций, получаемые в результате осадки и прошивки.

Форма заготовки оказывает существенное влияние на НДС заготовки в процессе раскатки и влияет на формоизменение. Так если взять обычный кузнечный инструмент (плоский боек и гладкий дорн) и произвести раскатку полой ступенчатой заготовки, то в итоге получится коническое кольцо. Это произойдет за счет того, что в первую очередь будет деформироваться участок заготовки большего диаметра, увеличение поперечных размеров заготовки будет происходить только лишь с одной стороны, в то время как у заготовки останется жесткий недеформируемый конец меньшего диаметра. Исследование данного процесса приведено в работе [70]. Заготовка же подобной ступенчатой формы может быть получена различными способами: протяжкой на оправке или литьем [71, 72].

В работе [73] для получения конических колец предлагается использовать исходную заготовку в виде кольца с конической внутренней поверхностью (рис. 1.25), которое получено протяжкой на конической оправке. За счет разности толщин стенки по длине заготовки при раскатке плоским бойком достигается различная по длине вытяжка, что позволяет получать коническое кольцо.

Кинематический фактор. Кинематика движения инструмента. Наряду с формой инструмента и заготовки по влиянию на НДС в процессе раскатки стоит и кинематический фактор. Кинематика движения инструмента оказывает существенное влияние на производительность и качество получаемого продукта в процессе раскатки. Примеры различной кинематики движения инструмента не многочисленны из-за сложности их реализации. В подавляющем большинстве применяется традиционная схемаковки, которая заключается в линейном перемещении плоского бойка прикрепленного к ползуну прессы для деформирования заготовки и вращательного движения дорна для поворота заготовки вдоль своей оси [77]. Данная схема имеет несколько вариантов реализации, которые зависят от габаритов получаемой поковки и

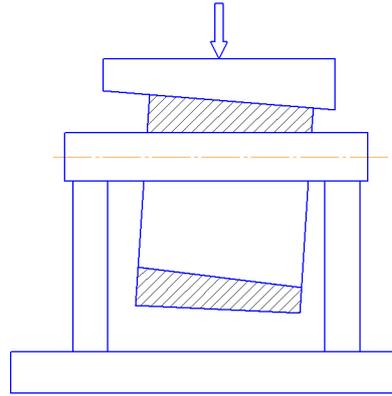


Рисунок 1.23 - Схема раскатки конического кольца скошенным бойком

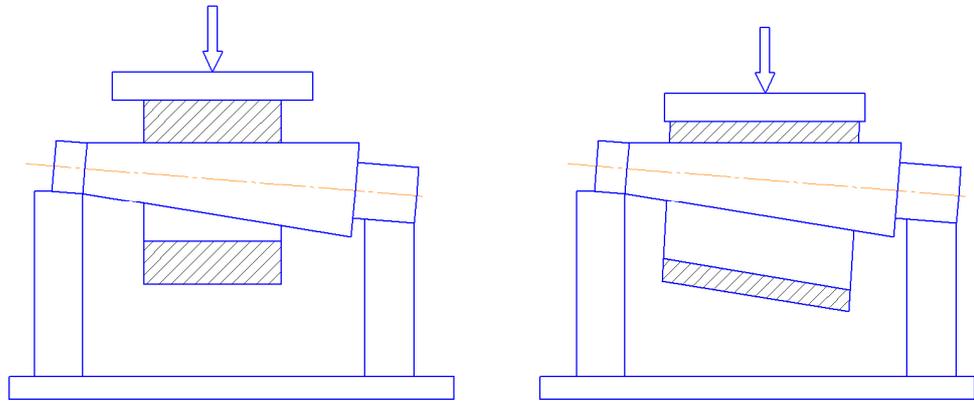


Рисунок 1.24 - Ковка конической обечайки с применением специальной оправки

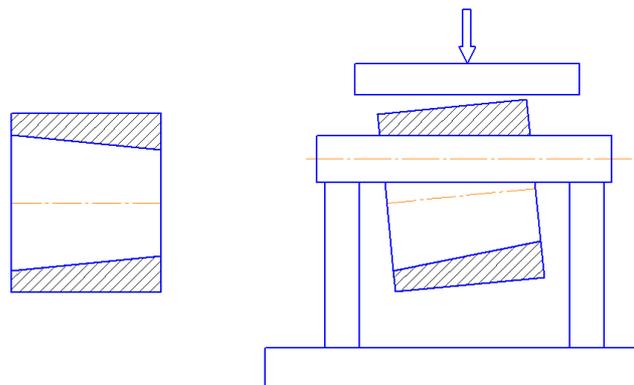


Рисунок 1.25 - Схема раскатки кольца с внутренней конической поверхностью

размеров пресса.

В случае больших габаритов поковки, которая не может быть размещена под прессом, применяют схему внепрессовой раскатки, как это показано на рис. 1.26 [74, 75]. В данном случае вертикальное движение ползуна пресса может быть преобразовано через систему рычагов или клиновую систему в горизонтальное или угловое движение деформирующего инструмента. Такие приемы значительно расширяют возможности процессов раскатки.

В работе [76] авторы, предлагают получать конические кольца раскаткой обычной кольцевой заготовки, на гладкой оправке плоским бойком применяя специальный кинематический режим рис. 1.27.

Для более производительного получения колец используют специальные раскатные машины [77, 78]. В данном случае деформирование кольца происходит не за счет линейного перемещения плоского бойка, а за счет линейного перемещения ролика, который одновременно вращается вокруг своей оси (рис. 1.28).

Механический режим. Исследованию механического режима раскатки посвящен ряд работ. В работе [79] авторы для получения конических поволоков предлагают в процессе раскатки на оправке выставлять оправку под углом к рабочей поверхности плоского бойка (рис. 1.29). За счет этого в процессе деформирования стенка заготовки обжимается неравномерно по длине, что приводит к разности вытяжек в процессе раскатки и формируется наружная и внутренняя коническая поверхности заготовки. В случае раскатки высокого кольца, когда ширина бойка не позволяет за один раз перекрыть всю ширину стенки, авторы работы [80] предлагают производить раскатку по частям с последующей правкой. В работе [81] устанавливаются рациональные параметры раскатки, такие как скорость раскатки и величина обжатия для получения поковки требуемых размеров и качества.

Температурный фактор. Температурное поле в процессе раскатки заготовки постоянно меняется и хотя в литературе практически отсутствует информация по схемам ковки колец со специально полученным неоднород-

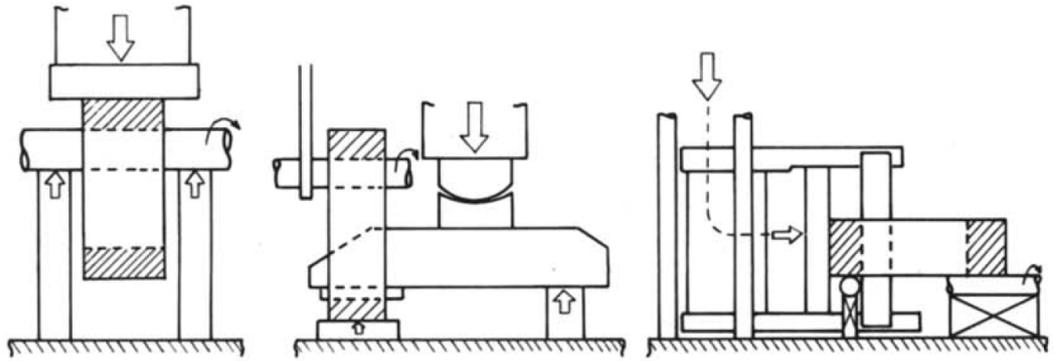


Рисунок 1.26 - Схемы прессовой и вне прессовой раскатки колец

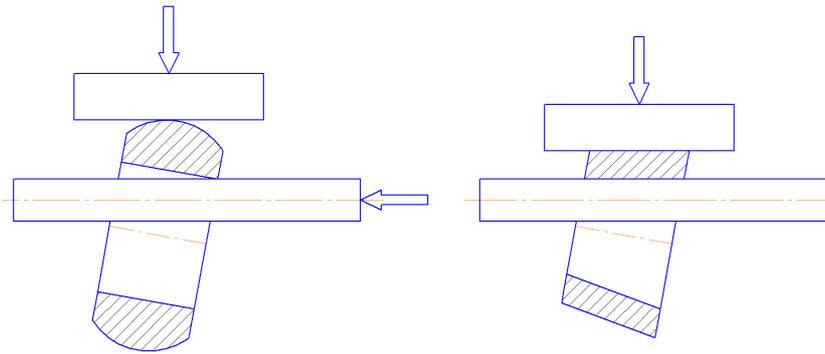


Рисунок 1.27 - Схема раскатки конического кольца

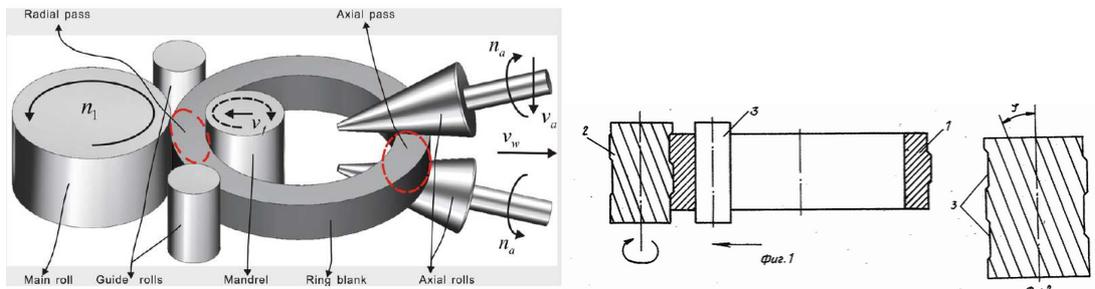


Рисунок 1.28 - Схемы получения колец на раскатных машинах

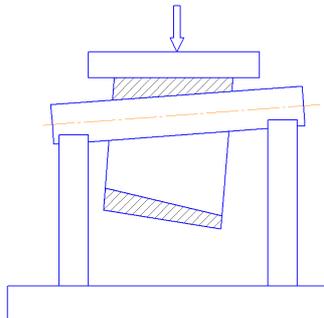


Рисунок 1.29 - Раскатка кольца на оправке, выставленной под углом

ным температурным полем, данный фактор может оказать существенное влияние, как на качество, так и на формоизменение заготовки.

1.1.5 Состояние вопроса в процессахковки крупногабаритных труб

Фактор формы. Форма инструмента. Дляковки поковок типа труб традиционно используются комбинированные и вырезные бойки и коническая охлаждаемая оправка. Такой инструмент позволяет получать трубные изделия разнообразной наружной и внутренней формы, используя различные технологические приемы [82]. Форма инструмента оказывает существенное влияние на параметры формоизменения, качество и оказывает значительное влияние на возможность трещинообразования в процессековки. Наряду с использованием традиционного инструмента известно применение инструмента специальной формы для расширения возможностей, увеличения производительности и качества при получении трубных изделий [83-88] рис. 1.30-1.33.

Форма заготовки. В работе [89] предлагается для получения трубной поковки с глухим дном использовать заготовку, полученную прошивкой также с глухим дном (рис. 1.34). Технология, которую предлагают авторы, предполагает прошивку заготовки специальной оправкой и протяжку поковки на данной оправке. Таким образом, изделие, полученное данным способом, не будет иметь сварных швов, что определяет его более высокое качество.

В работе [90] для получения крупногабаритных трубчатых поковок предлагается использовать заготовку специально формы (рис. 1.35). Это позволяет обеспечить изготовление полых крупногабаритных поковок, длина которых больше длины стола прессы. Для получения такой заготовки на первой операции протяжки ей придается форма цилиндра с концевыми утолщениями. Затем раскаткой заготовка обрабатывается до поковочных размеров по внутреннему диаметру и наружному диаметру средней части. Далее концевые утолщения протягиваются на короткой оправке поочередно. Это поз-

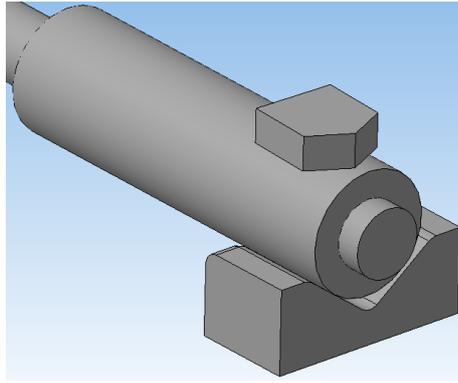


Рисунок 1.30 - Схема протяжки трубы верхним узким бойком с непрямолинейным фронтом подачи

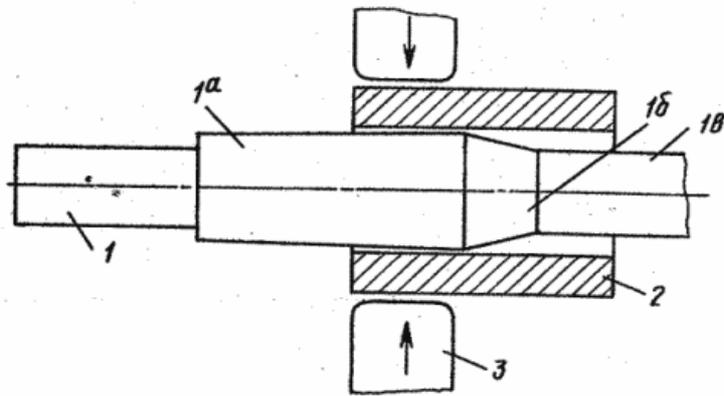


Рисунок 1.31 - Схема ковки заготовки с использованием ступенчатой оправки

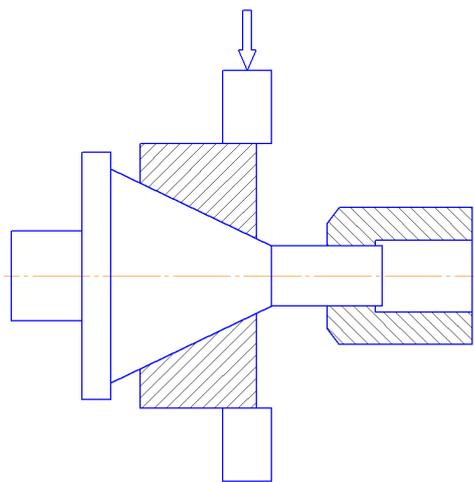


Рисунок 1.32 - Схема протяжки поковки на конической оправке

воляет минимизировать длину и массу оправки для протяжки и обеспечить изготовление поковок большой длины.

Исходной заготовкой для трубных поковок в основной своей массе являются обычный кузнечный, малоприбыльный и бесприбыльный кузнечный слиток. Использование подобных заготовок предполагает в технологическом процессе операции осадки и прошивки.

Поле напряжений и деформаций, приобретённых заготовкой в данных процессах, накладывается на аналогичные поля в процессе протяжки. В работе [91] приведен пример использования в качестве исходной заготовки полового слитка массой 500 т (рис. 1.36). По описываемой в данной работе технологии не было возможности осадить и прошить слиток таких размеров. Применение полых слитков для поковок меньшей массы также является достаточно эффективным, т.к. из технологического процесса исключаются две энергоёмких операции: осадка и прошивка. Количество переходов сокращается, уменьшается количество подогревов и, как следствие, снижается себестоимость изделия.

Кинематический фактор. Кинематика воздействия инструмента. Традиционные схемы ковки поковок типа труб предполагают линейное вертикальное перемещение кузнечного бойка, прикрепленного к траверсе прессы, горизонтальное перемещение оправки с заготовкой для протяжки по длине и вращательное движение оправки [82].

Существуют схемы ковки поковок труб на радиально-ковочных машинах (РКМ) [92] в которых деформирование происходит сразу четырьмя бойками (рис. 1.37). Такая схема ковки является более закрытой, нежели ковка в вырезных бойках на гидравлическом прессе. Схема напряжённого состояния является более благоприятной с точки зрения предельной деформации металла, кроме того, в процессе ковки по такой схеме металл более интенсивно разогревается, что позволяет за один вынос дать изделию больший уков.

Трубы, полученные на РКМ, имеют повышенную точность. Однако существуют и некоторые ограничения в использовании таких схем деформи-

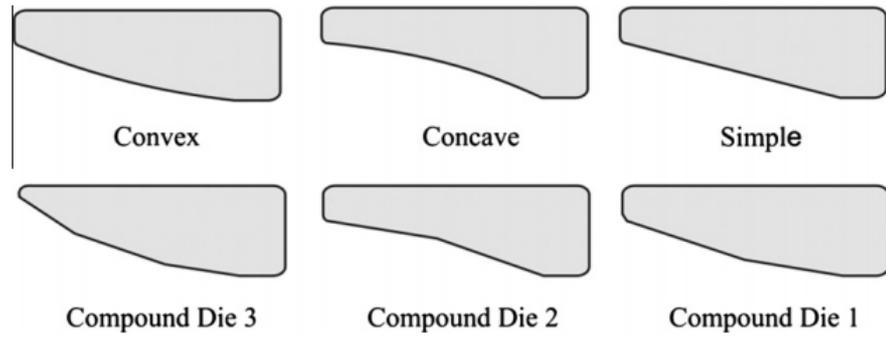


Рисунок 1.33 - Форма продольного сечения бойков для протяжки труб

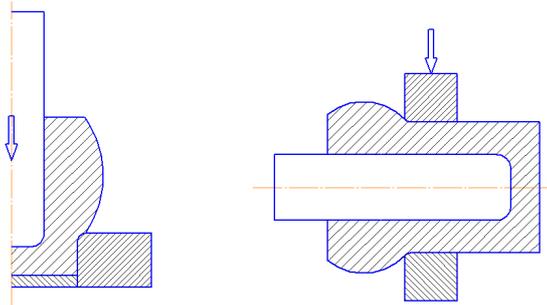


Рисунок 1.34 - Ковка трубных поволок с глухим дном

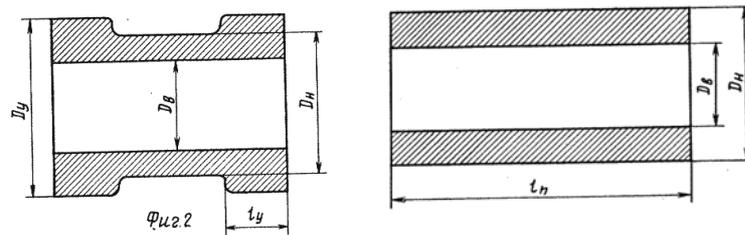


Рисунок 1.35 - Ковка ступенчатой заготовки



Рисунок 1.36 - Общий вид полого слитка для изготовления трубной поковки

рования. Трубы, которые получают на РКМ, имеют ограниченный размер. В основном это трубы диаметром до 500..600 мм.

Для получения труб с глухим дном повышенной точности известно в промышленности применение схем, взятых из объемной штамповки. Так в работе [93] описана схема обратного выдавливания слитка в специальном инструменте (рис. 1.38). В данной схеме деформирования подвижным является только деформирующий инструмент–прошивень. НДС заготовки в данном случае кардинально отличается от схемы протяжки на оправке. Точность изделия при этом определяется точностью используемого инструмент и точности его направления. Данная схема производства труб реализуется на SMS Meer.

Также известна схема протяжки трубы через фильеру [93]. Процесс предполагает получение полой заготовки с глухим отверстием и протяжку данной заготовки через фильеру для получения необходимых размеров (рис. 1.39). В данном случае кинематика движения инструмента также несколько отличается от традиционных схем ковки.

Механический режим. Механический режим ковки труб заключается в определении рациональных обжатий, кантовок и подач. Имея стандартный инструмент, варьируя параметры механического режима, возможно, добиваться кардинально различных результатов в получении определенной НДС заготовки. Например, в работе [67] рекомендуется протяжку на оправке производить в определенной последовательности, сначала обжимать концы заготовки, после чего переходить к средней ее части. Это обеспечивает минимальную вероятность дефектообразования в процессе протяжки.

Применение новой формы инструмента и заготовки в процессе протяжки также требует разработки нового механического режима.

Температурный фактор. Тепловое состояние заготовки в процессах протяжки труб играет такую же существенную роль, как и в процессах ковки валов, плит, дисков и колец. Данных по исследованию влияния распределения температур по сечению заготовки практически нет в литературе, что

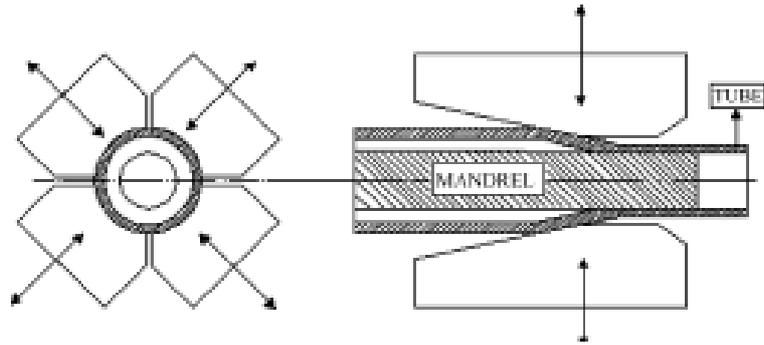


Рисунок 1.37 - Схемаковки труб на радиально-ковочной машине

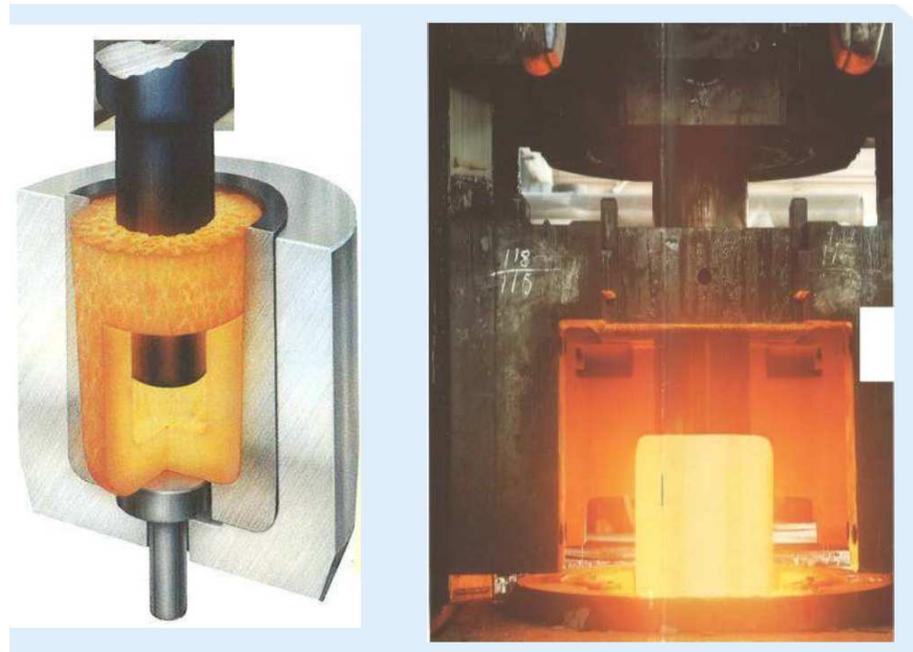


Рисунок 1.38 - Получение труб обратным выдавливанием

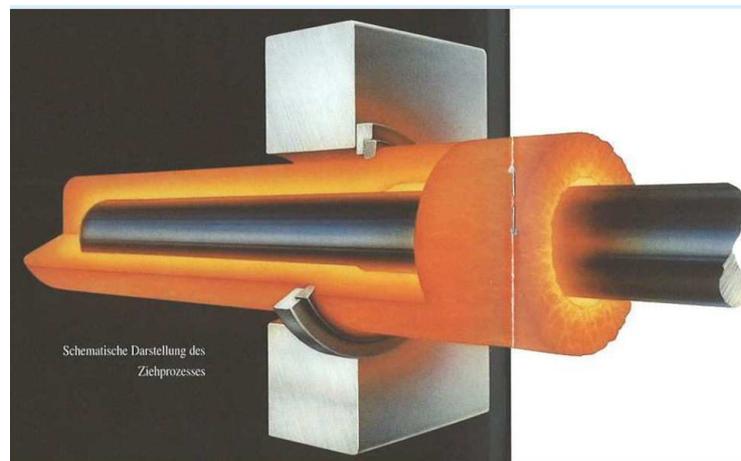


Рисунок 1.39 - Получение труб протяжкой через фильеру

объясняется сложностью учета данного параметр в процессе расчета схем деформирования. Кроме того с точки зрения управления для протяжки труб данный параметр является достаточно сложным, хотя и может оказать существенное влияние на качество изделия.

1.2 Влияние горячей пластической деформации на структуру и свойства металла

1.2.1 Структурные изменения

В своей работе [94] В.Ф. Волокушин, описывая способность различных металлов и сплавов к структурным превращениям в твердом состоянии указал, что одни из них склонны к таким превращениям, требуемая величина зерна в таких материалах достигается перекристаллизацией во время нагрева под закалку отжиг и нормализацию. В случае, когда сплавы и особенно чистые металлы такой способностью не обладают, то наклеп с последующей рекристаллизацией остаются единственной возможностью для получения нужной величины их зерна. Данное его утверждение указывает на то, что для некоторых металлов и сплавов деформация оказывает определяющее влияние на структуру металла вне зависимости от вида их термической обработки.

В.Ф. Волокушин описал влияние легирующих элементов на способность роста зерна аустенита. Так марганец и бор повышают эту способность, а такие элементы как Cr, Mo, W, V, Ti оказывают особенно сильно тормозящее воздействие. Это объясняется их устойчивостью к распаду, неравномерностью распределения в аустените при нагреве стали. Такие элементы как Ni, Co, Si, Cu относительно слабо влияют на рост зерна аустенита, т.к. не образуют карбидов, а следовательно, не оказывают тормозящего действия на рост его зерна.

Кроме того существует еще и определенная наследственность зернистости стали. Так выделяются наследственно мелкозернистые (НМЗС) и наследственно крупнозернистые стали (НКЗС). Эта наследственность прояв-

ляется в том, что одна и та же марка стали при равной степени теплового воздействия с одинаковым химическим составом, но разной плавки имеет различную величину действительного зерна аустенита. По мнению некоторых ученых [95-97], причина такого поведения стали заключается в разном способе раскисления при выплавке. При раскислении ферромарганцем и ферросилицием (кипящая сталь) при дальнейшей термообработке такая сталь проявляет большую склонность к росту зерна чем спокойная сталь раскисленная еще и алюминием. Предполагается, что нитриды и оксиды алюминия, располагаясь по границам зерен сдерживают их рост. Однако при достижении определенной температуры они распадаются в зерне и начинается его интенсивный рост, при котором зерно может вырасти больше, нежели у наследственно крупнозернистой стали. Поэтому перегрев данных сталей является нежелательным.

Для разработки новых эффективных процессовковки важным является определение влияния деформации в горячем состоянии и последующей термической обработки по стандартным режимам, выполняемым на предприятии на механические свойства материала которые зависят от его структуры. Проверку этого влияния необходимо определять на сталях, наиболее чувствительных к деформациям и наименее восприимчивых к термической обработке. Что касается химического состава, это стали с высоким содержанием Cr, Mo, W, V и Ti. При выборе стали по способу раскисления необходимо выходить из следующих соображений учитывая то, что он влияет на наследственную зернистость стали. Если температураковки превышает температуру, при которой размер зерна НМЗС меньше, чем у НКЗС, то необходимо уделять внимание НКЗС и наоборот.

В работе В.Ф. Волокушина [94], как и в работе А.П. Гуляева [98], указывается, что есть некоторая критическая степень деформации металлов и сплавов, которая приводит при дальнейшей термической обработке к гигантскому росту зерна. Величина данной деформации составляет от 3 до 15%. При обработке давлением данную степень деформации для металлов, прохо-

дящих дальнейшую термическую обработку, необходимо избегать.

В работе [99] польские исследователи установили связь между величиной горячей пластической деформации и размером зерна в высокомарганцевой аустенитной стали 27Mn-4Si-2Al-Nb-Ti. Они проводили исследования на растяжение образцов при температуре 850 °С. Растягивали образцы на 20%, 40% и 60%. После деформирования образцы охлаждались в воде. Выявлена четкая связь между величиной деформации и размером зерна. Так в образцах, деформированных на 60% зерна в несколько раз меньше чем при деформации 20%.

В работе [100] проведено изучение влияния горячей пластической деформации на свойства аустенитной нержавеющей стали 304 Н. Авторами работы проведены исследования по осадке цилиндрических образцов. Осадку производили при температуре 1050 °С, скорость деформации 0,1 с⁻¹. Логарифмическая степень деформации при осадке достигалась от 0,2 до 0,8. После деформации образцы сразу же охлаждались в воде. Установлено, что с увеличением степени деформации образца размер зерна уменьшается, при логарифмической деформации, равной 0,2, средний размер зерна составил 20 мкм, а при деформации 0,8 он в 4 раза меньше (5 мкм). Аналогичные исследования по осадке цилиндрических образцов из магниевого сплава AZ31 обсуждены в работе [101]. Авторы установили аналогичную взаимосвязь величины горячей деформации и размера зерна.

В работе [102] проведено обсуждение результатов исследований структур ферритной и аустенитной сталей в процессе горячей пластической деформации кручением. Стальные образцы нагревались до 1150 °С и подвергались кручению, после достижения определенной величины деформации образцы охлаждались в воде. Установлено, что с увеличением деформации кручением размер зерна образцов уменьшается в прямо пропорциональной зависимости.

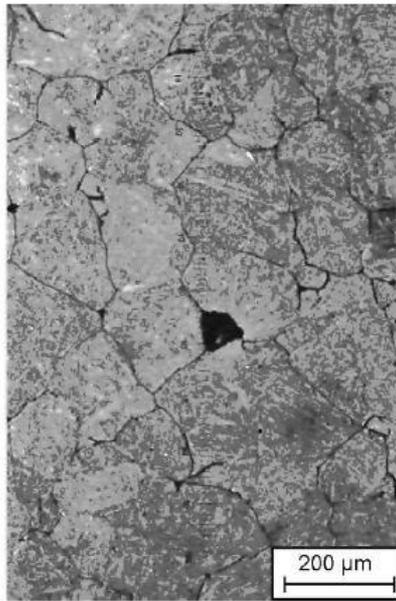
В работе [103] проведено исследование влияния таких технологических параметров радиально-сдвиговой прокатки на структуру стали 45, как темпе-

ратура прокатки, коэффициент вытяжки и отжиг. Рассмотрено три температурных режима деформирования 700 °С, 780 °С и 850 °С. В каждом режиме обеспечивали три коэффициента вытяжки 1.4, 2.5, 3.6. Образцы после деформации подвергали отжигу при 600 °С. Установлено, что коэффициент вытяжки оказывает влияние на размер зерна в центральной части образцов, так с его увеличением от 1,4 до 3,6 при размер зерна уменьшается в отожженных образцах от 9 до 4 раз, что говорит о положительном влиянии деформации на структуру стали и, как следствие, ее механические свойства.

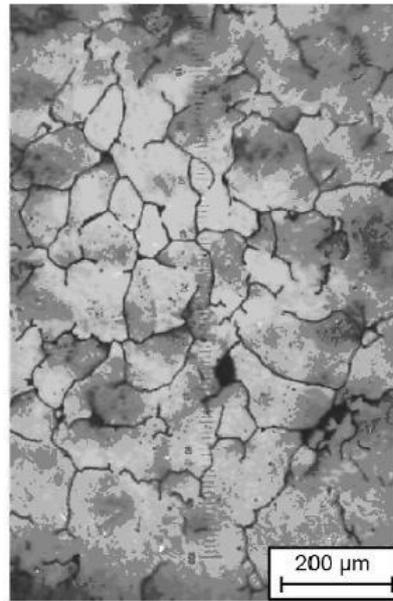
В работе Кривошеева В.П. [104], отмечено, что с ростом степени деформации при ковке крупных поковок карбидных сталей, карбидная сетка дробится. В работе установлена прямая связь между величиной деформации и размером зерна, даже после термической обработки в виде отжига.

В работах [105-110] проведены аналогичные вышеописанным исследования влияния горячей пластической деформации на структуру материала. Исследования проведены для таких материалов как стали К310 (0,83% С; 0,4% Mn; 0,3% Mo; 1,9% Cr; 0,45% Si) (рис. 1.40-1.41) [105], стали 22SiMn2TiB (0,22% С; 0,87% Si; 1,64% Mn; 0,024% Ti; 0,0015% B; 0,0025% N) (рис. 1.42) [106], сплава (0,038% С; 28,88% Cr; 0,001% P; 0,002% S; 10,05% Fe; 0,18% Al; 0,3% Mn; 0,36% Si; 0,29% Ti; Ni) (табл. 1.1, рис. 1.43) [107], стали 86CrMoV7 (0,89% С; 0,42% Si; 0,31% Mn; 0,002% P; 0,005% S; 1,8% Cr; 0,03% Ni; 0,27% Mo; 0,1% V) (рис. 1.44-1.45) [108], стали (0,22% С; 1,5% Mn; 0,13% Ti; 0,2% Mo; ≤0,004% S; ≤0,003 N) (рис. 1.46) [109], стали 30MSV6 (0,3% С; 0,56% Si; 1,49% Mn; 0,08% Ni; 0,22% Cr; 0,01% Mo; 0,11% V; 0,19% Cu; 0,017% Ti; 0,013% P; 0,078% S) [110]. Во всех случаях установлена однозначная зависимость размера структуры от горячей пластической деформации.

В работе [111] проведено исследованиековки поковок роторов из материала 25ХНЗМФА. Рассмотрено три вариантаковки. Первый предполагалковку из слитка массой 37 т. с промежуточной осадкой. Две других поковки отковали из слитка массой 51 т, одна протяжкой в комбинированных бойках,



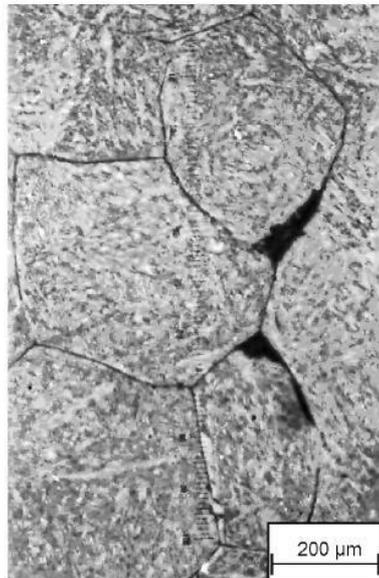
а



б

а – без деформации; б – с деформацией.

Рисунок 1.40 - Микроструктура образцов выдержанных при температуре 1050 °С



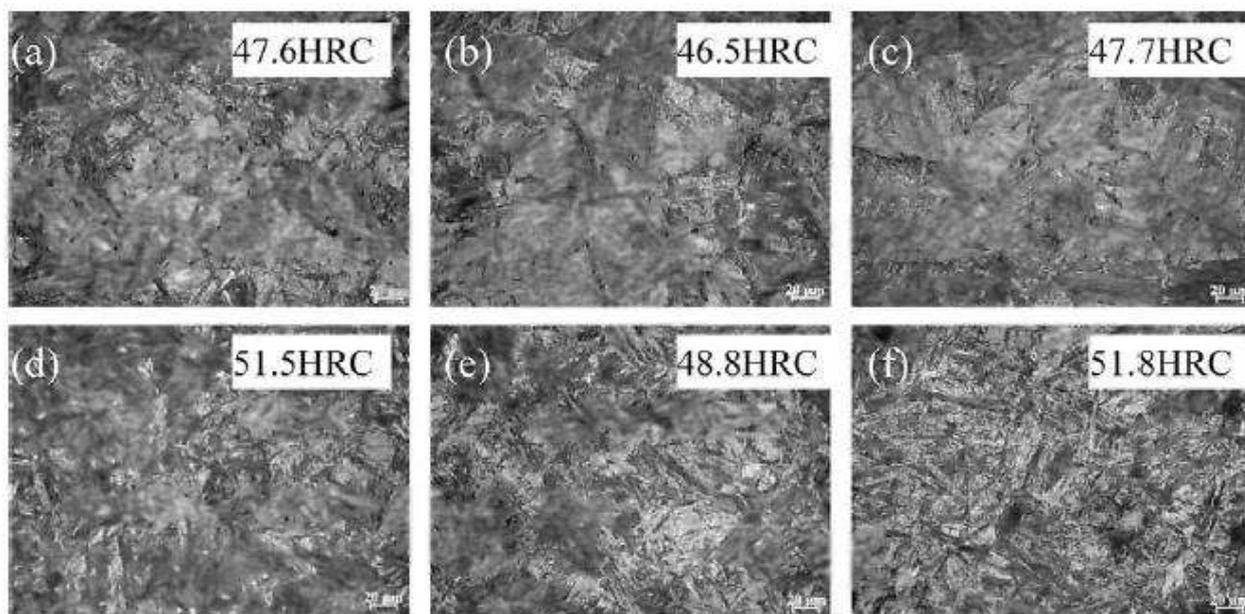
а



б

а – без деформации; б – с деформацией.

Рисунок 1.41 - Микроструктура образцов выдержанных при температуре 1100 °С

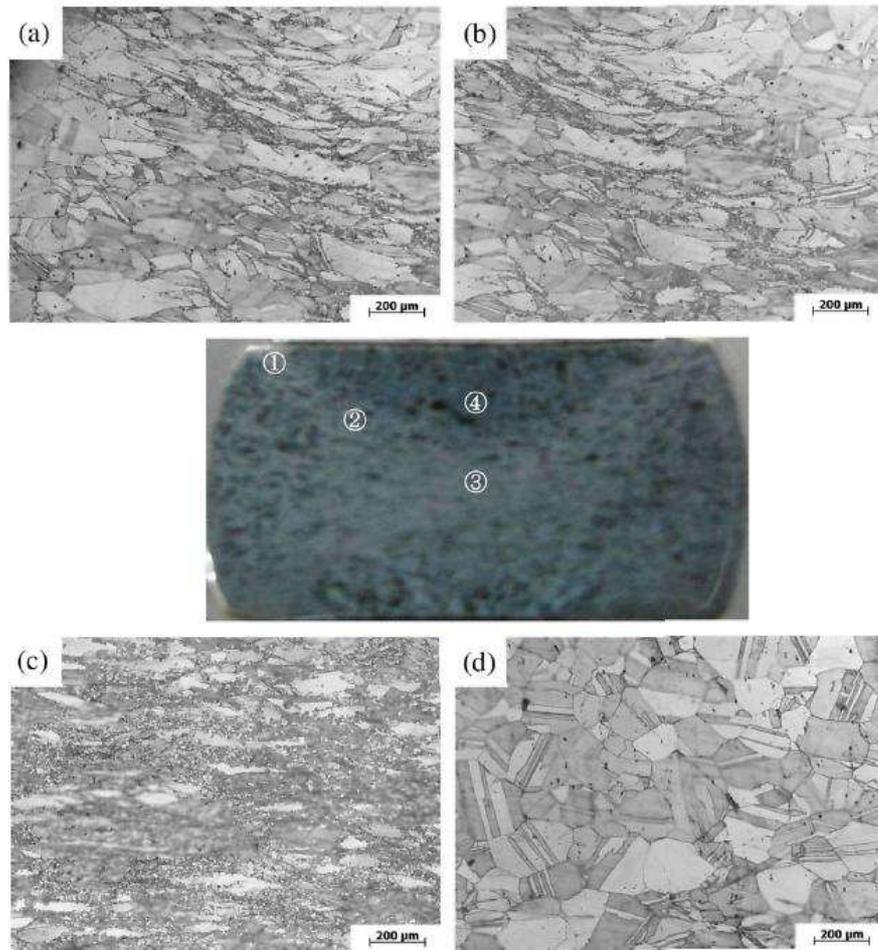


a,d – 950 °С; b,e – 1050 °С; c,f – 1150 °С; a,b,c – не деформированные;
d,e,f – деформированные;

Рисунок 1.42 - Сопоставление твердости и микроструктур стали

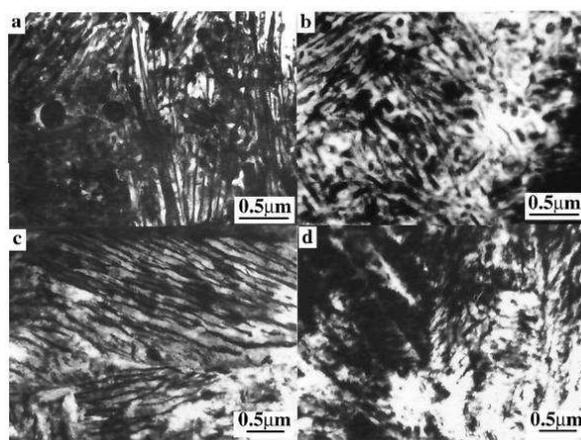
Таблица 1.1 – Результаты измерений размера зерна

| Вид | Диаметр (μm) |
|---|---------------------------|
| Конечная обработка при 1070 °С | 42,0 |
| Деформация при температуре 1050 °С; $0,1 \text{ c}^{-1}$ | 16,7 |
| Деформация при температуре 1050 °С; 1 c^{-1} | 12,4 |
| Деформация при температуре 1100 °С; $0,1 \text{ c}^{-1}$ | 20,0 |
| Деформация при температуре 1100 °С; 1 c^{-1} | 27,0 |
| Деформация при температуре 1150 °С; $0,01 \text{ c}^{-1}$ | 49,0 |
| Деформация при температуре 1200 °С; $0,01 \text{ c}^{-1}$ | 55,8 |



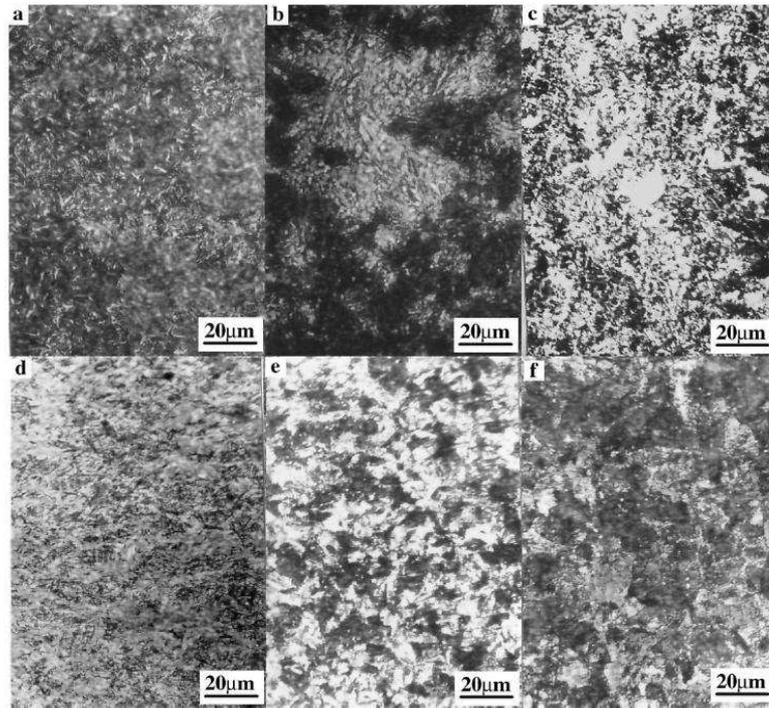
а – в зоне 1; б – в зоне 2; с – в зоне 3; д – в зоне 4

Рисунок 1.43 - Микроструктура образца после осадки



а – 600 °С, без деформации; б – 600 °С, с деформацией; с – 400 °С, без деформации; д – 400 °С, с деформацией

Рисунок 1.44 - Микроструктура деформированных и не деформированных образцов при 900 °С



а – 30 °C/с, без деформации; б – 0,6 °C/с, без деформации; с – 0,2 °C/с, без деформации; д – 30 °C/с, с деформацией; е – 0,6 °C/с, с деформацией; ф – 0,2 °C/с, с деформацией

Рисунок 1.45 - Структуры заготовок прошедших и не прошедших деформирование, с разной скоростью охлаждения

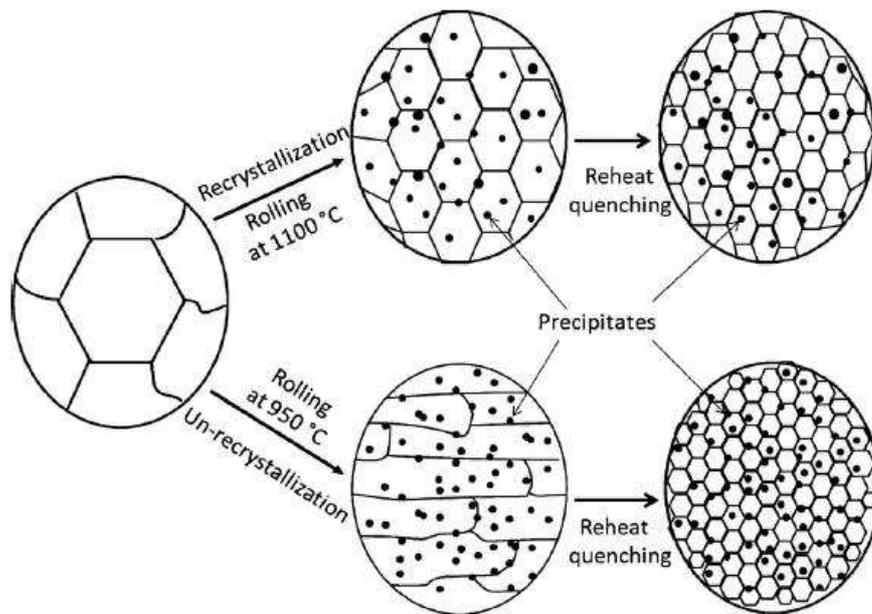


Рисунок 1.46 - Схематическая диаграмма эволюции зерна в процессе прокатки и повторного нагрева

вторая протяжкой в нижнем вырезном бойке с применением верхнего выпуклого. Третий вариант ковки обеспечивал большую величину и равномерность деформаций в заготовке и особенно в осевой ее части. Послековки производилась первичная термическая обработка в виде отжига и черновая механическая обработка. Окончательная термообработка состояла из закалки с охлаждением в воде и отпуска. Результаты исследования величины размера зерна приведены в таблице 1.2.

Видно, что наименьшую величину зерна имеет поковка, откованная по предлагаемой схеме, обеспечивающей большую величину деформаций в осевой части заготовки. Так для новой схемыковки балл зерна составляет 4 единицы, а для традиционной всего 1, что говорит о существенном влиянии деформации на данный показатель.

1.2.2 Влияние деформации на свойства металла

Влияние деформации на механические свойства. Основной мерой деформации в ковке крупных поковок принято считать уков, который показывает усредненную деформацию и не учитывает ее неравномерность, что говорит о необходимости использования данного показателя для оценки процессаковки только в крайних случаях. Наиболее приемлемой является оценка величины и равномерности деформаций в заготовке.

Наибольшее влияние деформация оказывает на такие механические характеристики как относительное удлинение, сужение и ударную вязкость, т.е. величины которые напрямую зависят от размер зерна металла и от наличия/отсутствия пустот в металле. За счет обеспечения высокого уровня деформаций в литом металле, подвергаемом последующей термической обработке, можно достичь увеличения перечисленных механических свойств до нескольких раз, о чем свидетельствует работа [111].

Влияние же на предел прочности, текучести и твердость деформация в процессахковки оказывает незначительное (в пределах 20%) при условии, что поковка будет проходить послековки дальнейший отжиг (90% всех по-

ковок). Это подтверждается экспериментальными данными, приведенными в работах [111, 112].

В работе [113] приведены исследования влияния деформации на механические свойства сталей 20, 40Х, 15ХН, 34ХН1М, 25Х1М1Ф. Послековки все материалы проходили термическую обработку в виде закалки и отпуска. Установлено, что наибольшее влияние деформация имеет на ударную вязкость, так для стали 40Х она увеличилась от 100 кДж/м² для литого металла до 850 кДж/м² при величине интенсивности деформаций сдвига, равной 3. Для других материалов изменение данного показателя тоже значительное, хотя и ниже, чем для стали 40Х. Для стали 20 при деформировании литых образцов удалось увеличить КСУ в 1,7 раз, для стали 15ХН всего лишь в 1,1 раза для стали 34ХН1М в 2 раза, для стали 25Х1М1Ф в 1,9 раза. При этом предел прочности и текучести изменялись разнонаправленно максимально на 10% от первоначальных значений.

Восстановление пластичности металла. При горячей обработке различных сталей и сплавов, в частности, в ковке крупных поковок, известен такой прием, как деформирование с паузами (дробное деформирование), во время которых происходит разупрочнение металла, что позволяет существенно снизить силу деформирования. Такой прием применяется в основном для осадки, как наиболее энергоемкой операции. Исследованием данного эффекта занимались многие ученые. Весомым вкладом в данном направлении явились работы Л.Н. Соколова и В.Н. Ефимова [114, 115].

Другим, не менее важным эффектом, сопровождающим горячее дробное деформирование, является общеизвестное свойство повышения пластичности материала в сравнении с монотонным деформированием. В первую очередь этот эффект проявляется при обработке специальных малопластичных сталей и сплавов. Дзугутовым М.Я. [116] отмечается, что дробная деформация применяется для улучшения деформируемости слитков, заготовок и поковок из малопластичных сталей и сплавов. Дробность деформаций при ковке характеризуется величиной единичных обжатий, т.е. обжатий за один удар бойка

при ковке на молоте или за одно нажатие прессы, а также паузами между ними. При прокатке она характеризуется числом проходов и величиной обжатия в каждом проходе. Чем ниже пластичность металла, тем больше должна быть дробность деформации. М.Я. Дзугутов объясняет физический смысл этого явления тем, что малые степени единичных обжатий позволяют вести деформацию при меньшем количестве препятствий движению дислокаций и скольжению при меньшем значении упрочнения и скалывающих напряжений, а увеличение количества пауз способствует, кроме того, большему разупрочнению деформируемого материала. Он также отмечает, что снижение скорости деформации и повышение ее дробности способствует протеканию процессов диффузии, снижению скорости падения пластичности и ее восстановлению.

Практическим путем Дзугутовым М.Я. установлено, что при ковке на гидравлическом прессе поковок из конструкционных легированных сталей перлитного класса дробные деформации могут достигать 30-60% без образования дефектов. При ковке высоколегированных малопластичных сталей допустимая дробная деформация должна быть намного ниже и находится в пределах 6-10%.

В работе [116] отмечается также, что для сплава типа ЖС6КП только многоцикловые дробные деформации с обжатиями 2-4% и частыми подогревами позволяют достигать положительных результатов и практически приемлемых значений предельной деформации. При этом величины единичных обжатий для разных сплавов при дробной деформации предлагается определять экспериментально.

С.В. Легранд [117] показал, что применение дробной деформации для стали ЭИ319 и сплава ЭИ437 способствует значительному повышению деформируемости промышленных образцов. По его данным, дробное деформирование малопластинчатых материалов может повысить их пластичность в 2-2,5 раза.

Дзугутов М.Я., ссылаясь на данные И.М. Павлова в своей работе [116],

указывает что при однократном осаживании образца из жаропрочного материала разрушение его наступает при 20% высотной деформации, а при выполнении деформации с помощью двенадцатикратного обжатия суммарно допустимая деформация может возрасти до 70%.

В.Н. Ефимовым [118] установлено, что во время паузы плотность дислокаций в деформированном образце уменьшается (рис. 1.47). Указанная закономерность и является физическим основанием увеличения пластичности и разупрочнения металла.

Одним из видов дробной деформации является вибрационная ковка (осадка) [119]. Такая ковка позволяет увеличить равномерность деформации в заготовке, а также ее деформируемость. Еще одним способом дробной деформации является ковка на ротационных ковочных машинах.

Исходя из вышесказанного, очевидно, что дробное деформирование позволяет расширить возможности горячей обработки различных сталей и сплавов, однако отсутствие соответствующего аналитического описания снижает эффективность внедрения и использования подобных технологий.

1.3 Теоретические исследования процессов горячего деформирования металлов

Прогнозирование напряженно-деформированного состояния заготовки. На сегодняшний день существует большое разнообразие методов теоретического исследования процессов ОМД позволяющих прогнозировать напряженно-деформированное состояние (НДС) заготовки. Большая часть из них позволяет лишь определить силу деформирования (среднеинтегральную характеристику напряженного состояния). Для процессовковки важным критерием является не только силы деформирования, но и распределение температур, деформаций, напряжений.

При решении задач плоской пластической деформации высокую сходимость с экспериментом дает метод полей линий скольжения [120-122]. Метод позволяет определить напряженно-деформированное состояние и силы

деформирования [123]. Переход от напряжений к деформации осуществляется соотношениями между ними согласно деформационной теории или теории течения. Однако для построения полей линий скольжения даже для предельных значений касательных контактных напряжений необходимо обладать известным опытом и интуицией. По изотропности, однородности и несжимаемости литой металл (слиток) не удовлетворяет допущениям метода. Кроме того метод не позволяет определить формоизменение заготовки в процессе деформирования, им можно рассчитать только определенную устойчивую стадию. Поэтому исследование процессовковки методом полей линий скольжения проблематично.

Большое распространение при решении технологических задач обработки металлов давлением получил энергетический метод для определения нагрузок деформирования и деформаций [124]. Метод основан на законе сохранения энергии. Энергетический (вариационный) метод, применительно к операциямковки, начал развиваться главным образом в трудах уральских ученых [125], однако успешно использовался и другими [126]. В последние годы встречаются компьютерные реализации энергетических методов с использованием метода перемещений жёстких блоков [127]. Применительно к решению задач обработки металлов давлением энергетический метод состоит в замене системы уравнений равновесия, условия пластичности и граничных условий эквивалентным этой системы принципом возможных перемещений. Метод является приближенным, поскольку минимизирующие функции подбираются эмпирически. Этот метод для общего случая смешанных граничных условий менее точен, так как содержит допущение о постоянстве контактных касательных напряжений. Важным критерием оценки процессовковки является распределение деформаций и напряжений в объеме заготовки в процессе деформирования, с учетом реальной температуры, установившаяся на определенном этапе обжатия. Энергетический метод не может дать такой информации, а следовательно, решение этим способом будет не полным для исследования процессовковки.

Разновидностью энергетического метода является метод верхней оценки (МВО). Этот метод приемлем, когда необходимо получить экспресс-оценку технологического процесса (сила деформирования, накопленную деформацию, тепловыделение). МВО благодаря его гибкости и простоте широко применяется в работах, посвященных анализу силового режима деформирования различных процессов ОМД. Однако метод не учитывает неравномерность распределения температуры, накопленной деформации, физических свойств по объему заготовки, это является грубыми допущениями.

Метод совместного решения приближенных уравнений равновесия и условия пластичности («инженерный»), относится к методам, которые дают заниженную оценку силы деформирования. Основным допущением метода является линейное распределение касательных напряжений по одной из осей координат с нулевым их значением на геометрической оси деформируемого объекта и максимальным значением на контактных поверхностях. Условие пластичности принимается линеаризованным относительно касательных напряжений.

В настоящее время разрабатываются новые общие аналитические методы решения сложных вариационных задач для исследования кузнечных операций [128-130], которые дают хорошую сходимость с экспериментальными исследованиями.

Для теоретического изучения процессовковки используют различные механические модели. Если пренебречь упрочнением, то можно использовать модель идеально-пластического тела [131] или жестко-пластического тела [132-139].

С интенсивным развитием компьютерной техники широкое распространение получили численные методы. Одним из первых численных методов при решении задач ОМД был метод конечных разностей (МКР) [140, 141]. Ряд примеров применения метода для расчетов приведен в работах [142-146].

В последнее время самым распространенным численным методом ре-

шения задач ОМД является метод конечных элементов (МКЭ) [147]. МКЭ позволяет решать плоские и объемные задачи пластичности с учетом нелинейности физических свойств материала заготовки, неравномерного температурного поля и пр. Метод определяет не только изменение формы заготовки в процессе деформации, но и образование дефектов и нарушение сплошности материала. Результаты, полученные МКЭ, имеют высокую точность [148] и соответствуют экспериментальным данным [149, 150]. МКЭ получил свое развитие применительно к исследованию напряженно-деформированного состояния металла в пластическом состоянии лишь в последние годы [151, 152].

На основании МКЭ и интегрированной программы наблюдения и обработки данных о происходящих в процессековки структурных изменениях производится оптимизация процессов свободнойковки. Примеры применения современных программных продуктов основанных на МКЭ многочисленны [153-166].

Китайскими учеными при помощи МКЭ исследовался механизм закрытия осевых дефектов при осадке цилиндрических заготовок [167]. Установлено, что наилучшее закрытие осевой пористости обеспечивается при осадке заготовок с $H/D \approx 1,0$. В этом случае дефект закрывается сильнее в центре и незначительно вблизи контактных поверхностей. Развитие коммерческих программных продуктов достигло того уровня, что КЭ моделированием становится возможным прогнозирование микроструктуры металла и размеров зёрна [168].

Таким образом, в последнее время для определения формоизменения в процессах обработки металлов давлением получил широкое распространение МКЭ [169-173]. Метод определяет не только изменение формы заготовки в процессе деформации, но и образование дефектов (утяжин, не заполнение углов при штамповке) и нарушение сплошности материала [174-176]. Результаты, полученные МКЭ, обладают высокой точностью и соответствуют экспериментальным данным [177], поэтому исследование формоизменения при

ковке целесообразнее проводить этим методом.

Прогнозирование изменения микроструктуры металлов. Основное влияние на структуру металла, безусловно, оказывает термическая обработка, однако и пластическая деформация имеет большое значение, что подтверждается многочисленными исследованиями, приведенными в работах [178-185]. Посредством пластической деформации при определенных условиях можно существенно влиять на размер зерна металла, на распределение карбидов и других включений в структуре металла, на наличие или отсутствие пор в металле.

При изготовлении крупногабаритных изделий ковкой из слитков, технологический процесс необходимо организовывать таким образом, чтобы деформационный и температурный режим максимально способствовали получению качественного изделия, т.е. получению необходимой структуры металла. Вследствие чего большое влияние приобретает возможность моделирование преобразований в микроструктуре металла. Значительный прогресс в данном направлении совершили западные и китайские ученые.

Для описания изменений микроструктуры металла во время горячей обработки давлением используется ряд зависимостей: зависимости, описывающие изменение микроструктуры во время статической рекристаллизации, метадинамической и динамической и зависимости для описания роста зерна без рекристаллизации.

Для никелевого сплава 718 в работе [186] на основе проведенных экспериментальных исследований и обработки литературных данных, взятых из работ [186-194] определены константы материалов и приведены зависимости, позволяющие описывать изменение размера зерна (табл. 1.3).

В работе [195] китайских ученых Fei Chen, Zhenshan и др., описаны экспериментальные и теоретические исследования изменения микроструктуры специальной роторной стали 30Cr2Ni4MoV в процессе горячей пластической деформации и последующей выдержки при высокой температуре. Установлено, что режим деформирования оказывает существенное влияние на

микроструктуру деформированной заготовки. Кроме того существенное влияние оказывается и на механические свойства металла в процессе деформирования.

В данной работе авторы предложили для моделирования микроструктуры стали 30Cr2Ni4MoV следующую математическую модель (табл. 1.4). Авторы провели экспериментальную проверку предлагаемой модели, которая показала хорошие результаты по совпадению размеров зерна натурального образца деформированного при высокой температуре и размеров зерна по математической модели (рис. 1.48, 1.50, 1.51).

Недостатком предложенной модели является, то что она не учитывает динамическую и статическую рекристаллизацию, кроме того она не учитывает рост зерна в процессе выдержки металла после рекристаллизации, что происходит в процессахковки.

Ряд моделей для расчета эволюции микроструктуры материала в процессах горячей пластической деформации представлены в работах [196-201] и показаны в таблицах 1.5-1.10, блок схема расчета приедена на рис. 1.49.

Порядок расчета по предлагаемым моделям следующий. На основе исходных данных в виде степени деформации ϵ , скорости деформации $\dot{\epsilon}$ и температуры заготовки T , производится расчет критической степени деформации ϵ_c и степени деформации, при которой рекристаллизуется 50% деформируемого металла $\epsilon_{0.5}$. Если интенсивность деформаций достигает критического значения (ϵ_c), тогда в металле произойдет динамическая рекристаллизация. Производится расчет степени рекристаллизации X_{drx} и размер зерна после завершения динамической рекристаллизации D_{drx} .

Считается, что если степень X_{drx} меньше 0,05 рекристаллизация не началась, а если больше 0,95, то уже закончилась, то есть полная рекристаллизация. Средняя величина зерна определяется с учетом начальной величины D , размера рекристаллизованных зерен D_{drx} и степени рекристаллизации X_{drx} по формуле:

Таблица 1.2 – Экспериментальные данные по исследованию микро-структуры поковки ротора из стали 25ХНЗМФА

| Место вырезки шлифов | Схема ковки | | |
|-------------------------|-------------|-----------|-----------|
| | Вариант 1 | Вариант 2 | Вариант 3 |
| | Уков 2 | | |
| Поверхность | 3 | 4 | 5 |
| Половина радиуса | 3 | 4 | 5 |
| Осевая зона | 1 | 2 | 4 |

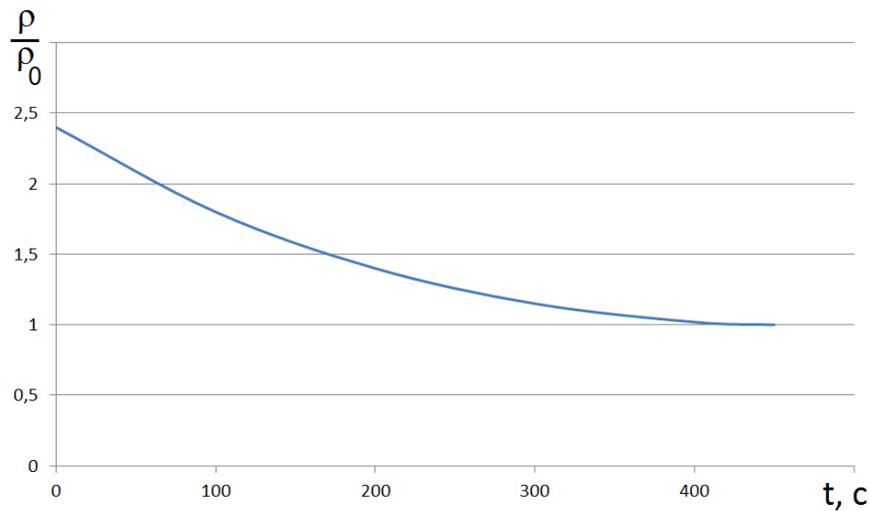


Рисунок 1.47 - Изменение относительной плотности дислокаций в стали 1X18Н9Т при температуре 1000 °С, деформированной на 10% в зависимости от длительности паузы

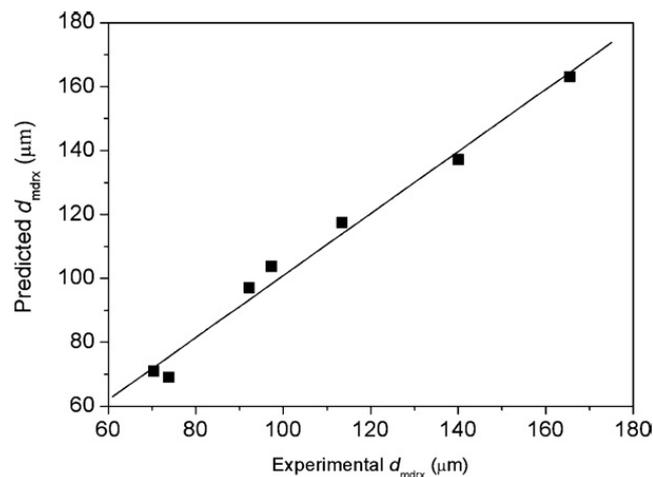


Рисунок 1.48 - Сопоставление экспериментальных и теоретических данных по размеру зерна после метадинамической рекристаллизации

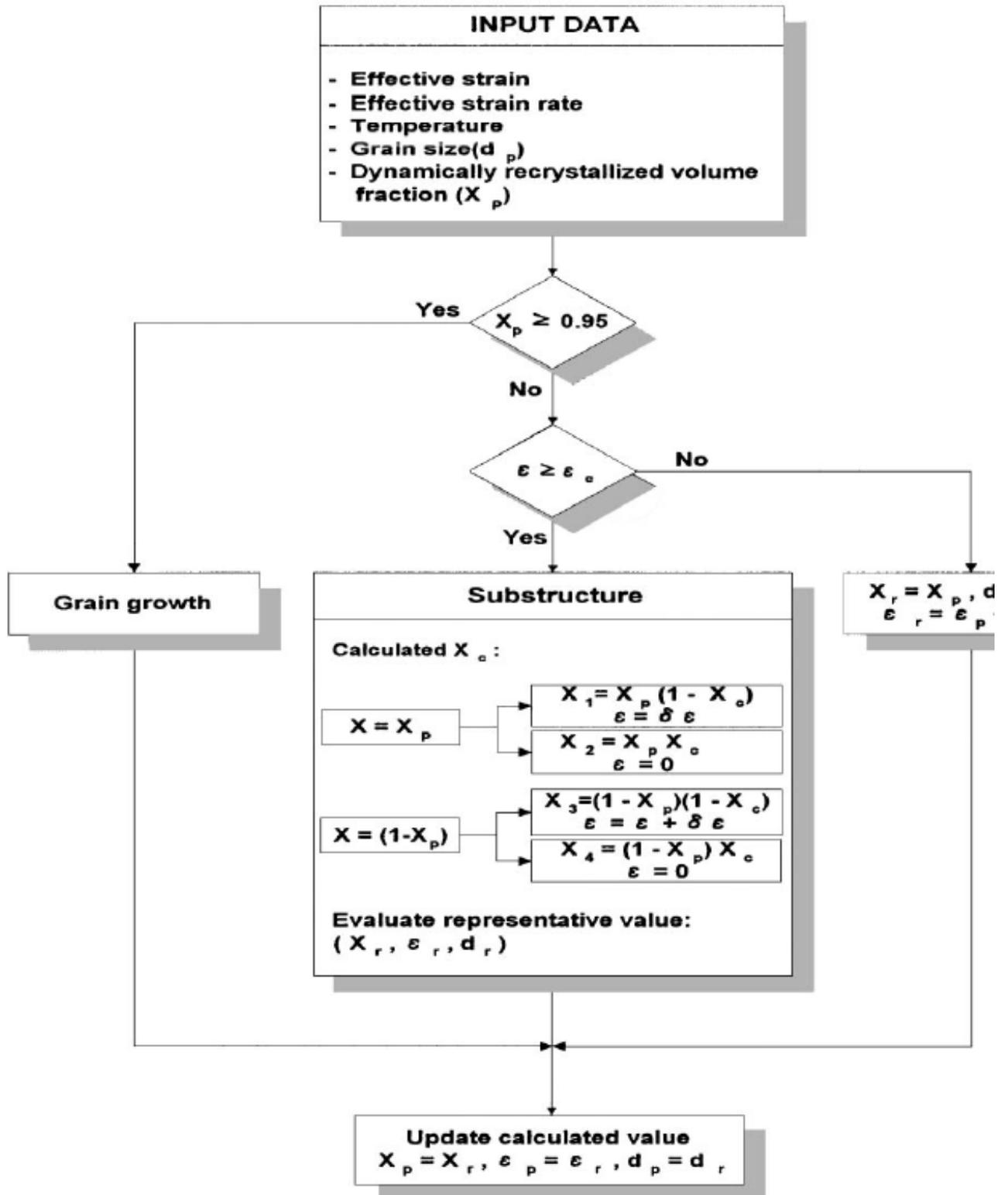


Рисунок 1.49 - Блок-схема расчета изменения микроструктуры металла

Таблица 1.3 - Формулы для определения изменения размеров зерна сплава 718 [181]

| | |
|------------------------------------|--|
| Критическая деформация | $\varepsilon_p = 0,4659 * 10^{-2} \dot{\varepsilon}^{0,1238} \exp\left(\frac{49520}{RT}\right)$. |
| Метадинамическая рекристаллизация: | $X_{mrx} = 1 - \exp\left[-0,693 \left(\frac{t}{t_{0,5}}\right)\right];$ $t_{0,5} = 5,043 * 10^{-9} \varepsilon^{-1,42} \dot{\varepsilon}^{-0,408} \exp\left(\frac{196000}{RT}\right);$ $d_{mrx} = 4,85 * 10^{10} \varepsilon^{-0,41} \dot{\varepsilon}^{-0,028} \exp\left(\frac{240000}{RT}\right).$ |
| Статическая рекристаллизация: | $X_{srx} = \exp\left[-0,693 \left(\frac{t}{t_{0,5}}\right)\right];$ $t_{0,5} = 3,16 \varepsilon^{-0,75} \exp\left(\frac{74826}{RT}\right);$ $d_{srx} = 6,78 * 10^2 \exp\left(\frac{-31716}{RT}\right).$ |
| Рост зерна: | $d_{gg} = \left[d_0^m + 9,44 * 10^{19} t \exp\left(\frac{-467114,7}{RT}\right) \right]^{1/2}$. |

Таблица 1.4 - Формулы для определения изменения размеров зерна материала 30Cr2Ni4MoV [190]

| | |
|--|---|
| Объем металла прошедший метадинамическую рекристаллизацию: | $X_{mtrx} = 1 - \exp\left[-0,693 \left(\frac{t}{t_{0,5}}\right)^n\right];$ $t_{0,5} = A_{mtrx} \dot{\varepsilon}^r \exp\left(\frac{Q_{mtrx}}{RT}\right), r = \frac{d(\ln(t_{0,5}))}{d(\ln(\dot{\varepsilon}))} = 0,44;$ $Q_{mtrx} = R \frac{d(\ln(t_{0,5}))}{d(1/T)} = 217,8 \text{ кДж/моль.}$ <p>где A_{mtrx}, r – константы материала; R – газовая постоянная, T – температура металла; Q_{mtrx} – энергия активации метадинамической рекристаллизации.</p> |
| Метадинамическая рекристаллизация: | $X_{mtrx} = 1 - \exp\left[-0,693 \left(\frac{t}{t_{0,5}}\right)^{0,31}\right];$ $t_{0,5} = 1,27 * 10^{-9} \dot{\varepsilon}^{-0,44} \exp\left(\frac{217800}{RT}\right).$ <p>Размер зерна после метадинамической рекристаллизации может быть найден как:</p> $d_{mtrx} = C d_0^h Z^m; Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q_{mtrx}}{RT}\right),$ <p>где C, h, m – параметры, которые зависят от вида материала.</p> <p>$m = -0,22$; $h = 0$ и $C = 4059$ при $d_0 \geq 225,4$ мкм; $h = 1,77$ и $C = 0,28$ при $d_0 < 225,4$ мкм; $d_{mtrx} = 4059 Z^{-0,22}$ при $d_0 \geq 225,4$ мкм; $d_{mtrx} = 0,28 d_0^{1,77} Z^{-0,22}$ при $d_0 < 225,4$ мкм.</p> |

Таблица 1.5 - Формулы для определения изменения размеров зерна стали 0,4% С и 1,3% Мн [191]

| | |
|--|--|
| Время, за которое протекает 50% рекристаллизации: | $t_{0,5} = 10^{-9} \dot{\varepsilon}^{-1,91} \dot{\varepsilon}^{-0,53} d_0^2 \exp\left(\frac{158000}{RT}\right)$. |
| Размер зерна после статической рекристаллизации: | $d_{stx} = 343 d_0^{0,5} \dot{\varepsilon}^{-0,5} \exp\left(\frac{-45000}{RT}\right)$, где d_0 – исходный размер зерна, мкм. |
| Рост зерна во время паузы: | $d(t) = d_{stx} + 1,5 * 10^{27} (t - 4,32t_{0,5}) \exp\left(\frac{-400000}{RT}\right)$. |
| Размер зерна после динамической рекристаллизации: | $d_{drx} = 1,6 * 10^4 Z^{-0,23}$. |
| Объем динамически рекристаллизованной фракции металла: | $X_{drx} = 1 - \exp\left[-0,693 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_{0,5}}\right)\right]$; $\varepsilon_{0,5} = 1,44 * 10^{-3} \dot{\varepsilon}^{-0,05} D_{drx}^{0,25} \exp\left(\frac{6420}{RT}\right)$. |
| Рост зерна во время паузы после динамической рекристаллизации: | $d(t) = d_{drx} + 8,2 * 10^{25} (t - 2,65t_{0,5}) \exp\left(\frac{-400000}{RT}\right)$; $t_{0,5} = 1,1Z^{-0,8} \exp\left(\frac{230000}{RT}\right)$ |
| Размер зерна после метадинамической рекристаллизации: | $d_{mdrx} = 2,6 * 10^4 Z^{-0,23}$. |

Таблица 1.6 - Формулы для определения изменения размеров зерна сплава Nimonic 80A [192]

| | |
|--------------------------------|--|
| Динамическая рекристаллизация: | $X_{dyn} = 1 - \exp\left[-0,693 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_{0,5}}\right)\right]^2$; $\varepsilon_{0,5} = 1,0 * e^{-4} \dot{\varepsilon}^{0,1} D_0^{0,3} \left[\exp\left(\frac{Q}{RT}\right)\right]^{0,2}$; $d_{dyn} = 1,2 * e^7 \dot{\varepsilon}^{-0,08} \left[\exp\left(\frac{Q}{RT}\right)\right]^{-0,36}$, где Q=426 кДж/моль, R – газовая постоянная. |
| Рост зерна: | $d^2 = d_0^2 + 1,4 * 10^{17} * t * \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$, d_0 – исходный размер зерна. |

Таблица 1.7 - Формулы для определения изменения размеров зерна стали AISI1030 [193]

| | |
|---|---|
| Динамическая рекристаллизация: | $\varepsilon_c = 4,76 * 10^{-4} \exp\left(\frac{8000}{T}\right); d_{dyn} = 22600Z^{-0,27};$ $X_{dyn} = 1 - \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_{0,5}}\right)^2\right];$ $\varepsilon_{0,5} = 1,144 * 10^{-5} \dot{\varepsilon}^{0,05} d_0^{0,28} \exp\left(\frac{6420}{T}\right); Z = \dot{\varepsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right).$ |
| Статическая рекристаллизация: | $X_{st} = 1 - \exp\left[-0,693 \left(\frac{t}{t_{0,5}}\right)^2\right];$ $t_{0,5} = 2,2 * 10^{-12} * S_v^{-0,5} \dot{\varepsilon}^{-0,2} \exp\left(\frac{30000}{T}\right);$ $S_v = \frac{24}{\pi d_0} (0,419e^z + 0,155e^{-z} + 0,1433e^{-3z}); d_{st} = \frac{5}{(S_v \varepsilon)^{0,5}}.$ |
| Рост зерна прошедшего динамическую рекристаллизацию | $d = d_{dyn} + 1,1y(d_{pd} - d_{dyn}); d_{pd} = 5380 \exp\left(\frac{-6480}{T}\right);$ $y = 1 - \exp\left(-295 \dot{\varepsilon}^{0,1} \exp\left(\frac{-8000t}{T}\right)\right).$ |
| Рост зерна прошедшего статическую рекристаллизацию | $d^2 = d_{st}^2 + 1,44 * 10^{12} * t * \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right).$ |

Таблица 1.8 - Формулы для определения изменения размеров зерна сплава Alloy 718 [194]

| | |
|--|--|
| Определение критической деформации, при которой начинается рекристаллизация: | $\varepsilon_c = 8,87 * 10^{-4} d_0^{0,2} Z^{0,099} \text{ при } \dot{\varepsilon} \geq 0,01 \text{ с}^{-1};$ $\varepsilon_c = 9,57 * 10^{-6} d_0^{0,196} Z^{0,167} \text{ при } \dot{\varepsilon} < 0,01 \text{ с}^{-1};$ |
| Метадинамическая рекристаллизация: | $X_{mdyn} = 1 - \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{t}{t_{0,5}}\right)^1\right];$ $t_{0,5} = 1,7 * 10^{-5} \dot{\varepsilon}^{-0,08} d_0^{0,5} \varepsilon^{-2} \exp\left(\frac{12000}{T}\right);$ $d_{mdyn} = 8,28 d_0^{0,29} \varepsilon^{-0,14} Z^{-0,03}.$ |
| Динамическая рекристаллизация: | $X_{dyn} = 1 - \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0,5}}\right)^{1,68}\right]; T \leq 1038 \text{ }^\circ\text{C};$ $\varepsilon_{0,5} = 0,037 d_0^{0,2} Z^{0,058};$ $X_{dyn} = 1 - \exp\left[-\ln 2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{0,5}}\right)^{1,9}\right]; T > 1038 \text{ }^\circ\text{C};$ $\varepsilon_{0,5} = 0,029 d_0^{0,2} Z^{0,058}; d_{dyn} = 1,301 * 10^3 Z^{-0,124}.$ |
| Рост зерна: | $d^3 - d_0^3 = 9,8 * 10^{19} * t * \exp\left[\frac{-437000}{RT}\right].$ |

Таблица 1.9 - Формулы для определения изменения размеров зерна стали 316LN [195]

| | |
|-----------------------------------|---|
| Динамическая рекристаллизация: | $X_d = 1 - \exp \left[-1,778 \left(\frac{\varepsilon - 0,668\varepsilon_p}{\varepsilon_{0,5}} \right)^{0,989} \right];$ $\varepsilon_p = 0,012 \dot{\varepsilon}^{0,23} d_0^{0,00037} \left(\frac{45501}{RT} \right);$ $d_d = 7,23 \cdot 10^7 \dot{\varepsilon}^{0,00869} \exp \left(\frac{-183092}{RT} \right).$ |
| Метадинамическая рекристаллизация | $X_m = 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{t}{t_{0,5}} \right)^{0,88} \right];$ $t_{0,5} = 8,62 \cdot 10^{-15} \dot{\varepsilon}^{-0,21} d_0^{1,76} \exp \left(\frac{279876}{RT} \right);$ $d_m = 5,18 \cdot 10^2 d_0^{0,293} \dot{\varepsilon}^{-0,0386} \exp \left(\frac{-50669}{RT} \right).$ |
| Статическая рекристаллизация | $X_s = 1 - \exp \left[-0,693 \left(\frac{t}{t_{0,5}} \right)^{0,75} \right];$ $t_{0,5} = 2,18 \cdot 10^{-16} \dot{\varepsilon}^{-1,419} d_0^{0,85} \exp \left(\frac{353253}{RT} \right);$ $d_s = 7,7 \cdot 10^3 d_0^{0,4356} \dot{\varepsilon}^{-0,317} \exp \left(\frac{-85446}{RT} \right);$ |
| Рост зерна | $d_t^{2,55} - d_0^{2,55} = 1,95 \cdot 10^{13} \cdot t \cdot \exp \left(-\frac{307578}{R \cdot T} \right).$ |

Таблица 1.10 - Формулы для определения изменения размеров зерна стали Mn18Cr18N [196]

| | |
|--|---|
| Соотношения, описывающие динамическую рекристаллизацию | <p>Параметр Zener-Holloman: $Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp \left(\frac{Q}{R \cdot T} \right)$,</p> <p>где Q – энергия активации (478,6 кДж/моль); R – газовая постоянная (8,314 Дж/моль*К); T – температура деформации, К; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, с⁻¹.</p> <p>Критическая степень деформации, при достижении которой начинается динамическая рекристаллизация: $\varepsilon_c = 3,7 \cdot 10^{-5} \cdot d^{0,071} \cdot Z^{0,2}$,</p> <p>где D – исходный размер зерна (350 мкм).</p> <p>Степень деформации, при которой рекристаллизуется 50% деформируемого металла: $\varepsilon_{0,5} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot d^{0,117} \dot{\varepsilon}^{0,103} \cdot \exp \left(\frac{89748}{R \cdot T} \right)$.</p> <p>Размер зерна после завершения динамической рекристаллизации:</p> $d_{drx} = 1,159 \cdot 10^6 \cdot Z^{-0,277}.$ <p>Объем динамически рекристаллизовавшегося металла:</p> $X_{drx} = 1 - \exp \left(-0,693 \cdot \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_{0,5}} \right)^{1,6} \right),$ <p>где ε – интенсивность деформации.</p> |
|--|---|

продолжение табл. 1.10.

| | |
|--|---|
| <p>Соотношения, описывающие статическую рекристаллизацию</p> | <p>Время протекания половины статической рекристаллизации:</p> $t_{0.5} = 8.47 \cdot 10^{-16} \cdot d^{1.99} \varepsilon^{-3.323} \cdot \exp\left(\frac{249300}{R \cdot T}\right).$ <p>Часть металла прошедшая статическую рекристаллизацию (в долях от 1):</p> $X_{стк} = 1 - \exp\left(-0.693 \cdot \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^{1.702}\right).$ <p>Размер зерна после завершения статической рекристаллизации:</p> $d_{стк} = 2.98 \cdot 10^5 \cdot d^{0.79} \varepsilon^{-1.74} \cdot \exp\left(-\frac{158500}{R \cdot T}\right).$ |
| <p>Функция для определения роста зерна</p> | $d_t^{5.9} - d_0^{5.9} = 2.2 \cdot 10^{26} \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{486809}{R \cdot T}\right).$ |

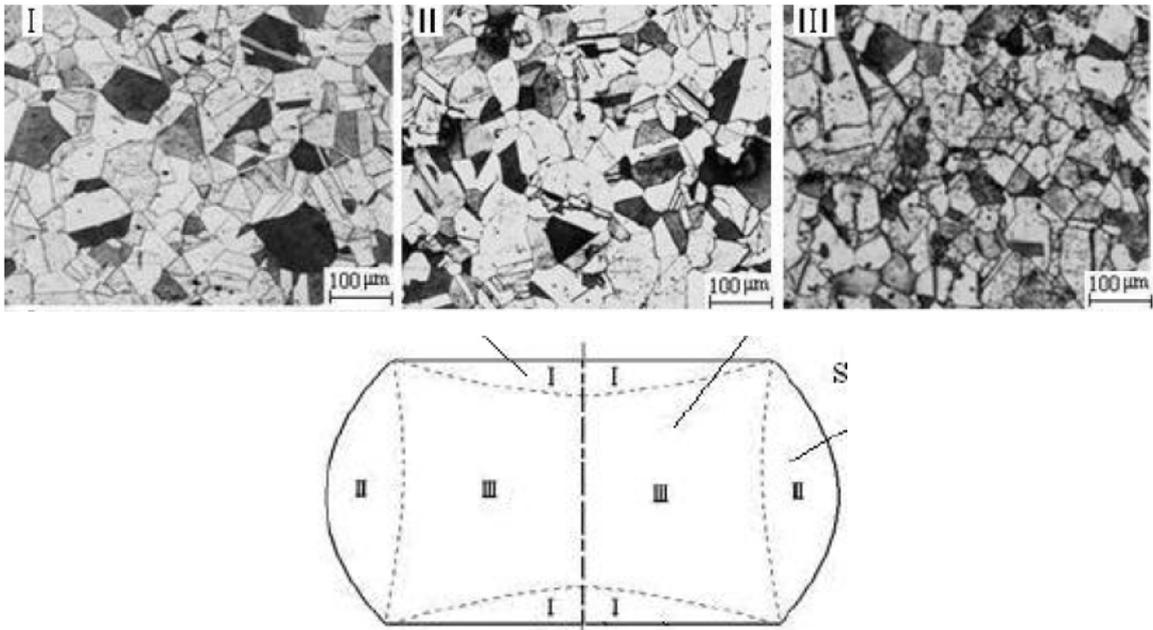


Рисунок 1.50 - Экспериментальные исследования микроструктуры металла в процессе осадки

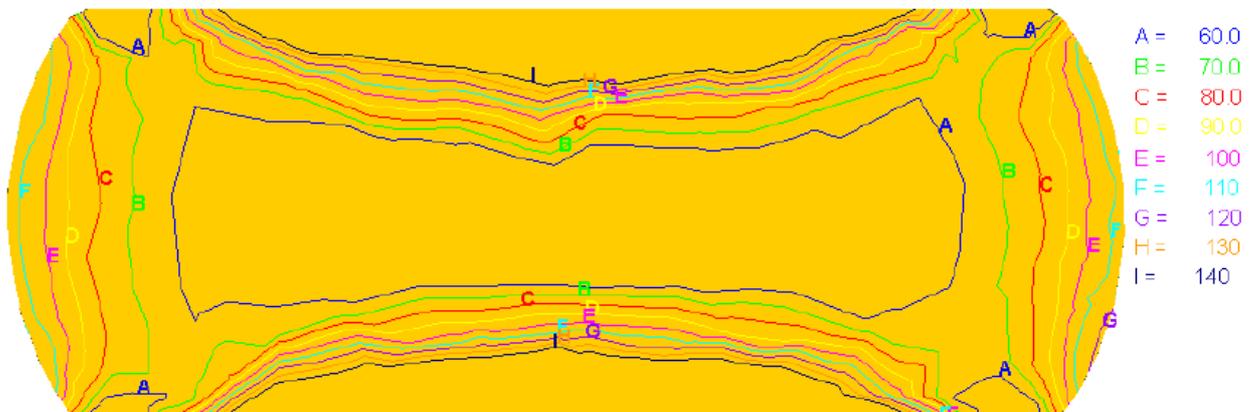


Рисунок 1.51 - Моделирование микроструктуры металла в процессе осадки по приведенной выше методике

$$d_{avdtrx} = d_{dtrx} * X_{dtrx} + (1 - X_{dtrx}) * d.$$

По окончании динамической рекристаллизации начинается статическая рекристаллизация. Определяется время половины рекристаллизации $t_{0.5}$, величина полностью рекристаллизовавшегося зерна d_{srxx} . Если процесс многоэтапный, то время паузы между деформациями позволяет определить степень статической рекристаллизации X_{srxx} . Средняя величина зерна определяется так же, как и в случае с динамической рекристаллизацией:

$$d_{avsrxx} = d_{srxx} * X_{srxx} + (1 - X_{srxx}) * d_{avdtrx}.$$

Если время паузы больше, чем время полной рекристаллизации наступает третий этап. Рост зерна после рекристаллизации. В этом случае рассчитывается только величина зерна.

Порядок расчета можно представить в виде блок-схемы (рис. 1.52).

Данный метод расчета изменения микроструктуры металла в процессе горячей деформации в приложении к процессамковки крупных поковок в сочетании с методом конечных элементов (для определения температуры, скорости деформации и интенсивности деформации в заготовке) позволит подобрать рациональную схемуковки, которая обеспечивает высокое качество изделия.

В отечественной литературе отсутствуют данные по моделированию изменения микроструктуры металла в процессахковки и штамповки. Развитие и адаптация данного метода к задачамковки крупных поковок являются важным для отечественной науки. Использование данного инструментария существенно расширит возможности в прогнозировании качества получаемых изделий и повысит эффективность производства.

Расчет восстановления пластичности. Как известно восстановления пластичности деформированного металла добиваются для холодных процессов промежуточными отжигами, а для горячих процессов - паузами при обеспечении высокой температуры заготовки. Само явление восстановления

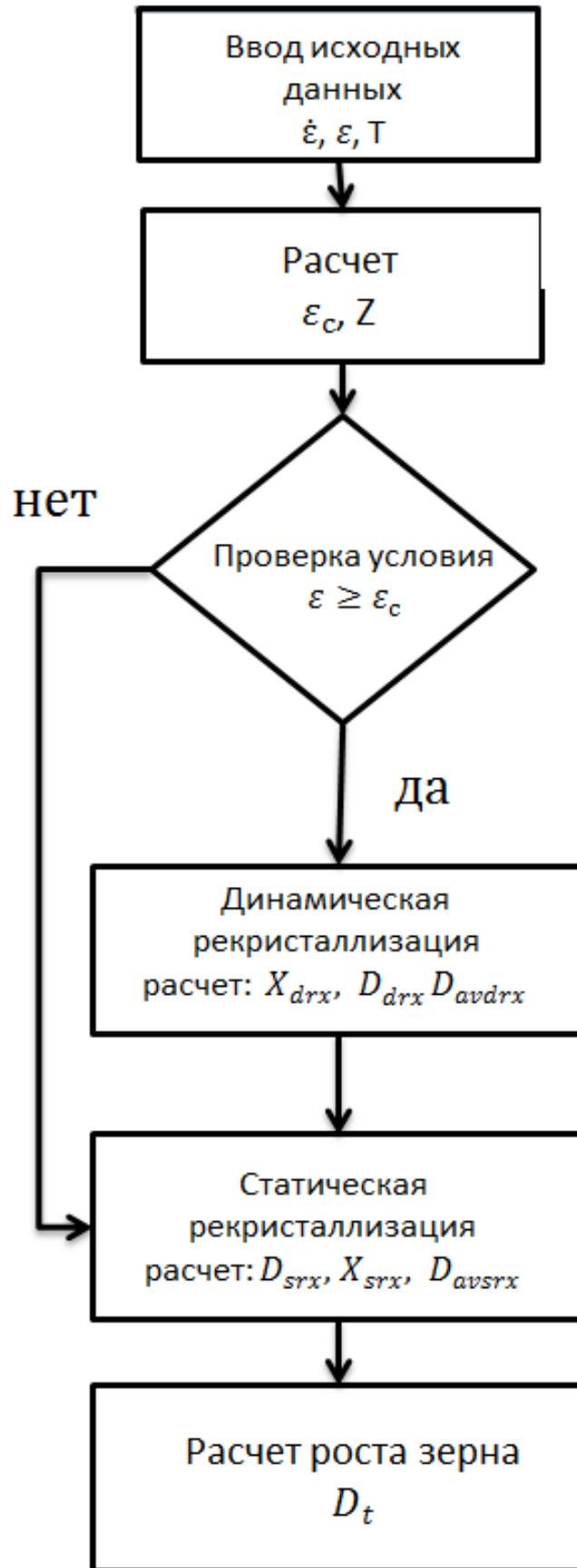


Рисунок 1.52 - Алгоритм расчета размера зерна при одноэтапном деформировании

пластичности металла в процессе горячего деформирования и его механизм были описаны ранее.

Наиболее распространенные методы теоретического анализа процессов ОМД не позволяют учитывать данное явление в расчетах предельного формоизменения, что накладывает ряд ограничений на сами методы. Т.е. они не могут адекватно рассчитать процессыковки с учётом цикличности деформирования заготовки.

Разработка метода, позволяющего прогнозировать разрушение металла с учетом восстановления его пластичности, является весьма актуальной задачей и позволит создать ряд технологий, расширяющих возможности производства, особенно при изготовлении деталей из малопластичных материалов.

Прогнозированием восстановления пластичности в холодных процессах обработки давлением занимался Матвийчук В.А. [202]. Он получил многочисленные экспериментальные данные для различных материалов (в основном низкоуглеродистые стали и алюминии), на основании которых дал рекомендации по предельной степени деформации заготовки до отжига.

Прогнозированием восстановления пластичности в горячих процессах занимались Ефимов В.Н. и Михалевич В.М., однако модели, которые были ими предложены, обладают одним существенным недостатком. Они получены при использовании гипотезы полной обратимости процесса накопления повреждений при горячей деформации. Следствием данной гипотезы является свойство соотношения, согласно которому при достаточно длительной паузе пластичность восстанавливается полностью независимо от уровня накопленных повреждений.

Модель Михалевича В.М. [203]:

$$\Delta \psi = \frac{\ln(1 + e^{(s \psi_1)^{s \Delta_i}} (e^{(s \Delta_i)} - 1))}{s} - \Delta_i, \quad (1.1)$$

где s – коэффициент материала; Δ_{II} - относительная длительность паузы

зы; ψ_1 - использованный ресурс пластичности перед паузой.

Модель Ефимова В.Н. [204]:

$$d\psi = \chi(\dot{\epsilon}) \cdot (\psi - \psi_1) \cdot \left\{ \left[dB_p \cdot (\tau - \tau_n) \right] / d\tau \right\} d\tau, \quad (1.2)$$

где $\chi(\dot{\epsilon})$ – убывающая функция, зависящая от скорости деформации; ψ_1 - максимально восстанавливаемая степень запаса пластичности, относительная длительность паузы; $[dB_p \cdot (\tau - \tau_n)] / d\tau$ - функция скорости степени восстановления пластичности, τ_n - время в момент прекращения движения инструмента.

В модели (1.2) величина максимально восстанавливаемого запаса пластичности не зависит от истории нагружения металла, т.е. нет зависимости от того, какая же величина пластичности уже израсходована. Т.е. величина ψ_1 одинакова и для 10% затраты ресурса пластичности, и для 90%.

Таким образом, создание метода, позволяющего определять уровень восстановления пластичности и прогнозировать предельное формоизменение в процессах горячего дробного деформирования с учетом истории деформирования и реальности самого процесса восстановления, является актуальной задачей.

Определение реологии металла. Адекватное моделирование процессовковки, как и многих других процессов ОМД, невозможно без учета реологии деформируемого материала в виде кривых течения. В прикладных программах, работающих на основе метода конечных элементов, кривые течения металла задаются либо в табличном виде, либо в виде формул, описывающих данные кривые.

Как показывают многочисленные экспериментальные исследования и работы отечественных и зарубежных авторов, зависимость сопротивления деформированию при постоянной температуре корректно описывается степенной зависимостью предложенной П. Людвигом [205]:

$$\sigma_s = C \cdot e^n,$$

где C , n – константы материала.

Для построения кривой течения металла, описывающей зависимость, приведенной выше, достаточно знать несколько стандартных характеристик материала, таких как предел прочности σ_B и условный предел текучести $\sigma_{0,2}$.

Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ – условное напряжение, которое соответствует относительному остаточному удлинению равному 0,2%. При таких деформациях относительное остаточное удлинение отличается от истинной логарифмической деформации не более чем на 0,1%, поэтому

$$e_{0,2} \approx \varepsilon_{0,2} / 100 = 0,002,$$

$$\sigma_{0,2} = C \cdot 0,002^n.$$

В работах [206-208], анализируя устойчивость деформирования, показано, что если модель материала следует аппроксимации Людвига, то образование шейки при растяжении начинается при логарифмической деформации, равной n . Таким образом:

$$\sigma_{iB} = \sigma_B \exp(-n), \quad \sigma_{iB} = C \varepsilon^n, \quad \sigma_B = C \exp(-n)n^n.$$

Имеем два уравнения с двумя неизвестными, решая которые определяем коэффициенты C и n . Данная методика описана в работе Грушко А.В [209]. Однако данная методика подходит только для построения кривых течения металла в холодном состоянии.

При горячей деформации на сопротивление деформации существенное влияние оказывают температура и скорость деформации. Процессыковки крупных поковок характеризуются неоднородным температурным и дефор-

мационным полями, что вызывает необходимость в наличии кривых течения металла для различных температур и скоростей деформации. Зачастую стандартные величины материала в виде предела прочности и текучести в справочниках даны для ограниченного количества скоростей деформации, отличающихся в сотни раз. Использование данной методики невозможно для получения кривых течения металла по имеющимся стандартным характеристикам для горячих процессов деформирования.

Создание методики позволяющей на основании ограниченного количества справочных данных о стандартных характеристиках материала строить любое количество кривых течения, необходимых для описания процессовковки, является актуальной задачей.

1.4 Проблемы проектирования процессовковки крупных поковок, постановка целей и задач исследований

Ковка поковок типа валов. В целом алгоритм разработки технологического процессаковки крупных поковок выглядит следующим образом (рис. 1.53): технолог, опираясь на исходные данные в виде формы изделия, материала, из которого это изделие получается, серийности производства и др. сперва назначает группу поковки, т.е. относит поковку к валам, плитам, дискам и т.д. После чего технолог должен определиться с группой материала, является данный материал малопластичным или пластичным, от чего в дальнейшем будет зависеть выбор схемыковки. Имея данные по группе поковок и типу материала, необходимо выбрать форму и размеры исходной заготовки (слиток). Выбор вида слитка осуществляется по имеющимся рекомендациям и исходя из производственного опыта, экономической целесообразности, технологических возможностей производства. Так, например, для валов целесообразно применять укороченный слиток, для плит слябовый, для колец и втулок полый либо бесприбыльный.

Далее необходимо выделить особенности формыковки для определения необходимости назначения дополнительных кузнечных операций, не свойственных традиционным процессам свободнойковки (протяжки, осадки,

раскатки, прошивки и т.д.). Так, например, деталь ротор может иметь широкий фланец, который получить протяжкой не возможно без существенных напусков и, следовательно, необходимо применять дополнительную операцию высадки.

Имея приведенные выше данные, возможно назначить схемуковки, т.е. указать каким инструментом будет выполнятьсяковка. После назначения инструмента необходимо оговорить термомеханический режимковки.

Основываясь на проведенном выше обзоре различных способовковки, исходных заготовок, режимов, по которым данные заготовкикуются, можно заключить, что по некоторым типампоковок и по некоторым из пунктов составления технологического процесса существует некая неопределенность. Данная неопределенность заключается как в необходимости выбора схемыковки из большого количества возможных вариантов, так и в отсутствии научно обоснованных рекомендаций, что не позволяет эффективно разрабатывать технологический процесс.

Рассмотрим более подробно по каждой из групппоковок «белые пятна» (неопределенности) в рекомендациях по разработке технологического процесса (рис. 1.54-1.58).

В процессе разработки технологического процессаковки валов первой из неопределенностей является выбор вида слитка. Как отмечалось выше, на различных предприятиях используется множество типов слитков: обычный кузнечный слиток, удлиненный, укороченный, малоприбыльный, слитки специальной конфигурации (трех-, четырехлучевой) и т.д. Каждый из данных видов слитков имеет ряд преимуществ и недостатков, позволяющих или не позволяющих использовать их в определенных условиях.

Исследования по выбору слитков дляковкипоковок типа валов проведены в работе Маркова О.Е. [210]. В результате проведенных исследований он заключает, что наиболее рациональным дляковки валов является применение укороченного слитка, что позволяет получать качественные изделия

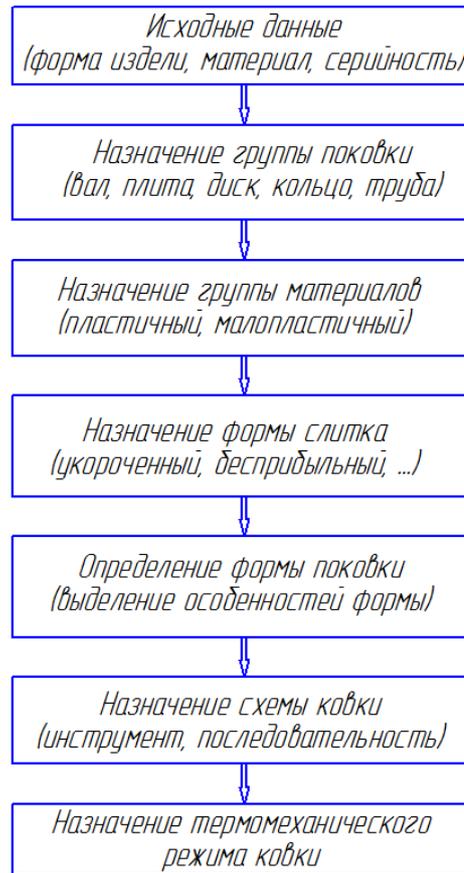


Рисунок 1.53 - Последовательность разработки технологического процесса ковки

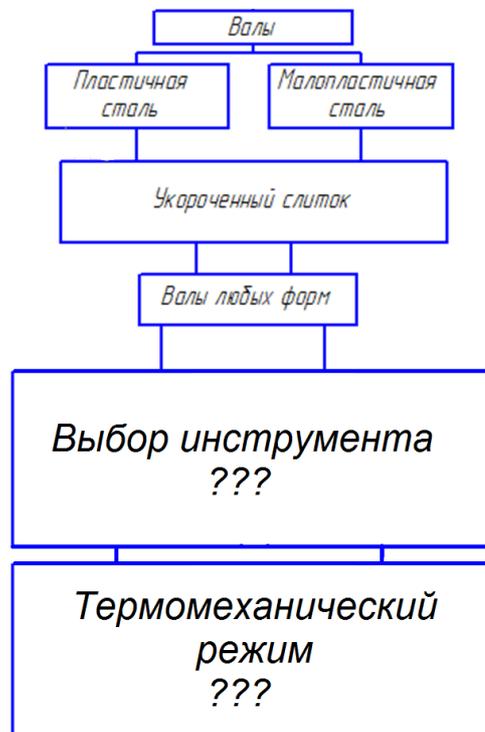


Рисунок 1.54 - Неопределенности при проектировании процессов ковки валов

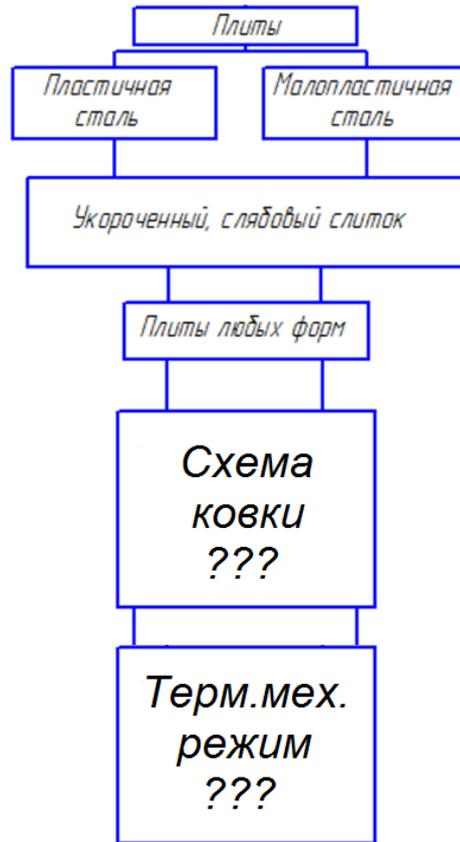


Рисунок 1.55 - Неопределенности при проектировании процессов ковки
ПЛИТ



Рисунок 1.56 - Неопределённости при проектировании процессов ковки
ДИСКОВ

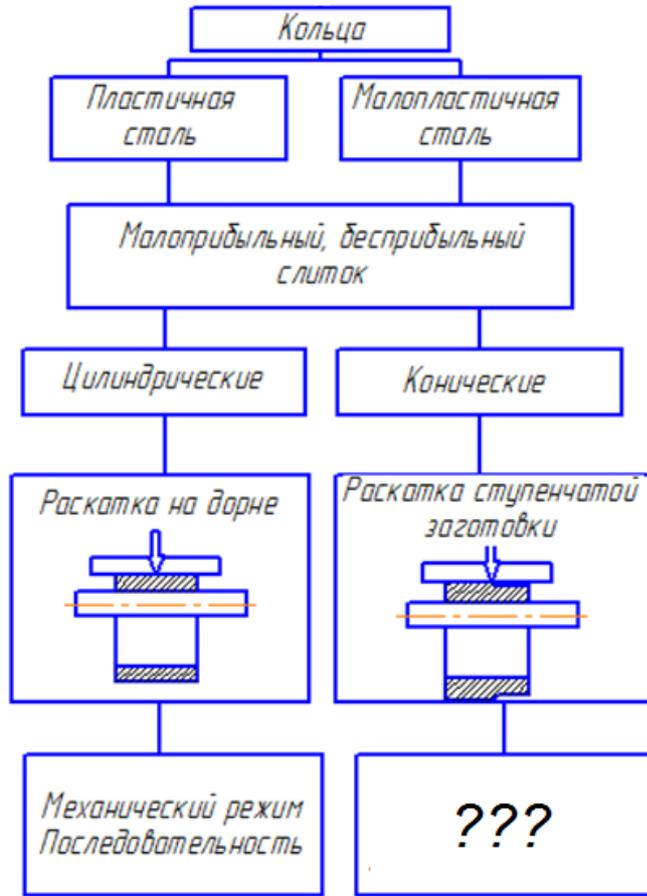


Рисунок 1.57 - Неопределенности при проектировании процессовковки колец

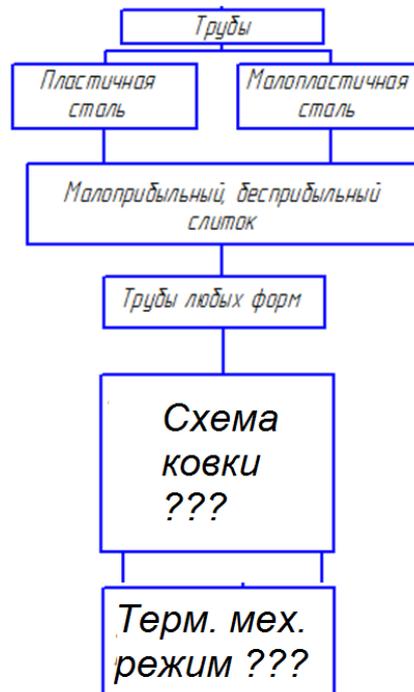


Рисунок 1.58 - Неопределенности при проектировании процессовковки труб

без применения операции осадки. Таким образом, основываясь на его исследованиях, можем данную неопределенность вычеркнуть и рекомендовать для изделий типа валов и плит использование укороченных слитков.

Следующей неопределенностью является выбор инструмента для реализации процессаковки, причем применение того или иного инструмента будет зависеть от характеристик материала (пластичная или малопластичная сталь). Как показал проведенный выше обзор схем инструмента, используемых дляковки валов и плит, количество их большое и все схемы имеют определенные преимущества друг перед другом. Однако множество схем, приведенных в рассмотренных работах, попросту не исследовано, или исследовано поверхностно без применения современных методов исследования, что не позволяет выделить какую либо одну схемуковки. Это вносит неопределённость в выборе инструмента и требует дополнительных исследований, для разработки научно обоснованных рекомендаций.

Подобрать рациональную схему инструмента дляковки валов невозможно, не разработав механический режимковки, т.к. он является определяющим для качества изделия. Таким образом, следующая неопределённость в виде механического режима также требует большого внимания со стороны исследователей и непременно должна быть решена.

Ковка поковок типа плит. Общеизвестно, что дляковки поковок типа плит хорошо себя зарекомендовали слябовые слитки, которые позволяют минимизировать количество переходовковки, и при назначении вида слитка предпочтение нужно отдавать именно этому виду слитков.

Дляковки поковок типа плит возможно применение инструмента различной конфигурации (выпукло-вогнутые бойки, бойки ступенчатые, нижний плоский верхний выпуклый и т.д.).

Бойки сложной формы в процессековки плит используются в качестве инструмента для повышения проработки металла слитка. На завершающих этапахковки всегда используются плоские бойки. Плоские бойки могут иметь радиусную кромку (на подавляющем большинстве предприятий) и

фаску. Выбор тех или иных бойков должен быть основан на влиянии их на технологическую пластичность заготовки и качество формоизменения. Рекомендаций по поводу размеров таких бойков дляковки плит в литературе носят противоречивый характер, что говорит о необходимости проведения дополнительных исследований с использованием современных методов анализа. Подбор схемы инструмента должен сопровождаться подбором рационального механического режима деформирования.

Ковка поковок типа дисков. При разработке технологического процессаковки дисков, проводя выбор типа слитка необходимо учитывать, что основной формоизменяющей операцией является осадка. В процессе осадки часть металла находящаяся вдоль его оси, течет в поперечном направлении. В случае, если слиток будет иметь дефектную осевую зону, то после получения диска данная зона увеличится в поперечном направлении. Такая поковка будет иметь низкое качество. Поэтому исходная заготовка также должна иметь высокое качество, чему соответствует обычный кузнечный слиток с достаточно большой прибыльной частью. В процессе подготовительных операций (биллетеровка) форма заготовки, безусловно, может быть изменена для достижения более высокого качества изделия. Как показал обзор различных работ, заготовке может быть предано большое количество различных форм. Проблема подбора рациональной формы остается открытой и требует дальнейших исследований.

На следующем этапе необходимо подобрать инструмент для осуществления процессаковки. Подбор инструмента безусловно будет зависеть от формы получаемого изделия, кроме того от требований предъявляемых к качеству изделия. Схем инструмента дляковки поковок типа дисков достаточно большое количество, однако все они обладают некоторыми недостатками, такими как низкая точность получаемых изделий и пониженное качество. Поиск новых схемковки, лишенных данных недостатков, является актуальной задачей и должен быть учтен при выборе направлений исследований в областиковки поковок типа дисков.

Подбирать рациональную схему инструмента необходимо одновременно с подбором механического режима ковки, т.к. он является определяющим для качества изделия. Таким образом, следующая неопределённость в виде механического режима также требует большого внимания со стороны исследователей и непременно должна быть решена.

Ковка крупногабаритных колец. При разработке технологического процесса ковки поковок типа колец на начальном этапе технолог сталкивается с проблемой выбора вида слитка. Для ковки поковок данного типа часто используют бесприбыльные, малоприбыльные и пустотелые слитки. Пустотелые слитки позволяют существенно сократить технологический процесс, исключить операции прошивки и осадки. Однако данный вид слитка достаточно сложно получать в производственных условиях, и малое количество предприятий использует его. Т.к. в процессе производства кольца из заготовки удаляют центральную часть металла при прошивке, то часто применяют малоприбыльные и бесприбыльные слитки. Их недостаток в виде усадочной раковины и осевой пористости для поковок типа колец не критичен и его перевешивает преимущество в виде повышенного коэффициента использования металла.

После выбора слитка технолог должен подобрать инструмент, с помощью которого будет осуществляться ковка. Данный этап будет зависеть от формы кольца. Так если речь идет о ковке обычного цилиндрического кольца то, как показал анализ многочисленных работ, особой альтернативы цилиндрическому дорну и плоскому бойку нет. Т.е. в этом случае целесообразно использовать стандартный инструмент. В случае, если кольцо имеет сложную форму (коническую, ступенчатую и т.д.), то необходим специальный инструмент, что конечно же ведет к удорожанию технологического процесса. С целью повышения технико-экономических показателей процессов ковки колец данному вопросу необходимо уделить особое внимание, разработав возможно новые приемы ковки с использованием стандартного инструмента.

Подобрав рациональную для данного изделия схему инструмента необ-

ходимо разработать режим ковки, который позволил бы достичь требуемых показательней качества и экономии. Данной проблеме должно быть уделено особое внимание, что говорит о необходимости проведения дополнительных исследований.

Ковка крупногабаритных труб. Производство крупногабаритных труб горячей обработкой давлением можно разделить на две группы: это протяжка на оправке и прошивка в контейнере. Прошивка в контейнере позволяет получать трубы с глухим дном и трубы с повышенной точностью, однако требует специального оборудования.

При выборе слитка для ковки протяжкой на оправке, необходимо принимать во внимание, что перед протяжкой происходит сквозная прошивка слитка и его сердцевина удаляется. Именно поэтому допускается, чтобы исходная заготовка имела некоторую осевую дефектность в виде пористости. Данное допущение позволяет использовать более дешевые заготовки. Так, например, часто используются малоприбыльные и бесприбыльные слитки. Использование пустотелых слитков зачастую затруднено сложностью их получения, и чаще более целесообразно использовать обычный кузнечный слиток. Выбор вида слитка существенно зависит от возможности конкретного производства качественно изготовить тот или иной его вид. В случае получения труб прошивкой в контейнере, осевая, дефектная часть слитка не удаляется, а разгоняется по телу поковки. Выбор слитка в этом случае должен быть основан на необходимости обеспечения высокого качества осевой части слитка, и здесь необходимо использовать обычный кузнечный слиток.

На следующем этапе необходимо подобрать инструмент для осуществления процесса ковки. Подбор инструмента, безусловно, будет зависеть от формы получаемого изделия. Будет это труба со сквозным отверстием или с глухим. В случае ковки трубы со сквозным отверстием, как показал проведенный обзор, наиболее часто используют вырезные или комбинированные бойки и гладкую коническую охлаждаемую оправку. Проблемой данного способа производства является необходимость содержать большой парк ти-

поразмеров оправок для труб различных диаметров или идти на существенные напуски в поковке. Кроме того, стойкость оправок достаточно мала и они требуют периодической замены. Это достаточно существенная проблема, которая требует определенных решений. Исследования, направленные на устранения данных проблем, являются актуальными. В случаековки труб с глухим дном и отсутствии специализированного оборудования в виде специальных прошивных прессов, необходимо прибегнуть к приему заковки, используя при этом обычный кузнечный инструмент. Режимуковки трубных изделий также должно быть уделено особое внимание.

Наметив пути дальнейших исследований необходимо выбрать критерии оптимизации технологических процессов и уточнить цели и задачи проведения исследований.

Основными направлениями исследований является создание и применение математического инструментария с целью разработки новых способовковки и усовершенствования традиционных. Для конкретизации основных направлений работ по созданию и усовершенствованию способовковки выделим цели второго ранга (рис. 1.59), которые обозначают различные области применения получаемых решений, т.е. групп поковок к которым данные решения могут быть применены. На следующем уровне выделим цели в виде элементов системы, сопоставимых с точки зрения их содержания и влияния на цель более высокого уровня. Такими элементами являются заготовка, поковка, режимковки, инструмент, вспомогательные операции и оборудование. В качестве целей 4-го ранга принимаются категории (показатели), составляющие общую эффективность технологической системы, а далее на последующих уровнях устанавливаем факторы, определяющие значение этих показателей. Очевидно, что показатели, обозначающие подцели 4-го уровня, могут служить целевыми объектами исследования, а подцели на более низких уровнях, указывающие на пути достижения требуемых целевых эффектов, могут быть приняты в качестве задач научных исследований.

Рассмотрим более подробно дерево целей, приведенное на рис.1.59.

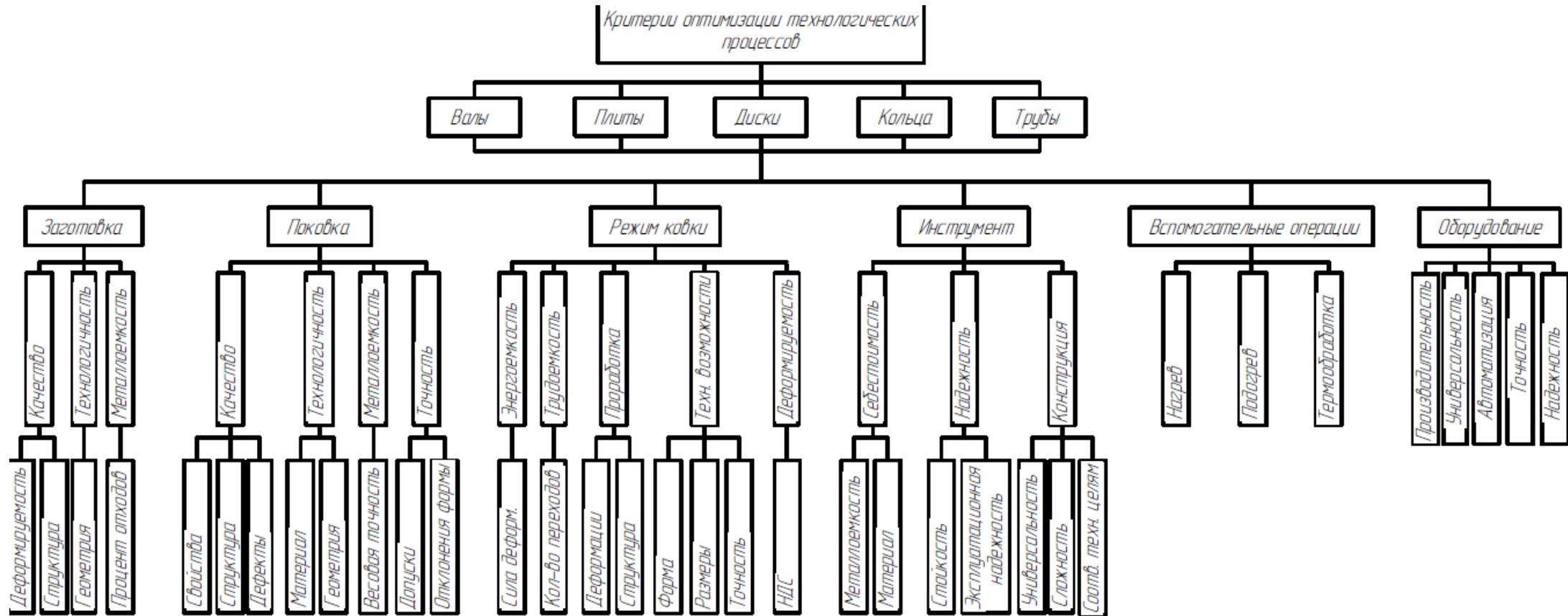


Рисунок 1.59 - Древо целей и задач

Как уже указывалось, целями второго ранга служат группы поковок имеющие наибольшее распространение в машиностроении: валы, плиты, диски, кольца и трубы. К целям третьего ранга можно отнести заготовку в виде слитка, поковку как конечный продукт ковки, режим ковки, инструмент, вспомогательные операции и оборудование.

Для заготовки можно выделить такие подцели, как качество, технологичность и металлоемкость. При достижении данных подцелей необходимо следить за такими параметрами, как деформируемость металла и его структура, геометрия слитка и процент отходов. Для поковки подцелями являются также качество, технологичность, металлоемкость и точность. Качество поковки будет определяться механическими свойствами, структурой металла, и дефектами. Технологичность определяется геометрией изделия и его материалом. Металлоемкость поковки определяется весовой точностью. Обеспечивая точность поковки необходимо обеспечить малые допуски и отклонение формы.

Режим ковки имеет такие подцели, как энергоемкость, трудоемкость, технологические возможности и деформируемость. При достижении данных целей необходимо отслеживать силу деформирования, количество переходов, деформации, структуру, форму, размеры, точность поковки. Для инструмента подцелями являются себестоимость, надежность и конструкция, что выражается в металлоемкости, материале, стойкости, эксплуатационной надежности, универсальности, сложности и соответствия технологическим целям. Вспомогательные операции и оборудование имеют существенное влияние на экономические показатели технологических процессов ковки, но не являются объектом настоящего исследования.

Выводы

В связи с постоянно растущей конкуренцией на международном рынке тяжелого машиностроения между такими игроками, как Япония, Китай, Германия, Великобритания, Южная Корея, Россия и др. возрастает роль создания новых эффективных технологийковки крупных поковок.

1. На основании проведенного обзора состояния вопроса в областиковки крупных поковок и проведенного анализа выделены основные группы поковок и схемыковки для них. Для каждой из группы поковок, с целью структурирования имеющихся знаний и определения направлений дальнейшего развития, выделены основные факторы, которые имеют наибольшее влияние на НДС заготовки в процессахковки. Это фактор формы (форма инструмента и заготовки), кинематический фактор (кинематика воздействия инструмента на заготовки и механический режим) и температурный фактор. Для каждой из групп поковок в пределах отдельных факторов отмечены пути и направления дальнейшего совершенствования процессовковки крупных поковок.

2. С целью определения важности обеспечения определенных условийковки, в виде рациональной схемы НДС металла заготовки, проведен анализ влияния горячей пластической деформации на структуру и свойства различных материалов, опираясь на отечественные и зарубежные литературные данные. Установлены, основные параметры, на которые влияет НДС заготовки в процессахковки. Отмечено, что наибольшее влияние деформация в горячем состоянии, особенно литого металла, оказывает на пластические свойства, такие, как относительное удлинение и ударная вязкость. Определены группы материалов с наибольшим влиянием деформации на их механические свойства.

3. Установлено, что основным методом моделирования процессовковки крупных поковок, на данном этапе развития науки и техники, является метод конечных элементов, т.к. позволяет с высокой точностью оценивать параметры НДС заготовки. Современные мировые тенденции в моделировании

процессов горячего пластического деформирования заключаются в разработке новых методов учета физических явлений протекающих в реальных процессахковки и штамповки. Так в последнее время учеными европейских ученых школ начал использоваться метод прогнозирования изменения микроструктуры стали, примеры использования которого в Украине полностью отсутствуют. Кроме того, метод конечных элементов не позволяет учитывать такое явление как восстановление пластичности металла и прогнозировать его разрушение, что вызывает необходимость в применении специального метода расчета процессовковки.

Кроме того, метод конечных элементов основан на использовании большого количества экспериментальных данных по реологии материала, особенно для горячих процессов пластического деформирования. Применение новых методов прогнозирования реологии материалов в горячем состоянии по ограниченному количеству данных позволит повысить эффективность применения МКЭ.

4. На основе проведенного анализа определены проблемы в традиционном подходе к проектированию технологического процессаковки крупных поковок различных типов. Установлены основные направления совершенствования технологических процессовковки таких поковок как валы, плиты, диски, кольца и трубы. Выделены основные параметры процессовковки, которые необходимо оптимизировать в процессе разработки новых схем деформирования. Выделены основные задачи исследования при создании новых и усовершенствовании традиционных схемковки.

На основании проведенного анализа и выводов сформулированы цель работы и задачи исследования которые приведены в вводной части диссертации.

РАЗДЕЛ 2

ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР МЕТОДОВ И НАПРАВЛЕНИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ КОВКИ КРУПНЫХ ПОКОВОК

2.1 Расширение области проведения исследований на основании метода морфологических карт

Создание эффективных схем деформирования должно сопровождаться рассмотрением большого количества вариантов для выбора наиболее приемлемого. С этой целью необходимо использовать специальные методы расширения области поиска решений. Для этого необходимо воспользоваться одним из методов поиска идей: метода мозговой атаки, синектики, ликвидации тупиковых ситуаций, морфологических карт.

Метод мозговой атаки [211, 212] заключается в стимулировании группы лиц к быстрому генерированию большого количества идей. Это делается за счет отбора группы лиц для генерации идей, создания каждым членом группы большого количества идей и их оценки. Такой подход имеет ряд недостатков, связанных с необходимостью нестандартного мышления при создании идей и практически нулевой возможности формализации такого поиска.

Метод синектики [213, 214] заключается в направлении спонтанной деятельности мозга и нервной системы на исследование и преобразование проектной проблемы. Для данного метода подбирается группа специалистов в качестве самостоятельного «отдела разработок», предоставляется этой группе возможность попрактиковаться в использовании аналогий для ориентирования спонтанной активности мозга и нервной системы на решение предложенной проблемы. После этого группе передаются сложные проблемы, которые не может решить основная организация, и предоставляется достаточное время их решения. Полученные результаты работы для оценки и внедрения предоставляются основной организации.

Для определения новых решений используя данный метод необходимо подобрать большое количество людей – экспертов.

Ликвидация тупиковых ситуаций [215, 216] позволяет найти новые направления поиска, если очевидная область поиска не дала приемлемого решения. Данный метод заключается в поиске новых взаимосвязей между частями имеющегося неудовлетворительного решения, переоценки проектной ситуации. Данный метод практически невозможно, каким либо образом формализовать и решения, которые будут находиться существенным образом, будут зависеть от опыта исследователя.

Метод морфологических карт [217, 218] является наиболее приемлемым для расширения области поиска решений проектной проблемы. План действий для реализации данного метода заключается в определении функций, которые приемлемый вариант решения должен быть способен выполнить, перечисления на карте широкого спектра частичных решений, т.е. альтернативных средств осуществления каждой функции. После чего происходит выбор по одному приемлемому частичному решению для каждой функции.

Этот метод достаточно успешно применялся для поиска решений ряда новых инженерных проблем самого различного характера – от транспортировки нефти без танкеров до конструкций различных механизмов. Наилучшие результаты он дает при ограниченной области поиска.

Для создания новых способов ковки поковок основных видов, типа валов, плит, дисков, колец и труб рассмотрим применение метода морфологических карт. Для создания морфологической карты необходимо вначале выделить основные элементы способов, имеющие наибольшее влияние на процесс деформирования. Это выполнено в разделе 1, к таким элементам относятся фактор формы, кинематический фактор и температурный фактор.

Для морфологических карт фактор формы инструмента и заготовки можно условно разделить на продольную и поперечную форму в связи со сложной их конструкцией. Кинематический фактор разделяется на кинема-

тику движения инструмента и механический режим деформирования.

На основании проведенного анализа многочисленных работ по ковке различными способами, приведенного в разделе 1, возможно для каждого из элементов морфологической карты занести следующие частные решения. Дляковки валов и плит известно использование бойков, которые имеют продольную форму плоскую, ступенчатую, со скосами различной конфигурации, в тоже время поперечная форма инструмента может быть также плоской, с вырезом, выпуклой, ступенчатой и т.д. (около 14 вариантов). Заготовки которые используются дляковки таких поковок - это слитки с круглой, квадратной, прямоугольной и фигурной (трех-, четырех лучевой) формы. Инструмент может двигаться вертикально либо с горизонтальным смещением. Температурное поле заготовки может быть однородным с температурой выше температуры рекристаллизации, ниже температуры рекристаллизации и неравномерным симметричным и несимметричным. Все возможные варианты занесены в карту (рис. 2.1).

Генерирование способовковки с помощью данной карты предполагает применение для каждого из элементов наиболее эффективного частного случая и их комбинирование. Общее количество схем деформирования, которое можно составить с использованием данной карты находится в районе 30 тысяч. Такое количество способов просто физически невозможно проанализировать и обработать, поэтому анализу необходимо подвергнуть только лишь несколько наиболее эффективных с точки зрения исследователя (эксперта) схем, полученных в результате комбинирования различных частных решений.

На основании проведенного анализа работ по ковке дисков возможно для каждого из элементов морфологической карты занести следующие частные решения. Инструментом дляковки дисков может выступать осесимметричные плиты, ассиметричные плиты и узкие бойки. Плиты, как и бойки, могут быть плоскими, выпуклыми, вогнутыми, ступенчатыми с отверстиями различной конфигурации.

Заготовка в продольном сечении может быть прямоугольной, вогнутой, конической выпуклой и сложной комбинированной формы. Поперечное сечение заготовки может быть круглой формы, квадратной, прямоугольной, с отверстием, сложной трех-, четырехлучевой. На основании проведенного анализа можно выделить 6 основных видов кинематики движения инструмента в процессе осадки дисков - это линейное продольное перемещение верхнего инструмента, комбинированное продольно-поперечное и продольно-вращательное, одновременное продольное движение верхнего и нижнего инструмента, одновременное продольно-вращательное и продольное перемещение верхнего инструмента с поперечным перемещением нижнего инструмента. Деформирование может осуществляться с паузами и непрерывно. Температурное поле и состояние заготовки также имеет ряд вариантов, прежде всего, однородное температурное поле с температурой выше и ниже температуры рекристаллизации. Температурное поле может быть неравномерное симметричное и асимметричное в продольном и поперечном сечении заготовки. Все основные варианты занесены в таблицу, приведенную на рис. 2.2. Данная таблица позволяет сгенерировать все приведенные выше способы ковки. Пользуясь этой таблицей и совмещая друг с другом различные решения, возможно создать более 10000 способов ковки дисков. Большую часть из них будет либо практически невозможно реализовать, либо они не будут иметь преимуществ по сравнению с уже существующими. Однако из такого большого количества способов, возможно будет выделить и ряд новых перспективных способов ковки. Принимая во внимание, что такое количество способов просто физически невозможно проанализировать и обработать, анализу необходимо подвергнуть только лишь несколько наиболее эффективных с точки зрения исследователя (эксперта) схем, полученных в результате комбинирования различных частных решений.

Что касается ковки колец, для каждого из элементов морфологической карты можно выделить следующие частные решения. Инструментом для ковки колец может выступать верхний боек плоский, выпуклый, вогнутый,

| | | Валы, плиты | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|
| A | Форма инструмента продольная | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | | | | | | | |
| B | Форма инструмента поперечная | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| B | Форма заготовки продольная | 1 | 2 | | | | | | | | | | | | |
| Г | Форма заготовки поперечная | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | | | | | | | |
| Д | Кинематика движения инструмента | 1 | 2 | 3 | | | | | | | | | | | |
| Е | Механический режим | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | |
| Ж | Температурное поле | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | |

Рисунок 2.1 - Морфологическая карта для создания способов ковки поковок типа валов и плит протяжкой бойками

| | | Диски | | | | | | | | | |
|---|---------------------------------|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| A | Форма инструмента продольная | 1 | 2 | 3 | | | | | | | |
| B | Форма инструмента поперечная | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| B | Форма заготовки продольная | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | | | |
| Г | Форма заготовки поперечная | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | | | |
| Д | Кинематика движения инструмента | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | | | |
| Е | Механический режим | 1 | 2 | | | | | | | | |
| Ж | Температурное поле | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | | | |

Рисунок 2.2 - Морфологическая карта для создания способов ковки поковок типа дисков осадкой

ступенчатый скошенный, оправка может быть круглой и многогранной различных конфигураций. Заготовка в продольном сечении может быть цилиндрической, конической ступенчатой формы. Поперечное сечение заготовки может быть круглой и многогранной формы. На основании проведенного анализа можно выделить 3 основных видов кинематики движения инструмента в процессе раскатки колец: линейное продольное перемещение верхнего инструмента, комбинированное продольно-поперечное и продольно-вращательное. Деформирование может осуществляться с паузами и непрерывно. Температурное поле и состояние заготовки также имеет ряд вариантов. Прежде всего, однородное температурное поле с температурой выше и ниже температуры рекристаллизации. Температурное поле может быть неравномерное симметричное в поперечном сечении заготовки. Все варианты занесены в таблицу, приведенную на рис. 2.3. Пользуясь таблицей, и совмещая друг с другом различные решения, возможно создать несколько тысяч способов раскатки колец. Основная часть из них будет конечно же иметь явные недостатки и практически затрудненная в реализации. Но из такого большого количества способов можно выделить и ряд новых перспективных способов ковки. Анализу необходимо подвергнуть наиболее эффективные с точки зрения исследователя (эксперта) схемы раскатки колец.

Морфологическая карта для создания новых способов ковки поковок типа труб приведена на рис. 2.4. Здесь указаны следующие частные решения. Инструментом для ковки труб могут выступать плоские, комбинированные и вырезные бойки, бойки выпуклые, со скосом, симметричные и ассиметричные, протяжка может осуществляться с оправкой и без нее.

Оправка может быть конусной и ступенчатой. Бойки в продольном сечении могут быть с радиусными кромками, с фаской, или вогнутые. Заготовка обязательно должна быть полой, но в продольном сечении она может быть со сквозным отверстием, с глухим отверстием и ступенчатой.

Можно выделить 3 основных вида кинематики движения инструмента в процессе ковки труб: линейное продольное перемещение верхнего инстру-

| | | Кольца | | | | | | | |
|---|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| A | Форма инструмента продольная | | | | | | | | |
| Б | Форма инструмента поперечная | | | | | | | | |
| В | Форма заготовки продольная | | | | | | | | |
| Г | Форма заготовки поперечная | | | | | | | | |
| Д | Кинематика движения инструмента | | | | | | | | |
| Е | Механический режим | 1 с паузами | 2 без пауз | | | | | | |
| Ж | Температурное поле | 1 $T > T_{\text{реж}}$ | 2 $T < T_{\text{реж}}$ | 3 | | | | | |

Рисунок 2.3 - Морфологическая карта для создания способов ковки поковок типа колец раскаткой на дорне

| | | Трубы | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | | | | |
| A | Форма инструмента продольная | | | | | | | | | | | | | | |
| Б | Форма инструмента поперечная | | | | | | | | | | | | | | |
| В | Форма заготовки продольная | | | | | | | | | | | | | | |
| Г | Форма заготовки поперечная | | | | | | | | | | | | | | |
| Д | Кинематика движения инструмента | | | | | | | | | | | | | | |
| Е | Механический режим | 1 по лямкам | 2 по кольцу | | | | | | | | | | | | |
| Ж | Температурное поле | 1 $T > T_{\text{реж}}$ | 2 $T < T_{\text{реж}}$ | 3 | | | | | | | | | | | |

Рисунок 2.4 - Морфологическая карта для создания способов ковки поковок типа труб протяжкой

мента, комбинированное вертикально-продольное и вертикально-поперечное.

Деформирование может осуществляться с паузами и непрерывно. Температурное поле и состояние заготовки также имеет ряд вариантов. Прежде всего, однородное температурное поле с температурой выше и ниже температуры рекристаллизации. Температурное поле может быть неравномерное симметричное в поперечном сечении заготовки. Пользуясь таблицей, и совмещая друг с другом различные решения, возможно также создать несколько тысяч способов раскатки колец. Исследованию нужно подвергнуть только часть из данных способов наиболее перспективных, по мнению исследователя (эксперта).

Заготовки для раскатки колец и протяжки труб получают ковкой с применением операции прошивки. На основании проведенного обзора процессов ковки создана морфологическая карта для процессов прошивки заготовки. По каждому из факторов выделенному ранее приведен ряд частных решений (рис. 2.5).

Прошивка производится прошивнем, который по своей конструкции может быть полым и сплошным, кроме того он может быть и цилиндрическим, и коническим. Прошивка производится на плите, которая также может иметь различную форму. Прошивка может производиться на плоской плите на плите с отверстием, также прошивку можно осуществлять в контейнере. Заготовка под прошивку может быть круглого или многогранного поперечного сечения, продольное сечение может быть конусное, с вогнутыми и выпуклыми боковыми гранями. Процесс прошивки осуществляется вертикальным движением прошивня. Движение инструмента может быть и более сложное, например движение дополнительно нижнего инструмента или вращательное движение одного из инструментов. Заготовка может быть нагрета равномерно либо иметь неравномерное температурное поле. Неравномерное температурное поле может быть симметричное в виде «холодной» оболочки горячей сердцевины или наоборот. Также у заготовки могут быть подсужены торцы либо один из них.

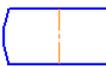
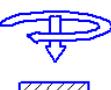
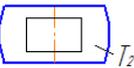
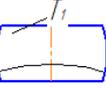
| Прошивка заготовки | | | | | |
|--------------------|---------------------------------|---|--|---|---|
| А | Форма прошивня |  |  |  | |
| Б | Форма плиты |  |  |  |  |
| В | Форма заготовки продольная |  |  |  | |
| Г | Форма заготовки поперечная |  |  | | |
| Д | Кинематика движения инструмента |  |  |  | |
| Е | Механический режим | С паузой | Без паузы | | |
| Ж | Температурное поле |  |  |  |  |

Рисунок 2.5 - Морфологическая карта для создания способов прошивки заготовок

Сочетание всех этих частных решений выражается в создании большого числа способов прошивки.

Таким образом получено большое количество новых ранее неизвестных способов ковки, которые нуждаются в исследовании.

2.2 Разработка классификации процессов ковки крупных поковок и выбор направлений научных исследований

Как отмечалось ранее количество способов ковки поковок типа валов, плит, колец и труб, полученных на основании метода морфологических карт, достигает нескольких тысяч, однако многие из них априори не могут быть реализованы. Для упорядоченности всех этих способов, определения новых потенциально перспективных способов необходимо составить общую классификацию. Классификация позволит упорядочить все способы, отбросить сложно реализуемые и наметить пути развития знаний в области ковки.

Классификацию процессов ковки будем вести на основе факторов выделенных ранее в первом разделе диссертационной работы.

На основании проведенного информационного обзора для морфологических карт факторы [219-221] были разбиты еще подробнее. Так, например форма инструмента для ковки валов и плит имеет две характеристики: продольную и поперечную форму. Аналогично и для формы заготовки. Выполним классификации для различных процессов: протяжки валов (плит), осадке дисков, раскатке колец, протяжке труб и прошивке заготовок.

Процессы протяжки слитков бойками (рис. 2.6). На первом уровне классификации будут находиться характеристики заготовки. Для компактного представления классификации будем шифровать все характеристики процессов согласно морфологических карт. На основе предыдущих исследований установлено, что поперечное сечение заготовки может быть круглым (Г1), квадратным (Г2), прямоугольным (слябовая заготовка Г3), иметь трехлучевую (Г4) и многогранную (Г5) форму. Каждая из этих заготовок может иметь как цилиндрическую (В1), подготовленную заранее, так и кониче-

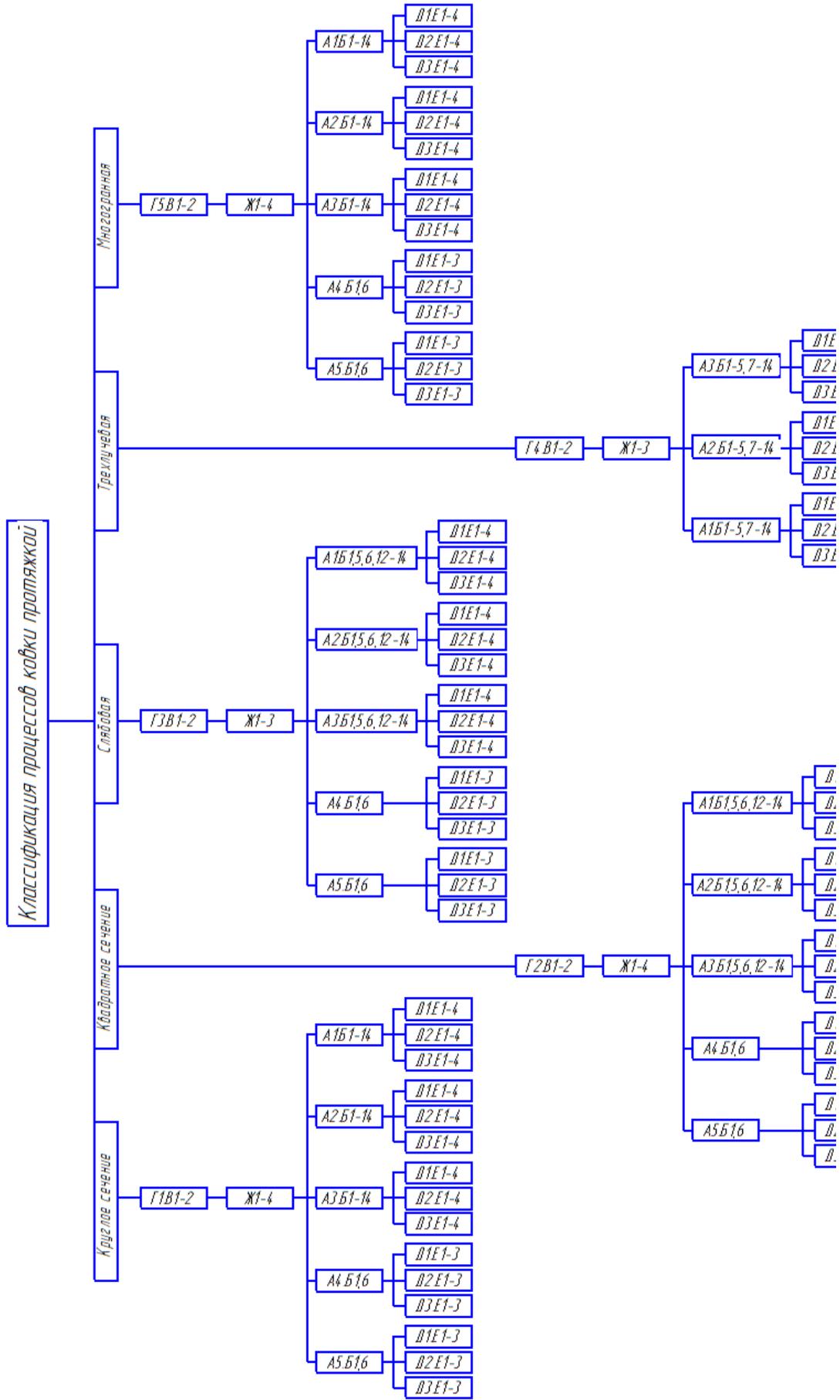


Рисунок 2.6 - Классификация процессов ковки поковок протяжкой

скую (В2) форму.

На следующем уровне располагается такая характеристика заготовки, как температурное поле. Для заготовок, которые имеют цилиндрическую, квадратную многогранную форму температурное поле может быть однородным с температурной заготовки ниже температуры рекристаллизации (Ж1), однородным с температурной выше температуры рекристаллизации (Ж2), неравномерным симметрично (Ж3) и несимметрично (Ж4). Ковка заготовок слябовой и трехлучевой формы с несимметричным температурным полем представляется бессмысленным. Поэтому для заготовок Г3.В1-2 и Г4.В1-2 представляются возможными поля Ж1-3.

На следующем уровне классификации располагается форма инструмента продольная (А) и поперечная (Б). Заготовки описанные выше могут быть откованы бойками со следующей формой продольного сечения: плоское сечение (А1), бойки с фасками (А2), с вогнутым радиусом (А3), ступенчатым симметричным сечением (А4) и несимметричным сечением (А5). Форм разновидностей поперечного сечения бойков гораздо больше.

Это плоские (Б1), комбинированные (Б2), вырезные (Б3), радиусные (Б4), выпуклые клиновые (Б5), ступенчатые (Б6), нижний плоский верхний косой (Б7), нижний вырезной верхний косой (Б8), верхний и нижний косые разнонаправленные (Б9), вырезные несимметричные (Б10), радиусные несимметричные (Б11), выпуклые радиусные (Б12), выпуклые клиновые несимметричные (Б13), выпуклые радиусные несимметричные (Б14). Не все формы поперечного сечения бойков представляется возможным сочетать с любой продольной формой. Так например для заготовок круглой цилиндрической и конической формы (Г1.В1-2) и заготовок с многогранным поперечным сечением (Г5.В1-2) плоские бойки (А1), бойки с фаской (А2) и вогнутым радиусом (А3) могут сочетаться с любой формой поперечного сечения (Б1-14). Бойки, имеющие ступенчатую форму продольного сечения А4 и А5, представляются сочетанию для данной заготовки только лишь с поперечными сечениями Б1 и Б6. Сочетание же их с остальными бойками, например вы-

резными, видится абсолютно бессмысленным и практически не реализуемым.

Для заготовок, имеющих форму поперечного сечения в виде квадрата (Г2.В1-2) и прямоугольника (Г3.В1-2), форма бойков А1-3 может сочетаться с плоской формой поперечного сечения (Б1), выпуклой клиновой формой (Б5), ступенчатой (Б6) и выпуклой радиусной (Б12), несимметричной клиновой (Б13) и несимметричной радиусной (Б14) формой.

Трехлучевую заготовку представляется возможным ковать бойками плоскими (А1), с фаской (А2) и с вогнутым радиусом (А3). При этом форма поперечного сечения бойков не может быть только лишь ступенчатой, т.е. возможны варианты Б1-5, Б7-14.

На следующем уровне находится кинематика движения инструмента. Для всех вариантов бойков и заготовок возможны вертикальное движение бойков (Д1), вертикально-поперечное (Д2) и вертикально-продольное (Д3).

На рис. 2.6 приведена классификация процессов протяжки валов и плит в зашифрованном виде. Для примера на рис. 2.7 приведена подробная (расшифрованная) часть общей классификации.

Коническая заготовка круглого сечения Г1.В1 с однородным температурным полем и температурой выше температуры рекристаллизации (Ж2) может быть откована ступенчатыми в продольном сечении бойками (А4) и плоскими в поперечном (Б1). Ковка может вестись с вертикальным перемещением верхнего бойка (Д1) без пауз (Е2). Формула этого способа выглядит следующим образом Г1.В1.Ж2.А4.Б1.Д1.Е2.

В качестве направления исследований подберем несколько схем ковки поковок типа валов и плит протяжкой.

Основная масса заготовок под ковку протяжкой имеет круглое поперечное сечение Г1, в продольном сечении такие заготовки имеют цилиндрическую форму В1. Наиболее просто в ковке при нагреве заготовки обеспечивать температурное поле, максимально приближенное к однородному (без значительных перепадов температур по сечению) Ж1. Наиболее часто ис-

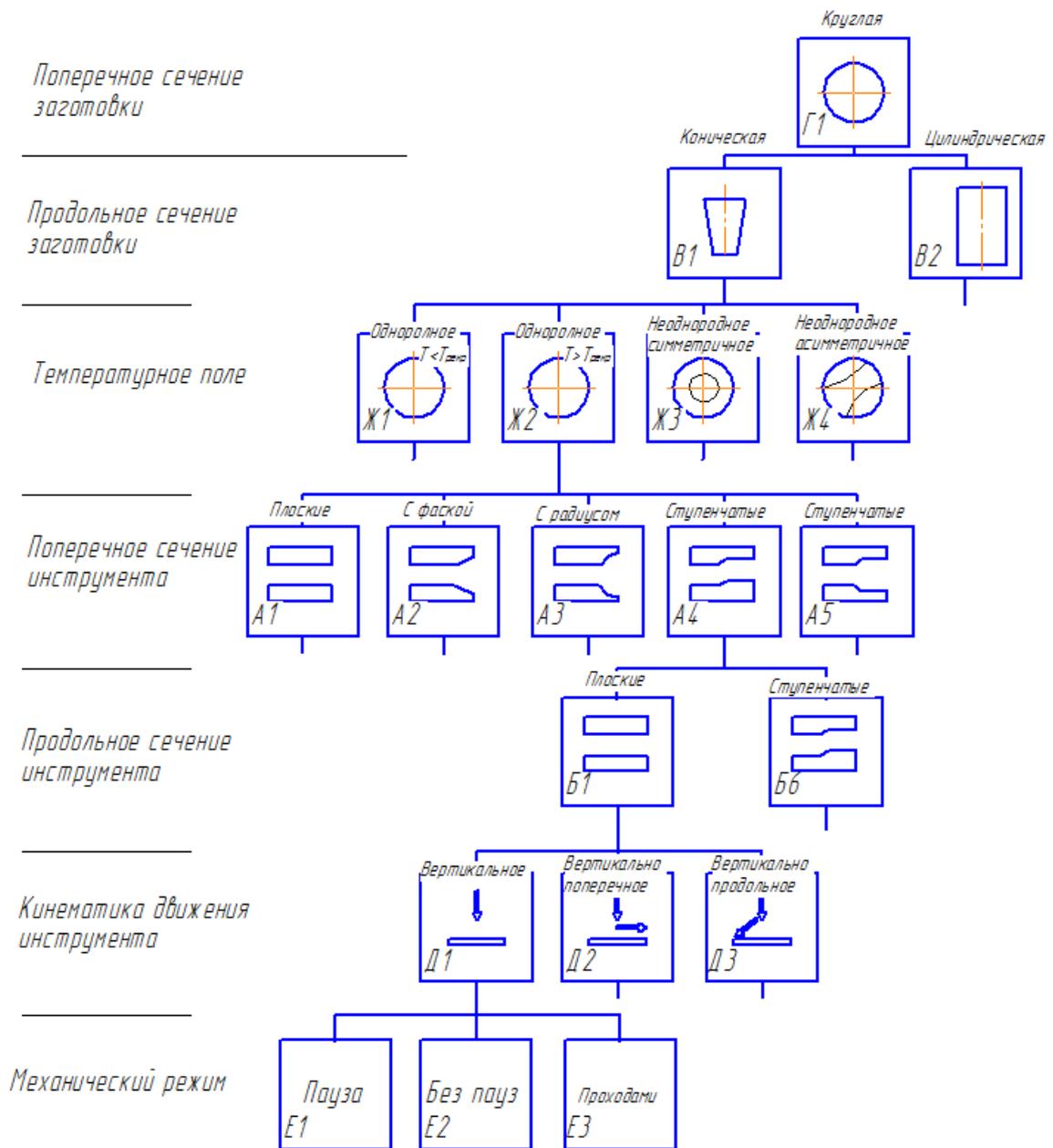


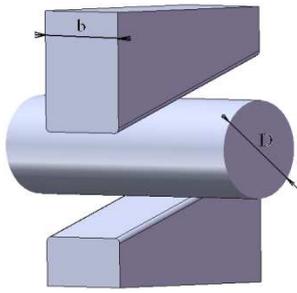
Рисунок 2.7 - Расшифрованная часть классификации процессовковки протяжкой

пользуемые бойки имеют плоское продольное сечение А1. Как показал анализ схем ковки, проведенный в разделе 1, инструмент, обладающий ассиметричной формой, обеспечивает макросдвиговые деформации в заготовке, что позволяет повышать качество литого металла. В качестве такого инструмента возьмем косые бойки с формой поперечного сечения Б9. Механический режим будем реализовывать по традиционной схеме Д1Е2. Таким образом, формула схемы ковки будет выглядеть как Г1В1Ж1А1Б9Д1Е2. Также интерес для исследований будут составлять и другие схемы ковки протяжкой основанные на использовании специального инструмента: Г1В1Ж1А1Б8Д1Е2 – косые комбинированные бойки, Г1В1Ж1А1Б10Д1Е2 – косые вырезные бойки, Г1В1Ж1А1Б6Д1Е2 – ступенчатые бойки. Данные типы бойков обеспечат сдвиговые деформации в заготовке при ковке. Кроме того для ковки ступенчатыми бойками возможно применение заготовки с прямоугольным поперечным сечением Г3В1Ж1А1Б6Д1Е2.

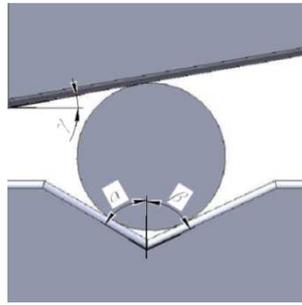
Для расширения области знаний о влиянии температурного поля на НДС заготовки в процессах протяжки также большой интерес представляют схемы ковки заготовок с неравномерным температурным полем: Г1В1Ж3А1Б1Д1Е2 – ковка плоскими бойками заготовки с симметричным неравномерным полем, Г1В1Ж3А1Б2Д1Е2 – ковка комбинированными бойками заготовки с неравномерным симметричным температурным полем, Г1В1Ж4А1Б1Д1Е2 – ковка плоскими бойками заготовки с несимметричным неравномерным температурным полем.

Кроме того, без внимания нельзя оставлять и известные способы ковки, хорошо зарекомендовавшие себя, но мало применяемые из-за недостатка информации о закономерностях НДС заготовки. К таким способам относится протяжка плоскими бойками со скосами плоской заготовки Г3В1Ж1А2Б1Д1Е2. Предлагаемые способы ковки приведены на рис. 2.8.

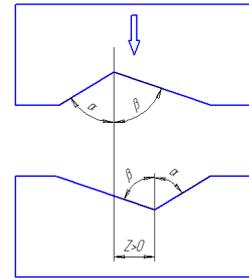
Процессы ковки слитков осадкой (рис. 2.9). Для осадки могут использоваться заготовки круглого поперечного сечения (Г1), квадратного (Г2), полые заготовки (Г3), заготовки трехлучевой (Г4) и многогранной (Г5) формы.



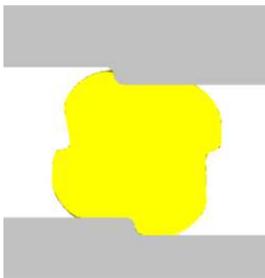
Г1В1Ж1А1Б9Д1Е2



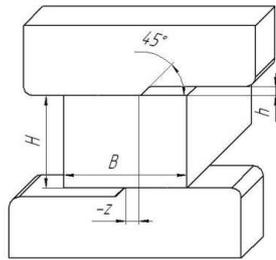
Г1В1Ж1А1Б8Д1Е2



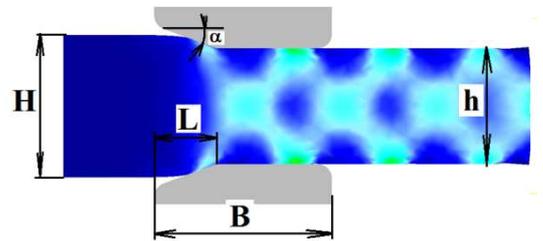
Г1В1Ж1А1Б10Д1Е2



Г1В1Ж1А1Б6Д1Е2



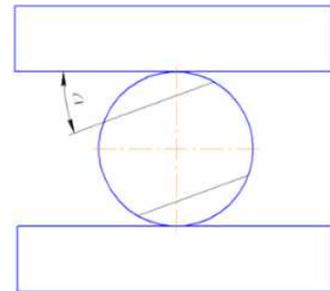
Г3В1Ж1А1Б6Д1Е2



Г3В1Ж1А2Б1Д1Е2

Г1В1Ж3А1Б1Д1Е2

Г1В1Ж3А1Б2Д1Е2



Г1В1Ж4А1Б1Д1Е2

Рисунок 2.8 - Схемы ковки поковок типа валов и плит полученные на основе морфологического анализа

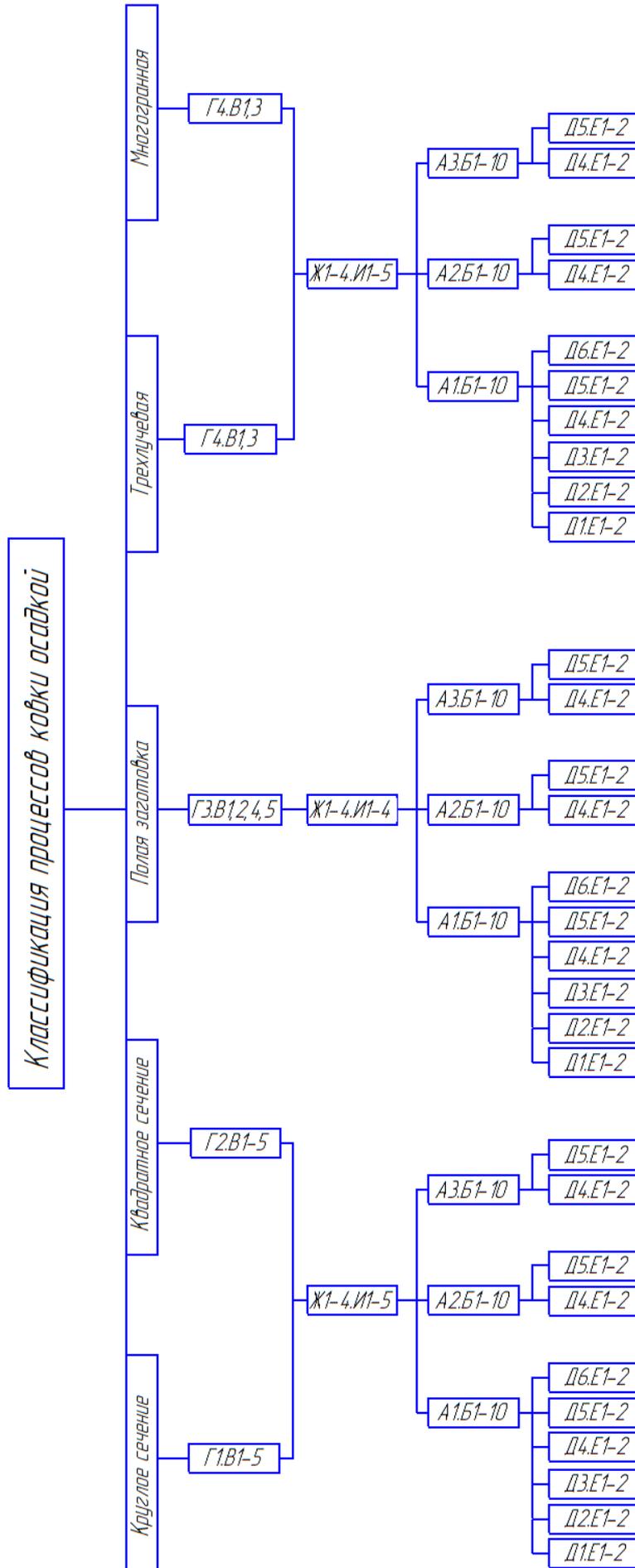


Рисунок 2.9 – Классификация процессов ковки поковок осадкой

При этом круглые (Г1), квадратные (Г2) и полые (Г3) заготовки могут быть в продольном сечении прямоугольными (В1), с вогнутой боковой поверхностью (В2), коническими (В3), с выпуклой боковой поверхностью (В4), и иметь профилированную форму (В5). Заготовки с более сложной поперечной формой, например трехлучевая (Г4) и многогранная (Г5), могут иметь коническую и цилиндрическую форму.

Заготовки с круглым, квадратным, трехлучевым и многогранным поперечным сечением, а также полые заготовки могут иметь однородное температурное поле с температурой выше температуры рекристаллизации (Ж1), ниже температуры рекристаллизации (Ж2), неравномерное симметричное (Ж3) и неравномерное несимметричное поле (Ж4) в поперечном сечении. Что же касается продольного сечения заготовки, то температурное поле может быть следующим. Для заготовок Г1,2,4,5 продольное температурное поле может быть также однородным (И1), неравномерным с различными температурами на торцах и в середине заготовки (И2), неравномерным несимметричным полем (И3), неравномерным симметричным в виде оболочки (И4) и неравномерным дискретным (И5). Полая заготовка в продольном сечении не может иметь форму И5 из-за особенностей ее геометрии.

Для деформирования заготовки может использоваться инструмент с такой формой продольного сечения: плоские плиты (А1), нижняя плоская плита верхний узкий боек (А2), верхний и нижний плоские бойки (А3). Поперечное сечение инструмента может быть следующим: гладкие плоские плиты (Б1), полый верхний и нижний инструмент (Б2), верхний полый, нижний плоский (Б3), верхний и нижний вогнутый инструмент (Б4), верхний и нижний выпуклый (Б5), верхний и нижний полый инструмент, верхний скошенный (Б6), нижний плоский верхний выпуклый (Б7), верхний и нижний ступенчатые (Б8), верхний выпуклый клиновой нижний вогнутый клиновой (Б9), верхний выпуклый радиусный нижний вогнутый радиусный (Б10). Сочетание всех форм продольного и поперечного сечения инструмента возможно.

Кинематика движения инструмента существенно зависит от его формы. Так, например, для инструмента в виде плит (А1) различной конфигурации (Б1-10) возможно применение разнообразной кинематики движения: вертикальное перемещение верхнего инструмента (Д1), вертикально поперечное движение верхнего инструмента (Д2), встречное движение верхнего и нижнего инструмента (Д3), вертикальное движение с вращением (Д4), встречное движение с вращением (Д5) и вертикальное движение верхнего инструмента с поперечным движением нижнего (Д6).

Для инструмента с верхним узким бойком (А2) и нижним узким бойком (А3) существуют некоторые ограничения. Здесь реалистичным видится только цикличное перемещение верхнего узкого бойка в вертикальном направлении с постоянным поворотом на определенный угол (Д4) и такое же, только встречное, движение (Д5). Для всех выше перечисленных схем деформирование возможно проводить с паузами (Е1) и без них (Е2).

Более подробная часть классификации приведена на рис. 2.10. Заготовка для осадки может иметь круглое поперечное сечение (Г1) и профилированную продольную форму (В5) с неравномерным температурным полем (ЖЗИ4). Верхний и нижний инструмент в виде плоских осадочных плит (А1Б1). Движение инструмента может быть вертикальным без пауз (Д1Е2).

Для дальнейших исследований процессов ковки осадкой воспользовавшись классификацией, выберем наиболее перспективные схемы деформирования.

Для получения специальных изделий, к которым можно отнести эксцентрики, необходимо использовать либо специальный инструмент, либо специальный режим ковки. Чтобы получать изделия типа эксцентриков, одним из приемов может быть управление течением металла заготовки за счет специальной формы инструмента. Используя обычную цилиндрическую заготовку Г1В1 с однородным температурным полем Ж1И1, необходимо использовать осадочные плиты А1, причем одна из них должны иметь несимметричный скос Б6. Деформирование будет осуществляться по обычному

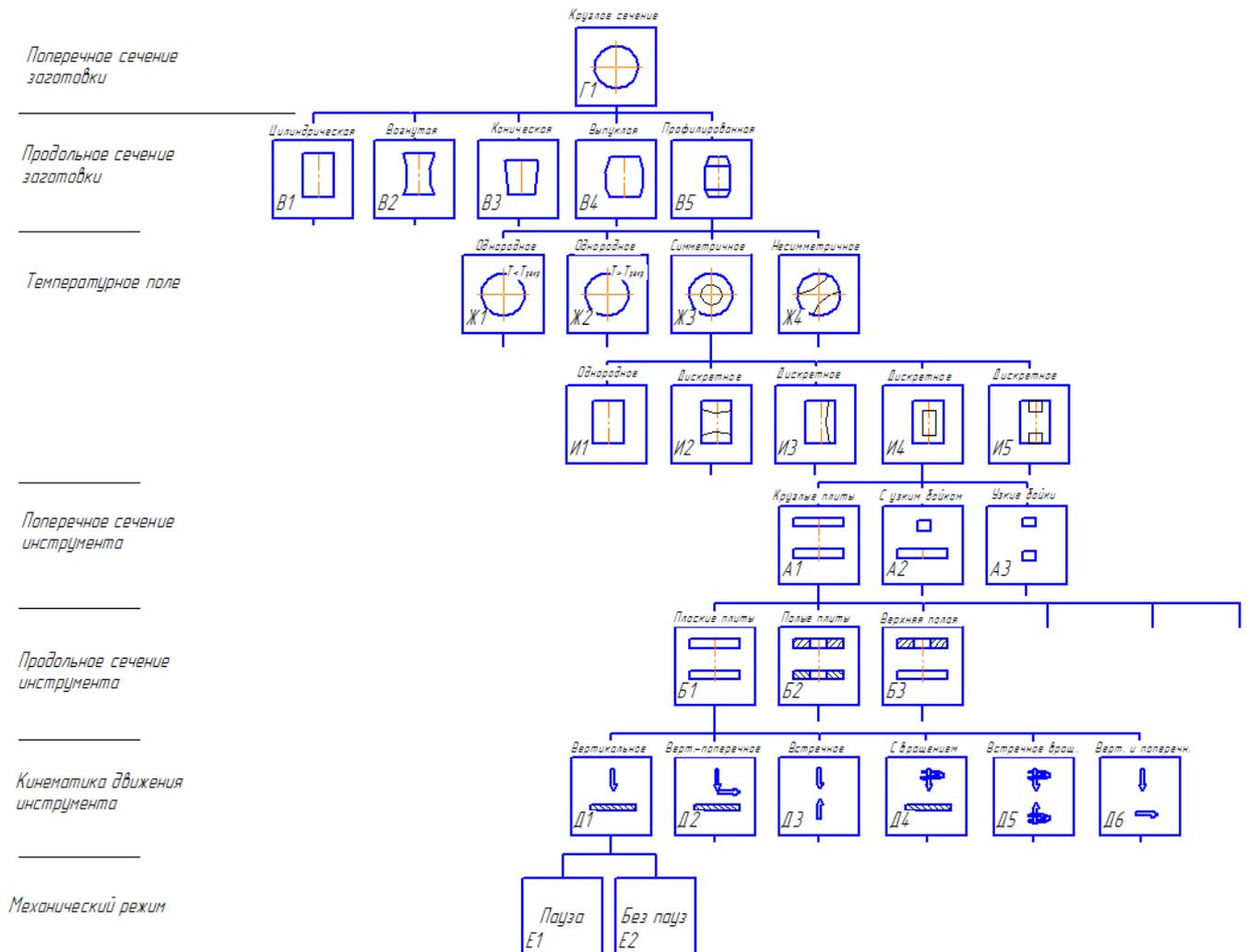


Рисунок 2.10 - Расшифрованная часть классификации процессовковки осадкой

режиму Д1Е2. В целом формула процесса будет выглядеть как Г1В1Ж1И1А2Б6Д1Е2.

Основной проблемой традиционного процесса осадки заготовки является неравномерное распределение деформаций по сечению заготовки, которое выливается в низкую точность и качество изделия. Для устранения данных недостатков попробуем воспользоваться специальной заготовкой, режимом деформирования и специальным инструментом. Такими способами могут быть: Г1В5Ж1И1А1Б1Д1Е2 – осадка плоскими плитами заготовки профилированной формы с однородным температурным полем, Г1В1Ж1И1А2Б1Д4Е2 – осадка цилиндрической заготовки с однородным температурным полем разгонкой узким бойком, Г1В1Ж1И1А1Б9Д1Е2 – осадка выпукло вогнутыми коническими плитами. Для осадки особо крупных заготовок применяют осадку протяжкой заготовки в торец. Не смотря на то, что способ известен, информации по его реализации в виде механических режимов ковки практически нет. Данный способ имеет код Г1В1Ж1И1А2Б1Д2Е2 и заслуживает определенного внимания.

С целью расширения информации о влиянии температурного поля заготовки на НДС следует также обратить внимание на такие способы как: Г1В1Ж3И4А1Б1Д1Е2 – осадка заготовки с неравномерным симметричным температурным полем плоскими плитами, Г1В1Ж1И2А1Б1Д1Е2 – осадка цилиндрической заготовки с охлажденными/нагретыми торцами плоскими плитами.

Кроме того осадка, применяется как заготовительная операция перед прошивкой для ковки поковок типа колец и труб. Часто для поковок таких типов применяют бесприбыльные слитки Г1В3, основным недостатком которых является наличие усадочной раковины в теле слитка и некачественного металла. Новые способы, позволяющие повысить качество таких поковок на стадии осадки, достойны особого внимания. К таким способам можно отнести осадку бесприбыльного слитка полой плитой Г1В3Ж1И1А1Б3Д1Е2. Предлагаемые способы приведены на рис. 2.11.

Классификация процессов раскатки колец на прессах (рис. 2.12). На верхнем уровне классификации расположена поперечная форма заготовки. Заготовка для раскатки на оправке может иметь гладкую круглую форму (Г1), форму с профилированным отверстием (Г2) и форму кольца с эксцентрично расположенным отверстием (Г3). В продольном сечении эти заготовки могут быть цилиндрическими (В1), коническими (В2) и ступенчатыми (В3).

Заготовки могут быть с однородным температурным полем и температурой выше температуры рекристаллизации (Ж1), ниже температуры рекристаллизации (Ж2) и с неравномерным температурным полем (Ж3).

Инструмент для раскатки может иметь такую форму продольного сечения: гладкий дорн и верхний плоский боек (А1), гладкий дорн и верхний вогнутый радиусный боек (А2), гладкий дорн и верхний вогнутый боек (А3), гладкий дорн и верхний выпуклый боек (А4), гладкий дорн и верхний косой боек (А5), ступенчатый дорн и верхний плоский боек (А6), вырезной дорн и верхний плоский боек (А7), гладкий дорн и верхний ступенчатый боек (А8). Формы поперечного сечения могут сочетаться не со всеми формами продольного сечения. Так формы А1, А5, А6, А7, А8 сочетаются с формами: верхний плоский боек (Б1), верхний вырезной боек (Б2), верхний выпуклый боек (Б3), верхний радиусный боек (Б4), верхний косой боек (Б5), верхний радиусный боек дорн с различными радиусами (Б6), верхний боек вырезной дорн профилированный (Б7).

Форма инструмента А2 и А3 может сочетаться только с формами Б1, Б2, Б4, Б6 и Б7. В случае верхнего выпуклого бойка (А4) сочетание может быть только с формами Б1 и Б7.

Для всего вышперечисленного инструмента возможны такие варианты кинематики движения: вертикальное перемещение бойка (Д1) и вертикально-поперечное перемещение бойка (Д2) при этом обжатие может происходить как с паузами так и без пауз (Е1, Е2).

На рис. 2.13 приведена расшифрованная часть схемы классификации.

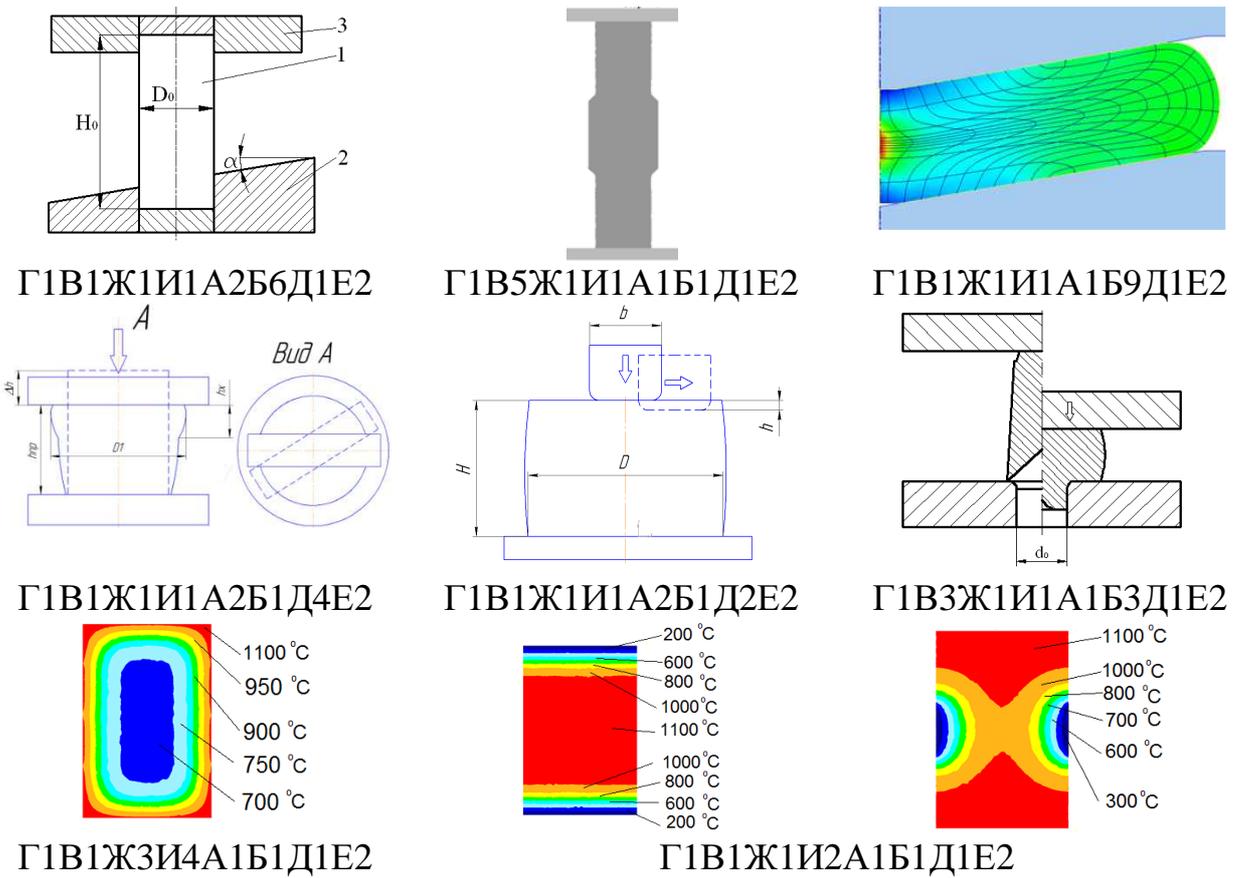


Рисунок 2.11 - Схемыковки слитков осадкой полученные на основе морфологического анализа

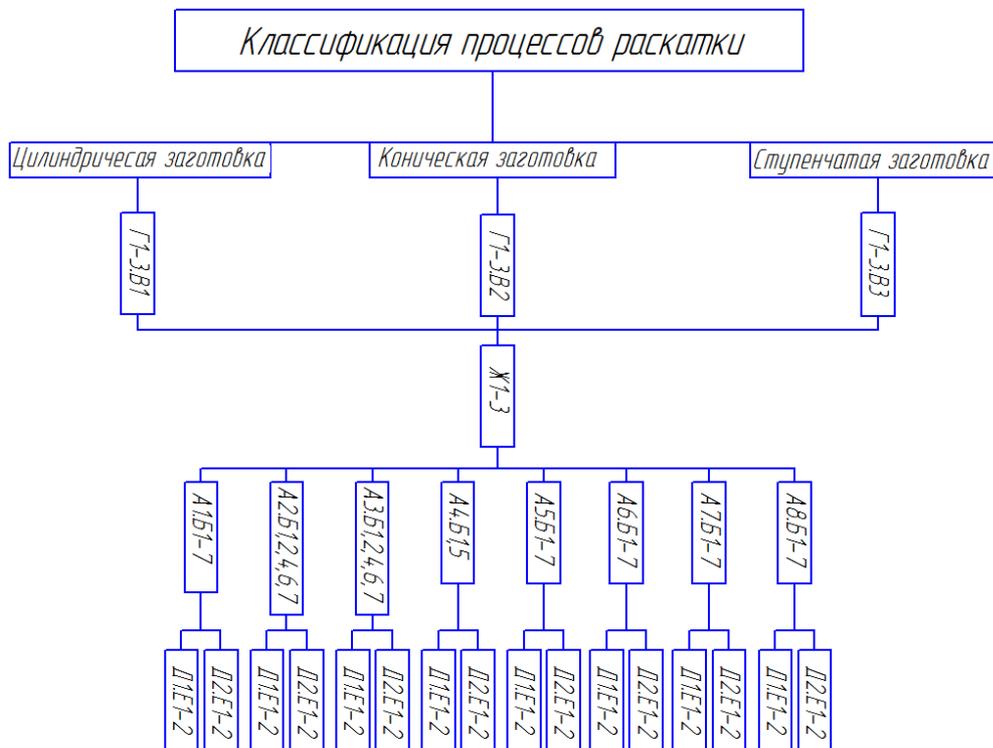


Рисунок 2.12 - Классификация процессовковки полых поковок раскаткой на дорне

Ступенчатая цилиндрическая заготовка (Г1В3) с однородным температурным полем и температурой выше температуры рекристаллизации (Ж2) раскатывается плоским бойком на гладком дорне (А1Б1). Деформирование происходит вертикальным перемещением верхнего бойка без пауз (Д1Е2). Общая формула схемы Г1В3Ж2А1Б1Д1Е2.

Достаточно большой проблемой является получение сложно профилированных полых изделий, таких как конические кольца. Получать такие изделия возможно как с применением специального инструмента, так и специальной заготовки. Второй вариант для практического применения является более приемлемым. Используя традиционный инструмент, возможно, получать сложную форму поковки, применив заготовку ступенчатой формы В3. Способом, позволяющим получать конические кольца, является Г1В3А1Б1Д1Е2Ж1 – раскатка ступенчатой заготовки. Несмотря на то, что данный способ является известным, методика проектирования, закономерности развития НДС в заготовке остаются неизвестными, поэтому исследования в данном направлении позволят расширить область знаний ковки поковок колец и усовершенствовать его.

Влияние температурного поля на НДС заготовки в процессах раскатки является малоизученным, в литературе практически отсутствуют данные о нем. Поэтому исследование такого способа является весьма актуальным. К подобной схеме деформирования можно отнести Г1В1А1Б1Д1Е2Ж3.

Классификация процессов ковки труб протяжкой на оправке (рис. 2.14). Заготовка для протяжки на оправке может иметь круглое осесимметричное поперечное сечение (Г1) и круглое сечение с отверстием с эксцентриситетом (Г2). В продольном направлении заготовка может быть гладкая со сквозным отверстием (В1), с глухим отверстием (В2), со сквозным отверстием и наружной ступенчатой поверхностью (В3).

Заготовки могут обладать тремя видами температурного поля: однородное поле с температурой выше температуры рекристаллизации (Ж1), с температурой ниже температуры рекристаллизации (Ж2) и неравномерное

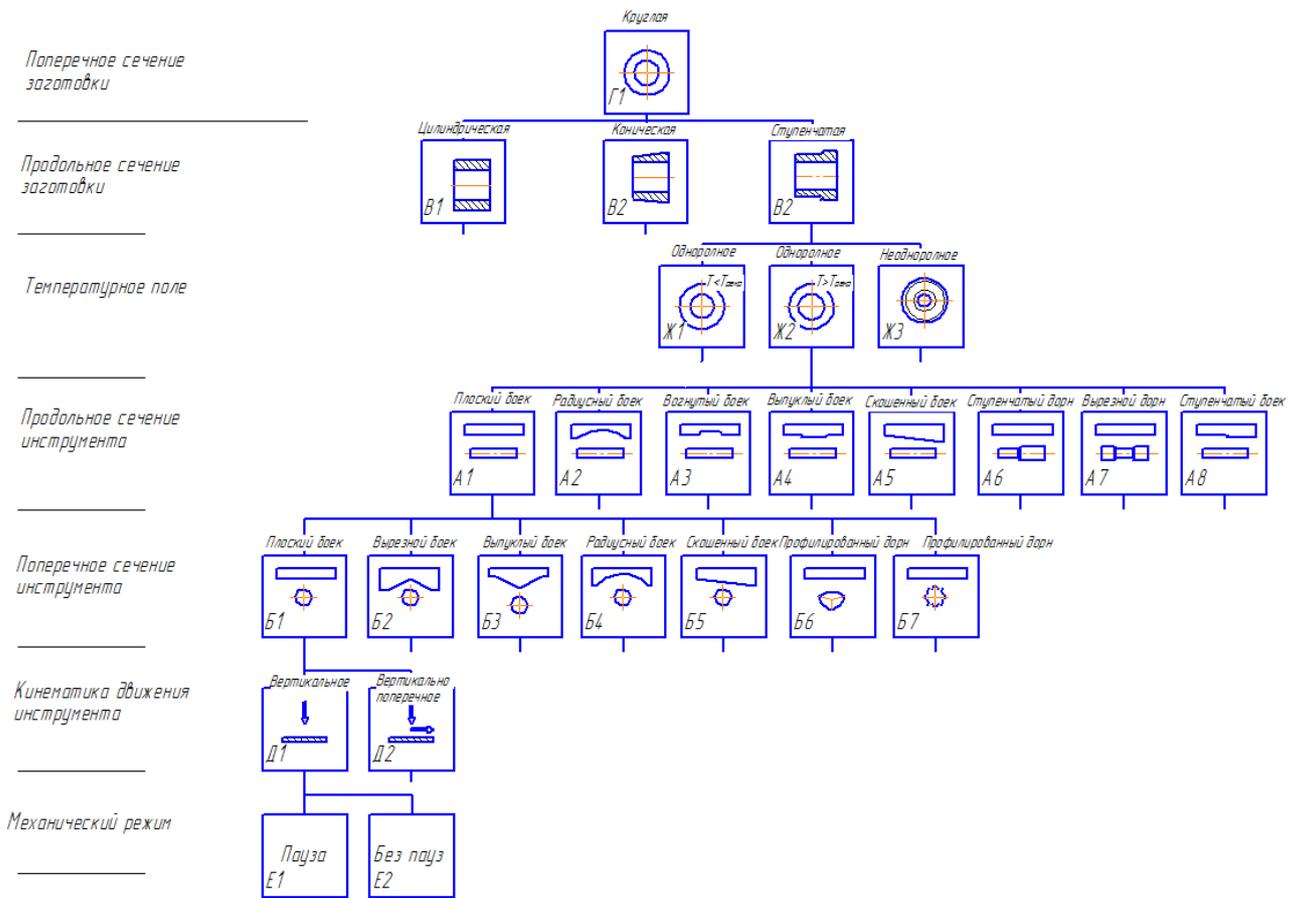


Рисунок 2.13 - Расшифрованная часть классификации процессовковки поковок типа колец

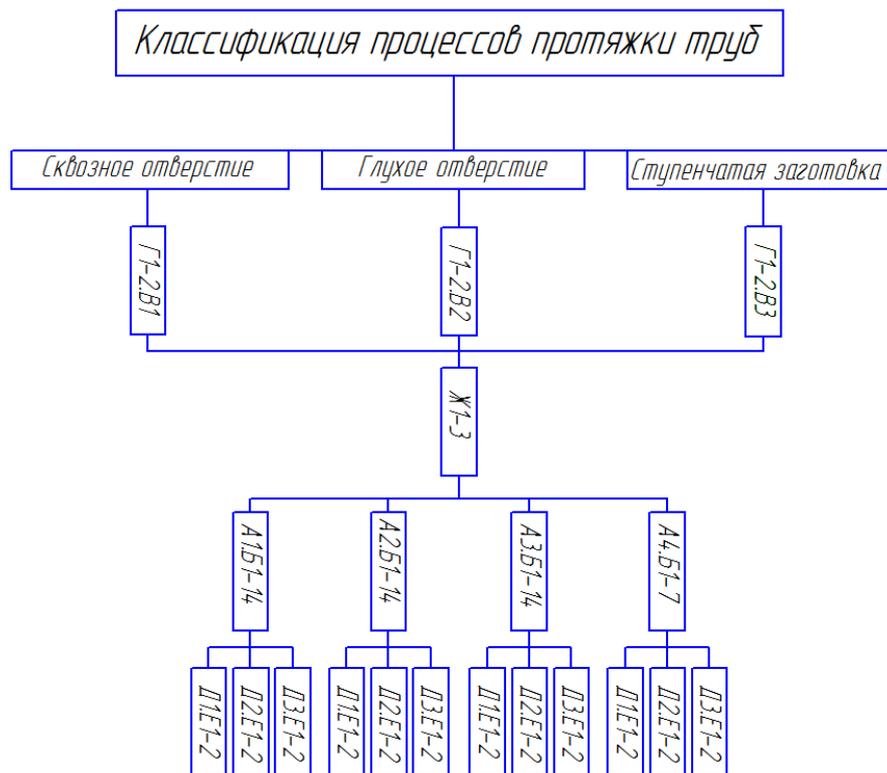


Рисунок 2.14 - Классификация процессовковки труб протяжкой

осесимметричное поле (Ж3).

Продольная форма инструмента: плоские бойки с конической оправкой (А1), бойки с фасками и конической оправкой (А2), бойки с вогнутой радиусной кромкой (А3), плоские бойки и ступенчатая оправка (А4). Инструмент первых трех типов сочетается с бойками комбинированными (Б1), вырезными (Б2), радиусными (Б3), нижним вырезным и верхним выпуклым (Б4), верхним скошенным (Б5), ассиметричными вырезными (Б6), ассиметричными радиусными (Б7). Кроме того, возможна безоправочная ковка труб такими же бойками (Б8-14). Использование инструмента со специально оправкой естественно возможно в сочетании с формой продольного сечения Б1-7. Кинематика движения инструмента для все типов бойков возможна по следующим схемам: вертикально перемещение верхнего бойка (Д1), вертикально-поперечное движение верхнего бойка (Д2), вертикально-продольное движение (Д3). Деформирование может происходить проходами (Е1) и кругами (Е2).

Более подробная часть классификации приведена на рис. 2.15. Заготовка с гладкой наружной поверхностью (Г1В1) с однородным температурным полем и температурой выше температуры рекристаллизации (Ж1), деформируется комбинированными бойками (А1Б1). Деформирование происходит вертикальным перемещением верхнего бойка проходами (Д1Е1). Общая формула процесса Г1В1Ж1А1Б1Д1Е1.

Основной проблемой процессов ковки труб является металлоемкость процесса и стойкость инструмента. Металлоемкость поковки, полученной протяжкой на оправке, возможно, снизить за счет использования малоприбыльного или бесприбыльного слитка, при этом, не удаляя перед протяжкой дефектную часть слитка. В процессе протяжки, перераспределив данную часть металла вдоль оправки заготовки (загнав в припуск), возможно увеличить коэффициент выхода годного. Однако для этого необходимо подобрать режим протяжки заготовки на оправке. В свете выше сказанного актуальным является исследование процесса протяжки заготовки традиционным инстру-

ментом. Код такого процесса выглядит как Г1В1Ж1Б1А1Д1Е2.

С целью уменьшения расходов цеха, связанных с низкой стойкостью оправок, предложено использовать оправку специальной конструкции (составную). Данная оправка будет иметь узкую рабочую часть со сменными втулками, позволяющими ковать поковки различных размеров. Оправка в этом случае будет иметь ступенчатую форму, код процесса Г1В1Ж1Б1А4Д1Е2.

Классификация процессов прошивки заготовок (рис. 2.16). Исходная заготовка для прошивки может иметь круглое поперечное сечение (Г1), квадратное (Г2) и сложное многогранное (Г3). В продольном сечении заготовка может быть с выпуклыми или прямыми гранями (В1), конической (В2) и с вогнутыми гранями (В3).

Температурное поле заготовки может быть четырех видов: однородное поле (Ж1), неравномерное симметричное в виде оболочки (Ж2), неравномерное несимметричное с охлажденным торцом (Ж3) и неравномерное с двумя охлажденными торцами (Ж4).

Прошивку можно производить цилиндрическим (А1), коническим (А2) и полым прошивнем (А3), при этом нижний инструмент может быть в виде плоской плиты (Б1), плоской плиты с отверстием (Б2), в виде контейнера с глухим отверстием (Б3) и контейнера со сквозным отверстием (Б4).

Реализовать можно две кинематики движения инструмента: вертикальное движение прошивня (Д1) и встречное движение (Д2), причем деформирование может происходить как с паузами (Е1) так и без пауз (Е2).

Более подробная классификация приведена на рис. 2.17. Пример классификации способа: круглая заготовка (Г1) с выпуклыми гранями (В1) с однородным температурным полем (Ж1) прошивается цилиндрическим прошивнем (А1) на плоской сплошной плите (Б1). Прошивка вертикальным перемещением прошивня без пауз (Д1Е2). В целом процесс имеет шифр Г1В1Ж1А1Б1Д1Е2. Прошивка в основном применяется как заготовительная операция перед раскаткой колец и протяжкой труб. Однако прошивка также

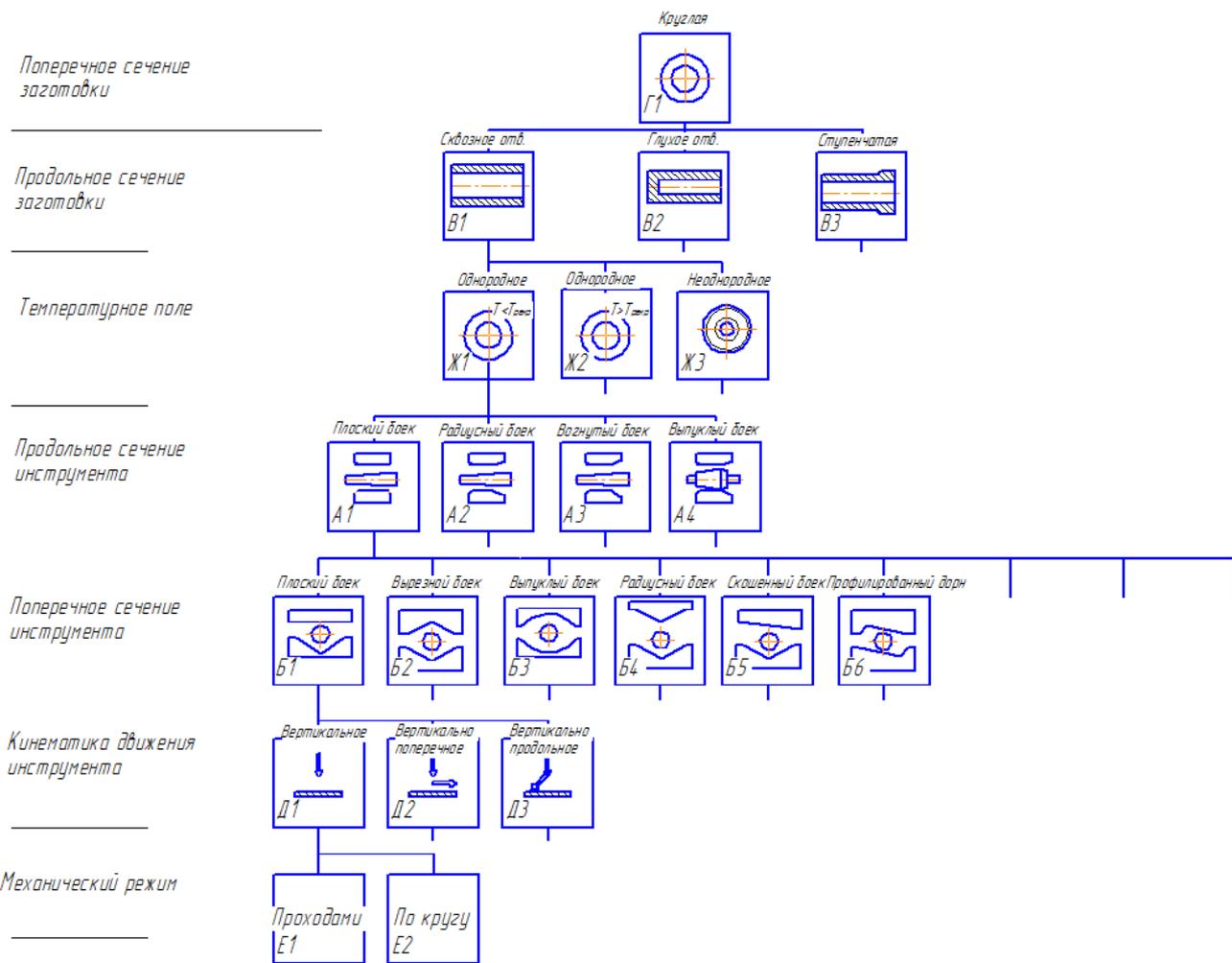


Рисунок 2.15 - Расшифрованная часть классификации процессовковки поковок типа труб



Рисунок 2.16 - Классификация процессов прошивки

может использоваться для получения поковок типа труб. Такой способ называется закрытой прошивкой и имеет обозначение Г1В1Ж1А1Б3Д1Е2.

Влияние температурного поля заготовки на параметры НДС заготовки в процессе прошивки является неопределенным и нуждается в исследовании. Такой схемой может быть Г1В1Ж2А1Б1Д1Е2, Г1В1Ж3А1Б1Д1Е2 и Г1В4Ж1А1Б1Д1Е2.

2.3 Методы исследования процессов ковки крупных поковок

2.3.1 Теоретические методы исследования процессов ковки крупных поковок

Применение метода конечных элементов для исследования процессов ковки. Основанная масса теоретических исследований проведенных в работе выполнена с применением метода конечных элементов. Данный метод обладает широкими возможностями и универсальностью. При решении задачи МКЭ объем заготовки разбивается на множество простых геометрических элементов (плоские и объёмные элементы: прямолинейные и криволинейные, правильные и произвольные треугольники и четырёхугольники, тетраэдры и др.). Элементам в целом и каждому узлу в частности придают определённые степени свободы, а каждый элемент обладает свойствами материала дискретизированной среды. Основные соотношения МКЭ, применительно к процессам ОМД, основаны либо на теории пластического течения, либо на деформационной теории пластичности.

Существует множество специализированных и общеинженерных пакетов конечно-элементного анализа. Для моделирования и исследования процессов ковки крупных поковок будем применять два пакета: QForm 2D/3D (лицензия ДГМА), Deform 3D (временная лицензия предоставленная компанией ТЕСИС). Применение данных программных продуктов обусловлено их широким распространением, высокой точностью и минимальным временем расчета.

Моделирование процессов ковки крупных поковок с помощью МКЭ является реальной альтернативой экспериментальному исследованию и мо-

жет быть весьма эффективной при анализе данной группы процессов и решении поставленных задач. Тем более, что данный метод показал весьма высокую точность в оценке параметров напряженно-деформированного состояния, в том числе и процессов горячего пластического деформирования, о чем свидетельствуют многочисленные работы [222-227]. Однако данный метод все же требует экспериментальной верификации получаемых результатов с целью проверки правильности задания граничных условий при моделировании.

Для проведения моделирования методом конечных элементов в указанных программных продуктах необходимо создание геометрии инструмента и заготовки, для чего использовался пакет КОМПАС V11 (лицензия ДГМА).

При задании граничных условий в виде скоростей движения деформирующего инструмента, механических свойств материала заготовки и условий трения на поверхностях инструмента и заготовки использованы промышленные, лабораторные и справочные данные.

Решение задач методом верхней оценки (МВО). МВО является прикладным методом, т.е. таким который позволяет дать приближенную оценку напряженному состоянию заготовки в процессе пластического деформирования. Основным преимуществом МВО является получение математических моделей в виде математической формулы, дающей множество решений.

Одним из основных допущений МВО является то, что любая задача сводится к плоскому деформированному состоянию. Очаг деформации разбивается на ряд жестких зон треугольной формы. Деформация сводится к перемещению этих зон (элементов) относительно друг друга. Соблюдение кинематических граничных условий проверяется построением годографа скоростей.

Приведенное давление \bar{p} рассчитывается по упрощенной формуле энергетического баланса [228-240]:

$$\bar{p} = \frac{1}{2bV_0} \left[\sum l_{ij} V_{ij} + 2\mu_s \sum l_{ik} V_{ik} \right],$$

где b - длина линии контакта заготовки и активного инструмента (по сечению);

l_{ij} , V_{ij} - длина границы контакта и скорость относительного движения блоков, между которыми происходит срез. Величины l_{ij} , V_{ij} определяются из принятого поля скоростей и соответствующего ему годографа скоростей;

l_{ik} , V_{ik} - длина границы контакта и скорость относительного движения инструмента и заготовки.

Оптимальное число жестких элементов n , дающее минимум верхней оценки интегральной характеристики напряжений непостоянно, зависит от формы и размеров очага деформации.

МВО помимо определения интегральной характеристики поля напряжений в процессе деформирования позволяет также вычислить накопленную степень деформаций сдвига γ_{ij} и проанализировать нарастание степени деформации по ходу течения.

2.3.2 Общая методика теоретического исследования процессовковки

QForm 2D/3D и Deform 3D являются мощными инструментами для моделирования различных процессов пластического деформирования заготовки в горячем и холодном состояниях. Для процессов осесимметричного деформирования применяли QForm 2D/3D для более сложных схемковки Deform 3D, что связано с временем расчета (QForm 2D/3D позволяет выполнять более быстрый расчет).

Важным критерием при ковке крупных поковок является равномерность распределения деформаций в теле заготовки. Неравномерность деформаций оценивалась, как $\Delta e = e_{\max} - e_{\min}$. Общую проработку того или иного сечения заготовки целесообразно определять средневзвешенной величиной деформации. Так например средневзвешенная сдвиговая деформация опре-

деляется как $\langle \gamma_{xy} \rangle = \frac{\sum(|\gamma_{xy_i}| \cdot F_i)}{\sum(F_i)}$, где $|\gamma_{xy_i}|$ - величина сдвиговой деформации i -ой области заготовки по модулю, F_i - площадь области заготовки с величиной сдвиговых деформаций γ_{xy_i} .

Для оценки напряжённого состояния для исследуемых схем деформирования наиболее целесообразно пользоваться показателем жесткости схемы напряженного состояния, который показывает знак преобладающих напряжений в исследуемой зоне $\eta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}$.

2.3.3 Экспериментальные методы исследований процессов ковки крупных поковок

Повышенная точность результатов исследований в процессах ковки крупных поковок является важным аспектом, т.к. от этого зависит достоверность получаемой информации. Экспериментальные исследования должны быть проведены в лабораторных условиях с соблюдением теории и законов подобия. В данной работе проводятся исследования процессов горячего пластического деформирования, которое характеризуется большим количеством и сложностью процессов, протекающих в металле. Такие процессы зависят от размеров, формы, химического состава материала, температурных, скоростных условий, условий окружающей среды и т.д. Чтобы максимально приблизить условия экспериментальных исследований к реальным условиям, необходимо соблюсти основные условия закона подобия [241].

Геометрические условия подобия:

$$\frac{h_n}{h_m} = \frac{b_n}{b_m} = \frac{l_n}{l_m} = n,$$

где $h_n, h_m, b_n, b_m, l_n, l_m$ – геометрические параметры натурального и модельного образцов; n – масштабный коэффициент подобия.

Кинематическое условие подобия [242]:

$$v_{.m} = v_{.n} n ,$$

где $v_{.m}$, $v_{.n}$ – скорость деформирования модели и натурального образца соответственно.

Формоизменение и силовые характеристикиковки. Основным технологическим параметром при проектировании технологииковки крупных поковок является конечное и предельное формоизменение, а также энергосиловые параметры процесса деформирования [243]. При экспериментальном моделированииковки валов, дисков, колец и труб необходимо установить влияние геометрии инструмента, формы исходной заготовки, кинематики движения инструмента и температурного поля на формоизменение при различных условиях деформирования.

В качестве материала для моделирования процессовковки применяют свинец, у которого температура рекристаллизации $\approx 25^{\circ}\text{C}$. Введением в свинец 1...5% сурьмы можно изменять механические характеристики модельного материала в достаточно широких пределах. Моделирование на свинце не противоречит положениям теории подобия, поэтому материалом для исследования был выбран свинец с добавками сурьмы ($\approx 1\%$) [241]. Диаметр заготовок при коэффициенте подобия 1:20 составлял 28, 36, 45 мм. Заготовки получены путём прямого прессования свинцовой отливки через фильеру круглого сечения соответствующего диаметра.

Для проведения эксперимента были спроектированы и изготовлены специальные ковочные бойки с учётом масштабного фактора 1:20. Материал бойков - сталь 45. Их фотографии приведены на рис. 2.18. Для проведения исследований процессовковки дисков и колец использован инструмент стандартной формы (плоские осадочные плиты, плиты с отверстием, цилиндрический дорн для раскатки, плоский боек).

Для проведения экспериментов был использован блок штампа с задним расположением направляющих узлов для обеспечения взаимной параллельности и соосности верхнего и нижнего инструмента при движении подвижной траверсы прессы (см. рис. 2.18). Штмп устанавливается на испытатель-

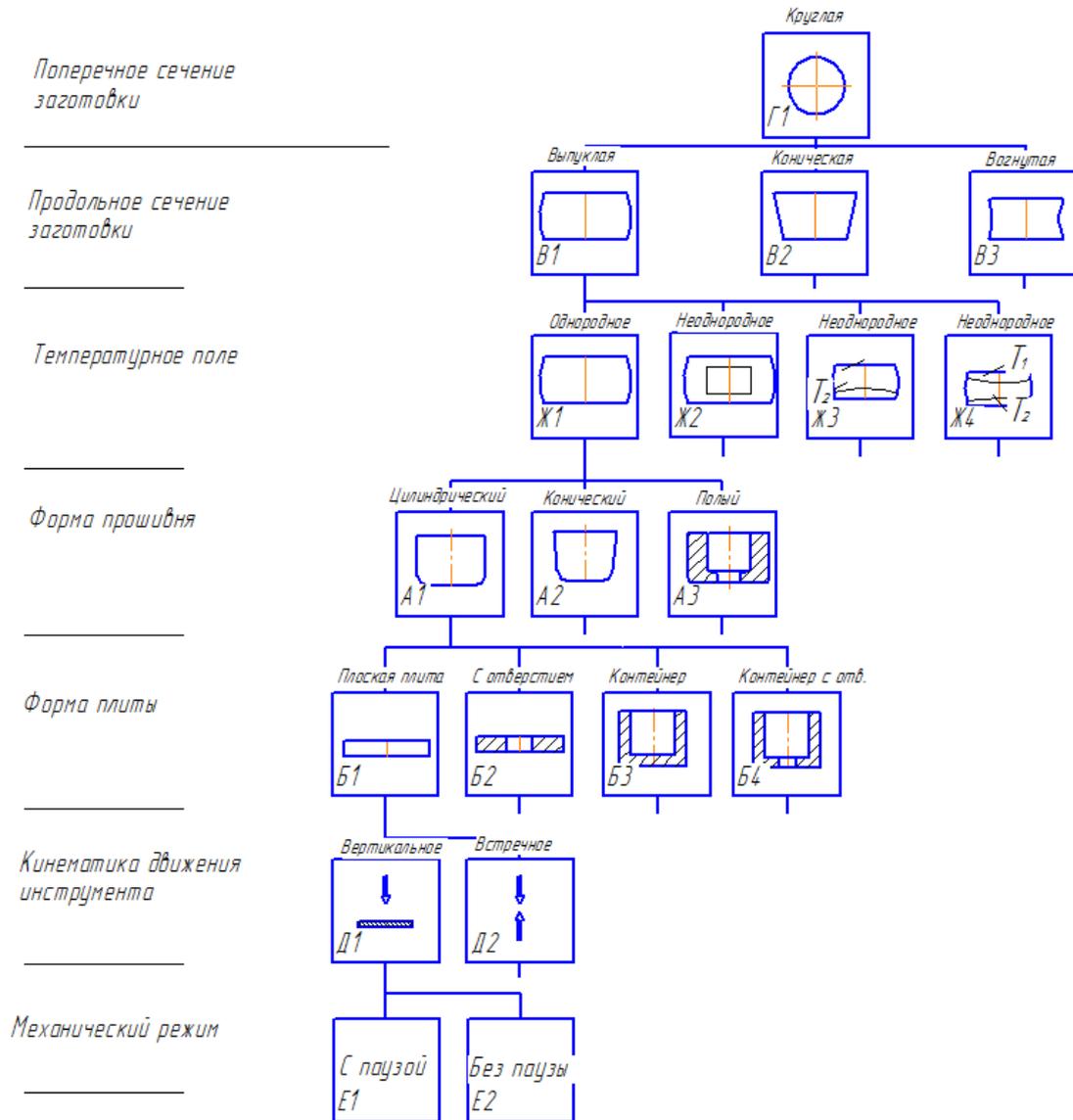


Рисунок 2.17 - Расширенная часть классификации процессов прошивки

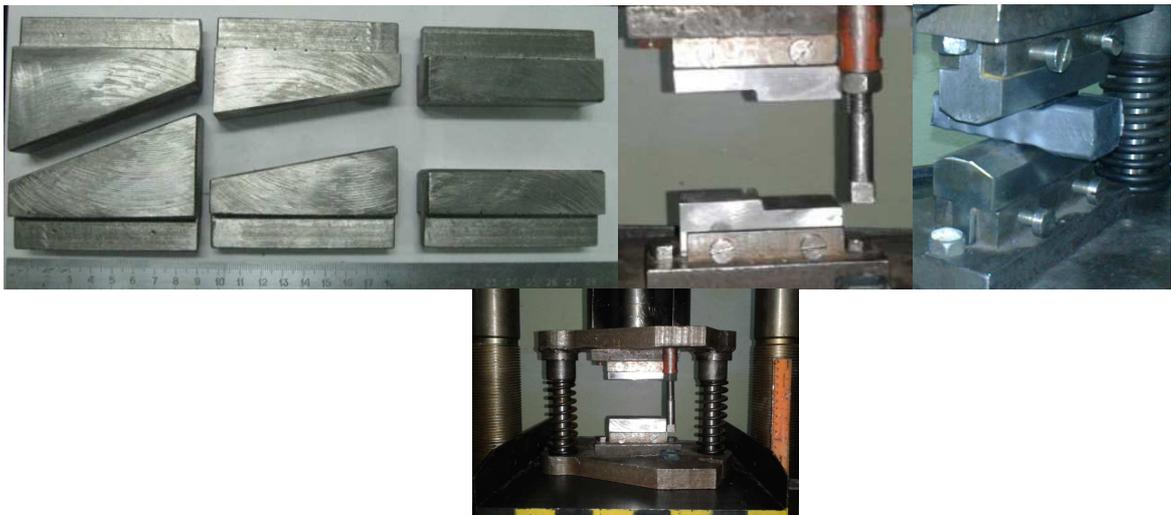


Рисунок 2.18 - Фотографии специальных бойков для моделирования процессов ковки поковок типа валов

ную машину модели МС-500 силой 500 кН, скорость деформирования 2мм/сек.

Планирование эксперимента. В результате применения планирования эксперимента получены математические модели, описывающие формоизменение заготовки в различных процессахковки. В частности планирование эксперимента применили для исследования процессовковки дисков осадкой с разгонкой узким бойком иковки конических колец. Для данных процессов было выделено по три фактора имеющих наибольшее влияние на процесс формоизменения. Варьирование значений этих факторов производилось на трех уровнях. Моделирование проводилось по разработанному плану экспериментов [244]. Общий вид уравнения регрессии следующий:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 \quad (2.1)$$

Переход от условных параметров к натуральным производится по следующим зависимостям:

$$x_1 = \frac{X_1 - X_{10}}{\Delta X_1}, \quad x_2 = \frac{X_2 - X_{20}}{\Delta X_2}, \quad x_3 = \frac{X_3 - X_{30}}{\Delta X_3} \quad (2.2)$$

В результате обработки полученных данных получены коэффициенты уравнения регрессии. Коэффициенты регрессии определялись по следующим формулам:

$$b_i = O_2 \cdot \sum_{k=1}^N (x_{k,i} \cdot y_k), \quad b_{i,j} = O_4 \cdot \sum_{k=1}^N (x_{k,i} \cdot x_{k,j} \cdot y_k), \\ b_{i,i} = O_3 \cdot \sum_{k=1}^N \left\{ \left[(x_{k,i})^2 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_{k,i})^2 \right] \cdot y_k \right\}, \quad b_0 = O_1 \cdot \sum_{k=1}^N y_k - \frac{O_1}{O_2} \sum_{k=1}^m b_{k,k} \cdot \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_{k,i})^2, \quad (2.3)$$

где N – количество экспериментов, m – количество факторов, $O_1=0,06667$, $O_2=0,09141$, $O_3=0,23041$, $O_4=0,125$.

Планирование эксперимента применялось к численному моделированию описанных процессовковки.

Определение деформированного состояния при ковке. Основную роль при производстве крупных поковок играет их качество, которое определяется завариванием внутренних дефектов и проработкой литой структуры металла. Проработку структуры металла можно оценить деформированным состоянием для данной схемы деформации.

Информация о деформированном состоянии позволит прогнозировать заваривание внутренних дефектов, изменение структуры металла, исчерпание ресурса пластичности и др. Для определения деформированного состояния будет использоваться метод координатных сеток.

Координатная сетка в экспериментальных исследованиях наносилась в меридиональном сечении образцов с шагом ячейки 2 мм в обоих направлениях. Сетка наносится на поверхность образцов с помощью специального оттиска. Перед спаиванием половинок образца сетка сканировалась с разрешением 600 dpi. Затем производилась серия обжатий, в ходе которой фиксировалось изменение геометрических размеров заготовки и координатной сетки. После каждого этапа деформирования (10%) происходил обмер координатной сетки и расчет распределения логарифмических деформаций по сечению образца. Обмер координат производился с помощью программы КОМПАС, которая позволяет достичь высокой точности при малой трудоёмкости, по сравнению с ручным обмером с помощью инструментального микроскопа.

Определение реологии исследуемого материала. Для определения формоизменения, НДС, энергосиловых характеристик процессовковки необходимо при теоретическом исследовании учитывать реологические и механические свойства исследуемого материала. Основные факторы, которые оказывают влияние на сопротивление деформированию - степень деформации, температура и скорость деформирования. При горячих процессах ОМД происходят процессы разупрочнения металла. Ковка крупных слитков реализуется обжатиями, подачами и проходами, за это время проходят процессы разупрочнения, что необходимо учитывать при теоретическом исследовании процессовковки. В литературе имеются данные о свойствах большого числа

сталей, в зависимости от температуры, скорости и степени деформации, но сложно обеспечить идентичный химический состав одной и той же марки стали для разных плавок.

Одним из исследуемых материалов является сталь 38ХНМ, т.к. она имеет широкое распространение в производстве крупных поковок ответственного назначения, диапазон температур, в котором проводились эксперименты, равен 800 - 1200°C (температурный интервалковки). Скорости деформации лежат в интервале от 10^{-3} до 10^{-1} сек⁻¹, которые соответствуют скоростям деформации при ковке. Влияние температурно-скоростных условий деформирования на механические свойства нелинейно. Для определения зависимости сопротивления деформирования от условий деформирования проведено планирование экспериментальных исследований с использованием полнофакторного эксперимента по типу 3^3 . Для проведения данного исследования необходимо провести 27 опытов. Уровни варьирования факторов и план эксперимента приведены в таблицах 2.1-2.3.

Исследования механических свойств стали 38ХНМ при повышенных температурах производились совместно с институтом моделирования и автоматизированных процессов обработки давлением. Установка MTS Insight для физического моделирования термомеханических испытаний растяжения представлена на рисунке 2.19. Механическая система MTS Insight – это интегрированная сервосистема, способная развивать силу 100 кН на растяжение.

Для исследования применяли десятикратные образцы с $d_0=10$ мм по ГОСТ 9651-73 [246]. Испытания на растяжение производились до образования шейки, что соответствует изменению напряженно-деформированного состояния.

Разработка рационального технологического процесса не возможна без учета предельной пластичности материала. Для этого необходимо провести дополнительно испытания на осадку в горячем состоянии при различных температурах. Испытания на кручение при горячей деформации провести очень сложно [246, 247], поэтому можно принять зависимость предельной

Таблица 2.1 - Уровни варьирования факторов

| | | | |
|---|-------|-------|-------|
| Интервал варьирования и уровни факторов | | | |
| Основной уровень $X_{i0}=0$ | | | |
| Интервал варьирования ΔX_i | | | |
| Верхний уровень $x_i= +1$ | | | |
| Нижний уровень $x_i= -1$ | | | |
| Кодовое обозначение | X_1 | X_2 | X_3 |

Таблица 2.2 - Расширенная матрица планирования эксперимента

| N | Код | | | y_{ug} |
|----|-------|-------|-------|----------|
| | x_1 | x_2 | x_3 | |
| 1 | +1 | +1 | 0 | |
| 2 | + | -1 | 0 | |
| 3 | -1 | +1 | 0 | |
| 4 | -1 | -1 | 0 | |
| 5 | +1 | 0 | +1 | |
| 6 | +1 | 0 | -1 | |
| 7 | -1 | 0 | +1 | |
| 8 | -1 | 0 | -1 | |
| 9 | 0 | +1 | +1 | |
| 10 | 0 | +1 | -1 | |
| 11 | 0 | -1 | +1 | |
| 12 | 0 | -1 | -1 | |
| 13 | 0 | 0 | 0 | |
| 14 | 0 | 0 | 0 | |
| 15 | 0 | 0 | 0 | |

Таблица 2.3 – Уровни факторов для определения поверхности сопротивления деформации

| | | | |
|---|---------------|---------------|-------|
| Интервал варьирования и уровни факторов | ε | ξ , сек-1 | t, °C |
| Основной уровень $X_i^o = 0$ | 0,03 | 0,0043 | 1000 |
| Интервал варьирования ΔX_i | 0,03 | 0,004 | 200 |
| Верхний уровень $X_i = +1$ | 0,06 | 0,0083 | 1200 |
| Нижний уровень $X_i = -1$ | 0 | 0,0003 | 800 |
| Кодовое обозначение | X_1 | X_2 | X_3 |



Рисунок 2.19 - Установка MTS Insight для испытаний стальных образцов при повышенных температурах на осадку и растяжение

пластичности от напряженного состояния линейной и провести только испытания на растяжение и осадку. Методика проведения планирования эксперимента и определения коэффициентов регрессии аналогична рассмотренной выше. При исследовании фиксировалась предельная деформация, которая соответствовала моменту разрушения образца.

Для растяжения: $e_p = \sqrt{3} \cdot \ln\left(\frac{100}{100 - \delta}\right)$, для осадки $e_p = \sqrt{3} \cdot \ln \frac{h_o}{h_p}$, где

δ - относительное удлинение; h_o , h_p - высота образца до деформации и в момент образования трещины.

После проведения экспериментальных исследований и обработки полученных результатов с применением теории планирования эксперимента были установлены коэффициенты регрессии для уравнений, определяющих зависимость сопротивления деформированию и ресурса пластичности от степени, скорости деформации и температуры.

По полученным коэффициентам регрессии составляем полиномы для определения сопротивления деформированию и предельной пластичности в зависимости от температуры, показателя напряженного состояния, степени и скорости деформирования.

$$\begin{aligned} \sigma_s(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = & 35 + 2245 \cdot X_1 + 1.7 \cdot X_2 - 43 \cdot X_3 - 125 \cdot X_1^2 - 1.7 \cdot X_2^2 + 226 \cdot X_3^2 - 1.13 \cdot X_1^2 \cdot X_2^2 \cdot X_3^2 - \\ & - 1.56 \cdot X_1^2 \cdot X_2^2 \cdot X_3 - 4.24 \cdot X_1^2 \cdot X_2 \cdot X_3^2 - 3.11 \cdot X_1 \cdot X_2^2 \cdot X_3^2 + 2.013 \cdot X_1^2 \cdot X_2^2 - 2.087 \cdot X_2^2 \cdot X_3^2 - \\ & - 12.14 \cdot X_1^2 \cdot X_3^2 - 1.75 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3^2 + 2.38 \cdot X_1 \cdot X_2^2 \cdot X_3 + 1.55 \cdot X_1^2 \cdot X_2 \cdot X_3 + 20.16 \cdot X_1^2 \cdot X_3 + \\ & + 3.5 \cdot X_2^2 \cdot X_3 + 10.4 \cdot X_1^2 \cdot X_3 + 2.49 \cdot X_2 \cdot X_3^2 + 0.3 \cdot X_1 \cdot X_2^2 + 2.24 \cdot X_1^2 \cdot X_2 - 0.38 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + \\ & + 3.94 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1.34 \cdot X_2 \cdot X_3 - 2284 \cdot X_1 \cdot X_3 \end{aligned}$$

$$\text{где } X_1 = \frac{\varepsilon - 0,03}{0,03}, \quad X_2 = \frac{\dot{\varepsilon} - 0,0043}{0,004}, \quad X_3 = \frac{T - 1000}{200}.$$

Доверительный интервал при уровне значимости 0,05: $\Delta b = 1,1$. Адекватность модели определялась по критерию Фишера

$$\left(F^{расч} = 1,8\right) < \left(F_{0,05;f_2;f_1}^{расч} = 2,8\right).$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_p(\Pi, \xi, T) = & 1.08 - 0.07 \cdot X_1 + 0.08 \cdot X_2 - 0.13 \cdot X_3 + 0.012 \cdot X_1^2 + 0.12 \cdot X_2^2 + 0.18 \cdot X_3^2 + 0.18 \cdot X_1^2 \cdot X_2^2 \cdot X_3^2 + \\
& - 0.28 \cdot X_1^2 \cdot X_2^2 \cdot X_3 + 0.24 \cdot X_1^2 \cdot X_2 \cdot X_3^2 + 0.99 \cdot X_1 \cdot X_2^2 \cdot X_3^2 + 0.05 \cdot X_1^2 \cdot X_2^2 - 0.4 \cdot X_2^2 \cdot X_3^2 + \\
& + 0.01 \cdot X_1^2 \cdot X_3^2 + 0.324 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3^2 - 0.21 \cdot X_1 \cdot X_2^2 \cdot X_3 - 0.26 \cdot X_1^2 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0.02 \cdot X_1^2 \cdot X_3 + \\
& + 0.41 \cdot X_2^2 \cdot X_3 - 0.14 \cdot X_1^2 \cdot X_3 + 0.02 \cdot X_2 \cdot X_3^2 - 0.39 \cdot X_1 \cdot X_2^2 + 0.012 \cdot X_1^2 \cdot X_2 - 0.28 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 + \\
& - 0.04 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.09 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.143 \cdot X_1 \cdot X_3
\end{aligned}$$

$$\text{где } X_1 = \frac{\Pi - 0}{1}, \quad X_2 = \frac{\dot{\varepsilon} - 0,0043}{0,004}, \quad X_3 = \frac{T - 1000}{200}.$$

Доверительный интервал при уровне значимости 0,05: $\Delta b = 0.01$. Адекватность модели определялась по критерию Фишера $(F^{расч} = 1,1) < (F_{0,05; f_2; f_1}^{расч} = 2,8)$. Полученные полиномы использованы при расчетах выполненных МКЭ.

Выводы

1. На основе метода морфологических карт расширена область поиска рациональных схем деформирования, позволяющих получать основные типы поковок, такие как валы, плиты, диски, кольца и трубы. Установлено, что на основании метода морфологических карт общая численность способов ковки по некоторым из деталей представителей доводится до нескольких тысяч. Определены основные из направлений создания и исследования новых схем ковки крупных поковок.

2. На основании метода морфологических карт созданы наиболее полные классификации процессов ковки поковок типа валов, плит, труб, колец и дисков. Классификации составлены на основании выделенных факторах технологического процесса: фактора формы, температурного и кинематического фактора. Подобраны новые, наиболее перспективные способы ковки поковок основных типов.

3. Предложена методика теоретических исследований процессов ковки крупных поковок. В качестве основного метода теоретических исследований предложен наиболее востребованный современный метод конечных элементов, реализованный в программных продуктах QForm 2D/3D и Deform 3D. Для определения аналитических зависимостей, параметров формоизменения заготовки в процессах ковки различных типов поковок предложен метод верхней оценки. Приведены основные положения теоретических методов.

4. Предложена методика проведения экспериментальных исследований процессов ковки крупных поковок. Указаны основные материалы, оборудование и инструмент, используемые в работе. Для определения параметров деформированного состояния заготовки в процессах ковки предложен метод координатных сеток. Для обработки экспериментальных данных и получения аналитических зависимостей на основе экспериментальных исследований, предложен метод планирования эксперимента. На основании испытаний на растяжение при различных температурно-скоростных условиях определена реология металлов.

РАЗДЕЛ 3

РАЗРАБОТКА И РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ГОРЯЧЕГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

3.1 Метод расчета технологической деформируемости с учетом восстановления пластичности во время пауз при горячем дробном деформировании

Одной из проблем процессовковки крупных поковок является трещинообразование, связанное с истощением пластичности металла (рис. 3.1). Существует множество приемов повышения пластичности, одним из которых являетсяковка с паузами. Для оценки влияния паузы на пластичность металла при горячем деформировании необходим специальный метод расчета.

Создание метода оценки пластичности металла при изотермическом дробном деформировании является достаточно важным и позволит разрабатывать режимыковки основных типов поковок с учетом такого физического явления, как восстановление пластичности.

Исследование явления восстановления пластичности проводились различными учеными, и основные работы рассмотрены в первом разделе. В процессе пластического деформирования в металле протекают различные процессы, один из которых - это зарождение и размножение дислокаций. В какой-то момент, когда образуется критическое количество дислокаций, происходит зарождение микротрещины, и при дальнейшем деформировании происходит разрушение образца, т.е. истощение пластичности. В случае если деформирование происходит не монотонно, а с паузой, то предельная деформация образца может быть увеличена. Во время паузы в металле под действием высокой температуры происходит уменьшение плотности дислокаций, за счет чего и происходит восстановление пластичности. Согласно данным работы [248] наиболее интенсивное восстановление пластичности происходит в начале паузы. Дальнейшее многократное увеличение длительности паузы приводит к незначительному увеличению восстановленной пластично-



Рисунок 3.1 - Образование трещин в различных типах поковок

сти (рис. 3.2).

Предложим модель расчета восстановления пластичности металла во время паузы. Кривые восстановления пластичности, приведенные на рис. 3.1, могут быть описаны уравнением, следующего вида:

$$\Delta\psi = K(1 - e^{-t^n}), \quad (3.1)$$

где K – коэффициент, отражающий предельное значение восстановления пластичности; t – продолжительность паузы, с; n – коэффициент, отражающий скорость восстановления пластичности.

Соотношение (3.1) дает результаты, практически совпадающие с более сложным соотношением [248]:

$$\Delta\psi = \frac{\ln(1 + e^{s\psi_1}(e^{s\Delta_n} - 1))}{s} - \Delta_n, \quad (3.2)$$

где s – коэффициент материала; Δ_n – относительная длительность паузы; ψ_1 – использованный ресурс пластичности до паузы.

Однако соотношение (3.2) обладает одним важным недостатком. Данное соотношение получено при использовании гипотезы полной обратимости процесса накопления повреждений при горячей деформации. Следствием данной гипотезы является свойство соотношения (3.2), согласно которому при достаточно длительной паузе пластичность восстанавливается полностью независимо от уровня накопленных повреждений.

При холодной деформации существует критическая величина поврежденности, превышение которой уже не позволяет восстановить исходную пластичность после термообработки [249]. Подобные предположения можно сделать и относительно горячей деформации. Будем полагать, что максимальное значение $\Delta\psi$ при малых величинах ψ_i , использованного ресурса пластичности на i -м этапе деформирования, равно ψ_i , а при больших, близ-

ких 1, стремиться к 0. В этом случае коэффициент K зависимости (3.1) принимает следующий вид:

$$K = m \cdot \psi_i, \text{ причем } \begin{cases} \psi_i = 0 \rightarrow m = 1 \\ \psi_i = 1 \rightarrow m = 0 \end{cases}$$

Графически это можно представить следующим образом (рис. 3.3).

В этом случае формула (3.1) принимает следующий вид:

$$\Delta \psi = \psi_i \cdot m(1 - e^{-t^n}). \quad (3.3)$$

В общем случае параметры m и n определяются материалом и температурой деформации.

На основании проведенного анализа параметр m можно представить в следующем виде:

$$m = (1 - \psi_i)^{f(\psi_i, T)}, \quad (3.4)$$

где функция $f(\psi, T)$, является характеристикой материала, которую необходимо определить экспериментально. Выражение (3.3) принимает следующий вид:

$$\Delta \psi = \psi_i \cdot (1 - \psi_i)^{f(\psi_i, T)} (1 - e^{-t^n}). \quad (3.5)$$

Экспериментальное определение величины восстановления пластичности для расчета коэффициентов зависимости (3.5), необходимо определять по следующей формуле:

$$\Delta \psi = \psi_1 + \psi_{2*} - 1, \quad (3.6)$$

где $\psi_1 = \varepsilon_{u1} / \varepsilon_p$ - использованный ресурс пластичности металла перед осуществлением паузы; $\varepsilon_p = \ln(l_p / l_0)$ - предельная логарифмическая степень деформации при монотонном растяжении образца; $\varepsilon_{u1} = \ln(l_1 / l_0)$ - логарифмическая степень деформации образца до паузы; $\varepsilon_{p2} = \ln(l_{p2} / l_0)$ - логарифмиче-

ская степень деформации, при которой произошло разрушение образца после паузы; $\psi_{2*} = \frac{\varepsilon_{p2} - \varepsilon_{u1}}{\varepsilon_p}$ - остаточный после осуществления паузы ресурс пластичности; l_0, l_1 - исходная и полученная при растяжении перед паузой длины образца соответственно, мм; l_p, l_{p2} - предельная длина образца при монотонном растяжении и растяжении с паузой соответственно, мм.

В том случае если восстановления пластичности не произошло, т.е. $\Delta\psi = 0$, то $\psi_1 + \psi_{2*} = 1$ или

$$\frac{\varepsilon_{p2} - \varepsilon_{u1}}{\varepsilon_p} + \frac{\varepsilon_{u1}}{\varepsilon_p} = 1. \quad (3.7)$$

В этом случае длина разрушившегося образца после паузы должна равняться длине образца, разорванного монотонно без паузы $\varepsilon_{p2} = \varepsilon_p$. Тогда выражение (3.7) принимает вид:

$$\frac{\varepsilon_p - \varepsilon_{u1}}{\varepsilon_p} + \frac{\varepsilon_{u1}}{\varepsilon_p} = 1.$$

Если подставить в зависимость (3.6) все выше описанные выражения и провести математические упрощения, получим:

$$\Delta\psi = \frac{\ln\left(\frac{l_{p2}}{l_0}\right)}{\ln\left(\frac{l_p}{l_0}\right)} - 1.$$

Схема для расчета предложенным методом на примере осадки цилиндрической заготовки приведена на (рис. 3.4) [250-251]. Наблюдая за точкой Т, в которой, вероятнее всего, пройдет разрушение, определяем для нее ψ_1 , являющейся функцией от относительной степени осадки $\varepsilon_h = \Delta h/h_0$ (Δh - абсолютное обжатие заготовки за ход, мм). В этой точке можно определить величину интенсивности логарифмических деформаций ε_i и ресурс использо-

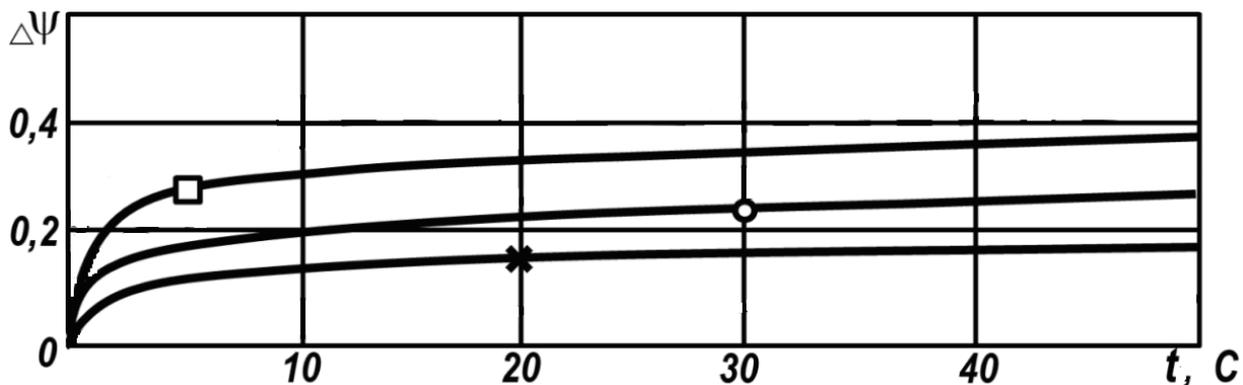


Рисунок 3.2 - Характер восстановления пластичности стали 13X11H2B2MФ-Ш в паузах при горячем деформировании: ○, ×, □ - T = 850, 900, 1100°C соответственно

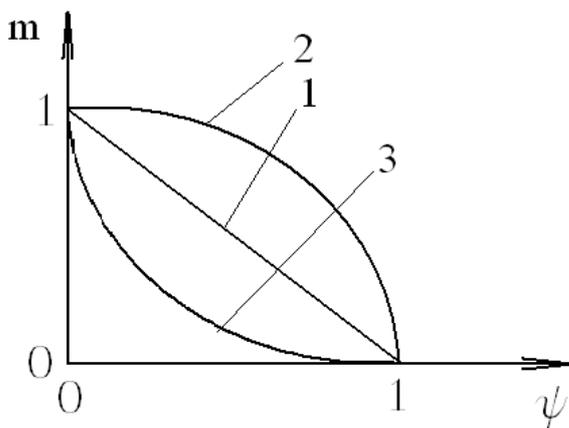


Рисунок 3.3 - Зависимость значения коэффициента m от значения предварительно исчерпанного ресурса пластичности (1 – линейная зависимость $m=1-\psi_i$, 2, 3 – параболические зависимости соответственно $m = \sqrt{1-\psi_i}$, $m = (1-\psi_i)^2$)

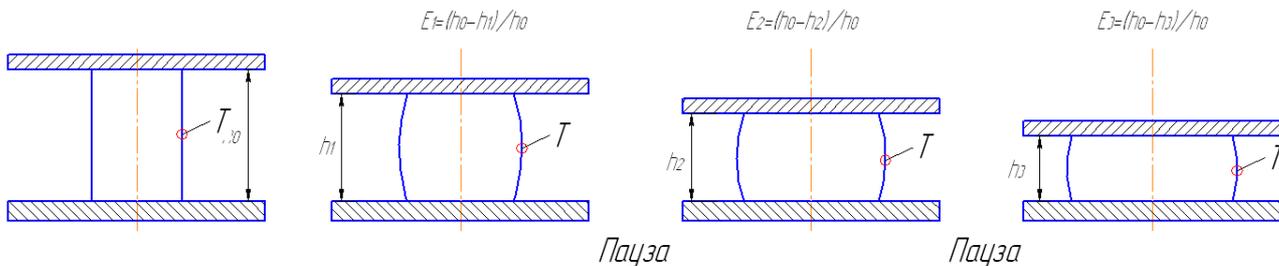


Рисунок 3.4 - Схема осадки цилиндрической заготовки с промежуточными паузами

ванной пластичности $\psi_1 = \varepsilon_1 / \varepsilon_p$, где ε_p – предельная логарифмическая степень деформации.

После первой осадки и осуществления паузы, восстановление пластичности может быть рассчитано, по следующей зависимости:

$$\Delta\psi_1 = \psi_1 \cdot (1 - \psi_1)^{f(\psi_1, T)} (1 - e^{-t \cdot n}).$$

Израсходованная пластичность после первой паузы определится как разница исчерпанной пластичности до паузы и восстановленной пластичности к концу паузы:

$$\psi_1^1 = \psi_1 - \Delta\psi_1.$$

После второй осадки во время паузы восстанавливаться будет пластичность, затраченная во время второй осадки ψ_2 , однако с учетом того, что поврежденность металла накопилась после первой осадки, и предположив, что величина поврежденности обладает свойством аддитивности, из которого следует справедливость простого их суммирования, величина восстановленной пластичности и исчерпанная за две осадки пластичность будут определяться следующим образом:

$$\Delta\psi_2 = (\psi_1^1 + \psi_2) \cdot (1 - \psi_1^1 - \psi_2)^{f(\psi_1^1 + \psi_2, T)} (1 - e^{-t \cdot n});$$

$$\psi_2^1 = \psi_1^1 + \psi_2 - \Delta\psi_2.$$

Для k осадок

$$\psi_k^1 = \psi_{k-1}^1 + \psi_k - \Delta\psi_k, \quad (3.8)$$

причем $\psi_{k-1}^1 + \psi_k \leq 1$, если идет превышение, то восстановление пластичности не рассчитывается.

Для определения зависимости интенсивности логарифмических деформаций ε_i в точке T на боковой поверхности заготовки от относительной

степени осадки ε_h проведено конечно-элементное моделирование процесса осадки цилиндрической заготовки диаметром 18 мм и высотой 20 мм из материала сталь 45 при температуре 1100 °С со скоростью 1 мм/с. Коэффициент пластического трения Зибеля при этом задавался равным 0,35. Результатом моделирования являются поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки и графическая зависимость интенсивности логарифмических деформаций от относительного обжатия заготовки (рис. 3.5).

Обработывая полученные данные, можно вывести аналитическую зависимость интенсивности логарифмических деформаций от относительной степени осадки, которая принимает следующий вид для данных температурно-скоростных условий:

$$\varepsilon_i = 0,3725 \cdot \varepsilon_h^2 + 0,7977 \cdot \varepsilon_h . \quad (3.9)$$

Для расчета повышения предельной степени деформации заготовки при дробной осадке рассмотрим вариантковки заготовки из стали У7 при постоянной температуре 1100 °С и скорости деформации 0,00066 с⁻¹. По данным работы [118], полученным экспериментально при монотонном изотермическом растяжении цилиндрических образцов при температуре 1100 °С со скоростью 0,00066 с⁻¹, предельная степень деформации равна 0,65. Сделав допущение о том, что напряженное состояние на периферийной поверхности бочки осаженой заготовки равно или близко напряженному состоянию при растяжении, можно говорить о том, что при монотонной осадке заготовки разрушение наступит в тот момент, когда интенсивность деформаций в точке Т достигнет критического значения, равного 0,65, что соответствует относительной степени осадки ε_h равной 0,63 (3.9). Проверим возможность осадки заготовки до большей величины дробным деформированием. Для этого проведем расчет дробной осадки с величиной единичного относительного обжатия за нажим $\Delta\varepsilon_h$, равного 0,25, с паузами между обжатиями, равными 60 секунд, используя зависимости (3.5-3.8).

Сделаем допущение о том, что коэффициент m , который необходимо определять экспериментально, в формуле (3.3) имеет вид $1 - \psi_i$ для рассматриваемой температуры и материала, т.е. $f(\psi_{i-1}^1 + \psi_i, T)$ в формуле (3.5) равен 1, а параметр n принимает значения до 0,15, о чем свидетельствуют графики на рис. 3.2.

Используя описанные выше соотношения и допущения, определили, что дробным деформированием с обжатием за нажим, равным 0,25, возможно увеличить предельную степень осадки от 0,63 до 0,75 с применением двух промежуточных пауз величиной 60 секунд, причем после третьей осадки можно выполнить паузу и снизить накопленную поврежденность до 0,5937, что дает возможность провести дополнительную осадку. Степень осадки, возможно увеличить еще, если уменьшить дробность деформаций.

Полученные результаты подтверждаются экспериментальными данными, полученными в работе [252] (рис. 3.6, 3.7).

3.2 Метод построения кривых течения металла по стандартным характеристикам

Время, затрачиваемое на подготовку технологического процесса, является важным экономическим параметром современного производства. Подготовка технологического процесса неразрывно связана с необходимостью его моделирования. Наиболее часто применяемым методом для моделирования процессовковки крупных поковок является метод конечных элементов, который позволяет получить наиболее приемлемые оценки параметров моделируемого процесса. Данный метод основан на учете большого количества реологических свойств деформируемого материала, основными из которых являются кривые течения металла при различных температурно-скоростных условиях.

В случае проведения экспресс-анализа, какого либо процессаковки необходим полный набор кривых течения металла при различных температур-

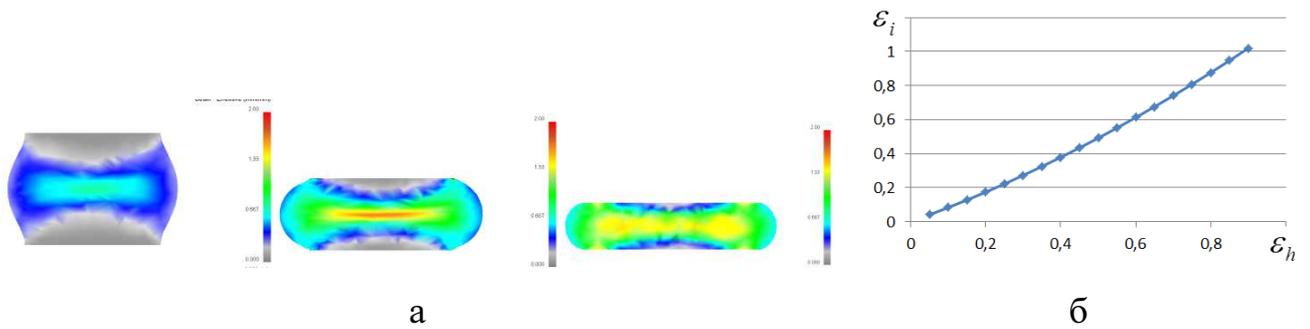


Рисунок 3.5 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки при осадке (а) и зависимость интенсивности деформаций от степени осадки (б)

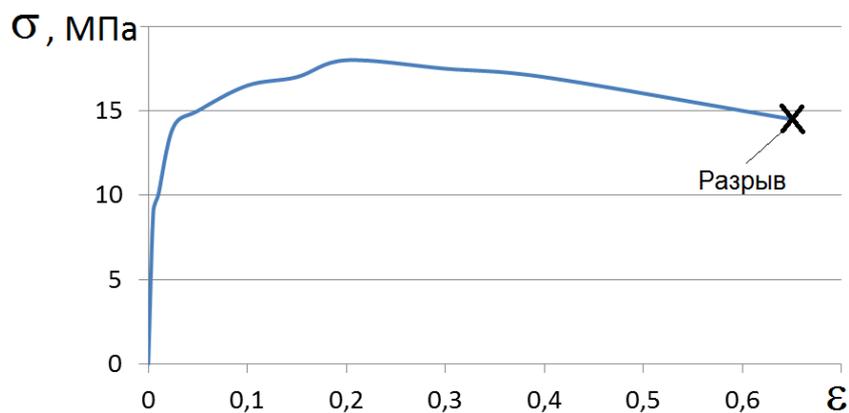


Рисунок 3.6 - Кривая упрочнения стали У7 при монотонном растяжении (скорость деформации $0,00066 \text{ с}^{-1}$, температура $1100 \text{ }^\circ\text{C}$)

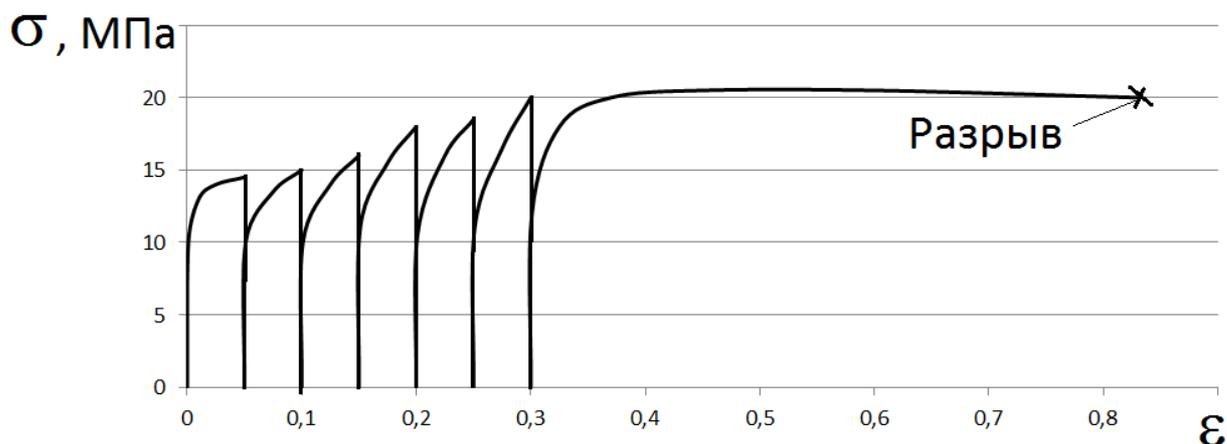


Рисунок 3.7 - Кривая упрочнения при дробном деформировании стали У7 (скорость деформации $0,00066 \text{ с}^{-1}$, температура $1100 \text{ }^\circ\text{C}$, продолжительность пауз 60 с)

но-скоростных условиях. Обычно данная информация о материале получается на основании проведения экспериментов по растяжению образцов. В случае, если необходимо провести моделирование процессаковки слитка из материала, информации о котором нет в базе данных используемой программы, технолог сталкивается с необходимостью дополнительных экспериментальных исследований. Для этого нужно выплавить слиток из данного материала, изготовить из него образцы и провести многочисленные испытания при различных температурно-скоростных условиях. Это требует значительных материальных и временных затрат.

В то же время существует большое количество справочных характеристик для множества материалов, применяемых в ковке. Это такие характеристики, как предел текучести, прочности, относительное удлинение и сужение. Разработка метода, позволяющего по справочным данным строить кривые течения металла в широком диапазоне температурно-скоростных условий деформирования, является весьма актуальной задачей и позволит существенно ускорить экспресс-анализ технологических процессов горячего пластического деформирования в условиях производства.

Как показывают многочисленные экспериментальные исследования и работы отечественных и зарубежных авторов, зависимость сопротивления деформированию при постоянной температуре корректно описывается степенной зависимостью, предложенной П. Людвигом [252, 253]:

$$\sigma_s = C \cdot e^n. \quad (3.10)$$

Для построения кривой течения металла, описывающейся зависимостью, приведенной выше, достаточно знать несколько справочных характеристик материала, таких как предел прочности σ_B и условный предел текучести $\sigma_{0.2}$.

Условный предел текучести $\sigma_{0.2}$ - условное напряжение, которое соответствует относительному остаточному удлинению равному 0,2%. При таких деформациях относительное остаточное удлинение отличается от истинной

логарифмической деформации не более чем на 0,1%, поэтому

$$\begin{aligned} e_{0,2} &\approx \varepsilon_{0,2} / 100 = 0,002 ; \\ \sigma_{0,2} &= C \cdot 0,002^n . \end{aligned} \quad (3.11)$$

В работах [253-256], анализируя устойчивость деформирования при растяжении, показано, что если модель материала следует аппроксимации Людвига, то образование шейки при растяжении начинается при логарифмической деформации, равной n . Таким образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{iB} &= C\varepsilon^n , \\ \sigma_B &= Cn^n . \end{aligned} \quad (3.12)$$

Имеем два уравнения с двумя неизвестными, решая которые определяем коэффициенты C и n .

По справочным характеристикам материала, которые зачастую прилагаются к материалу, поставляемому на производство, возможно быстро получить кривые течения металла и использовать их для экспресс-анализа технологического процессаковки или штамповки. Такое определение кривой течения металла будет вносить определенные погрешности, но отклонение теоретической кривой от экспериментальной не превышает 25-30% при определенных деформациях. Однако такие кривые будут получены строго для определенной температуры и для определенной скорости деформации. Т.е. экспресс-анализ технологии усложняется необходимостью использования большого количества экспериментальных данных в виде предела прочности и текучести при различных температурах и скоростях. Сведение необходимых данных до минимума является важной научно-практической задачей.

Изменение сопротивления деформации от одной скорости до другой можно определить аналитически. Так, например С.И. Губкин и Рейто предложили зависимости, получившие теоретическое и экспериментальное подтверждение в работах других авторов [257-259]:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)^n;$$

$$\sigma = \sigma_0 + A_1 \lg \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right)$$

Ф.Ф. Витман и В.А. Степанов вывели формулу, дающую двойную логарифмическую зависимость [257].

$$\ln \frac{\sigma}{\sigma_0} = n \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}. \quad (3.13)$$

П.Л. Людвик предложил зависимость сопротивления деформации от скорости деформации в полулогарифмическом виде

$$\sigma = \sigma_0 + c \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right). \quad (3.14)$$

Полухин П.И. в своей работе [258] отмечает, что коэффициент n показывающий степень влияния скорости на сопротивление деформации, в значительной мере определяется температурой процесса. Также в его работе отмечается, что он является постоянным для определенного диапазона скоростей. В ряде работ зависимость скоростного показателя от гомологической температуры авторы приняли линейную. Так, например Л.Д. Соколов предлагает его определять по следующей формуле [258]

$$n = m \frac{T}{T_m},$$

где m константа материала, которую М.А. Зайков определил равную 3 для всех материалов и скоростей.

По В.С. Зотееву $n = \alpha + \beta T$, где α, β - константы материала [258].

В.В. Витман и М.А. Златин, учитывая влияние температуры и скорости деформации, для определения сопротивления деформированию предложили следующую зависимость [258]:

$$\ln \frac{\sigma}{\sigma_0} = m(T - T_0) \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right). \quad (3.15)$$

Наибольшее распространение получила зависимость (3.13). В работе [259] приведены значения коэффициента n - коэффициента пропорциональности для различных сталей (табл. 3.1). Авторы устанавливали данный коэффициент для множества материалов. Видно, что для некоторых сталей данный коэффициент одинаков при одной и той же температуре, для других он существенно отличается.

В работе [260] указано, что зависимость коэффициента n от температуры линейна и не зависит от вида стали и скорости деформации (табл. 3.2).

Наблюдается явное противоречие с данными работы [259], хотя попытка упорядочить и вывести закономерности коэффициента пропорциональности является практически очень важной. Имея возможность определить кривую течения металла при определенной температуре и скорости деформации по справочным величинам, используя зависимость, предложенную С.И. Губкиным и Рейто, возможно получить множество кривых для практически любой скорости деформации.

Актуальным является уточнение коэффициента пропорциональности для различных материалов и температурно-скоростных условий и получение обобщенных данных.

На основании имеющихся экспериментальных данных полученных по результатам испытаний на растяжение и осадку различных типов материалов при различных температурно-скоростных условиях определим величины коэффициента пропорциональности сопротивления деформированию к скорости деформации. Экспериментальные данные были получены в лабораторных условиях ОАО «Русполимет» и взяты из литературы [261-276]. Химический состав и свойства исследуемых материалов приведены в приложении А.

Таблица 3.1 – Значение коэффициента пропорциональности различных материалов [259]

| Материал | 800 °С | | 900 °С | | 1000 °С | | 1100 °С | | 1200 °С | |
|-------------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|----------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|
| | $\sigma_{0,2}$, МПа | n | $\sigma_{0,2}$, МПа | n | $\sigma_{0,2}$, МПа | K_{np} | $\sigma_{0,2}$, МПа | n | $\sigma_{0,2}$, МПа | n |
| 25 | 203 | 0,129 | 149 | 0,156 | 105 | 0,175 | 76 | 0,184 | - | - |
| 45 | 205 | 0,11 | 141 | 0,12 | 108 | 0,13 | 81 | 0,17 | 61 | 0,2 |
| 50 | - | - | 172 | 0,12 | 124 | 0,135 | 93 | 0,151 | 66 | 0,183 |
| 30ХГСА | 210 | 0,12 | 157 | 0,13 | 113 | 0,135 | 81 | 0,16 | 61 | 0,15 |
| 12ХН3А | 220 | 0,12 | 170 | 0,14 | 130 | 0,15 | 94 | 0,16 | 70 | 0,18 |
| ШХ15 | 230 | 0,15 | 159 | 0,152 | 107 | 0,16 | 75 | 0,176 | 50 | 0,2 |
| 60С2 | 241 | 0,12 | 171 | 0,13 | 133 | 0,13 | 104 | 0,137 | 80 | 0,135 |
| У7 | 147 | 0,12 | 122 | 0,14 | 83 | 0,18 | 58 | 0,2 | - | - |
| У10 | 224 | 0,11 | 133 | 0,12 | 104 | 0,13 | 73 | 0,18 | 50 | 0,23 |
| Х12 | 400 | 0,08 | 225 | 0,14 | 126 | 0,2 | 71 | 0,26 | 40 | 0,32 |
| Р18 | 399 | 0,07 | 264 | 0,114 | 174 | 0,16 | 115 | 0,2 | 76 | 0,25 |
| 12Х13 | - | - | 189 | 0,126 | 138 | 0,213 | 88 | 0,21 | 26 | 0,2 |
| 30Х13 | 246 | 0,14 | 186 | 0,16 | 164 | 0,18 | 109 | 0,2 | 85 | 0,212 |
| 12Х18Н9Т | - | - | 256 | 0,06 | 194 | 0,09 | 144 | 0,1 | 102 | 0,115 |
| 40Х9С2 | - | - | 143 | 0,132 | 202 | 0,112 | 133 | 0,15 | 87 | 0,17 |
| 45Х14Н14В2М | 940 | 0,03 | 680 | 0,09 | 400 | 0,2 | 247 | 0,22 | 145 | 0,24 |

Таблица 3.2 - Значение коэффициента пропорциональности для сталей [260]

| Температура, °С | 800 | 900 | 1000 | 1100 | 1200 |
|-----------------|------|------|------|------|------|
| n | 0,12 | 0,14 | 0,16 | 0,18 | 0,20 |

Коэффициент пропорциональности n определялся по следующей зависимости:

$$n = \frac{\ln \frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}}}{\ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}}.$$

В результате обработки экспериментальных данных получено множество значений коэффициента n при различных температурно-скоростных условиях деформирования для множества видов материалов. Установлено, что величина коэффициента пропорциональности низколегированных и углеродистых сталей находится на одном уровне и достаточно существенно отличается для легированных и высоколегированных сталей. Кроме того установлено, что диапазон скоростей деформации также оказывает существенное влияние на чувствительность к скорости, сопротивления деформированию у всех материалов. Значение коэффициента n для низколегированных и углеродистых сталей при различных скоростях деформации приведено в таблицах 3.3-3.5.

На рис. 3.8 приведены графические зависимости коэффициента пропорциональности от температуры для группы низколегированных и углеродистых сталей. На основании статистической обработки получены линейные зависимости, описывающие влияние температуры и скорости деформации на коэффициент n .

Аналогичные данные получены для высоколегированных хромом, никелем, молибденом и вольфрамом сталей и приведены в таблицах 3.7-3.10. На рис. 3.9 приведены графические зависимости коэффициента n от температуры для высоколегированных сталей.

На рис. 3.10 показано сопоставление коэффициентов скоростной чувствительности стали различных групп от температуры в различных скоростных диапазонах. Видно, что у легированных сталей более ярко выражена чувствительность к скорости деформации при повышении температуры.

Таблица 3.3 - Значение коэффициента пропорциональности от температуры для диапазона скоростей деформации 0,001-0,01 с⁻¹ (низколегированные и углеродистые стали)

| T, °C | $\dot{\epsilon} = 0,001..0,01 \text{ с}^{-1}$ | T, °C | $\dot{\epsilon} = 0,001..0,01 \text{ с}^{-1}$ | T, °C | $\dot{\epsilon} = 0,001..0,01 \text{ с}^{-1}$ |
|-------|---|-------|---|-------|---|
| 1150 | 0,20412 | 1050 | 0,287583 | 950 | 0,223243 |
| 1150 | 0,221849 | 1050 | 0,287583 | 900 | 0,183644 |
| 1100 | 0,196295 | 1000 | 0,151268 | 900 | 0,124939 |
| 1100 | 0,196 | 1000 | 0,236089 | 850 | 0,191306 |
| 1100 | 0,281163 | 1000 | 0,210853 | 850 | 0,09691 |
| 1050 | 0,151268 | 950 | 0,18406 | | |
| 1050 | 0,2156 | 950 | 0,124939 | | |

Таблица 3.4 - Значение коэффициента пропорциональности от температуры для диапазона скоростей деформации 0,01-0,1 с⁻¹ (низколегированные и углеродистые стали)

| T, °C | $\dot{\epsilon} = 0,01..0,1 \text{ с}^{-1}$ | T, °C | $\dot{\epsilon} = 0,01..0,1 \text{ с}^{-1}$ | T, °C | $\dot{\epsilon} = 0,01..0,1 \text{ с}^{-1}$ |
|-------|---|-------|---|-------|---|
| 1200 | 0,131888 | 1050 | 0,086859 | 950 | 0,108574 |
| 1200 | 0,154902 | 1050 | 0,140179 | 900 | 0,069081 |
| 1200 | 0,20412 | 1000 | 0,167491 | 900 | 0,21 |
| 1150 | 0,151268 | 1000 | 0,121422 | 900 | 0,127105 |
| 1150 | 0,130288 | 1000 | 0,101709 | 900 | 0,072003 |
| 1150 | 0,146128 | 1000 | 0,128168 | 900 | 0,167491 |
| 1100 | 0,162727 | 1000 | 0,086186 | 900 | 0,159701 |
| 1100 | 0,129095 | 1000 | 0,168913 | 900 | 0,138618 |
| 1100 | 0,201645 | 1000 | 0,173451 | 850 | 0,09691 |
| 1100 | 0,179986 | 1000 | 0,176091 | 850 | 0,14766 |
| 1100 | 0,167491 | 1000 | 0,160654 | 800 | 0,065502 |
| 1100 | 0,163502 | 1000 | 0,135255 | 800 | 0,182931 |
| 1050 | 0,167491 | 950 | 0,125925 | 800 | 0,079181 |
| 1050 | 0,129634 | 950 | 0,151268 | 800 | 0,08543 |
| 1050 | 0,198368 | 950 | 0,152091 | | |

Таблица 3.5 - Значение коэффициента пропорциональности от температуры для диапазона скоростей $0,1-1 \text{ с}^{-1}$ (низколегированные и углеродистые стали)

| $T, ^\circ\text{C}$ | $\dot{\epsilon} = 0,1..1 \text{ с}^{-1}$ | $T, ^\circ\text{C}$ | $\dot{\epsilon} = 0,1..1 \text{ с}^{-1}$ | $T, ^\circ\text{C}$ | $\dot{\epsilon} = 0,1..1 \text{ с}^{-1}$ |
|---------------------|--|---------------------|--|---------------------|--|
| 1200 | 0,20926 | 1050 | 0,108574 | 900 | 0,121734 |
| 1200 | 0,09691 | 1050 | 0,121422 | 900 | 0,051153 |
| 1150 | 0,18868 | 1000 | 0,10721 | 900 | 0,087739 |
| 1150 | 0,108574 | 1000 | 0,094786 | 900 | 0,051153 |
| 1150 | 0,230449 | 1000 | 0,137869 | 900 | 0,146128 |
| 1100 | 0,19382 | 1000 | 0,079181 | 900 | 0,116506 |
| 1100 | 0,109144 | 1000 | 0,106455 | 900 | 0,086691 |
| 1100 | 0,08241 | 1000 | 0,165367 | 900 | 0,113943 |
| 1100 | 0,068716 | 1000 | 0,11115 | 850 | 0,070038 |
| 1100 | 0,132626 | 1000 | 0,073429 | 850 | 0,07383 |
| 1100 | 0,124939 | 950 | 0,063282 | 800 | 0,064458 |
| 1100 | 0,164586 | 950 | 0,173298 | 800 | 0,058583 |
| 1050 | 0,146128 | 950 | 0,122464 | 800 | 0,09691 |
| 1050 | 0,121422 | 950 | 0,069487 | 800 | 0,059121 |
| 1050 | 0,142668 | 950 | 0,090177 | 800 | 0,031408 |

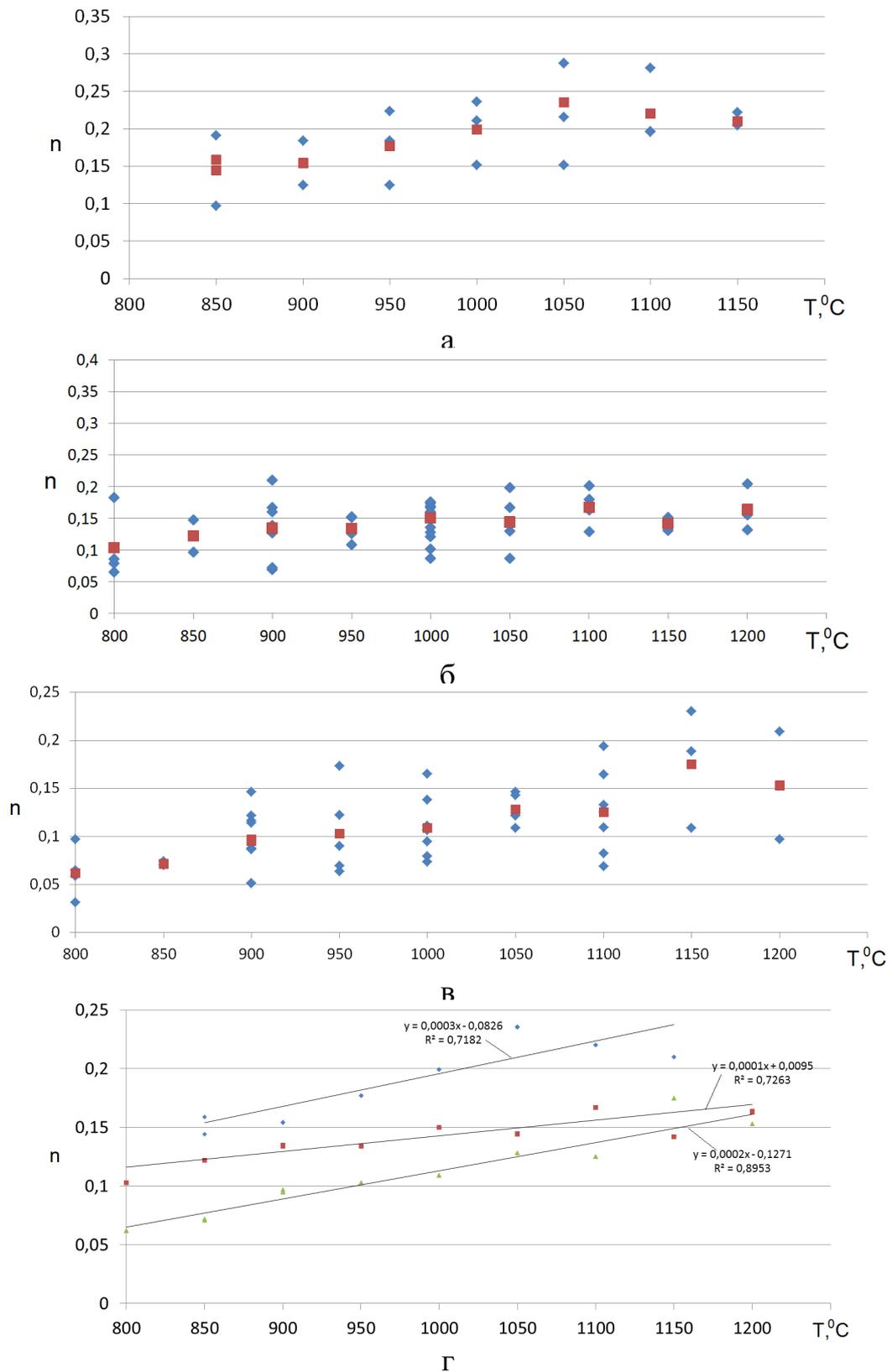


Рисунок 3.8 - Зависимость коэффициента пропорциональности от температурно скоростных условий деформирования низколегированных и углеродистых сталей (а - $\dot{\epsilon} = 0,001-0,01 \text{ s}^{-1}$, б - $\dot{\epsilon} = 0,01-0,1 \text{ s}^{-1}$, в - $\dot{\epsilon} = 0,1-1 \text{ s}^{-1}$, г – общий график)

Таблица 3.6 - Значение коэффициента пропорциональности от температуры для различных диапазонов скоростей (низколегированные и углеродистые стали)

| $\dot{\epsilon} = 0,001..0,01 \text{ c}^{-1}$ | | $\dot{\epsilon} = 0,01..0,1 \text{ c}^{-1}$ | | $\dot{\epsilon} = 0,1..1 \text{ c}^{-1}$ | |
|---|-------|---|-------|--|-------|
| n | T, °C | n | T, °C | n | T, °C |
| 0,2774 | 1200 | 0,1295 | 1200 | 0,1129 | 1200 |
| 0,2624 | 1150 | 0,1245 | 1150 | 0,1029 | 1150 |
| 0,2474 | 1100 | 0,1195 | 1100 | 0,0929 | 1100 |
| 0,2324 | 1050 | 0,1145 | 1050 | 0,0829 | 1050 |
| 0,2174 | 1000 | 0,1095 | 1000 | 0,0729 | 1000 |
| 0,2024 | 950 | 0,1045 | 950 | 0,0629 | 950 |
| 0,1874 | 900 | 0,0995 | 900 | 0,0529 | 900 |
| 0,1724 | 850 | 0,0945 | 850 | 0,0429 | 850 |
| 0,1574 | 800 | 0,0895 | 800 | 0,0329 | 800 |

Таблица 3.7 - Значение коэффициента пропорциональности от температуры для диапазона скоростей деформации $0,001-0,01 \text{ c}^{-1}$ (высоколегированные стали)

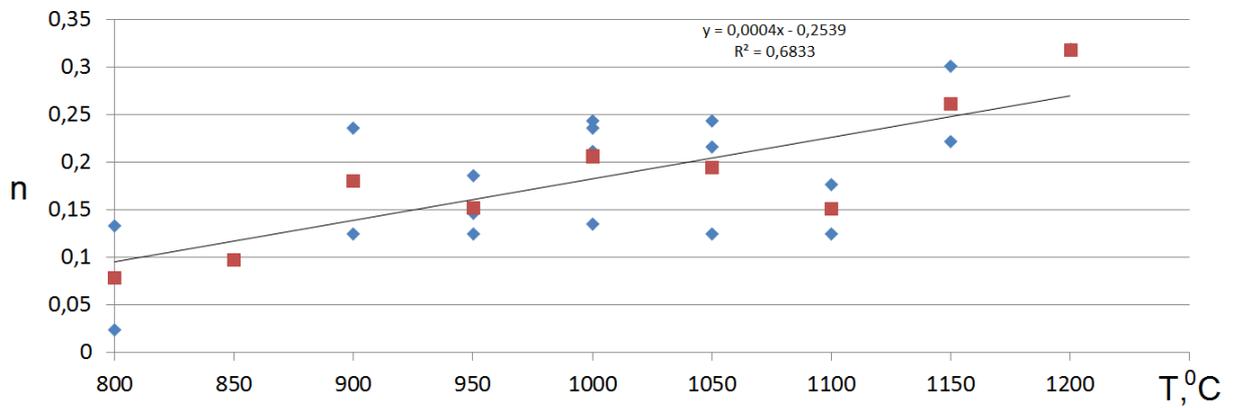
| T, °C | $\dot{\epsilon} = 0,001..0,01 \text{ c}^{-1}$ | T, °C | $\dot{\epsilon} = 0,001..0,01 \text{ c}^{-1}$ | T, °C | $\dot{\epsilon} = 0,001..0,01 \text{ c}^{-1}$ |
|-------|---|-------|---|-------|---|
| | ₁ | | ₁ | | |
| 1200 | 0,318759 | 1050 | 0,243038 | 950 | 0,124939 |
| 1150 | 0,30103 | 1000 | 0,243038 | 900 | 0,124939 |
| 1150 | 0,221849 | 1000 | 0,134699 | 900 | 0,236089 |
| 1100 | 0,176091 | 1000 | 0,236089 | 850 | 0,09691 |
| 1100 | 0,124939 | 1000 | 0,210853 | 800 | 0,023481 |
| 1050 | 0,124939 | 950 | 0,146128 | 800 | 0,132626 |
| 1050 | 0,2156 | 950 | 0,185332 | | |

Таблица 3.8 - Значение коэффициента пропорциональности от температуры для диапазона скоростей деформации 0,01-0,1 с⁻¹ (высоколегированные стали)

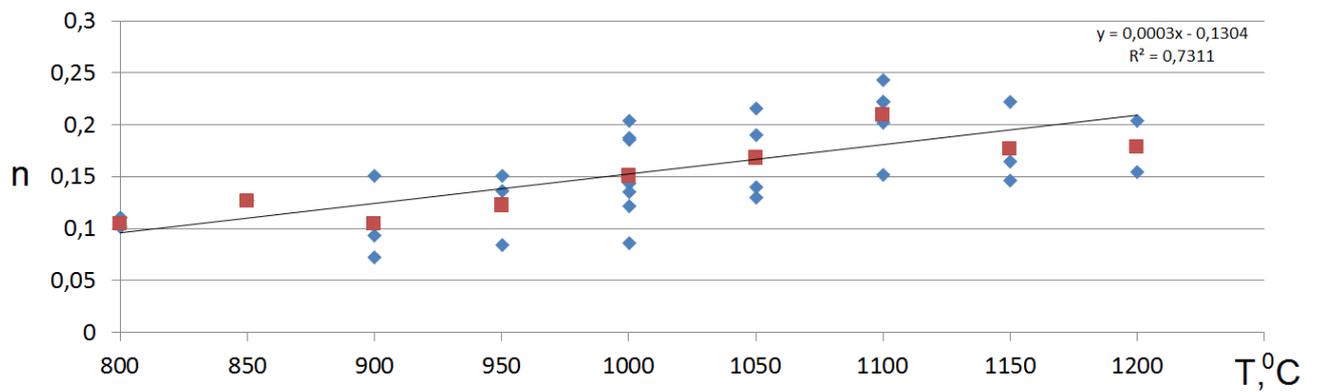
| T, °C | $\dot{\epsilon} = 0,01..0,1 \text{ с}^{-1}$ | T, °C | $\dot{\epsilon} = 0,01..0,1 \text{ с}^{-1}$ | T, °C | $\dot{\epsilon} = 0,01..0,1 \text{ с}^{-1}$ |
|-------|---|-------|---|-------|---|
| 1200 | 0,154902 | 1050 | 0,190332 | 950 | 0,084321 |
| 1200 | 0,20412 | 1050 | 0,2156 | 950 | 0,13622 |
| 1150 | 0,221849 | 1050 | 0,129634 | 950 | 0,151268 |
| 1150 | 0,16481 | 1050 | 0,140179 | 900 | 0,072003 |
| 1150 | 0,146128 | 1000 | 0,143907 | 900 | 0,151268 |
| 1100 | 0,221849 | 1000 | 0,086186 | 900 | 0,093422 |
| 1100 | 0,201645 | 1000 | 0,185637 | 850 | 0,127105 |
| 1100 | 0,243038 | 1000 | 0,187087 | 800 | 0,110412 |
| 1100 | 0,221849 | 1000 | 0,20412 | 800 | 0,101458 |
| 1100 | 0,221849 | 1000 | 0,121422 | | |
| 1100 | 0,15202 | 1000 | 0,135255 | | |

Таблица 3.9 - Значение коэффициента пропорциональности от температуры для диапазона скоростей 0,1-1 с⁻¹ (высоколегированные стали)

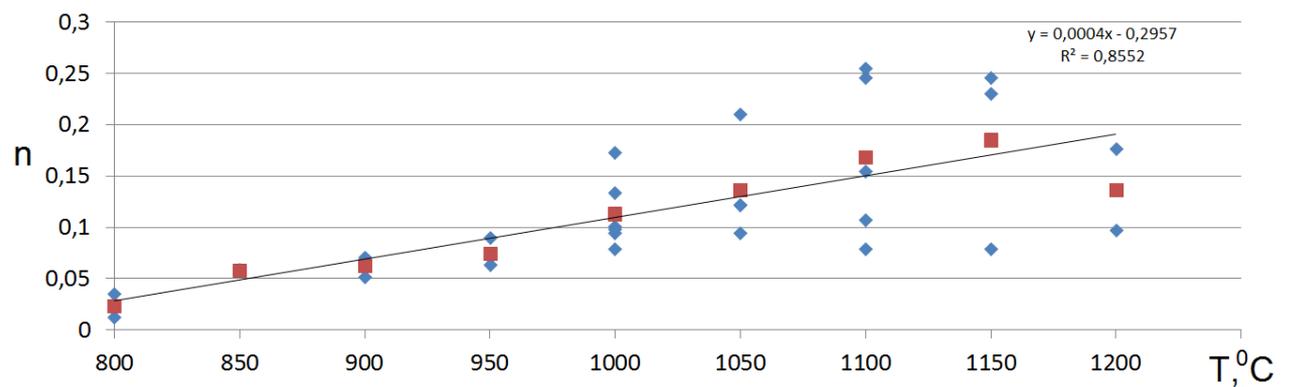
| T, °C | $\dot{\epsilon} = 0,1..1 \text{ с}^{-1}$ | T, °C | $\dot{\epsilon} = 0,1..1 \text{ с}^{-1}$ | T, °C | $\dot{\epsilon} = 0,1..1 \text{ с}^{-1}$ |
|-------|--|-------|--|-------|--|
| 1200 | 0,09691 | 1050 | 0,121422 | 1000 | 0,098132 |
| 1200 | 0,176091 | 1050 | 0,210369 | 950 | 0,070581 |
| 1150 | 0,079181 | 1050 | 0,121422 | 950 | 0,090177 |
| 1150 | 0,246291 | 1050 | 0,093905 | 950 | 0,063282 |
| 1150 | 0,230449 | 1000 | 0,133211 | 900 | 0,051153 |
| 1100 | 0,10721 | 1000 | 0,079181 | 900 | 0,070581 |
| 1100 | 0,079 | 1000 | 0,10067 | 900 | 0,064941 |
| 1100 | 0,154902 | 1000 | 0,172789 | 850 | 0,058532 |
| 1100 | 0,245513 | 1000 | 0,113943 | 800 | 0,012234 |
| 1100 | 0,255273 | 1000 | 0,094786 | 800 | 0,034762 |



а



б

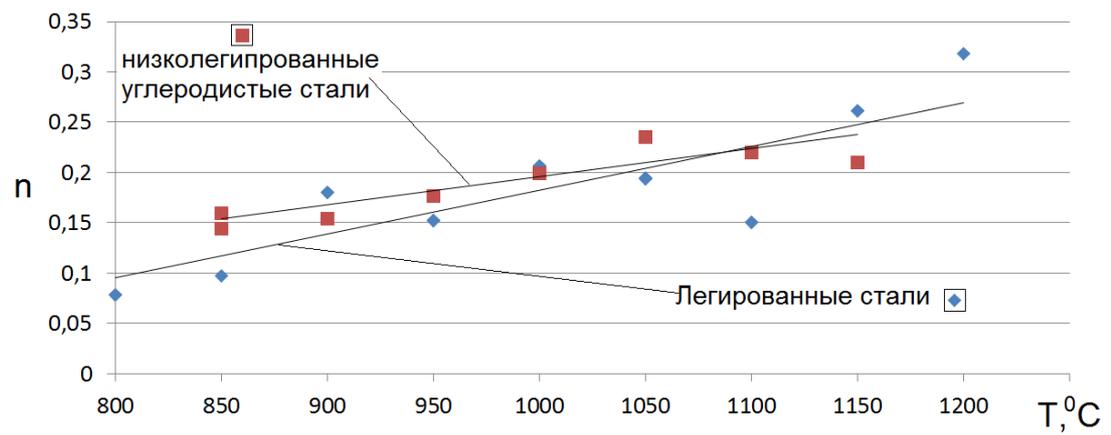


в

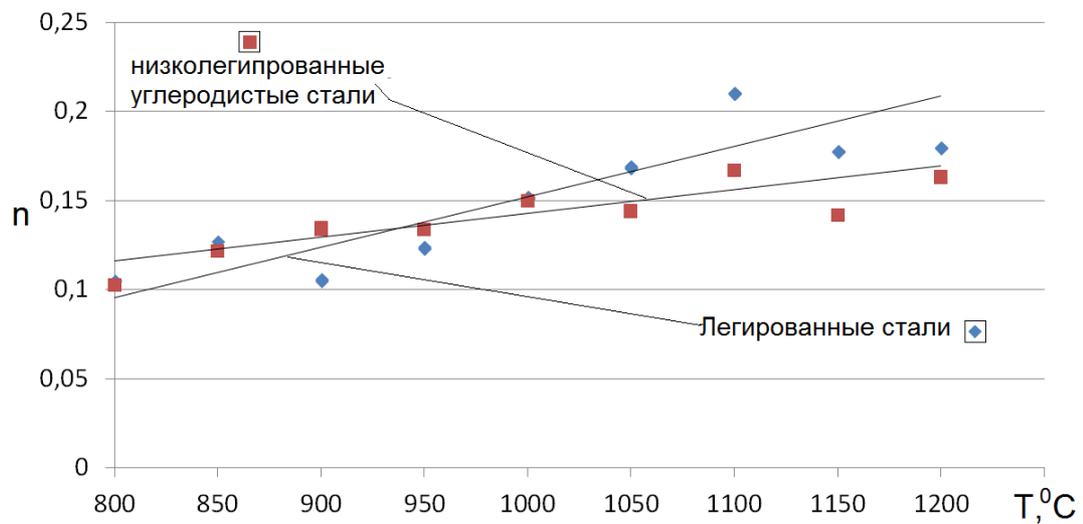
Рисунок 3.9 - Зависимость коэффициента пропорциональности от температурно скоростных условий деформирования высоколегированных сталей (а - $\dot{\epsilon} = 0,001-0,01 \text{ c}^{-1}$, б - $\dot{\epsilon} = 0,01-0,1 \text{ c}^{-1}$, в - $\dot{\epsilon} = 0,1-1 \text{ c}^{-1}$)

Таблица 3.10 - Значение коэффициента пропорциональности от температуры для различных диапазонов скоростей (высоколегированные стали)

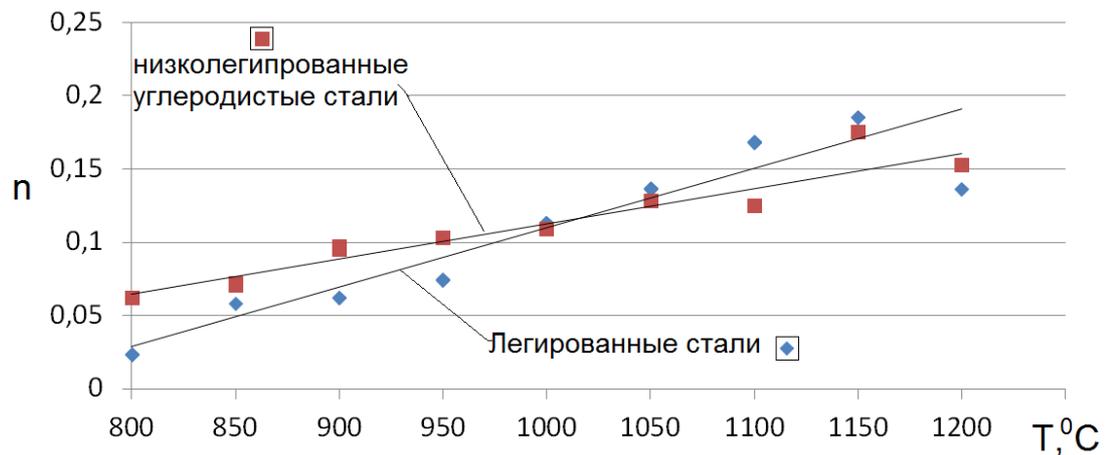
| $\dot{\epsilon} = 0,001..0,01 \text{ c}^{-1}$ | | $\dot{\epsilon} = 0,01..0,1 \text{ c}^{-1}$ | | $\dot{\epsilon} = 0,1..1 \text{ c}^{-1}$ | |
|---|-------|---|-------|--|-------|
| n | T, °C | n | T, °C | n | T, °C |
| 0,2261 | 1200 | 0,2296 | 1200 | 0,1843 | 1200 |
| 0,2061 | 1150 | 0,2146 | 1150 | 0,1643 | 1150 |
| 0,1861 | 1100 | 0,1996 | 1100 | 0,1443 | 1100 |
| 0,1661 | 1050 | 0,1846 | 1050 | 0,1243 | 1050 |
| 0,1461 | 1000 | 0,1696 | 1000 | 0,1043 | 1000 |
| 0,1261 | 950 | 0,1546 | 950 | 0,0843 | 950 |
| 0,1061 | 900 | 0,1396 | 900 | 0,0643 | 900 |
| 0,0861 | 850 | 0,1246 | 850 | 0,0443 | 850 |
| 0,0661 | 800 | 0,1096 | 800 | 0,0243 | 800 |



а



б



в

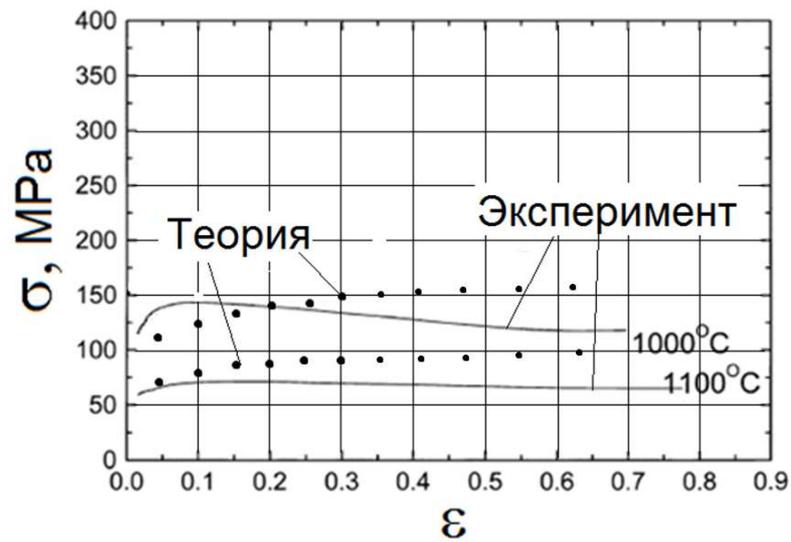
Рисунок 3.10 - Зависимость коэффициента пропорциональности от температурно скоростных условий деформирования различных групп материалов (а - $\dot{\epsilon}=0,001-0,01 \text{ c}^{-1}$, б - $\dot{\epsilon}=0,01-0,1 \text{ c}^{-1}$, в - $\dot{\epsilon}=0,1-1 \text{ c}^{-1}$)

Для определения адекватности полученных результатов проверим разработанную методику на одном из исследуемых материалов. Возьмем для примера материал 1 (приложение А) – высоколегированную сталь. Возьмем экспериментально полученные значения предела прочности и предела текучести при температурах $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ при скорости деформации равной $0,01\text{ с}^{-1}$. Предел прочности при $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ равен 195 МПа , предел текучести 100 МПа , для температуры $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно 120 МПа и 80 МПа . Воспользовавшись уравнениями (3.2) и (3.3) определим коэффициент аппроксимации кривых течения металла, они составят соответственно для температур $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($C=254, n=0,15$) и для температур $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($C=254, n=0,15$).

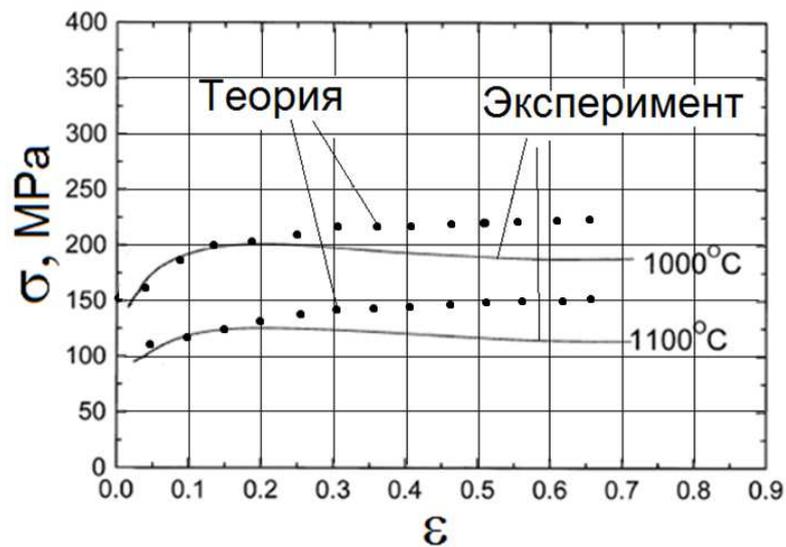
Подставив эти значения коэффициентов в выражение (3.1) получим теоретические кривые течения металла при соответствующих температурах и скорости деформации. Результаты приведены на рис. 3.11 а. Видно, что отклонение теоретических значений от экспериментальных находится в пределах 15%.

Для проверки адекватности коэффициентов, отражающих влияние скорости деформации на напряжение течения металла, определим теоретическое положение кривых течения металла на графиках, полученных экспериментально для различных скоростей деформации: $0,001\text{ с}^{-1}$ и 1 с^{-1} .

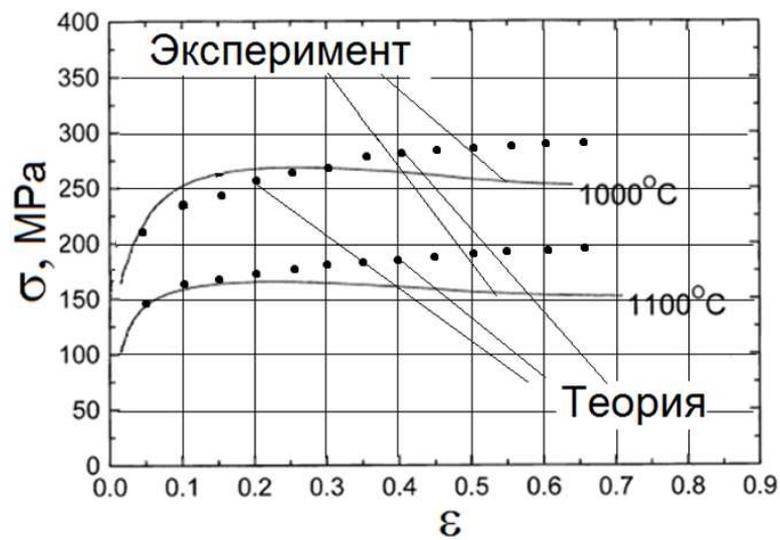
Построить кривые течения при различных скоростях деформации возможно на основании полученных теоретических кривых с применением выражения (3.4) и графиков (см. рис. 3.4) для определения пропорциональности. Произведя несложные математические вычисления, получим теоретические значения напряжения текучести материала при скоростях деформации $0,001$ и 1 с^{-1} . Нанеся теоретические значения на экспериментально полученные графики (рис. 3.11 б, в) можно увидеть, что теоретически влияние скорости деформации достаточно точно описывается. Отклонение теоретических значений напряжения течения металла находится в пределах 20%.



а



б



в

Рисунок 3.11 - Кривые течения стали AISI T1 при различных температурно скоростных условиях (а - $\dot{\epsilon}=0,001 \text{ c}^{-1}$, б - $\dot{\epsilon}=0,1 \text{ c}^{-1}$, в - $\dot{\epsilon}= 1 \text{ c}^{-1}$)

3.3. Моделирование эволюции микроструктуры стали в процессах ковки крупных поковок

3.3.1 Модель расчета эволюции микроструктуры металла

При изготовлении крупногабаритных изделий ковкой из слитков, технологический процесс необходимо организовывать таким образом, чтобы деформационный и температурный режим максимально способствовали получению качественного изделия, т.е. получению необходимой структуры металла. Для описания изменений микроструктуры металла во время горячей обработки давлением используется ряд зависимостей: зависимости, описывающие изменение микроструктуры во время статической рекристаллизации, метадинамической и динамической и зависимости для описания роста зерна.

Статическая рекристаллизация протекает в том случае, если интенсивность деформации в металле меньше критической ϵ_c . Критическая деформация обычно является функцией от пиковой деформации ϵ_p . Значение ϵ_p определяется экспериментально и, как правило, является функцией скорости деформации, температуры и начального размера зерна [196-201].

$$\epsilon_p = a_1 d_0^{n_1} \epsilon^{m_1} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) + c_1; \epsilon_c = a_2 \epsilon_p,$$

где a_1 , n_1 , m_1 , c_1 , a_2 – константы материала.

Для описания зависимости между объемом рекристаллизовавшейся фракции металла и временем рекристаллизации используют уравнение Avrami [196-201]:

$$X_{srx} = 1 - \exp\left[-\beta_s \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^{K_s}\right]; t_{0.5} = a_3 d^{h_3} \epsilon^{n_3} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right),$$

где K_s , a_3 , h_3 , n_3 , m_3 – константы материала.

$t_{0.5}$ обозначает время, за которое протекает 50% рекристаллизации.

Размер зерна после рекристаллизации является функцией начального размера

зерна, деформации, скорости деформации и температуры [196-201].

$$d_{srx} = a_6 d_0^{h_6} \varepsilon^{n_6} \dot{\varepsilon}^{m_6} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) + c_6,$$

где a_6 , h_6 , n_6 , m_6 , c_6 – константы материала.

Метадинамическая рекристаллизация протекает в том случае если полученная металлом деформация больше критической ε_c . Метадинамическая рекристаллизация моделируется также как и статическая, но с некоторым отличием в константах материала [196-201].

$$X_{mrx} = 1 - \exp\left[-\beta_m \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^{K_m}\right]; t_{0.5} = a_4 d^{h_4} \varepsilon^{n_4} \dot{\varepsilon}^{m_4} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right);$$

$$d_{mrx} = a_7 d_0^{h_7} \varepsilon^{n_7} \dot{\varepsilon}^{m_7} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) + c_7,$$

где K_m , a_4 , h_4 , n_4 , m_4 , a_7 , h_7 , n_7 , m_7 , c_7 – константы материала.

Динамическая рекристаллизация по своей сути комплексный процесс во время, которого происходит одновременная генерация и аннигиляция дислокаций рекристаллизацией. Динамическая рекристаллизация моделируется феноменологически как функция деформации при фиксированных температуре и скорости деформации. В данном случае также используется уравнение Avrami для описания зависимости объема рекристаллизованной фракции металла от интенсивности деформации [196-201].

$$X_{drx} = 1 - \exp\left[-\beta_d \left(\frac{\varepsilon - a_{10}\varepsilon_p}{\varepsilon_{0.5}}\right)^{K_d}\right];$$

$$\varepsilon_{0.5} = a_5 d_0^{n_5} \dot{\varepsilon}^{m_5} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) + c_5,$$

где K_d , a_{10} , a_5 , n_5 , m_5 , c_5 – константы материала.

$\varepsilon_{0.5}$ – обозначает деформацию, при которой протекает 50% рекристаллизации. Размер зерна при динамической рекристаллизации определяется по следующей зависимости [196-201]:

$$d_{drx} = a_8 d_0^{h_8} \varepsilon^{n_8} \dot{\varepsilon}^{m_8} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) + c_8,$$

где a_8, n_8, m_8, h_8, c_8 – константы материала.

Моделирование роста зерен выполняется в том объеме металла, который не имеет деформации, т.е. либо до горячей деформации либо после того как рекристаллизация завершилась. С этой целью используется классическая феноменологическая зависимость описывающая рост зерна [196-201]:

$$d_{gr} = \left[d_0^m + a_9 t \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \right]^{1/m},$$

где a_9, m – константы материала.

3.3.2 Автоматизация расчета эволюции микроструктуры стали

В работе [196] приведена модель изменения размера зерна в процессе горячей пластической деформации стали Mn18Cr18N. Соотношения, описывающие динамическую рекристаллизацию предложенные в данной работе следующие.

Параметр Zener-Holloman:

$$Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{Q}{RT}\right),$$

где Q – энергия активации (478,6 кДж/моль); R – газовая постоянная (8,314 Дж/моль*К); T – температура металла, К; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации, s^{-1} .

Критическая степень деформации, при достижении которой начинается динамическая рекристаллизация:

$$\varepsilon_c = 3,7 \cdot 10^{-5} \cdot d^{0,071} \cdot Z^{0,2},$$

где d – исходный размер зерна (350 мкм).

Степень деформации, при которой рекристаллизуется 50% деформируемого металла:

$$\varepsilon_{0,5} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot d^{0,117} \dot{\varepsilon}^{0,103} \cdot \exp\left(\frac{89748}{R \cdot T}\right).$$

Размер зерна после завершения динамической рекристаллизации:

$$d_{drx} = 1.159 \cdot 10^6 \cdot Z^{-0.277}.$$

Объем динамически рекристаллизовавшегося металла:

$$X_{drx} = 1 - \exp\left(-0.693 \cdot \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_{0.5}}\right)^{1.6}\right),$$

где ε – интенсивность деформации.

Соотношения, описывающие статическую рекристаллизацию следующие.

Время протекания половины статической рекристаллизации:

$$t_{0.5} = 8.47 \cdot 10^{-16} \cdot d^{1.99} \varepsilon^{-3.323} \cdot \exp\left(\frac{249300}{R \cdot T}\right).$$

Часть металла прошедшая статическую рекристаллизацию (в долях от 1):

$$X_{srx} = 1 - \exp\left(-0.693 \cdot \left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^{1.702}\right).$$

Размер зерна после завершения статической рекристаллизации:

$$d_{srx} = 2,98 \cdot 10^5 \cdot d^{0.79} \varepsilon^{-1.74} \cdot \exp\left(-\frac{158500}{R \cdot T}\right).$$

Когда рекристаллизация завершается, т.е. объем рекристаллизовавшейся части металла составляет 0,95 и выше, начинается рост зерен, за счет уменьшения площади их границ в единице объема. Функция для определения роста зерна следующая:

$$d_t^{5.9} - d_0^{5.9} = 2,2 \cdot 10^{26} \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{486809}{R \cdot T}\right).$$

Имея данную модель эволюции микроструктуры, можно разрабатывать рациональные режимыковки крупных поковок различного типа.

Анализ описанных зависимостей в совокупности с методом конечных элементов дал возможность разработать порядок расчета изменения микроструктуры металла в процессах горячего деформирования, который можно

представить в виде блок-схемы (рис. 3.12).

Имея данные по микроструктуре поковки в процессековки легко можно выйти на микроструктуру готового изделия после охлаждения и ряда термических обработок, применяя диаграммы превращений металлов.

3.3.3 Примеры расчета эволюции микроструктуры стали в процессахковки валов, плит и дисков

Ковка плит. Для разработанного режима протяжки бойком со скосом проведено моделированиековки плиты, на основании которого с использованием модели эволюции микроструктуры стали Mn18Cr18N произведен расчет размеров зерна в поковке, откованной по предлагаемому режиму и по традиционному [277]. Расчет микроструктуры в поковке проводился для точек указанных на рис. 3.13. Результатом расчета стали поля распределения зерна по поперечному сечению поковки.

Из рис. 3.13 видно, что поковка, полученная по новому режиму, будет иметь в объеме более равномерную структуру, в то время, как поковка, полученная по традиционной технологии, будет иметь зоны с крупным зерном, что отрицательно скажется на механических свойствах изделия.

Ковка валов. Проведено моделирование изменения размера зерна в заготовке в процессековки поковок типа вал по схеме протяжки через пластину плоскими бойками и с дополнительным профилированием ступенчатыми бойками. На рис. 3.14 показаны поля распределения размеров зерна в поперечном сечении заготовки на различных стадияхковки. На рис. 3.14 (а) показано поперечное сечение заготовки после протяжки ее плоскими бойками. Видно, что наименьшее зерно расположено в центральной части заготовки. Это объясняется тем, что при ковке плоскими бойками наибольшие деформации сосредотачиваются в осевой зоне заготовки.

На рис. 3.14 б показано поперечное сечение заготовки после ее профилирования ступенчатыми бойками и последующей правки плоскими бойками. На рис. 3.14 в показано сечение поковки, полученное ковкой только лишь плоскими бойками. Из рис 3.14 видно, что наименее проработанными явля-

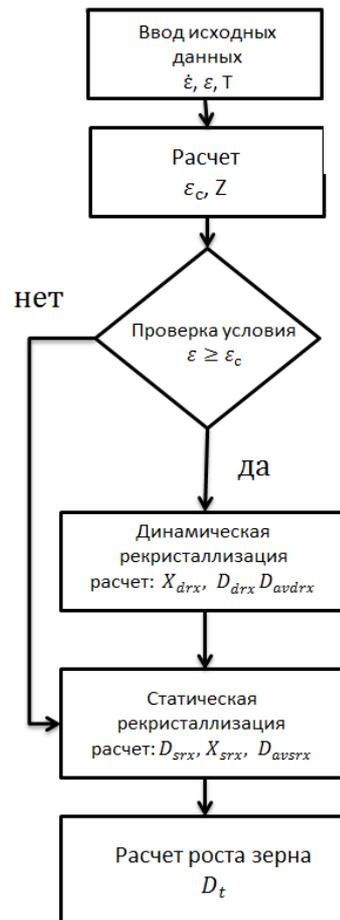


Рисунок 3.12 - Алгоритм расчета размера зерна при одноэтапном деформировании

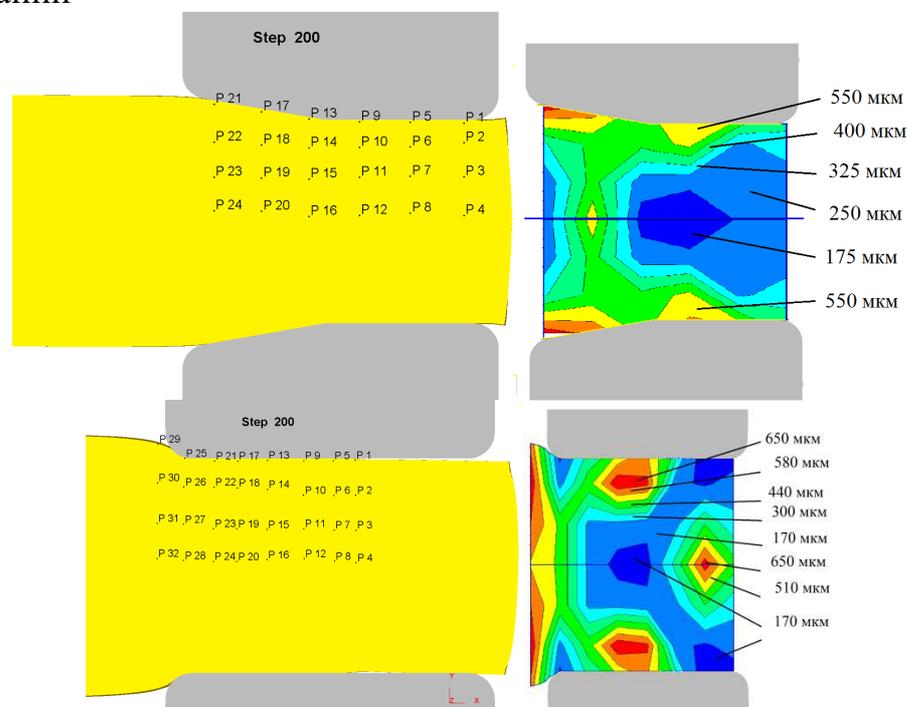


Рисунок 3.13 - Поля распределения зерна в поперечном сечении заготовки откованной по (а) предлагаемому способу и (б) традиционному способу

ются участки поковки, расположенные у ее поверхности. Также можно заключить, что поковка, полученная ковкой с применением ступенчатых бойков, в среднем имеет более мелкое зерно, нежели поковка, откованная по традиционной технологии.

Ковка дисков. На основании проведенного моделирования получены поля распределения логарифмических деформаций и скоростей деформаций в поперечном сечении заготовки. С использованием полученных данных произведен расчет размеров зерна в поковке и получены поля распределения зерна в поперечном сечении заготовки. Анализ результатов расчета позволяет сделать вывод о том, что в поковке, полученной осадкой в области зоны затрудненных деформаций, зерно металла будет крупнее, нежели в центральной части поковки. Размер зерна отличается в 2,5-3 раза, что говорит об анизотропии механических свойств металла.

Из рис. 3.15 видно, что наименьшая неравномерность распределения зерна в теле поковки будет при ковке по новому способу.

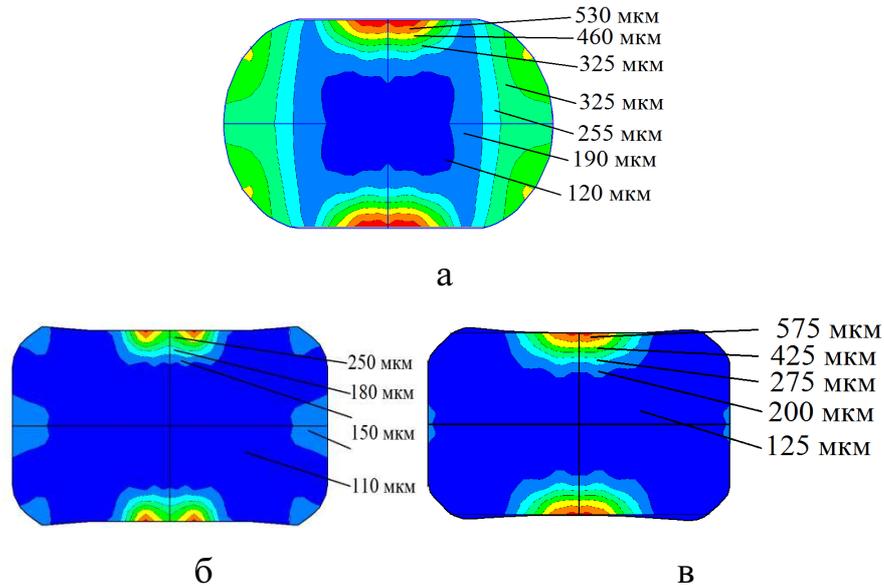


Рисунок 3.14 - Поля распределения размеров зерна в поперечном сечении заготовки полученной протяжкой а – заготовка после обжатия плоскими бойками, б – заготовка после профилирования ступенчатыми бойками и правки плоскими, в – заготовка после ковки плоскими бойками

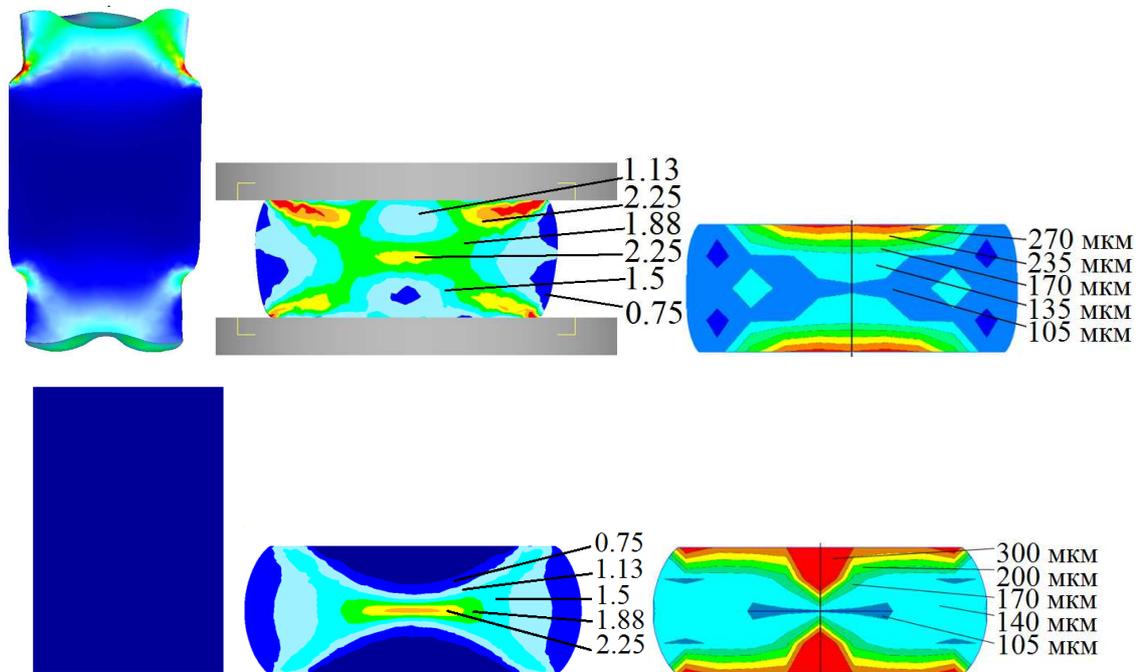


Рисунок 3.15 - Поля распределения логарифмических деформаций и размеров зерна в поперечном сечении заготовки

Выводы

1. Предложен метод расчета технологической деформируемости, который учитывает восстановление пластичности металла при горячем дробном деформировании и позволяет прогнозировать предельное формоизменение заготовки в зависимости от величины дробности деформации и продолжительности выдержки заготовки между дробными деформированиями. Проведен расчет процесса изотермической осадки цилиндрического образца, который показал, что при монотонной осадке максимальная относительная степень осадки составляет 0,63. При дробном деформировании с единичным обжатием равным 0,25 и паузами между осадками, возможно, повысить предельную степень осадки до 0,75 без разрушения образца.

2. Разработан метод построения кривых течения металла при горячем пластическом деформировании по справочным характеристикам материала, таким как предел прочности и предел текучести. Метод позволяет на основании использования коэффициента пропорциональности материала к температурно-скоростным условиям деформирования строить кривые течения металла в широком диапазоне скоростей по минимальному набору данных.

3. На основании обработки экспериментальных и литературных данных по растяжению таких групп металлов, как углеродистые стали, низколегированные и легированные стали, получены зависимости коэффициента пропорциональности материала от температурно-скоростных условий деформирования. Выявлены зависимости данного коэффициента от температуры, группы материала и промежутков скоростей деформации. Эти зависимости представлены в линейном виде. Установлено, что кривые течения материала, построенные по предлагаемому методу с использованием справочных характеристик материала, отклоняются от экспериментально полученных кривых на 10-20% для различных температур и скоростей деформации.

4. Предложена методика расчета эволюции микроструктуры металла в процессах ковки крупных поковок, которая учитывает такие физические

процессы в металле как динамическая, статическая рекристаллизация и рост зерен при выдержке. Предложена блок-схема расчета размера зерна в процессе горячего деформирования. Проведен расчет изменения микроструктуры металла в процессах протяжки плит, валов иковки дисков. Установлены поля распределения размеров зерна в поперечном сечении заготовки и рациональные режимыковки, позволяющие снизить неравномерность его распределения.

РАЗДЕЛ 4

УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ЗАГОТОВКИ В ПРОЦЕССЕ ПРОТЯЖКИ ВИДОИЗМЕНЕНИЕМ ФОРМЫ ИНСТРУМЕНТА

4.1 Исследование процесса протяжки цилиндрической заготовки скошенными бойками

В разделе 2 определили, что одной из перспективных схемковки является ковка скошенными бойками [278-284]. МКЭ проведено исследование процесса протяжки бойками со скосом (рис. 4.1) величиной 5, 10°, 15° и 20°. Материал заготовки - сталь 35, температура заготовки 1100°С, скорость деформирования 15 мм/с. Коэффициент теплоотдачи 5 Вт/м²·°С. Заготовка для моделирования принималась в виде гладкого цилиндра диаметром 1000 мм, ширина бойков принималась равной от 600 до 1400 мм.

По результатам моделирования получены поля распределения интенсивности логарифмических и сдвиговых деформаций (рис. 4.2, 4.5). Анализ картин полей распределения интенсивности логарифмических деформаций показывает, что с увеличением хода ползуна прессы область наибольших деформаций смещается от поверхности заготовки к ее центру и достигает там наибольших значений. Установлено, что угол скоса бойков на величину интенсивности логарифмических деформаций оказывает незначительное влияние, что подтверждается графиком, отражающим распределение интенсивности логарифмических деформаций по ширине заготовки (рис. 4.3). Кроме того, вычислены средневзвешенные по площади деформации в заготовке и их зависимость от угла скоса бойков (рис. 4.4).

$$\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{\sum(\varepsilon_{ii} \cdot F_i)}{\sum(F_i)},$$

где ε_{ii} - величина интенсивности логарифмической деформации i - ой области заготовки, F_i - площадь области заготовки с величиной интенсивности деформаций ε_{ii} .

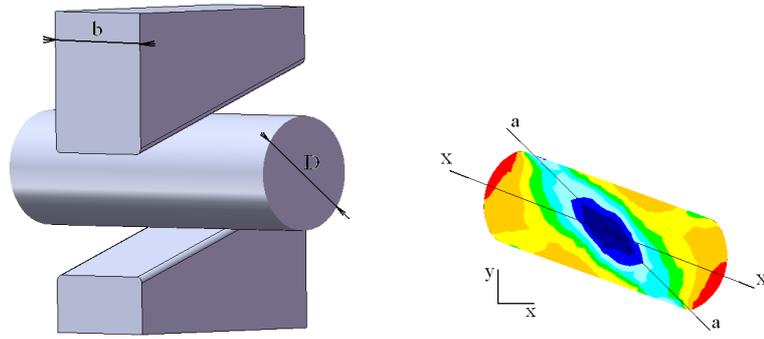


Рисунок 4.1 - Общий вид инструмента с заготовкой и поперечное сечение заготовки после протяжки

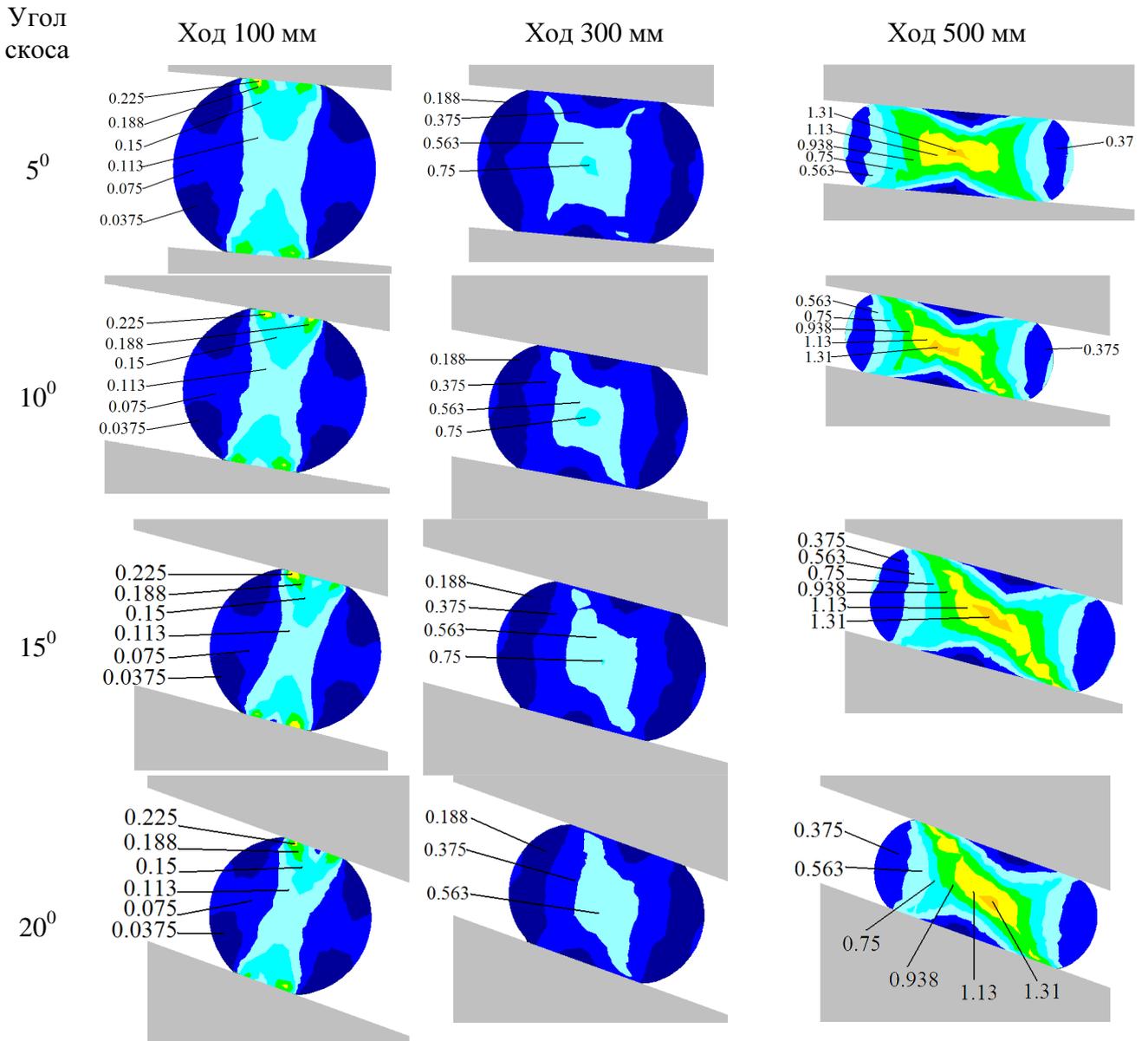


Рисунок 4.2 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций по поперечному сечению заготовки при внедрении в нее бойка со скосом

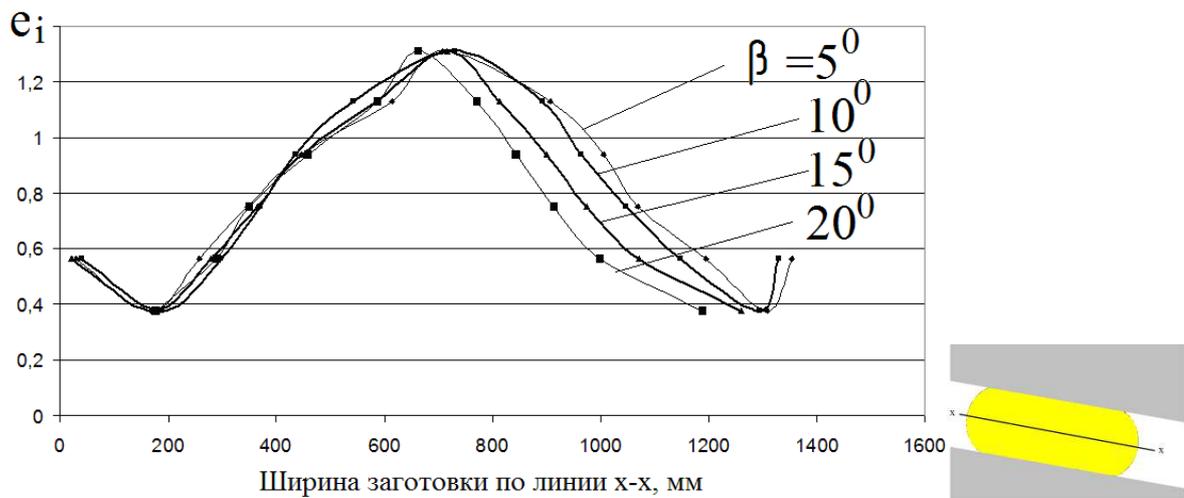


Рисунок 4.3 - Распределение интенсивности логарифмических деформаций по поперечному сечению заготовки при внедрении в нее бойка со скосом

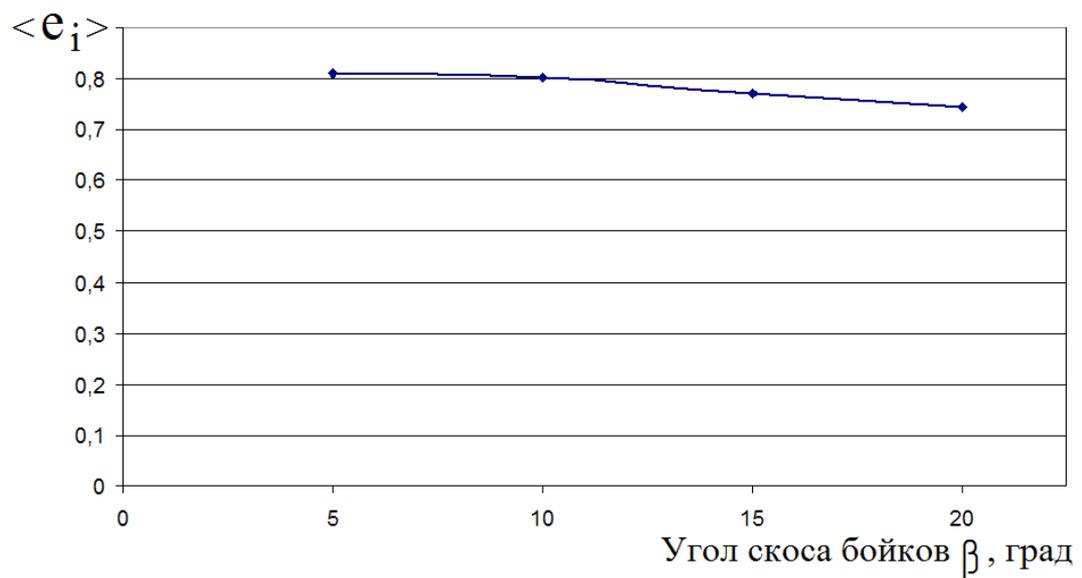


Рисунок 4.4 - Зависимость средневзвешенной интенсивности логарифмических деформаций в заготовке при протяжке бойками со скосом от угла скоса

Угол
ско-
са

Ход 100 мм

Ход 300 мм

Ход 500 мм

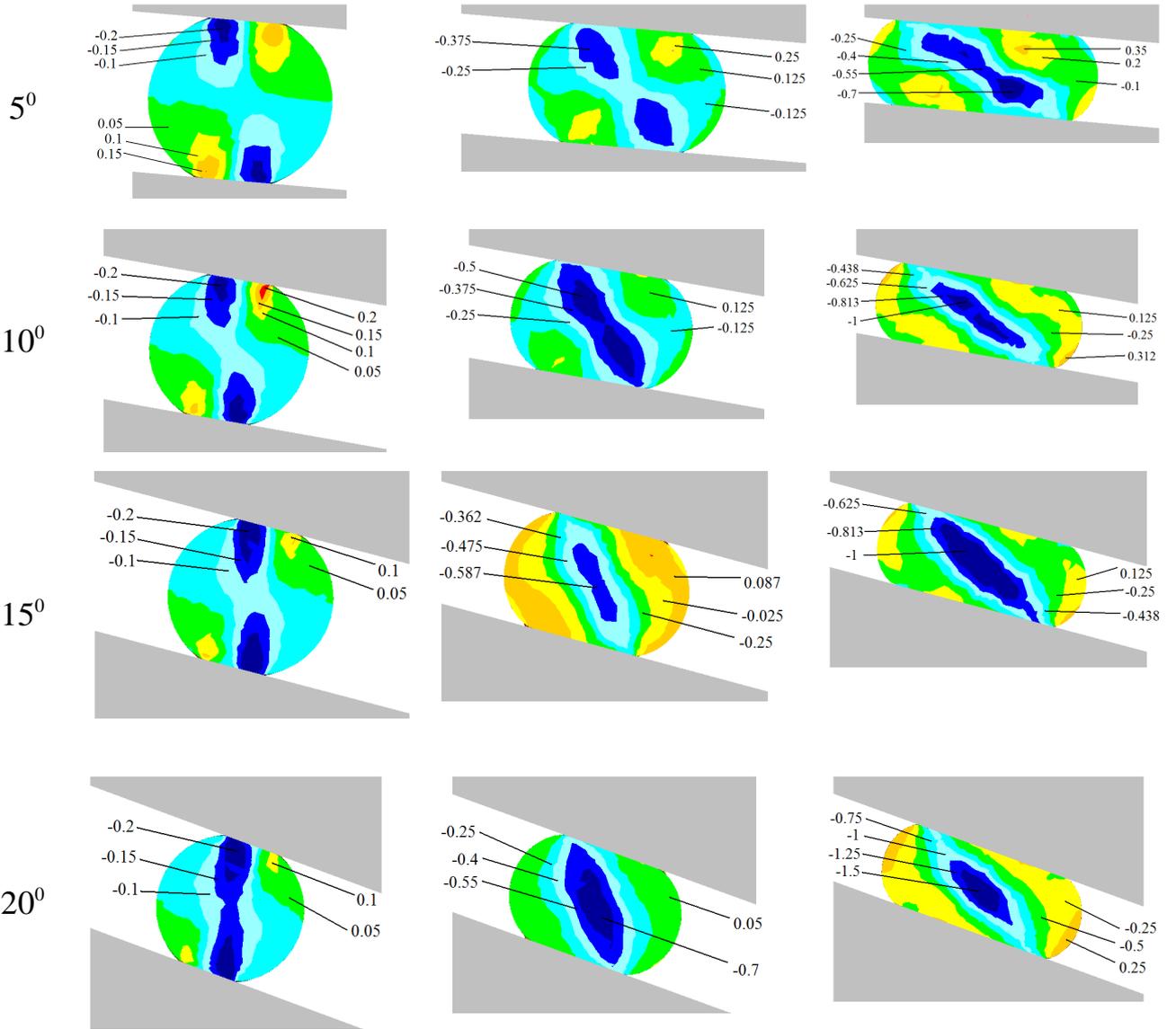


Рисунок 4.5 - Распределение сдвиговых деформаций в поперечной к заготовке плоскости

Из графика видно, что при увеличении угла скоса бойка средневзвешенная интенсивность логарифмических деформаций незначительно уменьшается. Из рисунка 4.2 видно, что с увеличением угла скоса бойков зона наибольшей интенсивности деформаций становится более вытянутой вдоль поверхности сдвига.

На рис. 4.5 представлены картины полей распределения сдвиговых деформаций по сечению заготовки по ходу ее деформирования бойками со скосом. Видно, что зона наибольших сдвиговых деформаций распространяется через все сечение заготовки по ее диагонали. С увеличением хода перемещения бойка величина сдвиговых деформаций также возрастает. Видно, что с увеличением угла наклона бойков величина сдвиговых деформаций возрастает. Так если при протяжке бойком с углом скоса 5° величина сдвиговых деформаций достигала $-0,55$ единиц и размер данной зоны незначителен в объеме заготовки, то при протяжке бойком со скосом 20° сдвиговые деформации достигают $-1,5$ единиц, что практически в 3 раза больше.

Таким образом, при использовании бойков с различным углом скоса интенсивность логарифмических деформации в заготовке при протяжке практически не изменяется и имеет одну и ту же величину, но при этом уровень сдвиговых деформаций отличается в разы.

Согласно работам Тюрина В.А., наличие больших сдвиговых деформаций в заготовке при протяжке будет способствовать измельчению зерен слитка, более интенсивному завариванию дефектов и повышению уровня механических свойств. Это позволяет рекомендовать использование бойков с достаточно большим углом скоса.

Проведено моделирование процесса протяжки верхним бойком со скосом и нижним плоским бойком. Результаты моделирования представлены на рис. 4.6, 4.7. Видно, что при внедрении бойка со скосом в заготовку она начинает изгибаться в процессе деформирования, что связано с большим обжимом заготовки с одной стороны за счет наличия скоса на верхнем бойке. Поковка при такой протяжке будет требовать дополнительной правки в дру-

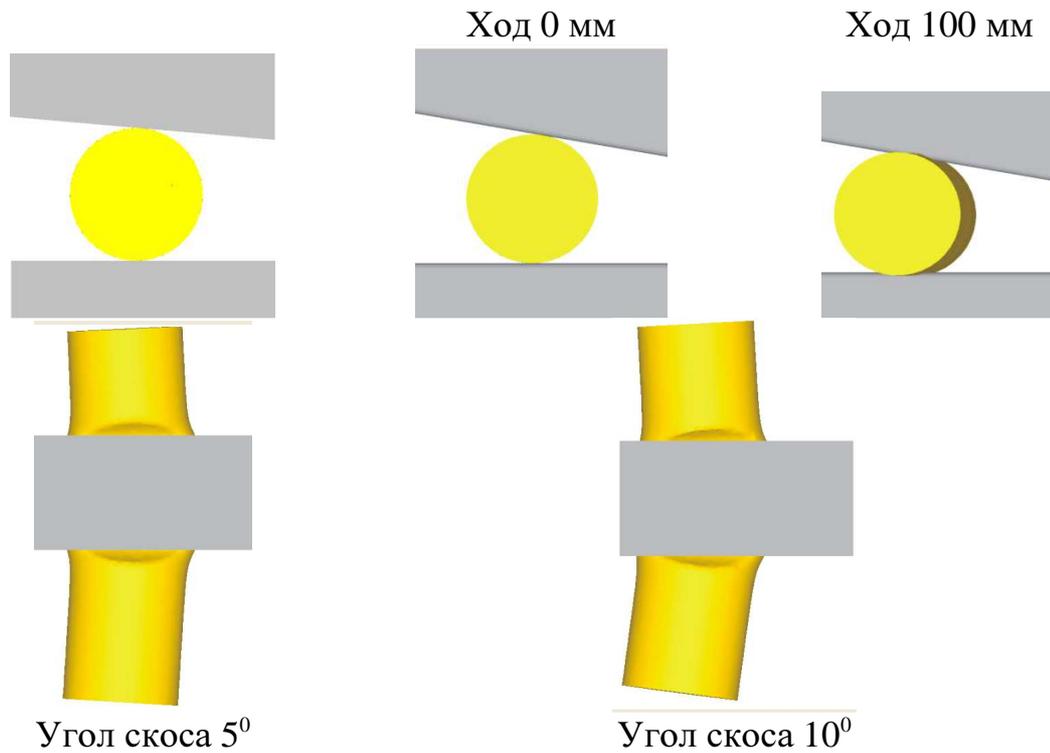


Рисунок 4.6 - Результаты моделирования процесса внедрения бойка со скосом в заготовку

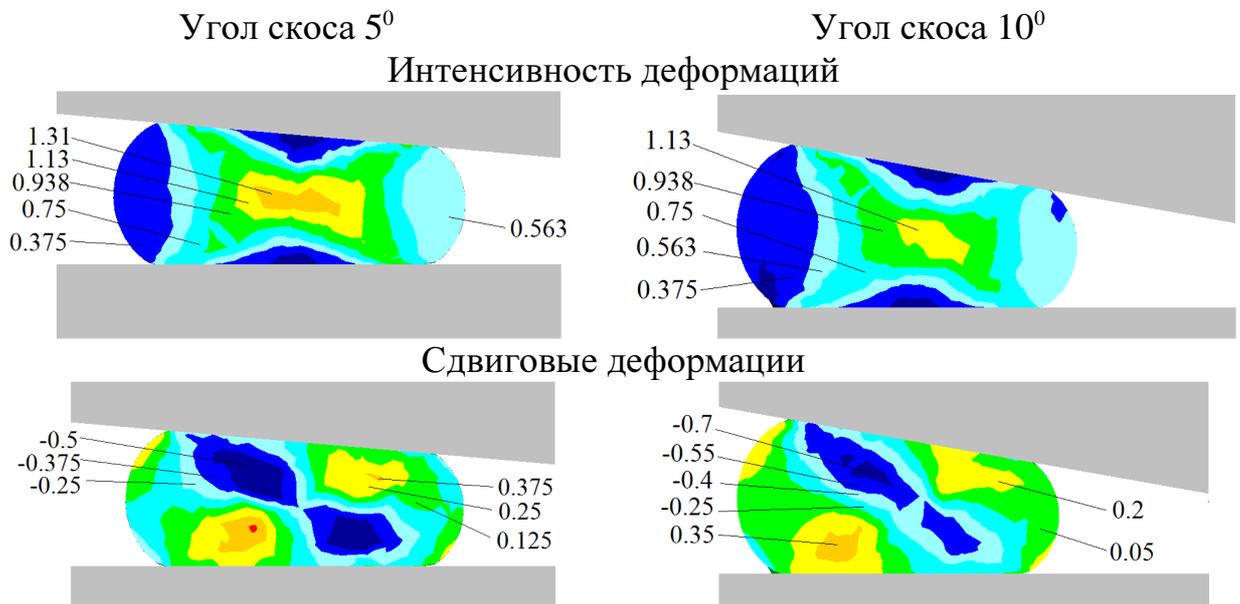


Рисунок 4.7 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций и сдвиговых деформаций по сечению заготовки при деформировании бойком со скосом на плоском бойке (ход равен 500 мм)

гих бойках. Кроме этого, при движении бойка возникают силы, действующие на заготовку, которые стремятся сместить ее из-под бойка. Из рисунка 4.6 видно, что уже при использовании бойка со скосом 10^0 заготовка начинает выскальзывать. При протяжке по данной схеме в манипуляторе будут возникать большие горизонтальные силы, которые будут стремиться вырвать заготовку.

На рис. 4.7 приведены поля распределения логарифмических деформаций (интенсивности и сдвиговых). Анализ этих полей показывает, что угол скоса имеет незначительное влияние на величину интенсивности логарифмических деформаций. Величина сдвиговых деформаций с увеличением угла скоса бойка увеличивается незначительно, кроме того сравнение с деформациями, возникающими при протяжке двумя бойками со скосом показывает, что по схеме, приведенной на рис. 4.6 деформации меньше на 20-30% чем при ковке по схеме с двумя скошенными бойками. Данные результаты не позволяют рекомендовать протяжку заготовок по схеме с верхним скошенным бойком и нижним плоским.

Дополнительно проведено моделирование протяжки верхним и нижним бойками со скосом, направленным в различные стороны (рис. 4.8). Установлено, что заготовка будет стремиться перемещаться в поперечном направлении, что в свою очередь, приведет к дополнительным нагрузкам на манипулятор. Кроме того, искривление заготовки в продольном направлении также будет происходить, что потребует либо дополнительной правки заготовки, либо применения специального режима протяжки.

На основе проведенного анализа можно заключить, что из рассмотренных схем наиболее целесообразной является схема с двумя скошенными бойками со скосом в одном направлении, т.к. она обеспечивает наибольшие значения сдвиговых деформаций в заготовке, и при протяжке по данной схеме не будут возникать силы, перемещающие заготовку в горизонтальном направлении поперек ее оси.

Распределение интенсивности логарифмических деформаций и дефор-

маций сдвига в поперечной плоскости заготовки в зависимости от относительной подачи приведены в табл. 4.1, 4.2.

На основании полученных данных установлено, что в процессековки скошенными бойками при увеличении относительной подачи, интенсивность логарифмических деформаций увеличивается, как видно из табл. 4.1. Увеличивается область наибольших деформаций, которые сосредотачиваются в плоскости наибольших сдвигов. Установлено, что при увеличении относительной подачи заготовки увеличивается уширение, т.е. течение металла преимущественно в поперечном сечении заготовки. Кроме того данные, приведенные в табл. 4.1, позволяют сделать вывод о том, что с увеличением угла скоса бойков зона наибольших деформаций сосредотачивается в плоскости «а-а» (см. рис. 4.1), тем самым уменьшается равномерность распределения деформаций по сечению заготовки после единичного обжатия.

В табл. 4.2 приведены поля распределения сдвиговых деформаций γ_{xy} в поперечном сечении заготовки, по этим данным построены графические зависимости средних деформаций сдвига $\langle \gamma_{xy} \rangle$ вдоль линии интенсивного сдвига «а-а» от хода бойка, его угла скоса и относительной подачи \bar{b} (рис. 4.9-4.10). Средняя деформация сдвига и относительная подача определялись по следующим формулам:

$$\langle \gamma_{xy} \rangle = \sum_n \gamma_{xy} / n; \bar{b} = \frac{b}{D},$$

где n – количество замеров величины сдвиговых деформаций вдоль линии «а-а» (выполнялось двадцать замеров).

Анализ рис. 4.9, 4.10 позволяет сделать вывод о том, что с увеличением обжатия заготовки бойками средняя величина логарифмических деформаций сдвига вдоль линии сдвига увеличивается по прямо пропорциональной зависимости. Также установлено, что с увеличением угла скоса бойков эта зависимость становится более «крутой», т.е. деформации начинают расти бьуст-

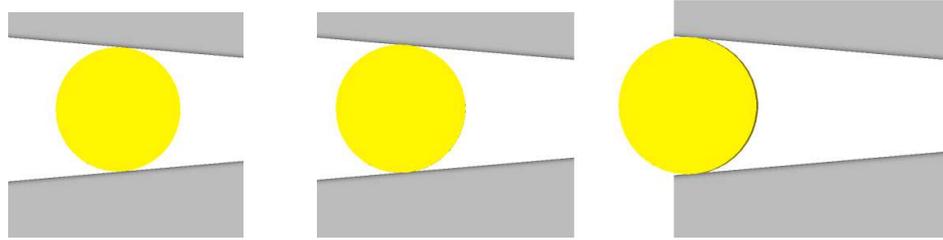


Рисунок 4.8 - Результаты моделирования процесса обжатия заготовки двумя бойками разнонаправленным скосом

Таблица 4.1 – Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций по поперечному сечению заготовки при протяжке скошенными бойками

| Угол скоса | относительная по- дача 0,6 | относительная подача 1 | относительная подача 1,4 | |
|---------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------------|--|
| 5° | | | | 1.5 1.31 1.13 0.938 0.75 0.563 0.375 0.188 0 |
| 10° | | | | |
| 15° | | | | |
| 20° | | | | |

Таблица 4.2 – Поля распределения сдвиговых в поперечной плоскости заготовки логарифмических деформаций при протяжке скошенными бойками

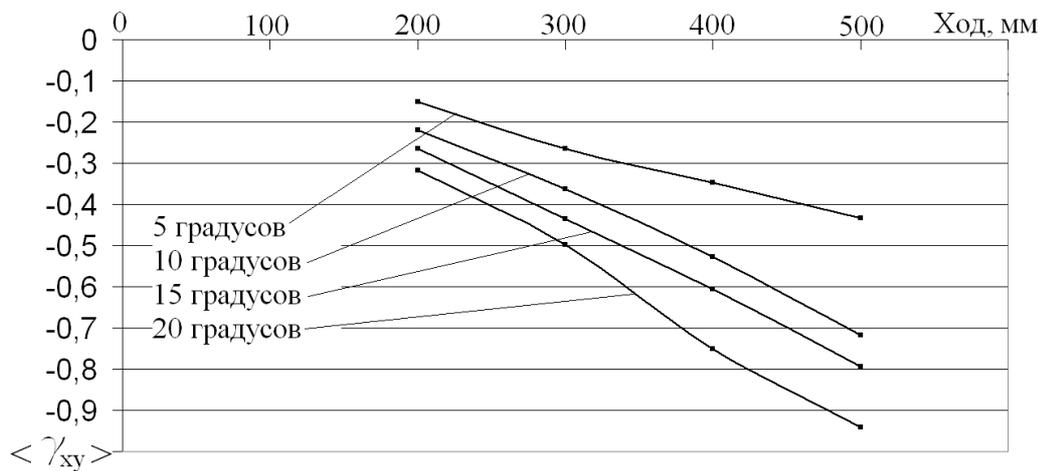
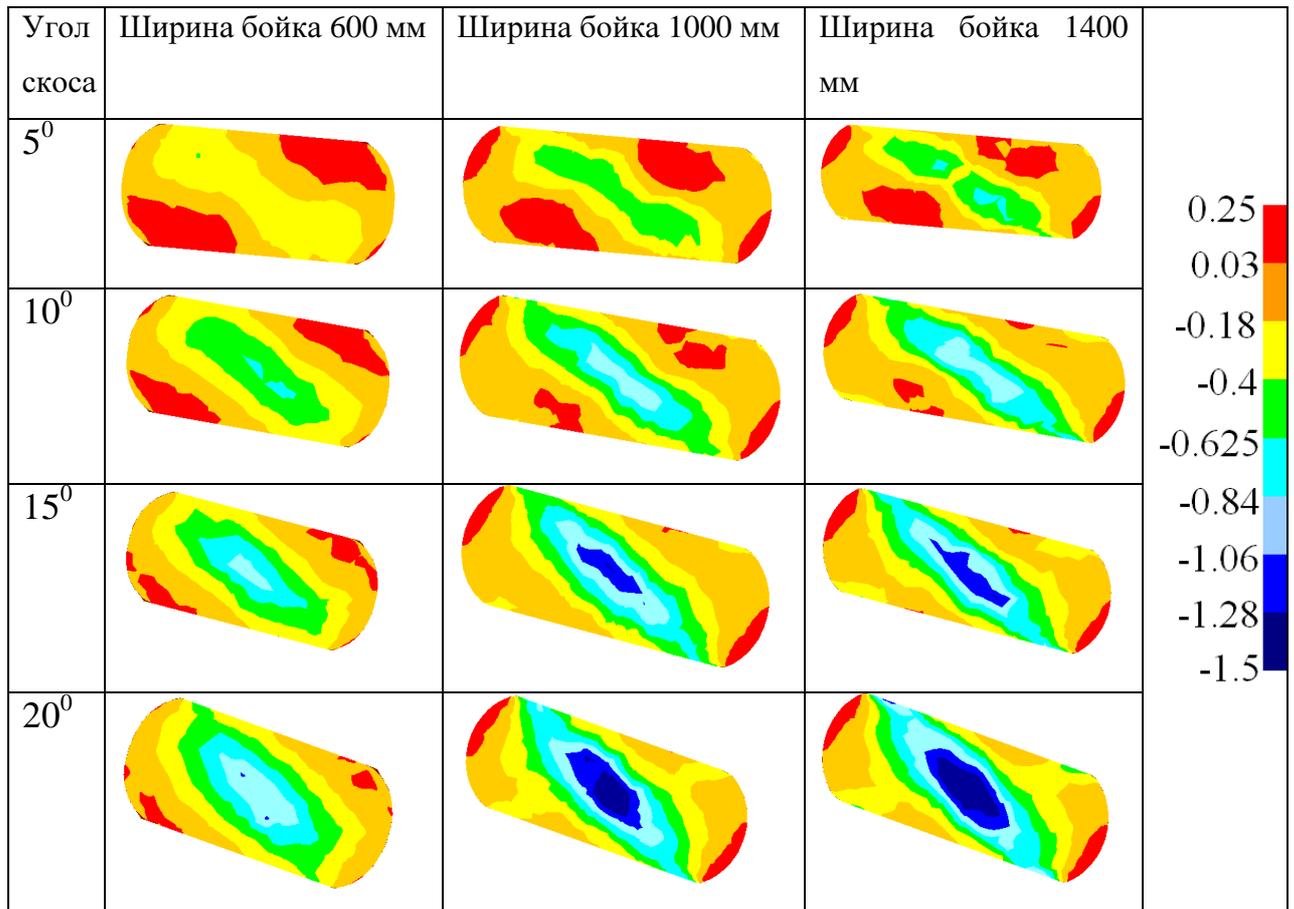


Рисунок 4.9 - Влияние величины обжатия и угла скоса бойков на величину средних сдвиговых деформаций вдоль линии интенсивного сдвига «а-а» (см. рис. 4.1) при относительной подаче 1,4

рее по ходу движения бойка. При увеличении обжатия от 200 до 500 мм средняя величина сдвиговых деформаций вдоль линии интенсивного сдвига «а-а» увеличивается практически в три раза: для бойков с углом скоса 5° от -0,15 до -0,43, 10° от -0,22 до -0,71, 15° от -0,26 до -0,8, 20° от -0,31 до -0,94.

На рис. 4.10 приведена зависимость величины средних сдвиговых деформаций от относительной подачи и угла скоса бойков, которая позволяет сделать вывод о том, что при увеличении относительной подачи от 0,6 до 1 средняя величина сдвиговых деформаций вдоль линии интенсивного сдвига увеличивается в среднем на 25%. Дальнейшее увеличение относительной подачи от 1 до 1,4 не приводит к существенному увеличению уровня сдвиговых деформаций.

Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что для обеспечения наибольшего уровня сдвиговых деформаций в заготовке необходимо обеспечить при ковке бойками со скосом, величина которого должна находиться в пределах $10-15^{\circ}$, относительную подачу равную 1 или близкую к ней. Ковка должна вестись с единичными обжатиями равными около 30%. В этом случае в заготовке возникает область интенсивных сдвиговых деформаций, которая проходит вдоль линии «а-а» (см. рис. 4.1).

Для качественной проработки заготовки и уменьшения неравномерности распределения сдвиговых деформаций по сечению заготовки предложен режим ковки бойками со скосом. Способ заключается в кантовке заготовки при протяжке по следующей схеме «обжатие - кантовка на 90° - обжатие – кантовка на 45° – обжатие – кантовка на 90° - обжатие». При этом в заготовке возникают несколько областей интенсивного, сдвига находящихся под углом друг к другу и охватывающих весь объем заготовки.

Проведено исследование напряженного состояния заготовки при протяжке бойками со скосом. Установлено, что при деформировании заготовки в ее центре средние напряжения имеют отрицательные значения, т.е. там возникает напряженное состояние всестороннего сжатия, благоприятное для «залечивания» внутренних дефектов в виде несплошностей. Положительные

напряжения возникают только в периферийных слоях заготовки, и эта область достаточно мала. Проведен анализ влияния угла скоса бойков на величину средних напряжений в заготовке и построены графики распределения средних напряжений по сечению заготовки (рис. 4.11). Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что угол скоса бойков не оказывает существенного влияния на величину и характер распределения средних напряжений в заготовке.

Проведен анализ влияния величины угла скоса бойков на заковку внутренних несплошностей заготовки. Для этого моделировали протяжку цилиндрической заготовки диаметром 1000 мм, в которой искусственно создавали сквозные отверстия диаметром 100 мм. Отверстия выполнены в центре заготовки и на расстоянии 200 и 350 мм от ее центра. Общее количество отверстий в заготовке 13.

Анализ заковки несплошностей определяли по соотношению текущей общей площади несплошностей S к общей начальной S_0 . По результатам моделирования и расчетов построен график зависимости относительной текущей площади несплошностей от хода бойков при обжатии заготовки (рис. 4.12). Из графика видно, что по ходу обжатия бойками общая площадь несплошностей уменьшается, и при обжатии на 50% общая площадь несплошностей составляет 10% от первоначальной площади, при этом большая часть отверстий «схлопнулась». Не закрылось четыре отверстия, находящихся ближе к боковой поверхности заготовки. Установлено, что угол скоса бойков на закрытие внутренних дефектов не оказывает существенного влияния.

Проведены экспериментальные исследования процесса протяжки заготовки цилиндрической формы скошенными в плане бойками. Для моделирования процесса протяжки были изготовлены специальные бойки со скосом (рис. 4.13) и плоские бойки. Скос бойков 10° и 20° , ширина бойков 28 мм. Бойки крепились в специальном переналаживаемом штампе, который, в свою очередь, устанавливался в пресс (рис. 4.14). Диаметр заготовки 28 мм. Заготовки получали прессованием, материал заготовок свинец С1. Деформирова

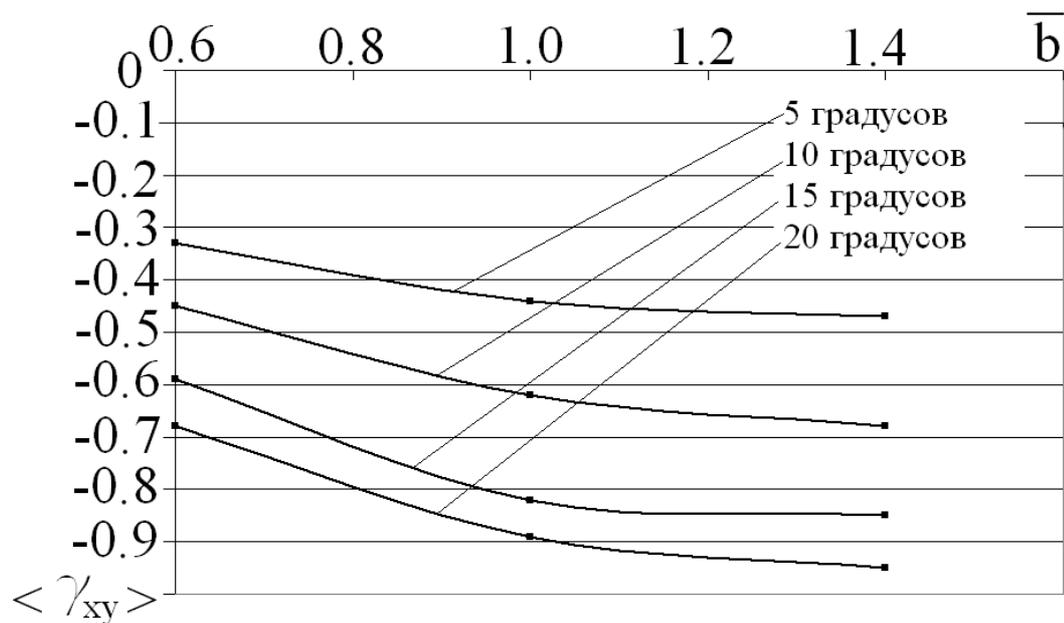


Рисунок 4.10 - Влияние величины относительной подачи и угла скоса бойков на величину средних сдвиговых деформаций вдоль линии интенсивного сдвига «а-а» (см. рис. 4.1) (ход обжатия 500 мм при диаметре заготовки 1000 мм)

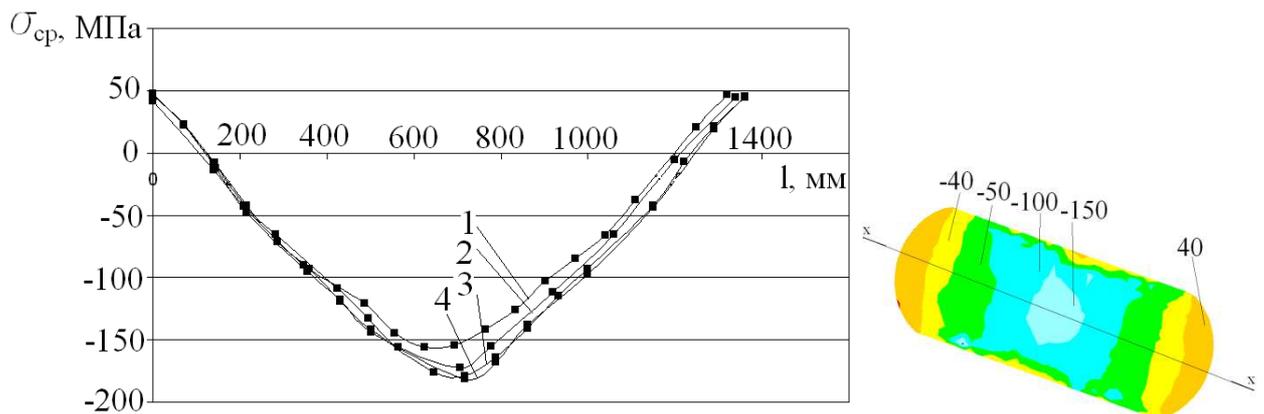


Рисунок 4.11 - График распределения средних напряжений по сечению заготовки вдоль линии «х-х» при ковке протяжкой скошенными бойками (1 – 20°, 2 – 15°, 3 – 10°, 4 – 5°) и поле распределений средних напряжений (МПа) по поперечному сечению заготовки (ход бойка 500 мм)

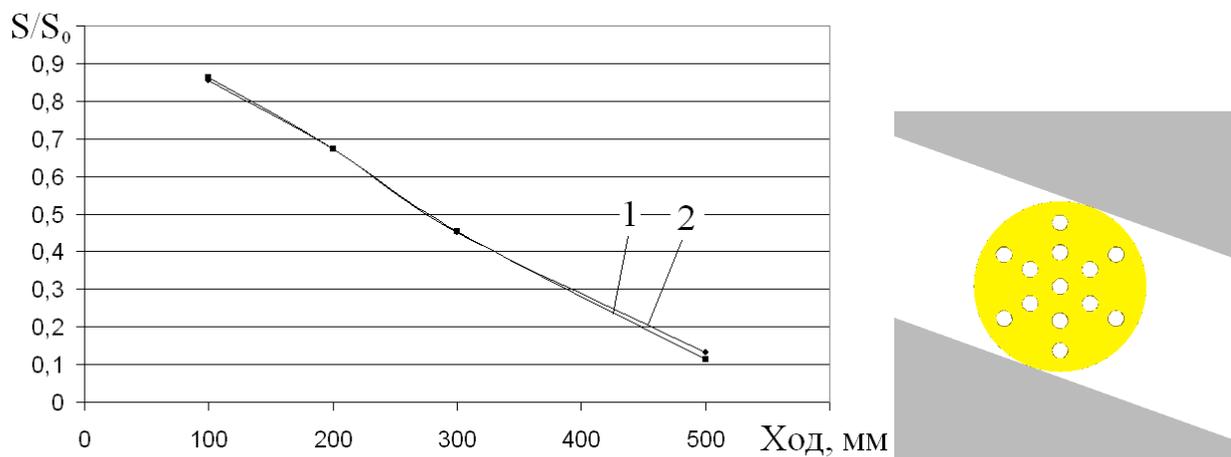


Рисунок 4.12 - График зависимости относительной площади несплошностей заготовки от хода ползуна прессы при обжатии заготовки скошенными бойками (1 – угол скоса 20° , 2 – угол скоса 5°)



Рисунок 4.13 - Общий вид бойков со скосом



Рисунок 4.14 - Общий вид штампа установленного в прессе со скошенными бойками

ние свинца при комнатной температуре позволяет моделировать процесс горячего деформирования среднеуглеродистой стали.

Проведена ковка заготовки протяжкой с круглого сечения диаметром 28 мм на круглое сечение диаметром 20 мм по схеме, которая заключается в определенной очередности обжатий, кантовок и подач, причем кантовку на заданный угол. Данная схема протяжки обеспечивает наилучшую проработку заготовки по сечению, т.е. сечение заготовки равномерно прорабатывается сдвигом. Протяжка проводилась бойками со скосом 20° .

Фотографии переходов от сечения к сечению заготовок при протяжке приведены на рис. 4.15. Форма сечения заготовки после первого обжатия показана на рис. 4.15 а, здесь заготовка имеет сечение по форме схожее с сечением после обжатия плоскими бойками. На рис. 4.15, б показано сечение заготовки после ее кантовки на 90° и обжатия, сечение заготовки имеет форму ромба. После первых двух проходов в сечении заготовки появляются две области больших сдвиговых деформаций. На рис. 4.15, в показано сечение заготовки после ее кантовки на 45° и обжатия. Сечение заготовки принимает более сложную форму, имеющую очертания овала. На рис. 4.15, г, д показано сечение заготовки после ее кантовки на 90° и 45° и обжатий. После последнего прохода заготовка имеет форму близкую к кругу (рис. 4.15 е). Дальнейшей ковкой заготовки по предложенной схеме возможно достичь более правильной формы заготовки.

С помощью метода координатных сеток проведено исследование деформированного состояния заготовок при протяжке скошенными бойками с различным углом скоса. Образцы изготавливались из свинца, сетка наносилась в поперечном сечении заготовки царапанием, шаг сетки 2 мм.

Деформирование заготовок производилось в несколько этапов, обжатие со степенью деформации $\varepsilon = 18,5\%$ и $\varepsilon = 29..33\%$. После каждого обжатия производилось сканирование поперечной плоскости заготовки. Бойки при протяжке использовались со скосом 0° , 10° и 20° .

Обработка сетки производилась по методике, предложенной Колмого-

ровым В.Л. Измерение сетки производились в программе КОМПАС. Одним из наиболее важных параметров для определения эффективности использования специального инструмента является уровень сдвиговых деформаций. Сдвиговые деформации в поперечной плоскости образца определяли по формуле:

$$\gamma_{xy} = \frac{\pi}{2} - \alpha,$$

где α - угол искажения ячейки координатной сетки (рис. 4.16).

Анализ полей распределения сдвиговых деформаций по сечению заготовки позволяет сделать вывод о том, что при протяжке заготовки плоскими бойками с увеличением степени деформации уровень сдвиговых деформаций возрастает. Так при деформировании заготовки на 18,5% наибольшие сдвиговые деформации достигают значения 0,15 при деформировании на 29% сдвиговые деформации возрастают до значения 0,3.

Увеличение угла скоса бойков до 20^0 позволяет повысить уровень сдвиговых деформаций в заготовке. Так при обжатии заготовки на 18,5% бойками с углом 10^0 сдвиговые деформации достигают 0,2, бойками с углом 20^0 они достигают 0,3, что в 2 раза больше деформаций при протяжке бойками без скоса. При обжатии на 30% для бойков с углом 10^0 сдвиговые деформации достигают 0,3, для бойков с углом скоса 20^0 достигают 0,65.

Таким образом, видно, что чем больше угол скоса бойка, тем больше уровень сдвиговых деформаций в заготовке, однако увеличение угла скоса бойков непременно вызывает сложности в реализации процесса протяжки, связанные с большими сдвигающими силами, что требует определенного решения.

Диаметр заготовки принимался равным диаметру заготовки, используемой при физическом моделировании 28 мм, ширина бойков 28 мм. Относительная подача при моделировании принималась равная 1. Угол скоса бойков 20^0 и 10^0 . Результатами моделирования являются полученные искажен-

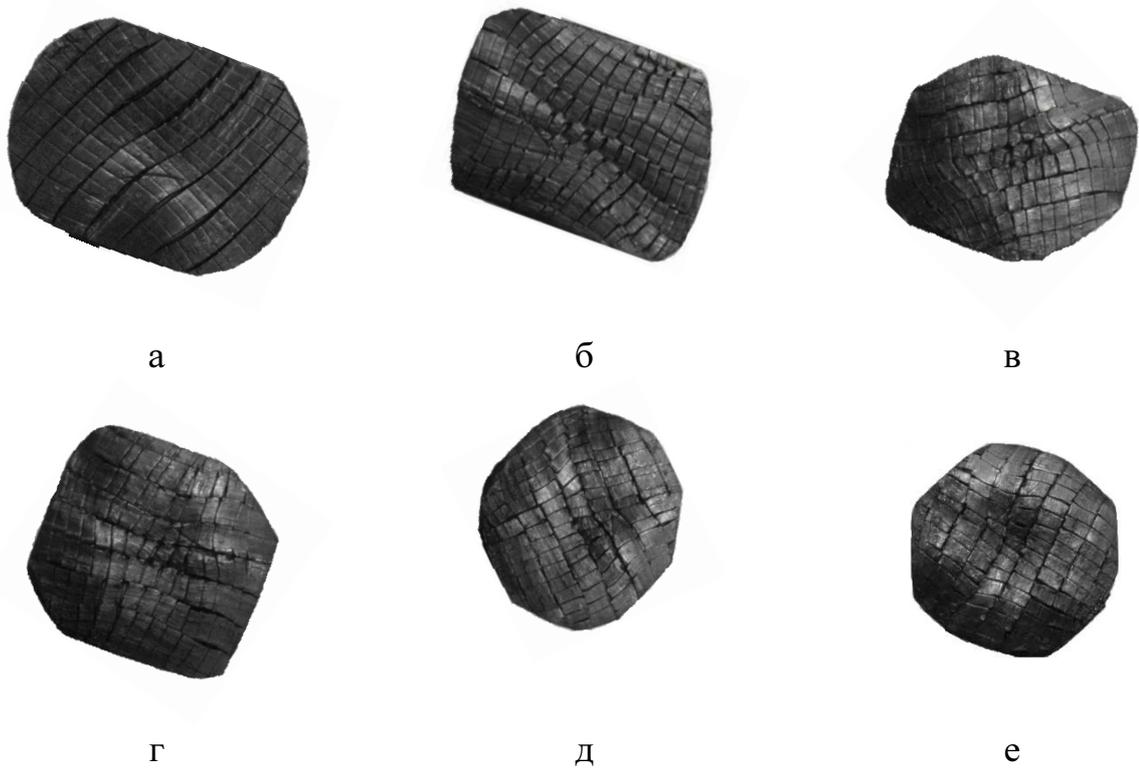


Рисунок 4.15 - Формы сечения заготовки при ковке протяжкой на различных ее стадиях

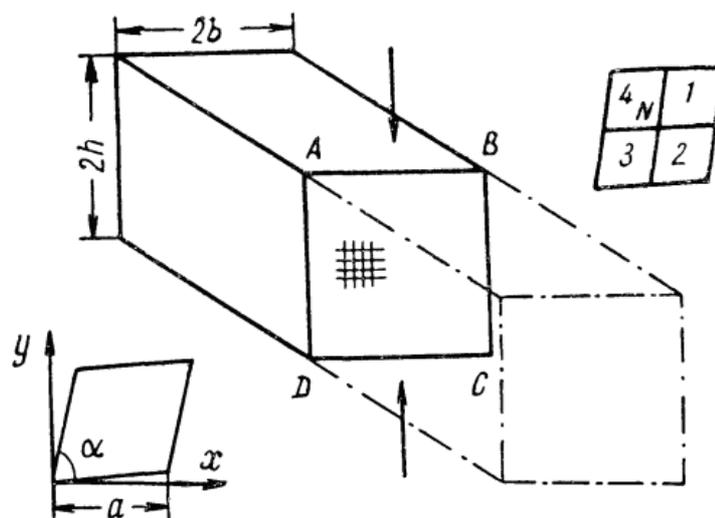
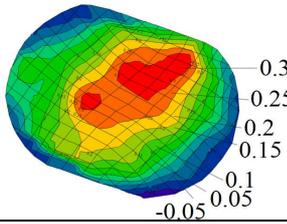
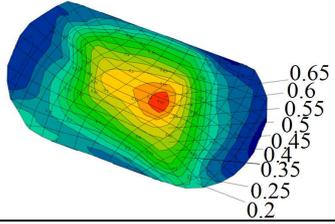
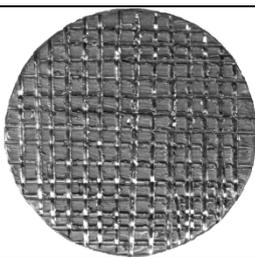
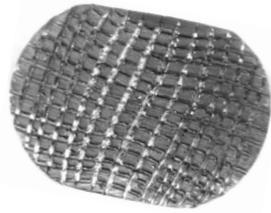
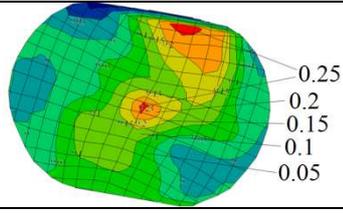
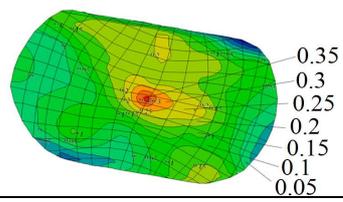
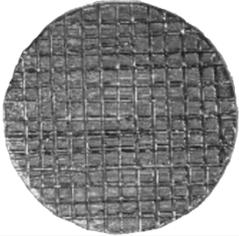
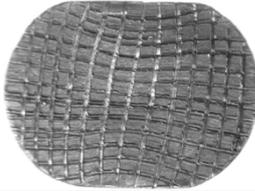
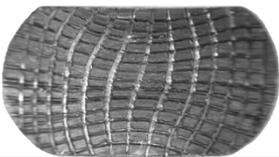
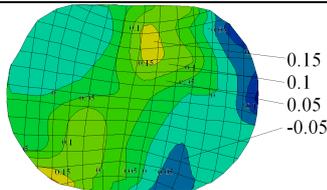
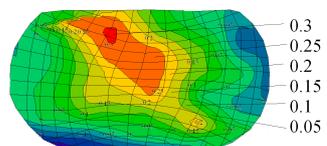


Рисунок 4.16 - Схема образца с нанесенной координатной сеткой и искаженная ячейка сетки

Таблица 4.3 - Фотографии искаженных координатных сеток в поперечном сечении заготовки при протяжке бойками различной конфигурации и поля распределения сдвиговой деформации по сечению заготовки (относительная подача равна единице)

| Угол скоса бойков 20° | | |
|---|--|---|
|  |  |  |
| |  |  |
| $\varepsilon = 0\%$ | $\varepsilon = 18.5\%$ | $\varepsilon = 33.3\%$ |
| Угол скоса бойков 10° | | |
|  |  |  |
| |  |  |
| $\varepsilon = 0\%$ | $\varepsilon = 18.5\%$ | $\varepsilon = 29\%$ |
| Угол скоса бойков 0° | | |
|  |  |  |
| |  |  |
| $\varepsilon = 0\%$ | $\varepsilon = 18.5\%$ | $\varepsilon = 29\%$ |

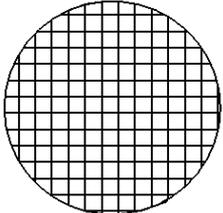
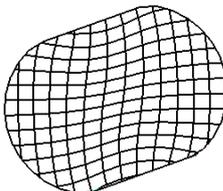
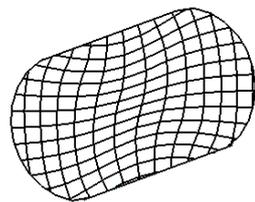
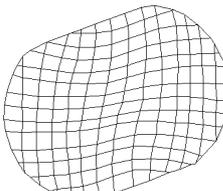
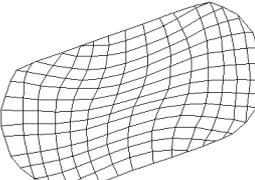
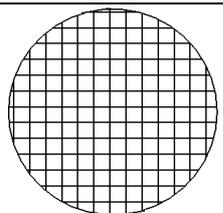
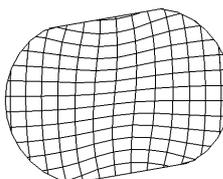
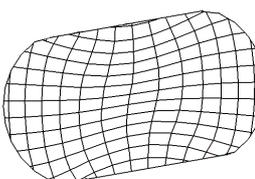
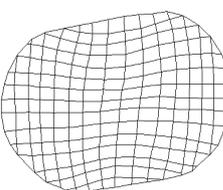
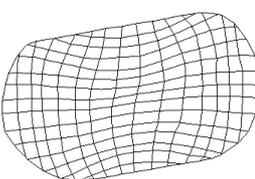
ные координатные сетки на различных этапах деформирования заготовки (табл. 4.4). Проведено сравнение координатных сеток, полученных с помощью МКЭ и экспериментально. На основании визуального сравнения можно сделать вывод о том, что теоретическое решение подтверждается экспериментально, сетка имеет те же характерные искажения.

Проведены экспериментальные исследованияковки цилиндрических заготовок из стали 40Х. Диаметр заготовки 24 мм, протяжку проводили с относительной подачей 0,5-0,6. Заготовку предварительно нагревали до температуры 1150 °С и протягивали до диаметра 19 мм, что соответствует укову 1,5. Общий вид процесса протяжки заготовки бойками различной конфигурации приведен на рис. 4.17.

Заготовка протягивалась не полностью, оттягивалась только ее часть. После протяжки заготовки помещали в печь с температурой 950 °С, и отключали ее. Охлаждение заготовок происходило в течение 24 часов вместе с печью. После охлаждения заготовка разрезалась в поперечном сечении в деформированной и недеформированной частях, изготавливались шлифы и на микроскопе МИМ-8М исследовали микроструктуру. Микроструктура стальных образцов рассматривалась в центре заготовки, фотографии приведены на рис. 4.18.

Из рис. 4.18 видно, что зерна металла заготовки, не подвергнутого деформированию, прошедшего полный отжиг, имеют крупнозерную однородную структуру, что связано с высокой температурой нагрева металла при отжиге и медленным охлаждением его с печью. Зерна металла, деформированного с уковом 1,5 в скошенных бойках, после отжига несколько меньше, чем в плоских бойках. В целом зерна имеют неравномерную величину, наряду с крупными зернами имеются мелкие. Это должно быть связано с различным видом деформации металла.

Таблица 4.4 - Общий вид координатных сеток в поперечном сечении заготовки при протяжке бойками различной конфигурации полученные в МКЭ и экспериментально (относительная подача равна единице)

| Угол скоса бойков 20° | | | |
|--------------------------------|--|---|---|
| МКЭ |  |  |  |
| Эксперимент | |  |  |
| | $\varepsilon = 0\%$ | $\varepsilon = 18.5\%$ | $\varepsilon = 33.3\%$ |
| Угол скоса бойков 10° | | | |
| МКЭ |  |  |  |
| Эксперимент | |  |  |
| | $\varepsilon = 0\%$ | $\varepsilon = 18.5\%$ | $\varepsilon = 29\%$ |

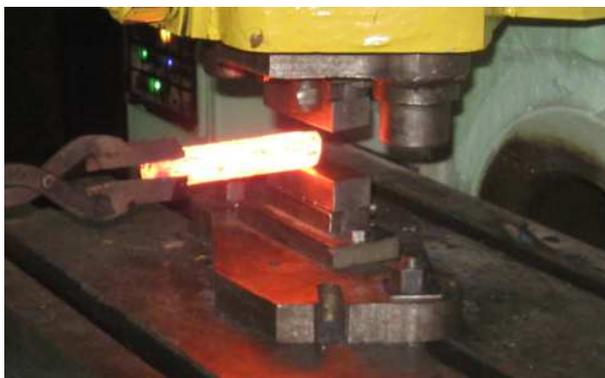


Рисунок 4.17 - Протяжка заготовки бойками плоскими и скошенными в плане

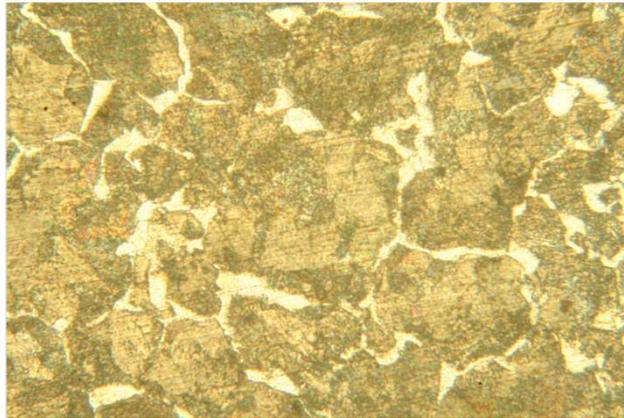
4.2 Исследование процесса протяжки цилиндрической заготовки ассиметричными комбинированными бойками

Методом конечных элементов проведено моделированиековки цилиндрической заготовки протяжкой в комбинированных бойках различной конфигурации (рис. 4.19) [285]. Диаметр исходной заготовки 1000 мм, ширина бойков 1000 мм, относительная подача при моделировании принималась равной 1, материал заготовки сталь 35, начальная температура заготовки 1100°C , инструмента 20°C . Коэффициент теплоотдачи $5 \text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$. Коэффициент трения по закону пластического трения Зибеля 0,35, скорость движения бойка 15 мм/с. Размеры инструмента принимались следующие: $\alpha = 60^{\circ}$, $\beta = 65^{\circ}..85^{\circ}$, $\gamma = 0^{\circ}..20^{\circ}$.

На рис. 4.20, 4.21 приведены поля распределения интенсивности и сдвиговых логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки при протяжке комбинированными бойками по ходу обжатия. Установлено, что область наибольшей интенсивности деформаций сосредоточена в центре заготовки, область малых деформаций находится в вершине выреза нижнего бойка. Зона наибольших сдвиговых деформаций несколько смещена от центра заготовки к верхнему плоскому бойку, и в целом по заготовке сдвиговые деформации распространены равномерно. Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что вначале внедрения бойка в заготовку сдвиговые деформации сосредоточены локально в верхней части заготовки, но уже при обжатии на 200 мм, что соответствует относительному обжатию 20%, в заготовке появляется область сдвиговых деформаций, имеющая достаточно большую площадь и проходит через центр заготовки.

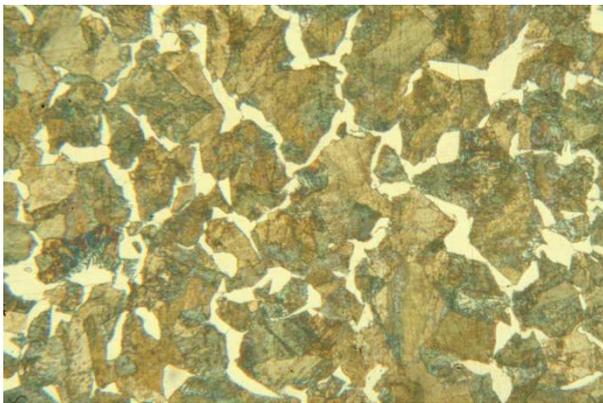
В виду сложности визуального определения схемыковки, обеспечивающей в заготовке наибольший уровень сдвиговых деформаций, определялась средневзвешенная сдвиговая деформация в сечении заготовки по следующей формуле:

Уков 0



Бойки со скосом

Уков 1,5



Плоские бойки

Уков 1,5

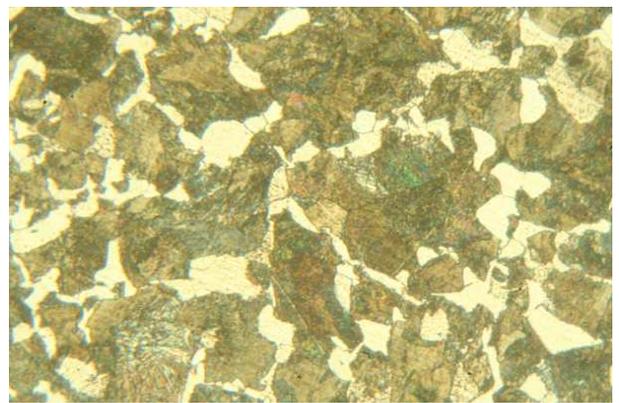


Рисунок 4.18 - Микроструктура заготовки из стали 40X, при различных уковах и полученной протяжкой скошенными и плоскими бойками

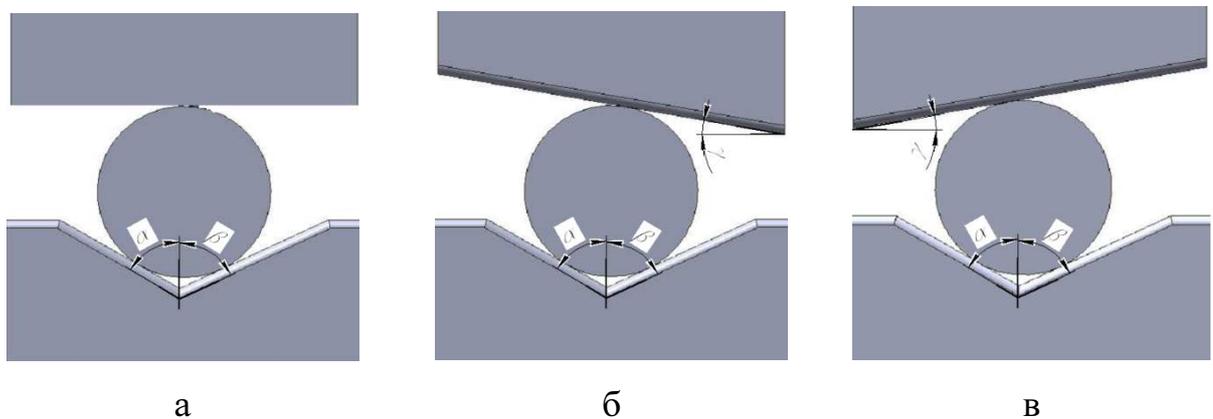


Рисунок 4.19 - Схема протяжки цилиндрической заготовки комбинированными бойками (нижний боек вырезной несимметричный верхний плоский (а), скошенный (б, в))

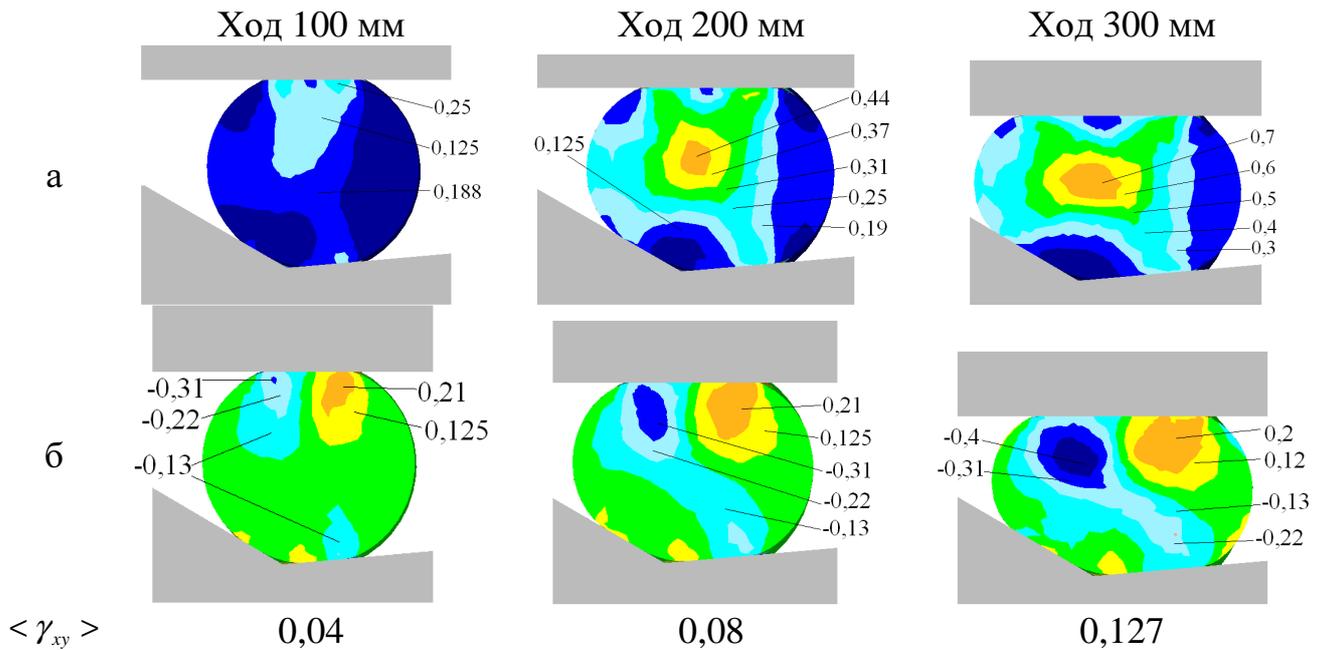


Рисунок 4.20 - Распределение интенсивности (а) и сдвиговых (б) логарифмических деформаций γ_{xy} по поперечному сечению заготовки при протяжке верхним плоским и нижним несимметричным вырезным бойками ($\alpha = 60^\circ$, $\beta = 85^\circ$)

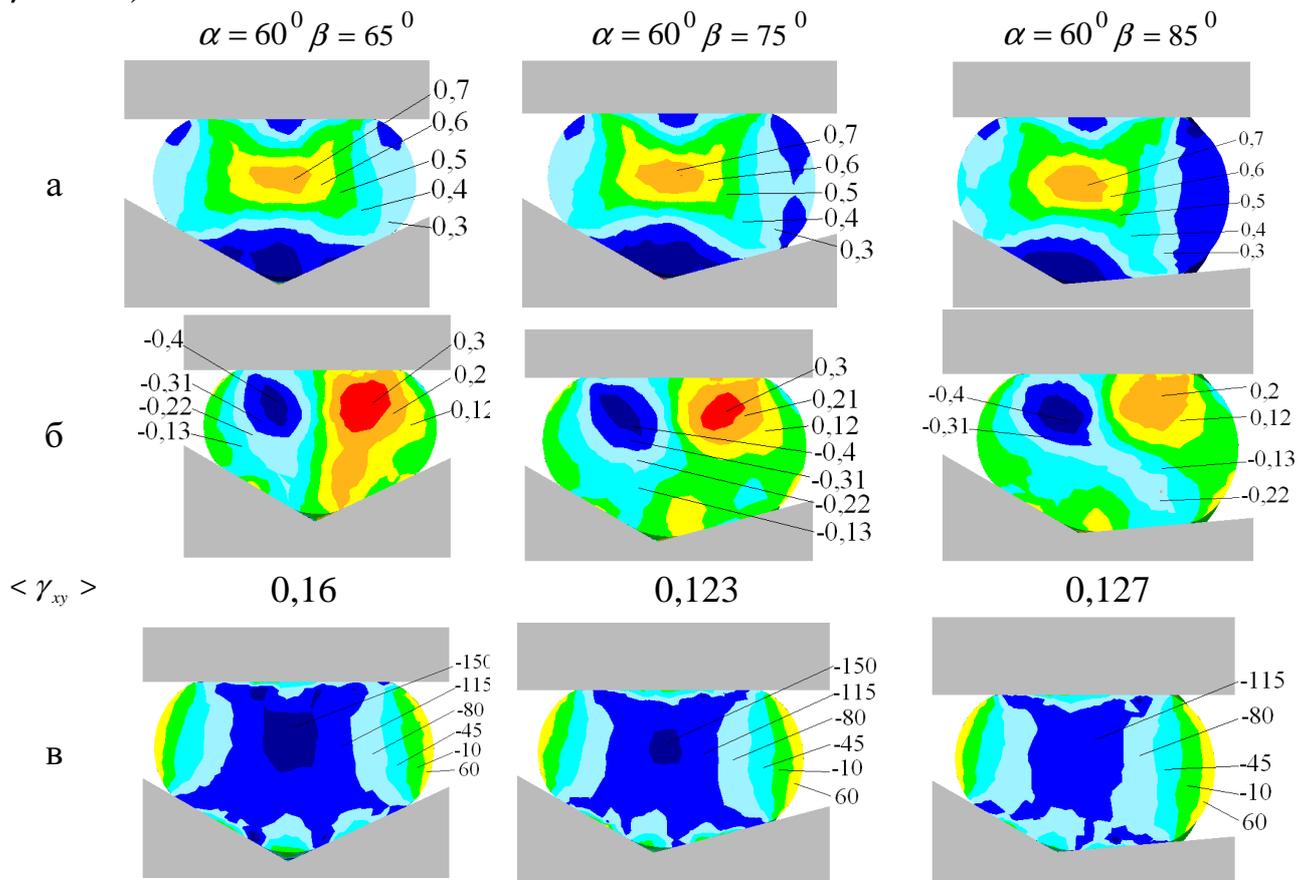


Рисунок 4.21 - Поля распределения интенсивности (а), сдвиговых (б) логарифмических деформаций и средних напряжений МПа (в) по поперечному сечению заготовки при протяжке верхним плоским и нижним несимметричным вырезным бойками (ход 300 мм)

$$\langle \gamma_{xy} \rangle = \frac{\sum (\gamma_{xy_i} \cdot F_i)}{\sum (F_i)},$$

где $|\gamma_{xy_i}|$ - величина сдвиговой деформации i - ой области заготовки по модулю, F_i - площадь области заготовки с величиной сдвиговых деформаций γ_{xy_i} .

Установлено, что по ходу обжатия заготовки в вырезном несимметричном бойке верхним плоским бойком, величина средневзвешенной сдвиговой логарифмической деформации увеличивается от 0,04 при обжатии 100 мм до 0,127 при обжатии 300 мм.

Из этого следует, что для обеспечения высокого уровня сдвиговых деформаций в заготовке и, как следствие, более высокого уровня механических свойств поковки, меньшей величины их анизотропии, ковку следует вести с обжатиями не менее 20%.

Установлено, что наибольшая величина средневзвешенной сдвиговой логарифмической деформации $\langle \gamma_{xy} \rangle$, наблюдается в заготовке, обжатой в вырезном бойке с углами $\alpha = 60^{\circ}$, $\beta = 65^{\circ}$ и составляет 0,16 при обжатии 300 мм. Для бойков с углами $\alpha = 60^{\circ}$ $\beta = 75^{\circ}$ и $\alpha = 60^{\circ}$ $\beta = 85^{\circ}$ она составила 0,123 и 0,127 соответственно. Это говорит о том, что увеличение асимметрии выреза нижнего бойка при обжатии верхним плоским бойком не приводит к увеличению уровня сдвиговых деформаций в заготовке. При этом величина интенсивности логарифмических деформаций одинакова в рассматриваемых схемах, и увеличение угла β приводит к появлению на боковой поверхности заготовки зоны низких деформаций. Средние напряжения в основном в поперечном сечении заготовки имеют отрицательное значение, что говорит о том, что металл в заготовке получает всестороннее сжатие, повышающее пластичность металла и способствующее завариванию внутренних дефектов заготовки. Исследования показали, что с увеличением угла β в заготовке уровень средних напряжений уменьшается, так при $\beta = 65^{\circ}$ макси-

мальные средние напряжения достигают -150 МПа, а при $\beta = 85^\circ$ они составляют -115 МПа.

Проведено исследование напряженно-деформированного состояния заготовки при ее ковке верхним бойком со скосом и нижним несимметричным вырезным бойком (см. рис. 4.19 б). Результаты моделирования представлены в виде полей распределения средних напряжений, интенсивности логарифмических деформаций и сдвиговых деформаций (табл. 4.5).

Верхний боек со скосом $\gamma = 10^\circ$ в направлении угла α . При обжатии заготовки бойками по схеме, приведенной на рис. 4.19 б, можно заметить, что с увеличением угла β уровень сдвиговых деформаций в заготовке растет. Сдвиговые деформации преимущественно одного знака, и с увеличением угла β от 65° до 85° средневзвешенная сдвиговая деформация увеличивается от 0,17 до 0,186. При этом интенсивность логарифмических деформаций находится на одном уровне, а средние напряжения незначительно уменьшаются.

Результаты моделирования обжатия заготовки вырезными бойками по схеме рис. 4.19, в, приведены в таблице 4.6. Здесь верхний боек имеет скос в направлении угла β . Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что с увеличением угла скоса β уровень сдвиговых деформаций уменьшается. Это объясняется увеличением зазора между верхним и нижним бойками со стороны угла β нижнего бойка. Средневзвешенная сдвиговая деформация уменьшается от 0,177 до 0,115 при увеличении угла β от 65° до 85° . В заготовке, на боковой поверхности при большом значении угла β появляется зона затрудненных деформаций и снижается уровень средних напряжений. Использование данной схемы ковки нецелесообразно для обеспечения высокого уровня сдвиговых деформаций в заготовке.

В таблице 4.7 приведены поля распределения сдвиговых деформаций по сечению заготовки при различных углах скоса верхнего бойка и углах выреза нижнего бойка. Данные поля были обработаны, и для каждой из схем

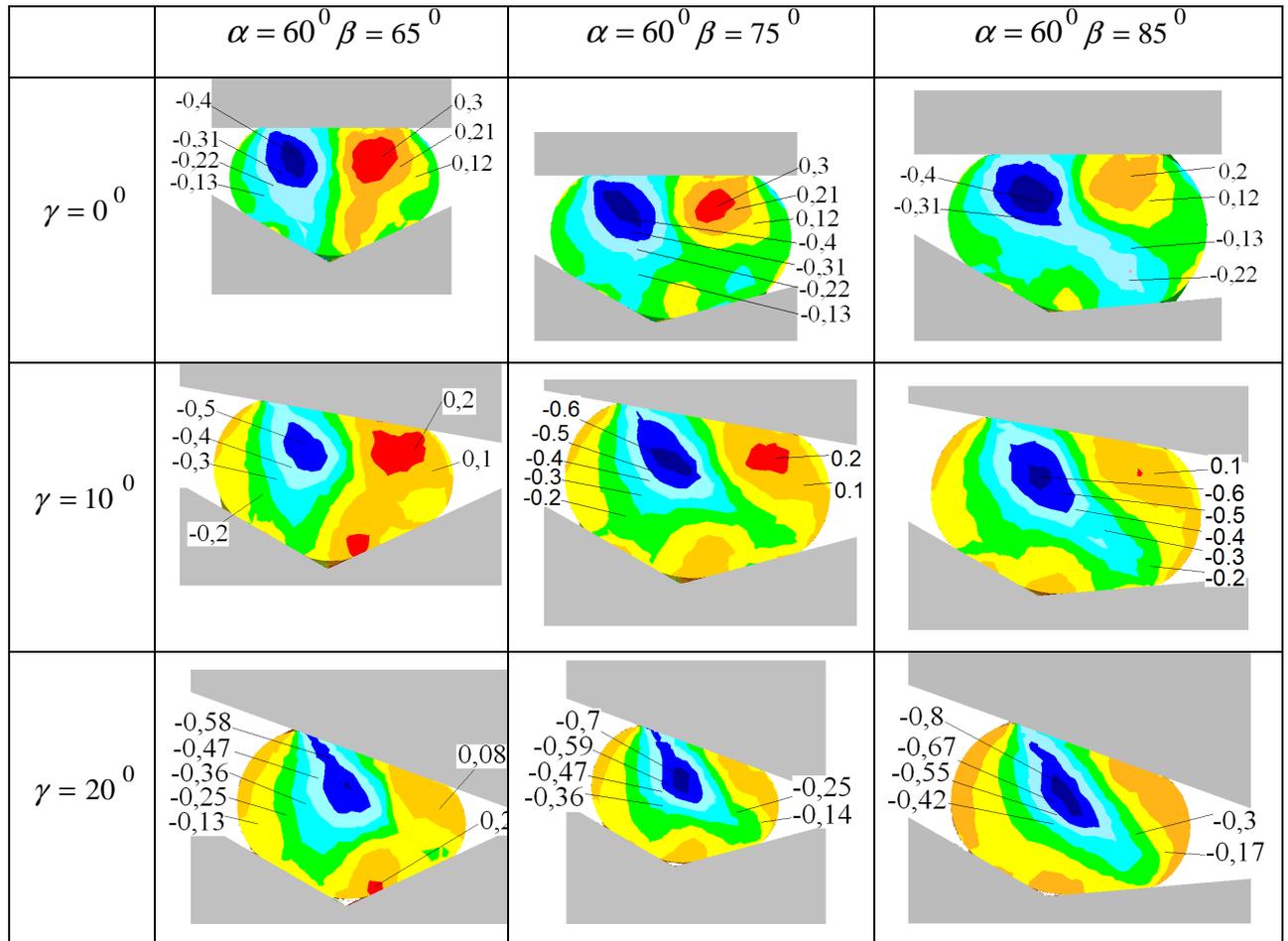
Таблица 4.5 – Результаты математического моделирования процесса протяжки цилиндрической заготовки комбинированными несимметричными бойками при обжати 300 мм

| | γ_{xy} | $\dot{\epsilon}_i$ | σ_{cp} , МПа |
|--|---------------|--------------------|---------------------|
| $\alpha = 60^0$ $\beta = 65^0$ $\gamma = 10^0$ | | | |
| $\alpha = 60^0$ $\beta = 75^0$ $\gamma = 10^0$ | | | |
| $\alpha = 60^0$ $\beta = 85^0$ $\gamma = 10^0$ | | | |

Таблица 4.6 – Результаты математического моделирования процесса протяжки цилиндрической заготовки комбинированными несимметричными бойками при обжатии 300 мм

| | γ_{xy} | $\dot{\epsilon}_i$ | σ_{cp} , МПа |
|--|---------------|--------------------|---------------------|
| $\alpha = 60^0$ $\beta = 65^0$ $\gamma = 10^0$ | | | |
| $\alpha = 60^0$ $\beta = 75^0$ $\gamma = 10^0$ | | | |
| $\alpha = 60^0$ $\beta = 85^0$ $\gamma = 10^0$ | | | |

Таблица 4.7 – Поля распределения сдвиговых деформаций по сечению заготовки при ковке вырезными бойками (верхний плоский и со скосом, нижний несимметричный вырезной) при обжати 300 мм



рассчитана средневзвешенная сдвиговая логарифмическая деформация и построена графическая зависимость величины средневзвешенной сдвиговой деформации от угла скоса верхнего бойка γ и угла выреза нижнего β (рис. 4.22).

Анализ полученной зависимости позволяет сделать вывод, о том, что угол выреза нижнего бойка имеет незначительное влияние на величину средневзвешенной сдвиговой деформации. С увеличением угла выреза нижнего бойка величина зон больших сдвиговых деформаций в среднем по сечению заготовки уменьшается при использовании верхнего бойка с малым скосом до 10^0 . При увеличении угла скоса верхнего бойка от 10^0 до 20^0 увеличение угла выреза нижнего бойка способствует увеличению средневзвешенной сдвиговой деформации. Средневзвешенная сдвиговая деформация в поперечном сечении заготовки увеличивается от 0,12 до 0,26 при увеличении угла скоса верхнего бойка от 0^0 до 20^0 при протяжке в вырезных бойках с углом $\beta = 75...85^0$.

Это позволяет рекомендовать использование комбинированных бойков с верхним бойком со скосом от 10^0 до 20^0 и нижним вырезным с углом $\beta = 75...85^0$.

Проведено сравнение средневзвешенной сдвиговой деформации в поперечном сечении заготовки при протяжке комбинированными бойками и скошенными бойками (см. рис. 4.22). Установлено, что уровень деформаций отличается не значительно, однако схема ковки в комбинированных бойках предпочтительней с точки зрения напряженного состояния заготовки при протяжке.

4.3 Исследование процесса протяжки цилиндрической заготовки ассиметричными вырезными бойками

Методом конечных элементов проведено моделирование процесса обжатия цилиндрической заготовки диаметром $D=1000$ мм из стали 35. Исходная температура заготовки 1100^0C . Обжатие проводилось вырезными бойка-

ми с асимметричным вырезом (рис. 4.23). Рассматривалось три схемы расположения выреза в бойках: с положительным зазором между центрами выреза бойков (см. рис. 4.23 а), без зазора, когда центры углов в бойках находятся на вертикальной линии (см. рис. 4.23 б), и с отрицательным зазором между центрами углов (см. рис. 4.23 в). Ширина бойка 1000 мм (относительная подача равна 1), температура бойков задавалась равной 20°C , коэффициент трения по закону Зибеля равен 0,35, коэффициент теплоотдачи равен $5 \text{ Вт/м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$, скорость деформирования 15 мм/с.

Обжатие заготовки производили до 30%. Результатами моделирования являются полученные сечения заготовки по ходу обжатия и поля распределения сдвиговых деформаций по поперечному сечению заготовки при обжатии (рис. 4.24-4.25).

В виду сложности визуального определения схемыковки обеспечивающей в заготовке наибольший уровень сдвиговых деформаций, определялась средневзвешенная сдвиговая деформация в сечении заготовки.

За основу был взят вырезной боек с углом выреза $2 \cdot \alpha = 120^{\circ}$, и исследовали влияние величины раскрытия угла выреза в бойке на напряженно-деформированное состояние заготовки при обжатии. Угол α фиксировался и принимался равным 60° , угол β принимался при моделировании равным 65° , 75° , 85° . Зазор между центрами углов вырезных бойков составлял 215 и 315 мм (0,215 и 0,315 от диаметра заготовки).

На рис. 4.24 представлены поля распределения сдвиговых деформаций по сечению заготовки при обжатии вырезными бойками с различным углом выреза при нулевом зазоре между центрами углов выреза бойков. Анализ полей распределения сдвиговых деформаций по сечению заготовки (см. рис. 4.24) позволяет сделать вывод о том, что процесс обжатия можно разбить на две стадии. На первой стадии при обжатии заготовки металл контактирует с двумя гранями нижнего вырезного бойка и с одной гранью верхнего бойка, и процесс можно рассматривать как обжатие в комбинированных бойках (нижний вырезной верхний плоский со скосом). На второй стадии металл

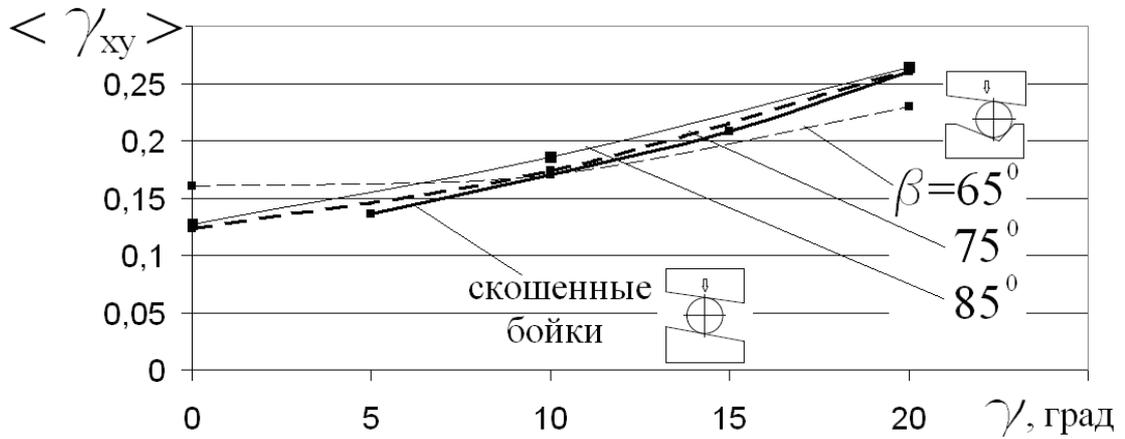


Рисунок 4.22 - Графическая зависимость величины средневзвешенной логарифмической сдвиговой деформации от параметров инструмента при обжатии цилиндрической заготовки (обжатие 300 мм)

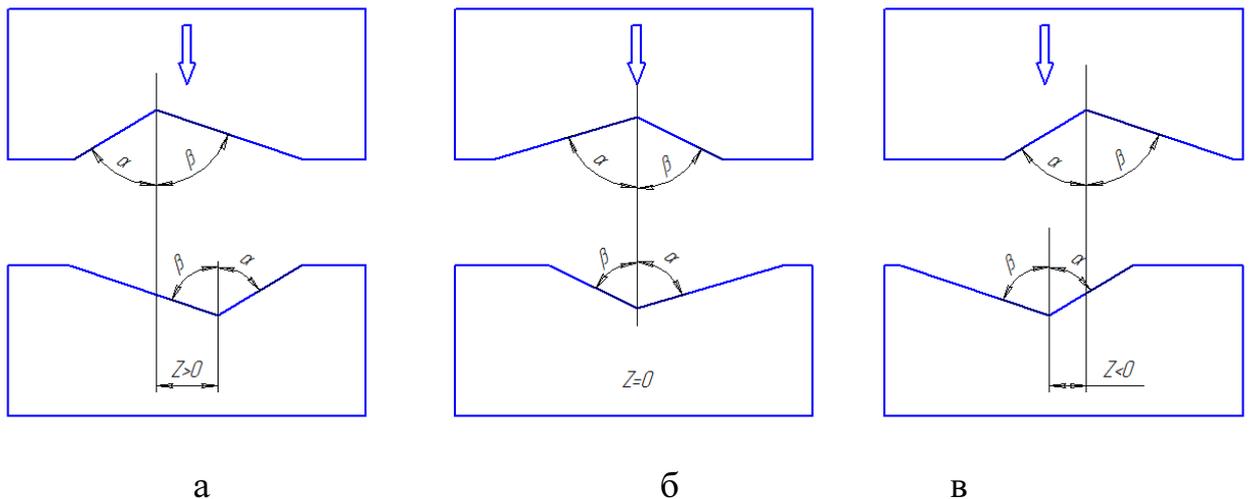


Рисунок 4.23 - Общий вид вырезных бойков с положительным зазором между центрами углов выреза (а), нулевым (б) и отрицательным

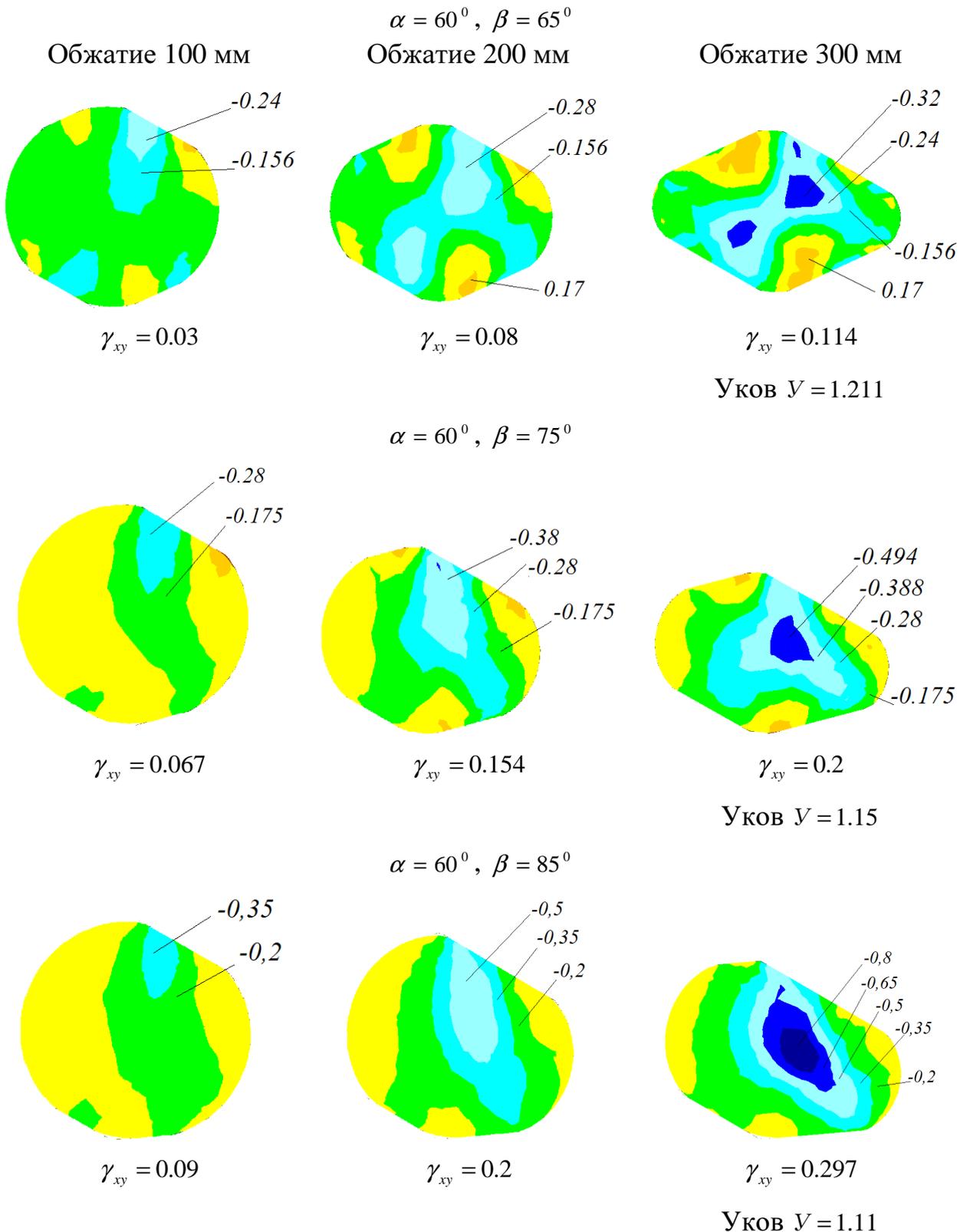


Рисунок 4.24 - Поля распределения сдвиговых деформаций в поперечном сечении заготовки при обжатии заготовки вырезными бойками с нулевым зазором между центрами углов выреза

начинает контактировать с двумя гранями верхнего вырезного бойка.

Чем больше угол β , тем большее обжатие необходимо дать заготовке для наступления второй стадии. Так при β , равном 65° , вторая стадия начинается уже после обжатия 100 мм (10%), а для угла β равного 75° , вторая стадия начинается после обжатия 200 мм (20%). Для угла β равного 85° , вторая стадия начинается при обжатии 300 мм (30%) и преимущественно процесс нужно рассматривать как обжатие в комбинированных бойках.

Установлено, что с увеличением обжатия величина сдвиговых деформаций возрастает, а с увеличением угла β в бойках характер ее распределения и ее величина изменяются. Так при β равном 65° , наибольшие сдвиговые деформации достигают 0,32, при обжатии 300 мм и располагаются они преимущественно в центре заготовки. При $\beta = 75^\circ$ наибольшие сдвиговые деформации достигают 0,494, при этом распределение их по сечению заготовки наиболее равномерно.

Увеличение угла выреза до $\beta = 85^\circ$ привело к увеличению наибольших сдвиговых деформаций до 0,8 в центре заготовки. Установлено, что уков при одинаковом обжатии заготовки бойками с различным углом β отличается. Так при угле $\beta = 65^\circ$ уков составил 1,21, а при $\beta = 85^\circ$ он составил 1,11. При этом средневзвешенная сдвиговая деформация увеличилась от 0,114 до 0,297 (см. рис. 4.25). Это говорит о том, что продольное течение металла уменьшилось при обжатии заготовки, а ее деформирование происходило, в основном, за счет сдвига одной части заготовки относительно другой в поперечном сечении, что способствует преобразованию литой структуры металла в деформированную без достижения больших уков.

Из рис. 4.25 видно, что с увеличением обжатия от 10% до 30% средневзвешенная сдвиговая деформация увеличивается практически в три раза. На бойках с углом выреза $\beta = 85^\circ$, обеспечивающих наибольшие сдвиговые деформации, проведено исследование влияния величины зазора между центра-

ми вырезов бойков на величину сдвиговых деформаций.

На рис. 4.26 приведены поля распределения сдвиговых деформаций в поперечном сечении заготовки при ее обжатии вырезными бойками различных размеров. Установлено, что с увеличением зазора Z от 0 до 315 мм величина сдвиговых деформаций значительно уменьшается. Так при нулевом зазоре средневзвешенная сдвиговая деформация для обжатия 300 мм составила 0,297, а при зазоре 315 мм 0,15, что практически в два раза меньше. Это говорит о том, что положительный зазор между центрами улов выреза бойков нежелателен. В случае с отрицательным зазором схему обжатия вырезными бойками с большим углом выреза β следует рассматривать как схему обжатия комбинированными бойками, что и так наблюдается при нулевом зазоре.

График, иллюстрирующий зависимость величины средневзвешенной сдвиговой деформации в зависимости от величины зазора и обжатия, представлен на рис. 4.27, из которого четко видно, что наиболее предпочтительны с точки зрения величины сдвиговых деформаций в заготовке бойки с нулевым зазором между центрами углов выреза.

Проведено исследование напряженного состояния заготовки при обжатии ассиметричными вырезными бойками с различным углом выреза. Установлено, что наибольшие средние напряжения в заготовке возникают в центральной ее части и достигают -150 МПа для различных углов выреза бойков ($\alpha = 60^\circ$, $\beta = 65^\circ..85^\circ$). При увеличении угла выреза β величина зоны больших средних напряжений в заготовке уменьшается.

Главным фактором, который влияет на пластичность металла является схема напряженного состояния металла при деформировании. Схема напряженного состояния характеризуется определенными показателями. Наиболее распространенным показателем, характеризующим схему напряженного состояния материала при деформировании, является показатель напряжённого состояния, предложенный Г. А. Смирновым-Аляевым:

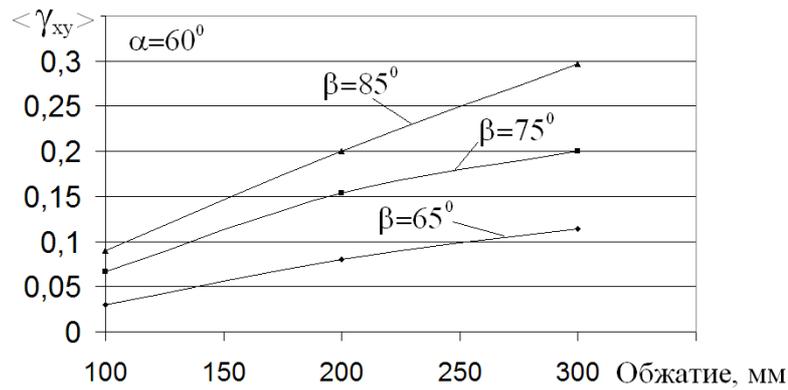


Рисунок 4.25 - Зависимость средневзвешенной сдвиговой деформации в поперечном сечении заготовки от хода обжатия вырезными асимметричными бойками

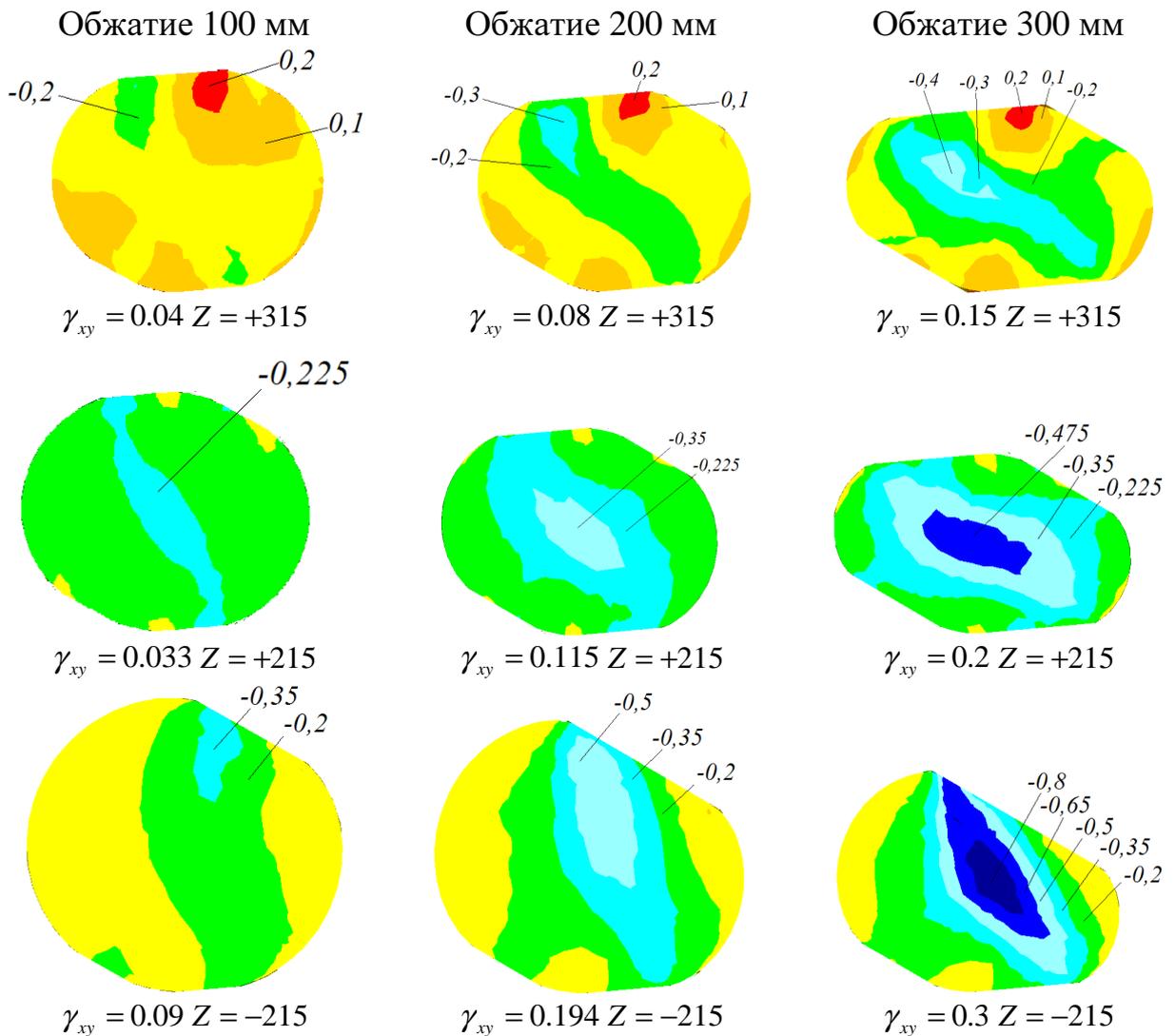


Рисунок 4.26 - Поля распределения сдвиговых деформаций в поперечном сечении заготовки при обжатии заготовки вырезными бойками с положительным и отрицательным зазорами между центрами углов выреза ($\alpha = 60^\circ$, $\beta = 85^\circ$)

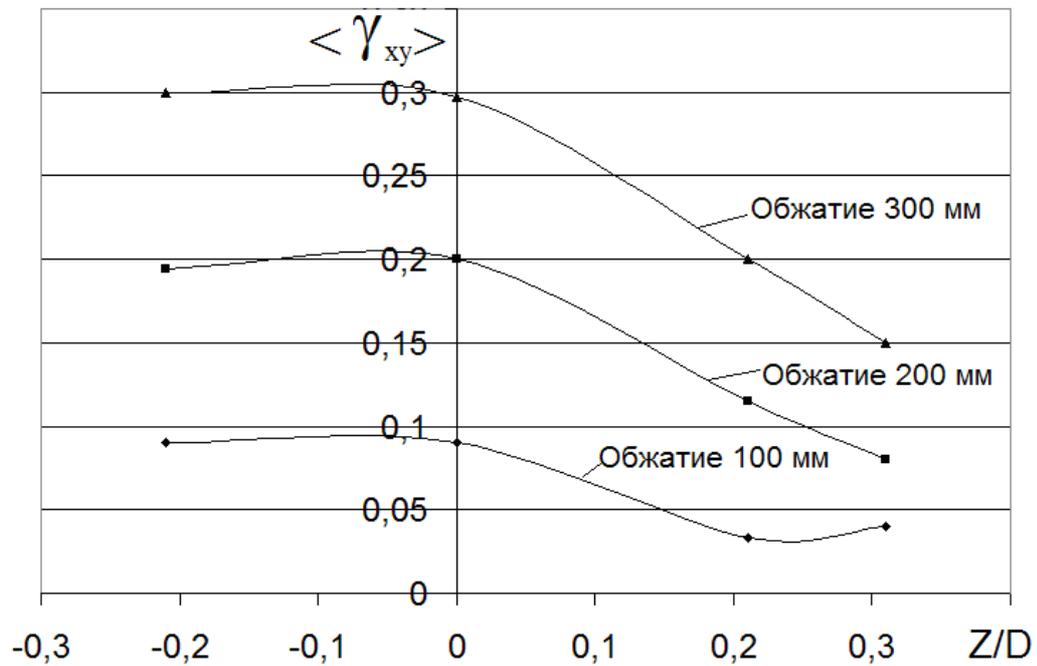


Рисунок 4.27 - Зависимость средневзвешенной сдвиговой деформации в поперечном сечении заготовки от величины зазора между центрами углов выреза бойков при ее обжатии вырезными бойками ассиметричной конфигурации

Таблица 4.8 – Характеристики напряженного состояния заготовки при ее обжатии

| Характеристика бойков | Средние напряжения, МПа | Интенсивность напряжений, МПа | Показатель напряженного состояния η |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|--|
| $\alpha = 60^\circ, \beta = 65^\circ$ | -129 | 84 | -4,6 |
| $\alpha = 60^\circ, \beta = 75^\circ$ | -120 | 90 | -4 |
| $\alpha = 60^\circ, \beta = 85^\circ$ | -97 | 88 | -3,3 |

$$\eta = \frac{3 \cdot \sigma_0}{\sigma_u} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_u},$$

где σ_0 - среднее напряжение, МПа; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - компоненты тензора главных напряжений, МПа; σ_u - интенсивность напряжений, МПа.

В таблице 4.8 приведены результаты расчета показателя напряженного состояния η в центре заготовки при ее обжати на 30%.

Отрицательное значение показателя η говорит о том, что в центре заготовки в рассматриваемой схеме возникает всестороннее сжатие, а величина показателя η свидетельствует о том, что схема напряженного состояния благоприятна для пластической деформации металла. Установлено, что увеличение угла β до 85° ведет к уменьшению абсолютного значения показателя η , однако его величина все равно остается достаточно значительной, и в сочетании с интенсивными сдвигами данную величину угла можно рекомендовать дляковки заготовок.

4.4 Исследование процесса протяжки заготовки ступенчатыми бойками

4.4.1 Ковка цилиндрической заготовки

Методом конечных элементов проведено моделирование процесса обжатия цилиндрической заготовки диаметром $D=1000$ мм из стали 35. Заготовка разбивалась на 50000 элементов, инструмент при моделировании был жестким, не деформируемым, исходная температура заготовки 1100°C . Обжатие проводилось ступенчатыми бойками (рис. 4.28). Рассматривалось две схемы расположения бойков с нулевым перекрытием и положительным (взаимное расположение вершин ступени бойков), причем перекрытие при моделировании принималось равным 100, 200 и 300 мм. Ширина бойка 1000 мм, температура бойков задавалась равной 20°C , коэффициент трения по закону Зибеля равен 0,35, коэффициент теплоотдачи от заготовки к инструменту равен 5 Вт/м²*°C, скорость деформирования 15 мм/с.

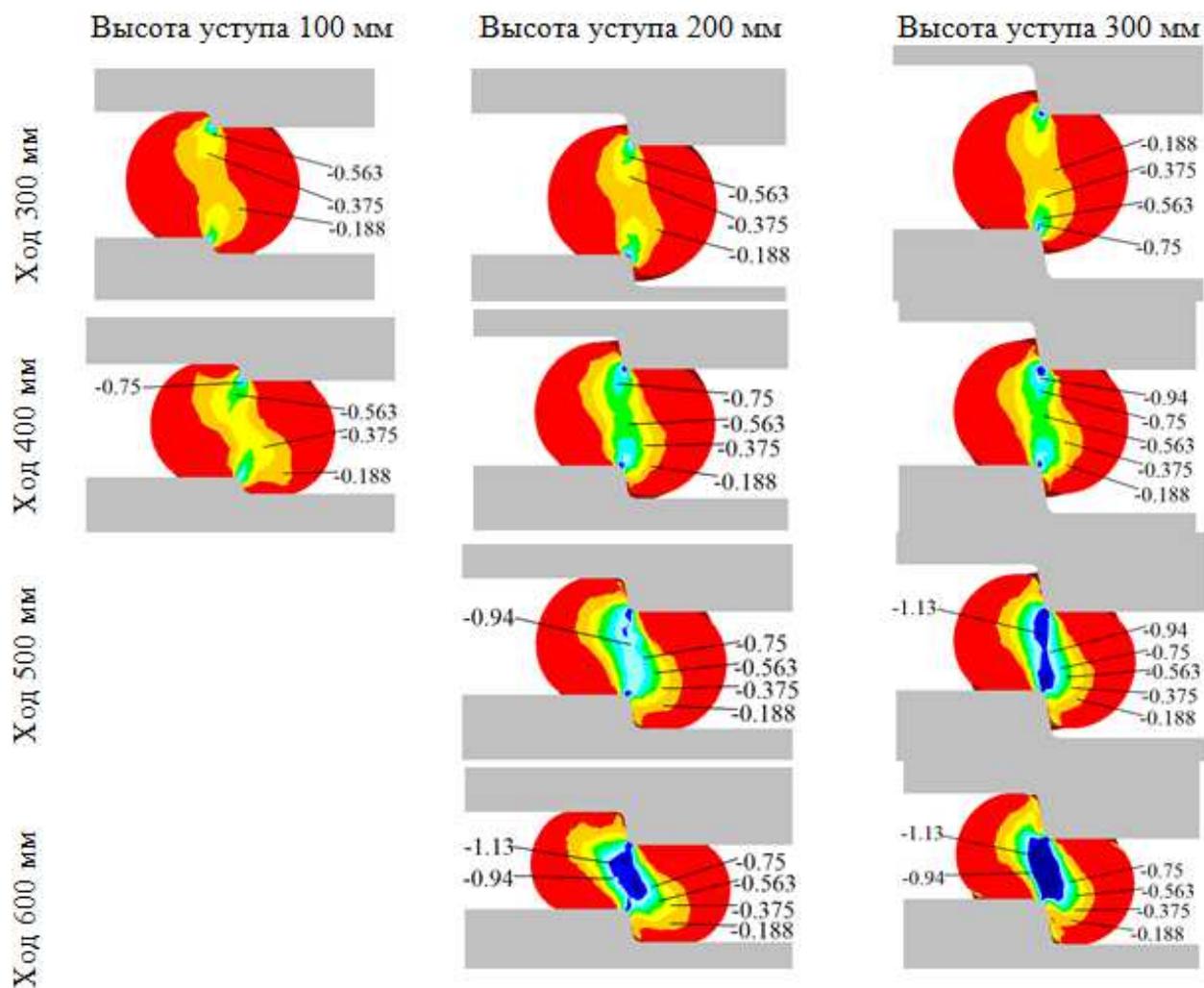


Рисунок 4.28 - Поля распределения деформаций сдвига в поперечном сечении заготовки при деформировании бойками с различной высотой уступа (перекрытие бойков равно нулю)

В результате моделирования получены поля распределения интенсивности логарифмических деформаций и сдвиговых деформаций в поперечном сечении заготовки на различных стадиях деформирования (см. рис. 4.28) [286].

Из рисунка 4.28 видно, что на уровень, величину деформаций и объем заготовки, в котором распространяются сдвиговые деформации, влияет ход обжатия заготовки. Так видно, что при ходе бойков 300 мм наибольшую площадь в поперечном сечении заготовки занимает сдвиговая деформация, равная $-0,188$, вне зависимости от высоты уступа бойков. При ходе 400 мм уровень сдвиговой деформации возрастает, и в заготовке, обжатой бойками с высотой уступа 200 и 300 мм, она увеличивается до $-0,563$, а при обжатии бойком с высотой уступа 100 мм - до $-0,375$, что связано с малой высотой уступа. При дальнейшем обжатии заготовок, уровень сдвиговых деформаций возрастает еще выше, как показано на рис. 4.28. Большой уровень сдвиговых деформаций в заготовке говорит о том, что течение металла преимущественно в поперечном сечении заготовки и заключается в сдвиге одной части заготовки относительно другой. Течение металла в продольном направлении минимально. Сочетание высокого уровня деформаций в заготовке с минимальным ее удлинением при протяжке позволит получать поковки высокого качества при минимальных укувах. Это является основным технологическим резервом операцийковки и позволит в некоторых случаях исключить из технологического процессаковки такую энергоемкую операцию, как осадку, что позволит существенно снизить затраты на производство.

На рис. 4.29 приведены поля распределения интенсивности логарифмических деформаций, которые показывают, что уже при обжатии заготовки бойками на 300 мм деформации проходят через весь объем заготовки, в том числе и центральную ее часть.

Дальнейшее увеличение обжатия заготовки приводит к росту уровня деформации в заготовке. Также видно, что при использовании бойка с уступом 100 мм при обжатии заготовки на 400 мм сдвиг одной части заготовки

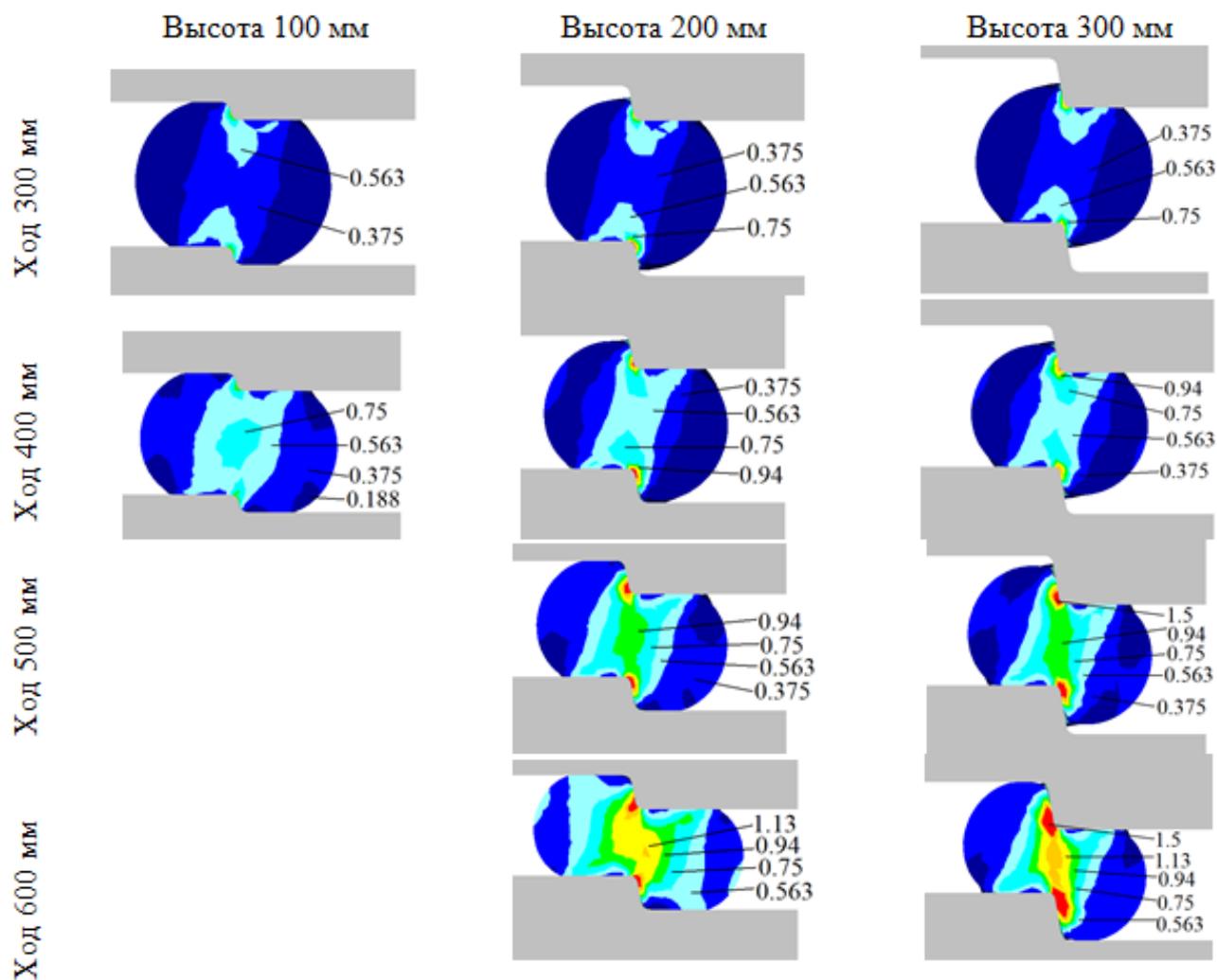


Рисунок 4.29 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки при деформировании бойками с различной высотой уступа (перекрытие бойков равно нулю)

относительно другой переходит в подсадку заготовки, т.е. течение металла заготовки становится характерным для обычной протяжки плоскими бойками. При обжати заготовки бойками с большей высотой уступа данная стадия наступает позже. Уровень интенсивности логарифмических деформаций при одинаковом обжати бойками с различными уступами одинаков.

Проведено исследование влияния величины перекрытия бойков на уровень сдвиговых деформаций и интенсивности логарифмических деформаций. На рис. 4.30 приведены поля распределения этих деформаций в поперечном сечении заготовки при деформировании бойками с различной величиной перекрытия.

Из рис. 4.30 видно, что увеличение перекрытия бойков от 0 до 300 мм не приводит к существенному росту уровня сдвиговых деформаций, а приводит только лишь к изменению формы очага сдвиговых деформаций. Поле интенсивности логарифмических деформаций изменяется несколько иначе. Так с увеличением перекрытия от нуля до 300 мм при обжати на 300 мм область наибольших деформаций со значением 0,563 также увеличивается, а при обжати 400 мм наибольшая деформация при перекрытии 300 мм составляет 0,94, при нулевом перекрытии 0,75. В совокупности с тем, что уровень сдвиговой в поперечном сечении деформации не изменяется с увеличением перекрытия, а интенсивность деформаций возрастает, можно говорить о том, что течение металла становится более интенсивным в продольном направлении. Это объясняется наличием плоской площадки, образовавшейся между выступами верхнего и нижнего бойков. Т.е. при одном и том же обжати заготовки бойками с различным перекрытием, уков будет наименьший при использовании бойков с минимальным перекрытием.

Для обеспечения наилучшей проработки литого металла исходной заготовки и обеспечения минимальной неравномерности распределения деформаций в заготовке предложено после обжима заготовки ступенчатыми бойками произвести ее кантовку и дополнительный обжим заготовки ступенчатыми бойками. Проведено исследование влияния размеров бойков и вели-

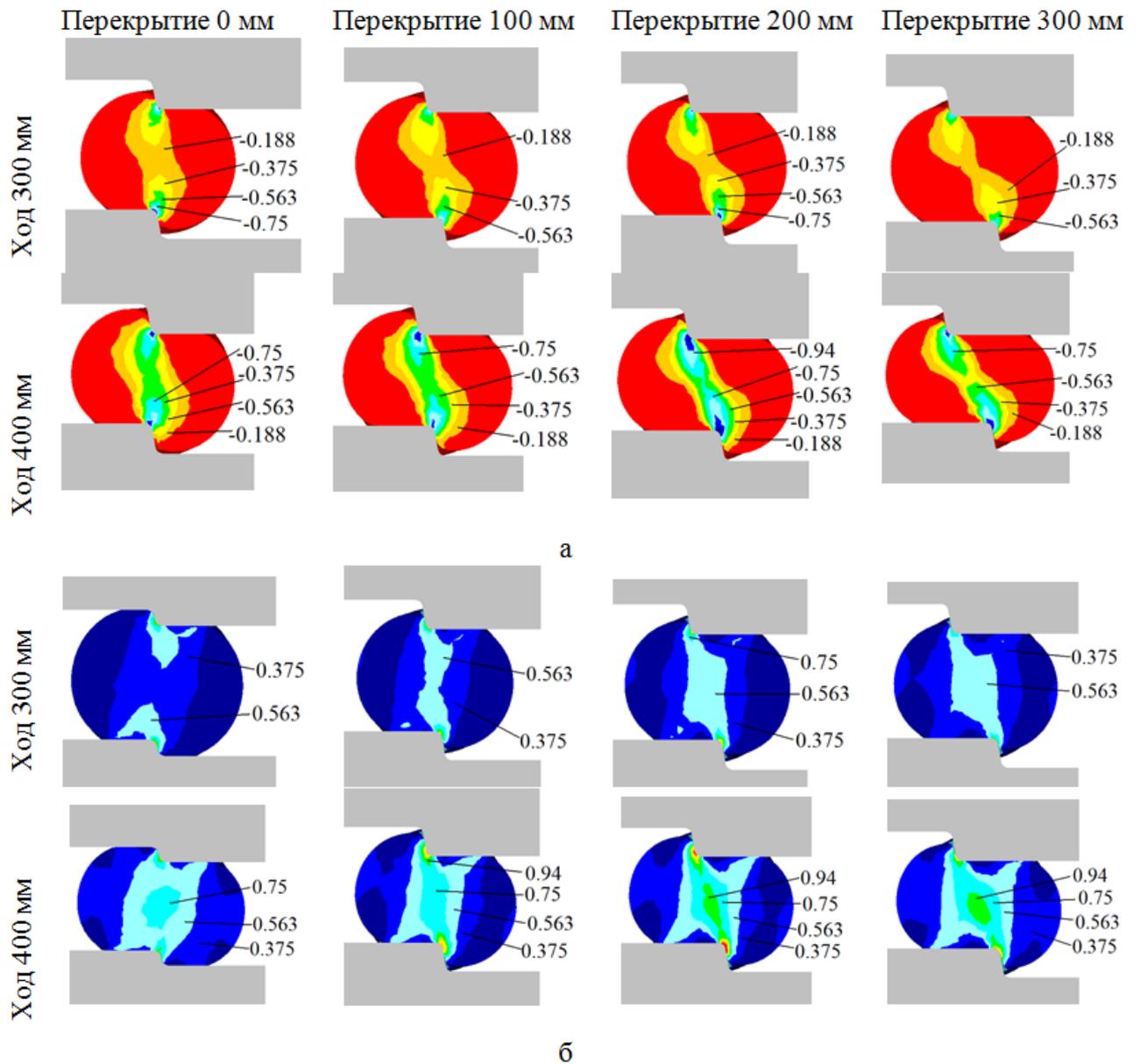


Рисунок 4.30 - Поля распределения деформаций сдвига (а) и интенсивности логарифмических деформаций (б) в поперечном сечении заготовки при деформировании бойками с различной величиной перекрытия (высота уступа бойка равна 200 мм)

чины их перекрытия на формоизменение заготовки. Заготовка обжималась бойками с уступом 100, 200 и 300 мм. Для бойков с уступом 200 мм рассматривали три перекрытия 100, 200 и 300 мм.

На рис. 4.31 показано сечение заготовки после обжатия ступенчатым бойком, ее кантовки и повторного обжатия ступенчатым бойком. Сечение заготовки имеет четырехлучевую форму, форму четырехлучевого слитка, ковка которого по традиционным схемам имеет определенные преимущества, заключающиеся в качественной проработке металла. Кроме того, поле распределения интенсивности логарифмических деформаций достаточно равномерно по всему сечению заготовки (см. рис. 4.31).

На рис. 4.32 приведено формоизменение заготовки при ее ковке бойком с высотой уступа 300 мм. Видно, что после кантовки заготовки и ее обжатии образуется дефект, обозначенный на рисунке областью «А», который заключается в деформировании части заготовки и образовании зажима, что не допустимо. Т.е. обжатие заготовки на данную величину не допускается.

На рис. 4.33 показаны результаты проведенного исследования по определению влияния величины перекрытия между верхним и нижним бойками на формоизменение заготовки. Из рисунка видно, что при нулевом перекрытии заготовка после обжатия, кантовки и повторного обжатия имеет четырехлучевую форму, но в выделенной области «А» на заготовке начинает образовываться зажим, который при дальнейшей перековке заготовки трансформируется в поверхностный зажим, что приведет к неминуемому браку.

При увеличении перекрытия между бойками заготовка после второго обжатия принимает форму, все более отдаленно похожую на форму четырехлучевой заготовки. Часть заготовки со стороны верхнего бойка практически не деформируется за счет большой площади контакта, преимущественная деформация сосредотачивается в нижней части заготовки. На ее боковой поверхности образуется зажим.

Таким образом, не рекомендуется проводить ковку заготовки по схеме обжатие-кантовка-обжатие при использовании ступенчатых бойков с поло-

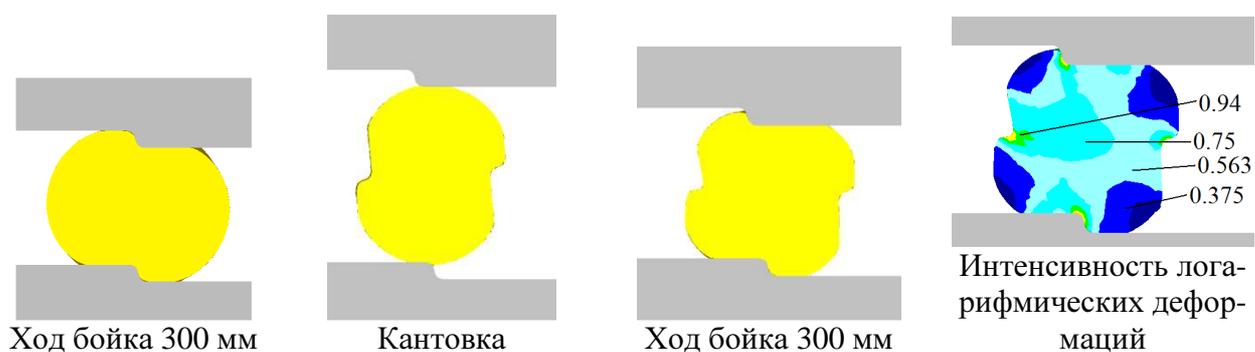


Рисунок 4.31 Формоизменение поперечного сечения заготовки при ковке ступенчатым бойком с нулевым перекрытием и высотой уступа 100 мм



Рисунок 4.32 - Формоизменение поперечного сечения заготовки при ковке ступенчатым бойком с нулевым перекрытием и высотой уступа 300 мм

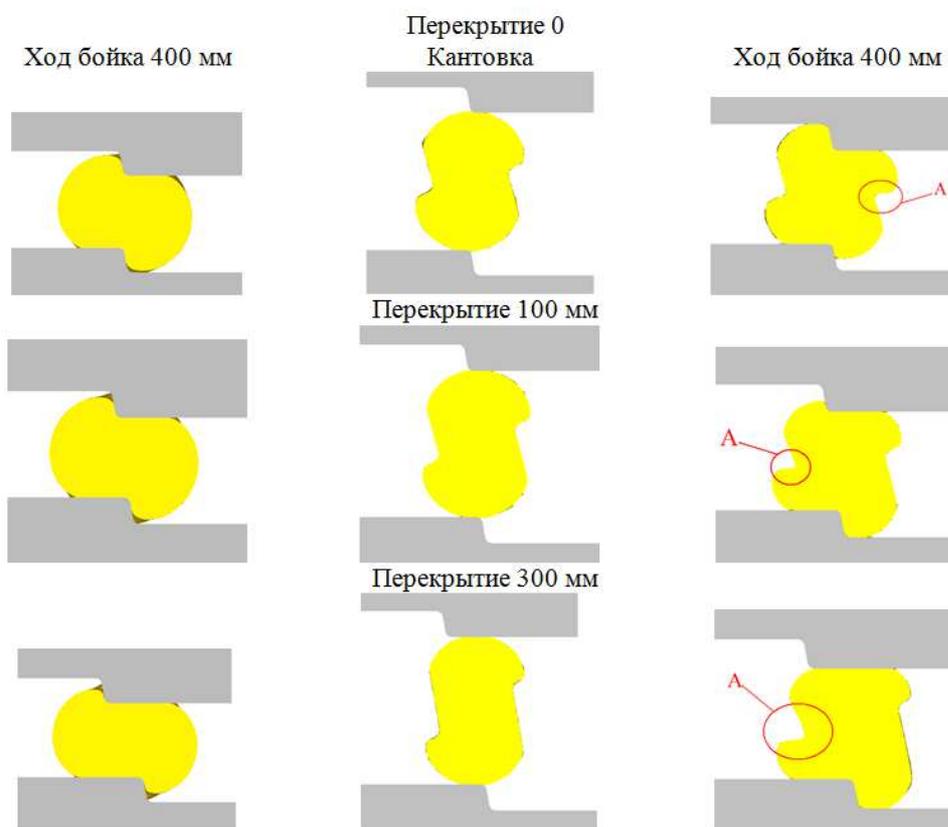


Рисунок 4.33 - Формоизменение поперечного сечения заготовки при ковке ступенчатым бойком с различным перекрытием и высотой уступа 200 мм

жильным перекрытием.

4.4.2 Ковка заготовки с прямоугольным сечением

Одной из схем ковки поковок типа валов является протяжка ступенчатыми бойками плоской заготовки (прямоугольное поперечное сечение), схема процесса приведена на рис. 4.34 [287-290]. Процесс ковки вала заключается в протяжке заготовки плоскими бойками с образованием прямоугольного поперечного сечения (протяжка через пластину), профилировании заготовки ступенчатыми бойками, правке плоскими бойками и последующей протяжке на круглое сечение. В процессе профилирования заготовки ступенчатыми бойками происходит проработка ее центральной части.

Для определения рациональной схемы протяжки ступенчатыми бойками необходимо определить следующие параметры: угол скоса ступеньки бойка α , относительную подачу заготовки f/H , относительный зазор между бойками z/H , относительную высоту ступеньки бойка h/H и относительные размеры заготовки H/B .

Теоретические исследования выполнены методом конечных элементов. Материал заготовки сталь 35, начальная температура заготовки 1100 °С, температура инструмента 20°С, скорость движения инструмента 15 мм/сек, коэффициент трения по закону Зибеля 0,35.

Проведено исследование деформированного состояния заготовок в процессе протяжки бойками различных размеров. Установлено влияние угла скоса ступеньки бойка в пределах 15°, 45°, 90° и относительной величины подачи в пределах 0,25, 0,5 и 1,0 на деформированное состояние заготовки в процессе обжатия. В таблице 4.9 показаны поля распределения интенсивности логарифмических деформаций и сдвиговых деформаций в заготовке при протяжке ступенчатыми бойками. Анализ полученных данных позволил установить, что с увеличением относительной подачи заготовки в бойках увеличивается проработка центральной зоны заготовки. При малой относи-

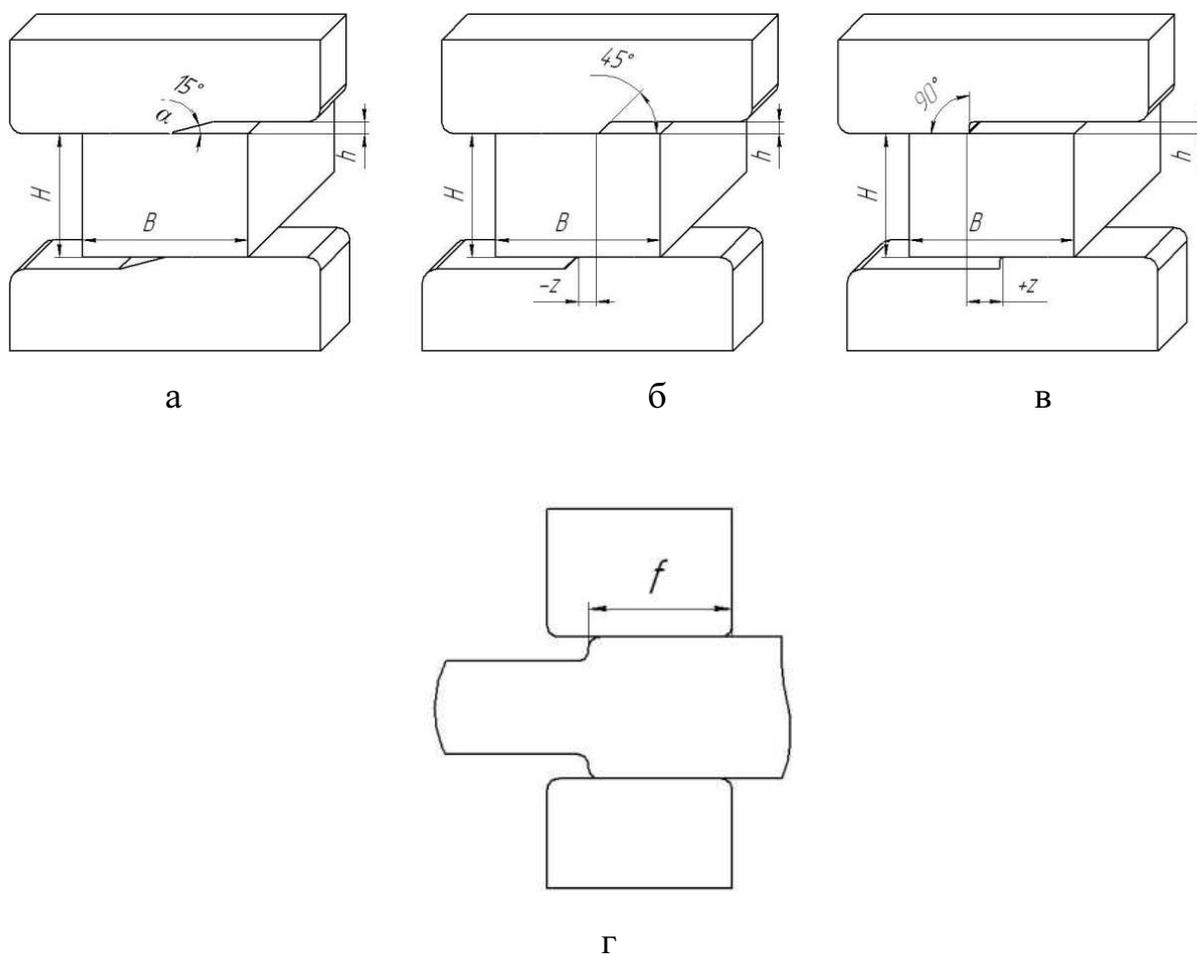
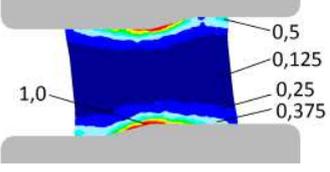
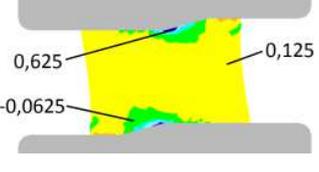
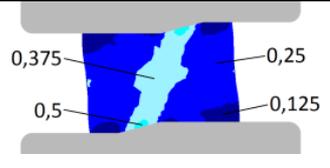
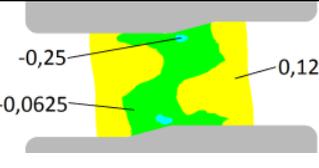
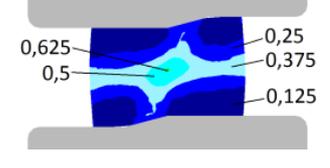
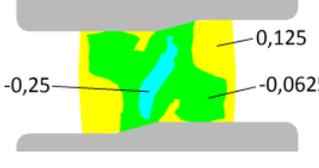
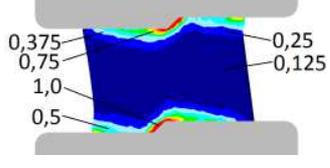
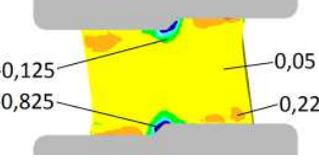
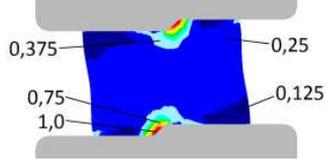
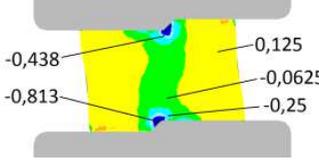
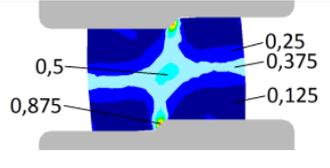
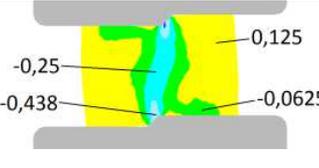
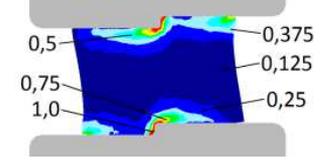
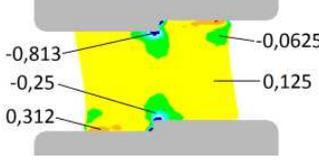
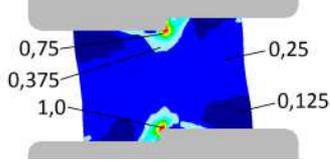
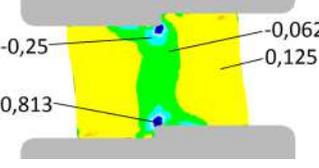
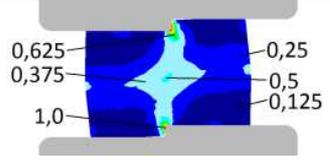
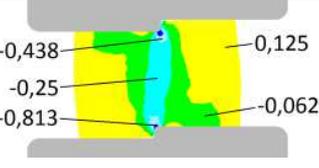


Рисунок 4.34 - Схема обжима плоской заготовки ступенчатыми бойками (а – нулевой зазор, б – отрицательный зазор, в – положительный зазор, г – вид сбоку)

Таблица 4.9 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций и сдвиговых деформаций в поперечном сечении заготовки ($H/B=0,75$; $h/H=0,1$; $z=0$)

| α | Подача | Интенсивность деформаций | Сдвиговая деформация |
|----------|------------|---|--|
| 15° | $f/H=0,25$ |  |  |
| | $f/H=0,5$ |  |  |
| | $f/H=0,1$ |  |  |
| 45° | $f/H=0,25$ |  |  |
| | $f/H=0,5$ |  |  |
| | $f/H=1$ |  |  |
| 90° | $f/H=0,25$ |  |  |
| | $f/H=0,5$ |  |  |
| | $f/H=1$ |  |  |

тельной подаче, равной 0,25 и меньше, основные деформации сосредоточены на поверхности заготовки.

Большое влияние на деформированное состояние заготовки оказывает и угол скоса ступеньки бойка α . Чем большие значения имеет угол α , тем меньше прорабатывается центральная часть заготовки. Так при относительной подаче 0,5 и угле α равном 15° центральная часть заготовки проработана достаточно хорошо, а при углах равных 45° и 90° , проработанной получается поверхность заготовки.

Таким образом, наиболее эффективной с точки зрения проработки осевой части заготовки является протяжка заготовки с относительной подачей более 0,5 и углом скоса ступеньки бойка меньшим 45° .

Характер распределения сдвиговых деформаций в заготовке практически полностью повторяет распределение интенсивности логарифмических деформаций. Наибольшие сдвиги в заготовке возникают при протяжке с большими подачами, угол скоса ступеньки бойка не оказывает существенного влияния на величину сдвиговых в поперечном сечении заготовки деформаций.

Для более точного определения влияния относительной подачи заготовки и параметра α определена средневзвешенная интенсивность логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки для различных вариантов протяжки. Средневзвешенная интенсивность логарифмических деформаций рассчитывалась по формуле:

$$\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n F_i \times \varepsilon_i}{\sum_{i=1}^n F_i},$$

где ε_i - интенсивность логарифмических деформаций в i -й зоне; F_i - площадь зоны; n - количество зон.

На рисунке 4.35 изображен график зависимости средневзвешенной интенсивности логарифмических деформаций от угла скоса ступеньки бойка

при различных относительных подачах.

Из графика видно, что наибольшая средневзвешенная интенсивность логарифмических деформаций наблюдается в схемах с относительной подачей $f/H=0,5$, но в этих схемах наибольшая интенсивность логарифмических деформаций расположена не в осевой зоне заготовки, а локализована в приповерхностном слое. Также из графика видно, что с уменьшением угла скоса ступеньки бойка средневзвешенная интенсивность логарифмических деформаций увеличивается.

Малые подачи заготовки приводят к возникновению растягивающих напряжений в поперечном сечении заготовки. Так при относительной подаче заготовки, равной 0,25, и угле скоса ступеньки бойка 15^0 , в центральной части заготовки возникают положительные средние напряжения, равные 22,5 МПа. Увеличение подачи до 1,0 позволило достичь в осевой части заготовки отрицательных средних напряжений равных -30 МПа. Угол скоса бойка оказывает незначительное влияние на напряженное состояние заготовки в рассматриваемом диапазоне размеров.

Проведено моделирование протяжки ступенчатыми бойками с различными зазорами (относительная величина зазора $z/H=0,1$; $z/H=-0,1$; $z/H=-0,2$; $z/H=-0,3$). Анализ полученных данных показал, что при использовании бойков с зазором $z/H = 0,1$, зона наибольших деформаций сосредоточена в осевой части заготовки, однако площадь зоны больших деформаций больше при протяжке бойками с отрицательным зазором. Кроме того, в случае отрицательного зазора уровень сдвиговых деформаций в заготовке выше. Таким образом, с точки зрения деформационной проработки заготовки лучше протяжка с отрицательным зазором. Отрицательный зазор также снизит и величину горизонтальной составляющей сил протяжки, заготовка в бойках не будет вращаться вокруг продольной оси при обжатии.

Для определения рациональной величины зазора между бойками дальнейшее исследование проводили для схем с отрицательным зазором. В таблице 4.10 приведены поля распределения интенсивности логарифмических

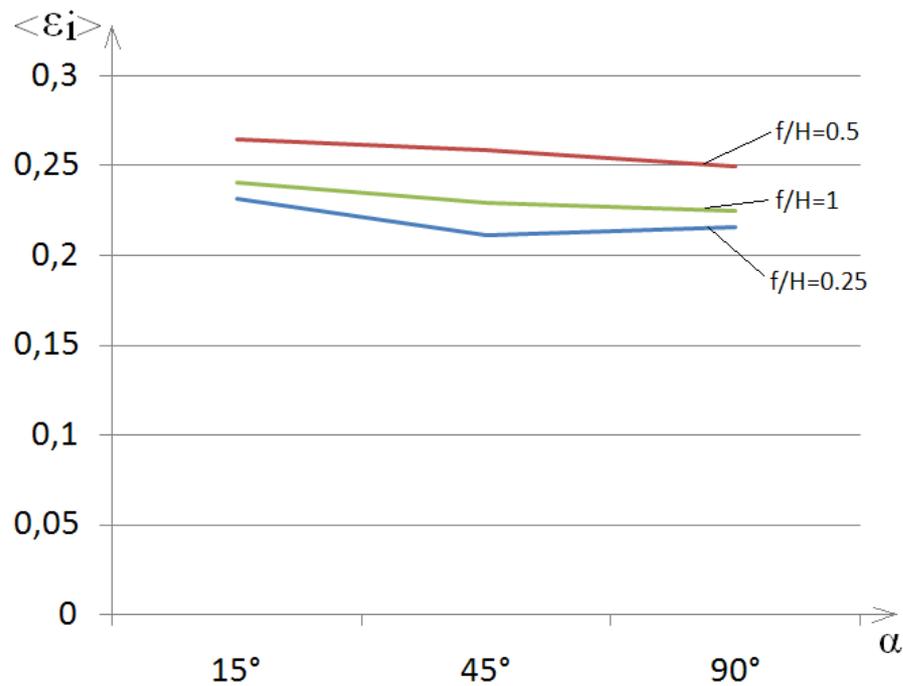


Рисунок 4.35 - График зависимости средневзвешенной интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки для различных размеров инструмента ($H/V=0,75$; $h/H=0,1$; $z=0$)

Таблица 4.10 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций и сдвиговых деформаций ($h/H=0,1$, $f/H=1$)

| Зазор | $z/H=-0,2$ | $z=-150$ мм | $z/H=-0,3$ $z=-225$ мм | |
|----------|--|----------------------|--|----------------------|
| α | Интенсивность логарифмических деформаций | Сдвиговые деформации | Интенсивность логарифмических деформаций | Сдвиговые деформации |
| 15° | | | | |
| 45° | | | | |
| 90° | | | | |

деформаций и сдвиговых деформаций в поперечном сечении заготовки при протяжке с отрицательными зазорами, относительная величина которых равна $-0,2$ и $-0,3$. Установлено, что с уменьшением зазора между бойками уровень деформаций в заготовке остается одинаковым, однако площадь заготовки с большими деформациями увеличивается. Из таблицы 4.10 видно, что влияние угла α на параметры деформированного состояния аналогично предыдущим схемам.

На основе полученных данных рассчитаны средневзвешенная логарифмическая и сдвиговая деформация в поперечном сечении заготовки при ее обжатии по разным схемам. По результатам расчетов построены графические зависимости, которые приведены на рис. 4.36-4.37. Анализ полученных графиков позволяет сделать вывод о том, что уровень проработки заготовки выше при отрицательных зазорах между вершинами бойков. Так при положительном зазоре, равном $0,1$, средневзвешенная интенсивность логарифмических деформаций составляет $0,22$ для угла ступеньки 15° , а при отрицательном зазоре $-0,1$, средневзвешенная в поперечном сечении деформация составляет $0,25$, уменьшив зазор до $-0,3$ возможно увеличить средневзвешенную деформацию до $0,28$.

Видно, что деформационная проработка интенсивнее при угле скоса ступеньки бойка меньше 45° . Что же касается сдвиговых в поперечном сечении деформаций, то наибольшая по модулю их величина наблюдается при отрицательном зазоре равном $-0,2$ и углах скоса бойка более 45° .

Зазор между бойками оказывает существенное влияние на напряженное состояние заготовки. При обжатии бойками с относительным зазором равным $0,1$ в центральной части заготовки возникают средние напряжения, равные -30 МПа (при относительной подаче равной $1,0$), уменьшение относительного зазора до $-0,2$ позволяет снизить уровень средних напряжений до $-47,5$ МПа, что является более благоприятным для деформируемого металла с точки зрения увеличения его технологической пластичности.

Таким образом, для обеспечения наилучшей деформационной прора-

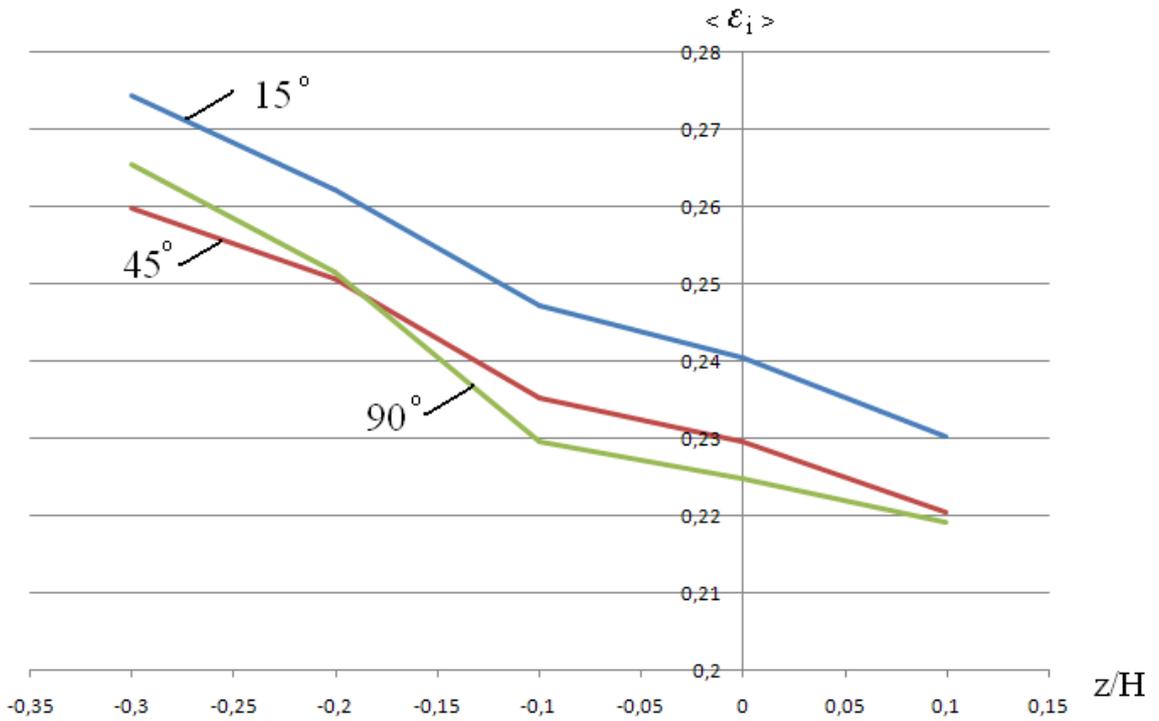


Рисунок 4.36 - График зависимости средневзвешенной интенсивности логарифмических деформаций от относительного зазора бойка ($H/B=0,75$; $h/H=0,1$; $f/H=1$)

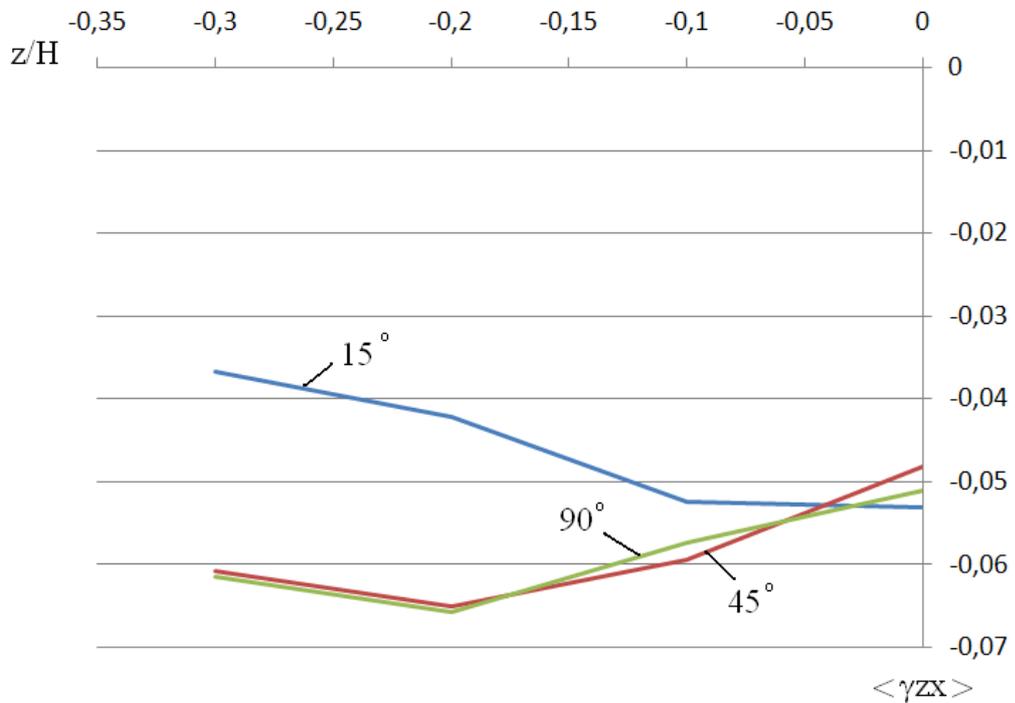


Рисунок 4.37 - График зависимости средневзвешенных сдвиговых деформаций от относительного зазора бойка ($H/B=0,75$; $h/H=0,1$; $f/H=1$)

ботки и высокого уровня сдвиговых деформаций в объеме заготовки, можно рекомендовать протяжку ступенчатыми бойками с отрицательным зазором между их вершинами равным $-0,2$ и углом скоса ступеньки бойка $45^0 \dots 15^0$.

Проведено исследование влияния относительной величины ступеньки бойка в пределах $h/H=0,05 \dots 0,2$ и относительных размеров заготовки $B/H=1 \dots 2$ на напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе обжатия ступенчатыми бойками. При этом в процессе моделирования постоянными были приняты следующие параметры: $z/H=-0,2$; $f/H=0,5$; $\alpha=45^\circ$.

В таблице 4.11 приведены результаты моделирования процесса обжатия заготовок с различным соотношением сторон в виде полей распределения интенсивности логарифмических деформаций и сдвиговых деформаций в поперечном сечении заготовки. Обжатие производилось на величину, равную двум высотам ступеньки бойка. Анализ полученных данных позволяет заключить, что при обжатии заготовки с соотношением $B/H=2$ бойками с относительной высотой ступеньки равной $0,05$, деформации в заготовке сосредотачиваются у ее поверхности в зоне внедрения ступеньки. Центральная часть заготовки и боковые зоны в поперечном сечении остаются не деформированными. Уменьшение ширины заготовки приводит к тому, что при данной величине обжатия в центральной части заготовки возникают деформации, однако их величина не значительна и характер распределения деформаций такой же, как и в первом случае.

Увеличение относительной высоты ступеньки до $0,1$ приводит к тому, что уровень деформаций в осевой части заготовки возрастает, но максимальные деформации сосредоточены в зоне внедрения ступеньки бойка в заготовку, что объясняется малым радиусом ступеньки. Величина интенсивности деформаций в центральной части заготовки возрастает в два раза с $0,25$ до $0,5$.

Увеличение высоты заготовки приводит к более интенсивной проработке осевой части заготовки. Наибольшая величина интенсивности деформаций наблюдается при обжатии заготовки бойками с относительной высо-

Таблица 4.11 - Поля распределения интенсивности логарифмических и сдвиговых деформаций при обжатии заготовок бойками с различной высотой ступеньки

| В/ Н | h/H | Интенсивность деформаций | Сдвиговые деформации | В/Н | Интенсивность деформаций | Сдвиговые деформации |
|---------|------|--------------------------|----------------------|-----|--------------------------|----------------------|
| 2 | 0,05 | | | 1,5 | | |
| | 0,1 | | | | | |
| | 0,15 | | | | | |
| | 0,2 | | | | | |
| 1 | 0,05 | | | 1 | | |
| | 0,1 | | | | | |
| | 0,15 | | | | | |
| | 0,2 | | | | | |

той ступеньки равной 0,2. Однако в этом случае в зоне внедрения бойка в заготовку также возникают большие деформации, которые могут привести к разрушению заготовки.

Влияние высоты ступеньки бойка и размеров заготовки на распределение и величину сдвиговых деформаций аналогично описанному выше распределению интенсивности логарифмических деформаций.

Проведено исследование напряженного состояния заготовки в процессе обжатия бойками с высотой ступеньки различных размеров. Установлено, что при малом обжатии заготовки с относительной высотой ступеньки бойка, равной 0,05, в центральной части заготовки наблюдаются положительные средние напряжения, которые соответствуют всестороннему растяжению. Увеличение высоты ступеньки до 0,2 позволяет достичь в центральной части заготовки сжимающих напряжений. По результатам обработки полученных данных построены графические зависимости отражающие влияние геометрических параметров заготовки и инструмента на величину средневзвешенной интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки (рис. 4.38).

Из графиков (см. рис. 4.38) видно, что общая деформационная проработка заготовки возрастает с ростом высоты ступеньки бойков, следовательно, и с увеличением обжатия заготовки. Так при h/H равной 0,05 средневзвешенная интенсивность логарифмических деформаций для различных заготовок составляет 0,15, а для $h/H=0,2$ эта величина составляет 0,45-0,5 для различных размеров заготовки. Несмотря на значительную деформационную проработку заготовки при больших значениях обжатий увеличивается возможность поверхностного разрушения заготовки. Ступенька на бойке может быть большой величины для возможности протяжки заготовок различных размеров, но обжатие должно осуществляться на ограниченный размер, обусловленный пластическими свойствами материала и быть не меньше 0,1 от высоты заготовки.

График, отражающий влияние геометрии заготовки и инструмента на

средневзвешенную сдвиговую деформацию, показывает, что с увеличением высоты ступеньки бойка уровень сдвиговых деформаций возрастает. Из графика видно, что для заготовок с $H/V=1$ сдвиговые деформации принимают наибольшую величину и занимают наибольшую площадь. Это объясняется, тем, что заготовки большей ширины деформируются только в средней части за счет сдвига, где и сосредотачиваются сдвиговые деформации.

Как показывают проведенные исследования, для максимизации деформационной проработки заготовки соотношение ее сторон должно быть близко к 1, однако так как рассматриваемая операция является одной из нескольких в технологии изготовления поковок типа валов и предшествует протяжке на пластину и служит для увеличения проработки осевой части заготовки, то можно рекомендовать получать заготовку с соотношением $V/H=1,5..2,0$ перед обжимом ступенчатыми бойками.

Таким образом, проведенные выше исследования позволяют рекомендовать для эффективной деформационной проработки операцию обжатия прямоугольной заготовки, при ковке поковок типа валов через пластину, ступенчатыми бойками со следующими параметрами: угол скоса ступеньки бойка $\alpha=15^\circ \dots 45^\circ$; относительная величина подачи заготовки $f/H=0,5 \dots 1,0$, относительный зазор между бойками $z/H= -0,15 \dots -0,3$, относительная высота ступеньки бойка (относительное обжатие) $h/H= 0,1 \dots 0,2$, относительные размеры заготовки $V/H= 1,5 \dots 2$.

Для предложенного способаковки разработана конструкция ступенчатых бойков со сменными вставками (рис. 4.39). Заменяя быстросменные вставки в бойках на различных этапахковки одними и теми же бойками можно ковать как плоскими, так и ступенчатыми, что является большим преимуществом перед базовым процессом протяжки плоскими и специальными выпуклыми бойками.

Проведен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния заготовки, которую обжимают выпуклым бойком, предложенным в работе [104], и бойком новой конфигурации. Поля распределения интенсив-

ности деформаций и средних напряжений представлены на рис. 4.40 (обжатие на одну и ту же величину). При обжатии заготовки выпуклым бойком наибольшие деформации сосредоточены непосредственно под бойком и несколько смещены от центральной зоны заготовки. Обжатие заготовки таким бойком придется выполнять как минимум в два прохода, т.к. нижняя часть заготовки, контактирующая с плоским бойком, практически никак не прорабатывается. Наибольшая интенсивность логарифмических деформаций при обжатии заготовки выпуклым бойком достигает 0,25.

При обжатии заготовки ступенчатыми бойками наибольшие деформации сосредоточены в центральной ее части и достигают величины 0,625, что более чем в 2 раза превышает аналогичный показатель при обжатии выпуклым бойком.

Анализ распределения средних напряжений в поперечном сечении заготовки также показал преимущество предлагаемой схемы обжатия заготовки. По новой схеме протяжки вся центральная часть заготовки находится в напряженном состоянии сжатия в отличие от обжатия выпуклым бойком, когда боковая часть заготовки испытывает растяжение.

Для данной схемыковки проведены исследования эволюции микроструктуры материала приведенные в п. 3.3.2. Получены картины распределения величины зерна в поперечном сечении заготовки. Анализ полученных данных подтвердил эффективность предлагаемой схемыковки в ступенчатых бойках. Неравномерность распределения зерен в заготовке полученной ступенчатыми бойками меньше, кроме того меньше и величина зерна, что говорит о более высоком качестве получаемого изделия.

Дефектообразование в процессе протяжки ступенчатыми бойками. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования дефектообразования в процессе профилирования заготовки ступенчатыми бойками. Экспериментальные исследования выполнены на свинцовых образцах и заключались в протяжке цилиндрической заготовки на пластину с относительными размерами $V/H=1..2$, обжатии заготовки ступенчатыми бойками и правке

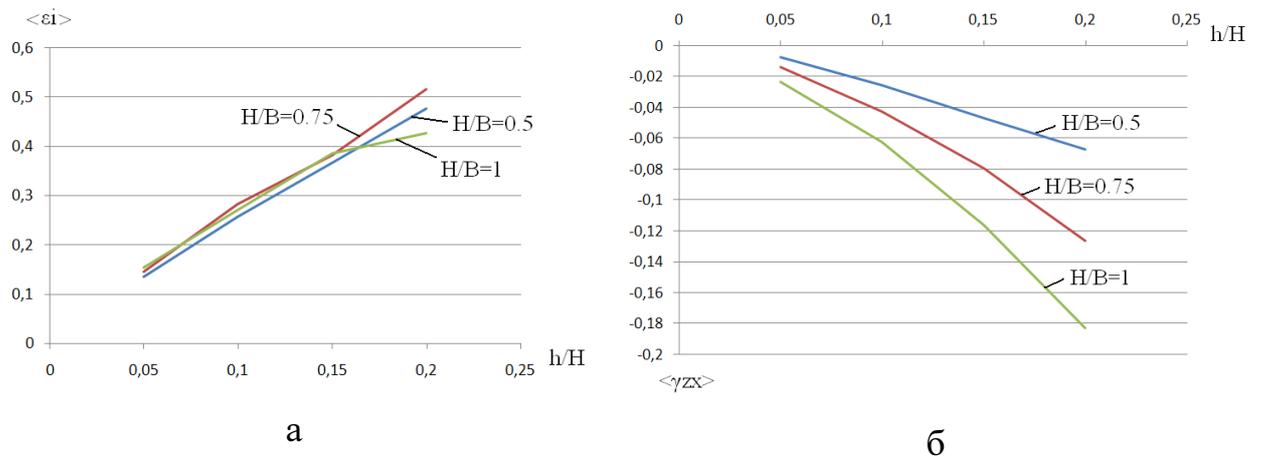


Рисунок 4.38 - График зависимости средневзвешенной интенсивности (а) логарифмических и сдвиговых (б) деформаций от относительной высоты ступеньки бойка ($f/H=0,5$; $z/H=-0,2$; $\alpha=45^\circ$)

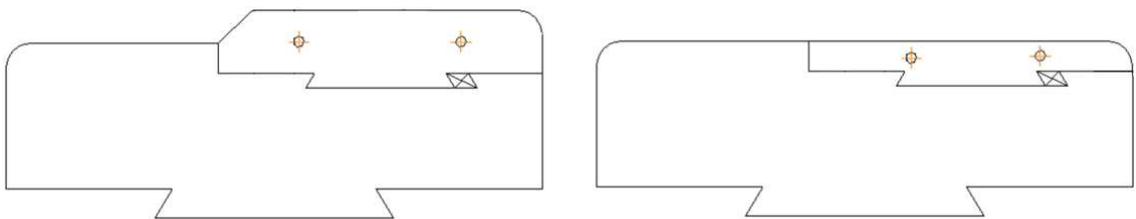


Рисунок 4.39 - Кузнечные бойки со сменными вставками

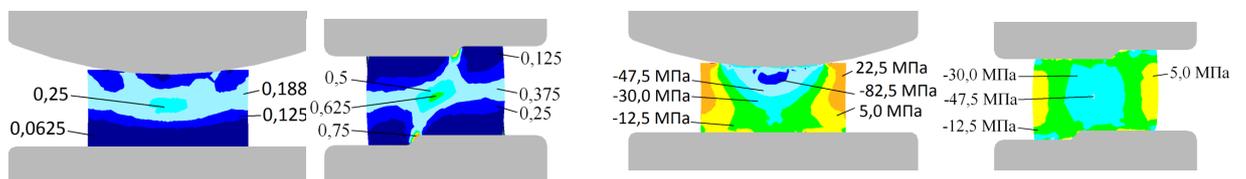


Рисунок 4.40 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений в заготовке при обжатии по двум схемам

плоскими бойками (рис. 4.41) шириной 28 мм.

На рисунке 4.42 приведена заготовка, которая после протяжки в ступенчатых бойках с углом скоса ступеньки 90° была протянута в плоских бойках. Видно, что после протяжки плоскими бойками на заготовке образуется зажим в области «Б». Из этого можно сделать вывод о том, что протяжка заготовки в ступенчатых бойках с углом скоса ступеньки 90° перед протяжкой на плоских бойках ведет к дальнейшему дефектообразованию (зажиму). С целью исключения зажима на поверхности заготовки необходимо ступеньку на бойке выполнить плавной, т.е. с меньшим углом. На рисунке 4.43 приведена заготовка, которая после протяжки в ступенчатых бойках с углом скоса ступеньки 45° была протянута в плоских бойках.

Для экспериментальной проверки полученных результатов проведены испытания по описанной ранее методике. На рисунке 4.44 изображена заготовка, прошедшая предварительную протяжку на пластину и профилирование ступенчатыми бойками с углом скоса ступеньки 90° .

Правка заготовки осуществлялась плоскими бойками. Эксперимент показал, что на поверхности заготовки остается зажим, который ковкой практически невозможно устранить, что ведет к неизбежному браку (см. рис. 4.44 б).

По аналогии с теоретическими исследованиями изготовлены бойки с углом скоса ступеньки 45° , и проведено профилирование заготовки данными бойками. На рисунке 4.45 изображена такая заготовка. При правке такой заготовки плоскими бойками на ее поверхности не образуется зажимов (см. рис. 4.45 б).

Кроме зажимов на поверхности заготовки возможно появление трещин из-за исчерпания ресурса пластичности металла. Для определения вероятности появления трещин проведено исследование на основе моделирования методом конечных элементов. На рисунке 4.46 показаны картины распределения полей деформаций и напряжений в поперечном сечении заготовки, из которых видно, что наиболее опасными с точки зрения дефектообразования яв-

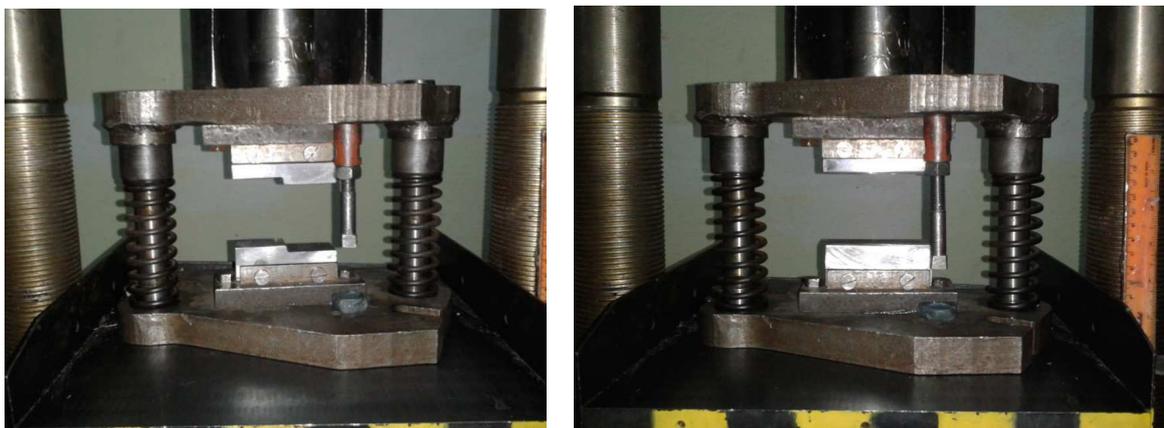


Рисунок 4.41 - Общий вид инструмента и заготовок для проведения экспериментальных исследований протяжки ступенчатыми бойками

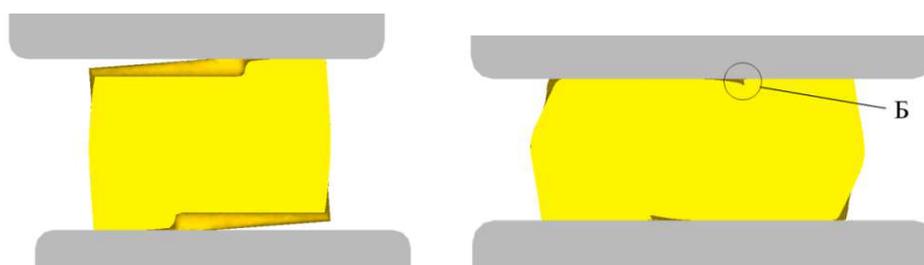


Рисунок 4.42 - Заготовка до и после протяжки в плоских бойках

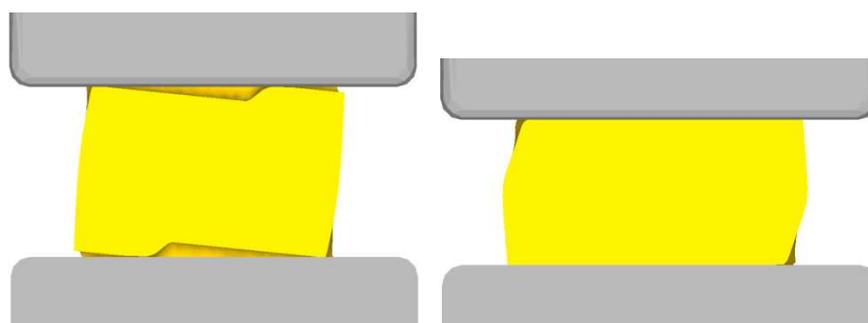


Рисунок 4.43 - Заготовка до и после протяжки в плоских бойках

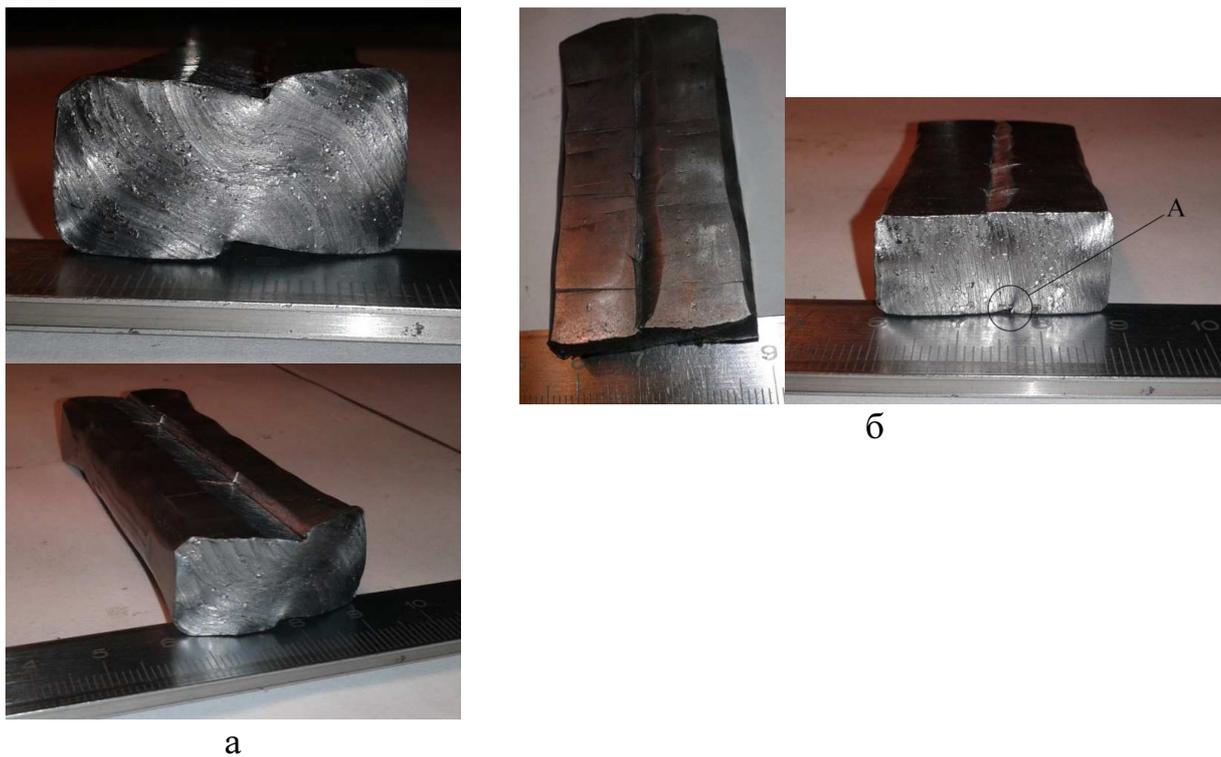


Рисунок 4.44 - Заготовка для правки после протяжки ступенчатыми бойками с углом скоса ступеньки 90° (а) и правки плоскими бойками

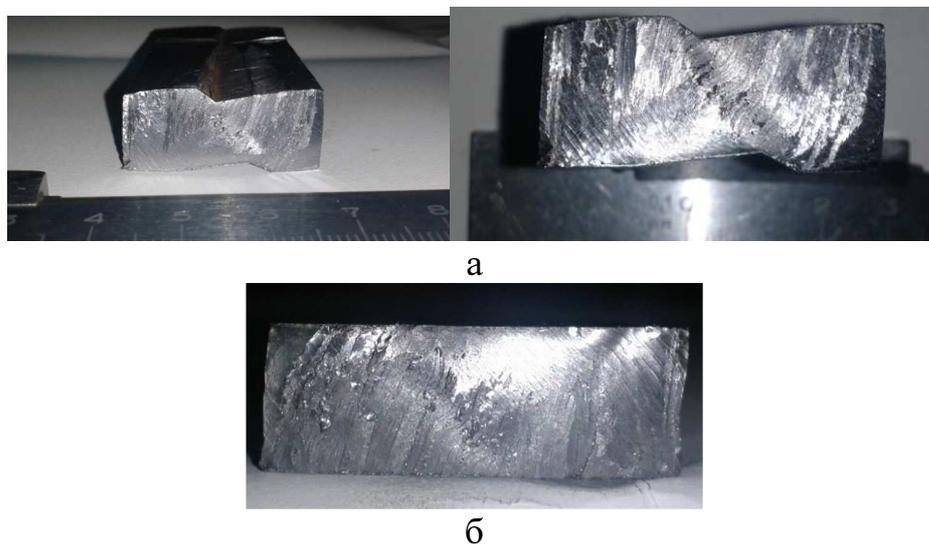


Рисунок 4.45 - Заготовка после профилирования ступенчатыми бойками с углом скоса ступеньки 45° (а) и правки плоскими бойками (б)

ляются зоны металла заготовки, которые находятся в непосредственной близости к ступени бойка. Это связано с тем, что деформации и интенсивность напряжений там наибольшие.

На основе полученных данных о напряженно-деформированном состоянии заготовки был рассчитан показатель жесткости схемы напряженного состояния η для точек на поверхности заготовки. Для определения места возможного образования трещины при протяжке на заготовке, по результатам моделирования, построили путь деформирования для точек P1, P2 и наложили его на диаграмму пластичности, как показано на рисунке 4.47.

В точке P1, которая находится непосредственно под кромкой бойка, деформации имеют значения больше, чем для точки P2, и показатель жесткости схемы напряженного состояния имеет большие значения.

Следовательно наиболее опасной с точки зрения исчерпания ресурса пластичности является область заготовки у точки P1. Из рисунка 4.51 видно, что кривая пластичности находится выше чем кривые P1 и P2. Из этого можно сделать вывод, о том, что разрушения в выбранных точках P1 и P2 при обжати не произойдет.

4.5 Исследование процесса протяжки плит бойками со скосом

С использованием метода конечных элементов проведено моделирование процесса протяжки плоскими бойками со скосом [291-292]. Исходная заготовка имела квадратное поперечное сечение со стороной квадрата 800 мм, длина заготовки 2000 мм. Материал - сталь 38ХНМ. Начальная температура заготовки 1100°C, заготовка разбивалась на 50000 элементов, скорость обжатия заготовки бойком 20 мм/с, при моделировании коэффициент пластического трения Зибеля принимался равным 0,35. Протяжка осуществлялась плоскими бойками шириной $B=1000$ мм с радиусом скругления кромки рабочей поверхности 50 мм, углами скоса 0, 10, 15, 20°.

Проведено исследование влияния величины угла скоса α и длины фаски L (рис. 4.48 а) на распределение интенсивности логарифмических дефор-

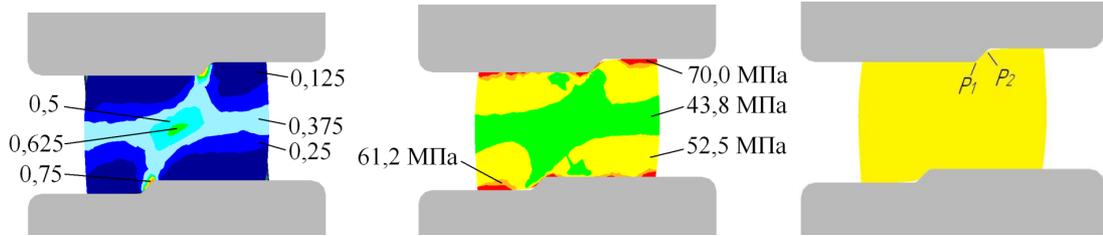


Рисунок 4.46 - Поля распределения интенсивности деформаций и напряжений в поперечном сечении заготовки при ее профилировании ступенчатыми бойками

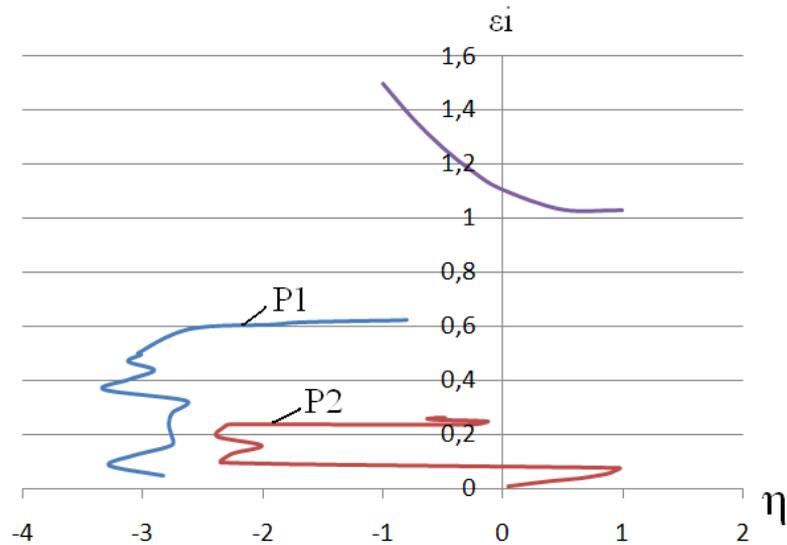


Рисунок 4.47 - Диаграмма пластичности стали 38ХНМ (температура 1100°C) с нанесенным путем деформирования для различных точек при протяжке ступенчатыми бойками с относительной подачей 1 и относительным обжатием 0,1

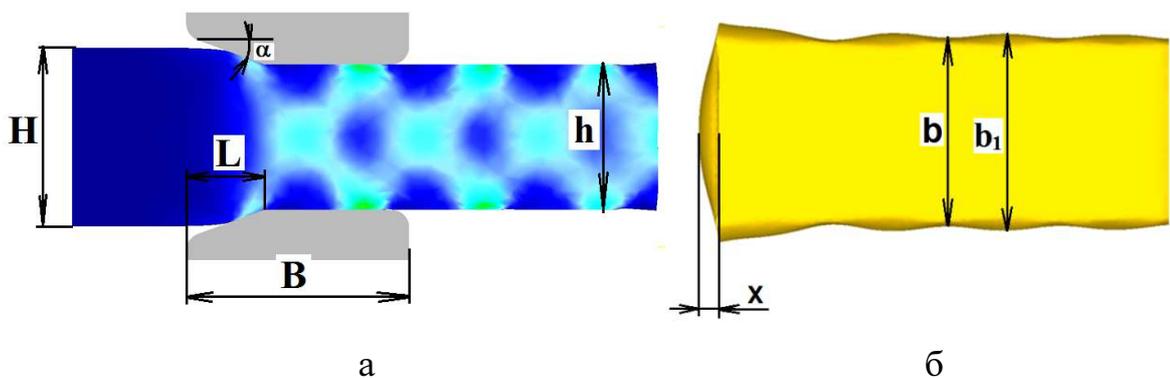


Рисунок 4.48 - Схема процесса протяжки бойками со скосом (а) и заготовки после протяжки (б)

маций и напряжений в заготовке и на формоизменение (параметры b , b_1 , x (рис. 4.48 б)). Относительная длина фаски L/B , принималась равной 0,25, 0,35 и 0,45, относительная подача принималась равной $2/3$ ширины бойка, величина обжатия $\varepsilon_n = 0,15$. В результате моделирования получены поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в заготовке, в зависимости от параметров инструмента и режима протяжки (рис. 4.49).

Установлено, что наибольшие деформации в заготовке в процессе протяжки плоскими бойками сосредотачиваются локально на поверхности заготовки и в центральной ее части. На поверхности заготовки деформации концентрируются непосредственно под кромкой плоского бойка, и это обусловлено интенсивным сдвигом металла при обжатии на границе между жестким недеформируемым концом заготовки и концом заготовки, подвергнутым деформации.

Наибольшие деформации на поверхности заготовки наблюдаются при протяжке бойком без скоса, здесь они достигают величины 0,7 при относительном обжатии 0,15. Наименьшая величина деформации на поверхности заготовки при протяжке бойком с углом скоса $10-15^\circ$, причем длина фаски не оказывает никакого влияния на величину деформации. При протяжке такими бойками интенсивность логарифмических деформаций равна 0,35. Это говорит о том, что образование поверхностной трещины в данном случае менее вероятно.

Концентрация больших деформаций в центральной части заготовки обусловлена большим пятном контакта между заготовкой и инструментом. Видно, что зоны максимальных деформаций в заготовке расположены периодически, вдоль оси, что соответствует периодическим подачам заготовки в процессе протяжки.

Такая локализация деформаций нежелательна, т.к. она ведет к исчерпанию ресурса пластичности металла и образованию трещины. Наименьшая неравномерность распределения деформаций в объеме заготовки соответствует протяжке бойком с углом скоса $\alpha = 10^\circ$ и длиной фаски $L/B = 0,35$ при

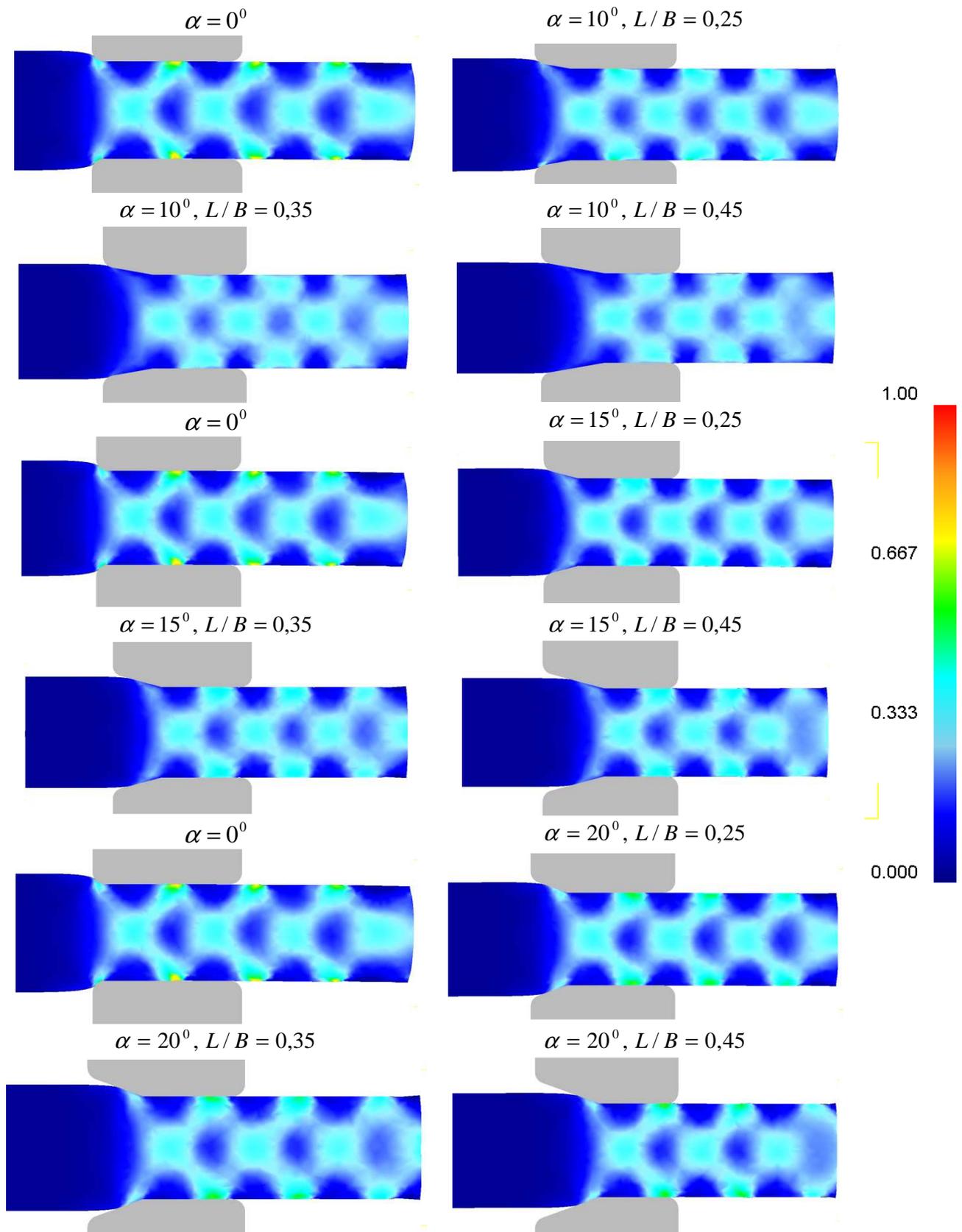


Рисунок 4.49 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки в процессе протяжки плоскими бойками со скосом различной величины при относительном обжатии заготовки, равном 0,15 и подаче, равной $2/3$ ширины бойка

постоянной подаче, равной $2/3$ ширины бойка.

На основе полученных данных о напряженно-деформированном состоянии заготовки был рассчитан показатель жесткости схемы напряженного состояния η для точки, находящейся на поверхности заготовки в зоне максимальных деформаций.

Для определения возможности образования трещины при протяжке на заготовке, по результатам моделирования, построили путь деформирования [293] и наложили его на диаграмму пластичности (рис. 4.50).

Из рис. 4.50 видно, что ближе всего к кривой предельных деформаций находится путь деформирования для точки с поверхности заготовки, протягиваемой плоскими бойками без фаски. Это говорит о том, что появление поверхностных трещин более вероятно для заготовки, протягиваемой данным инструментом. Анализируя пути деформирования для подобных точек поверхности заготовки, протягиваемых бойками с различной величиной фаски, можно сделать вывод о том, что величина фаски оказывает определенное влияние на возможность разрушения заготовки.

Из рис. 4.50 видно, что наименьшая вероятность образования поверхностной трещины у заготовки, протягиваемой бойками с углом фаски 10° и длиной 450 мм ($L/B=0,45$), что позволяет рекомендовать такой инструмент для протяжки плит.

Проведено исследование формоизменения заготовки в процессе протяжки бойками различной конфигурации. На рисунке 4.51 приведены картины, отражающие формоизменение заготовки после протяжки бойками различной конфигурации. Видно, что формоизменение в значительной мере определяется размерами инструмента. Так из рисунка 4.51 следует, что наибольшая величина «языка» и боковая волнистость на поковке будет образовываться при протяжке плоским бойком без скоса. Протяжка же скошенным бойком позволяет существенно снизить величину данных дефектов, что в последствие ведет к уменьшению технологического времени на правку этих дефектов.

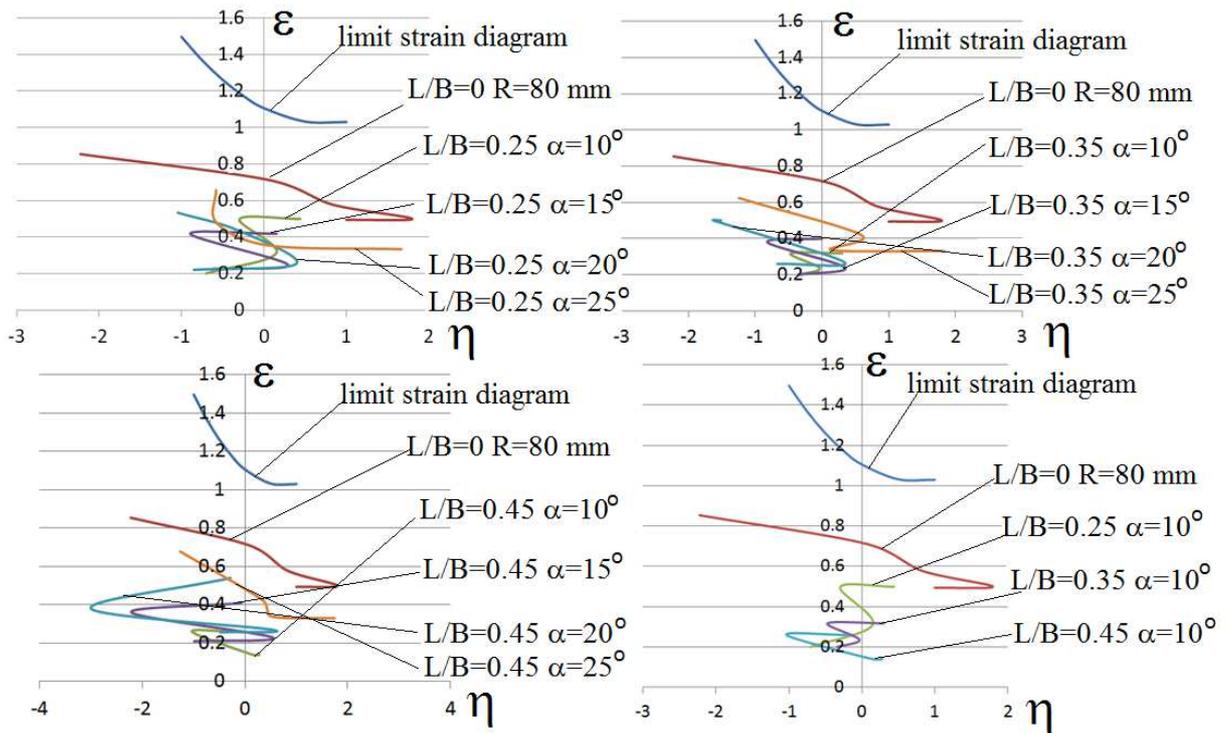


Рисунок 4.50 - Диаграмма пластичности для стали 38ХНМ (температура 1100 °С, скорость деформации $8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) с нанесенным путем деформирования для точки с поверхности заготовки, находящейся непосредственно под кромкой бойка при протяжке плоскими бойками со скосом

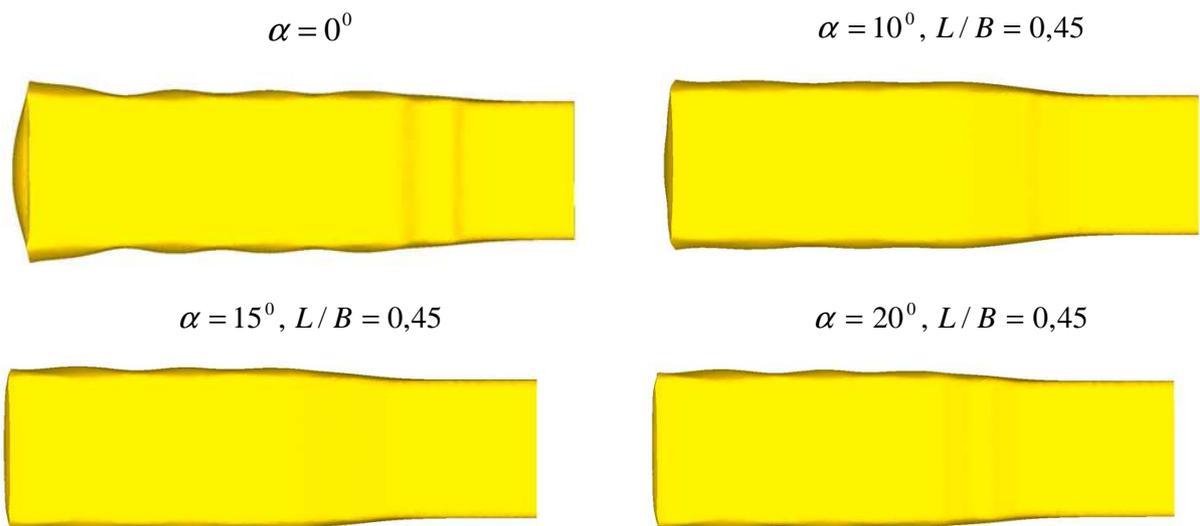


Рисунок 4.51 - Внешний вид заготовки после протяжки бойками различных размеров (вид сверху) при суммарном относительном обжатии заготовки равном 0,3 (два прохода) и подаче равной $2/3$ ширины бойка

Для количественной оценки влияния параметров инструмента на формоизменение заготовки построены графики зависимостей таких параметров как относительная кривизна боковой поверхности b/b_1 (см. рис. 4.51 а) и относительная величина «языка» x/b (см. рис. 4.51 б).

Из рисунка 4.52 видно, что относительная величина «языка» уменьшается с увеличением угла скоса бойка. Так при протяжке плоским бойком без скоса величина x/b составляет около 0,1, а при протяжке бойком с углом скоса 25° 0,03-0,05, что в 2-3 раза меньше. Также большое влияние оказывает относительная длина фаски. При $L/V=0,25$ с увеличением угла скоса от 10° до 25° параметр x/b уменьшается от 0,1 до 0,05, а при $L/V=0,35$ - 0,1 до 0,03. Оптимальным с точки зрения величины дефекта «язык» является протяжка бойком с длиной фаски равной 0,35 ширины бойка и углом скоса фаски $10-20^\circ$.

Величина боковой волнистости также является чувствительной к размерам инструмента. Так максимальная величина b/b_1 наблюдается при протяжке бойком с углом скоса 10° и относительной величиной фаски L/V равной 0,35. Таким образом, с точки зрения наилучшего формоизменения заготовки в процессе протяжки плоскими бойками является боек с углом скоса $10-15^\circ$ и относительной длиной скоса, равной 0,35 от ширины бойка.

Также было проведено экспериментальное исследование процесса протяжки плоскими бойками со скосом на свинцовых и стальных заготовках. Эксперимент состоял изковки с квадратным поперечным сечением плоскими бойками из цилиндрической заготовки. После чего проводилась протяжка различными бойками: плоскими с радиусной кромкой и плоскими со скосом (рис. 4.53, 4.54). Диаметр исходной заготовки принимался равным 28 мм, ширина бойков 28 мм, угол скоса бойков 10° и 15° , длина фаски $L = 9$ мм.

Экспериментальные исследования выполнены с целью верификации теоретически полученных данных, касающихся рекомендацийковки плит, полученных ранее. На рис. 4.55 приведен общий вид заготовок, полученныхковкой инструментом различной конфигурации.

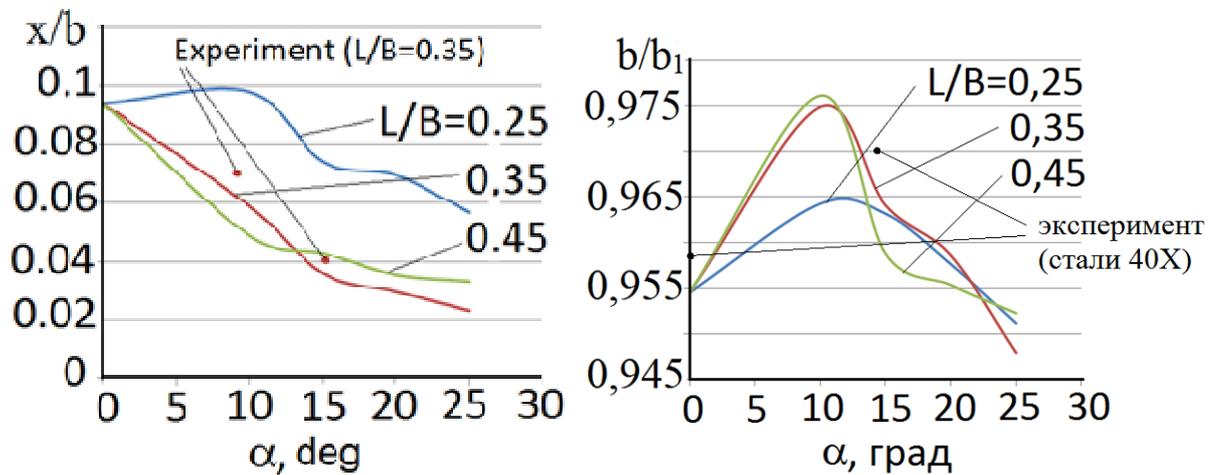


Рисунок 4.52 - Графики зависимости относительной величины языка (а) и относительной кривизны боковой поверхности (б) от геометрических параметров инструмента



Рисунок 4.53 - Экспериментальная оснастка и свинцовые заготовки

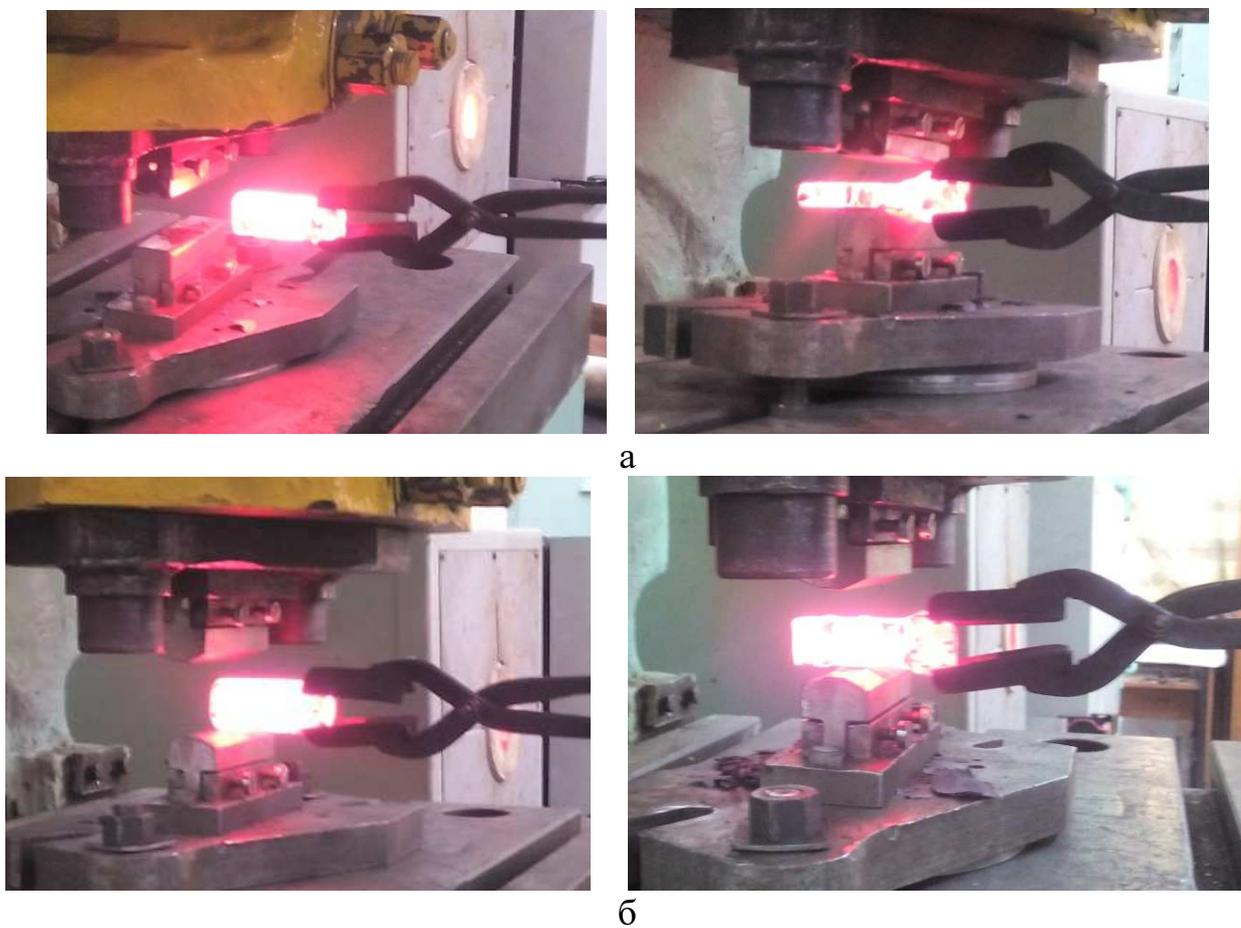


Рисунок 4.54 - Процесс ковки плит плоскими бойками (а) и бойками со скосом (б) заготовки из стали 40Х

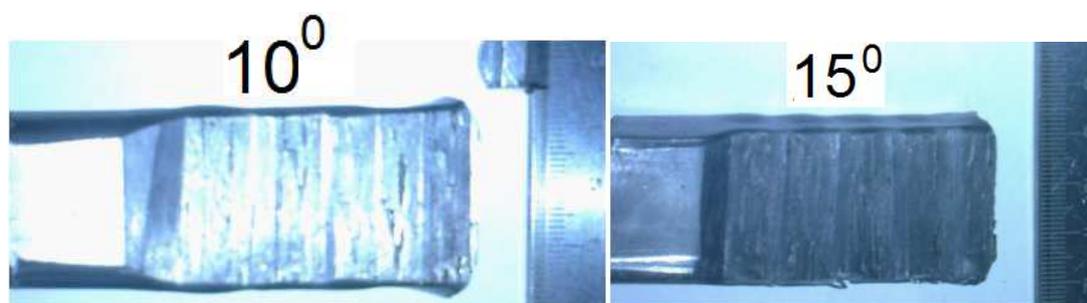


Рисунок 4.55 - Заготовки, полученные ковкой бойками со скосом

Полученные результаты подтверждают теоретические предположения о влиянии геометрии инструмента на течение металла в процессековки плит. Отклонение параметров x/b и b/b_1 , полученных на основе теоретических исследований, находится в пределах 5-15% (см. рис. 4.52).

Для данной схемыковки проведены исследования эволюции микроструктуры материала, приведенные в п. 3.3.2. Получены картины распределения величины зерна в продольном сечении заготовки. Установлено, что протяжка бойками со скосом позволяет получить более равномерное распределение зерна в объеме заготовки, нежели традиционная схемаковки плоскими бойками с радиусной кромкой (см. рис. 3.13).

Выводы

1. Установлено, что в процессе протяжки цилиндрической заготовки скошенными бойками, с увеличением обжатия заготовки средняя величина логарифмических деформаций сдвига вдоль линии сдвига увеличивается по прямо пропорциональной зависимости. При увеличении относительной подачи от 0,6 до 1 средняя величина сдвиговых деформаций вдоль линии интенсивного сдвига увеличивается в среднем на 25%. Дальнейшее увеличение относительной подачи от 1 до 1,4 не приводит к существенному увеличению уровня сдвиговых деформаций. Для обеспечения наибольшего уровня сдвиговых деформаций в заготовке, рекомендуется применение бойков со скосом $10-15^{\circ}$ и протяжку осуществлять с подачей, равной 1 или близкой к ней. Ковка должна вестись с единичными обжатиями до 30%. Ковку необходимо вести с постоянными кантовками заготовки при протяжке по следующей схеме «обжатие - кантовка на 90° - обжатие – кантовка на 45° – обжатие – кантовка на 90° - обжатие».

2. Экспериментально установлено, что в процессе протяжки бойками со скосом при увеличении степени высотной деформации от 18,5% до 33% величина наибольших сдвиговых деформаций сосредоточенных в центре заготовки, возрастает от 0,3 до 0,65. Экспериментально подтверждена адекватность полученных математических моделей.

3. Установлено, что в процессе ковки протяжкой в несимметричных комбинированных бойках сдвиговые деформации в заготовке при внедрении верхнего инструмента сосредоточены локально в верхней части, но уже при обжатии на 20% в заготовке появляется область сдвиговых деформаций, имеющая достаточно большую площадь, и проходит через центр заготовки. Установлено, что угол выреза нижнего бойка имеет незначительное влияние на величину средневзвешенной сдвиговой деформации. Установлено, что уровень сдвиговых деформаций в заготовке при ковке комбинированными и бойками со скосом отличается не значительно, однако более благоприятное

напряженное состояние заготовки обеспечивается при ковке комбинированными бойками. Таким образом, можно рекомендовать ковку комбинированными бойками верхним скошенным и нижним вырезным несимметричным. Причем угол скоса верхнего бойка должен составлять от 10° до 20° , угол β вырезного бойка от 75° до 85° . Ковка должна вестись с единичными обжатиями не менее 20% от диаметра заготовки.

4. Проведено исследование процессаковки цилиндрической заготовки вырезными ассиметричными бойками. Установлено, что увеличение угла выреза β от 65° до 85° приводит к увеличению средних сдвиговых деформаций в заготовке от 0,11 до 0,29 при обжатии на 30%. Установлено, что зазор между центрами углов выреза верхнего и нижнего бойков должен быть близкий к нулю для обеспечения больших сдвиговых деформаций. Результаты исследования напряженного состояния при ковке в рассматриваемом инструменте позволяют сделать вывод о его благоприятной схеме с точки зрения величины пластической деформации металла в центре заготовки.

5. Установлено, что в процессековки цилиндрической заготовки ступенчатыми бойками при увеличении высоты уступа бойков и хода обжатия уровень сдвиговой деформации в заготовке возрастает. Определили, что увеличение перекрытия между бойками от 0 до 300 мм не оказывает влияния на уровень сдвиговых деформаций в заготовке, но при этом увеличивается интенсивность логарифмических деформаций, что говорит о более интенсивном течении металла заготовки в продольном направлении. Целесообразным, с точки зрения качественного формоизменения, является ковка заготовки бойком с уступом, равным 100 мм, ходом обжатия 300 мм. При большем обжатии бойками с большим уступом в поперечном сечении заготовки наблюдается дефект в виде зажима. Обжатия заготовки ступенчатыми бойками не должны превышать 10-15% от диаметра заготовки, что обеспечит качественную, равномерную проработку и позволит избежать дефектообразования.

6. Предложен способ протяжки поковок типа валов через пластину с промежуточным обжимом заготовки ступенчатыми бойками. Для наиболь-

шей деформационной проработки протяжка должна осуществляться бойком с углом скоса ступеньки $\alpha=15^\circ \dots 45^\circ$; относительная величина подачи заготовки должна быть равна $f/H=0,5 \dots 1,0$, относительный зазор между бойками $z/H= -0,15 \dots -0,3$, относительная высота ступеньки бойка (относительное обжатие) $h/H= 0,1 \dots 0,2$, относительные размеры заготовки $B/H= 1,5 \dots 2$. Предложена конструкция бойков, которая обеспечивает быстросменность и позволяет осуществлять протяжку на различных этапах технологического процесса в различных режимах.

7. Установлено, что с точки зрения минимальной неравномерности распределения деформаций в заготовке при протяжке плит плоскими бойками со скосом, необходимо, чтобы боек имел скошенную кромку с углом скоса $\alpha = 10^\circ$, и длиной фаски $L/B = 0,35$ при постоянной подаче, равной $2/3$ ширины бойка. Определили, что наименьшая вероятность образования поверхностных трещин у заготовки, протягиваемой бойками с углом фаски 10° и длиной $L/B=0,45$. С точки зрения наилучшего формоизменения заготовки в процессе протяжки плоскими бойками является боек с углом скоса $10-15^\circ$ и относительной длиной скоса равной $0,35$ от ширины бойка. Таким образом, можно рекомендовать для протяжки плит, плоские бойки с углом скоса $10-15^\circ$, и относительной длиной фаски $L/B = 0,35 \dots 0,45$.

РАЗДЕЛ 5

УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ ЗАГОТОВКИ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И КИНЕМАТИКИ ПРОЦЕССА ПРОТЯЖКИ

5.1 Управление НДС заготовки на основе регулирования температурного поля

5.1.1 Исследование протяжки заготовки с симметричным неравномерным температурным полем

Одной из проблемковки длинномерных изделий типа валов, является неравномерность распределения деформаций в поперечном сечении заготовки. Причем наблюдается несколько картин такой неравномерности: интенсивная проработка поверхностных слоев заготовки, и в этом случае образуется такой дефект формы как утяжина на торце поковки (рис. 5.1. а), которую необходимо удалять; интенсивная проработка центральных слоев заготовки, приводящая к интенсивному течению осевой части металла (рис. 5.1 б). Появление первого дефекта ведет к увеличению металлоемкости изделия вследствие повышения количества отходов. Второй дефект заготовки в процессековки совместно с интенсивным охлаждением поверхности детали и высоким перепадом температур (в случаековки сталей с низкой теплопроводностью) может привести к трещинообразованию на торце. Для того чтобы избежать появления подобных дефектов, необходимо обеспечить равномерное распределение деформаций в поперечном сечении заготовки в процессековки.

Протяжка плоскими бойками. Проведено исследование процесса протяжки плоскими бойками цилиндрической заготовки из стали 35 в равномерном (температура заготовки 1200°С) и неравномерном температурном поле [294-300].

Неравномерное температурное поле формировалось охлаждением заготовки до температуры поверхности 1000°С, 900°С и 800°С. Ковка проводилась с различной величиной обжатия ($\varepsilon_h = \Delta D/D_0$, ΔD - величина абсолютного



а



б

Рисунок 5.1 - Дефекты (а – торцевая вогнутость, б – торцевая выпуклость) образованные в процессе протяжки валов традиционным кузнечным инструментом

обжатия) $\varepsilon_h = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3$ и различной относительной подачей ($\bar{f} = f/D_0$) $\bar{f} = 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1$. Проведено моделирование схем протяжки, в ходе которых обеспечивалось минимум 3 нажима бойком на заготовку для учета влияния ее жестких недеформированных концов на напряженно-деформированное состояние. Моделирование процесса протяжки проводилось в программе, которая основана на методе конечных элементов (Deform 3D). В качестве заготовки был принят цилиндр диаметром 1000 мм и длиной 3000 мм из материала сталь 35. Протяжка производилась при начальной температуре заготовки 1200°C (равномерное температурное поле), а также после ее охлаждения во время ковки до температур поверхности 1000°C, 900°C и 800°C (неравномерное температурное поле) плоскими бойками шириной $B = 1200$ мм и радиусом скругления кромки рабочей поверхности 100 мм. Заготовка разбивалась на 50000 элементов, скорость деформирования 25 мм / с. При моделировании коэффициент пластического трения Зибеля принимался равным 0,35. В ходе моделирования исследовано влияние величины относительного обжатия, относительной подачи и температурного поля заготовки на распределение интенсивности логарифмических деформаций по ее объему, а также на величину показателя жесткости схемы напряженного состояния.

Проведено исследование влияния размеров заготовки на распределение температуры по ее сечению при охлаждении. Построены графики распределения температуры для наиболее распространенных в ковке размеров сечений $D = 750 \dots 1500$ мм в различный момент охлаждения заготовки, а именно при температуре поверхности 1000°C, 900°C, 800°C (рис. 5.2).

Анализ кривых на графике (рис. 5.2) позволяет сделать вывод о том, что разница между данными температурными полями незначительна. Таким образом, можно считать, что перепад температур по сечению заготовки для диаметров 750...1500 мм отличается незначительно.

Для определения адекватности полученных данных проведено сравнение известных экспериментальных данных по охлаждению на воздухе куз-

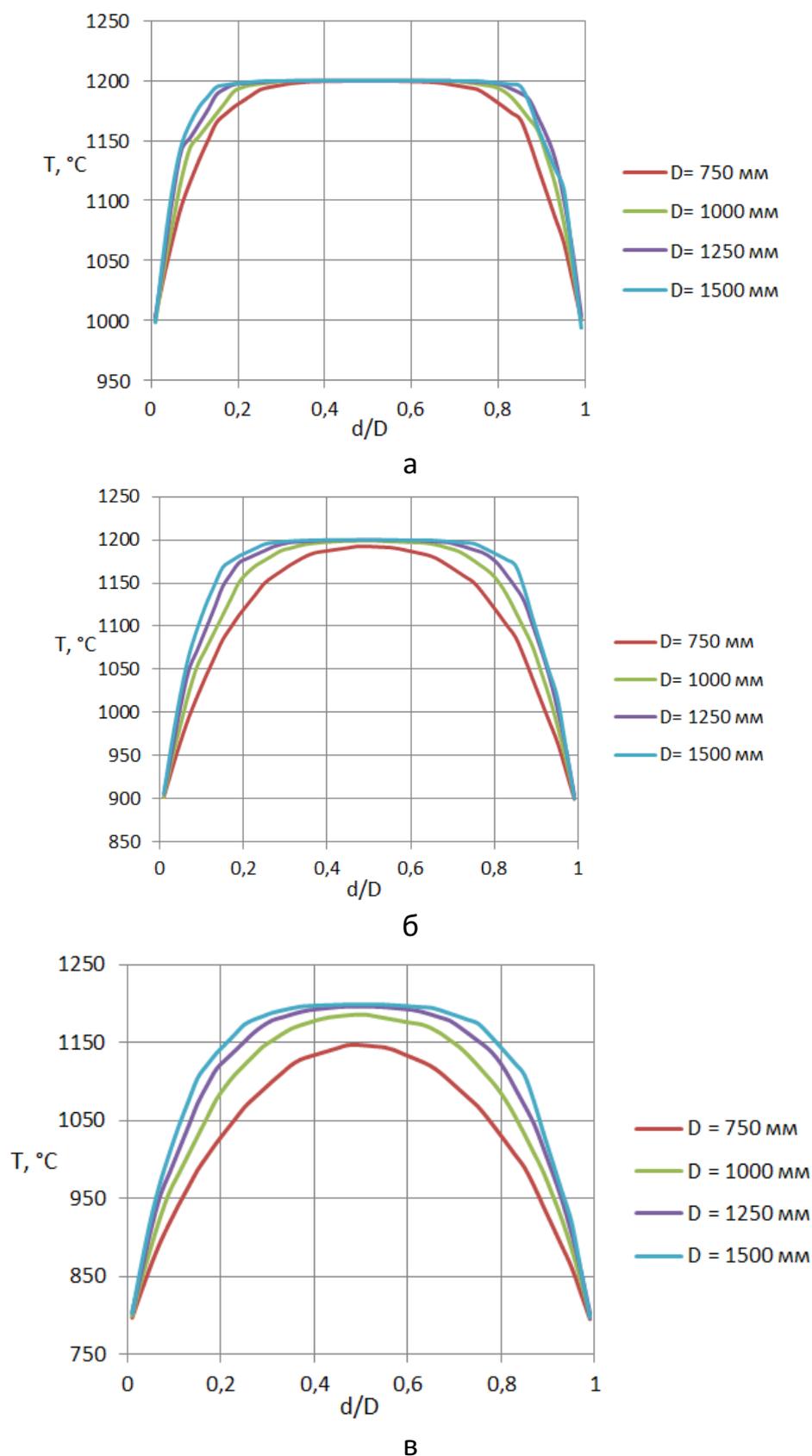


Рисунок 5.2 - График распределения температуры для различных сечений слитка при температуре поверхности 1000°C (а), 900°C (б) и 800°C (в)

нечного слитка из стали 35 весом 10 тонн [300]. В результате сравнения можно утверждать, что моделируемое температурное поле по сечению заготовки в интервале ковочных температур 800...1200°С схоже с экспериментальным (рис. 5.3). Расхождение результатов моделирования и экспериментальных данных находится в пределах 10 %, что не приведет к существенным погрешностям.

Полученные поля распределения температур накладывали на заготовку и моделировали ее протяжку плоскими бойками. По результатам исследования были построены графики распределения интенсивности логарифмических деформаций по поперечному сечению заготовки (рис. 5.4, сечение Б - Б) в зависимости от разных величин обжатия и относительных подач при протяжке заготовки с равномерным и неравномерным температурным полем с температурой поверхности 1000°С, 900°С, 800°С (рис. 5.5).

Анализ полученных данных позволил установить, что при протяжке заготовки плоскими бойками в равномерном температурном поле с относительной подачей $\bar{f}=0,3$ и величиной обжатия $\varepsilon_h=0,05...0,1$ (см. рис. 5.5, столбец 1, пунктир) наблюдается низкая неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций, что объясняется слабой проработкой периферийных слоев заготовки, а также наличием непроработанной осевой зоны. При увеличении величины обжатия (до $\varepsilon_h=0,3$) наружные слои заготовки прорабатываются более интенсивно, однако осевая зона остается слабо проработанной, что приводит к увеличению неравномерности распределения интенсивности логарифмических деформаций от 0,125 (при $\varepsilon_h=0,05$) до 0,75 (при $\varepsilon_h=0,3$).

После охлаждения поверхности заготовки до 1000°С при ее протяжке с относительной подачей $\bar{f}=0,3$ и величиной обжатия $\varepsilon_h=0,05...0,1$ также наблюдается низкая неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций, однако с увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h=0,3$ наблюдается более интенсивная проработка внутренних слоев вслед-

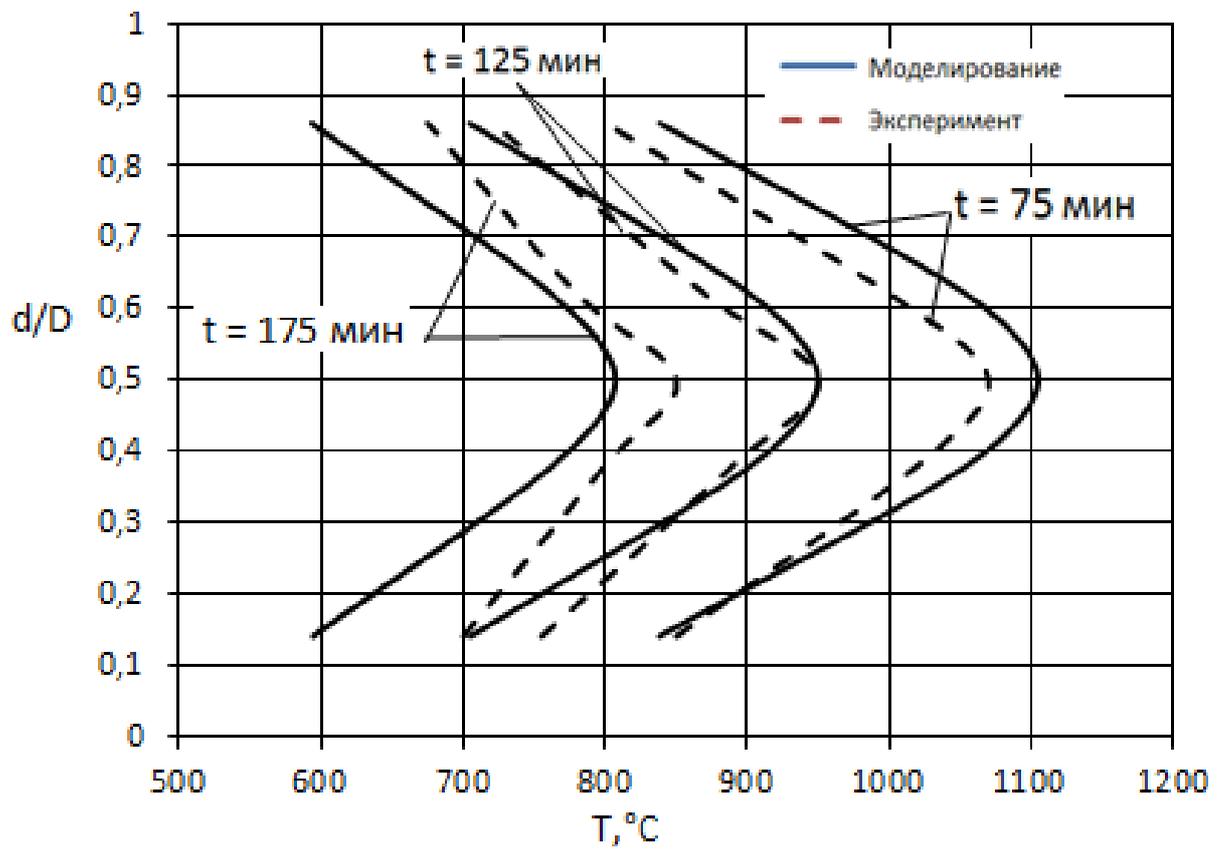


Рисунок 5.3 - График распределения температур по сечению слитка из стали 35 весом 10 т в разный момент времени

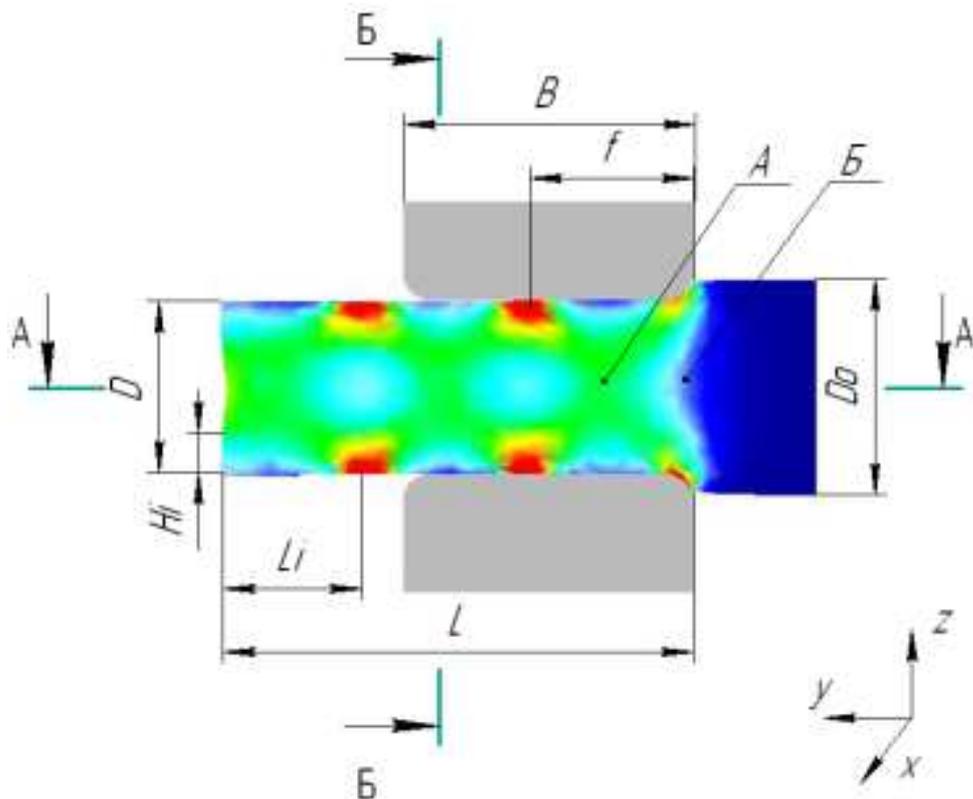


Рисунок 5.4 - Схема протяжки заготовки плоскими бойками

ствии повышения сопротивления деформированию наружных за счет охлаждения. При этом неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций (разница максимального и минимального значения) уменьшается по сравнению с протяжкой заготовки с равномерным температурным полем и составляет 0,094 (при $\varepsilon_h=0,05$) и 0,19 (при $\varepsilon_h=0,3$) (см. рис. 5.5, в, строка 1).

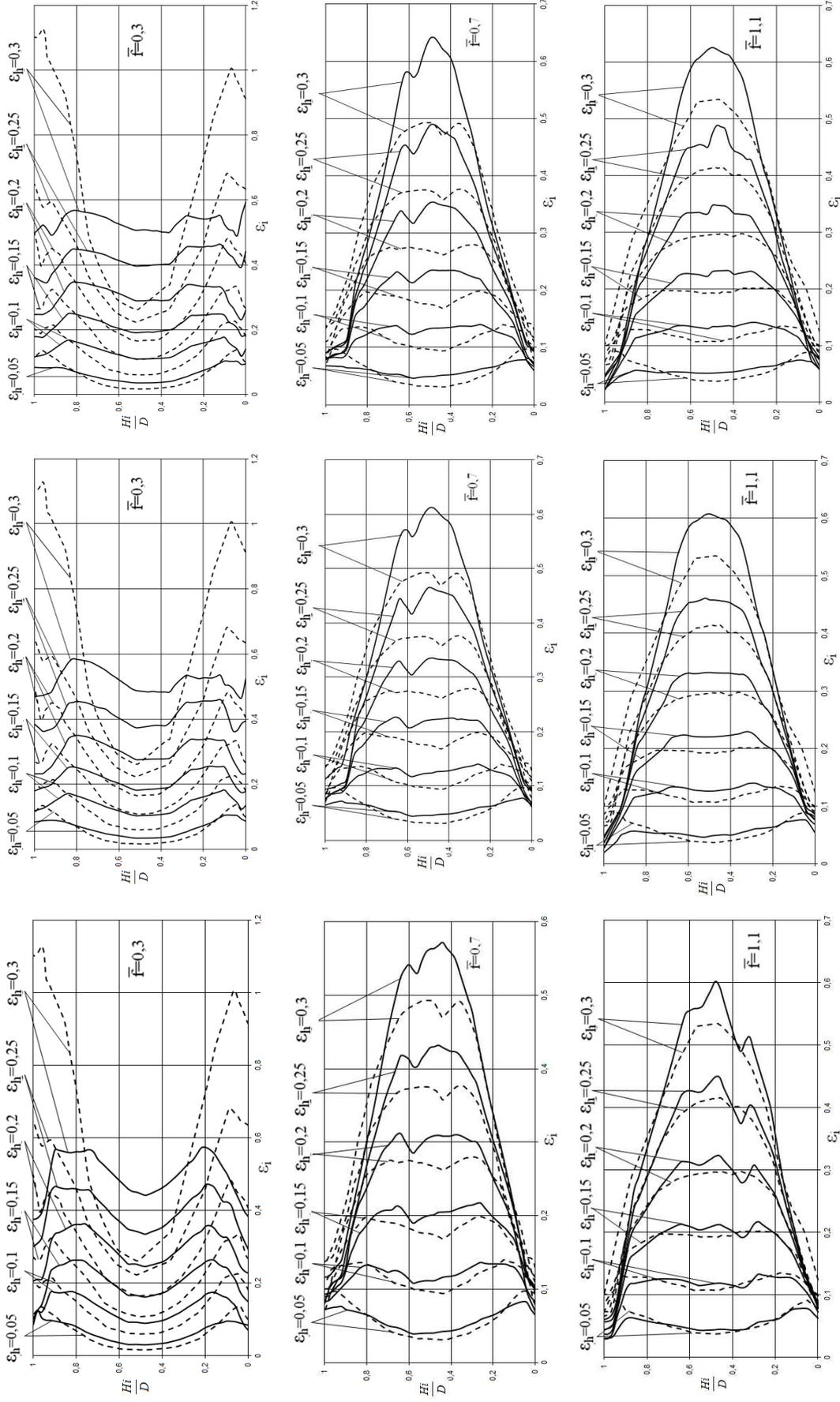
При охлаждении заготовки еще на 100°C проработка периферийных слоев остается на прежнем уровне за счет увеличения их сопротивления деформированию. Происходит деформирование осевой зоны заготовки поверхностными более жесткими слоями. При этом неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций уменьшается и составляет 0,07 (при $\varepsilon_h=0,05$) и 0,12 (при $\varepsilon_h=0,3$) (см. рис. 5.5, б, строка 1).

После охлаждения поверхности заготовки до 800°C при величине обжатия $\varepsilon_h=0,1\dots 0,3$ сохраняется проработка лишь осевой зоны заготовки. Неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций уменьшается и составляет 0,067 (при $\varepsilon_h=0,05$) и 0,1 (при $\varepsilon_h=0,3$) (см. рис. 5.5, в, столбец 1).

Также следует отметить, что при величине обжатия $\varepsilon_h=0,05\dots 0,1$ и различных подачах $\bar{f}=0,3\dots 1,1$ неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций практически одинакова и характеризуется наличием непроработанной осевой зоны (см. рис. 5.5) при всех исследуемых температурных полях.

При протяжке заготовки с величиной относительных подач от 0,5 до 1,1 и степени обжатия $\varepsilon_h=0,05\dots 0,15$ с равномерным и неравномерным температурным полями наблюдается уменьшение неравномерности распределения интенсивности логарифмических деформаций по ее сечению за счет его слабой проработки (см. рис. 5.5).

При протяжке заготовки с равномерным температурным полем с увеличением степени обжатия от 0,15 до 0,3 происходит более интенсивная про-



а б в

Рисунок 5.5 - График распределения интенсивности логарифмических деформаций по сечению заготовки Б-Б (см. рис. 5.4) в зависимости от разных величин обжатия и относительных подал при протяжке с равномерным температурным полем (пунктир) и с охлаждением в процессековки до 1000°C (а), 900°C (б) и 800°C (в)

работка осевой зоны заготовки. Однако неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций возрастает за счет образования застойной зоны под рабочей поверхностью деформирующего бойка и увеличения проработки лишь осевой зоны. Она составляет 0,073 (при $\varepsilon_h=0,05$) и 0,27 (при $\varepsilon_h=0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f}=0,5$, а также 0,05 (с $\varepsilon_h=0,05$) и 0,43 (с $\varepsilon_h=0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f}=1,1$ (см. рис. 5.5, строки 2-3, пунктир).

При охлаждении поверхности заготовки до 1000°C сохраняется увеличение деформирования лишь центральной зоны заготовки, что приводит к еще большей неравномерности распределения интенсивности логарифмических деформаций, которая составляет 0,07 (при $\varepsilon_h=0,05$) и 0,39 (при $\varepsilon_h=0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f}=0,5$, а также 0,048 (с $\varepsilon_h=0,05$) и 0,54 (с $\varepsilon_h=0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f}=1,1$ (см. рис. 5.5, а, строки 2-3).

При охлаждении заготовки еще на 100°C характер кривых на графиках сохраняется. Неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций уменьшается на 0,034 (при $\varepsilon_h=0,05$) и увеличивается на 0,04 (при $\varepsilon_h=0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f}=0,5$, а также уменьшается на 0,001 (при $\varepsilon_h=0,05$) и увеличивается на 0,2 (при $\varepsilon_h=0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f}=1,1$ (см. рис. 5.5, б, строки 2-3).

С уменьшением температуры поверхности заготовки до 800°C неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций при $\varepsilon_h=0,05$ уменьшается до 0,034 с величиной относительной подачи $\bar{f}=0,5$, что в 2 раза меньше, чем при протяжке заготовки с равномерным температурным полем и увеличивается до 0,467 при $\varepsilon_h=0,3$ и $\bar{f}=1,1$, что говорит о интенсивной проработке осевой зоны заготовки.

Такое большое значение деформации в осевой части заготовки положительно влияет на проработку литой дефектной части слитка, способствует

залечиванию дефектов в виде пустот металлургического происхождения.

Проведено исследование распределения интенсивности логарифмических деформаций вдоль оси протянутого участка поковки (сечение А-А, см. рис. 5.4) в зависимости от изменения величины обжатия и относительной подачи для различных температурных полей заготовки (рис. 5.6).

Анализ полученных данных позволил установить, что наименьшая неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций наблюдается в центральной части заготовки при протяжке заготовки как с равномерным, так и с неравномерными температурными полями при относительной подаче $\bar{f} = 0,3$. Как показали результаты исследования распределения интенсивности логарифмических деформаций по поперечному сечению заготовки, это вызвано низким уровнем проработки осевой зоны заготовки.

При протяжке заготовки с равномерным температурным полем с относительной подачей $\bar{f} = 0,5 \dots 1,1$ и величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,05 \dots 0,3$ происходит увеличение неравномерности распределения интенсивности логарифмических деформаций в осевой зоне заготовки от 0,025 при $\bar{f} = 0,5$ и $\varepsilon_h = 0,05$ до 0,346 при $\bar{f} = 1,1$ и $\varepsilon_h = 0,3$. Пики значений интенсивности логарифмических деформаций соответствуют по длине части заготовки, которая при протяжке находится непосредственно под бойком (точка А, см. рис. 5.4), а малые значения находятся под краем бойка (точка Б, см. рис. 5.4).

После охлаждения заготовки до $1000 \dots 800^\circ\text{C}$ неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций уменьшается до $0,02 \dots 0,29$ и характеризуется высоким уровнем проработки осевой зоны.

Такое синусоидальное распределение деформации вдоль оси заготовки после протяжки вызывает неравномерность ее механических свойств. Поэтому при последующем проходе необходимо производить протяжку со смещением заготовки на половину ширины бойка, что позволит обеспечить более равномерное распределение интенсивности логарифмических деформаций вдоль оси заготовки. Необходимо также учитывать, что при протяжке заго-

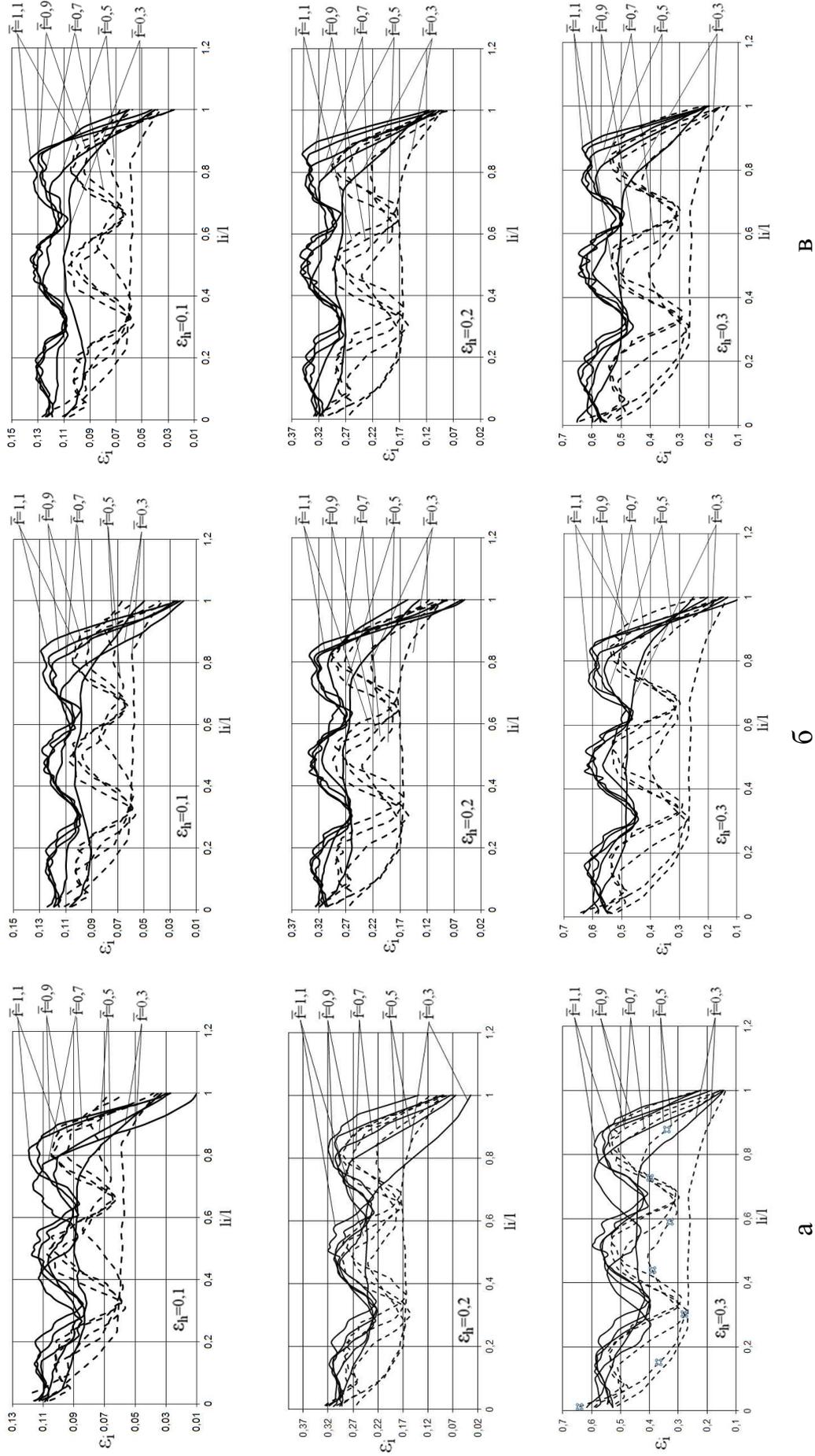


Рисунок 5.6 - График распределения интенсивности логарифмических деформаций в осевой зоне по длине заготовки, протянутой с различными относительными подачами и величинами обжатий при протяжке с равномерным температурным полем (пунктир) и с охлаждением в процессе ковки до 1000°C (а), 900°C (б) и 800°C (в)

товки одной и той же длины с различными подачами характер кривых на рис. 5.6 сохранится, однако неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций будет меньше для протяжки с малыми подачами. Это приводит к увеличению количества обжатий на участке заготовки той же длины, а следовательно и к образованию большего количества пиков кривой под центральной частью деформирующего бойка при каждом обжатии.

Для оценки напряженного состояния заготовки была исследована зависимость величины компонент осевых напряжений для точек А и Б (см. рис. 5.4), находящихся на оси заготовки, от термомеханического режима протяжки. Построены графики зависимости компонент осевых напряжений от величины обжатия и относительной подачи при различном температурном поле заготовки (рис. 5.7). Во всех рассмотренных случаях осевая компонента напряжения σ_z отрицательна, а компоненты σ_x и σ_y принимают в некоторых случаях положительные значения.

При протяжке заготовки с равномерным температурным полем плоскими бойками с величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,05 \dots 0,2$ и относительной подачей в диапазоне $0,3 \dots 1,1$ осевая компонента напряжения σ_x принимает положительные значения до 11 МПа (см. рис. 5.7, а). Это объясняется тем, что при больших подачах и малых обжатиях более интенсивное течение металла происходит в поперечном направлении. С увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h = 0,3$ осевая компонента напряжения σ_x принимает отрицательные значения до -11 МПа.

При протяжке заготовки плоскими бойками с температурой поверхности 1000°C положительные значения осевой компоненты напряжения σ_x наблюдаются при величине обжатия $\varepsilon_h = 0,05 \dots 0,075$ и относительной подаче $\bar{f} = 0,3$, которые достигают 2 МПа, а также при величине обжатия $\varepsilon_h = 0,125 \dots 0,175$ и относительной подаче $\bar{f} = 0,5 \dots 1,1$, которые достигают 7,5 МПа (см. рис. 5.7, а-б).

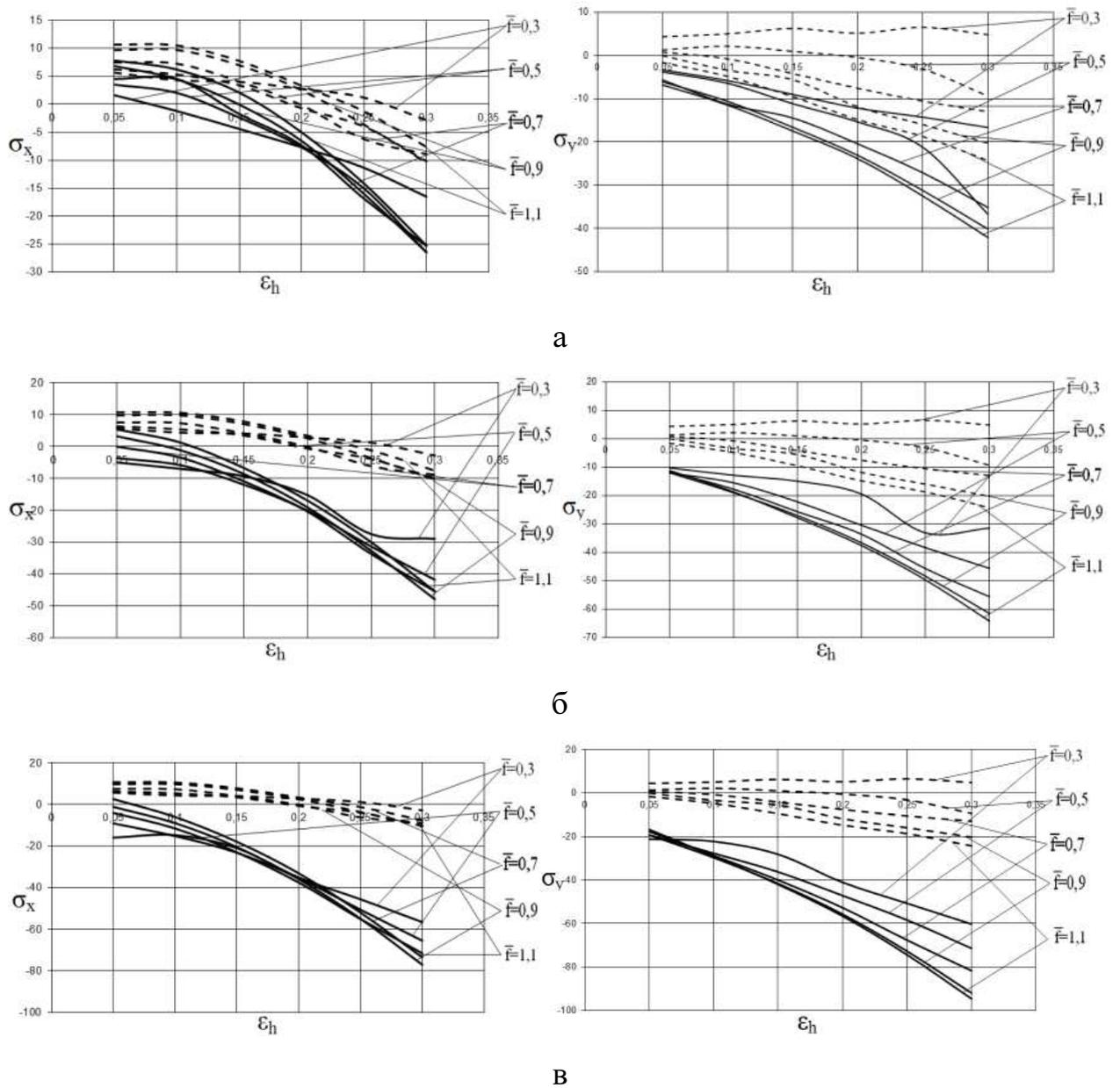


Рисунок 5.7 - График зависимости компонент осевых напряжений от величины обжатия и относительной подачи при протяжке плоскими бойками с равномерным температурным полем (пунктир) и с охлаждением в процессековки до 1000°C (а), 900°C (б) и 800°C (в)

При последующем охлаждении заготовки до 900°C осевая компонента напряжения σ_x принимает положительные значения при $\varepsilon_h=0,05\dots0,11$ и $\bar{f}=0,9\dots1,1$, которые достигают 4 МПа. При величине обжатия $0,05\dots0,1$ и относительной подаче $0,3\dots0,7$ осевая компонента σ_x принимает отрицательные значения до -5 МПа, а с увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h=0,3$ и относительной подачи до $\bar{f}=1,1$ до -29...49 МПа.

С уменьшением температуры поверхности заготовки до 800°C осевая компонента напряжения σ_x принимает положительные значения лишь при $\varepsilon_h=0,05\dots0,7$ при относительной подаче $\bar{f}=1,1$ и достигает 2,5 МПа. При протяжке заготовки с величиной обжатия $\varepsilon_h=0,05$ и $\bar{f}=0,3\dots0,9$ компонента σ_x принимает отрицательные значения до -18 МПа, а с увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h=0,3$ – до -48...68 МПа.

Что касается напряжения σ_y , то оно принимает положительные значения (~5 МПа) при относительной подаче $\bar{f}=0,3$ и всех значениях обжатия для рассматриваемых условий протяжки (см. рис. 5.7, строка 2, пунктир). При относительной подаче $\bar{f}=0,5$ напряжение σ_y положительно в случае протяжки с величины обжатия от 0,05 до 0,2, что в совокупности с положительными значениями компоненты σ_x может привести к образованию внутренних разрывов. С увеличением относительной подачи от 0,7 до 1,1 и величиной обжатия от 0,05 до 0,3 осевая компонента напряжений σ_y принимает отрицательные значения, которые достигают -23 МПа.

После охлаждения заготовки до температуры поверхности 1000°C при протяжке осевая компонента напряжения σ_y принимает отрицательные значения для всех исследуемых режимов протяжки. Так, при $\varepsilon_h=0,05$ и $\bar{f}=0,3\dots1,1$ она принимает значения от -3,5 до -6,8 МПа, а при увеличении величины обжатия до $\varepsilon_h=0,3$ – от -16 до -42 МПа.

При достижении температуры поверхности заготовки 900°C при протяжке осевая компонента напряжения σ_y принимает отрицательные значения,

которые достигают $-10...-11$ МПа при $\varepsilon_h=0,05$ и $\bar{f}=0,3...1,1$ и уменьшается с увеличением величины обжатия. Так, при $\varepsilon_h=0,3$ значения компоненты находятся в интервале от -31 до -64 МПа. При последующем охлаждении заготовки еще на 100°C эти значения уменьшаются до $-16...-21$ МПа при $\varepsilon_h=0,05$ и $\bar{f}=0,3...1,1$ и $-60...-94$ МПа при увеличении величины обжатия до $\varepsilon_h=0,3$.

На основе полученных данных был рассчитан показатель жесткости схемы напряженного состояния η для точек А и Б (см. рис. 5.4). Построены зависимости показателя жесткости схемы напряженного состояния от различных условий протяжки (рис. 5.8). Анализ кривых на рис. 5.8 позволил установить, что в точке А показатель жесткости схемы напряженного состояния принимает отрицательные значения при любых условиях подач и обжатий, а также любом температурном поле сечения заготовки, что говорит о наличии благоприятного напряженного состояния сжатия (см. рис. 5.6, строка 1). Так, при относительной подаче $\bar{f}=0,3$ и величине обжатия $\varepsilon_h=0,05...0,3$ показатель η принимает значения равные $-0,4...-0,85$, а при относительной подаче $\bar{f}=0,5...1,1$ от $-0,5$ до $-1,9$ при протяжки с равномерным температурным полем, а также $-0,8...-2,8$ и $-2,3...-6$ соответственно - при протяжке с неравномерным температурным полем.

В точке Б при протяжке с равномерным температурным полем с величиной обжатия $\varepsilon_h=0,05...0,1$ и относительной подачей $\bar{f}=1,1$ наблюдается напряженное состояние растяжения (см. рис. 5.8, пунктир), что обуславливает возможное появление разрывов в заготовке в данном месте. Как видно из графика, напряженное состояние сжатия в этой точке достигается при относительной подаче $\bar{f}=0,5...0,9$ при всех значениях величины обжатия для рассмотренных условий протяжки, а также при величине обжатия $\varepsilon_h=0,1...0,3$ и относительной подаче $\bar{f}=1,1$ — значений $-0,1...-1,2$ (см. рис. 5.8, пунктир).

При протяжке заготовки с неравномерным температурным полем пока-

затель жесткости схемы напряженного состояния принимает отрицательные значения для всех исследуемых режимов протяжки. Так, при протяжке заготовки с температурой поверхности 1000°C с величиной обжатия $\varepsilon_h=0,05$ и относительной подачей $\bar{f}=0,3\dots 1,1$ он принимает значения в точке А равные $-0,8\dots -1$, а с увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h=0,3$ — $-2,2\dots -3,2$, а в точке Б — до $-0,6\dots -1$ и $-2,2\dots -2,4$ соответственно.

После падения температуры поверхности заготовки на 100°C при протяжке с величиной обжатия $\varepsilon_h=0,05$ и относительной подачей $\bar{f}=0,3\dots 1,1$ показатель жесткости схемы напряженного состояния возрастает в точке А до $-1,2\dots -1,8$, а с увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h=0,3$ — $-3,2\dots -4,6$, а в точке Б — до $-0,7\dots -1,7$ и $-3,1\dots -3,4$ соответственно.

При достижении во время протяжки температура поверхности заготовки 800°C показатель жесткости схемы напряженного состояния в точке А достигает значений $-1,5\dots -2,7$ МПа при протяжке с величиной обжатия $\varepsilon_h=0,05$ и относительной подачей $\bar{f}=0,3\dots 1,1$, после увеличения величины обжатия до $\varepsilon_h=0,3$ — $-4,5\dots -6$ МПа. В точке Б этот показатель достигает значений, равных $-0,7\dots -2,5$ и $-4,1\dots -4,2$ соответственно.

Таким образом, показатель η в 3 раза больше при протяжке с неравномерным температурным полем, что объясняется наличием более жестких периферийных слоев заготовки, которые непосредственно деформируют центральную часть.

Протяжка комбинированными бойками. Исследован процесс протяжки цилиндрической заготовки из стали 35 с равномерным температурным полем (1200°C) и с охлаждением во времяковки комбинированными бойками [298-300] до температур поверхности 1000°C , 900°C , 800°C . Причем варьировалась величина обжатия ($\varepsilon_h = \Delta D/D_0$, ΔD - величина абсолютного обжатия) $\varepsilon_h = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3$ и величина относительной подачи ($\bar{f} = f/D_0$) $\bar{f} = 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,1$. Проведено моделирование схем протяжки, в ходе ко-

торых обеспечивалось минимум 3 нажима бойком на заготовку для учета влияния ее жестких недеформированных концов на ее деформированное состояние. Моделирование процесса протяжки проводилось в программе, основанной на методе конечных элементов. В качестве инструмента применялись комбинированные бойки шириной $B = 1200$ мм и радиусом скругления кромки рабочей поверхности 100 мм.

По результатам исследования были построены графики распределения интенсивности логарифмических деформаций по поперечному сечению заготовки (рис. 5.9, сечение Б - Б) в зависимости от разных величин обжатия и относительных подач при протяжке заготовки с равномерным и неравномерным температурными полями с температурой поверхности 1000°C , 900°C , 800°C (рис. 5.10). Анализ полученных данных позволил установить, что при протяжке заготовки комбинированными бойками в равномерном температурном поле с относительной подачей $\bar{f} = 0,3$ и величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,05 \dots 0,1$ (см. рис. 5.10, столбец 1, пунктир) наблюдается низкая неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций, что объясняется слабой проработкой периферийных слоев заготовки, а также наличием непроработанной осевой зоны. При увеличении величины обжатия (до $\varepsilon_h = 0,3$) наружные слои заготовки прорабатываются более интенсивно, однако осевая зона остается слабо проработанной, что приводит к увеличению неравномерности распределения интенсивности логарифмических деформаций от 0,12 (при $\varepsilon_h = 0,05$) до 0,33 (при $\varepsilon_h = 0,3$).

После охлаждения поверхности заготовки до 1000°C при ее протяжке с относительной подачей $\bar{f} = 0,3$ и величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,05 \dots 0,1$ также наблюдается низкая неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций, однако с увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h = 0,3$ наблюдается более интенсивная проработка слоев, находящихся на расстоянии половины радиуса от поверхности заготовки ($0,78 \dots 0,8$) D_0 вследствие повышения сопротивления деформированию наружных слоев за

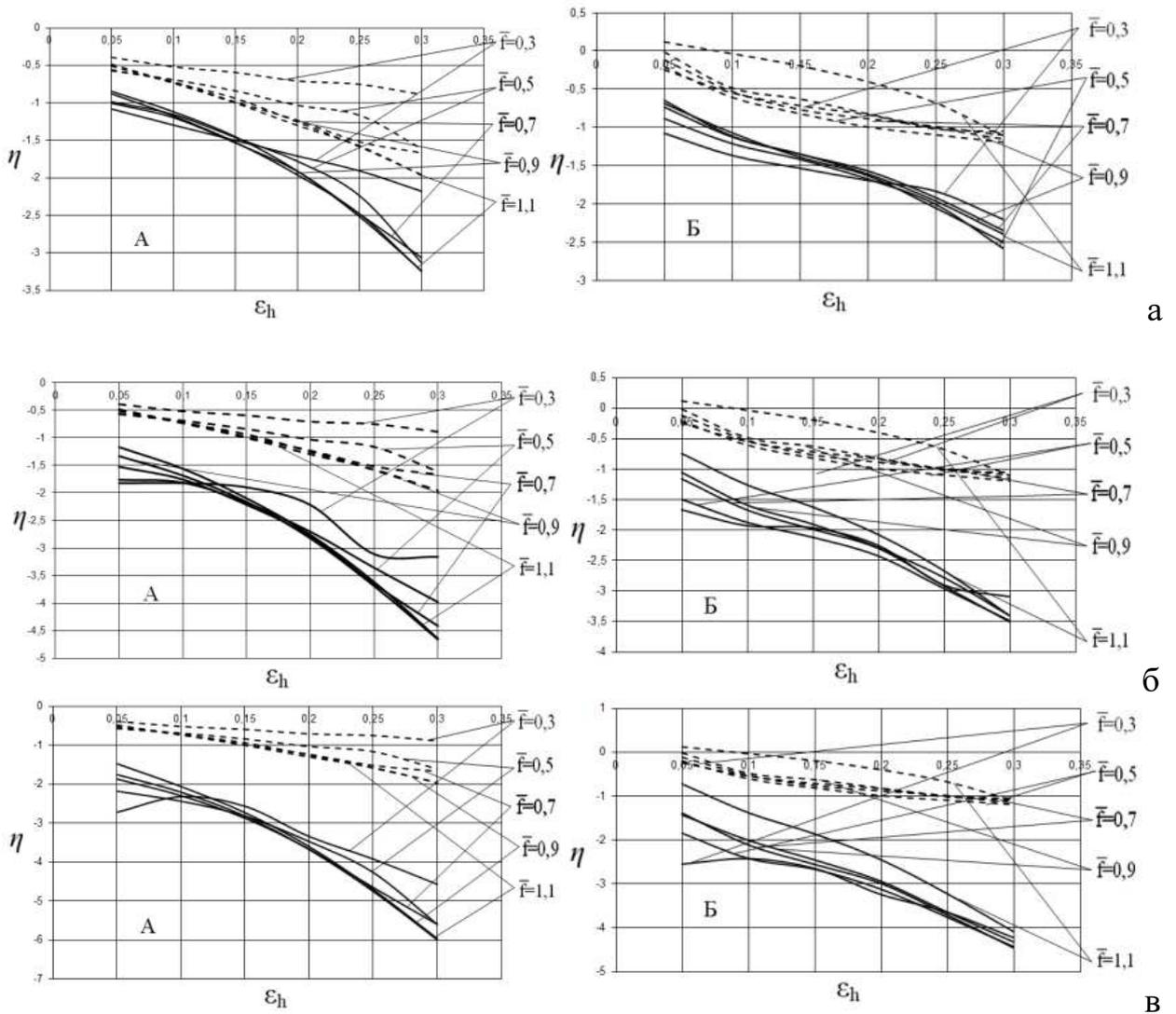


Рисунок 5.8 - Графики зависимости показателя жесткости схемы напряженного состояния в осевой зоне слитка от величины обжатия и относительной подачи при протяжке заготовки плоскими бойками с равномерным температурным полем (пунктир) и с охлаждением в процессе ковки до 1000°C (а), 900°C (б) и 800°C (в)

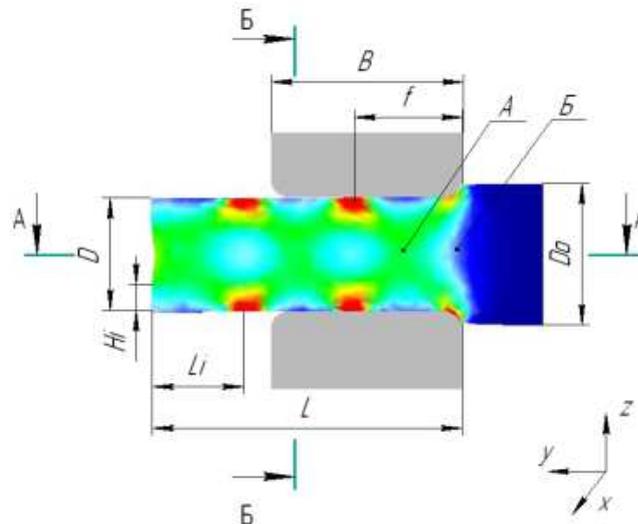


Рисунок 5.9 - Схема протяжки заготовки комбинированными бойками

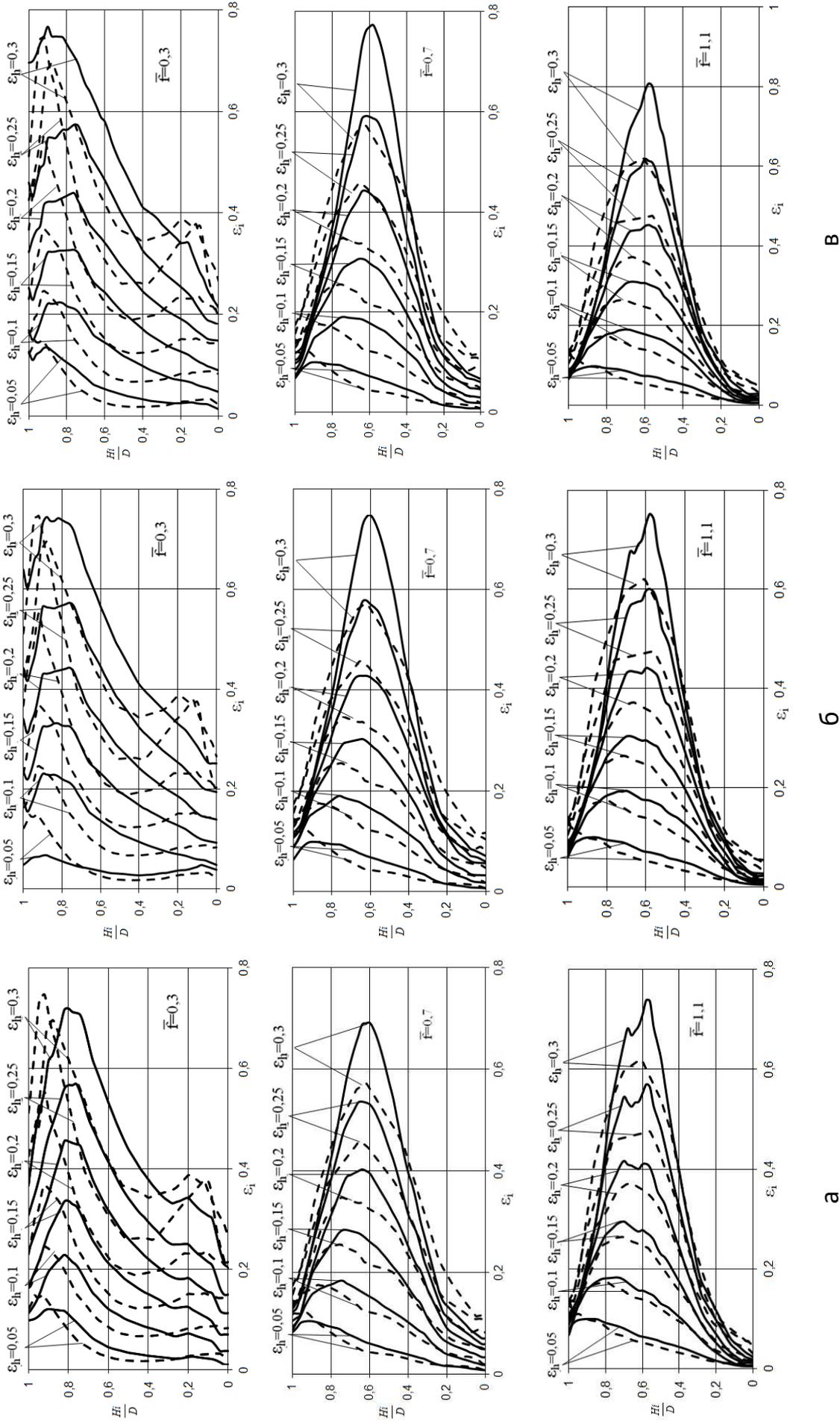


Рисунок 5.10 - График распределения интенсивности логарифмических деформаций по сечению заготовки Б-Б (см. рис. 5.9) в зависимости от разных величин обжатия и относительных подач при протяжке с равномерным температурным полем (пунктир) и с охлаждением в процессековки до 1000°C (а), 900°C (б) и 800°C (в)

в

б

а

счет их охлаждения. При этом неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций составляет от 0,11 (при $\varepsilon_h=0,05$) до 0,5 (при $\varepsilon_h=0,3$) (см. рис. 5.10, в, строка 1).

При охлаждении заготовки еще на 100°C проработка поверхностных слоев и осевой зоны остается на прежнем уровне. Наблюдается увеличение толщины прорабатываемого подповерхностного слоя, составляющего от $0,75 D_0$ до $0,9 D_0$. При этом неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций составляет 0,07 (при $\varepsilon_h=0,05$) и 0,49 (при $\varepsilon_h=0,3$) (см. рис. 5.10, б, строка 1).

После охлаждения поверхности заготовки до 800°C при протяжке с относительной подачей $\bar{f}=0,3$ и величине обжатия $\varepsilon_h=0,05\dots 0,3$ характер кривых распределения интенсивности логарифмических деформаций сохраняется. При этом их неравномерность составляет 0,12 (при $\varepsilon_h=0,05$) и 0,55 (при $\varepsilon_h=0,3$) (см. рис. 5.10, в, столбец 1). Также следует отметить, что при протяжке с относительной подачей $\bar{f}=0,3$ и величине обжатия $\varepsilon_h=0,05\dots 0,3$ при последующих проходах с кантовками осевая зона поковки останется в два раза меньше проработанной, чем ее периферийные слои (см. рис. 5.10). При протяжке заготовки с величиной относительных подач от 0,5 до 1,1 и степенью обжатия $\varepsilon_h=0,05\dots 0,3$ с равномерным и неравномерным температурным полями наблюдается увеличение неравномерности распределения интенсивности логарифмических деформаций по ее поперечному сечению за счет появления более жестких наружных слоев, которые более интенсивно деформируют осевую зону заготовки (см. рис. 5.10).

При протяжке заготовки с равномерным температурным полем с увеличением степени обжатия от 0,05 до 0,3 и величиной относительной подачи от 0,5 до 1,1 происходит более интенсивная проработка слоев заготовки, находящихся на уровне $0,7\dots 0,8 D_0$. Однако неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций возрастает за счет образования застойной зоны под рабочей поверхностью деформирующего плоского бойка

и увеличения проработки лишь подповерхностной зоны.

Она составляет 0,1 (при $\varepsilon_h=0,05$) и 0,41 (при $\varepsilon_h=0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f}=0,5$, а также 0,13 (с $\varepsilon_h=0,05$) и 0,46 (с $\varepsilon_h=0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f}=1,1$ (см. рис. 5.10, строки 2-3, пунктир). При охлаждении поверхности заготовки до 1000°C сохраняется увеличение деформирования лишь слоев заготовки, находящихся на уровне $0,7\dots 0,8 D_0$, что также приводит к большей неравномерности распределения интенсивности логарифмических деформаций, которая составляет 0,1 (при $\varepsilon_h=0,05$) и 0,53 (при $\varepsilon_h=0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f}=0,5$, а также 0,1 (с $\varepsilon_h=0,05$) и 0,71 (с $\varepsilon_h=0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f}=1,1$ (см. рис. 5.10, а, строки 2-3). При охлаждении заготовки еще на 100°C характер кривых на графиках сохраняется, однако более интенсивно прорабатываются слои, находящихся на уровне $0,6\dots 0,7 D_0$. Неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций составляет 0,1 (при $\varepsilon_h=0,05$) и увеличивается на 0,55 (при $\varepsilon_h=0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f}=0,5$, а также 0,1 (при $\varepsilon_h=0,05$) и 0,73 (при $\varepsilon_h=0,3$) при величине относительной подачи $\bar{f}=1,1$ (см. рис. 5.10, б, строки 2-3).

С уменьшением температуры поверхности заготовки до 800°C возрастает и толщина застойной зоны под поверхностью плоского бойка, таким образом происходит более интенсивная проработка слоя, находящегося на уровне $0,6\dots 0,65 D_0$. Неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций при $\varepsilon_h=0,05$ составляет 0,1 и при $\varepsilon_h=0,3$ равна 0,56 с величиной относительной подачи $\bar{f}=0,5$. Также при $\bar{f}=1,1$ значения неравномерности интенсивности логарифмических деформаций составляют 0,1 и 0,78 соответственно. Такое большое значение деформации в околоосевой части заготовки положительно влияет на проработку литой дефектной части металла слитка, способствует залечиванию дефектов в виде пустот металлургического происхождения.

Для оценки напряженного состояния заготовки была исследована зависимость величины компонент осевых напряжений для точек А и Б (см. рис. 5.9), находящихся на оси заготовки, от термомеханического режима протяжки. Построены графики зависимости компонент осевых напряжений от величины обжатия и относительной подачи при различном температурном поле заготовки (рис. 5.11). Во всех рассмотренных случаях осевая компонента напряжения σ_z отрицательна, а компоненты σ_x и σ_y принимают в некоторых случаях положительные значения.

При протяжке заготовки с равномерным температурным полем комбинированными бойками с величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,05 \dots 0,15$ и относительной подачей в диапазоне $0,3 \dots 1,1$ осевая компонента напряжения σ_x принимает положительные значения до 6 МПа (см. рис. 5.11, а). Это объясняется тем, что при больших подачах и малых обжатиях более интенсивное течение металла происходит в поперечном направлении. С увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h = 0,3$ осевая компонента напряжения σ_x принимает отрицательные значения от -10 МПа при $\bar{f} = 0,3$ до -24 МПа при $\bar{f} = 1,1$.

При протяжке заготовки комбинированными бойками с температурой ее поверхности 1000°C положительные значения осевой компоненты напряжения σ_x наблюдаются при величине обжатия $\varepsilon_h = 0,05$ и относительной подаче $\bar{f} = 0,3 \dots 1,1$, которые равны $0,19 \dots 3,67$ МПа соответственно, а при протяжке заготовки с $\varepsilon_h > 0,05$ осевая компонента напряжения σ_x принимает отрицательные значения. Так, при $\varepsilon_h = 0,1$ и $\bar{f} = 0,3$ ее значение равно -0,05 МПа, а при $\bar{f} = 1,1$ - -3,6 МПа и при увеличении величины обжатия до 0,3 принимает значения от -23 МПа до -53 МПа соответственно.

При последующем охлаждении заготовки до 900°C осевая компонента напряжения σ_x принимает отрицательные значения при всех значениях величины обжатия и относительных подач. При величине обжатия 0,05 и относительной подаче $0,3 \dots 1,1$ осевая компонента σ_x принимает значения равные $-1 \dots -6,9$ МПа, а с увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h = 0,3$ при относитель-

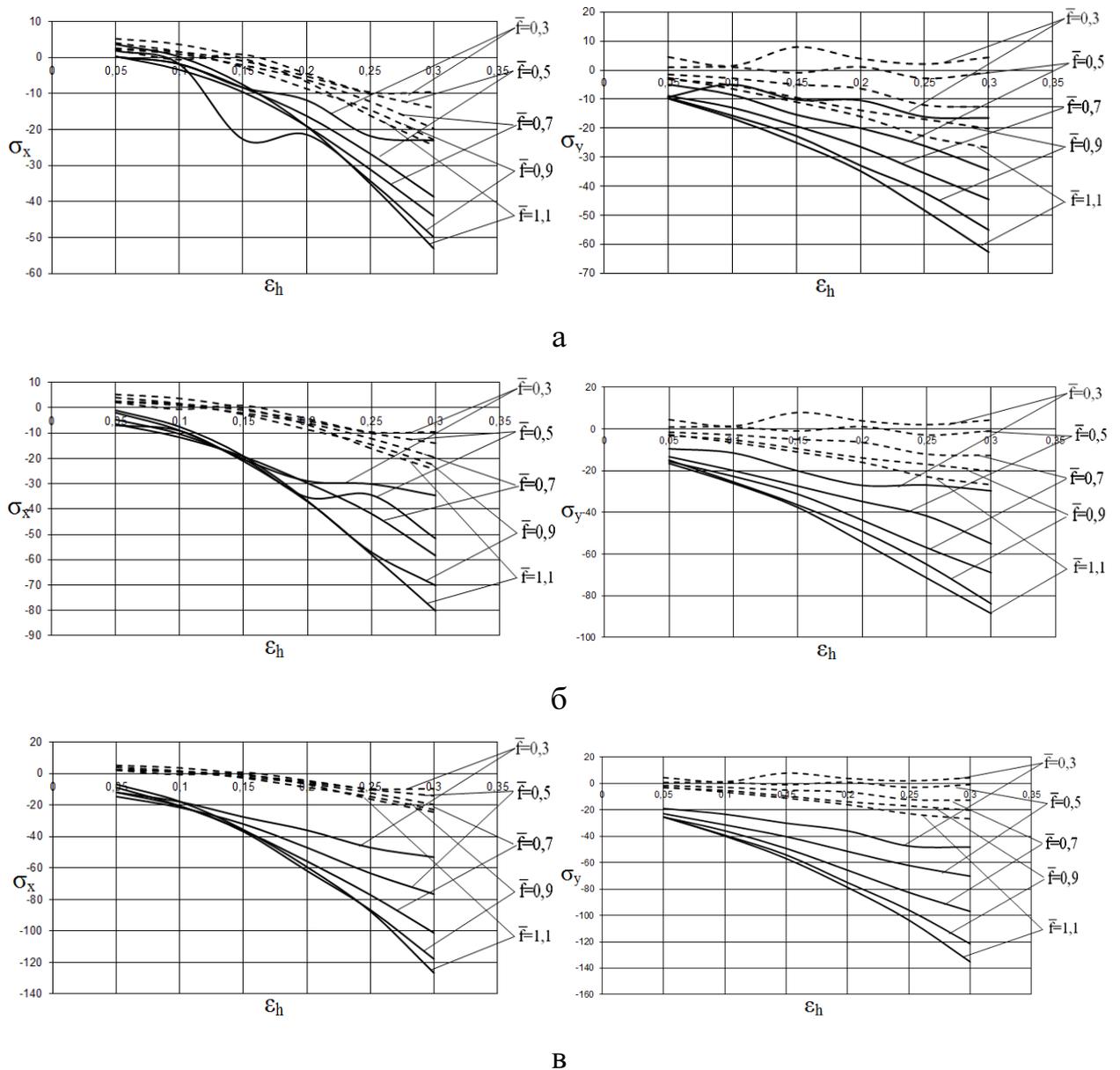


Рисунок 5.11 - График зависимости компонент осевых напряжений от величины обжатия и относительной подачи при протяжке комбинированными бойками с равномерным температурным полем (пунктир) и с охлаждением в процессе ковки до 1000°C (а), 900°C (б) и 800°C (в)

ной подаче $\bar{f} = 0,3 \dots 1,1$ – -34,6...-80,2 МПа.

С уменьшением температуры поверхности заготовки до 800°C осевая компонента напряжения σ_x также принимает отрицательные значения при всех значениях величины обжатия и относительных подач. При протяжке заготовки с величиной обжатия $\varepsilon_h = 0,05$ и $\bar{f} = 0,3 \dots 1,1$ компонента σ_x принимает отрицательные значения в диапазоне -6,8...-11,8 МПа, а с увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h = 0,3$ – до -53...-126,6 МПа.

Что касается напряжения σ_y , то оно принимает положительные значения (1,5...8 МПа) при всех значениях обжатия и величин относительной подачи, что в совокупности с положительными значениями компоненты σ_x может привести к образованию внутренних разрывов (см. рис. 5.11, строка 2, пунктир). При относительной подаче $\bar{f} = 0,5$ напряжение σ_y принимает как положительные так и отрицательные значения и колеблется в диапазоне -2,8...1,1 МПа. С увеличением относительной подачи от 0,7 до 1,1 и величины обжатия от 0,05 осевая компонента напряжений σ_y принимает отрицательные значения равные -1,5...-3,1, а при $\varepsilon_h = 0,3$ – -12,5...-26,7 МПа.

После охлаждения заготовки до температуры поверхности 1000°C при протяжке осевая компонента напряжения σ_y принимает отрицательные значения для всех исследуемых режимов протяжки. Так, при $\varepsilon_h = 0,05$ и $\bar{f} = 0,3 \dots 1,1$ она принимает значения от -5 до -9,8 МПа, а при увеличении величины обжатия до $\varepsilon_h = 0,3$ – от -16,5 до -62,7 МПа.

При достижении температуры поверхности заготовки 900°C при протяжке осевая компонента напряжения σ_y принимает отрицательные значения, которые достигают -9,5...-16,5 МПа при $\varepsilon_h = 0,05$ и $\bar{f} = 0,3 \dots 1,1$, и уменьшается с увеличением величины обжатия. Так, при $\varepsilon_h = 0,3$ значения компоненты находятся в интервале от -29,6 до -88,5 МПа. При последующем охлаждении заготовки еще на 100°C эти значения уменьшаются до -18,9...-25,5 МПа при $\varepsilon_h = 0,05$ и $\bar{f} = 0,3 \dots 1,1$ и -48,1...-135,2 МПа при увеличении величины обжа-

тия до $\varepsilon_h=0,3$.

На основе полученных данных был рассчитан показатель жесткости схемы напряженного состояния η для точек А и Б (см. рис. 5.9). Построены зависимости показателя жесткости схемы напряженного состояния от различных условий протяжки (рис. 5.12).

Анализ кривых на рис. 5.12 позволил установить, что в точке А показатель жесткости схемы напряженного состояния принимает отрицательные значения при любых условиях подач и обжатий, а также любом температурном поле сечения заготовки, что говорит о наличии благоприятного напряженного состояния сжатия (см. рис. 5.12, строка 1). Так, при относительной подаче $\bar{f}=0,3\dots 1,1$ и величине обжатия $\varepsilon_h=0,05$ показатель $\eta = -0,5\dots -0,8$, а при увеличении величины обжатия до 0,3 — от -1,1 до -2,8 при протяжке с равномерным температурным полем (см. рис. 5.12, строка 1).

В точке Б при протяжке заготовки показатель жесткости схемы напряженного состояния η также принимает отрицательные значения при любых условиях подач и обжатий, а также любом температурном поле сечения заготовки (см. рис. 5.12, строка 2).

Так при относительной подаче $\bar{f}=0,3\dots 1,1$ и величине обжатия $\varepsilon_h=0,05$ показатель η принимает значения равные -0,43...-0,67, а при увеличении величины обжатия до 0,3 — от -1,46 до -1,7 при протяжке с равномерным температурным полем (см. рис. 5.12, строка 2, пунктир).

При охлаждении поверхности заготовки в процессековки до температуры 1000°С показатель жесткости схемы напряженного состояния в точке А принимает значения, равные -1,1...-1,6, при протяжке заготовки с величиной обжатия $\varepsilon_h=0,05$ и относительной подачей $\bar{f}=0,3\dots 1,1$, а с увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h=0,3$ — -2,3...-4,9, а в точке Б — до -1...-1,2 и -2,6...-3,4 соответственно.

После падения температуры поверхности заготовки на 100°С при протяжке с величиной обжатия $\varepsilon_h=0,05$ и относительной подачей $\bar{f}=0,3\dots 1,1$

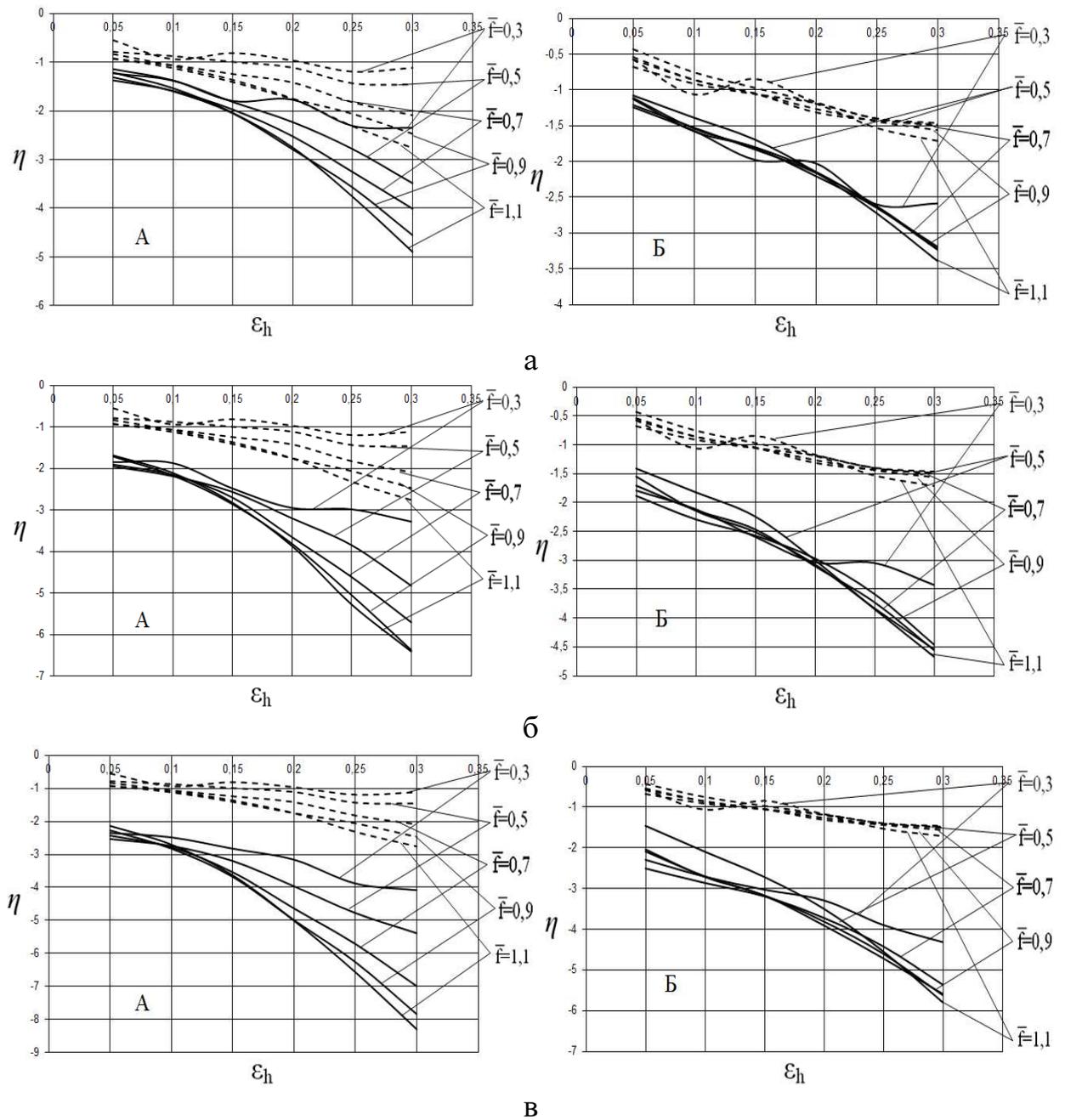


Рисунок 5.12 - Графики зависимости показателя жесткости схемы напряженного состояния в осевой зоне слитка от величины обжатия и относительной подачи при протяжке заготовки комбинированными бойками с равномерным температурным полем (пунктир) и с охлаждением в процессековки до 1000°C (а), 900°C (б) и 800°C (в)

показатель жесткости схемы напряженного состояния возрастает в точке А до $-1,7\dots-1,95$, а с увеличением величины обжатия до $\varepsilon_h=0,3$ — $-3,3\dots-6,4$, а в точке Б — до $-1,4\dots-1,9$ и $-3,4\dots-4,7$ соответственно.

При достижении во время протяжки температуры поверхности заготовки 800°C показатель жесткости схемы напряженного состояния в точке А достигает значений $-2,1\dots-2,5$ МПа при протяжке с величиной обжатия $\varepsilon_h=0,05$ и относительной подачей $\bar{f}=0,3\dots1,1$, после увеличения величины обжатия до $\varepsilon_h=0,3$ — $-4,1\dots-8,3$ МПа. В точке Б этот показатель достигает значений, равных $-1,5\dots-2,5$ МПа и $-4,3\dots-5,8$ МПа соответственно.

Таким образом, показатель η в 4 раза больше при протяжке с неравномерным температурным полем, что объясняется наличием более жестких периферийных слоев заготовки, которые непосредственно деформируют центральную часть.

Протяжка вырезными бойками. Рассмотрен распространенный вариант конструкции бойков с углом выреза 120 градусов. Построены графики распределения деформаций в поперечном сечении заготовки во время обжатия (рис. 5.13). Анализ полученных данных позволяет заключить, что в случае протяжки заготовки с относительной подачей, равной $0,3$, наибольшие деформации сосредотачиваются у поверхности заготовки при различных обжатиях. Центральная часть заготовки остается мало проработанной. С увеличением обжатия от $0,1$ до $0,3$ область больших деформаций в заготовке смещается от поверхности и располагается у поверхности на расстоянии, равном 20% от диаметра заготовки.

Увеличение относительной подачи до $0,5$ несколько меняет картину распределения деформаций в заготовке. При обжатиях, равных $0,05$ от диаметра заготовки, также наблюдается интенсивная проработка ее поверхностных слоев, однако разница деформаций между центральной частью заготовки и поверхностью здесь заметно меньше.

При относительных обжатиях, равных $0,1\dots0,15$ от диаметра заготовки,

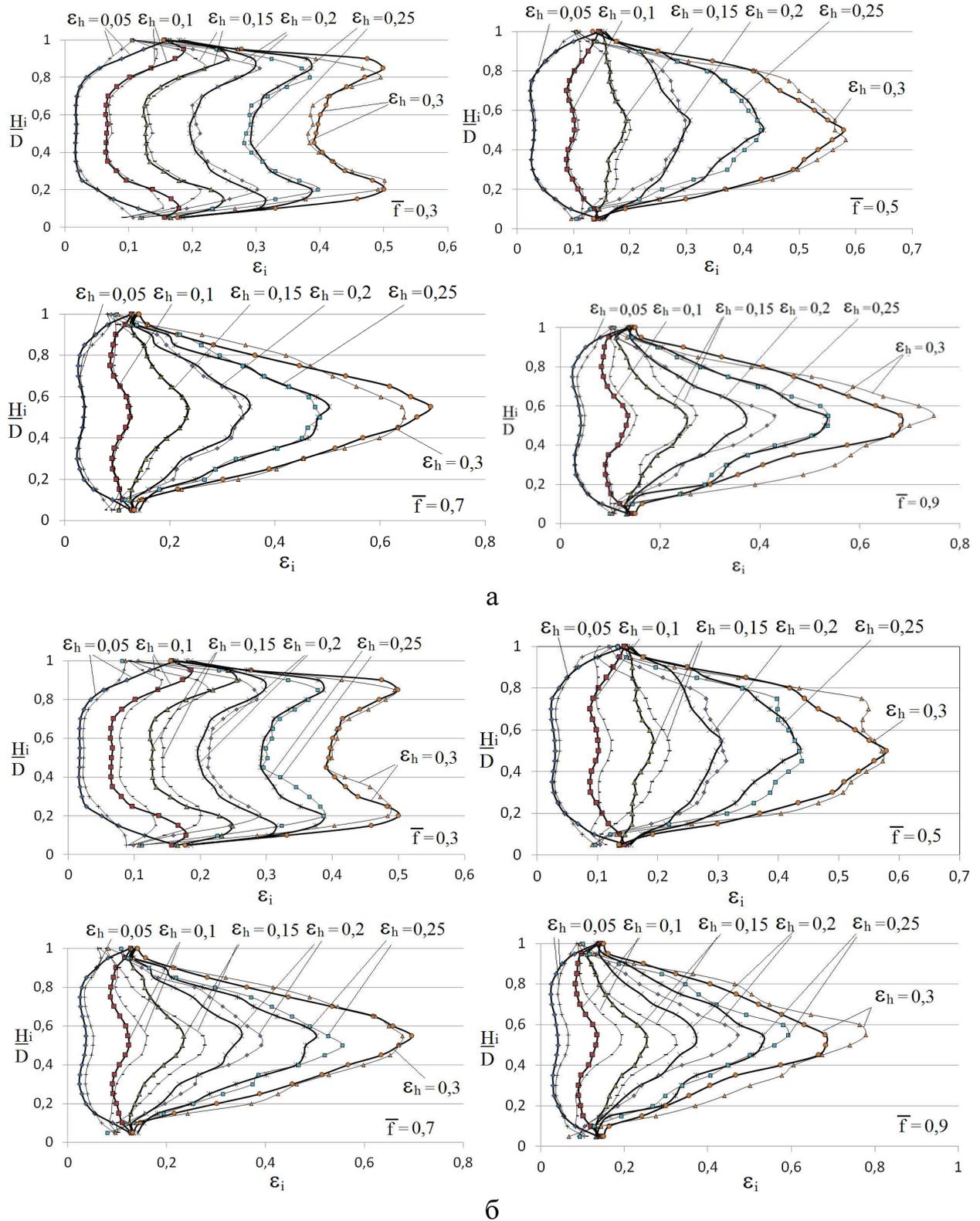


Рисунок 5.13 - Графики распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки при обжатии вырезными бойками с углом выреза 120° (толстыми линиями обозначены деформации для заготовок с равномерным полем): а – температура поверхности заготовки 1000°C , б – температура поверхности 800°C

наблюдается минимальная неравномерность распределения деформаций в ее поперечном сечении. Увеличение обжатия от 0,15 до 0,3 приводит к заметному росту величины интенсивности деформаций в центральной части заготовки. В процессе протяжки с относительными подачами 0,7 и 0,9 картина распределения деформаций качественно не меняется, только лишь увеличивается показатель интенсивности деформаций в центральной части заготовки. Так при протяжке заготовки с относительной подачей, равной 0,5, при относительном обжатии, равном 0,3, величина интенсивности деформаций в центре заготовки равна 0,58, при протяжке с относительной подачей, равной 0,9, показатель деформации достигает значения 0,68.

Рассмотрено влияние температурного поля на распределение деформаций в поперечном сечении заготовки для данной схемы деформирования. На рис. 5.13 (а) представлены графики распределения деформаций для заготовок с температурой поверхности 1000°C (графики указаны тонкими линиями). Установлено, что при таком перепаде температур между поверхностью заготовки и ее сердцевиной для схемы ковки в вырезных бойках разница в деформированном состоянии, в отличие от равномерного распределения температур, невелика. Видно некоторое увеличение деформаций в центральных слоях заготовки, но оно находится в пределах 5%.

Охлаждение заготовки до температуры поверхности 800°C , позволяет более существенно изменить картину распределения деформаций в заготовке. Из рис. 5.13 (б), видно, что деформации глубинных слоев заготовки увеличиваются на 15-20%.

Анализ проведенного исследования позволяет дать такие рекомендации. Для достижения равномерного распределения деформаций в заготовке при протяжке вырезными бойками с углом выреза, равным 120° , рекомендуется протяжку проводить с относительными подачами большим 0,5 и обжатиями 0,1..0,15 от диаметра заготовки. С целью интенсивной проработки центральных слоев заготовки рекомендуется протяжку осуществлять с относительными подачами, большими 0,5, и обжатиями, большими 0,15 от диа-

метра заготовки.

5.1.2 Исследование протяжки заготовки с неравномерным несимметричным температурным полем

Методом конечных элементов проведено моделирование деформирования заготовки с неравномерным температурным полем рис. 5.14 [301]. Моделирование проводилось в несколько этапов. На первом этапе моделировалось охлаждение цилиндрической заготовки диаметром 1000 мм из стали 35 с начальной температурой 1100 °С с двух сторон, для получения неравномерного в поперечном сечении температурного поля. При моделировании охлаждения производилось контактом заготовки с инструментом различной температуры 400 °С и 600 °С на протяжении 1000 и 2000 с, в реальных условиях охлаждение может производиться каким либо другим способом. Охлаждающий инструмент имел различные размеры и, контактируя с поверхностью заготовки, образовывал различный угол сегмента низкотемпературной зоны $\beta = 30^\circ, 60^\circ, 100^\circ$ и 140° . Таким образом, моделировалась различная величина низкотемпературных зон заготовки и неравномерность распределения температур. В таблице 5.1 приведены температурные поля заготовок, охлаждаемых различным время инструментом различной температуры.

На втором этапе моделирования производилось деформирование заготовки с полученным неравномерным температурным полем. Как на первом, так и на втором этапе моделирования коэффициент теплопередачи от заготовки инструменту задавался равным $5 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{С}$, температура окружающей среды 20 °С.

Заготовка укладывалась в бойки таким образом, чтобы внутренняя граница низкотемпературной зоны заготовки образовала угол с рабочей поверхностью плоского бойка, отличный от 0° . Угол $\alpha = 25^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ и 80° . Заготовка укладывалась в плоские бойки шириной 700 мм, после чего производилось обжатие заготовки на 30% от ее диаметра. Скорость движения деформирующего инструмента задавалась, равной 15 мм/с, температура бойка 20 °С, ко-

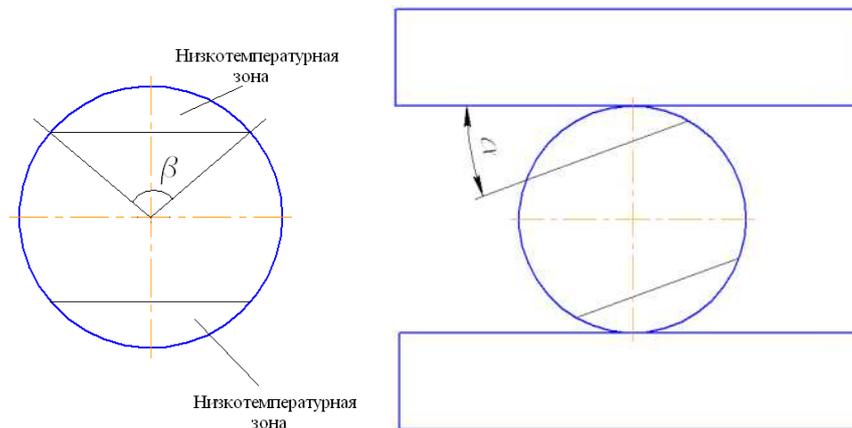
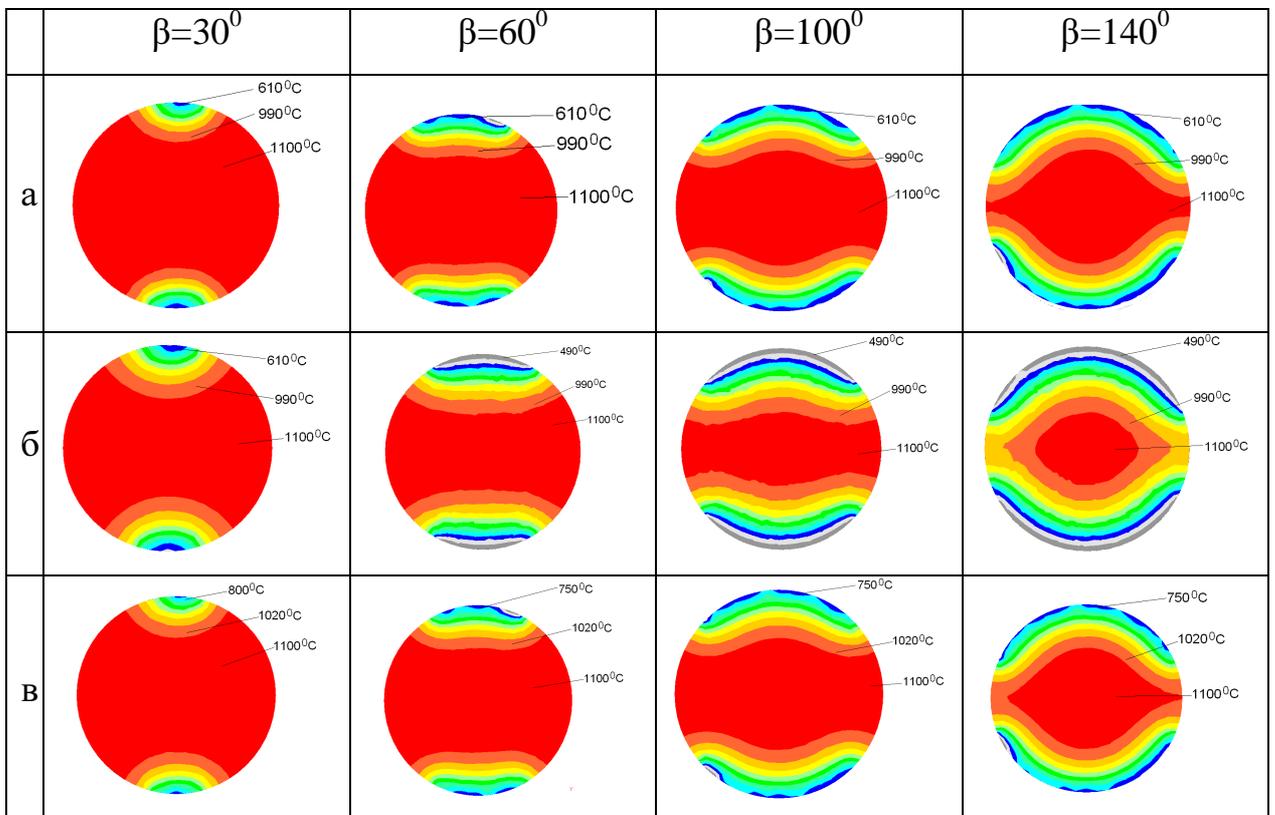


Рисунок 5.14 - Схема ковки с неравномерным температурным полем

Таблица 5.1 – Температурное поле заготовок охлажденных при различных условиях (а – температура инструмента 400 °С, время охлаждения 1000 с, б – температура инструмента 400 °С, время охлаждения 2000 с, в – температура инструмента 600 °С, время охлаждения 1000 с)



коэффициент трения по закону Зибеля принимался равным 0,35.

По результатам моделирования деформирования заготовки получены поля распределения деформаций по ее поперечному сечению. Так на рис. 5.15 приведены поля распределения сдвиговых деформаций в поперечном сечении заготовки после ее кантовки на 25° , 40° , 60° и 80° и обжатия плоскими бойками на 300 мм.

Анализ полей распределения сдвиговых деформаций по поперечному сечению заготовки позволяет сделать заключение о том, что данный способковки позволяет повысить уровень сдвиговых деформаций в заготовке, причем область наибольших сдвиговых деформаций локализуется по диагонали заготовки. Установлено, что наиболее рациональными с точки зрения наибольших сдвиговых деформаций, возникающих в поперечном сечении заготовки, являются угол $\beta = 60..100^{\circ}$ с углом кантовки заготовки $\alpha = 60^{\circ}$.

Аналогично получены поля распределения сдвиговых деформаций по поперечному сечению заготовки с температурным полем, полученным при других условиях (см. табл. 5.1 б, в). Однако по распределению деформаций в поперечном сечении заготовки после ее деформирования визуально сложно сделать заключение о величине деформаций и площади, которую они занимают, т.е. об эффективности той или иной схемы. Так, в одном случае деформация может быть высокой, а объем, который она занимает в заготовке, малым или наоборот, деформация низкая, но она занимает весь объем заготовки. Для более точного анализа эффективности схемы деформирования с точки зрения величин сдвиговых деформаций рассчитана средневзвешенная сдвиговая деформация в поперечном сечении заготовки.

Кроме того, для оценки эффективности рассматриваемого способаковки, проведено моделирование обжатия плоскими бойками цилиндрической заготовки с равномерным температурным полем. В результате моделирования получили поле распределения деформаций в поперечном сечении заготовки, приведенное на рис. 5.16.

В результате обработки полученных моделированием данных построе-

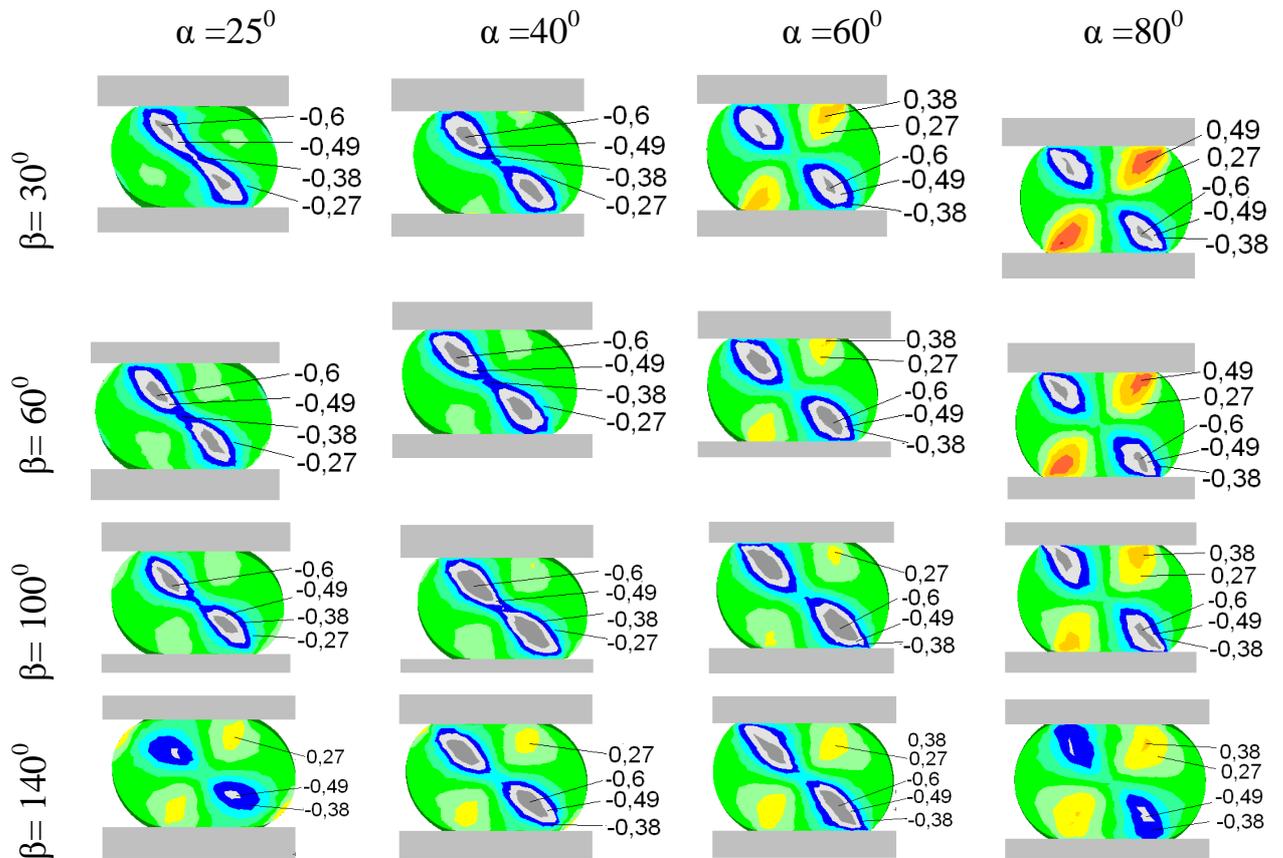


Рисунок 5.15 - Поля распределения сдвиговых деформаций по поперечному сечению заготовки с неравномерным температурным полем (температурное поле по табл. 5.1 а)

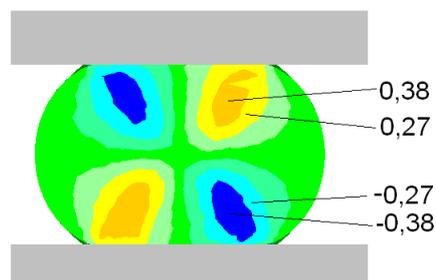


Рисунок 5.16 - Поле распределения сдвиговых деформаций в поперечном сечении заготовки с равномерным температурным полем при обжатии плоскими бойками

на графическая зависимость средневзвешенной сдвиговой деформации от различных условий деформирования (рис. 5.17). Из графика видно, что наибольшие сдвиговые деформации обеспечиваетковка заготовки с углом $\beta = 60^{\circ}..100^{\circ}$ и углом кантовки $\alpha=60^{\circ}$. Кроме того, видно, что с увеличением времени охлаждения заготовки величина зоны пониженных температур увеличивается, при этом увеличивается и ее влияние на деформированное состояние заготовки. Уменьшение неравномерности температур в поперечном сечении заготовки приводит к некоторому снижению уровня сдвиговых деформаций в заготовке.

Анализ развития сдвиговых деформаций в заготовке по ходу ее обжатия (рис. 5.18) позволяет сделать вывод о том, что на начальной стадии величина зон сдвиговых деформаций относительно невелика, в центральной части заготовки эти деформации полностью отсутствуют.

При обжатии, равном 15%, в центральной части заготовки с равномерным температурным полем также отсутствуют сдвиговые деформации, а в заготовке с неравномерным температурным полем присутствуют. Кроме того, величина сдвиговых деформаций в заготовке с неравномерным температурным полем больше, нежели в заготовке с равномерным температурным полем.

Анализ распределения интенсивности логарифмических деформаций по поперечному сечению заготовки (рис. 5.19) позволяет заключить, во-первых, то, что при деформировании заготовки с неравномерным температурным полем наибольшие деформации сосредоточены в области наибольших сдвиговых деформаций, во-вторых, то, что уровень деформаций при обжатии такой заготовки больший, нежели при обжатии заготовки с равномерным температурным полем.

Видно, что в заготовке с неравномерным температурным полем при ее обжатии даже на 200 мм остаются зоны с практически нулевой деформацией. Это зоны пониженной температуры, они не деформируются вследствие более высоких механических свойств обусловленных пониженной температурой.

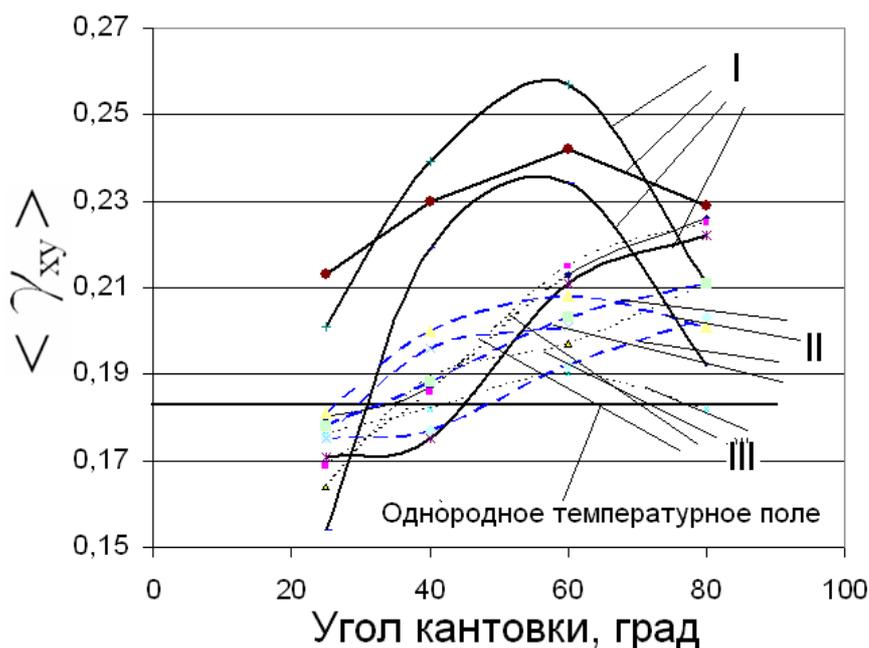


Рисунок 5.17 - График зависимости средневзвешенной сдвиговой деформации от угла кантовки заготовки (I – температурное поле табл. 5.1 б, II – температурное поле табл. 5.1 в, III – температурное поле табл. 5.1 а)

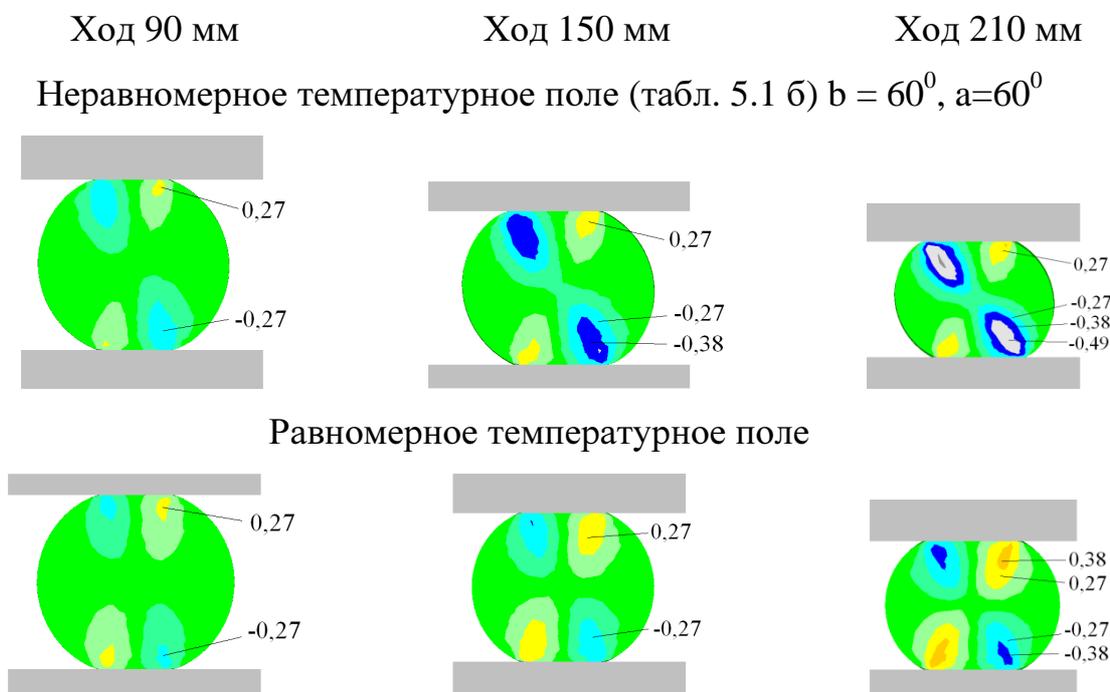


Рисунок 5.18 - Поля распределения сдвиговых деформаций в поперечном сечении заготовки при пошаговом ее деформировании

Для обжата заготовок с равномерным и неравномерным температурным полем, плоскими бойками рассчитан показатель η для центральной части заготовки и ее поверхности. Результаты расчетов приведены в графическом виде на рис. 5.20.

Анализ рис. 5.20 позволяет сделать вывод, о том, что рассматриваемая неравномерность распределения температур в заготовке при ее обжате плоскими бойками не оказывает влияние на схему напряженного состояния на поверхности заготовки. В центральной части заготовки показатель η оказался чувствительным к температурному полю, несмотря на то, что температура центральной части обеих заготовок одинакова. Так в заготовке с неравномерным температурным полем показатель η по модулю имеет большее значение, нежели в заготовке с равномерным температурным полем. При обжате заготовки на 300 мм показатель η для равномерного температурного поля составил -2,5, а для неравномерного температурного поля -3,2. что в сумме с повышенными деформациями даст лучший эффект при залечивании внутренних дефектов заготовки в виде пустот металлургического происхождения.

5.1.3 Влияние теплового состояния заготовки из стали X12MФ на ее деформируемость

Штамповая сталь X12MФ (1.2379 по DIN 17350) нашла широкое применение в инструментальном производстве. Потребность мирового рынка в поковках и прокате этой стали постоянно возрастает. В то же время увеличение объемов производства металлопродукции из стали X12MФ сдерживается технологическими особенностями ее деформационного передела, связанными с пониженной деформируемостью слитков.

В производственных условиях проведен ряд работ по совершенствованию технологических режимов выплавки и деформационного передела стали X12MФ [302]. Технология выплавки данной стали предусматривает максимальное удаление газов, вредных примесей (серы и кислорода) и оптимиза-

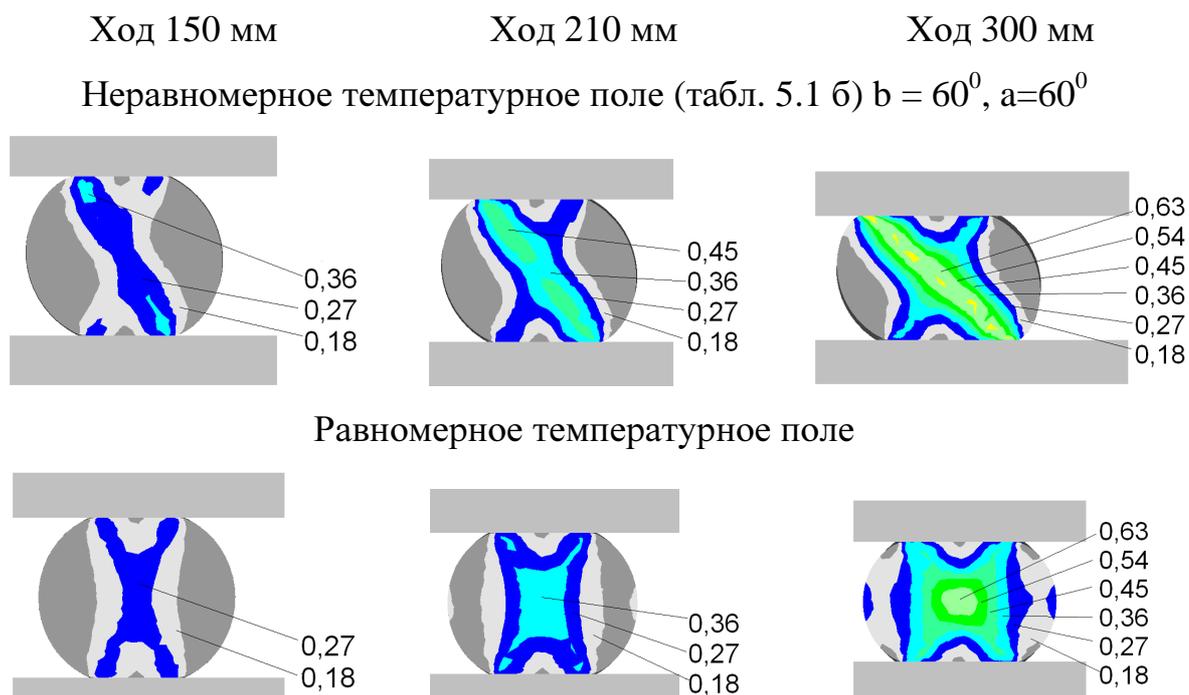


Рисунок 5.19 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки при пошаговом ее деформировании

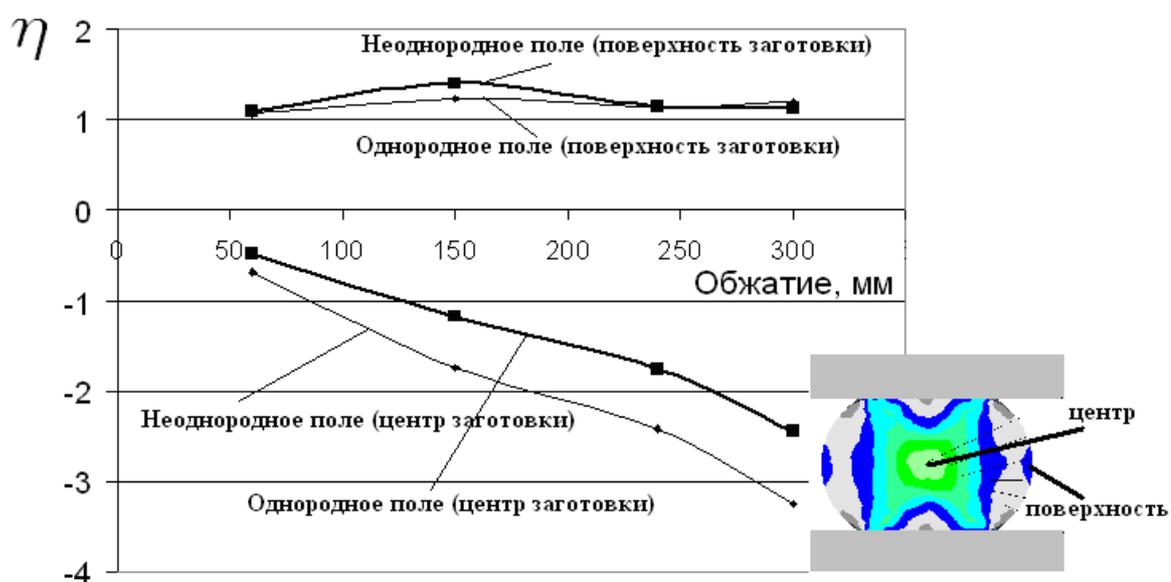


Рисунок 5.20 - Зависимость показателя схемы напряженного состояния на поверхности и в центре заготовки по ходу ее обжатия

цию содержания раскислителей. Использование указанных элементов технологии обусловлено как требованиями к качеству металла, так и необходимостью обеспечения максимальной технологической пластичности при деформации слитков. Однако устранить наличие хрупкой сетки карбидов в структуре слитка технологическими приемами в сталеплавильном производстве стали не удастся. По этой причине при ковке слитков на поверхности металла образуются грубые рванины, которые могут быть удалены путем вырубki специальным инструментом – ройкой (рис. 5.21) или зачищены абразивными кругами.

Пониженная деформируемость слитков стали X12МФ объясняется наличием в структуре большого количества избыточных карбидов, образующих сплошную сетку по границам первичных зёрен с участками ледебуритной эвтектики. Непрерывный нагрев слитков до температуры солидуса легкоплавких участков – эвтектик (1200-1220 °С), выдержка при этой температуре и последующее охлаждение до температуры деформации 1160 °С обеспечивает растворение тонких «перегородок» сетки и коагуляцию карбидных образований с увеличением их размеров (рис. 5.22). Это повышает технологическую пластичность. Во время выдержки при температуре 1250 °С происходит коагуляция крупных карбидов до недопустимо больших размеров и, как следствие, происходит снижение пластических характеристик металла.

Рациональную температуру начала деформации 1160 °С выбрали на основании пластометрических исследований, проведенных на торсионном пластометре, установленном в институте «УкрНИИ Спецсталь». Исследование реологических свойств стали X12МФ проводили в диапазоне температур 950 – 1230 °С при скоростях деформации 0,5 и 5 с⁻¹. Зависимости числа скручиваний до разрушения от температуры и скорости деформации приведены на рис. 5.23. Эти данные подтвердили ранее полученные результаты работы по улучшению пластичности стали X12МФ за счет вакуумирования при выплавке: вакуумирование стали расширяет температурный диапазон удовлетворительной горячей пластичности в сторону низких температур (см.

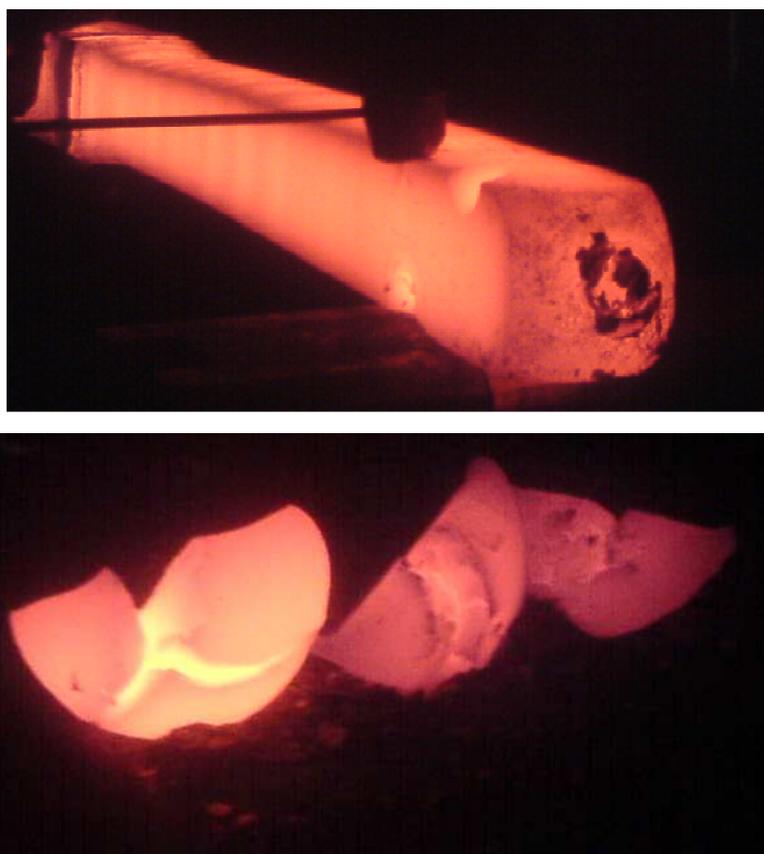


Рисунок 5.21 - Удаление дефекта ройкой

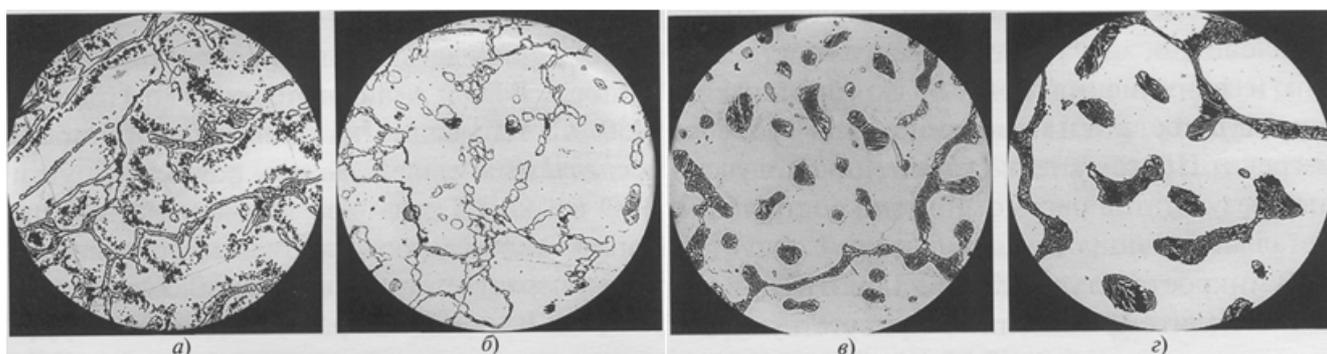


Рисунок 5.22 - Микроструктура исследуемых образцов стали X12MФ:

а) в исходном состоянии; б) после выдержки при температуре 1200 °С; в) после выдержки при температуре 1225 °С; г) после выдержки при температуре 1250 °С

рис. 5.23).

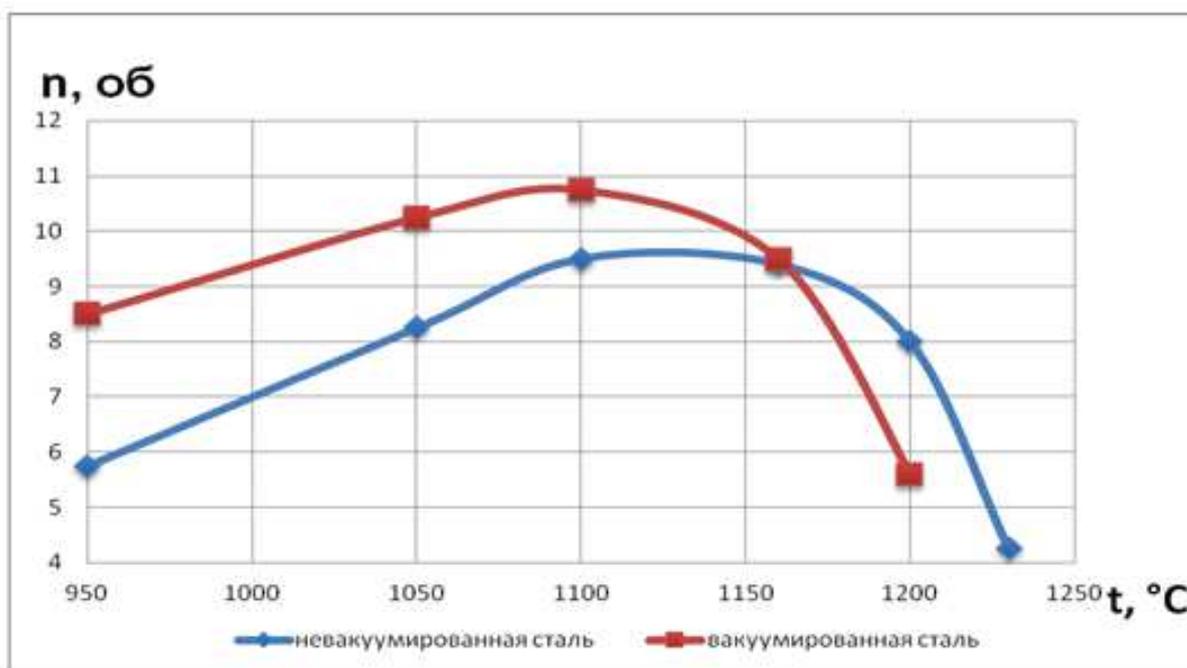
Число скручиваний образцов до разрушения вакуумированной стали при скорости деформации $0,5 - 5 \text{ с}^{-1}$ имеет высокие значения (от 9 до 11 оборотов) в диапазоне температур $950 - 1160 \text{ }^\circ\text{C}$. При температуре $950 \text{ }^\circ\text{C}$ возможна пластическая деформация слитков стали X12МФ-В с вакуумированием без макроразрушений металла. Для стали без вакуумирования минимально допустимой температурой горячей деформации является $1050 \text{ }^\circ\text{C}$. Но при этом сталь X12МФ без вакуумирования можно нагревать и при температуре $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, так как число скручиваний до разрушения при этой температуре составляет 8 оборотов.

Основываясь на этих данных, в условиях ПАО «Днепроспецсталь» разработаны и опробованы режимы нагрева, направленные на повышение технологической пластичности ледебуритной стали X12МФ (табл. 5.2).

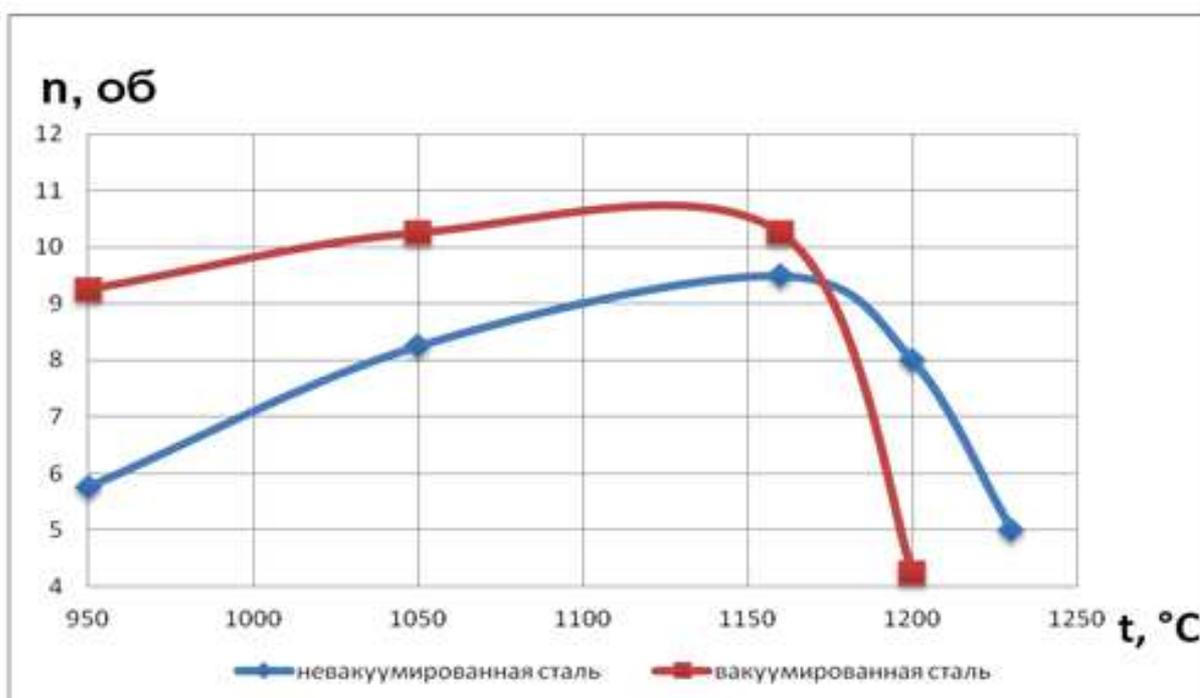
Часть слитков, которые нагревали с использованием выкотемпературных режимов, была передана на промежуточную абразивную зачистку (табл. 5.3). Ковку слитков на круглые поковки производили по схеме квадрат-квадрат-круг. Ковку слитков на полосовые профили произвели по схеме полоса-полоса. Следует отметить, что при ковке полосовых профилей вероятность образования поверхностных дефектов повышается, что объясняется более интенсивным охлаждением в процессековки полосовых профилей, чем при ковке квадратной заготовки.

Использование двух режимов высокотемпературных нагревов (ВТО № 1 и ВТО № 3) позволило уменьшить количество поверхностных дефектов (ковочных рванин), удаляемых с помощью ройки в процессе свободнойковки и с помощью абразивных кругов после промежуточного охлаждения и отжига. Режим нагрева ВТО №2, включающий нагрев до $1220 \text{ }^\circ\text{C}$, не позволил улучшить деформируемость слитков: после такого нагрева 31,7 % слитков подвергали промежуточной зачистке (см. табл. 5.3).

В результате передела слитков было установлено, что предварительный нагрев слитков массой 3,6 т и 4,3 т до температуры $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ с выдержкой 2 часа (ВТО № 1) и последующим занижением до температуры деформации



а



б

Рисунок 5.23 - Зависимость числа оборотов до разрушения (n) от температуры деформации (t) стали X12МФ без вакуумирования и с вакуумированием: а) при скорости деформации 5 с^{-1} ; б) при скорости деформации $0,5 \text{ с}^{-1}$.

Таблица 5.2 - Режимы нагрева слитков стали X12MФ

| № п/п | Технология нагрева | Длительность нагрева, ч |
|----------|---|----------------------------|
| 1 | Нагрев без высокотемпературной обработки слитков: <ul style="list-style-type: none"> - нагрев со скоростью 60 °С/ч до температуры 1160 °С; - минимальная выдержка при температуре 1160 °С – 1 час 45 мин. | 8 |
| 2 | Высокотемпературная обработка слитков (ВТО) №1: <ul style="list-style-type: none"> - нагрев со скоростью 60 °С/ч до температуры 1200 °С; - выдержка при температуре 1200 °С – 2 часа; - занижение до температуры 1160 °С; - выдержка при температуре 1160 °С – 3 часа. | 13 |
| 3 | Высокотемпературная обработка слитков (ВТО) №2: <ul style="list-style-type: none"> - нагрев со скоростью 60 °С/ч до температуры 1220 °С; - выдержка при температуре 1220 °С – 2 часа; - занижение до температуры 1160 °С; - выдержка при температуре 1160 °С – 3 часа. | 13 |
| 4 | Высокотемпературная обработка слитков (ВТО) №3: <ul style="list-style-type: none"> - нагрев со скоростью 60 °С/ ч до температуры 1200 °С; - выдержка при температуре 1200 °С – 3 часа; - занижение до температуры 1160 °С; - выдержка при температуре 1160 °С – 3 часа. | 14 |

1160 °С в большей степени повышает технологическую пластичность стали Х12МФ, чем другие режимы нагрева. Его внедрение обеспечило снижение количества слитков, передаваемых в промежуточном профиле на зачистку поверхности, с 30 до 13 %.

5.2 Управление НДС заготовки на основе регулирования кинематики ее деформирования

5.2.1 Исследование дифференцированной протяжки заготовки

Анализ влияния механического режима деформирования заготовки с равномерным температурным полем проведенный на основании моделирования представленного, в том числе в п. 5.1 позволил установить следующие закономерности (рис. 5.24-5.28).

При относительных подачах от 0,5 до 1,1 и степени обжатия $\varepsilon_n = 0,1 \dots 0,15$ наблюдается минимальная неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки (см. рис. 5.25, б-д). С увеличением степени обжатия от 0,15 до 0,3 происходит более интенсивная проработка осевой зоны заготовки. Однако неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций возрастает за счет образования застойной зоны под рабочей поверхностью деформирующего бойка.

Наименьшая неравномерность распределения интенсивности логарифмических деформаций в продольном сечении заготовки наблюдается при протяжке с относительной подачей равной 0,3. Как показали результаты исследования распределения интенсивности логарифмических деформаций по поперечному сечению заготовки, это вызвано низким уровнем проработки осевой зоны заготовки.

На практике, зачастую, протяжку плоскими бойками осуществляют с постоянной подачей и постоянным единичным обжатием, причем величина обжатия находится в пределах 100-150 мм для ковки на гидравлическом ковочном прессе силой 10 МН, для прессов меньших силах обжатия могут быть

Таблица 5.3 - Результаты передела слитков Х12МФ

| Режим нагрева (см. табл. 5.2) | Масса слитка, т | Профиль поковки | Задано слитков, шт. | Промежуточная зачистка заготовки | |
|----------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|----------------------------------|--------|
| | | | | шт. | % |
| Нагрев без ВТО | 3,6 | круг | 170 | 55 | 32 % |
| | | полоса | 37 | 8 | 21 % |
| | 4,3 | круг | 72 | 19 | 26 % |
| | | полоса | 62 | 21 | 34 % |
| Итого | | | 341 | 103 | 30 % |
| ВТО № 1 | 3,6 | круг | 119 | 13 | 9 % |
| | | полоса | 40 | 5 | 12,5 % |
| | 4,3 | круг | 105 | 11 | 10,5 % |
| | | полоса | 64 | 14 | 21,8 % |
| Итого | | | 328 | 43 | 13,1 % |
| ВТО № 2 | 3,6 | круг | 17 | 5 | 29 % |
| | | полоса | 10 | 5 | 50 % |
| | 4,3 | круг | 10 | 1 | 10 % |
| | | полоса | 4 | 2 | 50 % |
| Итого | | | 41 | 13 | 31,7 % |
| ВТО № 3 | 3,6 | круг | 54 | 5 | 9 % |
| | | полоса | 12 | 3 | 25 % |
| | 4,3 | круг | 28 | 6 | 21,4 % |
| | | полоса | 13 | 4 | 30,7 % |
| Итого | | | 107 | 18 | 16,8 % |

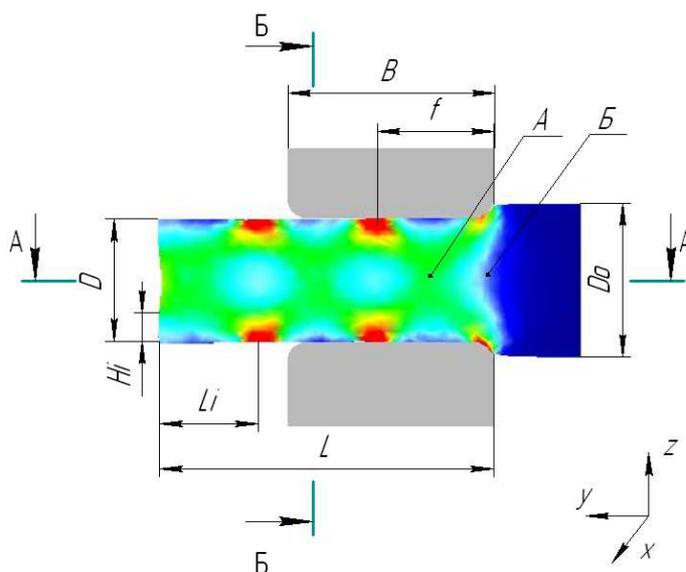


Рисунок 5.24 - Исследуемое поперечное сечение заготовки для случая протяжки в вырезных бойках

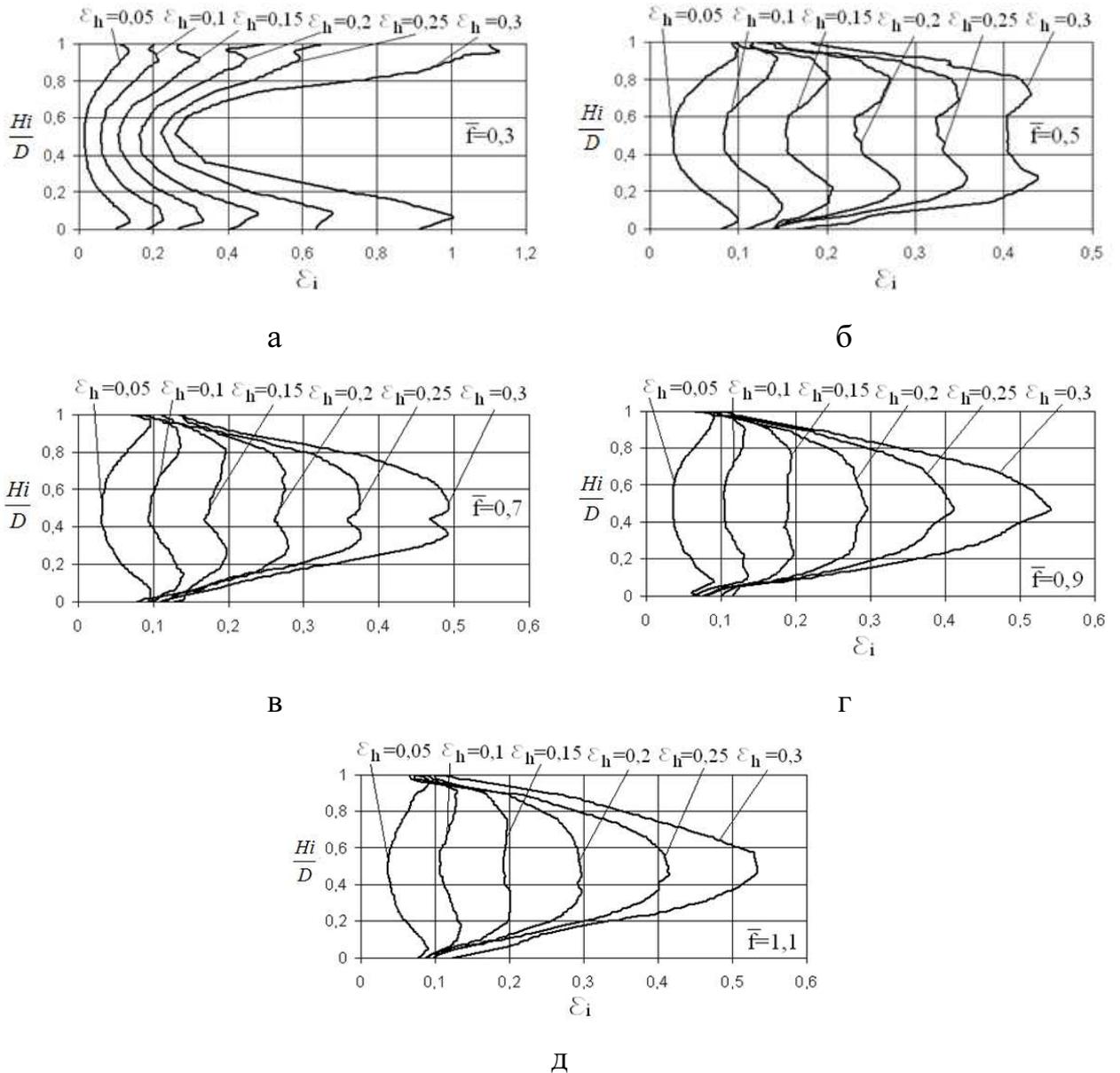


Рисунок 5.25 - График распределения интенсивности логарифмических деформаций по сечению заготовки Б-Б при различных величинах обжатия и относительных подачах

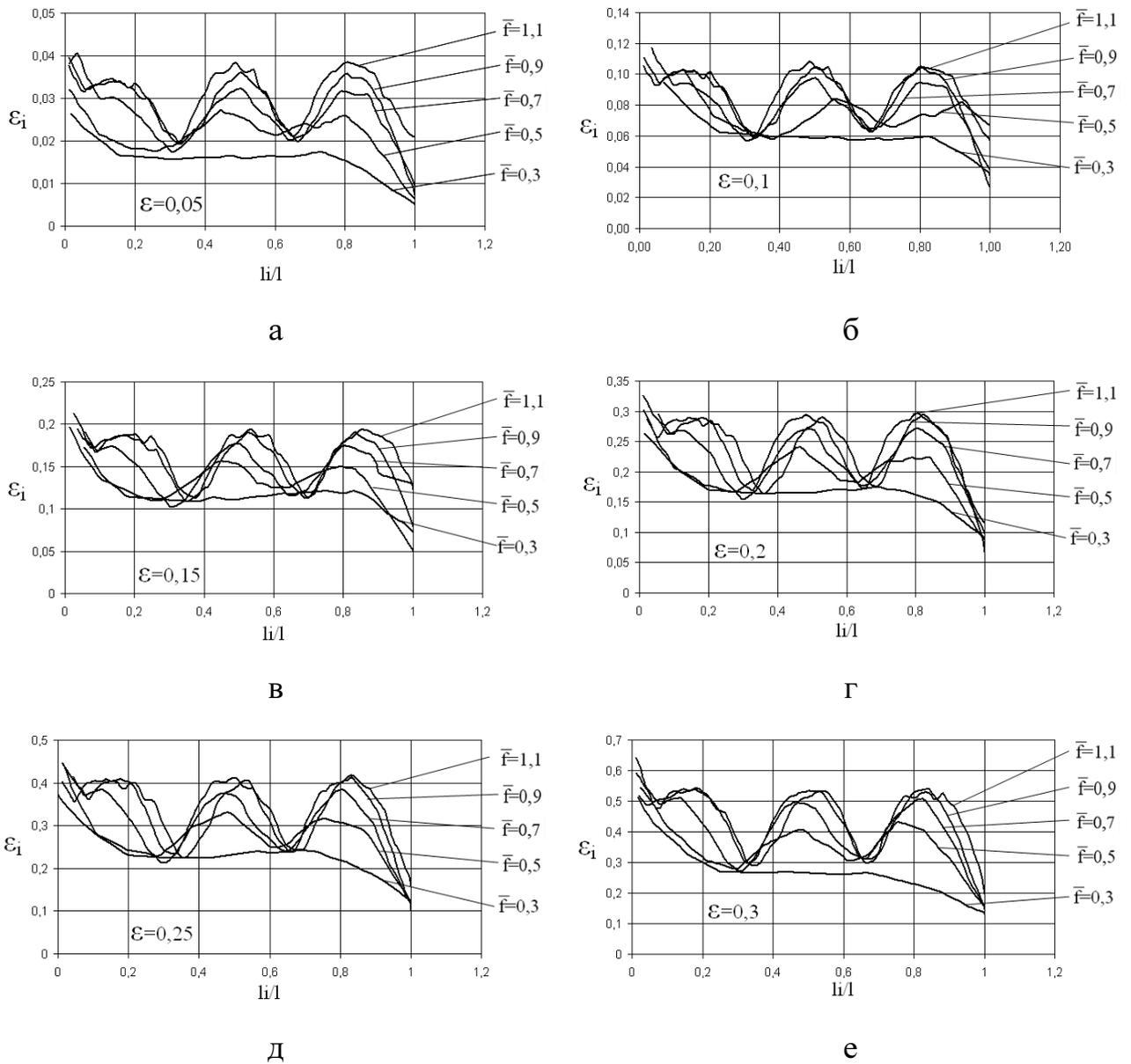


Рисунок 5.26 - График распределения интенсивности логарифмических деформаций в осевой зоне по длине заготовки, протянутой с различными относительными подачами и величинами обжатый

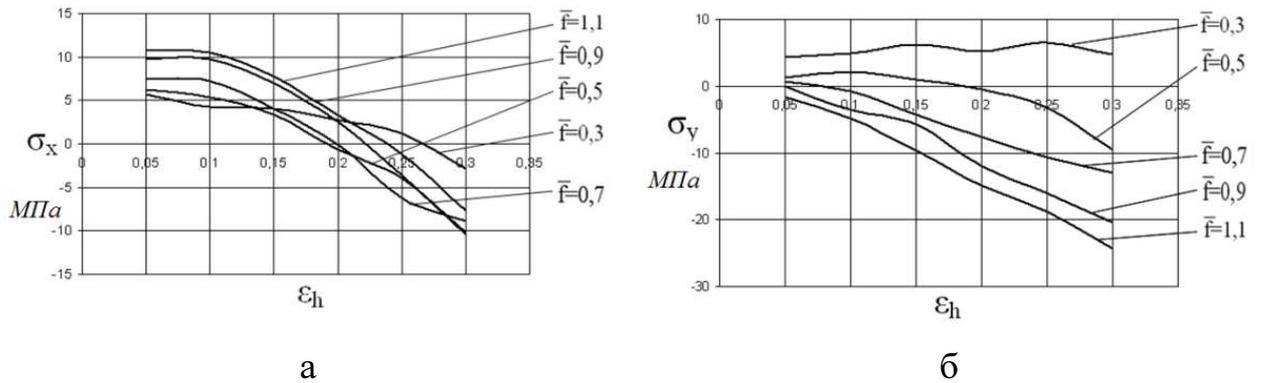


Рисунок 5.27 - График зависимости компонент осевых напряжений от величины обжатия и относительной подачи при протяжке плоскими бойками

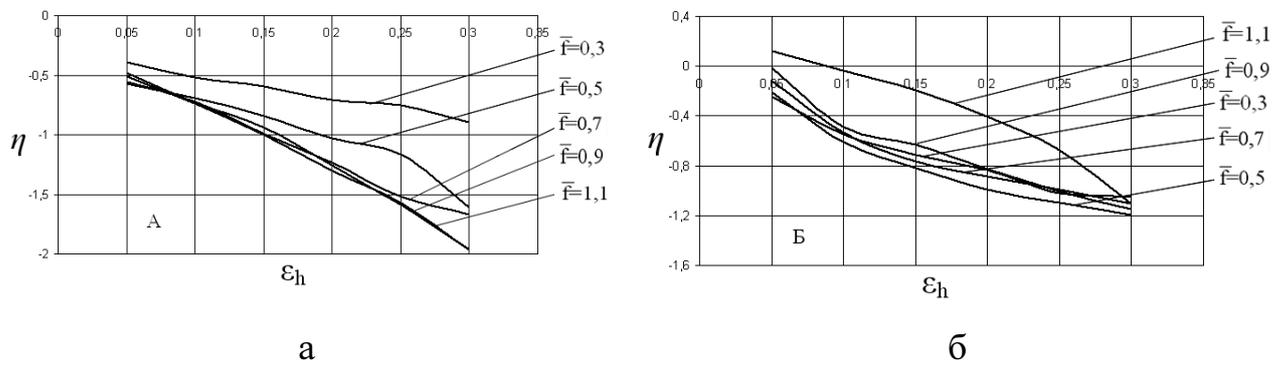


Рисунок 5.28 - График зависимости показателя жесткости схемы напряженного состояния от величины обжатия и относительной подачи при протяжке заготовки плоскими бойками

еще меньшими. Подача обычно составляет $2/3$ ширины бойка и не зависит от размера протягиваемой заготовки и может уменьшаться в случае нехватки силы прессы. Бойки для прессов от 30 до 100 МН имеют ширину 600-800 мм, т.е. подача находится в пределах 400-550 мм.

При протяжке заготовок достаточно больших размеров 1000-1500 мм в диаметре, по схеме круг – квадрат – восьмигранник – круг, которая часто используется на практике, как следует из приведенных выше исследований, деформационное поле поковки будет неравномерным. Центральная часть поковки остается не прокованной, что соответствующим образом отразится на качестве изделия.

Проведено моделирование протяжки цилиндрической заготовки диаметром 1000 мм, плоскими бойками шириной 600 мм. Подача составляла $2/3$ ширины бойка, единичное обжатие 100 мм. Протяжка производилась по схеме круг – квадрат – восьмигранник – круг проходами. На исходной заготовке оттянуты две ступени диаметрами 800 и 900 мм. Результаты моделирования в виде поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки приведены на рис. 5.29.

Как видно из рис. 5.29, центральная часть заготовки, как говорилось выше, имеет низкую деформацию, наибольшие деформации по сечению сосредоточены у периферийных слоев заготовки, что при дальнейшей термической обработке может привести к структурной неравномерности и неравномерности механических свойств. Кроме того поры литейного происхождения, которые находятся в центральной части заготовки, вследствие малой деформации могут не «залечиться».

Для лучшей проработки центральной части заготовки, можно рекомендовать максимально возможно увеличить подачу заготовки на последних проходах при ковке по данной схеме и увеличить величину единичного обжатия.

5.2.2 Исследование режимов протяжки заготовок уменьшающих торцовую вогнутость

Методом конечных элементов проведено моделирование процессаковки протяжкой заготовки по заводским режимам. В качестве заготовки был принят цилиндр диаметром 1000 мм и длиной 2000 мм из материала Сталь 45. Начальная температура заготовки 1200°С, заготовка разбивалась на 50000 конечных элементов, скорость деформирования 25 мм/с, при моделировании коэффициент пластического трения Зибеля принимался равным 0,35. Протяжка осуществлялась плоскими бойками шириной $B = 600$ мм радиус закругления рабочей кромки 50 мм. Подача составляла $2/3$ ширины бойка, единичное обжатие 100 мм. Протяжка производилась по схеме круг – квадрат – восьмигранник – круг проходами. На исходной заготовке оттянуты две ступени диаметрами 800 и 900 мм. Результаты моделирования в виде поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки приведены на рис. 5.30.

Как видно из рис. 5.30, осевая зона в заготовке имеет низкую деформационную проработку, наибольшие деформации по сечению сосредоточены у периферийных слоев заготовки, что при дальнейшей термической обработке может привести к структурной неравномерности и неравномерности механических свойств. Кроме того, видно, что на торцевой части появилась утяжина, и часть поковки с утяжиной уйдет в отход [303-304].

Проведено физическое моделирование процесса протяжки заготовки плоскими бойками по заводским режимам. Моделирование проводилось на заготовках, полученных отливкой в изложнице с последующей калибровкой в матрице до диаметра $D_0 = 36$ мм из свинца с содержанием 1% сурьмы для схожести механических характеристик модельного материала с натуральным при горячей деформации.

В ходе эксперимента исследовалась зависимость глубины образования вогнутости x на торцевой поверхности заготовки от величины обжатия и подачи при протяжке цилиндрической заготовки плоскими бойками. Исходная

заготовка имела относительную высоту $H/D_0 = 1,5$. Величина обжатия ϵ_n принималась равной 8 и 16 % от диаметра исходной заготовки, подача $1/3 \dots 2/3$ от ширины бойка.

Эксперимент осуществлялся следующим образом: цилиндрическая заготовка укладывалась на нижний плоский боек шириной $B = 28$ мм с подачей равной $1/3$, $1/2$ и $2/3$ ширины бойка, после чего производился нажим на заготовку верхним плоским бойком такой же ширины. Величина обжатия производилась на постоянную величину, равную 3 или 6 мм со скоростью 1 мм/с. Протяжка путем последовательных подач осуществлялась проходами по всей длине заготовки. Ковка проводилась по схеме круг – квадрат – восьмигранник – круг путем кантовок заготовки вокруг оси на 90^0 и 45^0 до диаметра $d = 15$ мм при величине обжатий равной 3 мм и до $d = 18$ мм при величине обжатий равной 6 мм. Таким образом, было промоделировано 6 схем протяжки.

В процессе эксперимента наблюдалось изменение формы и размеров торцов заготовки, на которых образовывалась вогнутость (утяжина) (рис. 5.31, 5.32), глубина которой замерялась после каждого перехода ковки от начального до конечного диаметра с шагом 3 и 6 мм для заготовок, протягиваемых с различной величиной обжатия. Перед тем, как на торцевой поверхности начинал образовываться зажим, таким образом, усложняя замер глубины вогнутости, в торцевую полость заготовки вставлялся щуп и далее в процессе протяжки замерялась длина его свободного конца (рис. 5.33). По мере уменьшения длины свободного конца щупа определялась глубина зажима.

По результатам экспериментальных исследований были построены графики зависимости относительной глубины зажимов от величины обжатия и подачи (рис. 5.34) при протяжке. Анализ полученных данных позволил установить, что при протяжке цилиндрической заготовки плоскими бойками до диаметра, равного 0,4 от исходного (уков ≈ 6), с величиной относительного обжатия 8 % диаметра исходной заготовки и подачами равными $1/3$ от

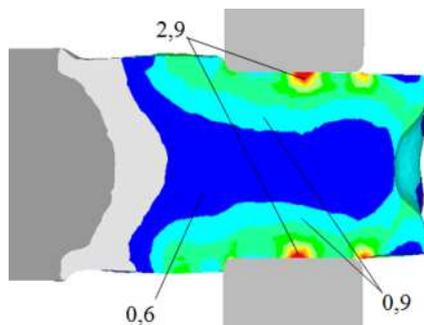


Рисунок 5.29 - Поле распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки после протяжки плоскими бойками с подачей 400 мм и единичным обжатием 100 мм

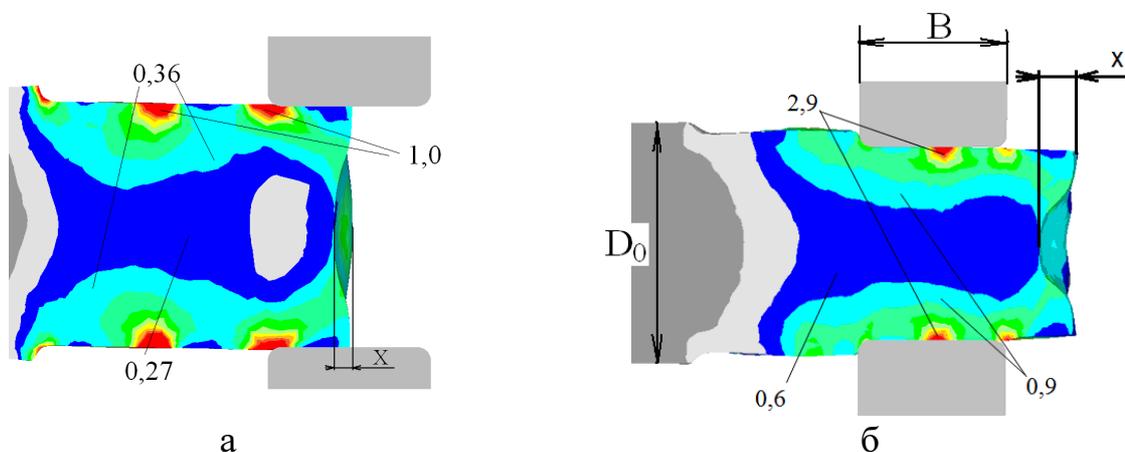


Рисунок 5.30 - Поле распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки в процессе протяжки плоскими бойками с подачей 400 мм и единичным обжатием 100 мм (а – протяжка на диаметр 900 мм, б – протяжка на диаметр 800 мм)

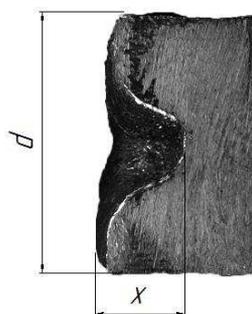


Рисунок 5.31 - Образование вогнутости (утяжины) на торцевой поверхности поковки



Рисунок 5.32 - По стадийное образование вогнутости торцевой поверхности заготовки в ходе протяжки



Рисунок 5.33 - Замер глубины зажима торцевой поверхности заготовки щупом

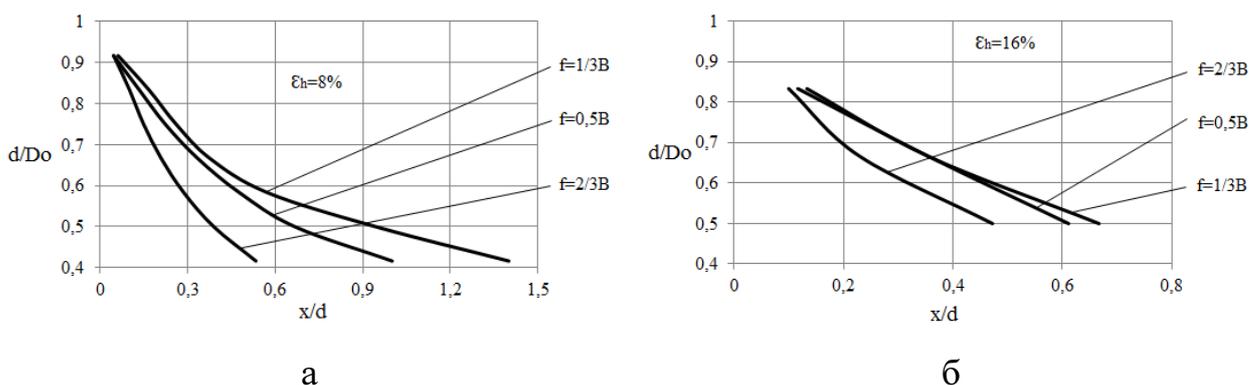


Рисунок 5.34 - График зависимости относительной глубины утяжины (зажима) от диаметра получаемого изделия при различных режимах протяжки

ширины бойка образуется зажим на торцевой части заготовки глубиной 1,4 ее диаметра (см. рис. 5.34 а). Это объясняется тем, что при таких подачах и величинах обжатия происходит течение (деформирование) лишь периферийных слоев металла заготовки, при этом осевая зона остается непроработанной. При протяжке с подачей равной $1/2$ ширины бойка до диаметра, равного 0,4 от начального, длина зажима равна 1 диаметру заготовки, а при протяжке с подачей, равной $2/3$ ширины бойка, его длина уменьшается до 0,53 диаметра заготовки.

Уменьшение утяжины с увеличением подачи объясняется увеличением пятна контакта бойка и заготовки, что, в свою очередь, способствует проникновению очага деформации вглубь заготовки. Таким образом, кроме периферийных слоев заготовки интенсивнее течь начинают и осевые, что способствует меньшему опережению периферийных слоев заготовки. Кроме того, на контакте заготовки и инструмента действуют значительные силы трения, сдерживающие интенсивное течение приконтактных слоев.

При протяжке цилиндрической заготовки плоскими бойками с величиной обжатия, равной 16 % от диаметра исходной заготовки, и подачами $f = (1/3...2/3) \cdot B$ до диаметра, равного 0,5 исходного, наблюдается некоторое уменьшение глубины зажима в сравнении с протяжкой с обжатиями, равными 8% диаметра исходной заготовки. Это объясняется тем, что с увеличением обжатия очаг деформации проникает глубже в объеме заготовки и ее центральные слои более интенсивно текут в осевом направлении.

Установлено, что при протяжке с подачами равными $1/3...1/2$ ширины бойка глубина зажима заготовки при протяжке до диаметра 0,5 от исходного, составляет 0,61...0,66 конечного диаметра заготовки. С увеличением подачи до $2/3$ ширины бойка глубина осевого зажима уменьшается до 0,47 конечного диаметра заготовки.

Таким образом, при протяжке по схеме круг-круг с фиксированной подачей и обжатием малой величины на торце заготовки будет образовываться утяжина, трансформирующаяся в дальнейшем при протяжке в зажим. Для

уменьшения ее относительной величины протяжку необходимо вести с максимально возможными обжатиями и максимальной подачей.

5.2.3. Протяжка с паузами

Причинами образования поверхностных трещин являются как низкое качество исходной заготовки (слитки могут иметь дефекты литейного происхождения), неправильный режим нагрева слитка, так и неправильный режимковки.

В процессековкипоковок по распространенным заводским режимам наибольшие значения деформаций сосредоточены на поверхности заготовки (рис. 5.35-5.36), кроме того в процессековки поверхность заготовки имеет более низкую температуру, что обуславливает и более низкую пластичность металла. Таким образом, наибольшая величина исчерпанной пластичности по В.Л. Колмогорову $\psi = \int_0^t \dot{\varepsilon}_i / \varepsilon_p dt$ ($\dot{\varepsilon}_i$ - скорость деформаций, ε_p - предельная деформация металла при данных условиях деформирования) будет на поверхности заготовки, где и образуются трещины.

Для оценки трещинообразования в процессековки построена кривая пластичности для стали 38ХНМ по испытаниям на растяжение, кручение и сжатие в диапазоне температур 800..1200°C (температурный интервалковки).

Процессковки протяжкой заключается в последовательных обжатиях и подачах, и между обжатиями проходит определенное время, за которое металл восстанавливает свою пластичность. Если наложить путь деформирования на кривую пластичности, то уже на втором или третьем проходе при протяжке он пересечёт кривую пластичности, что должно означать разрушение (образование трещины), однако на практике этого не происходит. Это объясняется известным эффектом восстановления пластичности в паузах между деформированиями. Восстановление пластичности во время паузы может быть рассчитано следующим образом:

$$\Delta\psi = \psi_i \cdot (1 - \psi_i)^{f(\psi_i, T)} (1 - e^{-t \cdot n}), \quad (5.1)$$

где ψ_i - использованный ресурс пластичности на i -м этапе деформирования, $f(\psi, T)$ и n - характеристики материала, t – время паузы, с.

Кроме того, восстановление пластичности, определяемое по результатам экспериментальных исследований, может быть записано как:

$$\Delta\psi = \psi_1 + \psi_{2*} - 1, \quad (5.2)$$

где $\psi_1 = \varepsilon_{u1} / \varepsilon_p$ - использованный ресурс пластичности металла перед осуществлением паузы; $\varepsilon_p = \ln(l_p / l_0)$ - предельная логарифмическая степень деформации при монотонном растяжении образца; $\varepsilon_{u1} = \ln(l_1 / l_0)$ - логарифмическая степень деформации образца до паузы; $\varepsilon_{p2} = \ln(l_{p2} / l_0)$ - логарифмическая степень деформации, при которой произошло разрушение образца после паузы; $\psi_{2*} = \frac{\varepsilon_{p2} - \varepsilon_{u1}}{\varepsilon_p}$ - остаточный после осуществления паузы ресурс пластичности; l_0, l_1 - исходная и полученная при растяжении перед паузой длины образца соответственно, мм; l_p, l_{p2} - предельная длина образца при монотонном растяжении и растяжении с паузой соответственно, мм.

Рассчитав по формуле (5.1) восстановленную за время паузы пластичность и зная величину предварительной деформации, можно рассчитать суммарно накопленную предельную деформацию заготовки при данных условиях деформирования:

$$\varepsilon_{p2} = \varepsilon_p \left(\Delta\psi - \frac{\varepsilon_{u1}}{\varepsilon_p} + 1 \right) + \varepsilon_{u1} \quad (5.3)$$

Построим на основе кривой пластичности кривую предельной суммарно накопленной деформации для осадки заготовки с паузой. За основу возьмем кривую пластичности для стали 38ХНМ (рис. 5.37). Рассчитаем осадку при температуре 1100 °С и скорости деформации 0,001 с⁻¹. Показатель напряженного состояния в данном случае равен -1. Предположим, что во время осадки на ее поверхности накопилась интенсивность логарифмических деформаций, равная 0,2. В этом случае использованный ресурс пластичности

равен:

$$\psi_1 = \frac{0,2}{\varepsilon_p(\eta, T, \varepsilon)} = \frac{0,2}{1,49} = 0,134.$$

По зависимости (5.1) восстановленный ресурс пластичности за время паузы, равной 60 секунд, равен:

$$\Delta\psi = 0,116.$$

Таким образом, предельная деформация после паузы для данной заготовки несколько вырастет и составит:

$$\varepsilon_{p2} = 1,49(0,116 - \frac{0,2}{1,49} + 1) + 0,2 = 1,663.$$

Предположив, что при этом предельная деформация данного материала при заданных условиях деформирования увеличится одинаково независимо от показателя напряженного состояния, это увеличение графически выглядит следующим образом (см. рис. 5.37).

Таким образом, за счет пауз при горячем деформировании возможно, повысить суммарную предельную пластичность металла. Большинство процессовковки заключаются в деформировании с паузами. Прогнозирование появления разрушений в процессахковки должно производиться с учетом приведенной выше методики.

Проведено моделирование процесса протяжки в программе, которая основана на методе конечных элементов [305-309]. В качестве заготовки был принят цилиндр диаметром 600 мм и длиной 2000 мм из материала сталь 38ХНМ. Начальная температура заготовки 1100°C, заготовка разбивалась на 50000 конечных элементов, скорость деформирования 25 мм/с, при моделировании коэффициент пластического трения Зибеля принимался равным 0,35. Протяжка осуществлялась плоскими бойками шириной В=800мм радиусом скругления кромки рабочей поверхности 50 мм.

В ходе моделирования исследовано влияние величины относительного

обжатия ($\varepsilon_h = \Delta D/D_0$, ΔD - величина абсолютного обжатия) и относительной подачи ($\bar{f} = f/D_0$) на распределение интенсивности логарифмических деформаций и напряжений на поверхности заготовки. Относительная подача принималась равной $\bar{f} = 0,5; 0,7; 0,9$, величина обжатия $\varepsilon_h = 0,1; 0,15; 0,2; 0,25$.

На основе полученных данных был рассчитан показатель жесткости схемы напряженного состояния η для точек на поверхности заготовки. Для определения места возможного образования трещины на заготовке при протяжке по результатам моделирования построили путь деформирования для точек P1, P2, P3 (рис. 5.38) и наложили его на диаграмму пластичности как показано на рис. 5.39.

Из рисунка видно, что наименьшая вероятность образования трещины соответствует области заготовки возле точки P2, т.к. деформации в ней наименьшие, и показатель жесткости схемы напряженного состояния также имеет наименьшие значения за все время обжатия.

В точке P3, которая находится непосредственно под кромкой бойка, деформации имеют несколько большие значения, чем для точки P2, и показатель жесткости схемы напряженного состояния имеет большие значения. Путь деформирования для точки P2 более приближен к кривой предельных деформаций, однако наибольшие значения деформаций соответствуют зоне заготовки в области точки P1. Это объясняется тем, что металл данной части заготовки был уже деформирован ранее за предыдущее обжатие. Т.е. точка P1 находится в области заготовки, которая соответствует точке P3 в конце текущего обжатия. Показатель жесткости схемы напряженного состояния в точке P1 имеет наибольшие значения, и в целом путь деформирования для данной точки более близок из трех рассматриваемых точек к кривой предельных деформаций. Все это свидетельствует о том, что образование трещины вероятнее всего в процессе обжатия будет в области перехода от обжатой части заготовки к еще не деформированной (точка P1).

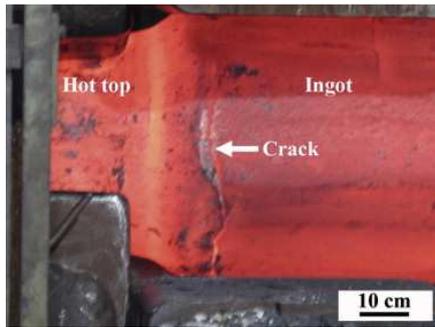


Рисунок 5.35 - Образование поверхностной трещины в процессе протяжки слитка массой 6 т из низколегированной стали



Рисунок 5.36 - Поверхностная трещина, образованная в процессе осадки

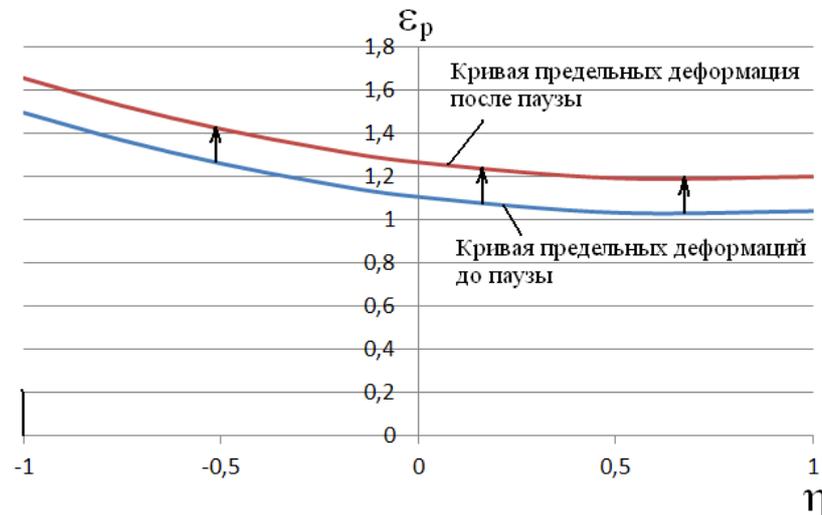


Рисунок 5.37 - Кривая пластичности стали 38ХНМ при температуре 1100 °С и скорости деформации 0,008 с⁻¹

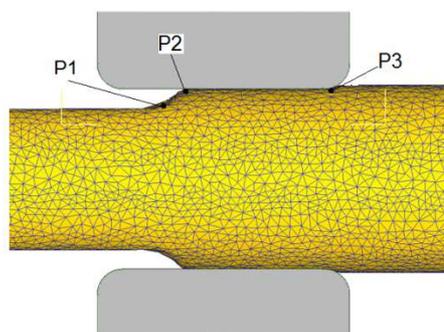


Рисунок 5.38 - Схема протяжки плоскими бойками цилиндрической заготовки

Для определения влияния параметров протяжки на возможное образование трещин проведен анализ полученных при моделировании данных распределения деформаций и напряжений по сечению заготовки. Причем, исходя из выше проведенного анализа, особому вниманию подвергались точки P1 и P3 на поверхности заготовки.

Построены пути деформирования для точек P1 и P3 при протяжке цилиндрической заготовки с различными подачами и обжатиями (рис. 5.40). Анализ полученных данных подтвердил полученное ранее предположение о зоне наибольшей вероятности образования трещин, путь деформирования для точки P1 более приближен к кривой предельных деформаций при всех рассматриваемых условиях деформирования. Установлено, что с увеличением относительно степени обжатия от 0,1 до 0,25 наибольшая степень деформации в точке P1 возрастает от 0,4..0,6 до 1,0..1,4, для точки P3 от 0,2 до 0,4. Также установлено, что для точки P1 на путь деформирования существенное влияние оказывает относительная подача.

При обжатии заготовки с относительной подачей, равной 0,5 и 0,7, путь деформирования для точки P1 имеет незначительное отличие, а увеличение подачи до 0,9 обуславливает существенное снижение уровня деформаций. При относительном обжатии, равном 0,1, это снижение происходит с 0,6 до 0,4, при обжатии 0,25 снижение с 1,4 до 1,0, и вероятность разрушения при этом уменьшается.

Для точки P3 не установлено подобного влияния подачи на уровень деформации, при увеличении подачи он изменяется незначительно. Однако, заметно существенное влияние подачи на значение показателя схемы напряженного состояния. Относительной подаче 0,5 соответствует на рис. 5.40, путь деформирования с наименьшими значениями η .

На рис. 5.40 показан путь деформирования для точек расположенных на поверхности заготовки при протяжке в процессе второго обжатия после подачи на первом проходе. Во время второго прохода при протяжке в процессе построения пути деформирования для точек P1 и P3 необходимо будет

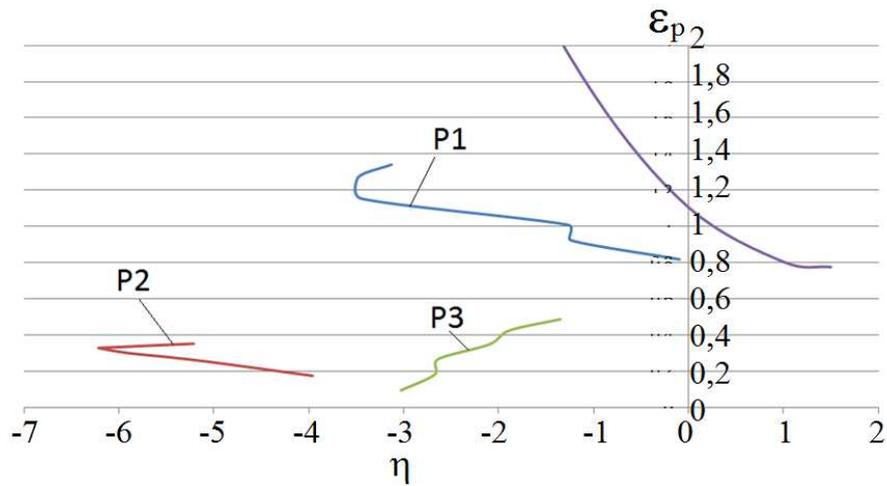


Рисунок 5.39 - Диаграмма пластичности стали 38ХНМ (температура 1100 °С, скорость деформации $8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) с нанесенным путем деформирования для различных точек при протяжке плоскими бойками с относительной подачей 0,5 и относительным обжатием 0,25

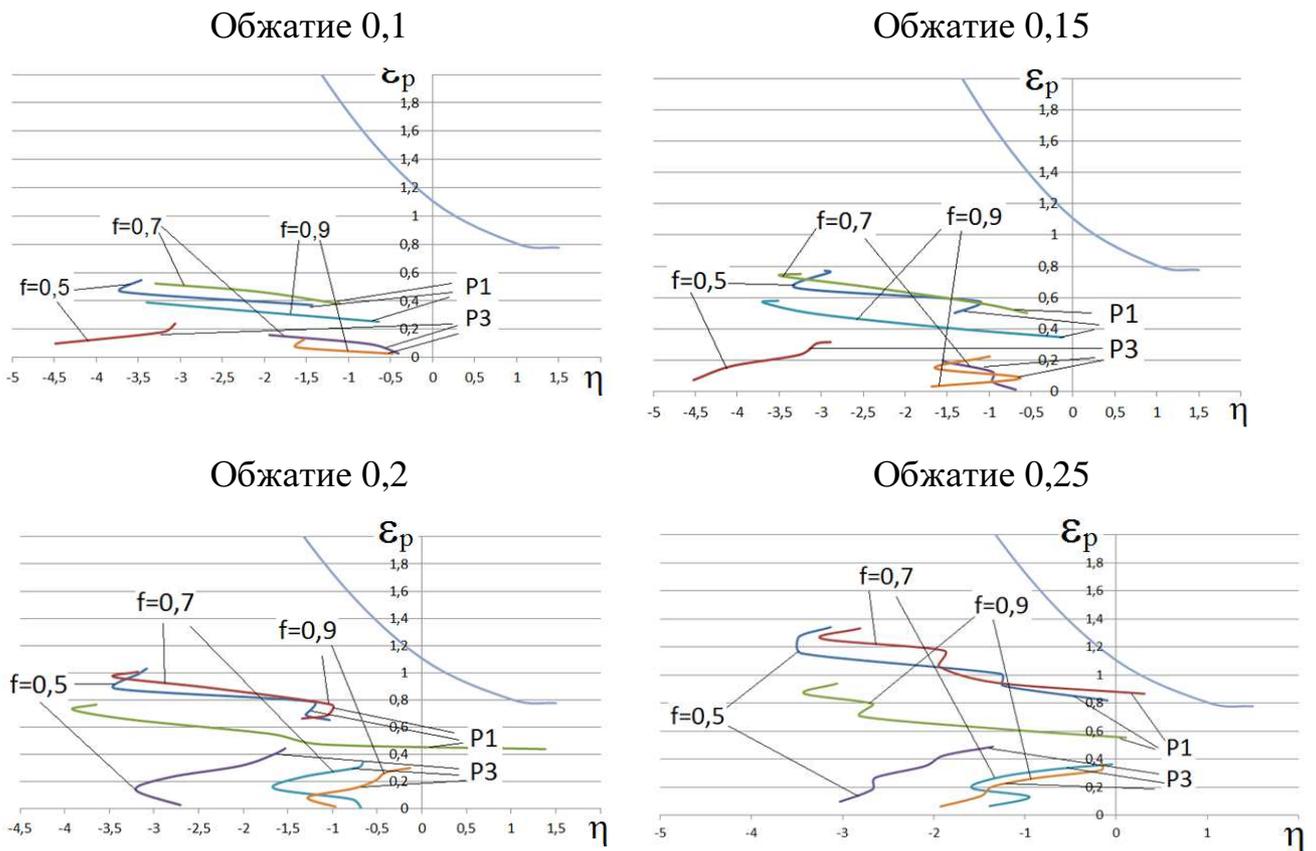


Рисунок 5.40 - Диаграмма пластичности для стали 38ХНМ (температура 1100 °С, скорость деформации $8 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) с нанесенным путем деформирования для различных точек при протяжке плоскими бойками

учесть паузу между деформированиями и при наложении полученных путей деформирования на диаграмму пластичности, она должна быть скорректирована как это показано выше на рис. 5.37.

Проведено моделирование процесса протяжки плоскими бойками шириной 800 мм круглой заготовки диаметром 1000 мм за четыре прохода без кантовок. Протяжка производилась с постоянными подачами 530 мм и обжатиями 180 мм. Поля распределения деформаций в поперечном сечении заготовки при протяжке показаны на рис. 5.41.

На последнем проходе выделены три точки с наибольшими деформациями на поверхности заготовки как зоны наибольшей вероятности разрушения заготовки. Для данных точек определены компоненты напряжений и величина интенсивности логарифмических деформаций. По полученным данным построен путь деформирования (рис. 5.42).

Из рисунка видно, что после первого прохода в процессе протяжки путь деформирования для рассматриваемых точек пересекает кривую пластичности, что должно означать разрушение заготовки в данных точках, однако на практике разрушение не наступает, что связано с описанным выше явлением восстановления пластичности.

Анализ полученных данных позволяет установить, что в случае протяжки с постоянными подачами на поверхности заготовки и в ее приповерхностных слоях возникают зоны больших деформаций, которые соответствуют зоне внедрения кромки бойка в заготовку и при последующей протяжке, несмотря на удлинение заготовки, величина деформаций в этих зонах возрастает и вероятность разрушения металла также увеличивается.

Для уменьшения концентрации деформаций на поверхности заготовки необходимо протяжку осуществлять проходами со смещением бойка на каждом проходе на половину его ширины. Кроме того вероятность разрушения возрастает с уменьшением времени между проходами при протяжке, т.е. при уменьшении интервала между нажимами бойком в одном и том же месте заготовки особенно на последних проходах когда температура поверхности за-

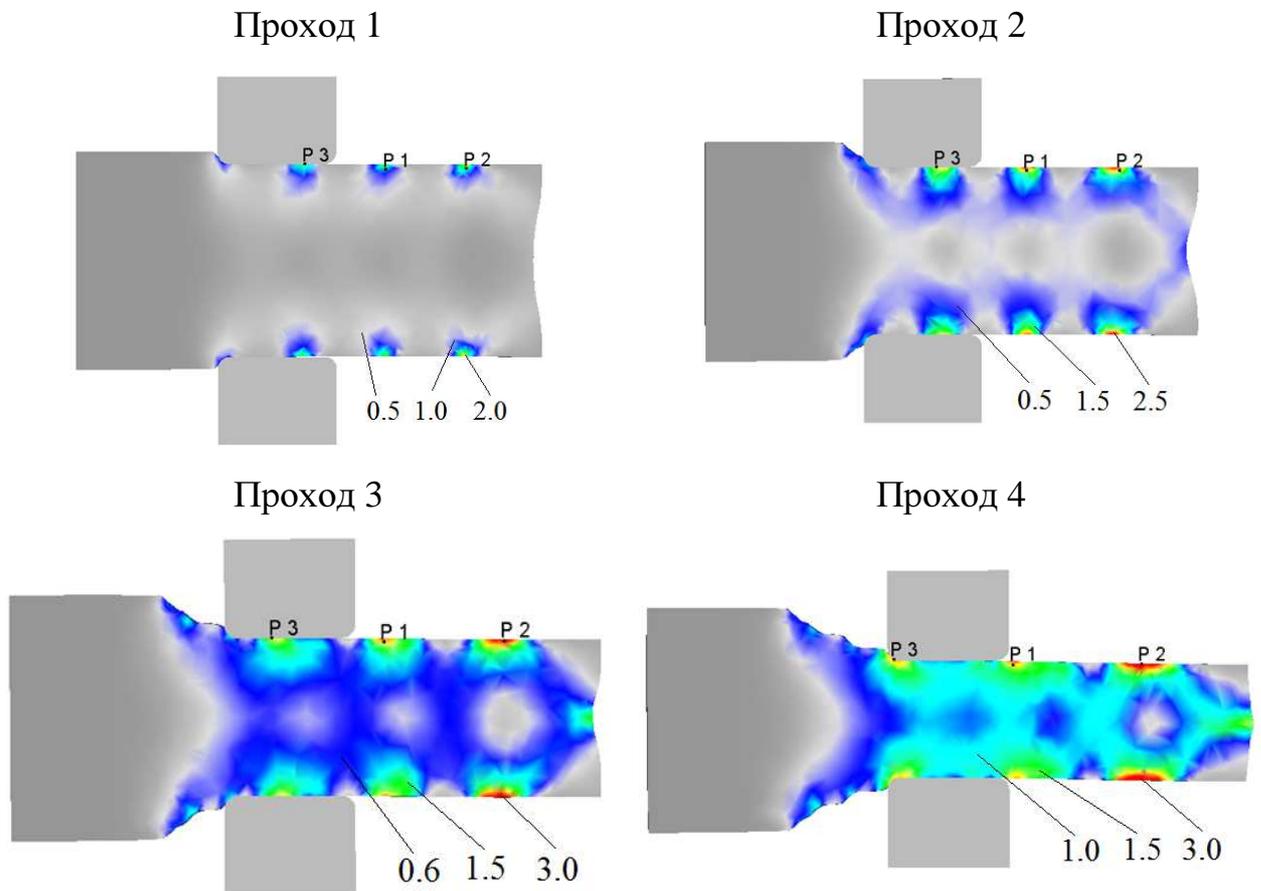


Рисунок 5.41 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в продольном сечении заготовки при протяжке плоскими бойками

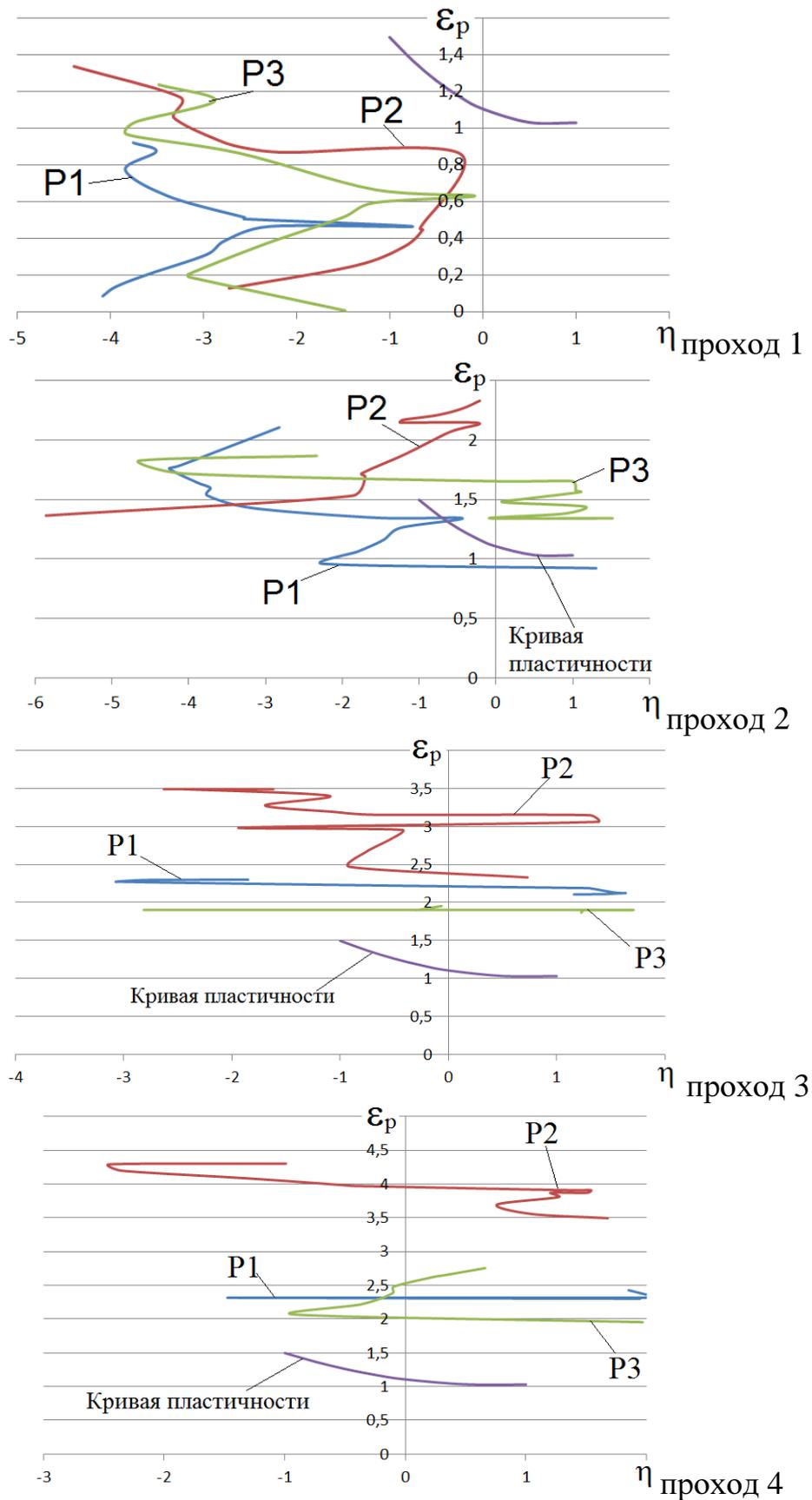


Рисунок 5.42 - Диаграмма пластичности для стали 38ХНМ (температура $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость деформации $8 \cdot 10^{-3}\text{ с}^{-1}$) с нанесенным путем деформирования для различных точек при протяжке плоскими бойками

готовки низкая. Решить данную проблему можно, во-первых введя паузы продолжительностью до 1 мин между проходами при протяжке, во-вторых уменьшив обжатие за один нажим, что в основном и делают на производстве, и в третьих производя протяжку по специальному режиму: нажим бойком, подача на длину большую ширины бойка, нажим и последующая правка предыдущего участка.

Выводы

1. Установлено, что для обеспечения благоприятного напряженно-деформированного состояния заготовки протяжку плоскими бойками рекомендуется проводить на первом этапе, при наличии равномерного температурного поля заготовки с относительной подачей от 0,5 до 1,1 и величиной относительного обжатия, равной 0,1...0,2. После падения температуры поверхности заготовки в процессековки до 1000°С следует осуществлять протяжку с относительной подачей 0,5...1,1 и величиной обжатия 0,1...0,15. При достижении поверхности заготовки температуры 900°С необходимо осуществлять протяжку с относительной подачей от 0,3 до 1,1 с той же величиной обжатия, а при падении температуры поверхности еще на 100°С необходимо уменьшить величину обжатия до 0,05...0,1 при тех же подачах. Рекомендуется при последующем проходе производить протяжку со смещением заготовки на половину ширины бойка, что позволит обеспечить более равномерное распределение интенсивности логарифмических деформаций вдоль оси заготовки.

2. Установлено, что для обеспечения благоприятного деформированного состояния заготовки протяжку комбинированными бойками рекомендуется проводить на первом этапе, т.е. при наличии равномерного температурного поля заготовки с относительной подачей от 0,3 до 0,5 и величиной обжатия равной 0,15...0,25. После падения температуры поверхности заготовки в процессековки до 1000°С следует осуществлять протяжку с относительной подачей 0,5...0,7 и величиной обжатия 0,2...0,25. При достижении поверхности заготовки температуры 900°С необходимо осуществлять протяжку с относительной подачей от 0,7 до 1,1 с той же величиной обжатия, а при падении температуры поверхности еще на 100°С необходимо уменьшить величину обжатия до 0,15...0,2 при тех же подачах.

3. Установлено, что управление температурным полем заготовки при ковке позволяет влиять на напряженно-деформированное состояние заготов-

ки. Так ковка заготовки с неравномерным температурным полем (заготовка с двумя низкотемпературными симметрично расположенными зонами) позволяет при правильной организации процесса повысить уровень сдвиговых деформаций, улучшить напряженно-деформированное состояние центральной части заготовки. Установлено, что заготовка с неравномерным температурным полем после первого обжатия на величину не менее 20% от диаметра заготовки должна быть прогрета до температурыковки.

4. Разработан эффективный режим высокотемпературной термической обработки слитков стали X12MФ, повышающий технологическую пластичность, который включает выдержку при температуре 1200 °С, снижение температуры и выдержку при температуре 1160 °С перед ковкой. Установлены рациональные температурные условияковки слитков стали X12MФ на прессах для плавки с вакуумированием (1160-950 °С) и без вакуумирования (1200-1050 °С). Внедрение технологии высокотемпературной обработки слитков наряду с рациональными температурными условиямиковки в условиях ПАО «Днепроспецсталь» позволило уменьшить количество слитков, передаваемых на промежуточную зачистку с 30 до 13 %.

5. Установлено, что при протяжке заготовок по схеме круг-круг по стандартным заводским режимам на ее торцах образуется утяжина, которая в дальнейшем при ковке трансформируется в зажим. Величина зажима зависит от механического режима протяжки, так с увеличением относительного обжатия и подачи заготовки величина зажима существенно снижается. Таким образом, протяжку необходимо осуществлять с максимально возможными обжатиями и подачами. Предложен способ протяжки, позволяющий получать поковки из коротких заготовок без торцевых зажимов, который заключается в предварительном профилировании короткой заготовки, формировании торцевых выпуклых фланцев и в дальнейшей ковке протяжкой фланцев по стандартным режимам.

6. Установлено, что в процессековки протяжкой существует большая вероятность образования поверхностных трещин, причиной которых является

ся исчерпание ресурса пластичности в местах локализации деформаций. Для протяжки плоскими бойками построен путь деформирования для поверхностных точек заготовки, на основании которого установили, что наиболее опасной с точки зрения образования трещины является зона заготовки, которая находится под бойком во время нажима на переходе между обжатым ранее участком заготовки и обжимаемым участком. Предложено, для прогнозирования трещинообразования в процессахковки, пользоваться методом, учитывающим восстановление пластичности материала во время паузы. Предложены основные рекомендации протяжки, которые позволят снизить вероятность трещинообразования в процессахковки поковок типа валов и плит.

РАЗДЕЛ 6

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОВКИ ПОКОВОК ДИСКОВ

6.1 Управление НДС заготовки варьированием ее формы и формы инструмента

6.1.1 Исследование процесса ковки эксцентриков

Предложен способ изготовления эксцентриков осадкой цилиндрической заготовки плитами со скосом и последующей правкой заготовки плоскими плитами (рис. 6.1) [310-313]. Способ осуществляется следующим образом. Заготовка 1 устанавливается в нижнюю плиту с несимметричным скосом 2 и верхнюю плоскую плиту 3, после чего осуществляется осадка заготовки до высоты H_1 . Далее полуфабрикат с сформировавшимся несимметричным фланцем устанавливается в плоские плиты с отверстием и фланец подсаживается до высоты $H_2 \leq H_1$.

Методом конечных элементов было проведено моделирование процесса изготовления эксцентрика. Исследовалось горячее деформирование (температура начала деформирования $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$) заготовки диаметром 1000 мм из материала сталь 45. Определили влияние угла скоса плиты α на формоизменение заготовки, угол при этом варьировался от 5° до 15° .

По результатам моделирования получены поля распределения деформаций по сечению заготовки в процессе осадки рис. 6.2. Из картин полей распределения деформаций по сечению заготовки при деформировании верхней плоской и нижней плитой со скосом (см. рис. 6.2) видно, что зона максимальных деформаций сосредоточена в центре заготовки. По ходу высадки максимальные деформации, расположенные в центре заготовки достигают значения 2,5 единицы, при использовании нижней плиты со скосом равным 5° , 2,2 единицы при использовании нижней плиты со скосом 10° и 15° . Также видно, что как и при обычной осадке, в верхней части осаживаемой заготовки образуется зона малых деформаций, что связано с подстыванием металла и влиянием трения на поверхностях контакта заготовки и ин-

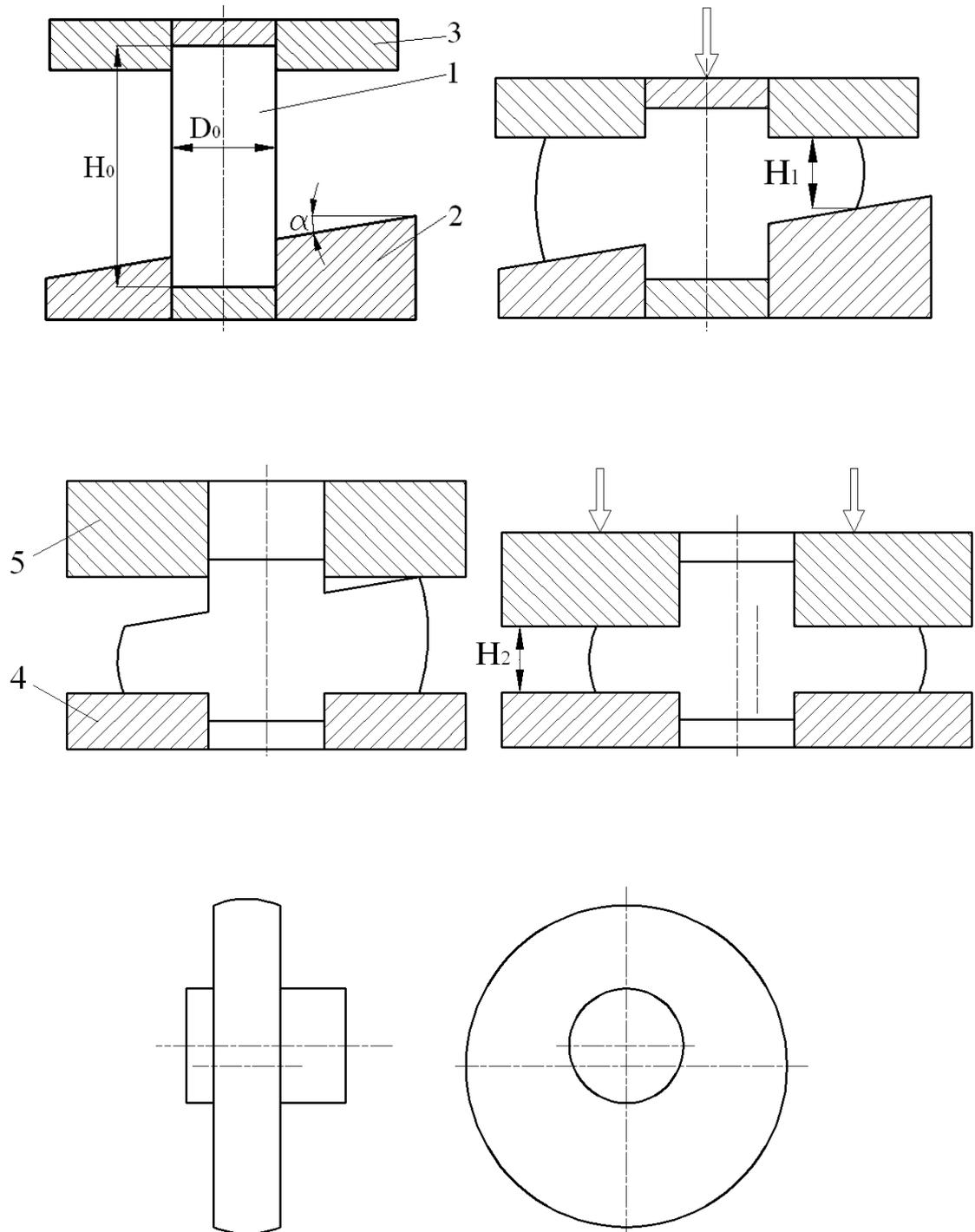


Рисунок 6.1 - Переходы изготовления детали типа эксцентрик

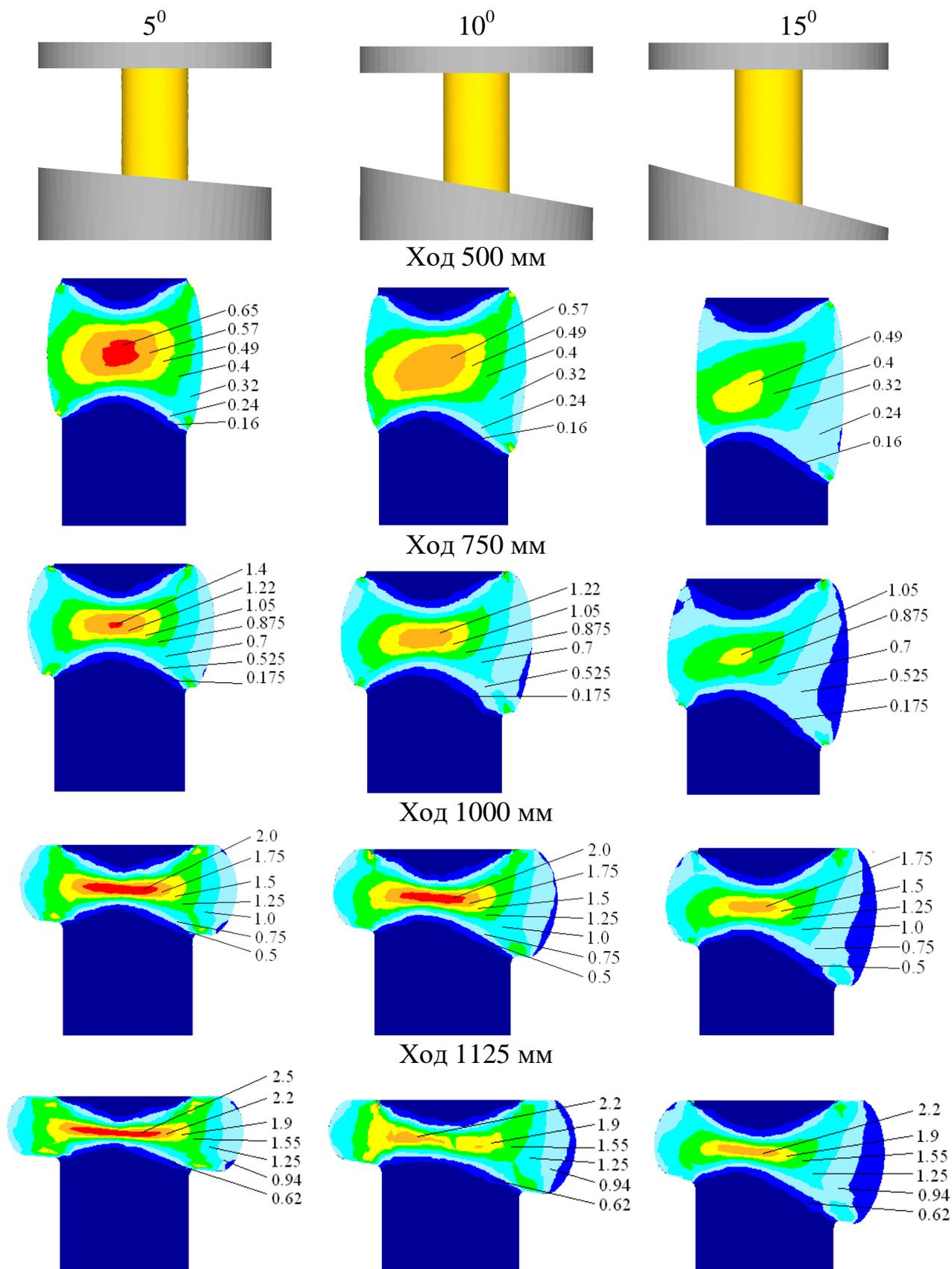


Рисунок 6.2 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций по сечению заготовки в процессе осадки плоской плитой и плитой со скосом

струмента.

Также видно, что с увеличением угла скоса нижней плиты неравномерность деформаций в заготовке уменьшается, что связано с уменьшением максимальной величины деформаций в заготовке. Чем больше величина скоса нижней плиты, тем большая часть металла заготовки при высадке течет в сторону, противоположную подъему угла нижней плиты, что при дальнейшей правке заготовки плоскими плитами (рис. 6.3) способствует получению большего эксцентриситета у изделия.

Проведено моделирование правки полученного полуфабриката плоскими плитами. На рис. 6.3 показаны поля распределения интенсивности логарифмических деформаций по сечению заготовки. Анализ полей распределения деформаций показал, что наибольшие деформации, которые достигают 3 единиц, получаются при правке заготовки, полученной осадкой на плите со скосом в 15° . Зона наибольших деформаций здесь сосредоточена в переходной части заготовки от стержня к фланцу. Видно, что наибольшая неравномерность деформаций во фланце также наблюдается в данной заготовке, средняя часть заготовки здесь наименее проработана.

Наименьшая неравномерность деформаций во фланце наблюдается в заготовке, полученной правкой после осадки плитой со скосом 5° . Здесь наибольшие деформации достигают 2,6 единиц. Однако в данной заготовке наблюдается существенная неравномерность распределения деформаций между фланцем и стержневой частью заготовки, которая практически не деформировалась, что в дальнейшем может привести к разрушениям в данном месте из-за существенной разницы механических свойств в различных частях заготовки.

Анализ формоизменения позволил установить, что наибольший эксцентриситет был достигнут при использовании плиты со скосом 15° и составил 120 мм. Установлено, что с увеличением угла скоса нижней плиты от 5° до 15° эксцентриситет на конечном изделии увеличивается от 30 до 120 мм.

Для получения аналитической зависимости, позволяющей описывать зависимость эксцентриситета конечного изделия от параметров процесса

осадки профилированным инструментом, был применен метод верхней оценки. Разработана математическая модель осадки заготовки верхней плитой со скосом на нижней плоской плите. Схема процесса и годограф скоростей приведены на рис. 6.4.

Проведя математические вычисления, определяем величину приведенного давления. В формуле приведенного давления варьируемым параметром является параметр $\bar{x} = x/H$ (зона раздела течения металла), единственно правильное значение которого определяется, исходя из минимума приведенного давления деформирования. Значение этого параметра будет определять величины выходящих скоростей $W1$ и $W2$, что определит количество металла, вытекшее в одну и другую сторону от оси симметрии заготовки и, как следствие, в случае высадки утолщения на конце стержня и последующей его правки плоскими плитами - эксцентриситет утолщения и стержня.

Проведен анализ процесса осадки плитой со скосом на основе разработанной методом верхней оценки математической модели. Построены графики зависимости приведенного давления осадки от геометрических параметров процесса и от значений коэффициента трения (рис. 6.5). Анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 6.5, позволил установить, что при увеличении угла скоса верхней плиты от 5^0 до 25^0 величина \bar{x} уменьшилась от 0,4 до 0,15, что говорит о том, что при высадке или осадке плитой со скосом большей величины металла больше потечет в направлении, противоположном подъему скоса. Таким образом, можно получить изделие с большим эксцентриситетом, что хорошо согласуется с результатами, полученными моделированием методом конечных элементов. Также установлено, что на величину \bar{x} оказывает влияние и высота осаживаемой заготовки, так при увеличении высоты заготовки $\bar{H1} = H1/H$ от 0,1 до 0,3 величина \bar{x} увеличилась от 0,3 до 0,4, а при увеличении $\bar{H1}$ от 0,4 до 1,0 величина \bar{x} незначительно уменьшилась от 0,35 до 0,3.

Проведено исследование влияния величины степени деформации осадки на эксцентриситет в заготовке (рис. 6.6). Установлено, что в случае осадки в кольцах цилиндрической заготовки с эксцентричным утолщением, величи-

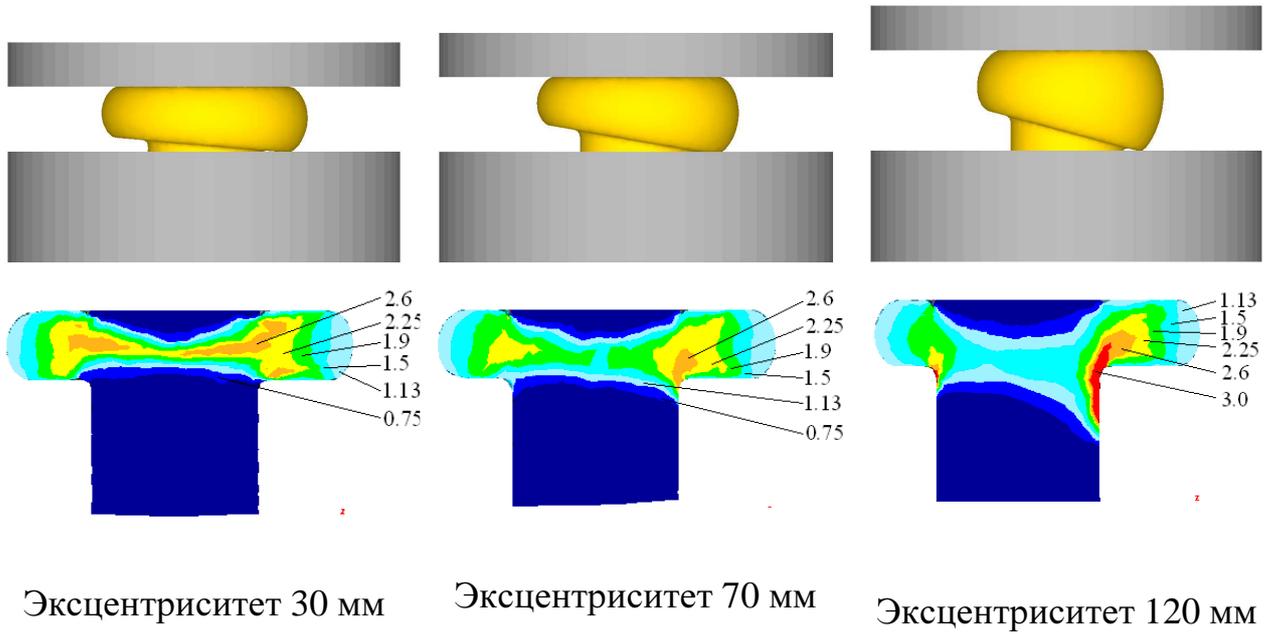


Рисунок 6.3 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций по сечению заготовки в процессе правки плоскими плитами

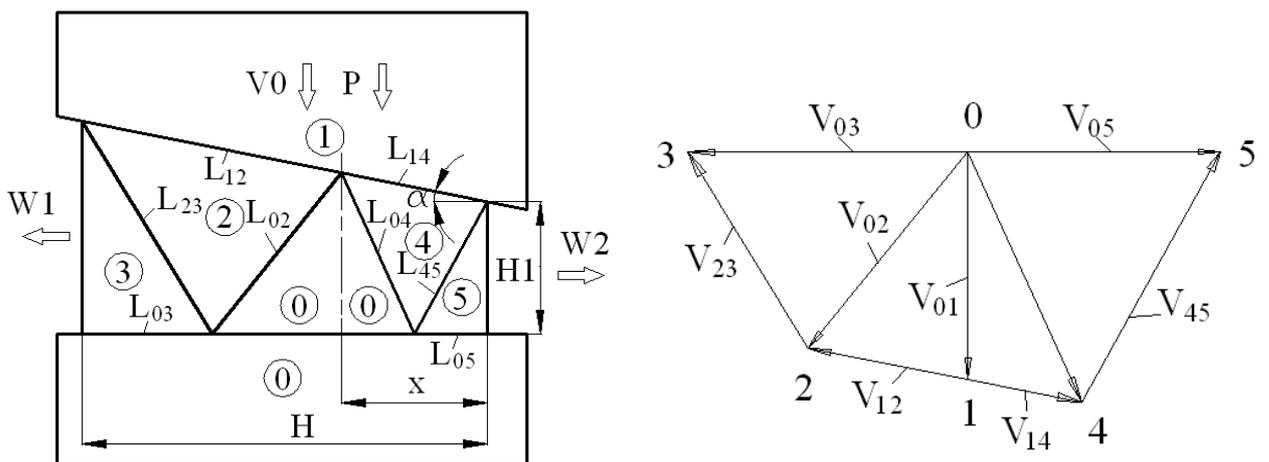


Рисунок 6.4 - Схема процесса осадки плитой со скосом и годограф скоростей для нее

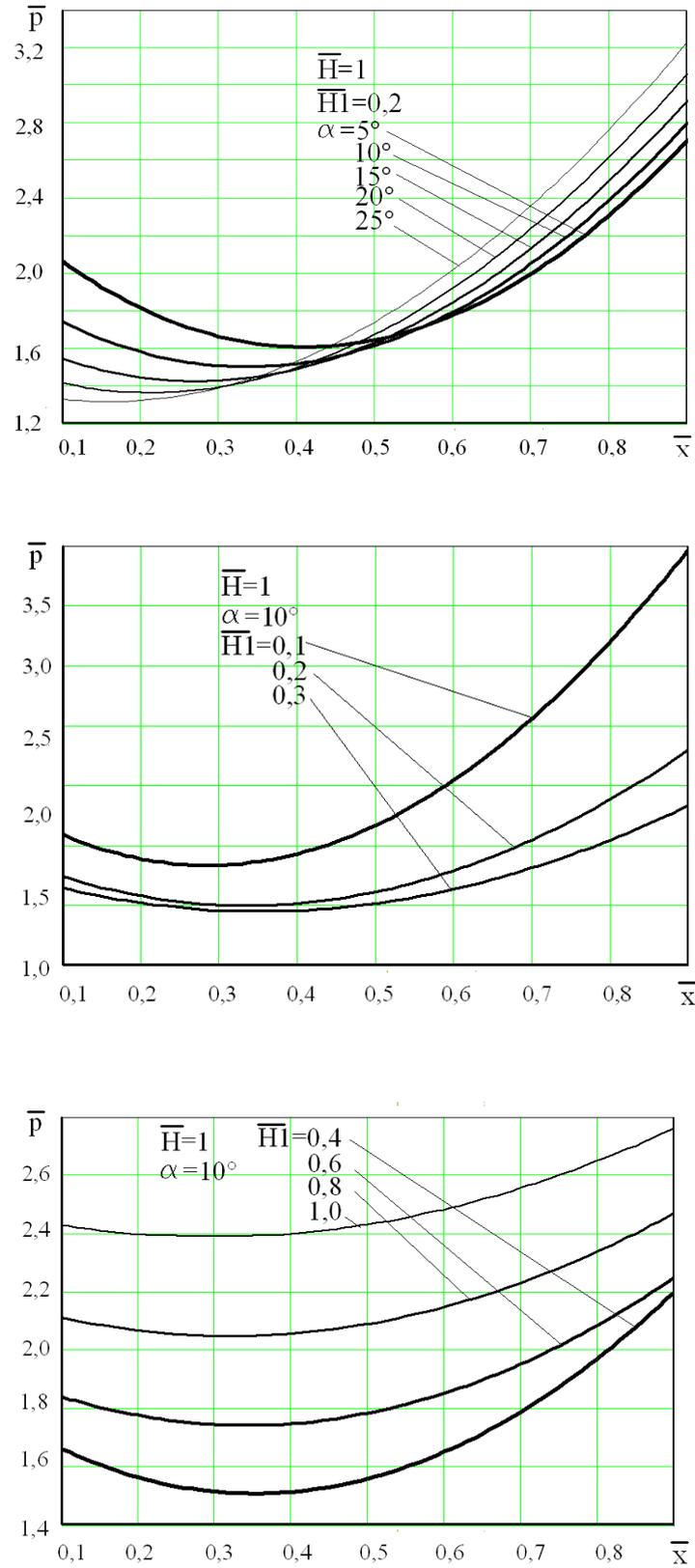


Рисунок 6.5 - Графики зависимости приведенного давления осадки плитой со скосом от геометрических параметров процесса

на эксцентриситета не меняется по ходу деформирования. Это говорит о том, что необходимую величину эксцентриситета на детали, необходимо получать на стадии получения эксцентричного утолщения, а операция осадки в кольцах позволит только лишь уменьшить высоту утолщения и снизить неравномерность распределения деформаций по сечению заготовки.

Установлено, что высадкой плитой со скосом и плоской плитой, возможно, получать несимметричные утолщения, после правки которых плоскими плитами получают изделия типа эксцентриков, причем эксцентриситет тем выше, чем больше угол наклона скоса плиты, которая используется при высадке. Проведены экспериментальные исследования, которые подтверждают теоретические.

6.1.2 Предварительное профилирование заготовок перед осадкой

К способам, позволяющим снизить неравномерность распределения деформаций в поперечном сечении заготовки и уменьшить величину бочкообразности относятся осадка с предварительным деформированием торцов заготовки выпуклой плитой, осадка со смазкой торцов заготовки или с применением специальных прокладок, предварительное профилирование заготовки на вогнутую бочку.

Данные способы имеют определенные недостатки. Так, осадка выпуклой плитой требует специального инструмента, позиционирование и установка заготовки на выпуклой плите затруднительны, после такой осадки на торцах заготовки остаются вогнутости, которые необходимо править плоскими плитами, что требует смены инструмента и вызывает необходимость дополнительного подогрева. Применение смазок при ковке крупных поковок большого развеса малоэффективно.

С точки зрения уменьшения бочкообразности эффективным способом является профилирование заготовки на вогнутую бочку и осадка плоскими плитами. Осадка заготовки с вогнутой боковой поверхностью сопровождается напряжениями сжатия, возникающими на боковой поверхности и в осевой зоне заготовки, которые повышают пластичность металла и способствуют

залечиванию внутренних дефектов. Однако данный способ не позволяет снизить неравномерность распределения деформаций, а наоборот, повышает ее за счет накопления деформаций в средней части заготовки при биллетировке и локализации деформаций в центральной части вогнутой заготовки при осадке. Величина зон затрудненных деформаций здесь наибольшая.

Повысить равномерность распределения деформаций в процессе осадки можно за счет снижения размеров зон затрудненных деформаций. Устранить данную проблему можно биллетировкой заготовки на выпуклую бочку. Недостаток данного способа - это необходимость применения специального кузнечного инструмента сложной геометрии и сложных механических режимов биллетировки.

Перспективным является профилирование торцов слитка перед осадкой [314-318]. Протяжка торцовых частей исходной заготовки, во-первых, позволит проработать часть металла, который в процессе осадки находится в зонах затрудненной деформации, во-вторых, это повлияет на напряженно-деформированное состояние (НДС) в процессе осадки. Локализация деформаций на начальном этапе осадки будет в торцовых зонах, это дополнительно повысит равномерность распределения деформаций, а следовательно, и проработку литой структуры слитка, что исключит анизотропию механических свойств готового изделия.

Профилирование заготовки рациональнее производить универсальным кузнечным инструментом (вырезные или комбинированные бойки). На сегодняшний день неизученным остается влияние геометрии профилированной заготовки на равномерность НДС и формоизменение в процессе осадки.

Для определения параметров НДС заготовки в процессе осадки использован метод конечных элементов. Моделировали осадку заготовки, которая имела форму цилиндра с уступами различной формы (рис. 6.7) плоскими плитами. Диаметр средней части заготовки $D = 1000$ мм, диаметр протянутых уступов заготовки $d = 700, 800$ и 900 мм, длина средней части заготовки $H_1 = 1000, 1500, 2000$ мм. Длина оттянутых уступов заготовки определялась из условия постоянства объемов, исходя из того, что данную заготовку полу-

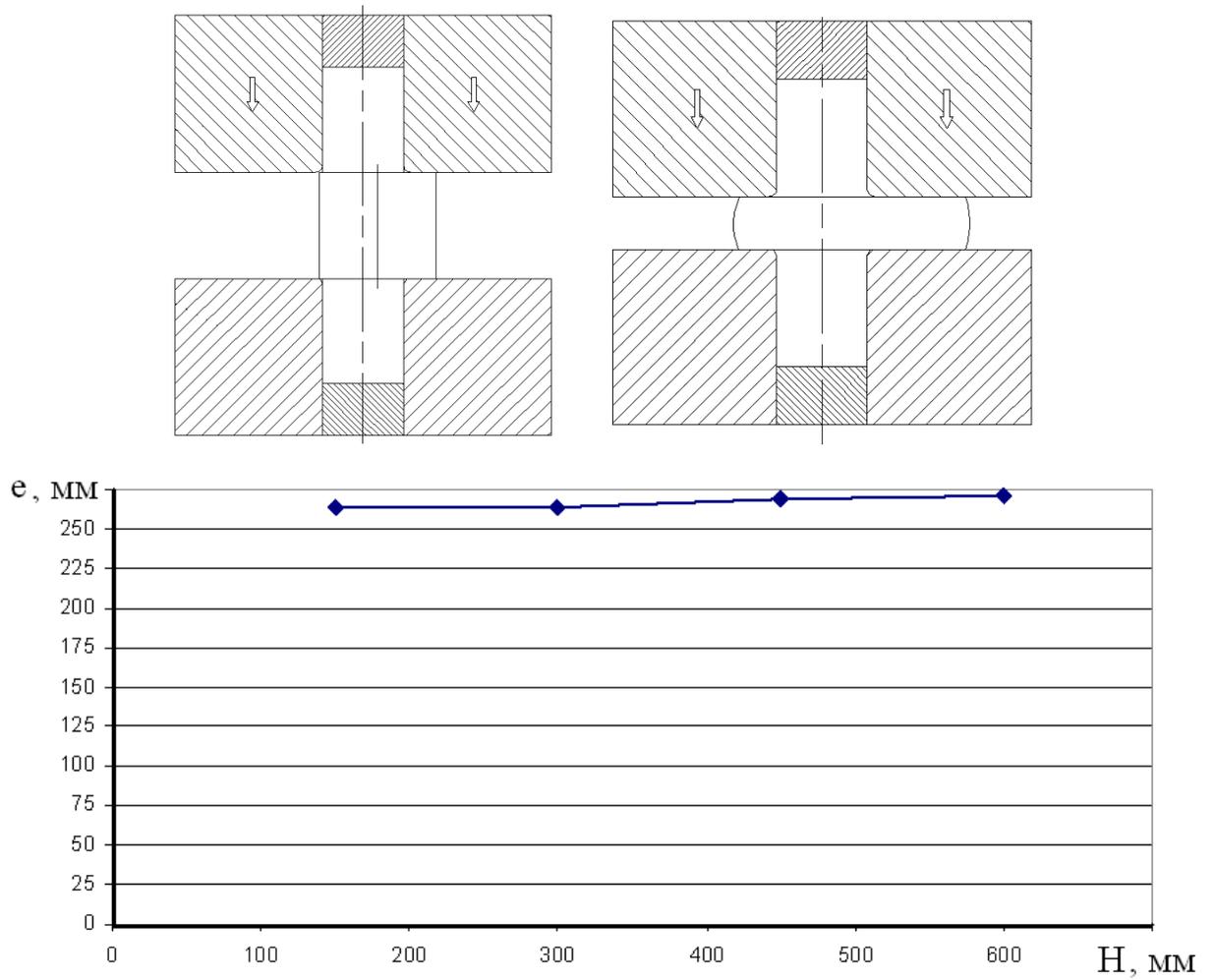


Рисунок 6.6 - Зависимость величины эксцентриситета от хода ползуна прессы при осадке в кольцах

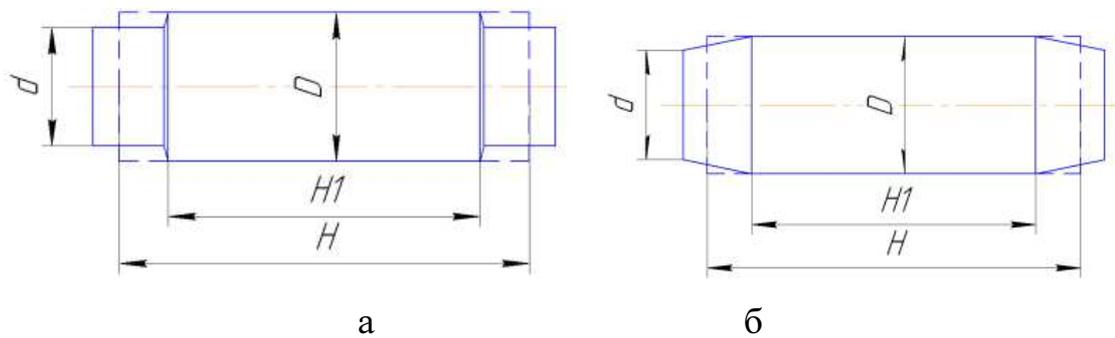


Рисунок 6.7 - Эскизы заготовок с протянутыми уступами а – цилиндрическими, б – конусными

чили протяжкой из цилиндрической заготовки диаметром 1000 мм и длиной $H = 2500$ мм. Материал заготовки нержавеющая сталь 03X16H15M3, начальная температура заготовки 1200°C , температура инструмента 20°C , количество конечных элементов 25000 шт. Коэффициент пластического трения Зибеля на контакте между инструментом и заготовкой 0,35, скорость движения инструмента 28 мм / с. Все заготовки осаживали до высоты 1000 мм.

Моделирование показало, что при осадке заготовки с цилиндрическими уступами (рис. 6.8 а), на начальной стадии интенсивно деформируются только торцы заготовки. В процессе осадки образуется двойная бочка, что вызвано локализацией деформации в торцах заготовки. Двойная бочка, которая образовалась на начальной стадии осадки, свидетельствует о возникновении напряжений сжатия на боковой поверхности заготовки.

Также установлено, что в месте перехода от средней части заготовки к ее уступам, в процессе осадки может произойти образование зажима (см. рис. 6.8 в). Для исключения образования зажима необходимо предусмотреть плавный переход от утолщения к уступам заготовки.

Анализ результатов моделирования (рис. 6.9) позволил установить, что на формоизменение и на деформированное состояние заготовки в процессе осадки, оказывают существенное влияние размеры исходной профилированной заготовки. Так при осадке заготовки с диаметром уступов, равным 700 мм величина деформаций, сосредоточенная на торцах заготовки, значительная. Это объясняется тем, что при уменьшении диаметра протянутых уступов увеличивается степень их осадки, которая должна привести к выравниванию их диаметра до диаметра средней части заготовки. Однако уступы заготовки слишком малого диаметра приведут к образованию резкого перехода от средней цилиндрической части, который впоследствии может трансформироваться в зажим.

Кроме того, уменьшение диаметра уступов заготовки ведет к увеличению длины заготовки, что может привести при осадке к ее изгибу и потере устойчивости. На рисунке 6.9 приведены результаты осадки заготовки высотой 3540 мм. В процессе осадки заготовка потеряла устойчивость, что приве-

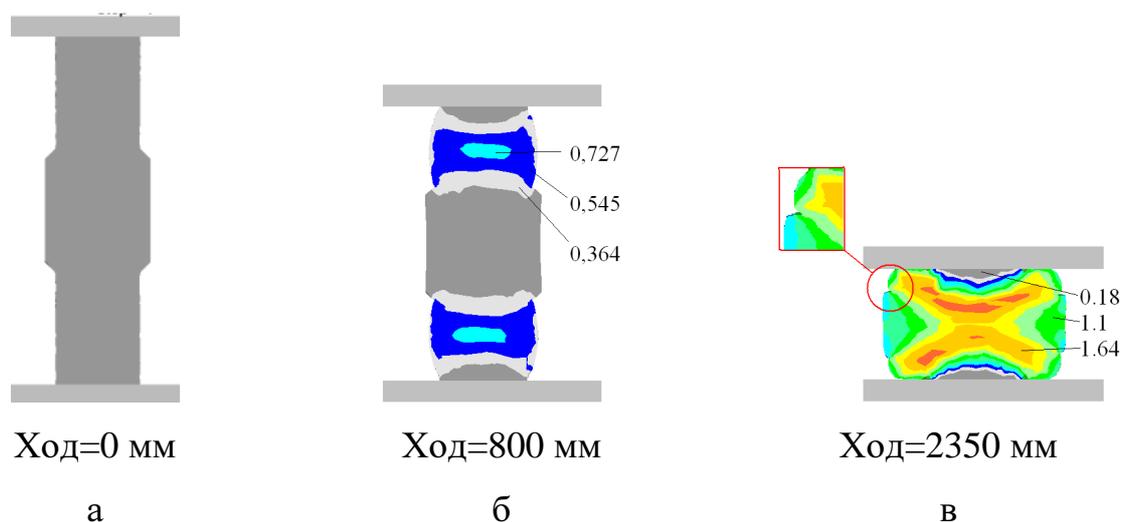


Рисунок 6.8 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в процессе осадки ступенчатой заготовки ($H1/D=1$, $d/D=0.8$)

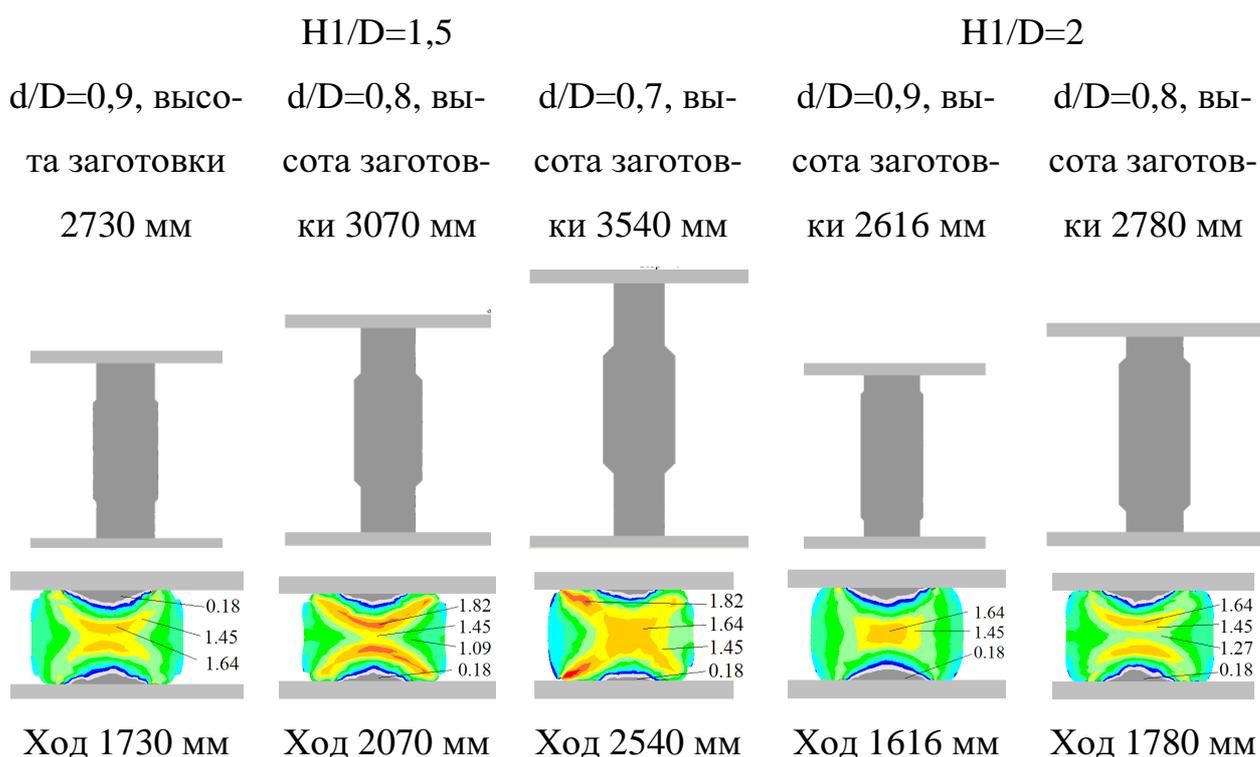


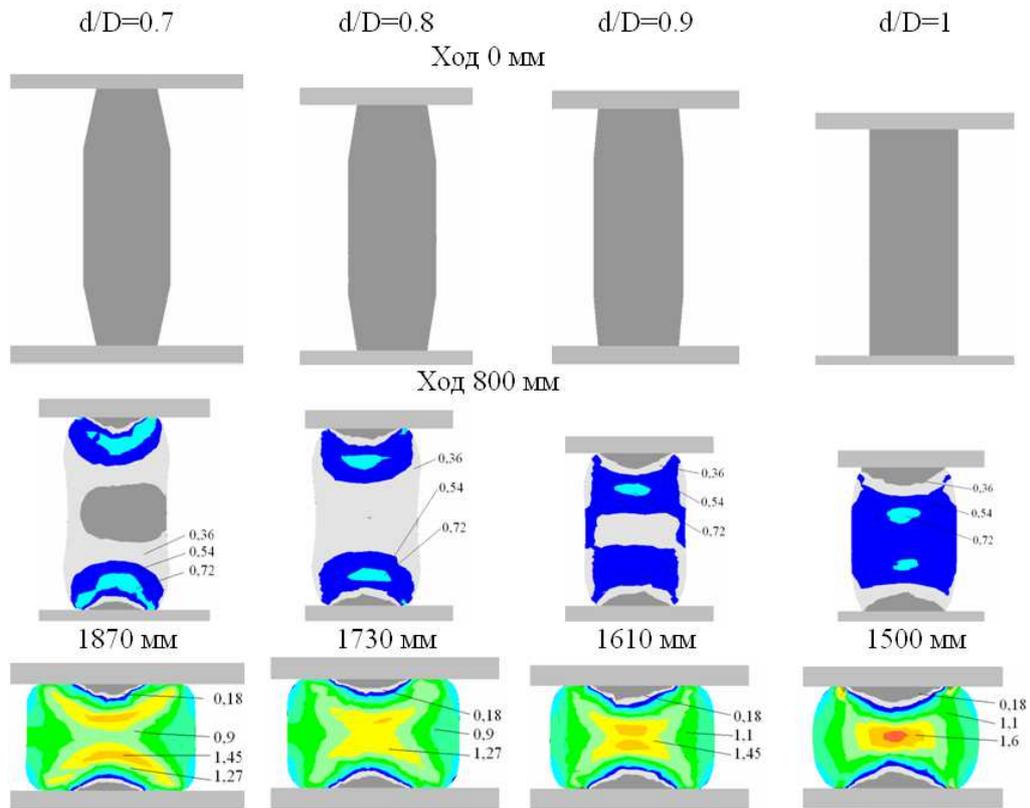
Рисунок 6.9 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в процессе осадки плоскими плитами заготовки с цилиндрическими уступами

ло к несимметричному распределению деформаций в ее продольном сечении. Более того, высокую заготовку сложно установить и удержать в начальный момент деформирования. В связи с этим должна быть определена рациональная величина диаметра оттянутого уступа заготовки. Приближение диаметра уступов к диаметру средней части заготовки будет приближать схему осадки к деформированию цилиндрической заготовки плоскими плитами с сохранением ограничений свойственных данному способу.

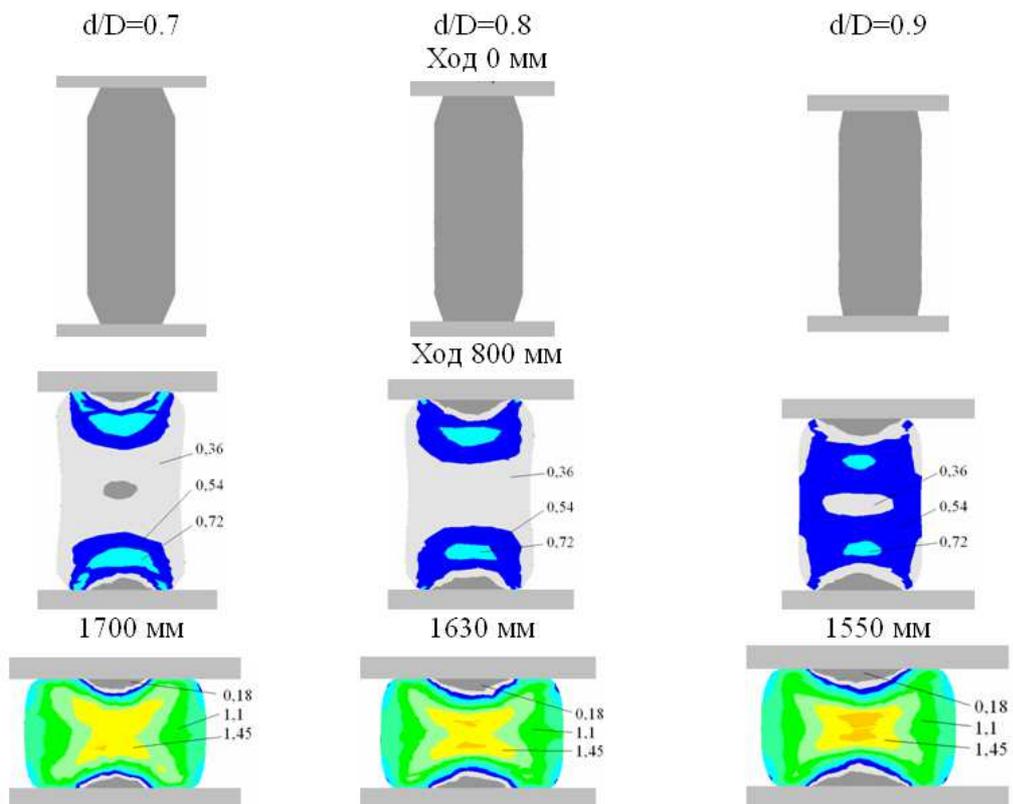
Установлено, что длина протянутых уступов заготовки также влияет на ее деформированное состояние. Чем больше длина протянутого уступа (меньше длина средней части заготовки), тем больше вероятность образования зажима (см. рис. 6.9). С увеличением длины протянутых уступов увеличиваются деформации в центральной части заготовки. Однако на величину зоны затрудненных деформаций этот параметр существенного влияния не оказывает. Результаты исследования показали, что величина зоны затрудненных деформаций обуславливается диаметром протянутых уступов заготовки. Полностью исключить образование зоны затрудненных деформаций в процессе осадки невозможно, однако при протяжке уступов перед осадкой часть металла, которая находится в торцевой зоне заготовки, будет проработана пластической деформацией.

Исключить вероятность образования зажимов в процессе осадки возможно за счет профилирования уступов на конус (см. рис. 6.7 б). МКЭ проведено моделирование осадки цилиндрической заготовки с коническими уступами.

Анализ полей распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки (рис. 6.10) позволил установить, что на первом этапе осадки деформации локализуются в торцах уступов, что вызвано меньшим их диаметром по отношению к средней части заготовки. Такая локализация деформаций приводит к образованию двойной бочки, что при дальнейшей осадке обуславливает появление на боковой поверхности напряжений сжатия. Зона затрудненных деформаций образуется уже на начальном этапе осадки, и размеры ее ограничены начальным диаметром

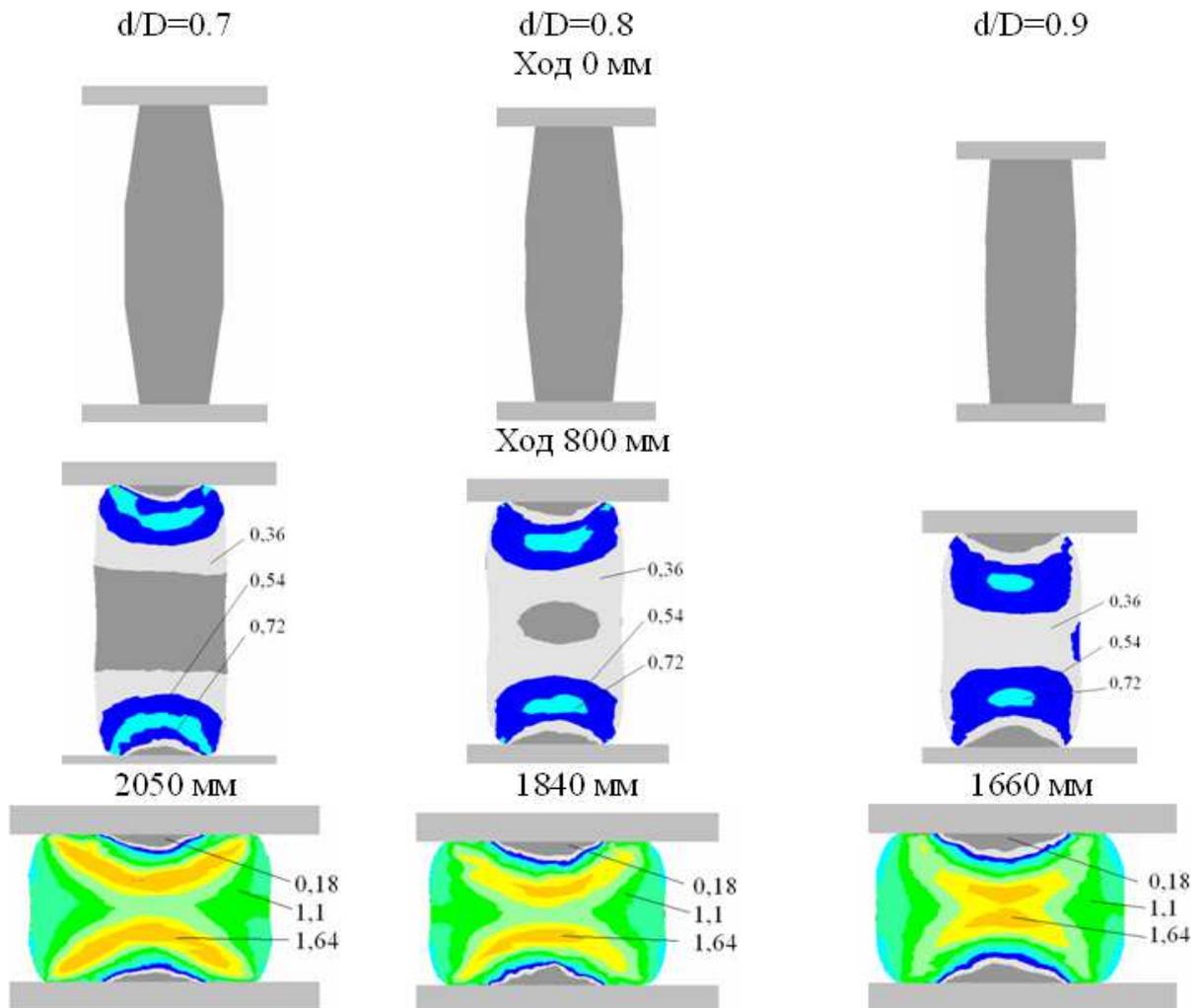


а



б

Рисунок 6.10 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в процессе осадки заготовки с коническими уступами плоскими плитами: а $H_1/D = 1.5$, б – $H_1/D = 2.0$, в – $H_1/D = 1.0$



В

Рисунок 6.10 стр. 2

уступа заготовки. При моделировании процесса осадки заготовки, которые имели одинаковый объем с различными диаметрами уступов и длинами цилиндрической части, осаживались до одинаковой высоты 1000 мм.

Максимальная неравномерность распределения деформаций наблюдается при осадке цилиндрической заготовки (см. рис. 6.10). В этом случае наблюдаются большая зона затрудненных деформаций, которая локализована в центре заготовки. При осадке заготовки с конусными уступами неравномерность деформаций снижается с уменьшением диаметра уступа. Осадка заготовки с относительным диаметром уступа (d / D) равного 0,7 обеспечивает наименьшую неравномерность деформаций, зона затрудненных деформаций занимает минимальный объем в заготовке, а зона наибольших деформаций имеет большую площадь максимальных деформаций, чем в процессе осадки цилиндрической заготовки.

На неравномерность распределения деформаций также оказывает влияние длина конусных уступов заготовки. Так при осадке заготовки с относительной длиной цилиндрической части, равной 2,0 (длина конусных уступов заготовки минимальна), наблюдается наибольшая равномерность распределения деформаций и нет локальных областей больших деформаций. При уменьшении относительной длины цилиндрической части заготовки, а, следовательно, при увеличении длин ее конусных уступов при осадке наблюдается локализация зон больших деформаций, которые находятся между зонами затрудненных деформаций.

Диаметр конусных уступов заготовки и их длина оказывает влияние на ее формоизменение при осадке. В исследуемом диапазоне размеров заготовки было установлено, что чем меньше диаметры конусных уступов заготовки и больше их длина, тем меньше величина бочкообразности (см. рис. 6.10). На первом этапе осадки, как было отмечено ранее, формируется двойная бочка, величина которой тем больше, чем меньше диаметр конусных уступов заготовки. В процессе осадки двойная бочка выравнивается, и боковая поверхность на последней стадии осадки принимает цилиндрическую форму в отличие от выпуклой формы при осадке цилиндрической заготовки.

Для количественного определения влияния размеров осаживаемой заготовки на размеры зоны затрудненных деформаций в процессе осадки определена относительная площадь этой зоны (отношение текущей площади зоны затрудненных деформаций в продольном сечении заготовки - S_{\min} к общей площади продольного сечения – S в процессе осадки).

Для различных материалов величина малых или критических деформаций, которые при рекристаллизации вызывают значительный рост зерна и ухудшают механические свойства доходят до 20%, что соответствует логарифмической деформации, равной 0,18. Эта величина была принята как критерий для определения площади зоны затрудненных деформаций.

На рис. 6.11 приведены графические зависимости относительной площади зоны затрудненных деформаций, которые образуются в процессе осадки заготовок с различными геометрическими параметрами.

Анализ полученных результатов (см. рис. 6.11) показал, что наибольший объем зоны затрудненных деформаций возникает при осадке цилиндрических заготовок (относительная площадь зоны затрудненных деформаций составляет 0,10 ... 0,14). С увеличением степени осадки она незначительно снижается. При осадке заготовки с относительным диаметром конусных уступов, равным 0,9, величина зоны затрудненных деформаций снижается и находится в пределах 0,07...0,09 от площади продольного сечения. Для заготовки с относительным диаметром уступов равным 0,8 данная зона занимает 0,04...0,06, с относительным диаметром концов уступов 0,7 - 0,02...0,04 от площади продольного сечения заготовки.

Установлено, что в процессе осадки (степень деформации по высоте $\varepsilon_h = 0,2...0,65$), относительная площадь зоны затрудненных деформаций практически не изменяется, длина уступов заготовки также не оказывает значительного влияния на ее величину. Образование бочки в процессе осадки может привести к появлению трещин на боковой поверхности заготовки в процессе осадки от действия растягивающих напряжений. Поэтому исследование новых способов осадки без определения уровня растягивающих напряжений будет неполным. Для этого дополнительно проведено исследо-

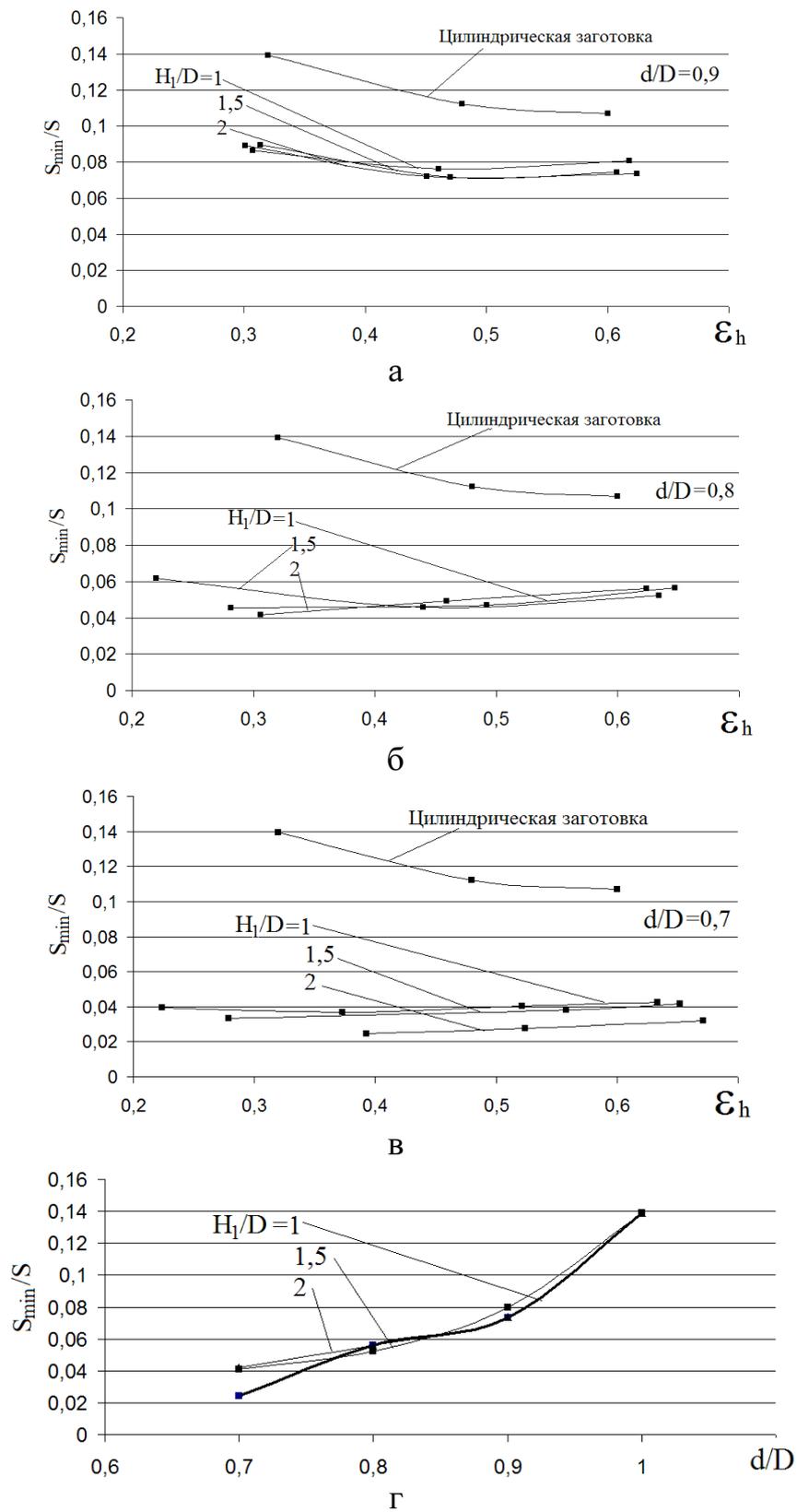


Рисунок 6.11 - Относительная площадь зоны затрудненных деформаций в поперечном сечении заготовки в зависимости от относительной степени осадки (а, б, в) и диаметра конического уступа (г) после осадки до высоты 1000 мм

вание напряженного состояния заготовки в процессе осадки. В результате исследований определили величину и знак напряжений на боковой поверхности заготовки. Для комплексной оценки напряженного состояния в процессе осадки рассчитывали показатель жесткости схемы напряженного состояния в средней части боковой поверхности заготовки η .

Графические зависимости показателя жесткости схемы напряженного состояния в зависимости от относительной степени осадки $\varepsilon_h = \Delta h / H_0$ (Δh - обжатие заготовки, мм, H_0 - начальная высота заготовки, мм) для заготовок с различными геометрическими параметрами приведены на рисунке 6.12. Установлено, что в процессе осадки цилиндрической заготовки показатель η имеет наибольшие значения из всех рассматриваемых вариантов, что указывает на наихудшие условия деформирования (рис. 6.12).

При увеличении степени осадки от 0,15 до 0,45 показатель η возрастает от -1 до 0, при дальнейшее осадке до 0,6 он возрастает до +1. Было определено, что с уменьшением относительного диаметра конусных уступов заготовки, показатель η в процессе осадки уменьшается. Так для осадки заготовки с относительным диаметром конусных уступов равным 0,9 показатель η изменяется от -1,25 до +0,7 при относительной степени осадки 0,15...0,6. Для заготовок с относительным диаметром уступов 0,8 и 0,7 данный показатель примерно одинаков и изменяется в пределах -1,25 .. +0,25 при относительной степени осадки от 0,15 до 0,65. Также установлено, что с увеличением длины конусных уступов заготовки показатель η незначительно снижается.

Для проверки достоверности результатов теоретического исследования проведено экспериментальное исследование процесса осадки цилиндрических заготовок с уступами конической формы. Заготовка изготавливалась из свинца, деформирование которого, при комнатной температуре моделирует деформирование среднеуглеродистой стали в горячем состоянии. Диаметр цилиндрической части заготовки $D = 28$ мм, диаметр конических уступов $d = 19$ мм, длина цилиндрической части заготовки принималась равной $H_1 = 28, 42, 56$ мм. Предполагалось, что уступы получались протяжкой кон-

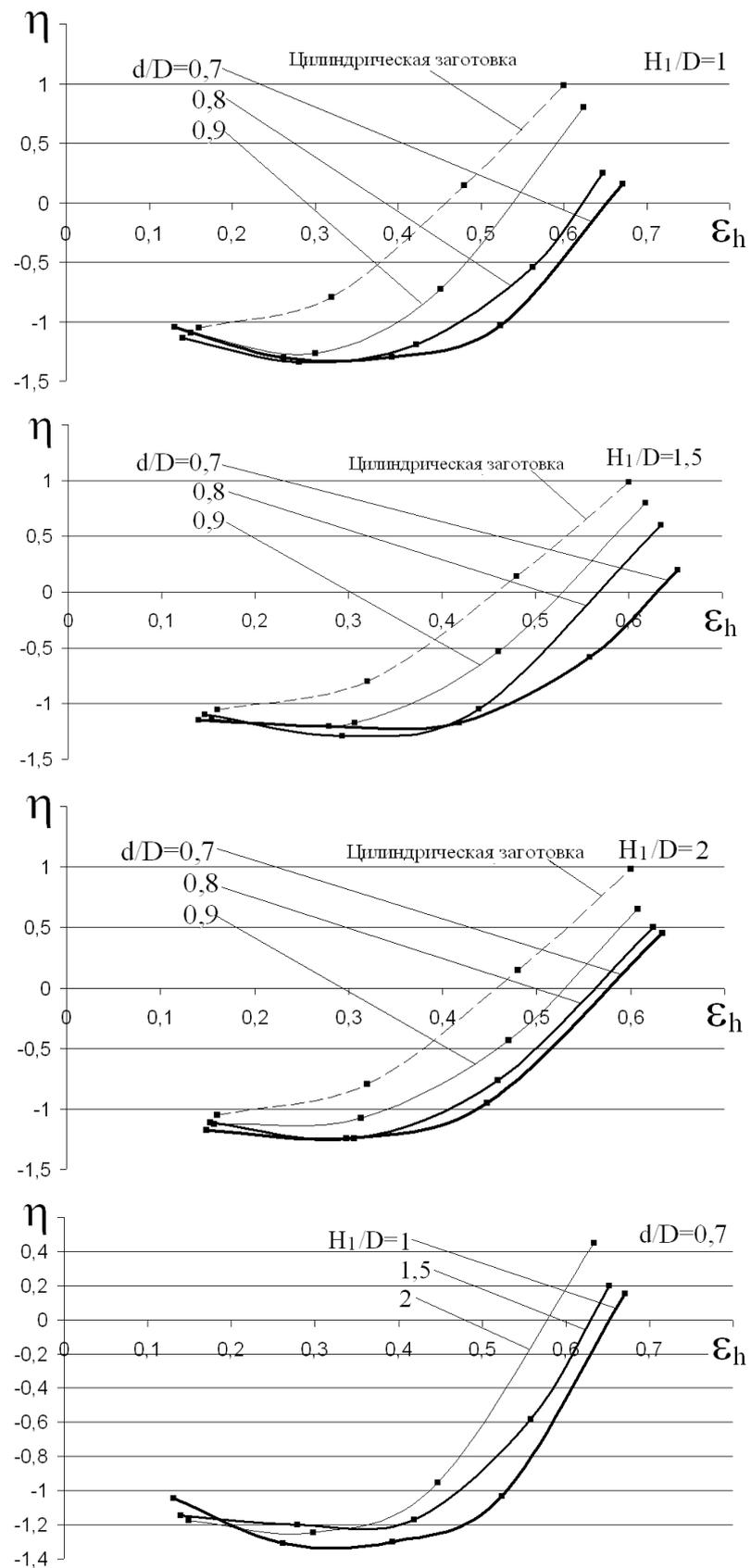


Рисунок 6.12 - Изменение показателя жесткости схемы напряженного состояния на боковой поверхности заготовки в зависимости от степени осадки заготовок с различными геометрическими параметрами

цов заготовки высота и диаметр, которой равны 70 и 28 мм соответственно. Длины профилированных заготовок получились равными 83, 77 и 72 мм (рис. 6.13 а).

В процессе осадки заготовок наблюдалась потеря их устойчивости (см. рис. 6.13 б), что связано со значительной их высотой (отношение высоты заготовки к наибольшему ее диаметру более 2,5). Таким образом, можно сделать вывод, что профилирование заготовок перед осадкой должно выполняться при ковке слитков, которые имеют соотношение высоты к диаметру меньше 2,5. С целью проверки возможности осадки профилированных заготовок без изгиба были изготовлены более низкие заготовки. Длина цилиндрической части заготовок $H_1 = 14, 27$ и 40 мм, общая длина $69, 64$ и 59 мм, $D = 28$ мм, $d = 19$ мм. Параметры данных заготовок соответствуют получению их из цилиндрической заготовки с соотношением высоты к диаметру 2,0 (рис. 6.14 а).

Экспериментально установлено, что изгиб заготовки в процессе осадки не происходит. Также установлено, что величина бочкообразности в заготовках, полученных осадкой профилированных заготовок, меньше, чем в случае осадки цилиндрической заготовки. В процессе осадки на боковой поверхности заготовки образуется вогнутость (см. рис. 6.14 б), что свидетельствует о наличии сжимающих напряжений в этой части заготовки.

После осадки заготовки до высоты 30 мм установлено, что ее боковая поверхность имеет меньшую бочкообразность чем при осадке цилиндрической заготовки.

Для подтверждения правильности полученных рекомендаций, необходимо определить влияние схемыковки на структуру металла поковки. Проведено исследование эволюции микроструктуры в заготовке в процессе осадки по предлагаемой схеме с предварительным профилированием. Получены поля распределения размера зерна в объеме заготовок (см. рис. 3.15), откованных по новой схеме с промежуточным профилированием и по традиционной схеме. На основании анализа полученных данных установлено, что новая схемаковки имеет значительное преимущество по отношению к тра-

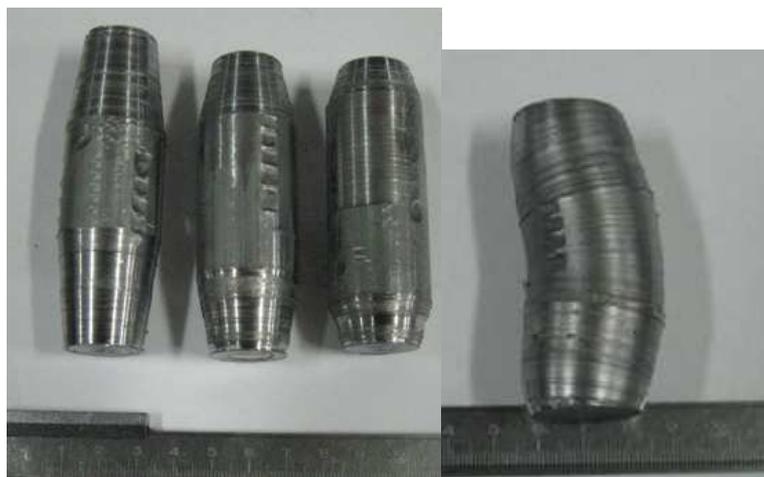
диционной, которое выражается в значительно уменьшенной зоне затрудненных деформаций и неравномерности распределения размера зерна в объеме поковки.

6.1.3 Ковка дисков с выворотом коническим инструментом

Повысить равномерность распределения деформаций при неизменном ударе и обеспечить проработку дендритной структуры литого металла, возможно при обеспечении возникновения в заготовке больших деформаций. В поковках типа дисков этот эффект можно обеспечить за счет знакопеременного выворота осажженной заготовки. Для этого необходимо применение инструмента, у которого верхняя плита выпуклая, а нижняя вогнутая. Знакопеременный изгиб повысит значения деформаций и равномерность их распределения. Прием выворота целесообразнее производить при пониженной температуре для уменьшения роста деформированных зерен и уменьшения окисления. Это легко можно обеспечить после основной осадки.

С применением программы QForm 2D проведено моделирование осадки цилиндрической заготовки высотой 1200 мм и диаметром 600 мм из материала сталь 45, нагретого до 1200 °С. Трение задавалось константой поверхности по Леванову равной 0,8. Осадка производилась до высоты 250 мм со скоростью 10 мм/с. Полученные результаты представлены на рис. 6.15. Из полей распределения логарифмических деформаций по сечению заготовки видно, что самая меньшая степень деформаций находится на торцах заготовки, что обусловлено охлаждением металла в этих местах и большим (практически предельным) коэффициентом трения.

После осадки плоскими плитами заготовку укладывают на нижнюю вогнутую конусную плиту и выворачивают ее верхней выпуклой конусной плитой (рис. 6.16 б). После того как заготовку вывернули ее переворачивают и выворачивают в обратную сторону (см. рис. 6.16 в) [319-320]. Последовательность повторяется несколько раз до накопления необходимой степени деформации. После того как металл заготовки проработан, ее правят плоскими плитами (см. рис. 6.16 г).



а

б

Рисунок 6.13 - Исходные заготовки (а) с конусными уступами и искривленной заготовки после осадки (б)



а

б

Рисунок 6.14 - Исходные заготовки (а) с конусными уступами и формоизменение заготовки в процессе осадки (б)

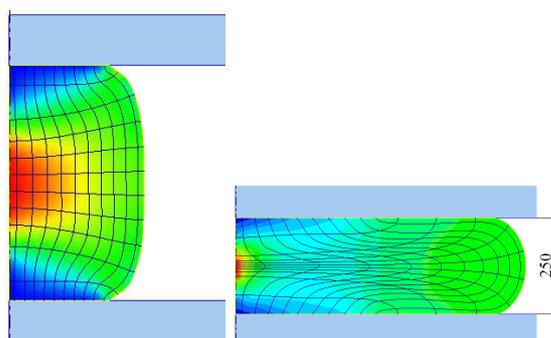


Рисунок 6.15 - Искажение координатной сетки по сечению заготовки в процессе осадки плоскими плитами

При ковке таким способом осаженная заготовка, не изменяя свои размеры, накапливает значительные степени деформации, что обуславливает хорошую проработку металла и, как следствие, повышение механических характеристик изделий. Полная последовательность осадки плоскими и конусными плитами и поля распределения деформаций по сечению заготовки при этом приведены на рис. 6.16.

По результатам моделирования построены графики распределения логарифмической деформации по сечению заготовки для двух способов осадки. Из распределения логарифмических деформаций по сечению заготовки при осадке плоскими плитами, видно, что наибольшей проработке подвергается центральный слой заготовки (рис. 6.17). Здесь логарифмические деформации колеблются от 2,2 единиц до 0,6, причем кривая распределения этих деформаций вдоль радиуса заготовки носит параболический характер.

Вершина кривой соответствует минимальным деформациям, которые находятся на расстоянии $1/3$ радиуса от осевой линии. Величина этих деформаций находится в районе 0,6 единиц. Наибольшие деформации находятся в центре заготовки и на ее периферии, здесь они достигают соответственно 2 и 1,1 единицы. Наименее проработанными остаются слои заготовки вблизи инструмента. Здесь деформации колеблются практически от 0 возле оси заготовки и до 1,1 на периферии заготовки. Причем кривая распределения деформаций по радиусу заготовки характеризуется постоянным ростом от центра к периферии.

Из распределения логарифмических деформаций по сечению заготовки при последовательной осадке плоскими и коническими плитами видно, что наибольшей проработке, как и в предыдущей схеме, подвергается центральный слой заготовки. Однако деформации здесь колеблются от 2,2 до 0,9. Нижний предел на 30% выше, нежели в предыдущем способе, и кривая, описывающая распределение деформаций по радиусу заготовки, имеет менее выраженный прогиб, что говорит о меньшей неравномерности деформаций.

Наружные слои металла заготовки хотя и получают меньшие деформации, нежели центральные, но накопленная степень деформации в них выше,

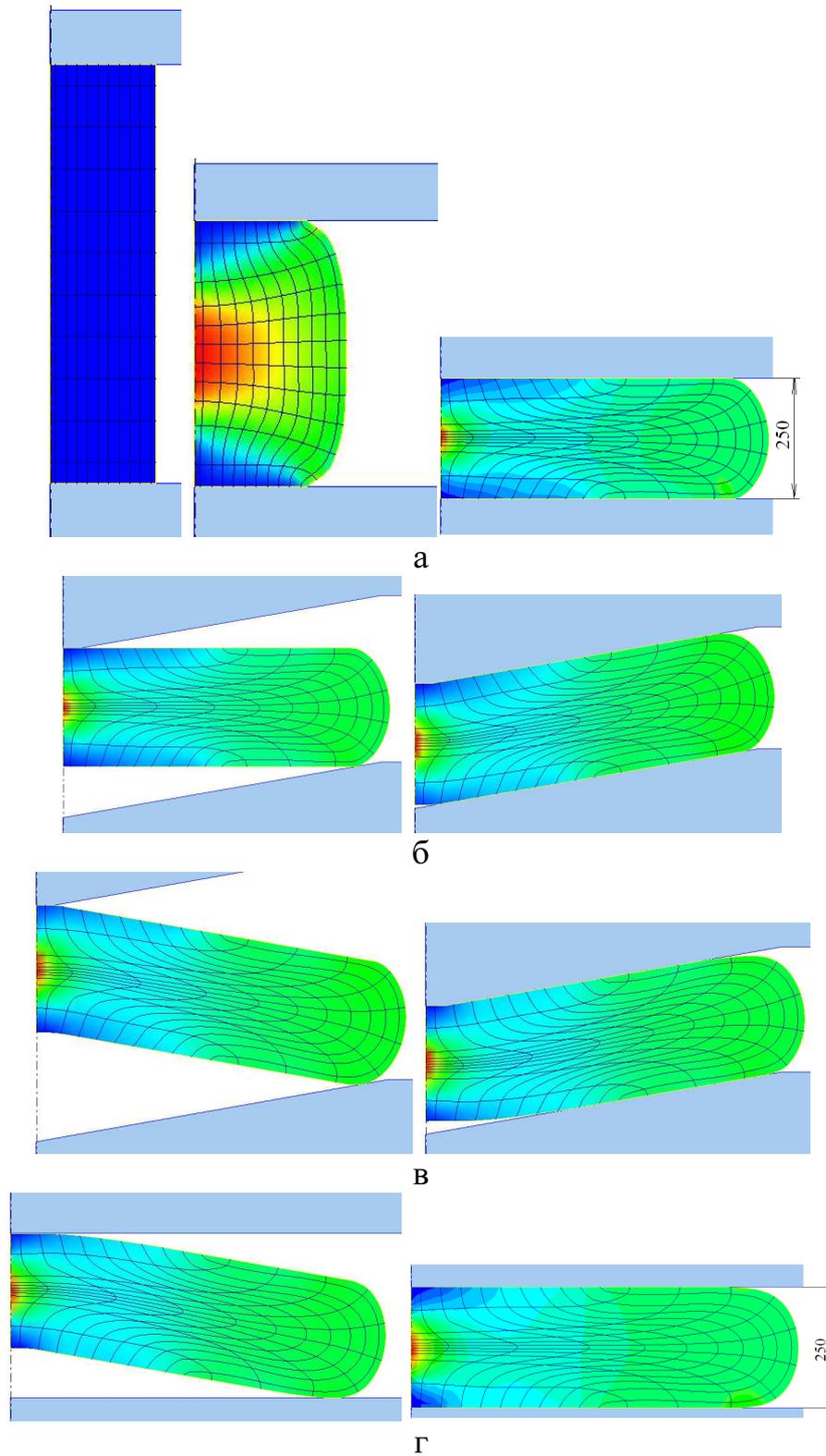


Рисунок 6.16 - Поля распределения логарифмических деформаций по сечению заготовки в процессе последовательной осадки плоскими и конусными плитами (а – осадка плоскими плитами, б – укладка заготовки на конусную плиту и осадка конусом, в – выворот заготовки конусом в обратную сторону, г – правка заготовки плоскими плитами)

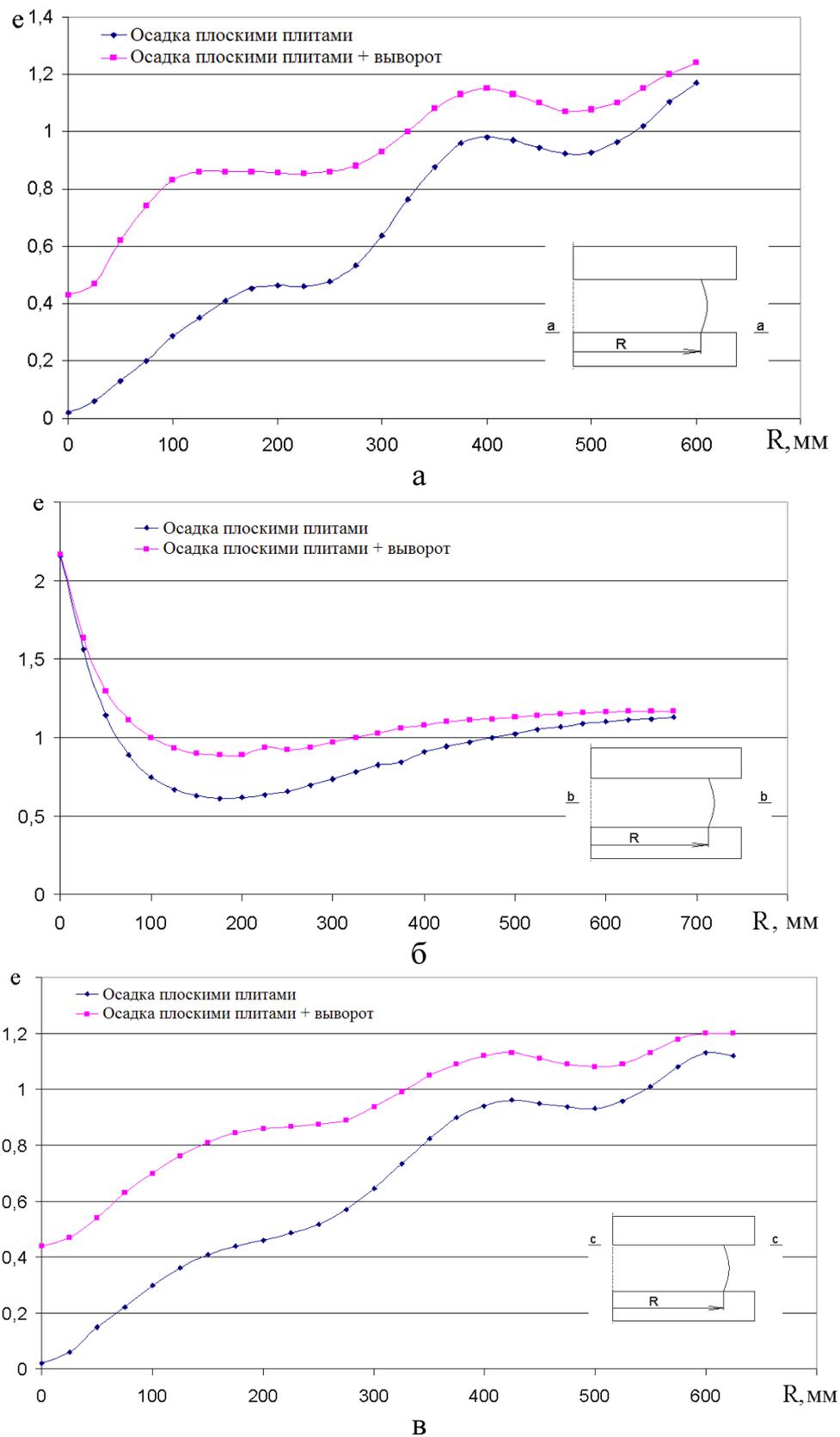


Рисунок 6.17 - Распределение логарифмической деформации по сечению заготовки (а - по сечению а-а возле нижней плиты, б – по центру заготовки б-б и в - по сечению с-с возле верхней плиты) для осадки плоскими плитами и конусными плитами

чем в базовом способе. Повышение составляет от 0,4 до 0,1 единицы.

Более всего при использовании данного способа деформацию накапливает металл, находящийся в поверхностных слоях на расстоянии от осевой линии от 0 до 0,75 радиуса заготовки, что позволяет рекомендовать данный способ для использования при ковке деталей типа дисков с повышенными требованиями, предъявляемыми к механическим характеристикам поверхностных слоев металла возле оси детали. Металл, находящийся на периферии заготовки, существенно не накапливает деформацию. Также стоит отметить то, что накапливать степень деформации, возможно и до больших величин, применяя большее количество выворотов заготовки.

6.2. Управление НДС заготовки регулированием кинематики ее деформирования

6.2.1 Профилирование заготовки разгонкой

Несмотря на эффективность осадки профилированной заготовки с коническими уступами на уменьшение неравномерности распределения деформаций, наиболее эффективным способом получения заготовки, приближенной к правильной цилиндрической форме, является осадка заготовки с вогнутой боковой поверхностью.

В процессе осадки проработка торцов возможна вследствие локализации очага деформации в их зоне. Кроме того если очаг деформации будет локализован у торцов заготовки, то в процессе осадки боковая поверхность будет иметь вогнутую форму. Такая локализация очага деформации возможна в процессе осадки узким бойком (разгонки). Предложен способ ковки поковок типа дисков осадкой, который заключается в последовательной разгонке обоих торцов заготовки и последующей осадке плоскими плитами (рис. 6.18) [321]. Разгонка в основном применяется в производстве с целью уменьшения силы осадки заготовки больших размеров из-за недостаточной мощности оборудования. Уменьшение площади контакта инструмента и заготовки приводит и к локализации очага деформации у поверхности контакта.

Рекомендации по размерам заготовки с вогнутой боковой поверхно-

стью перед осадкой, для получения минимальной бочкообразности приведены в работе В.А. Тюрина [46]. Необходимо определить режимы процесса разгонки для получения заготовок соответствующих размеров.

МКС проведен анализ осадки цилиндрической заготовки узким бойком, причем осадка производилась в несколько этапов вращением бойка относительно оси заготовки на определенный угол, обеспечивающий перекрытие бойком недеформированной части торца заготовки. Диаметр исходной заготовки $D = 500$ мм, высота $H = 250, 500, 750$ мм. Материал заготовки - сталь 45, начальная температура заготовки 1100 °С, температура инструмента 20 °С, количество конечных элементов на которые разбивался объем заготовки 100000. Коэффициент пластического трения Зибеля на контакте между инструментом и заготовкой 0,35, скорость движения инструмента 20 мм/с. В процессе профилирования заготовки использовался плоский узкий боек шириной $X=100, 150, 200$ мм.

В качестве основных факторов, которые влияют на формоизменение в процессе разгонки, для исследования были выбраны относительная высота заготовки H/D , ширина бойка X и относительная степень внедрения бойка в заготовку $\varepsilon_h = \Delta h/H$. С целью получения математической модели в параметрическом виде проведен регрессионный анализ данных, полученных в результате численного моделирования методом конечных элементов.

Моделирование проводилось по разработанному плану экспериментов. В таблице 6.1-6.2 приведены факторы варьирования, их уровни и матрица планирования. Откликом были приняты четыре параметра: $D'/D1$, $D1/Dcp$, $\bar{hx} = hx/h$, $a=(D1-Dcp)/2h$.

Общий вид уравнения регрессии (см. 2.1). Переход от условных параметров к натуральным производится по следующим зависимостям:

$$x_1 = \frac{\bar{X} - 0,3}{0,1}, \quad x_2 = \frac{H/D - 1}{0,5}, \quad x_3 = \frac{\varepsilon_h - 0,1}{0,05}.$$

В результате обработки полученных данных получены коэффициенты уравнения регрессии. В таблице 6.3 приведены коэффициенты для уравнения

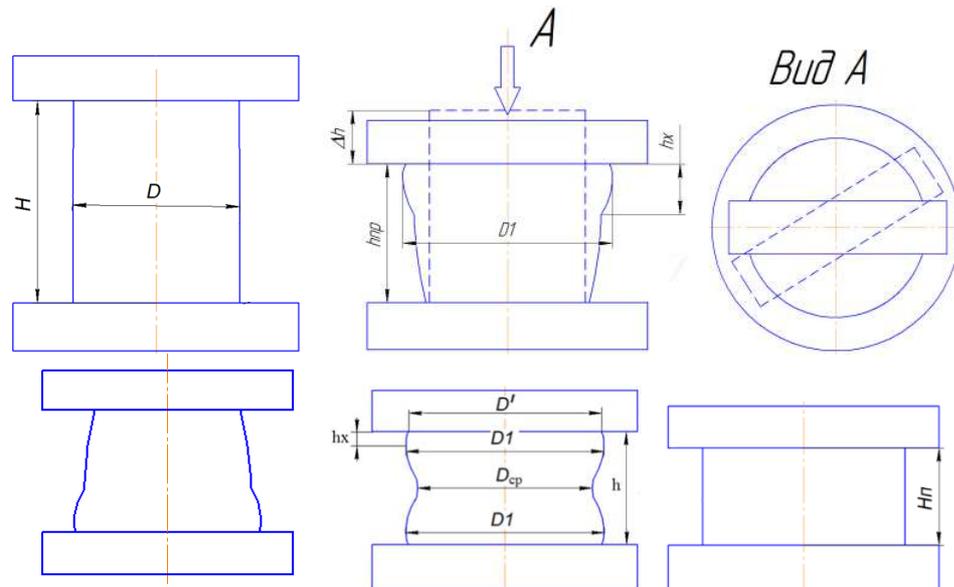


Рисунок 6.18 - Схема осадки цилиндрической заготовки с предварительным профилированием разгонкой узким бойком

Таблица 6.1 - Уровни варьирования факторов

| Интервал варьирования и уровни факторов | H / D | $\bar{X} = X / D$ | ε_h |
|---|---------|-------------------|-----------------|
| Основной уровень $X_{i0}=0$ | 1,0 | 0,3 | 0,1 |
| Интервал варьирования ΔX_i | 0,5 | 0,1 | 0,05 |
| Верхний уровень $x_i= +1$ | 1,5 | 0,4 | 0,15 |
| Нижний уровень $x_i= -1$ | 0,5 | 0,2 | 0,05 |
| Кодовое обозначение | X_1 | X_2 | X_3 |

Таблица 6.2 - Расширенная матрица планирования эксперимента

| N | Код | | | y_{ug} |
|----|-------|-------|-------|----------|
| | x_1 | x_2 | x_3 | |
| 1 | +1 | +1 | 0 | 1,081 |
| 2 | + | -1 | 0 | 1,023 |
| 3 | -1 | +1 | 0 | 1,231 |
| 4 | -1 | -1 | 0 | 1,04 |
| 5 | +1 | 0 | +1 | 1,055 |
| 6 | +1 | 0 | -1 | 1,053 |
| 7 | -1 | 0 | +1 | 1,189 |
| 8 | -1 | 0 | -1 | 1,071 |
| 9 | 0 | +1 | +1 | 1,167 |
| 10 | 0 | +1 | -1 | 1,083 |
| 11 | 0 | -1 | +1 | 1,023 |
| 12 | 0 | -1 | -1 | 1,015 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 1,079 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 1,079 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 1,079 |

регрессии, описывающего зависимость параметра $D1/D_{ср}$ от факторов варьирования. Коэффициенты регрессии определялись по формулам (см. 2.3).

Проведено исследование полученных регрессионных моделей, на основе которых построены графические зависимости параметров формоизменения заготовки от ее исходных размеров и режима деформирования (рис. 6.19).

Установлено, что в процессе разгонки цилиндрической заготовки плоским узким бойком ее боковая поверхность принимает вогнутую форму. При этом видно, что часть заготовки с наибольшим диаметром, равным $D1$, находится на расстоянии h_x от торца заготовки, который имеет диаметр D' . Параметром, который имеет наибольшее влияние на величину бочкообразности в процессе последующей осадки плоскими плитами, является отношение $D1/D_{ср}$. Чем больше данное отношение, тем на большую величину можно осадить заготовку без образования бочки.

Анализ полученных графиков позволяет сделать вывод о том, что наибольшее влияние на формоизменение оказывает ширина узкого бойка X . Установлено, что при разгонке заготовки с $H/D=1$ бойком относительной шириной $\bar{X} = 0,1$ можно получить заготовку с относительным параметром $D1/D_{ср} = 1,25$ при степени внедрения бойка в заготовку $\varepsilon_h = 0,15$.

Использование бойка относительной шириной $\bar{X} = 0,4$ при тех же условиях позволяет получить заготовку с $D1/D_{ср} = 1,06$. Это объясняется тем, что при использовании более узкого бойка наблюдается большая локализация очага деформации у торца заготовки, что приводит к более интенсивному его увеличению. Несмотря на то, что с уменьшением ширины бойка увеличивается величина прогиба боковой поверхности получаемой заготовки, это ведет к увеличению трудоемкости процесса, т.к. малая ширина бойка предполагает большее количество обжатий заготовки, которое вычисляется по формуле: $n = \pi D / 2X$, т.е. ширина бойка не должна быть слишком малой.

Также установлено, что с увеличением степени деформации ε_h от 0,05 до 0,15 происходит существенное увеличение параметра $D1/D_{ср}$ при разгонке заготовки бойком с $\bar{X} = 0,1..0,3$. При использовании бойка с $\bar{X} \geq 0,4$ степень

Таблица 6.3 - Коэффициенты уравнения регрессии

| b0 | b1 | b2 | b3 | b12 |
|--------|--------|-------|------------------------|-----------------------|
| 1,082 | -0,029 | 0,042 | 0,019 | -0,017 |
| b13 | b23 | b11 | b22 | b33 |
| -0,015 | 0,0095 | 0,015 | $-3,057 \cdot 10^{-3}$ | $-4,67 \cdot 10^{-3}$ |

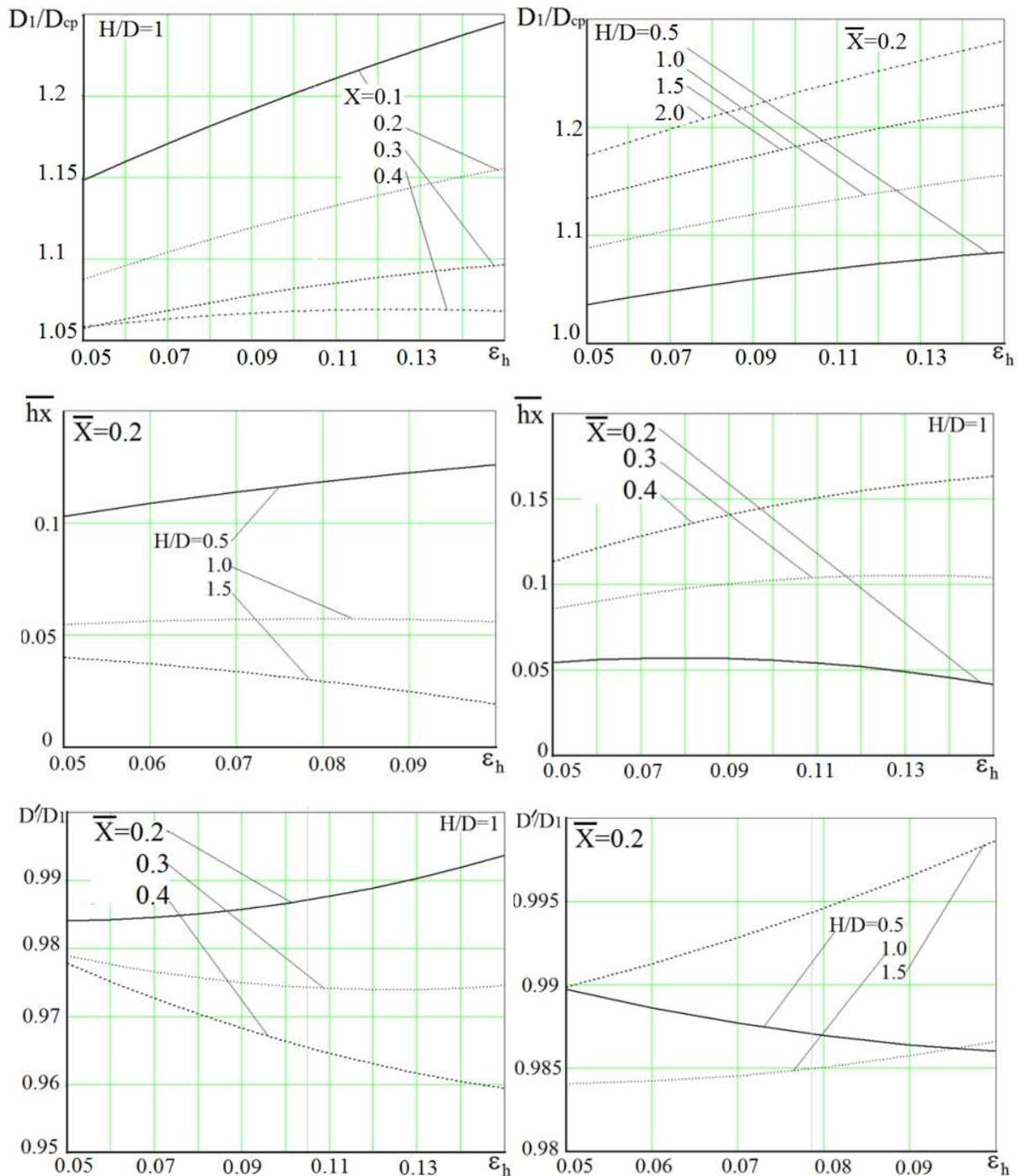


Рисунок 6.19 - Графики зависимости параметров формоизменения заготовки от исходных параметров заготовки и режима деформирования

внедрения не оказывает существенного влияния на получаемую разность диаметров торцовой и средней части заготовки. Это связано со значительным размером пятна контакта инструмента и заготовки и, как следствие, низкой локализацией очага деформации у торца заготовки.

Установлено, что большое влияние на формоизменение оказывает относительная высота исходной заготовки. Так при разгонке заготовки с $H/D=2$ бойком относительной шириной $\bar{X}=0,2$ со степенью деформации 0,15 получили заготовку с $D1/D_{ср} = 1,28$. Для заготовки с $H/D=0,5$ параметр $D1/D_{ср} = 1,09$ при прочих равных условиях деформирования.

На рис. 6.20 приведены графики зависимости стрелы прогиба боковой поверхности заготовки от геометрических параметров процесса разгонки. Влияние геометрических параметров исходной заготовки и режима деформирования на параметр «а» аналогично описанному выше для параметра $D1/D_{ср}$.

На основании полученной регрессионным анализом математической модели можно определить стрелу прогиба боковой поверхности заготовки. Зная это значение и значения размеров заготовки, используя графическую зависимость (рис. 6.21) можно определить степень осадки профилированной заготовки, при которой бочкообразность будет минимальной.

На формоизменение полученной разгонкой заготовки в процессе последующей осадки плоскими плитами окажет влияние форма ее торцов, а именно такие параметры, как h_x и D'/D . Проведено исследование влияния параметров разгонки на величины h_x и D'/D .

Установлено, что при разгонке заготовки узким бойком относительной шириной \bar{X} до 0,3 разница диаметра торца и наибольшего диаметра заготовки находится в пределах 2% при ε_n от 0,05 до 0,15. Резкое уменьшение D'/D , т.е. увеличение разности диаметра торца и максимального диаметра заготовки наблюдается при разгонке бойком шириной \bar{X} свыше 0,4. Относительная высота заготовки не оказывает существенного влияния на параметр D'/D .

Установлено, что величина h_x также зависит от ширины бойка X и относительной высоты заготовки. Этот параметр возрастает в три раза с увели-

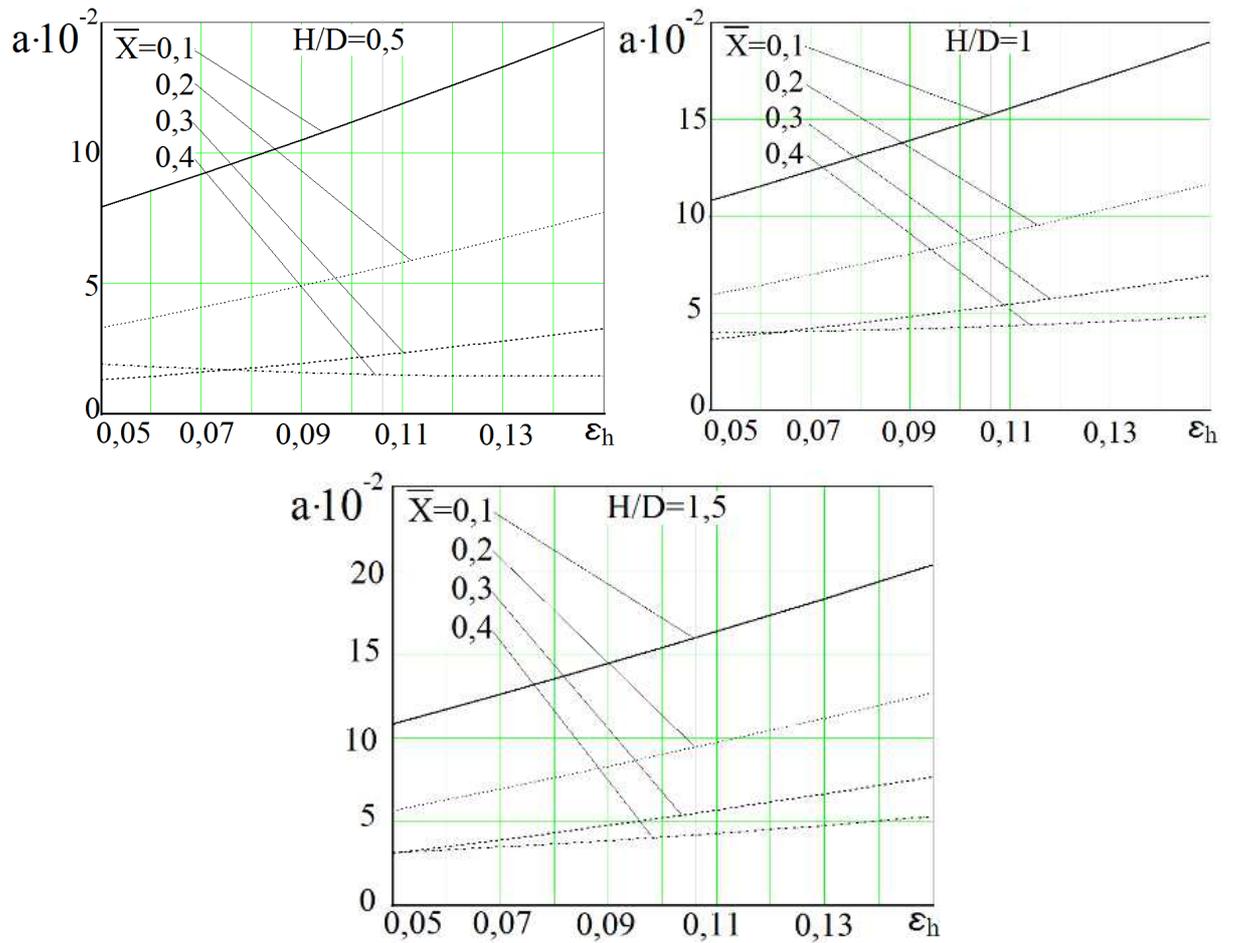


Рисунок 6.20 - Графики зависимости стрелы прогиба бочки от параметров процесса разгонки

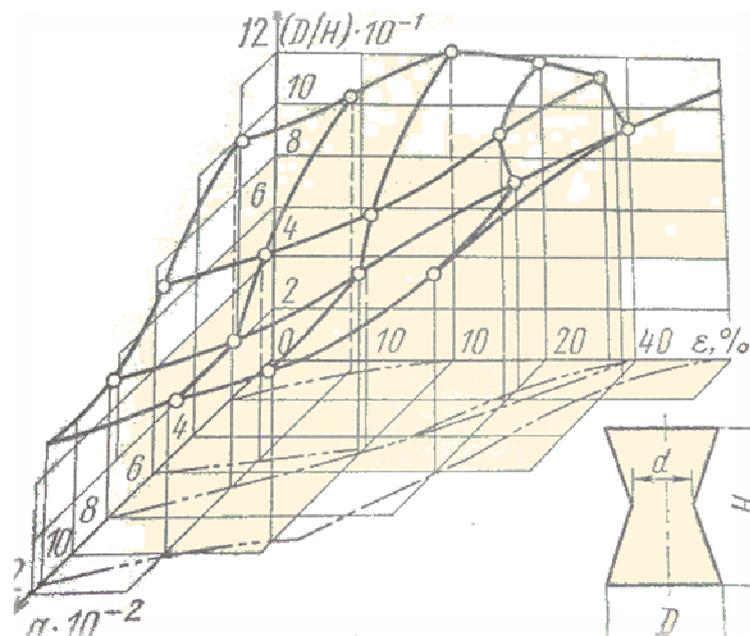


Рисунок 6.21 - Изменение стрелы прогиба боковой поверхности заготовки «а» при осадке

чением \bar{X} от 0,2 до 0,4 и в два раза с уменьшением H/D от 1,5 до 0,5. Степень деформации оказывает незначительно влияние на данный параметр. Для качественного формоизменения необходимо, чтобы параметр h_x был минимальным и параметр $D'/D = 1$.

Проведено исследование деформированного состояния заготовки в процессе разгонки узким бойком и последующей осадки плоскими плитами. Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций приведены на рис. 6.22-6.24.

Анализ полученных данных, позволил установить, что существенное влияние на величину очага деформации и распределение деформаций оказывают геометрические параметры инструмента (относительная ширина бойка) и режим деформирования (относительная степень внедрения бойка в заготовку ε_h). Из рис. 6.22 видно, что при внедрении в заготовку бойка относительной шириной $\bar{X}=0,4$ очаг деформации имеет значительные размеры, высота его равна практически половине высоты заготовки, т.е. наблюдается низкая степень локализации. Это приводит к тому, что при ковке заготовки таким инструментом вогнутость боковой поверхности будет минимальной или же вообще отсутствовать. При уменьшении ширины бойка наблюдается уменьшение высоты очага деформации и его ширины. Из рис. 6.22 видно, что непосредственно в зоне контакта бойка и заготовки наблюдается зона затрудненных деформаций, вызванная наличием сил трения и охлаждением торца заготовки. Величина этой зоны тем больше, чем шире деформирующий инструмент. Кроме того видно, что наибольшие деформации находятся у кромок бойка.

Наибольшая степень локализации очага деформации у торца заготовки наблюдается при использовании бойка шириной $\bar{X}=0,2$, что соответствует получению заготовки с большим значением параметра a . Видно, что на высоту очага деформации также оказывает влияние высота заготовки. С уменьшением высоты заготовки относительная высота очага деформации увеличивается. Это говорит о том, что такое профилирование не позволит получить заготовку с относительно большим значением величины прогиба боковой

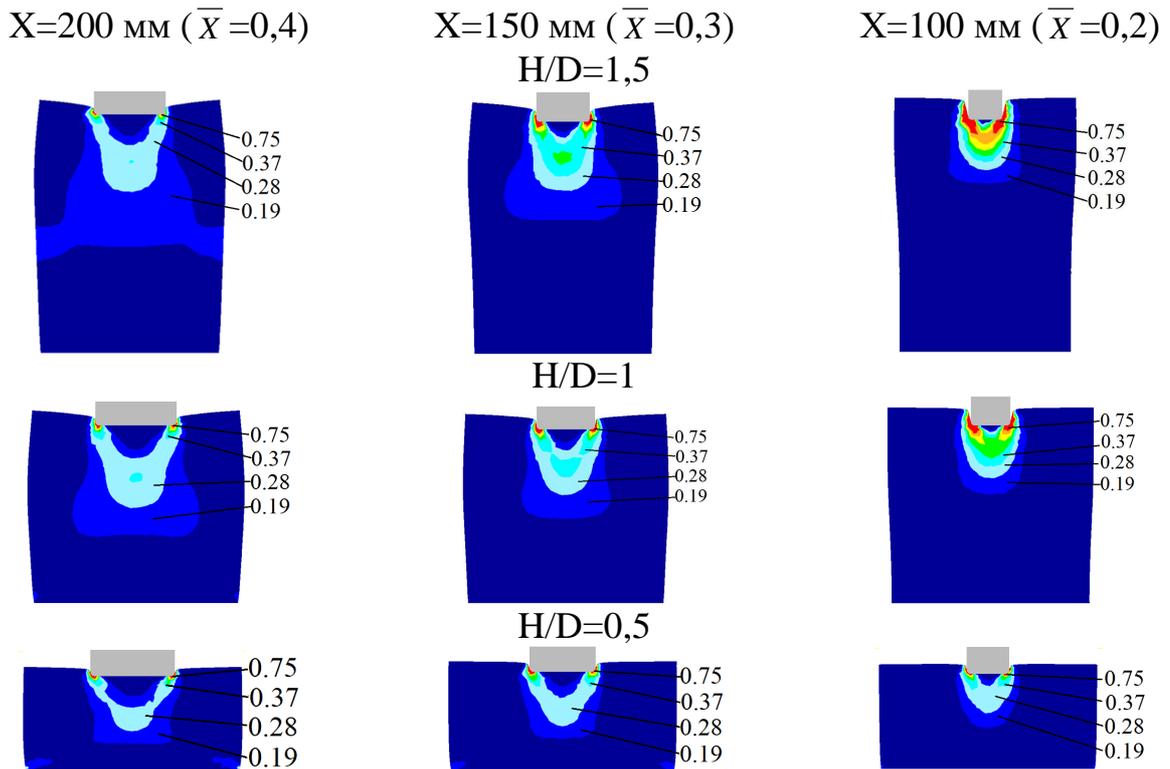


Рисунок 6.22 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки при обжатии узким бойком ($\varepsilon_h=0,1$)

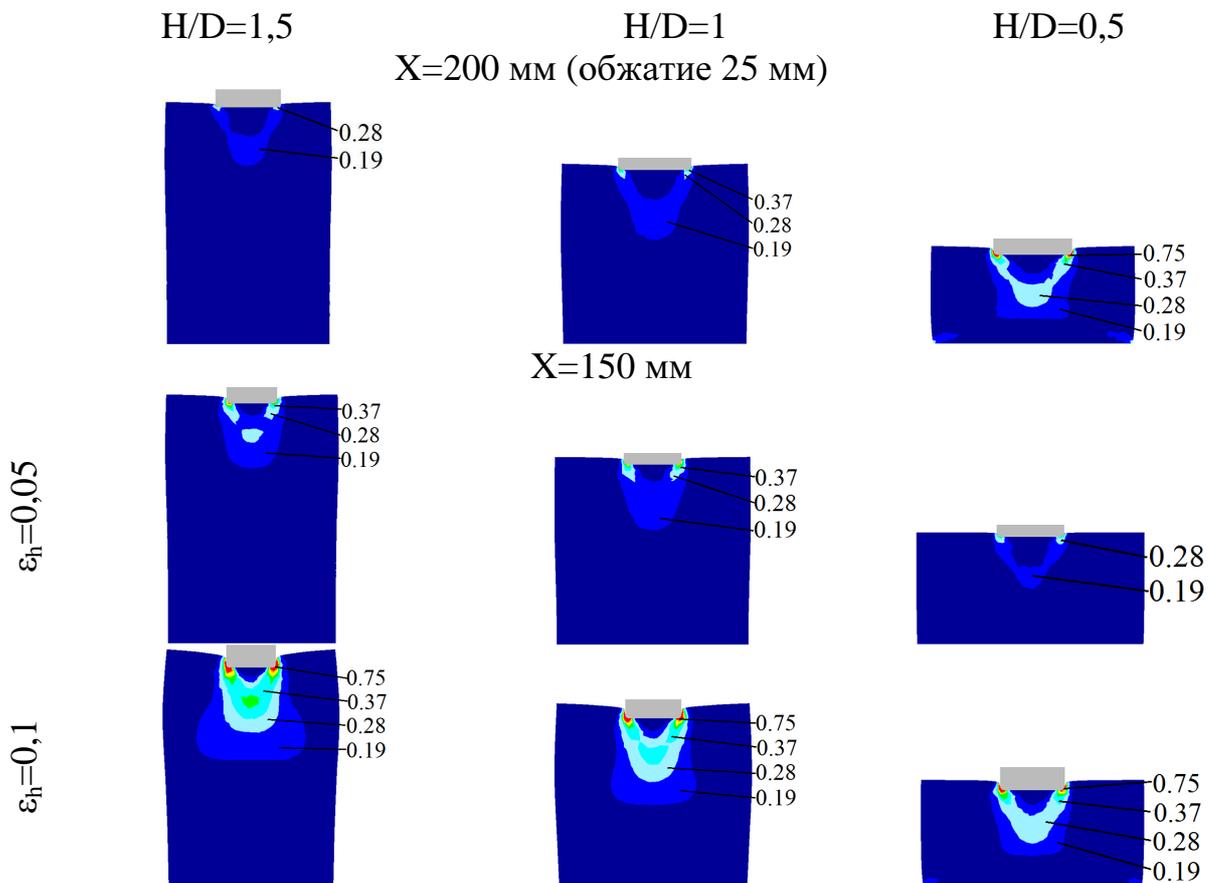


Рисунок 6.23 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки при обжатии узким бойком на различных стадиях

поверхности при малом соотношении высоты исходной заготовки к ее диаметру.

Анализ полученных данных позволил установить, что профилирование разгонкой лучше проводить на заготовке с $H/D > 1$. Влияние размеров заготовки на относительную величину очага деформации подтверждается и данными, приведенными на рис. 6.23. Из рисунка видно, что при одинаковом обжатии заготовки с различной высотой бойком одинаковой ширины, относительные параметры очага деформации отличаются существенно. Так при внедрении узкого бойка в заготовку с $H/D = 1,5$, высота очага деформации равна 25% от высоты заготовки. При деформировании заготовки с $H/D = 0,5$ высота очага деформации равна 75% от высоты заготовки.

Кроме того установлено влияние режима деформирования на размеры очага деформации и особенности его формирования. Установлено, что с увеличением степени внедрения бойка в заготовку высота очага деформации увеличивается, также возрастает и величина интенсивности деформаций.

Так, если при относительном внедрении бойка в заготовку ($H/D = 1,5$), равном 0,05, высота очага деформации равна 25% от высоты заготовки, то при $\epsilon_n = 0,1$ данная высота составляет 1/3 высоты заготовки. При этом максимальная величина интенсивности логарифмических деформаций возрастает с 0,37 до 0,75.

На рис. 6.24 приведены поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки на всех стадиях процессаковки цилиндрической заготовки по предлагаемому способу.

Данным способом удалось осадить заготовку на 60% без образования бочки, присущей для обычной осадки плоскими плитами. Кроме того из рис. 6.24 видно, что в заготовке отсутствует зона малых деформаций, снижена неравномерность деформаций, которая возникает при осадке цилиндрической заготовки плоскими плитами. Это позволяет судить об эффективности применения данного способаковки для поковок типа дисков без дополнительных операций в виде предварительной протяжки для устранения зоны малых деформаций и правки боковой поверхности.

Для подтверждения полученных данных проведена экспериментальная апробация данного способа. Эксперименты проводились на свинцовых образцах диаметром 50 мм и высотой 75 мм. Результаты приведены на рис. 6.25, из которого видно, что профилирование боковой поверхности заготовки предлагаемым способом возможно.

6.2.2 Осадка заготовок разгонкой

При изготовлении дисков осадкой нередко возникают проблемы, связанные с недостаточной мощностью оборудования, что решается несколькими путями: осадкой с паузами (во время паузы происходит разупрочнение металла и снижается сила осадки) и осадкой узким бойком. Наиболее эффективной представляется осадка разгонкой проходами узким бойком, т.к. в данном случае уменьшается площадь контакта между инструментом и заготовкой и присутствует эффект разупрочнения металла. Кроме того предполагается уменьшение объема металла в застойных зонах заготовки. Данный способ позволяет расширить номенклатуру изделий, получаемых ковкой на малых прессах.

Исследования процесса осадки узким бойком в известных исследованиях направлены на определение энергосиловых параметров. В процессе разгонки узким бойком цилиндрическая заготовка принимает овальную форму поперечного сечения, и получаемое изделие нуждается в дополнительных припусках, что увеличивает металлоемкость детали. Разработка математических моделей, позволяющих прогнозировать формоизменение заготовки и разработать рациональный режимковки, является актуальной задачей [322-323].

Для определения параметров НДС заготовки в процессе осадки использован метод конечных элементов. Моделировали осадку цилиндрической заготовки узким плоским бойком проходами (рис. 6.26). Диаметр заготовки принимался равным $D = 1000$ мм, высота заготовки $H = 750, 500, 250$ мм. Ширина бойка принималась равной 400, 600 и 800 мм. Материал заготовки сталь 45, начальная температура заготовки 1100°C , температура инструмента

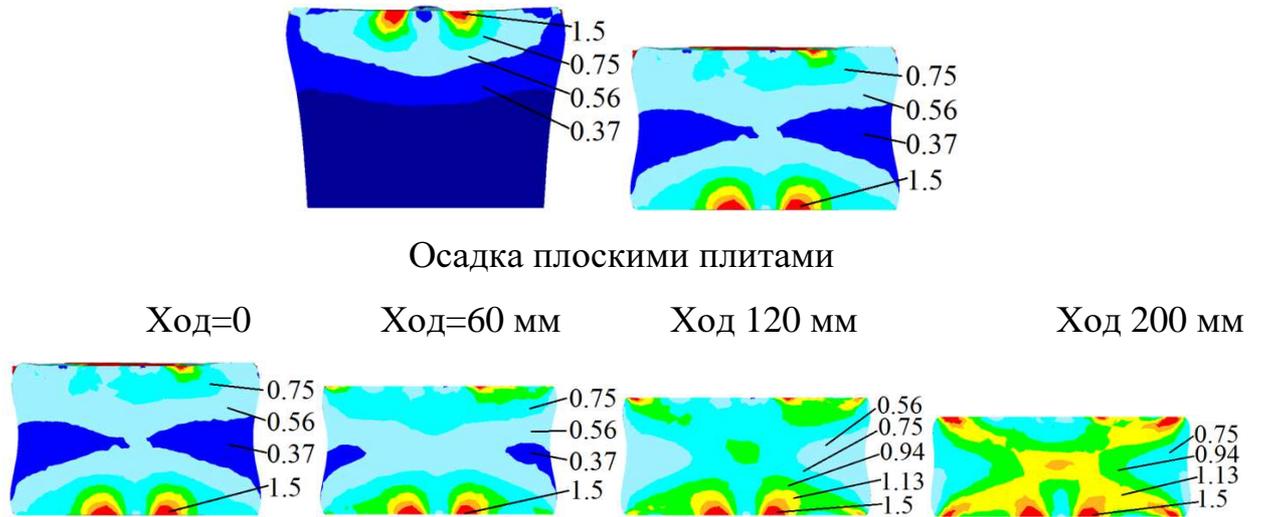


Рисунок 6.24 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки в процессе разгонки узким бойком и последующей осадки плоскими плитами ($H=1000$ мм $D=1000$ мм $X=300$ мм)

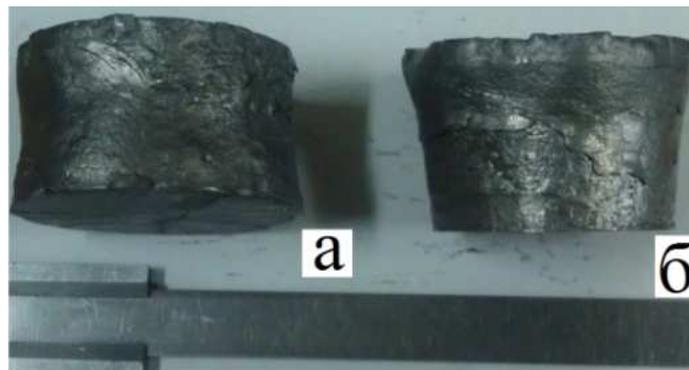


Рисунок 6.25 - Общий вид полуфабрикатов после деформирования разгонкой одного торца (б) и двух торцов (а) цилиндрической заготовки

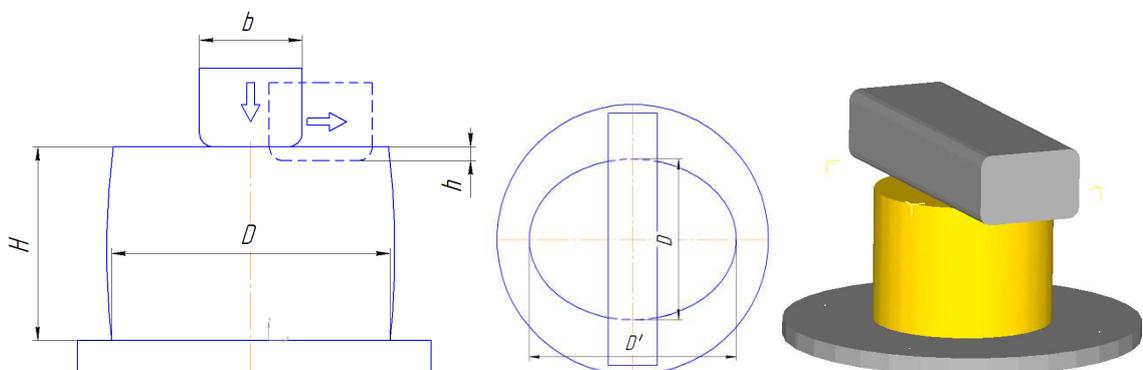


Рисунок 6.26 - Схема процесса осадки заготовки узким плоским бойком

200⁰С, количество конечных элементов 50000 шт. Коэффициент пластического трения Зибеля на контакте между инструментом и заготовкой 0,35, скорость движения инструмента 20 мм / с.

В результате моделирования получены данные о формоизменении заготовки, которые показывают, что в процессе осадки заготовки разгонкой узким бойком ее поперечное сечение принимает овальную форму (рис. 6.27). Такое формоизменение объясняется тем, что в процессе обжатия бойком, металлу заготовки энергетически целесообразнее перемещаться поперек бойка.

Исправить такое отклонение формы поперечного сечения возможно правкой боковой поверхности заготовки либо, что является более целесообразным, используя специальный режим разгонки узким бойком с постоянной кантовкой заготовки вокруг своей оси на 90⁰ между проходами и регулируя при этом обжатия.

Для разработки рационального режима разгонки, который бы обеспечил правильную форму поперечного сечения заготовки необходимо получить модели описывающие формоизменение заготовки при обжатии бойками различных размеров.

В качестве основных факторов, которые влияют на формоизменение в процессе разгонки, для исследования, были выбраны относительная высота заготовки H/D , ширина бойка b/D и относительная степень внедрения бойка в заготовку h/b . Процесс разгонки осуществлялся следующим образом: первое обжатие производилось всей шириной бойка по центру торца заготовки, после чего производилась подача бойка. Подача осуществлялась на всю ширину бойка в сторону недеформированных участков заготовки. С целью получения математической модели в параметрическом виде проведен регрессионный анализ данных, полученных в результате численного моделирования методом конечных элементов. Моделирование проводилось по разработанному плану экспериментов. В таблицах 6.4, 6.5 приведены факторы варьирования, их уровни и матрица планирования.

Откликом был принят параметр D'/D – отношение осей овала поперечного сечения заготовки. Общий вид уравнения регрессии (см. 2.1). Переход

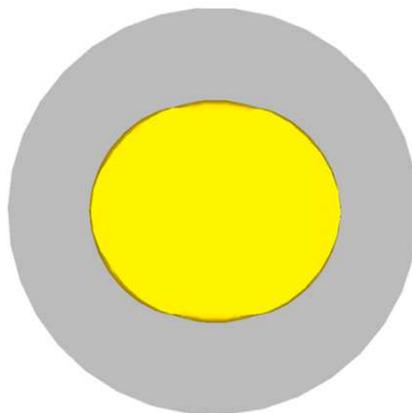


Рисунок 6.27 - Форма поперечного сечения заготовки после первого прохода плоским бойком

Таблица 6.4 - Уровни варьирования факторов

| Интервал варьирования и уровни факторов | H/D | b/D | h/b |
|---|-------|-------|-------|
| Основной уровень $X_{i_0}=0$ | 0,5 | 0,6 | 0,15 |
| Интервал варьирования ΔX_i | 0,25 | 0,2 | 0,05 |
| Верхний уровень $x_i= +1$ | 0,75 | 0,8 | 0,2 |
| Нижний уровень $x_i= -1$ | 0,25 | 0,4 | 0,1 |
| Кодовое обозначение | X_1 | X_2 | X_3 |

Таблица 6.5 - Расширенная матрица планирования эксперимента

| N | Код | | | y_{ug} |
|----|-------|-------|-------|----------|
| | x_1 | x_2 | x_3 | |
| 1 | +1 | +1 | 0 | 1,033 |
| 2 | + | -1 | 0 | 1,032 |
| 3 | -1 | +1 | 0 | 1,22 |
| 4 | -1 | -1 | 0 | 1,132 |
| 5 | +1 | 0 | +1 | 1,058 |
| 6 | +1 | 0 | -1 | 1,033 |
| 7 | -1 | 0 | +1 | 1,2 |
| 8 | -1 | 0 | -1 | 1,097 |
| 9 | 0 | +1 | +1 | 1,068 |
| 10 | 0 | +1 | -1 | 1,04 |
| 11 | 0 | -1 | +1 | 1,059 |
| 12 | 0 | -1 | -1 | 1,035 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 1,059 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 1,059 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 1,059 |

от условных параметров к натуральным производится по следующим зависимостям:

$$x_1 = \frac{H/D - 0,5}{0,25}, \quad x_2 = \frac{b/D - 0,6}{0,2}, \quad x_3 = \frac{b/h - 0,15}{0,05}.$$

В результате обработки полученных данных получены коэффициенты уравнения регрессии. В таблице 6.6 приведены коэффициенты для уравнения регрессии, описывающего зависимость параметра D'/D от факторов варьирования. Коэффициенты регрессии определялись по формулам (см. 2.3).

По результатам моделирования построены графические зависимости параметра D'/D от геометрических параметров инструмента и режима процесса разгонки (рис. 6.28). Полученные результаты показывают, что на величину овальности поперечного сечения большое влияние оказывает относительная величина внедрения бойка. Так, например, при разгонке заготовки с $H/D = 1$ бойком шириной $b/D = 0,5$ величина овальности поперечного сечения заготовки увеличивается от 1,11 до 1,14 при увеличении относительного обжатия заготовки от 0,05 до 0,1.

Кроме того, большое влияние на овальность оказывает и ширина бойка. При разгонке узким бойком овальность поперечного сечения заготовки больше, нежели при разгонке широким бойком.

При использовании бойка относительной шириной 0,3 овальность при обжатии 0,05 и относительной высоте заготовки равной 1,0 составляет 1,12, а при использовании бойка шириной 0,5 овальность составляет 1,11. Это объясняется тем, что при использовании бойка меньшей ширины металл более интенсивно течет в поперечном направлении из-под бойка во время обжатия, нежели в продольном.

Относительная высота заготовки также оказывает влияние на форму поперечного сечения в процессе разгонки. Заготовка меньшей высоты имеет меньшую склонность к искажению формы, т.е. минимальные отклонения формы поперечного сечения.

Таким образом, имея полученные зависимости, возможно прогнозиро-

вать формоизменение заготовки в процессе разгонки и, зная величину овальности поперечного сечения за один проход бойка при обжатии, возможно подобрать величину обжатия для второго прохода после поворота заготовки на 90^0 , чтобы компенсировать овальность.

Для проверки адекватности полученной математической модели проведены экспериментальные исследования процесса осадки разгонкой. Исследования проведены на свинцовых образцах диаметром 50 мм и высотой 37,5 мм. Деформирование производилось узким бойком шириной 20 мм. В результате проведенного эксперимента получены данные по формоизменению заготовки в процессе разгонки. Полученные данные нанесены на график (рис. 6.29) и произведено сопоставление с теоретическими значениями параметра овальности поперечного сечения заготовки.

Анализ рис. 6.29 позволяет заключить, что теоретически полученная зависимость позволяет с высокой степенью точности описывать реальный процесс формоизменения заготовки в процессе разгонки узким бойком.

Рациональный режим разгонки выбирается следующим образом. Сначала, на основании исходных данных в виде размеров заготовки и инструмента, рассчитывается величина овальности заготовки после первого обжатия. Далее необходимо подобрать величину обжатия следующего перехода так, чтобы появившаяся овальность компенсировала овальность предыдущего перехода. При этом исходными данными для расчета этого перехода служат размеры заготовки предыдущего перехода.

По запросу ОАО «Русполимет» проведено моделирование процессаковки поковки «диск» диаметром 1800 мм и высотой 270 мм. Данную поковку планируется изготавливать на прессе номинальной силой 35МН следующим образом: биллетировка, вырубка блока, осадка плоскими плитами до минимально возможной по силе пресса высоты и разгонка узким бойком с поворотами заготовки на 90^0 . Использоваться будет боек шириной 600 мм. Основной проблемой является отклонение от круглости формы поперечного сечения заготовки.

Для разработки технологииковки данной поковки на основании полу-

Таблица 6.6 - Коэффициенты уравнения регрессии

| | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| b_0 | b_1 | b_2 | b_3 | b_{12} |
| 1,068 | -0,045 | 0,009 | 0,016 | -0,011 |
| b_{13} | b_{23} | b_{11} | b_{22} | b_{33} |
| -0,009 | 0,0005 | 0,04 | -0,0028 | -0,009 |

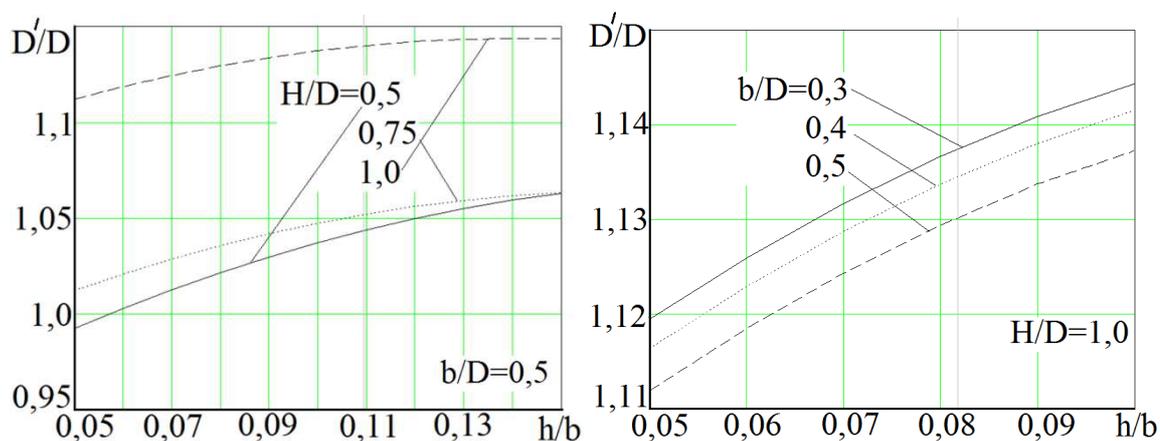


Рисунок 6.28 - Графики зависимости геометрических параметров формоизменения поперечного сечения заготовки от режима разгонки цилиндрической заготовки

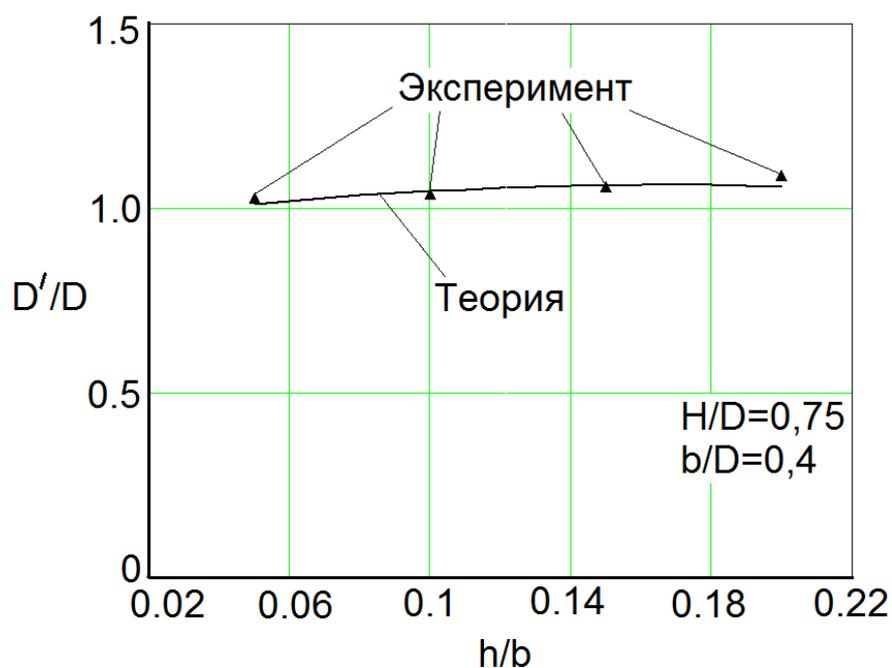


Рисунок 6.29 - Сопоставление теоретических и экспериментальных данных овальности поперечного сечения заготовки в зависимости от величины обжатия

ченных регрессионных моделей подобрали режим обжатий и кантовок заготовки. Установили, что на прессе силой 35 МН возможно плоскими плитами осадить заготовку до высоты 630 мм (рис. 6.30).

На рис. 6.31 показаны переходы ковки в процессе разгонки узким бойком. Установлено, что после первого прохода обжатий узким бойком на величину 100 мм овальность поперечного сечения заготовки будет равна 1,036. Для компенсации данной овальности необходимо на следующем переходе после кантовки заготовки на 90^0 выполнить обжатие равное 70 мм. Как показало моделирование (см. рис. 6.31), поперечное сечение заготовки при этом практически не будет иметь овальности.

Следующее обжатие производилось величиной 100 мм, это привело к образованию овальности, равной 1,055. Для компенсации овальности следующий проход плоским бойком необходимо было выполнить с обжатием 90 мм. Заготовка, полученная данным способом, имеет максимально приближенные размеры и форму поперечного сечения к номинальным.

Полученные результаты переданы для промышленной апробации и внедрения. Проведен промышленный эксперимент (рис. 6.32) по осадке разгонкой, который подтвердил адекватность разработанных математических и физических моделей.

6.3. Управление НДС заготовки регулированием ее температурного поля

6.3.1 Осадка заготовок с неравномерным симметричным температурным полем

Предложен новый способ осадки заготовок с неравномерным температурным полем, который позволяет снизить неравномерность деформаций в заготовке и величину бочкообразности. Способ основан на том, что заготовку, нагретую равномерно до температуры, которая соответствует минимальной из интервала ковочных температур, подвергают форсированному подогреву до верхней температуры ковки. При этом в заготовке создается наружный прогретый слой металла и «холодная» (более прочная) сердцевина. В

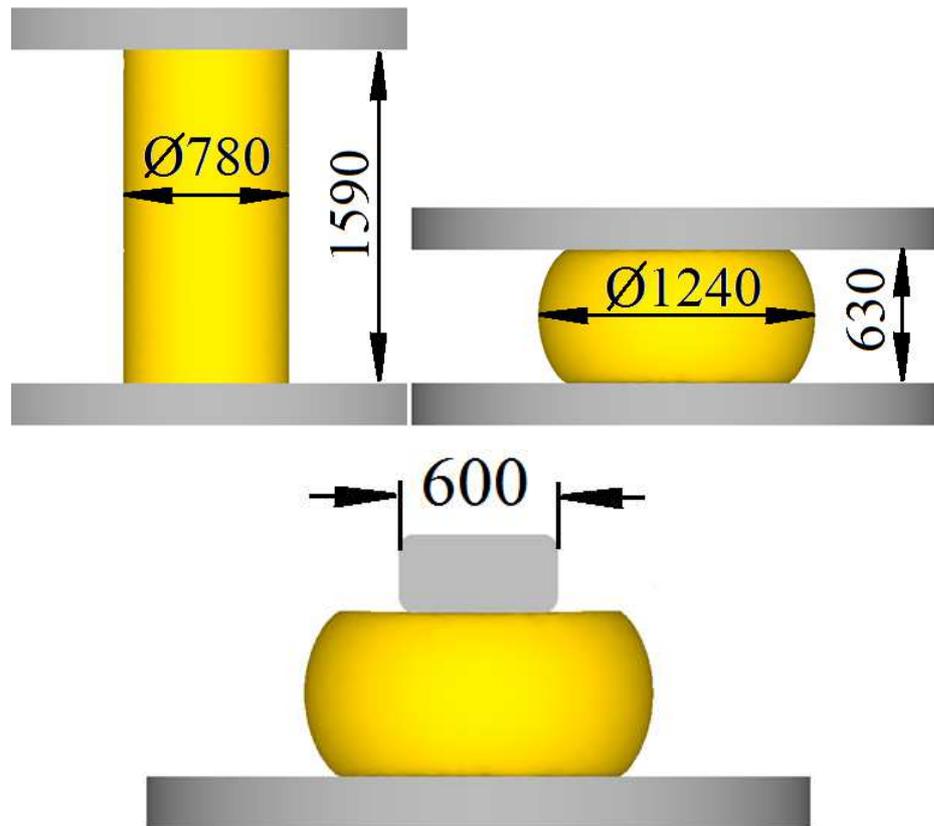


Рисунок 6.30 - Схема процесса осадки заготовки плоскими плитами

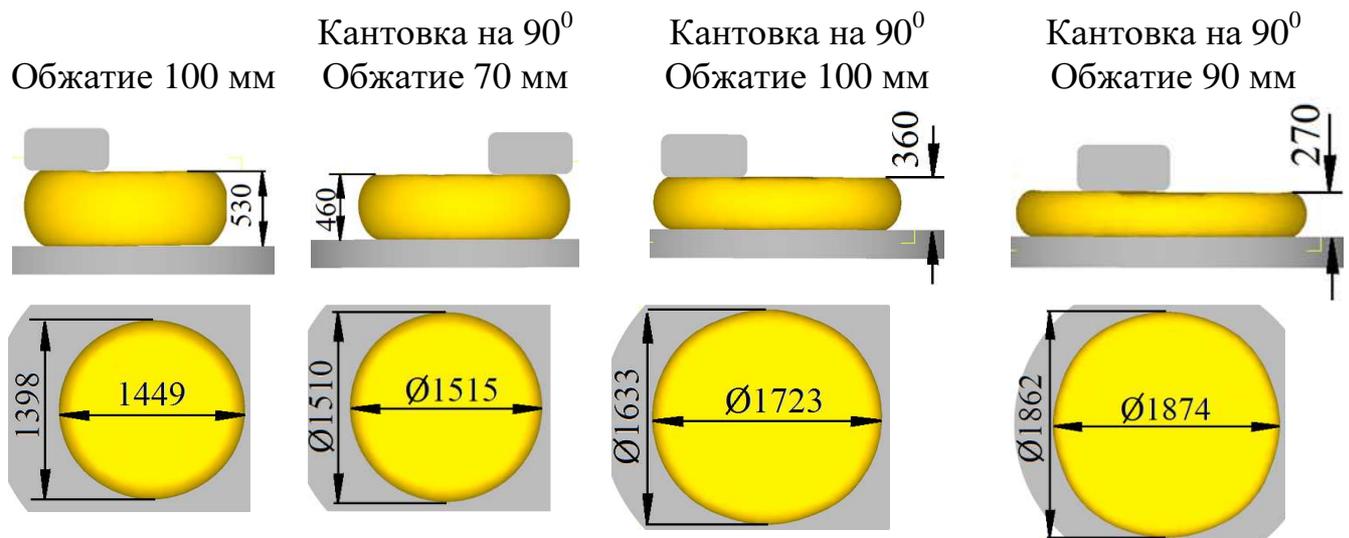


Рисунок 6.31 - Формоизменение заготовки в процессе разгонки заготовки узким бойком



Рисунок 6.32 - Промышленный эксперимент по реализации процесса разгонки заготовки плоским бойком на ОАО «Русполимет»

процессе осадки в первую очередь деформироваться будет металл с меньшим сопротивлением деформированию, т.е. металл, находящийся у торцев заготовки. За счет этого на первом этапе осадки образуется наружная вогнутая боковая поверхность, которая впоследствии вырождается и компенсирует бочкообразность (рис. 6.33). Кроме уменьшения бочкообразности происходит уменьшение размеров зоны затрудненных деформаций.

Методом конечных элементов проведено моделирование деформирования заготовки с неравномерным температурным полем. Моделирование проводилось в несколько этапов. На первом этапе моделировался процесс нагрева цилиндрической заготовки диаметром 1000 мм и высотой 500, 1000, 1500 и 2000 мм из стали 35 с начальной температурой 700 °С до температуры поверхности 900, 1000 и 1100 °С. При моделировании нагрев производился от окружающей среды различной температуры на протяжении 2000 (поле 1) и 3000 секунд (поле 2). Таким образом, достигались поля температур с различными толщинами прогретых слоев. В таблице 6.7 приведены температурные поля заготовок после нагрева до различной температуры.

В работах [298, 299] проведено сравнение полей температур, полученных в заготовке моделированием в программе Deform 3D и экспериментально в производственных условиях. Сравнение показало несущественные отклонения, что говорит об адекватности расчетов.

На втором этапе производили моделирование процесса осадки заготовки с неравномерным температурным полем. Деформирование производилось плоскими плитами до относительной степени осадки 50%.

Как на первом, так и на втором этапе моделирования коэффициент теплопередачи от заготовки инструменту задавался равным $5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$, температура окружающей среды 20 °С, температура осадочных плит 200 °С. Скорость движения деформирующего инструмента задавалась равной 20 мм/с, коэффициент трения по закону Зибеля принимался равным 0,35.

В таблице 6.8 приведены поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в продольном сечении заготовки в процессе осадки при различных полях распределения температур. Видно, что в процессе

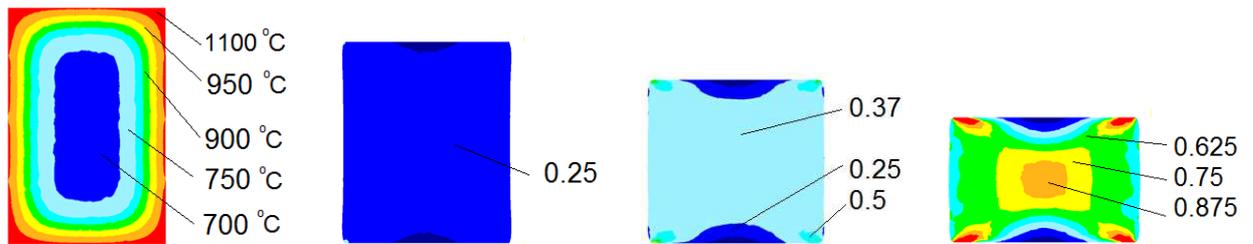
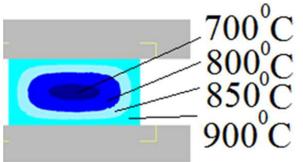
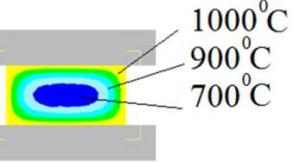
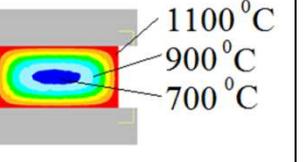
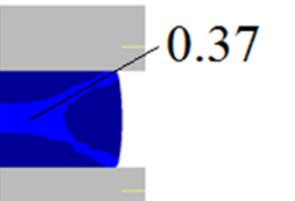
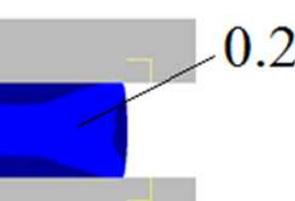
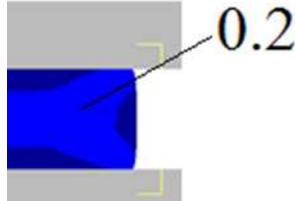
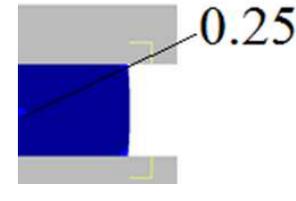
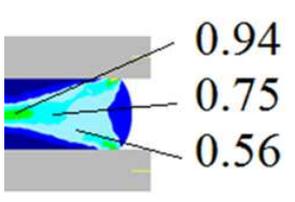
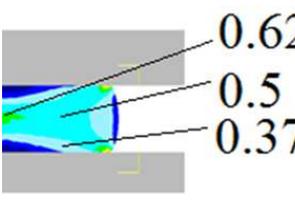
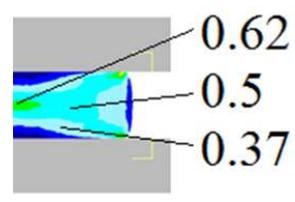
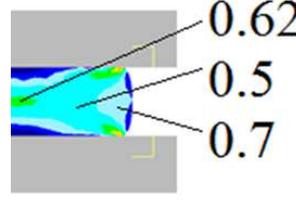
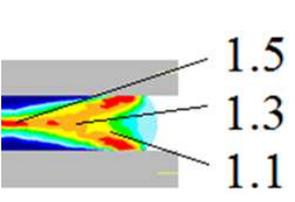
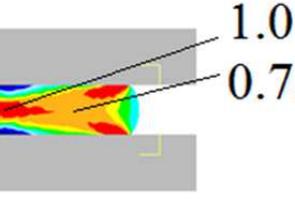
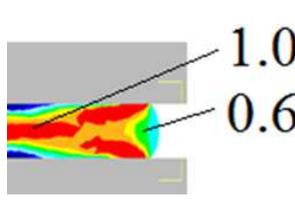
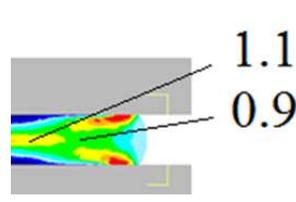


Рисунок 6.33 - Поля распределения температуры и интенсивности деформаций в продольном сечении заготовок в процессе осадки плоскими плитами

Таблица 6.7 – Поля распределения температур в продольном сечении заготовок нагретых в различных условиях

| Высота заготовки 500 мм | | |
|--|---|--|
| 900 ⁰ С 700 ⁰ С | 1000 ⁰ С 850 ⁰ С | 1100 ⁰ С 1000 ⁰ С 900 ⁰ С |
| Высота заготовки 1000 мм | | |
| 900 ⁰ С 800 ⁰ С 700 ⁰ С | 1000 ⁰ С 900 ⁰ С 700 ⁰ С | 1100 ⁰ С 1000 ⁰ С 700 ⁰ С |
| Высота заготовки 1500 мм | | |
| 900 ⁰ С 800 ⁰ С 700 ⁰ С | 1000 ⁰ С 900 ⁰ С 700 ⁰ С | 1100 ⁰ С 1000 ⁰ С 900 ⁰ С 700 ⁰ С |
| Высота заготовки 2000 мм | | |
| 900 ⁰ С 800 ⁰ С 700 ⁰ С | 1000 ⁰ С 900 ⁰ С 700 ⁰ С | 1100 ⁰ С 1000 ⁰ С 900 ⁰ С 700 ⁰ С |

Таблица 6.8 – Поля распределения температур и интенсивности логарифмических деформаций в продольном сечении заготовки при осадке плоскими плитами (высота заготовки 500 мм)

| равномерное | 900 ⁰ С | 1000 ⁰ С | 1100 ⁰ С |
|---|---|--|---|
| |  |  |  |
| Ход 60 мм | | | |
|  |  |  |  |
| Ход 140 мм | | | |
|  |  |  |  |
| Ход 240 мм | | | |
|  |  |  |  |

осадки заготовки с равномерным температурным полем возникает большая неравномерность распределения деформаций в объеме. Наблюдаются застойные зоны деформаций у торцов заготовки, и уже на первых этапах осадки видна ярко выраженная бочка. В процессе осадки заготовки с температурой наружных слоев, равной 900°C , неравномерность распределения деформаций уменьшается, что выражается в уменьшении площади зоны затрудненных деформаций и уменьшении величины выпуклости боковой поверхности (бочки).

При относительной степени осадки (отношение хода осадки к начальной высоте заготовки), равной 12%, наибольшие деформации в заготовке с температурой поверхности 900°C достигают значения 0,25, а для заготовки с равномерным температурным полем 0,37.

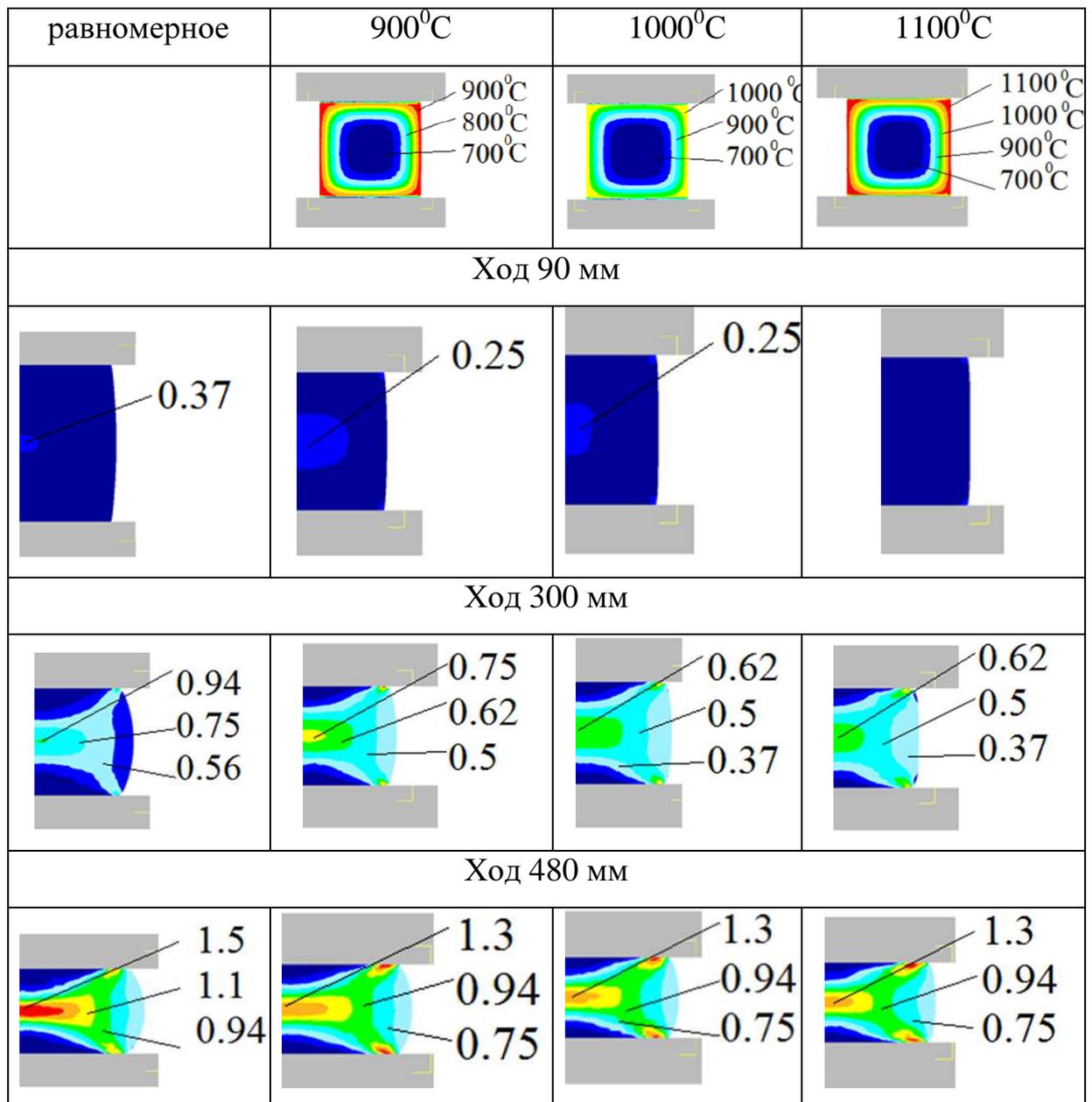
При осадке на 28% соответственно 0,62 и 0,94 в центре и при 48% эти деформации возрастают до 1,1 и 1,5 соответственно. Это говорит о том, что при осадке заготовок с «горячей» оболочкой на первых этапах деформируются наружные слои, находящиеся у торцов заготовки, и происходит меньшая локализации очага деформации в центральной части заготовки. Т.к. больше деформируются торцовые участки заготовки, то увеличивается радиальная составляющая течения металла в этой зоне, что и приводит к уменьшению величины бочкообразности заготовки.

С увеличением температуры поверхности заготовки неравномерность распределения деформаций уменьшается, и минимальная она в процессе осадки заготовки с температурой наружного слоя 1100°C .

В таблице 6.9 приведены поля распределения деформаций при осадке заготовки высотой 1000 мм. Здесь наблюдается аналогичная картина в распределении интенсивности логарифмических деформаций. Наибольшая неравномерность наблюдается при осадке заготовки с равномерным температурным полем.

Площадь зоны затруднённых деформаций заготовки с равномерным температурным полем превышает площадь аналогичной зоны в заготовке с температурной поверхности 1100°C в несколько раз. Кроме того видно, что

Таблица 6.9 – Поля распределения температур и интенсивности логарифмических деформаций в продольном сечении заготовки при осадке плоскими плитами (высота заготовки 1000 мм)



боковая поверхность заготовки с неравномерным температурным полем практически ровная, т.е. бочкообразность минимальная.

Также отличительной особенностью деформационного поля для неравномерно нагретых заготовок является наличие максимальных деформаций не в центре заготовки, как в традиционной схеме, а по концам ковочного креста. Это связано с остыванием торца заготовки и наличием зоны затрудненных деформаций, несмотря на то, что она уменьшена.

При относительной степени осадки заготовки, равной 9%, наибольшие логарифмические деформации возникают в равномерно нагретой заготовке. Здесь они достигают 0,37, в то время как в заготовке с температурой наружных слоев, равной 900 °С и 1000 °С, деформации достигают величины 0,25. Эти деформации сосредоточены в центральной части заготовки. Заготовка с температурой поверхности, равной 1100 °С, деформируется более равномерно, и при данной степени осадки не возникает локализации деформаций в центральной части.

При относительной степени осадки, равной 30%, неравномерность деформаций в равномерно нагретой заготовке становится более ярко выраженной. На данном этапе уже сформированы зоны затрудненных деформаций и наблюдается ярко выраженная бочкообразность.

В случае осадки неравномерно нагретых заготовок неравномерность распределения деформаций снижается, и заметно уменьшение величины бочкообразности. Максимальные деформации в центральной части равномерно нагретой заготовки равны 0,94, для неравномерно нагретой заготовки с температурой поверхности 1100 °С максимальная логарифмическая деформаций равна 0,62. Боковая поверхность заготовки практически ровная.

Осадка на 50% увеличивает неравномерность распределения деформаций, что связано с увеличением площади контакта инструмента и заготовки, охлаждением торцов и затруднением течения металла в приконтактной зоне. При данной степени осадки максимальные деформации в центре равномерно нагретой заготовки достигают величины 1,5 для неравномерно нагретой заготовки 1,3. Кроме того максимальные деформации в неравномерно нагретых

заготовках сосредотачиваются не в центральной части, а по концам ковочного креста.

В таблице 6.10 приведены поля распределения деформаций при осадке неравномерно нагретых заготовок высотой 1500 мм. Увеличение высоты осаженной заготовки приводит к тому, что увеличивается площадь зоны затрудненных деформаций.

Разница в формоизменении заготовок с различными полями температур здесь становится более ярко выраженной.

Как и ранее, наибольшая неравномерность распределения деформаций наблюдается в равномерно нагретой заготовке. Здесь максимальные деформации, сосредоточенные в центральной части, составляют 0,75 при осадке на 30%, что в 1,5 раза больше, чем для случая осадки неравномерно нагретых заготовок. Видно, что наименьшая бочка наблюдается в заготовке с наибольшим перепадом температур по сечению (температура поверхности 1100 °С). При дальнейшей осадке до 50% данная тенденция сохраняется. Видно, что площадь зоны затрудненных деформаций в заготовке с температурой поверхности 1100 °С меньше, чем в равномерно нагретой заготовке.

Аналогичные исследования проведены и для осадки заготовки высотой 2000 мм. Результаты исследований подтверждают предположение о влиянии неравномерности распределения температур в заготовке на ее формоизменение. Установлено, что более ярко выраженное влияние температурного поля наблюдается в относительно высоких заготовках с относительной высотой H/D большей 1.

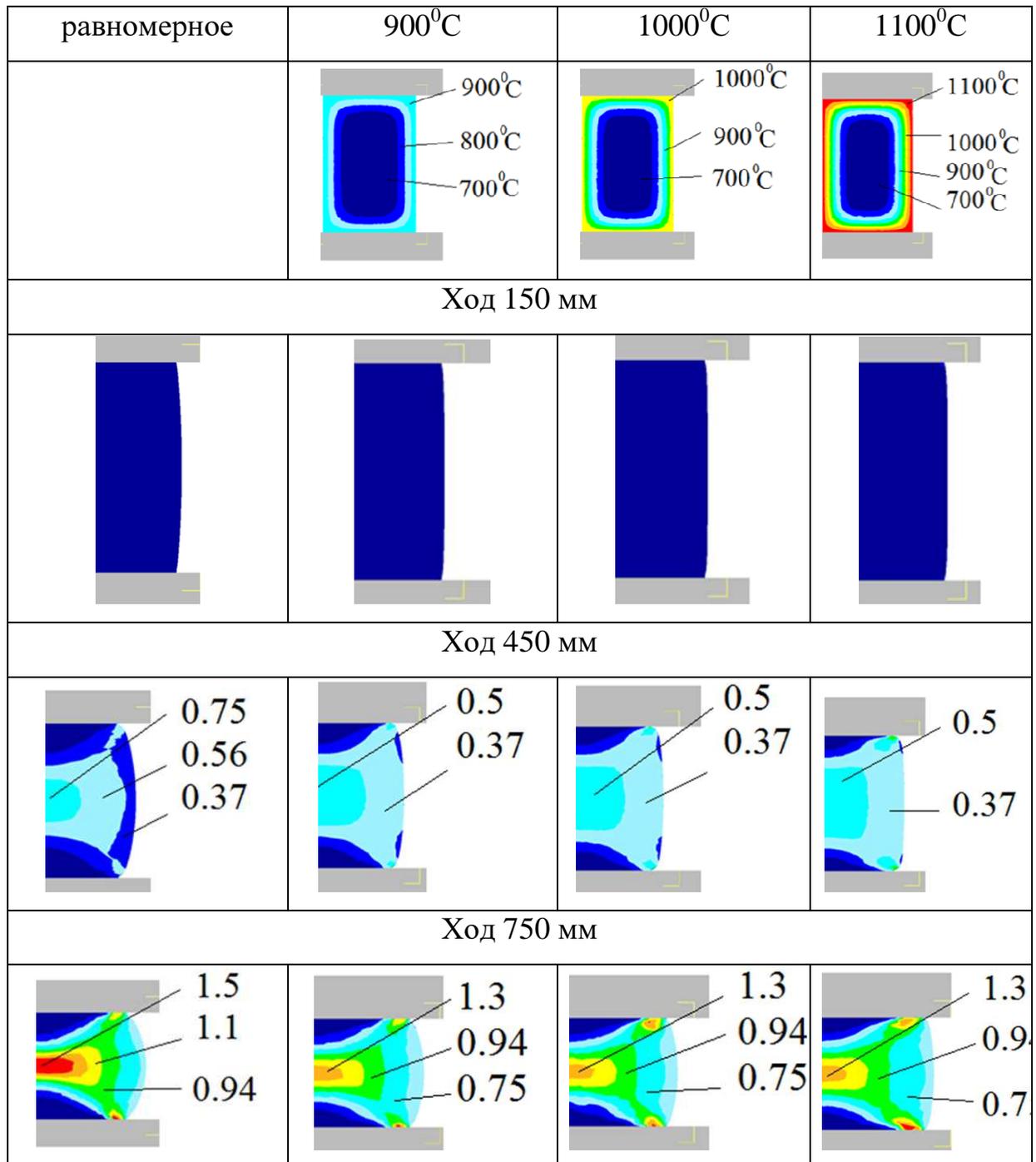
Для различных вариантов осадки произведен расчет относительной бочкообразности заготовки:

$$\theta = \frac{(V - V_{ц})}{V} \cdot 100\%,$$

где V – объем заготовки, мм³; $V_{ц}$ – объем цилиндрической части осаженной заготовки, без учета бочки, мм³.

На рисунке 6.34 приведены графики зависимости относительной бочкообразности для осадки заготовок с различной высотой и различным темпе-

Таблица 6.10 – Поля распределения температур и интенсивности логарифмических деформаций в продольном сечении заготовки при осадке плоскими плитами (высота заготовки 1500 мм)



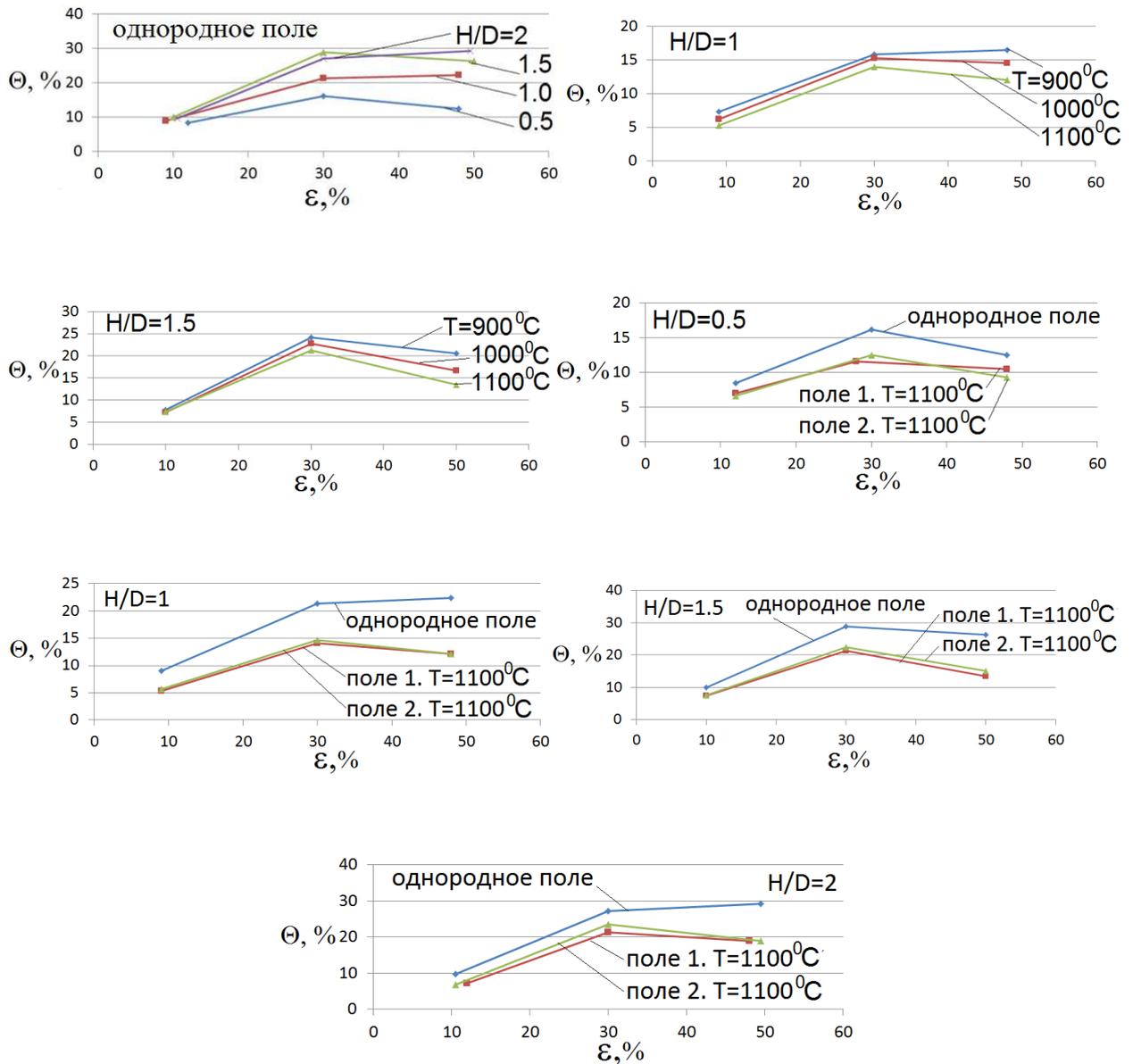


Рисунок 6.34 - Графики зависимости величины бочкообразности от относительной степени осадки для различных геометрических параметров заготовки и различных температурных полей

ратурным полем. Видно, что наибольшая величина бочкообразности у заготовок с равномерным температурным полем. Влияние высоты заготовки на бочкообразность имеет прямо пропорциональный характер. При осадке заготовки с относительной высотой равной 0,5 бочкообразность наименьшая и достигает 15% при осадке на 30%, для заготовки с относительной высотой 2 бочкообразность достигает 30%. По ходу осадки бочкообразность не имеет постоянного значения, наибольшее значение наблюдается при осадке на 30%.

Установлено что для заготовки с относительной высотой равной 1 наименьшая бочкообразность возникает при температуре поверхности 1100 °С и сердцевины 700 °С. Здесь при осадке на 50% бочкообразность составляет 12% для заготовки с температурой поверхности 1100 °С и 16% для заготовки с температурой поверхности 900 °С и 22% для равномерно нагретой заготовки.

В случае осадки заготовки с относительной высотой равной 1,5 разница в величине бочкообразности увеличивается с увеличением степени осадки. При осадке на 10% величина бочкообразности практически не отличается для заготовок с температурой поверхности 900, 1000 и 1100 °С. Отличие становится существенным только при осадке на 50%, где бочкообразность для заготовки с температурой поверхности 1100 °С равно 14%, а для заготовки с температурой поверхности 900 °С равно 21%, для равномерно нагретой заготовки 26%.

На графиках также проведено сопоставление относительной бочкообразности для температурных полей, полученных по результатам нагрева различной длительности (поле 1 – 2000 с, поле 2 – 3000 с). Установлено, что в рассматриваемых вариантах продолжительность нагрева и, как следствие, градиент температур по сечению заготовки не оказывает существенного влияния на формоизменение в процессе осадки для различных размеров заготовки. Таким образом, осаживая заготовки предложенным способом, возможно, снизить величину относительной бочкообразности до 1,8 раз, что позволяет существенно повысить экономию металла, особенно для крупногабаритных изделий.

6.3.2 Осадка заготовок с неравномерным температурным полем сложной формы

Проведено моделирование методом конечных элементов процессов осадки заготовки диаметром 1000 мм и высотой 1500 мм с различными температурными полями. Материал заготовки сталь 45. С целью обеспечения необходимого температурного поля производили моделирование различных режимов нагрева и охлаждения. Поля распределения температур приведены на рис. 6.35. Температура деформирующего инструмента задавалась равной 200 °С, коэффициент пластического трения по закону Зибеля 0,35, скорость деформирования 20 мм/с.

В результате моделирования получили поля распределения интенсивности логарифмических деформаций в поперечном сечении заготовки (рис. 6.35).

В случае осадки заготовки с симметричным неравномерным температурным полем (см. рис. 6.35 а) видно, что на первом этапе деформирования на ее боковой поверхности образуется вогнутость, которая в дальнейшем по ходу осадки выравнивается, тем самым уменьшая дефект бочкообразности. При осадке на 50% бочка полностью отсутствует.

В случае осадки заготовки с охлажденными торцами (см. рис. 6.35 б) наблюдается интенсивная деформация средней части заготовки, что позволяет сформировать форму диска с отростками. Металл заготовки, имея в торцах меньшую температуру, обладает большим сопротивлением деформации, что приводит к первоочередному деформированию центральной части заготовки.

При осадке заготовки с охлажденной средней частью (см. рис. 6.35 в) основная деформация сосредоточена на ее торцах, и в процессе осадки получаем поковку с формой, напоминающей катушку.

Таким образом, показано, что управлением температурным полем позволяет существенно управлять параметрами формоизменения заготовки в процессахковки крупных поковок.

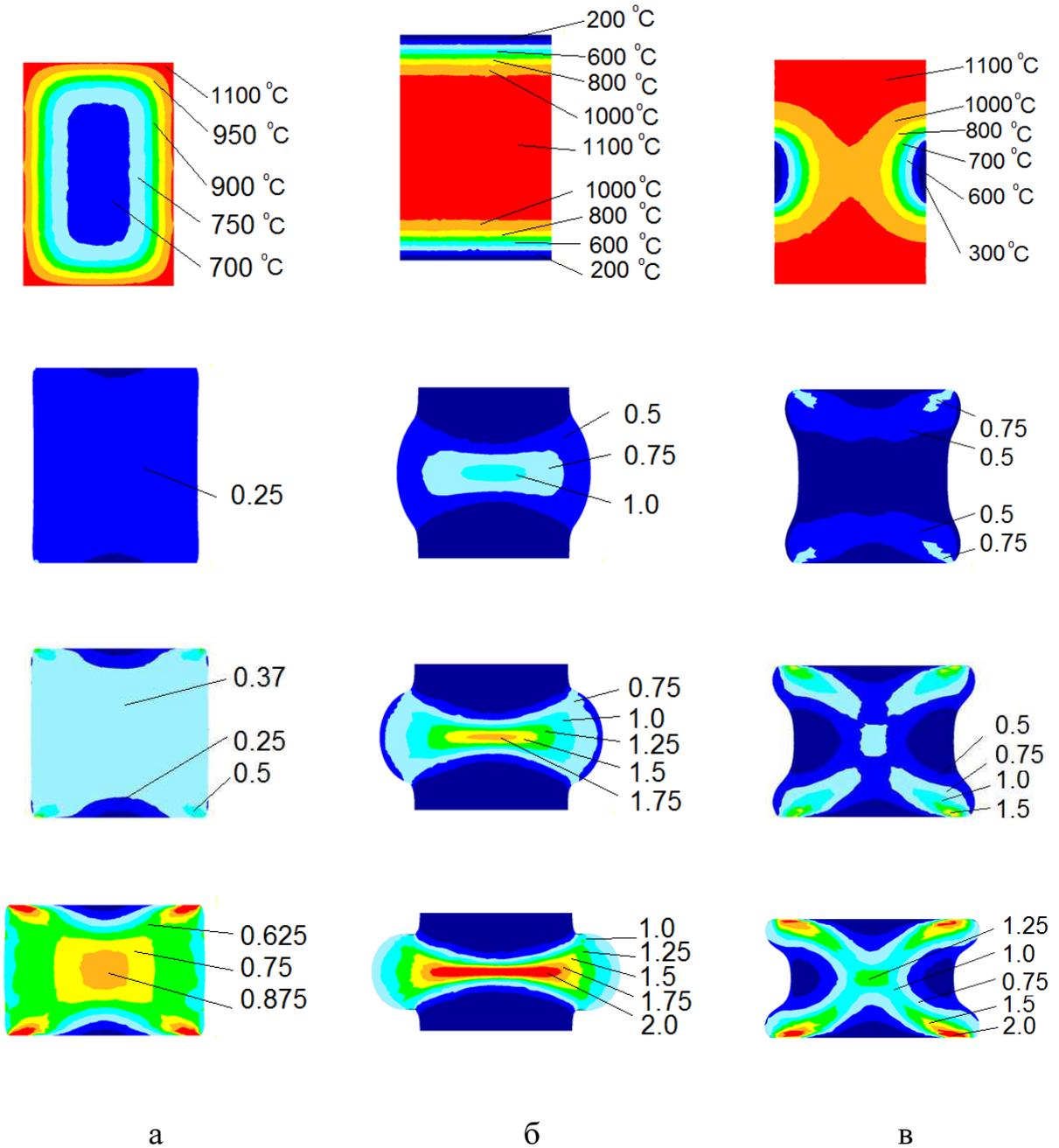


Рисунок 6.35 - Поля распределения температуры и интенсивности деформаций в продольном сечении заготовок в процессах осадки по различным схемам

6.3.3. Влияние теплового состояния на микроструктуру заготовки в процессе осадки плоскими плитами

Проведены экспериментальные исследования по осадке цилиндрических образцов из стали 40Х, диаметром 18 мм и высотой 20 мм [324]. Образцы изготавливались из одного куска проката и перед деформированием проходили отжиг, который заключался в выдержке образцов при температуре 880 °С в течении 5 минут и охлаждении вместе с печью. Деформирование происходило после того как холодные образцы помещали в печь нагретую до 1100 °С и выдерживали в течении 11 минут. Деформировали осадкой на различную высоту, степени деформации 0%, 32%, 47,5%, 63,5% (рис. 6.36), после чего одни образцы помещали в печь с температурой 1050 °С и медленно охлаждали (отжиг), вторые образцы охлаждали на воздухе на керамической подкладке (нормализация), третьи образцы проходили специальную обработку в сыпучем графите.

При погружении заготовки в сыпучий графит вокруг заготовки образуется оболочка из графита, имеющая высокую температуру. В результате этого между наружной поверхностью заготовки и внутренней поверхностью оболочки, контактирующей с заготовкой, обеспечивается плотный температурный контакт. Высокая температура оболочки снижает ее теплопроводность, а поэтому возможное выделение внутреннего тепла за счет превращений будет аккумулироваться в зоне превращения, что при отсутствии потерь тепла, будет обеспечивать постоянство температуры до завершения превращений. После чего из образцов изготавливались шлифы, и исследовалась их микроструктура. Т.к. при осадке в заготовке наблюдается неравномерное распределение деформаций и их наибольшая величина локализована в центральной ее части, то микроструктуру образцов исследовали именно в этой зоне. Фотографии микроструктуры приведены в табл. 6.11.

Из табл. 6.11 видно, что наибольшая величина зерна в заготовках прошедших отжиг, наименьшая в заготовках, прошедших нормализацию и специальную обработку в сыпучем графите. Кроме того видно, что с увеличением степени осадки зерно в образцах дробиться, что положительно влияет на



Рисунок 6.36 - Общий вид цилиндрических образцов после осадки

Таблица 6.11 – Микроструктура осаженных на различную высоту образцов стали 40Х (увеличение x100)

| | Печь | Воздух | Графит |
|-------|------|--------|--------|
| 0% | | | |
| 32% | | | |
| 47% | | | |
| 63,5% | | | |

механические свойства металла.

Данное исследование подтверждает выдвинутое ранее предположение о влиянии горячей пластической деформации на структуру металла.

Выводы

1. Установлены особенности напряженно-деформированного состояния заготовки в процессековки плитамиспециальной формы. Получена математическая модель осадки заготовки плитой со скосом, позволяющая прогнозировать параметры ее формоизменения. Установлено влияние геометрии инструмента на положение зоны раздела течения металла при высадке. При увеличении относительной высоты заготовки $\bar{H1} = H1/H$ от 0,1 до 0,3 величина \bar{x} увеличилась от 0,3 до 0,4, а при увеличении $\bar{H1}$ от 0,4 до 1,0 величина \bar{x} незначительно уменьшилась от 0,35 до 0,3, при увеличении угла скоса верхней плиты от 5^0 до 25^0 величина \bar{x} уменьшилась от 0,65 до 0,37. Определено, что при осадке заготовки с эксцентриситетом в кольцах по ходу ее деформирования величина эксцентриситета практически не изменяется, что позволяет рекомендовать получение требуемого эксцентриситета до высадки.

2. Предложен способ осадки профилированных цилиндрических заготовок в виде цилиндра с конусными уступами, позволяющий снизить неравномерность распределения деформаций в поперечном сечении заготовки и повысить точность поковок типа дисков получаемых с применением операции осадки. Установлено, что на величину неравномерности распределения деформаций существенное влияние оказывает диаметр и длина уступов заготовки. Чем меньше диаметр уступов заготовки, тем меньше неравномерность распределения деформаций. Наибольшая равномерность распределения деформаций наблюдается при осадке заготовки с уступами, длина которых равна 10...15% длины исходной заготовки. Установлено, что при осадке заготовок с коническими уступами можно уменьшить зону малых деформаций от 10...14% площади поперечного сечения для осадки цилиндрической заготовки до 2...4% для осадки профилированной заготовки с относительным диаметром уступов 0,7. Относительная длина уступов не влияет на величину зоны малых деформаций. Бочкообразность заготовки уменьшается с увеличением длины уступов и уменьшения их диаметра. В процессе осадки профилированной заготовки на ее боковой поверхности возникают сжимающие

напряжения, величина которых тем больше, чем меньше диаметр уступов заготовки. Экспериментально установлено, что при осадке профилированных заготовок со значительной высотой происходит потеря их устойчивости. Рекомендуемое отношение высоты к диаметру средней части профилированной заготовки должно быть меньше 2,5, что возможно при ковке слитков с соотношением высоты к диаметру тела слитка 2,0 и менее.

3. Предложен способ последовательной осадки плоскими и конусными плитами для устранения зон металла заготовки с низкой проработкой и уменьшения неравномерности распределения механических свойств в поковке. Проведено моделирование способов осадки плоскими плитами и последовательной осадки и изгиба выпукло вогнутыми плитами. По результатам моделирования построены поля распределения логарифмических деформаций по сечению заготовки и графики распределения деформаций вдоль радиуса заготовки в различных слоях. Установлено, что способ последовательной осадки позволяет повысить проработку металла заготовки в зонах затрудненной деформации до нескольких раз. Так при сравнении двух способов осадки предложенный способ позволил повысить деформации практически от 0,025 до 0,4 единиц в зоне затрудненных деформаций уменьшив неравномерность деформаций.

4. Установлено, что осадкой узким бойком цилиндрической заготовки, можно профилировать боковую поверхность заготовки. Предложенный способ осадки заготовок позволяет существенно снизить бочкообразность. Установлено, что разгонка осадкой, для наибольшей эффективности, должна проводиться узким бойком с относительной шириной $\bar{X} = 0,1..0,3$, причем исходная цилиндрическая заготовка должна быть с относительной высотой $H/D \geq 1,0$. Используя полученные математические, графические зависимости и приведенную методику можно точно определить параметры процесса осадки разгонкой узким бойком для получения поковок типа дисков с минимальной неравномерностью распределения деформаций по объему и минимальной величиной бочкообразности.

5. Для процесса осадки крупных заготовок разгонкой узким бойком,

разработана методика расчета параметров формоизменения, на основании которой предлагается рассчитывать режимы ковки. По результатам математического моделирования получена регрессионная модель, позволяющая рассчитывать отклонение формы поперечного сечения заготовки в зависимости от геометрических параметров заготовки, инструмента и режима ковки. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают адекватность полученных теоретических решений. По запросу ОАО «Русполимет», проведен расчет режима процесса осадки разгонкой поковки диск. Разработанный режим позволяет получать поковку с максимально приближенной формой поперечного сечения к круглой.

6. Предложен способ осадки заготовок с неравномерным температурным полем, который заключается в форсированном нагреве «холодной» заготовки и последующей осадке плоскими плитами. Данный способ позволяет снизить неравномерность распределения деформаций в поперечном сечении заготовки и снизить величину бочкообразности. Наибольшее снижение наблюдается при нагреве заготовки относительной высотой 1000 мм, исходной температурой 700 °С до температуры поверхности 1100 °С и осадке более чем на 30%. Нагрев необходимо осуществлять таким образом, чтобы обязательно образовывалось неравномерное температурное поле с максимально возможным перепадом температур по сечению заготовки.

7. Установлено, что горячая деформация различных сталей позволяет уменьшить размер их зерна, что положительно отражается на их механических свойствах. Проведенные эксперименты подтвердили данное положение для деформирования образцов из стали 40Х, которые прошли три различных вида термической обработки. Проектирование технологических процессов ковки крупных поковок и других видов горячей обработки металлов давлением, должно быть с учетом данного влияния.

РАЗДЕЛ 7

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОВКИ ПОКОВОК ТИПА КОЛЕЦ И ТРУБ

7.1 Управление НДС заготовки варьированием ее формы и формы инструмента

7.1.1 Исследование процесса ковки поковок типа конических колец

Изделия типа крупногабаритных конических колец достаточно распространены в машиностроении и энергетической промышленности. Наиболее целесообразным способом получения таких изделий является раскатка ступенчатой заготовки, т.к. данный способ не предъявляет особых требований к наличию специальной оснастки. Информация по данному способу ковки практически отсутствует как в отечественной, так и в зарубежной литературе, что сдерживает применение его в производстве. Исследование, направленное на расширение области знаний о данном способе и на создание методики проектирования процессов ковки конических колец, является актуальным.

Проведено физическое моделирование процесса ковки конусного бандаж на основе способа раскатки ступенчатой полой заготовки плоским бойком на цилиндрическом дорне [325]. Моделирование проводилось на свинцовых образцах. Процесс изготовления конусного бандаж схематически представлен на рис. 7.1.

Исходная заготовка изготавливалась из свинца в специальной оснастке (см. рис. 7.1-7.2). Наружный диаметр заготовки 60 мм, диаметр отверстия 40 мм. Раскатка производилась на гладком дорне диаметром 34 мм. Варьируя величину утолщения на заготовке, были получены конусные бандаж с различной величиной конусности. Варьировалось соотношение высоты бурта и высоты заготовки при неизменных диаметральных размерах. Получали заготовки с диаметром бурта (D_2) 77 мм и высотой (H_1) 9, 13 и 17 мм. На рис. 7.3 представлен график, зависимости величины угла конуса полученного бандаж

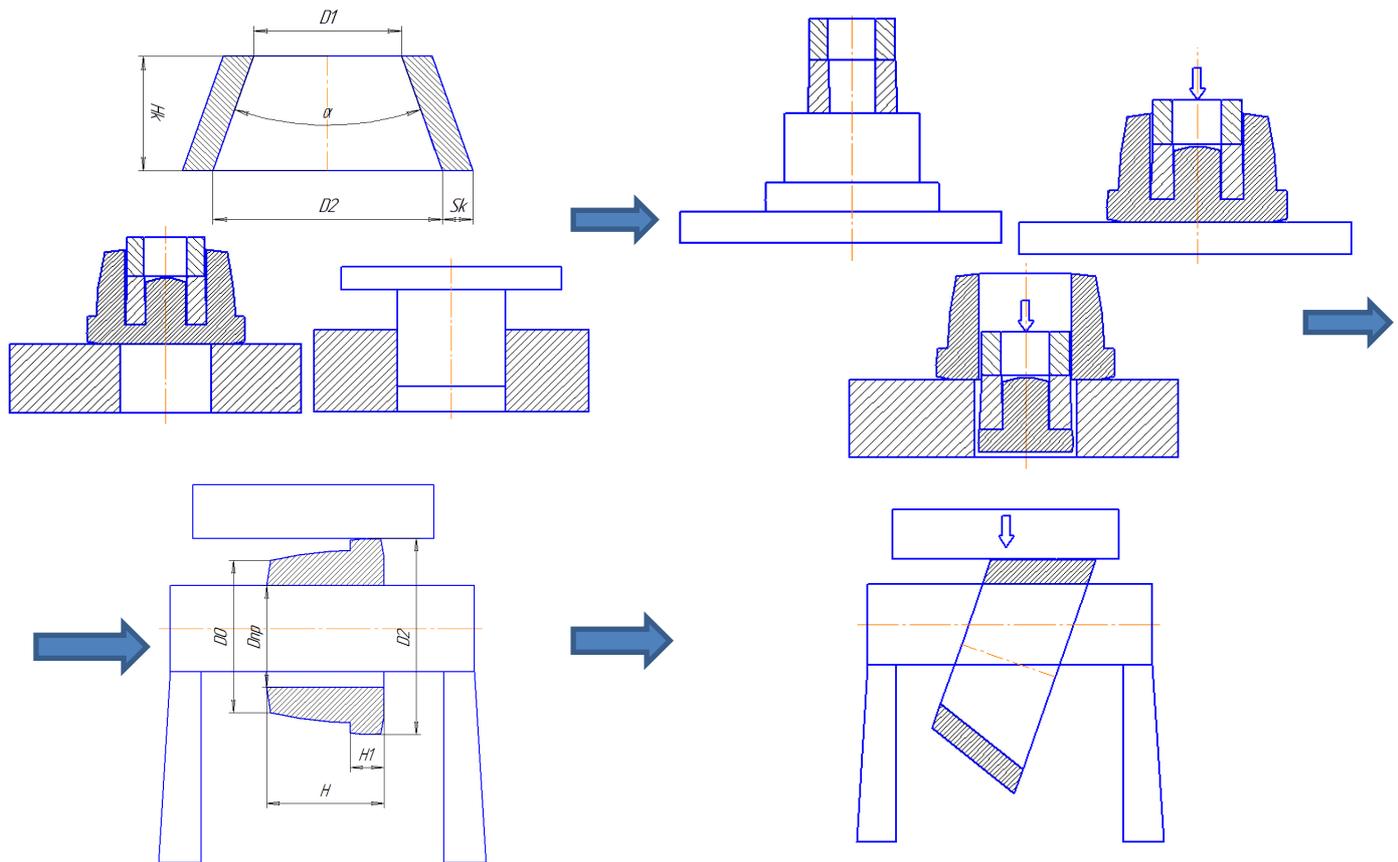


Рисунок 7.1 - Переходы ковки конического бандаж раскаткой ступенчатой заготовки



Исходная заготовка



Заготовка после высадки



Установка прошивня



Заготовки после раскатки

Рисунок 7.2 - Поэтапное деформирование заготовки при ковке конического бандаж

жа от относительной высоты бурта заготовки построенный по результатам физического моделирования.

Полученная зависимость (рис. 7.3) позволяет сделать вывод о том, что высота бурта исходной заготовки определяет величину конусности получаемого банджа. Также можно заметить, что существуют значения относительной высоты бурта заготовки, при которых конусность после раскатки будет наибольшей.

Для анализа деформированного состояния заготовки в процессе раскатки использован метод конечных элементов. Моделировался процесс раскатки полой заготовки со ступенчатой наружной поверхностью. Размеры заготовки были следующие: $D_2 = 1500$ мм, $D_0 = 1250$ мм, $D_{np} = 500$ мм, $H_1 = 300$ мм, $H_1 = 690$ мм. В качестве материала заготовки принималась сталь 45, заготовка нагревалась до температуры 1100°C , деформирование производилось с постоянной скоростью равной 10 мм/с.

На рис. 7.4 показаны поля распределения деформаций по сечению заготовки в процессе раскатки. Анализ полей распределения деформаций по сечению заготовки позволяет сделать следующие выводы. В начале обжатия ступенчатой заготовки бойком деформируется ее фланцевая часть. Наибольшие деформации сосредотачиваются у бурта заготовки, здесь их величина достигает 0,5 единиц. Установлено, что у бурта заготовки образуется зажим. Это говорит о том, что необходимо усовершенствовать форму заготовки под раскатку. Часть заготовки с меньшим наружным диаметром деформируется менее интенсивно.

На рис. 7.4 б показана заготовка после девятого нажима. Каждый нажим выполнялся с ходом 100 мм. Видно, что уже после первого прохода по контуру заготовки верхним бойком образуется конусность. Это объясняется тем, что при обжатии основные деформации сосредотачиваются в области заготовки возле бурта. Такое деформирование и обуславливает интенсивную раздачу кольца с одной стороны.

В случае раскатки заготовки со ступенчатым наружным контуром без

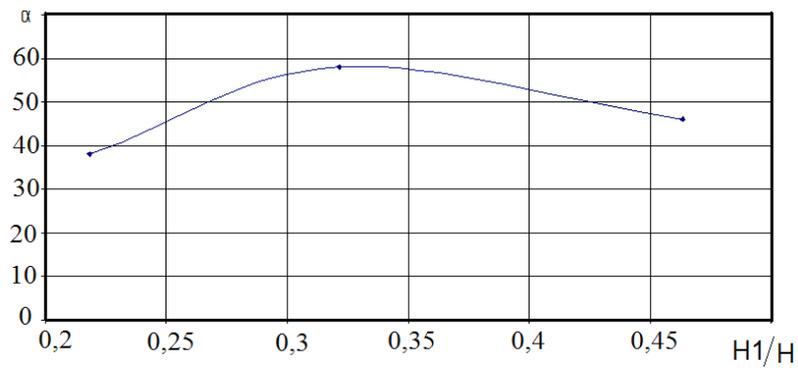


Рисунок 7.3 - График зависимости угла конусности бандажа α от относительной высоты бурта H_1/H на заготовке ($D_2/D_0 = 1,28$)

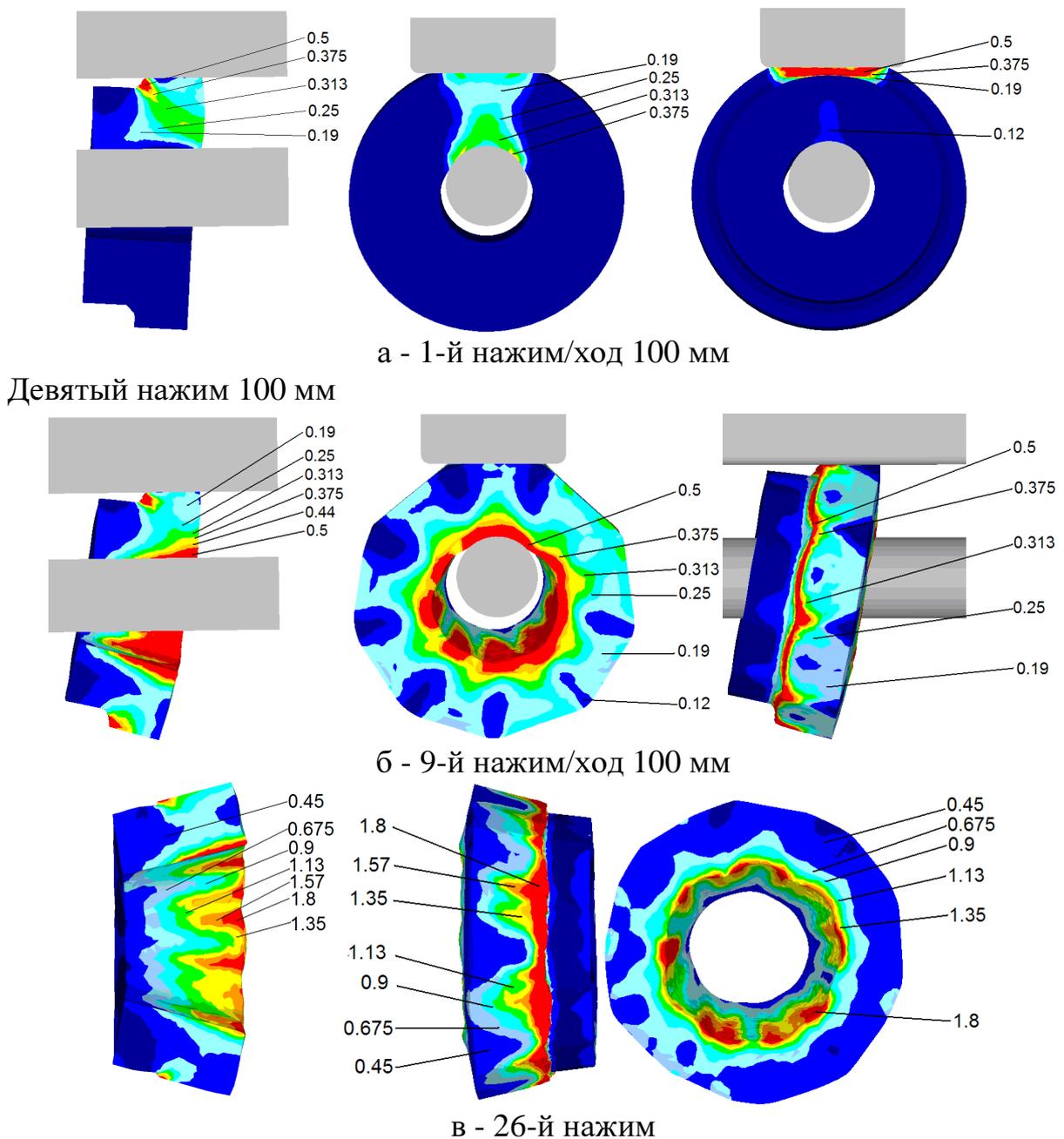


Рисунок 7.4 - Поля распределения логарифмических деформаций по сечению заготовки по этапам в процессе раскатки

плавного перехода может образоваться поверхностный зажим, что и подтвердило проведенное исследование. Установлено, что для рассматриваемого случая, начиная с 10-го нажима, при раскатке ступеньки начинает образовываться зажим на поверхности кольца.

Образование зажима при раскатке ступенчатой части кольца, является нежелательным дефектом, так как это приведет к увеличению припусков, что повлечет за собой увеличения объема необходимого металла и соответственно стоимости изделия. Избежать появления такого дефекта можно выполнив на наружной поверхности заготовки конический переход от бурта к меньшему диаметру или сформировав радиусное закругление в месте перехода.

При исследовании влияния на зажим формы и размеров переходной поверхности было проведено математическое моделирование раскатки заготовок с различными переходами от бурта к меньшему диаметру. Размеры заготовки были выбраны такие же, как и при исследовании деформированного состояния заготовки. Результаты моделирования приведены на рис. 7.5, из которого видно, что при деформировании бурта заготовки без плавного перехода (см. рис. 7.5 а) плоским бойком происходит формирование зажима на первых этапах обжатия. Формирование зажима начинается уже при ходе 10 мм, с учетом того, что весь ход составлял 100 мм. В случае, когда угол перехода у бурта составил 25° (см. рис. 7.5 в), зажим в процессе обжатия не сформировался. В случае применения заготовки с радиусным переходом, образование зажима прекращается при деформировании заготовки с радиусом, равным $0,8 \dots 1$ высоты бурта.

На основе полученных рекомендаций подобрана соответствующая заготовка и проведен расчет раскатки конического кольца. Размеры заготовки: $D = 1120$ мм, $D_1 = 1020$ мм, $D_0 = 520$ мм, $H = 550$ мм, $H_1 = 300$ мм. В качестве материала заготовки принималась сталь 45, заготовка нагревалась до температуры 1200°C , деформирование производилось с постоянной скоростью, равной 10 мм/с. Наружная поверхность заготовки выполнена с фаской у бурта, угол которой равен 25° .

На рис. 7.6 показано поле распределения деформаций по сечению заготовки после раскатки, из которого видно, что поверхность заготовки не имеет дефектов. Экспериментально получены конические кольца различных размеров, фотографии которых приведены на рис. 7.7.

На основе планирования эксперимента, регрессионного анализа и результатов экспериментальных исследований получена математическая модель, описывающая влияние геометрических параметров заготовки на конусность раскатываемого кольца. При проведении анализа полученной модели были построены графики зависимости угла конусности кольца от различных геометрических параметров заготовки.

Анализ графиков показывает, что при варьировании высоты бурта в промежутке $H_1 = 100 \dots 900$ мм угол конусности изменяется по параболической зависимости (рис. 7.8). Конусность кольца резко увеличивается при увеличении высоты бурта до 450 мм. При изменении высоты бурта от 450 до 900 мм конусность угла бандажа уменьшается. Это можно объяснить тем, что когда высота бурта слишком мала, то соответственно и малое количество металла подвергается деформации, которая влияет на конусность. При большой высоте бурта, уширение сдерживает небольшая высота кольца. Таким образом, наибольший угол конуса будет получен при соотношении высоты бурта к высоте кольца, находящимся в районе 0,5. Данная зависимость подтверждается для различных диаметральных параметров заготовки.

Изменение внешнего диаметра кольца $D_1 = 1500 \dots 1700$ мм показало, что конусность угла бандажа уменьшается, при постоянных параметрах H , H_1 , D , D_0 . Для различных величин $H_1 = 100, 500, 900$ мм угол изменяется в пределах 15° . Данная зависимость подтверждена для различных значений высоты бурта (см. рис. 7.8).

В результате варьирования диаметра бурта была получена практически линейная зависимость (см. рис. 7.8). Увеличение диаметра бурта в пределах $D = 1100 \dots 1500$ мм привело к постоянному увеличению конусности от 0° до 50° . Наибольший угол конусности наблюдается при наибольшем диаметре

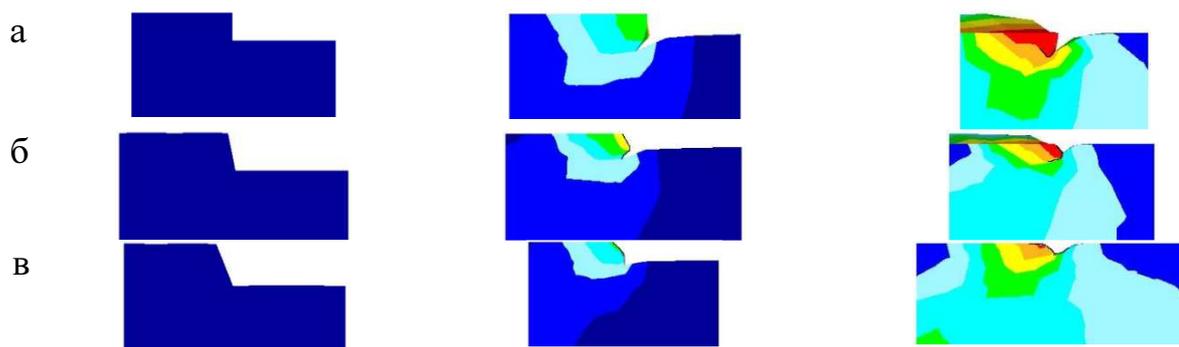


Рисунок 7.5 - Поля распределения интенсивности логарифмической деформации по ходу обжатия ступенчатой заготовки плоским бойком в зоне ступеньки (а – угол наклона ступени 0° ; б – 10° ; в – -25°)

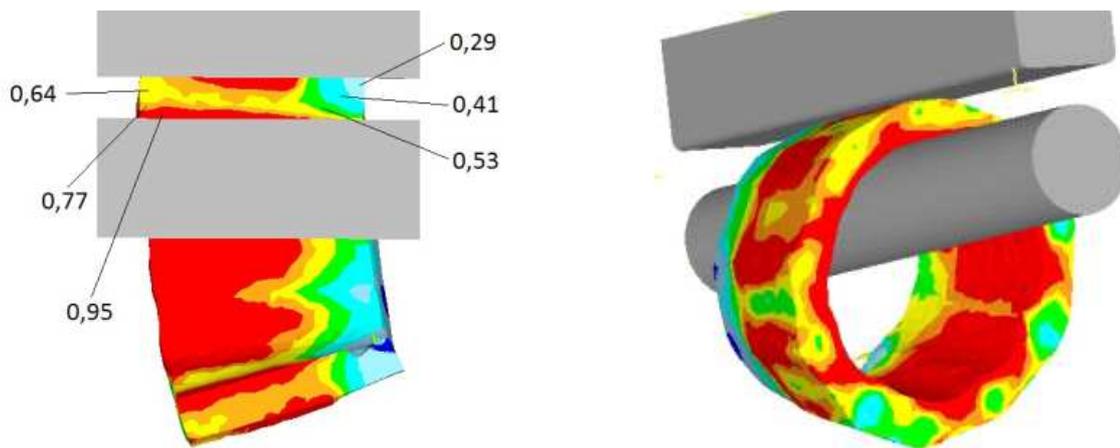


Рисунок 7.6 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций после полной раскатки ступеньки



Рисунок 7.7 - Конические кольца, полученные экспериментально

бурта. При этом варьирование внутреннего диаметра незначительно влияло на изменение угла. Так для $D_0 = 600, 630, 660$ мм изменение угла находится в пределах 5° .

Применяя профилированную заготовку, ковкой можно получать и более сложную конфигурацию изделий, такую как цилиндр с раструбом. В этом случае необходимо применять также цилиндрическую полу заготовку со ступенчатым наружным контуром, и раскатку нужно вести узким бойком. Бурт на заготовке в этом случае должен иметь малую длину, чтобы при раскатке оставалась жесткая недеформированная цилиндрическая часть заготовки.

На рис. 7.9 показаны результаты моделирования процесса раскатки ступенчатой цилиндрической заготовки на гладком дорне. Видно, что в процессе раскатки заготовка наклоняется под действием деформирующего инструмента и очевидно, что размер конусности получаемого раструба будет ограничен соотношением диаметра дорна и внутренним диаметром кольца. Так в случае, когда диаметр дорна будет не на много отличаться от внутреннего диаметра кольца, в процессе раскатки заготовка, повернувшись вдоль дорна, упрется в него, что будет препятствовать увеличению конусности.

Моделирование показало, что очаг деформации по длине заготовки ограничен длиной исходного бурта, не на много превышая ее, что, однако должно быть учтено при назначении припусков и напусков на деталь.

Определять размер бурта при раскатке для получения строго определенных размеров конечного изделия возможно, используя следующую методику, которая была разработана на основании работы [71].

1. Необходимо определить площадь поковки со стороны меньшего ее основания:

$$f = \frac{\pi}{4}(d_{k1}^2 - d_k^2),$$

где d_k, d_{k1} – соответственно внутренний и наружный диаметры поковки

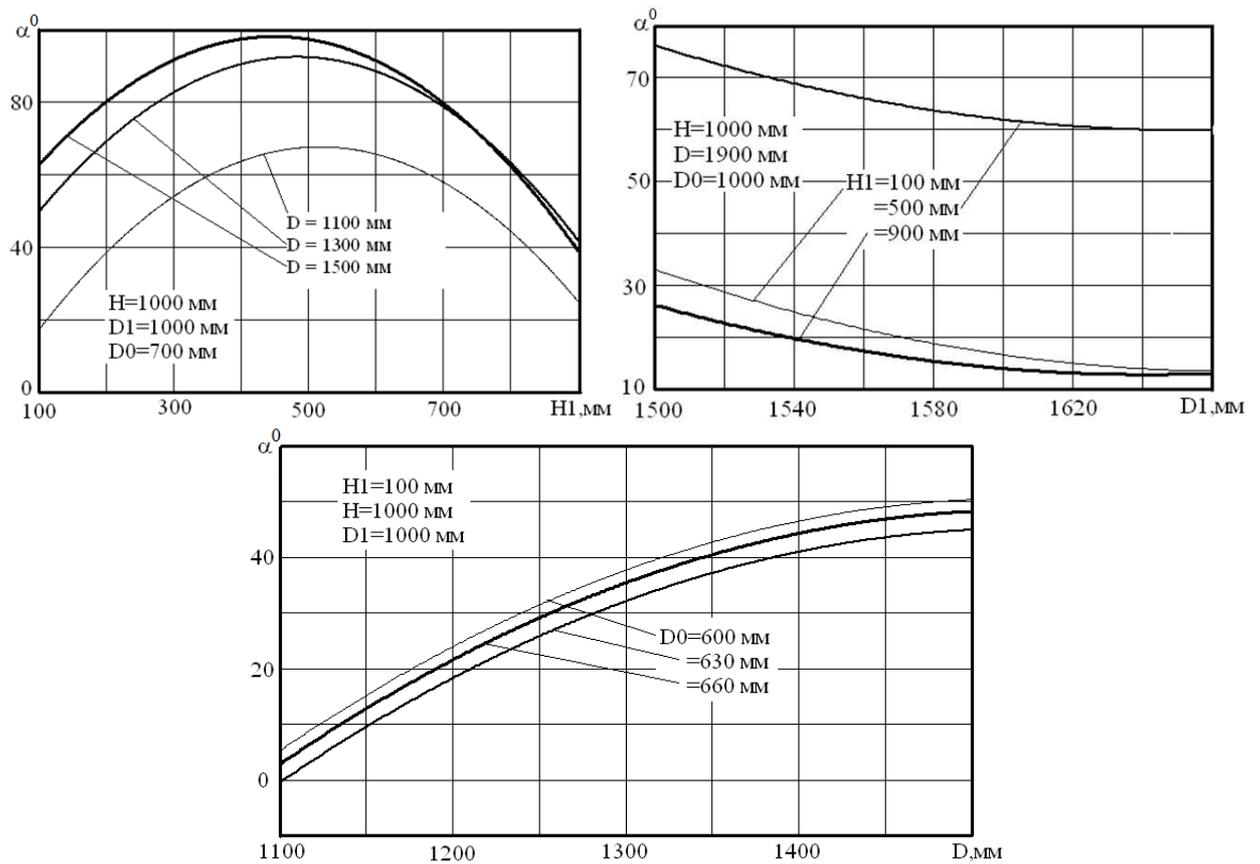


Рисунок 7.8 - График зависимости угла конусности получаемого кольца от геометрических параметров заготовки

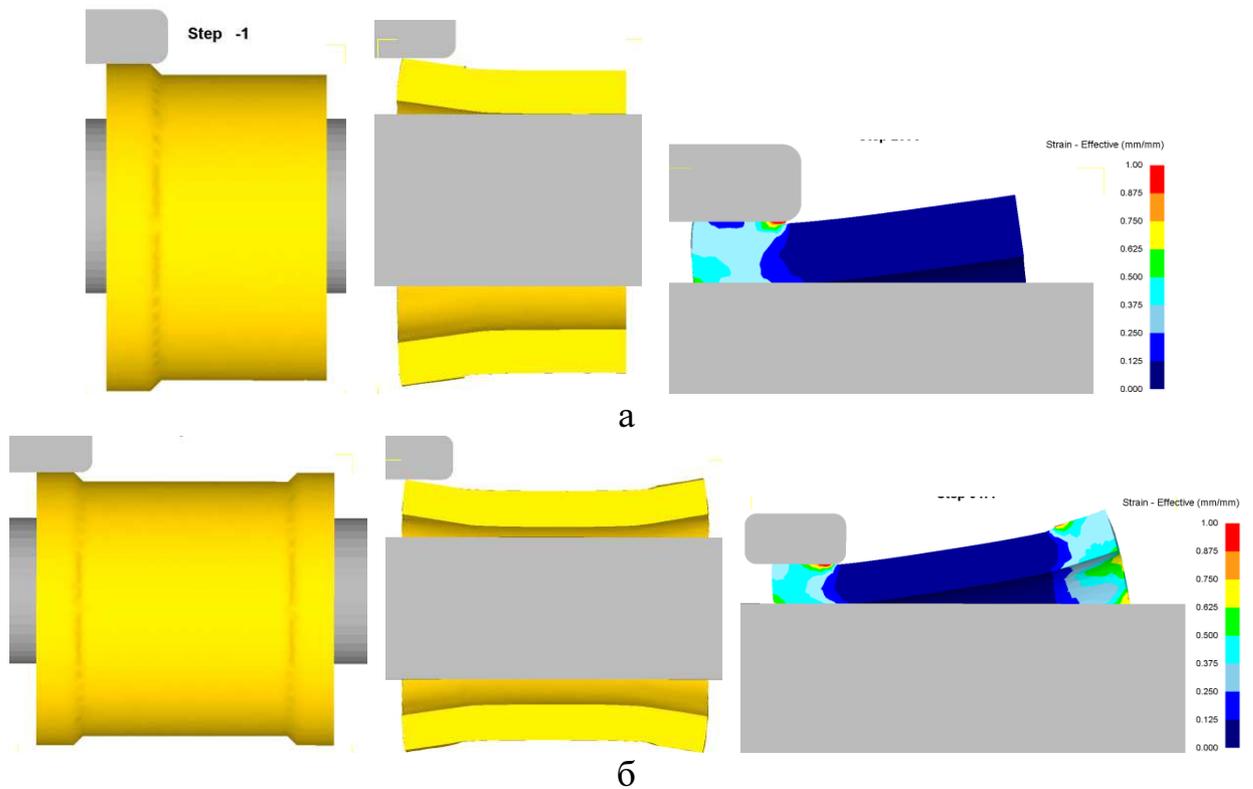


Рисунок 7.9 - Сложнопрофилированные цилиндрические поковки, полученные раскаткой на оправке из ступенчатой заготовки

со стороны меньшего ее основания.

2. Необходимо определить площадь поковки со стороны большего ее основания:

$$F = \frac{\pi}{4}(D_{k1}^2 - D_k^2),$$

где D_k , D_{k1} – соответственно внутренний и наружный диаметры поковки со стороны большего ее основания.

3. Задавшись внутренним диаметром заготовки для раскатки (исходя из особенностей технологического процесса, производственных условий и т.д.) D_0 и приняв что площадь заготовки со стороны меньшего основания равна площади торца кольца с этой же стороны, определяем наружный диаметр заготовки D_1 :

$$f = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_0^2);$$

$$D_1 = \sqrt{d_{k1}^2 - d_k^2 + D_0^2}.$$

4. Аналогично определяем наружный диаметр со стороны большего основания заготовки:

$$D = \sqrt{D_{k1}^2 - D_k^2 + D_0^2}.$$

5. Для определения длины исходной заготовки необходимо знать коэффициент ее уширения в процессе раскатки k_y , для чего можно воспользоваться данными работы [36], полученными экспериментально для определенных размеров кольца.

$$H = H_k / k_y.$$

б. Зная объем поковки (V), которую необходимо получить, и пользуясь условием постоянства объема, определяем длину бурта заготовки H_1 .

$$H_1 = \frac{4 \cdot V - H(D^2 - D_0^2)}{D^2 - D_1^2}.$$

7.1.2 Ковка труб из бесприбыльных слитков

7.1.2.1 Осадка бесприбыльных слитков плоскими плитами

Основным недостатком бесприбыльных слитков является наличие усадочной раковины и осевой пористости в теле слитка. Такие слитки в основном применяются для ковки полых поволоков типа колец и труб. Для увеличения качества поволоков, получаемых из бесприбыльных слитков, необходимо разработать способы удаления некачественного металла из центра слитка. Для этого необходимо определить параметры усадочной раковины в бесприбыльных слитках и, используя полученные данные, изучить процесс ковки бесприбыльных слитков с использованием процесса осадки слитка на плите с отверстием.

Объем, глубина и форма усадочной раковины определяются следующими факторами: типом и формой слитка (уширенный книзу, уширенный кверху, спокойный, кипящий блюминговый, листовой, без утепления прибыли, с утеплением шамотным кирпичом или теплоизолирующим вкладышем); химического состава стали (в основном, содержанием углерода, который определяет коэффициент усадки стали, условия образования «границы выливаемости» - относительное количество твердой фазы, при котором образуется сплошной скелет сросшихся твердых кристаллов); скоростями продвижения границы выливаемости в прибыли и тела слитка, зависящими от температуры их поверхностей, находящихся при различных условиях охлаждения.

По известной методике [326, 327] формула для определения глубины усадочной раковины (рис. 7.10) выглядит следующим образом:

$$y = \frac{\alpha \cdot (V + v)}{2 \cdot Q} + \sqrt{\left[\frac{\alpha \cdot (V + v)}{2 \cdot Q} \right]^2 + m^2 \cdot R^2}, \quad (7.1)$$

где Q - средняя площадь усадочной раковины, мм²; V , v - объем слитка без прибыли и объем самой прибыли соответственно, мм³; α - относительный коэффициент объемной усадки стали при затвердевании; m - относительная скорость затвердевания металла в прибыли слитка от верхней поверхности; R - толщина (радиус) слитка, мм.

Исходя из того, что в основном усадочная раковина имеет форму близкую к конусу, о чем свидетельствует работа [327] рис. 7.11, средняя площадь ее будет вычисляться по следующей зависимости:

$$Q = \frac{\pi}{12} \cdot D_{осн}^2, \quad (7.2)$$

где $D_{осн}$ - диаметр основания усадочной раковины, который совпадает в большинстве случаев с диаметром прибыли слитка, мм.

Относительный коэффициент объемной усадки стали α при затвердевании колеблется от 0,025 (2,5%) до 0,03 (3%) для углеродистых сталей и около 0,04 (4%) для легированных сталей. Более точный коэффициент усадки можно определить по табл. 7.1.

Относительная скорость затвердевания металла m в различных работах изменяется от 0,65 до 0,403 [326, 327]. Скорость затвердевания металла будет зависеть от температуры поверхности слитка и его химического состава (концентрации углерода) в различных сечениях. Наихудшим условиям с точки зрения величины усадочной раковины будет отвечать относительная скорость затвердевания, равная 0,65.

Формулу для расчета глубины усадочной раковины, возможно, применять и для бесприбыльных слитков, в таком случае она будет иметь несколько иной вид:

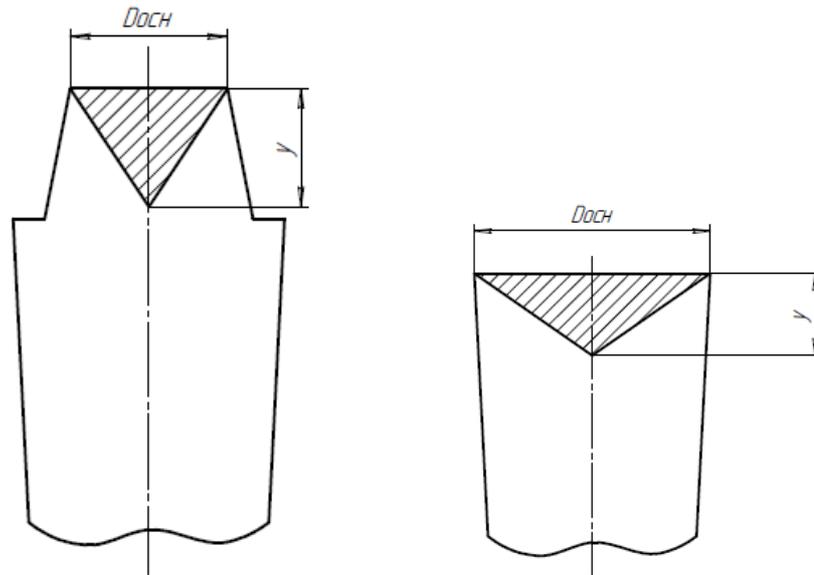


Рисунок 7.10 - Схема образования усадочной раковины в обычном кузнечном (а) и бесприбыльном (б) слитках

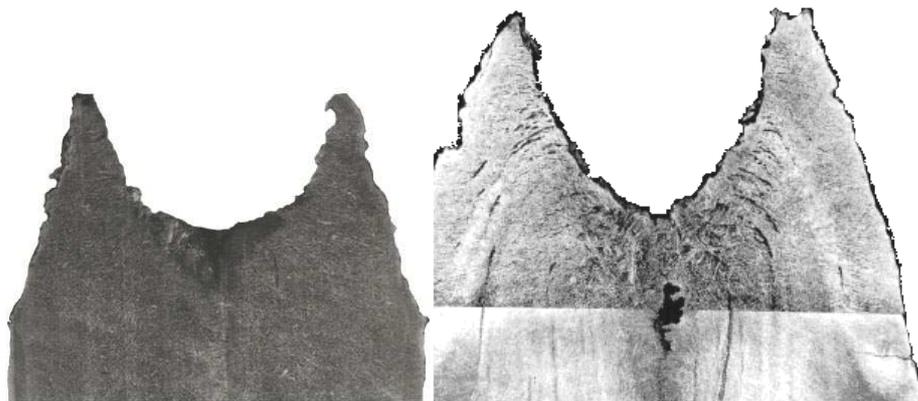


Рисунок 7.11 - Усадочная раковина, образовавшаяся в прибыльной части слитка массой 18 т (а) и 27 т (б)

Таблица 7.1 - Коэффициенты усадки при затвердевании и остывании стали

| Содержание углерода, % | При охлаждении жидкой стали на 100 °С | При затвердевании | Общая | Содержание углерода, % | При охлаждении жидкой стали на 100 °С | При затвердевании | Общая |
|------------------------|---------------------------------------|-------------------|-------|------------------------|---------------------------------------|-------------------|-------|
| 0,10 | 1,50 | 3,12 | 4,62 | 0,60 | 1,62 | 4,04 | 5,66 |
| 0,20 | 1,50 | 3,39 | 4,89 | 0,70 | 1,62 | 4,08 | 5,70 |
| 0,30 | 1,59 | 3,72 | 5,31 | 0,80 | 1,68 | 4,05 | 5,73 |
| 0,40 | 1,59 | 4,03 | 5,62 | 0,90 | 1,68 | 4,02 | 5,70 |
| 0,50 | 1,62 | 4,13 | 5,75 | 1,00 | 1,75 | 3,90 | 5,65 |

$$y = \frac{\alpha \cdot V}{2 \cdot Q} + \sqrt{\left[\frac{\alpha \cdot V}{2 \cdot Q} \right]^2 + m^2 \cdot R^2}, \quad (7.3)$$

По описанной выше методике произведен расчет абсолютных и относительных (отношение глубины усадочной раковины к длине тела слитка) величин усадочных раковин для бесприбыльных слитков различного тоннажа. Параметры слитков и их размеры брались из [259] такими же, как и размеры обычных кузнечных слитков, только без прибыльной части. В расчетах принимались наихудшие условия кристаллизации слитка, т.е. объемная усадка 4% и относительная скорость затвердевания металла 0,65. Результаты расчета представлены в таблице 7.2.

По результатам расчетов построена графическая зависимость относительной глубины усадочной раковины, образующейся после затвердевания жидкой стали в изложнице, от отношения высоты тела слитка к его среднему диаметру (рис. 7.12).

Из рис. 7.12 четко видно, что при увеличении относительной высоты тела слитка относительная глубина усадочной раковины уменьшается. В слитках с соотношением высоты к диаметру, близкому к 3-3,5, глубина усадочной раковины не достигает 20% от высоты тела слитка, а в укороченных слитках с отношением высоты тела слитка к его среднему диаметру близкому к 1 глубина усадочной раковины достигает 40% от высоты тела слитка. По результатам обработки расчетных данных получена математическая зависимость относительной глубины усадочной раковины от относительной высоты тела слитка. Данную зависимость необходимо учитывать при разработке технологических процессовковки крупных поковок из бесприбыльных слитков.

Из-за рентабельности применения бесприбыльных слитков при производстве крупных поковок различной конфигурации следует, что разработка режимовковки слитков, обеспечивающих удаление из слитка некачественного металла, является актуальной. Как показано в работе [238], удаление уса-

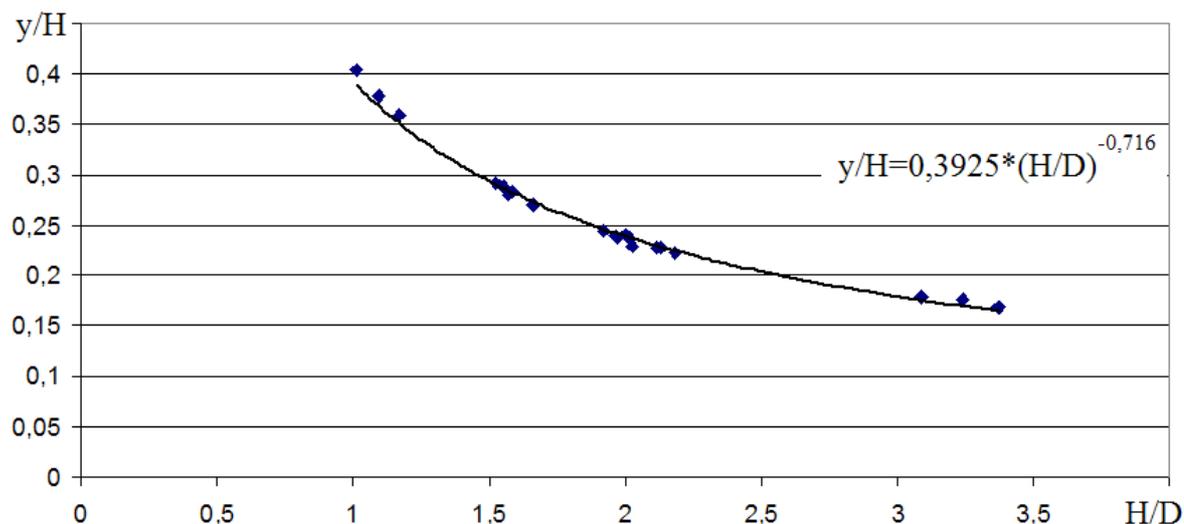


Рисунок 7.12 - График зависимости относительной высоты усадочной раковины от относительной высоты тела слитка

Таблица 7.2 - Параметры расчета величины усадочной раковины

| Масса обычного слитка, т | Масса слитка без прибыли, т | Объем слитка, мм ³ | Диаметр тела слитка, мм | Высота тела слитка, мм | Средняя площадь усадочной раковины, мм ² | Глубина усадочной раковины, мм | Относительная глубина усадочной раковины | H/D тела слитка |
|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------|---|--------------------------------|--|-----------------|
| Слитки НКМЗ | | | | | | | | |
| 1,6 | 1,325 | 168789808 | 435 | 1280 | 49513,9 | 225,1 | 0,176 | 3,24 |
| 3,5 | 3 | 382165605 | 570 | 1760 | 85015,5 | 295,8 | 0,168 | 3,37 |
| 4 | 3,5 | 445859872 | 620 | 1730 | 100584,7 | 308,8 | 0,178 | 3,08 |
| 6 | 4,255 | 542038216 | 648 | 1965 | 109874,88 | 331,2 | 0,168 | 3,37 |
| 7,5 | 6,057 | 771592356 | 880 | 1375 | 202634,66 | 372,12 | 0,27 | 1,66 |
| 10 | 8,215 | 1046496815 | 890 | 1725 | 207266,2 | 407,4 | 0,236 | 2,01 |
| 10,3 | 8,057 | 1026369427 | 985 | 1465 | 253875,54 | 411 | 0,28 | 1,57 |
| 21 | 17,085 | 2176433121 | 1150 | 2170 | 346054,2 | 520,1 | 0,240 | 1,96 |
| 30 | 24,4 | 3108280255 | 1265 | 2570 | 418725,5 | 585,6 | 0,228 | 2,11 |
| 45 | 36,74 | 4680254777 | 1400 | 2935 | 512866,7 | 672,8 | 0,229 | 2,02 |
| 68 | 55,4 | 7057324841 | 1705 | 3155 | 760671,5 | 769,9 | 0,244 | 1,92 |
| 87 | 70,93 | 9035668790 | 1800 | 3470 | 847800,0 | 835,8 | 0,241 | 2 |
| 104 | 84,23 | 10729936306 | 1900 | 3900 | 944616,7 | 885,1 | 0,227 | 2,13 |
| 132 | 106,9 | 13617834395 | 2100 | 4020 | 1153950,0 | 958,2 | 0,238 | 1,97 |
| 170 | 138,70 | 17669426752 | 2226 | 4700 | 1296578,2 | 1045,6 | 0,222 | 2,18 |
| Слитки предприятия «Ижорский завод» | | | | | | | | |
| 34,5 | 26,469 | 3371847134 | 1500 | 2135 | 588750 | 615,3 | 0,288 | 1,55 |
| 51 | 38,8 | 4942675159 | 1720 | 2400 | 774114,66 | 701 | 0,29 | 1,52 |
| 60,6 | 44,7 | 5694267516 | 2030 | 2050 | 1078302,1 | 773 | 0,37 | 1,09 |
| 65,3 | 47,4 | 6038216561 | 1830 | 2650 | 876295,5 | 748,3 | 0,28 | 1,58 |
| 136,5 | 100,4 | 12789808917 | 2700 | 2530 | 1907550 | 1021,7 | 0,4 | 1,01 |
| 180 | 129,5 | 16496815287 | 2760 | 3000 | 1993272 | 1077,66 | 0,359 | 1,17 |

дочной раковины и части некачественного металла возможно осуществлять обычной протяжкой, регулируя при этом величину подачи и обжатий.

Перспективным представляется удаление усадочной раковины и дефектного металла из тела слитка способами осадки бесприбыльного слитка плитой с отверстием, причем конфигурация плиты может быть различной как плоской (рис. 7.13 а), вогнутой (см. рис. 7.13 б) так и выпуклой (см. рис. 7.13 в).

В программе Q-Form 2D проведено моделирование процесса осадки бесприбыльных слитков с усадочной раковиной на плоской плите с отверстием [328-331]. Моделировалась осадка слитков ПАО НКМЗ с соотношением высоты тела слитка к среднему диаметру 3-3,5 (слитки массой 1,6, 3,5 и 6 т), 2-2,1 (слитки массой 10, 104, 170 т) и 1,5-1,6 (слитки массой 7,5 и 10,3 т) и предприятия «Ижорский завод» с соотношением высоты тела слитка к его среднему диаметру 1-1,1 (слитки массой 60,6, 136,5 и 180 т) и 1,5-1,6 (слиток массой 65,3 т). Параметры усадочной раковины принимались из расчетов, приведенных выше. Материалом слитков задавалась сталь 45, температура слитка 1200 °С, скорость осадки 10 мм/с, константа поверхности по Леванову принималась равной 0,8, что равнозначно коэффициенту пластического трения Зибеля 0,4.

Каждый слиток осаживали на плитах с относительным отверстием (отношение диаметра отверстия плиты d_0 к среднему диаметру слитка $d_{cp} = (D_1 + D_2)/2$) равным 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8.

По ходу осадки слитка с усадочной раковиной на плите с отверстием видно, что на первом этапе осадки усадочная раковина раскрывается, и в области ее вершины действуют растягивающие напряжения, что может отрицательно сказаться на качестве заготовки и может привести к зарождению и распространению трещины в тело слитка. Напряженное состояние изменяется от всестороннего неравномерного растяжения к всестороннему неравномерному сжатию в момент вытекания металла слитка с усадочной раковинной в отверстие плиты. Это наблюдается при осадке слитков различных размеров

(рис. 7.14-7.17).

Проводя анализ полей распределения логарифмических деформаций можно заметить, что по ходу осадки наименее проработанной зоной слитка является часть металла под усадочной раковиной, там сосредоточены самые малые деформации.

В добавок к этому металл под усадочной раковиной наименее качественный, что обуславливает необходимость его удаления. Часть некачественного металла из усадочной раковины в процессе осадки оказывается на торце осаженной заготовки, что должно быть учтено при составлении чертежа поковки, и на торец поковки, который будет соответствовать торцу осаженной заготовки с прибыльной стороны, должен быть назначен повышенный припуск.

На основе анализа данных по осадке различных слитков построена графическая зависимость относительной степени деформации осадки, при которой вершина усадочной раковины окажется в отверстии кольца, от относительного диаметра отверстия кольца (рис. 7.18).

Использование бесприбыльных слитков является весьма перспективным при изготовлении крупных поковок, о чем свидетельствуют практические результаты на различных отечественных и зарубежных предприятиях.

У бесприбыльных слитков различных размеров относительная глубина усадочной раковины отличается. Так установлено, что из номенклатуры слитков НКМЗ без прибыльной части с увеличением соотношения высоты тела слитка к его среднему диаметру относительная глубина усадочной раковины будет уменьшаться. Показано, что в укороченных слитках без прибыльной части с соотношением высоты к диаметру 1,5 относительная глубина усадочной раковины достигает 30-35% от высоты тела слитка, а в слитках с соотношением высоты к диаметру 2,5-3 достигает 20%.

7.1.2.2 Осадка бесприбыльных слитков вогнутыми плитами

Проведено моделирование осадки бесприбыльного слитка вогнутой

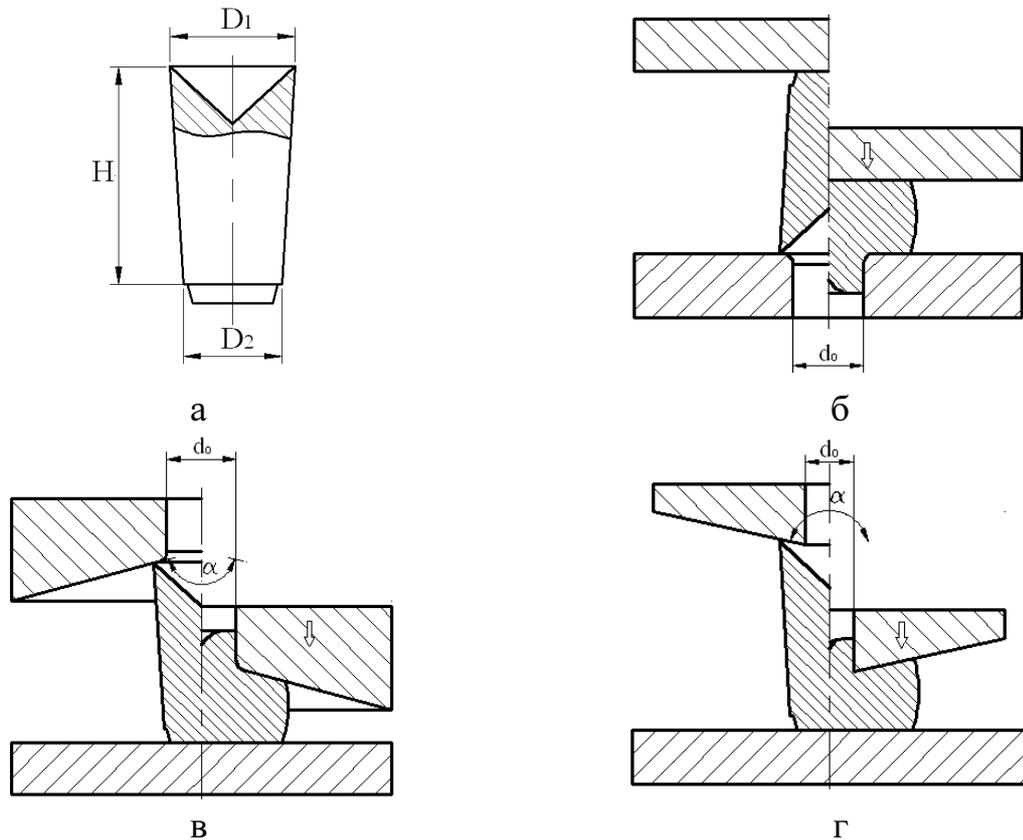


Рисунок 7.13 - Способы осадки бесприбыльного слитка (а) на плоской плите с отверстием (б), вогнутой конусной плитой с отверстием (в) и выпуклой конусной плитой с отверстием (г)

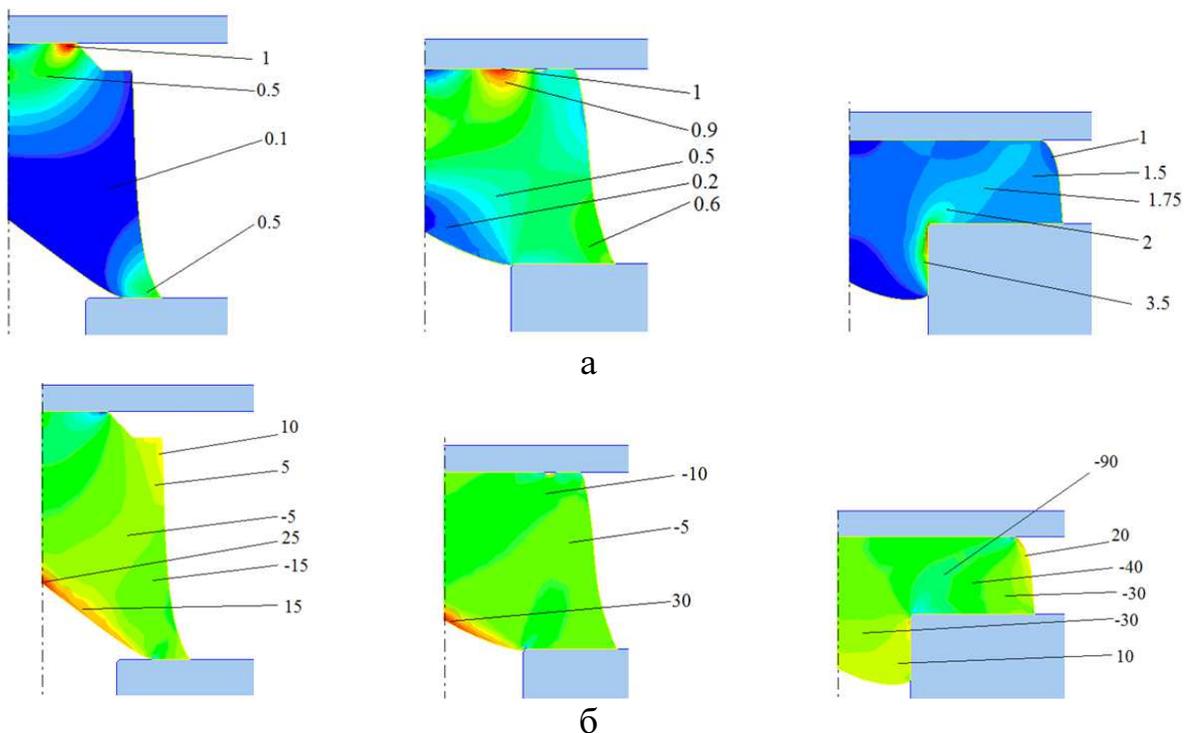


Рисунок 7.14 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений, МПа (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 136,5 тонны без прибыльной части на плите с отверстием диаметром, равным 0,6 среднего диаметра тела слитка

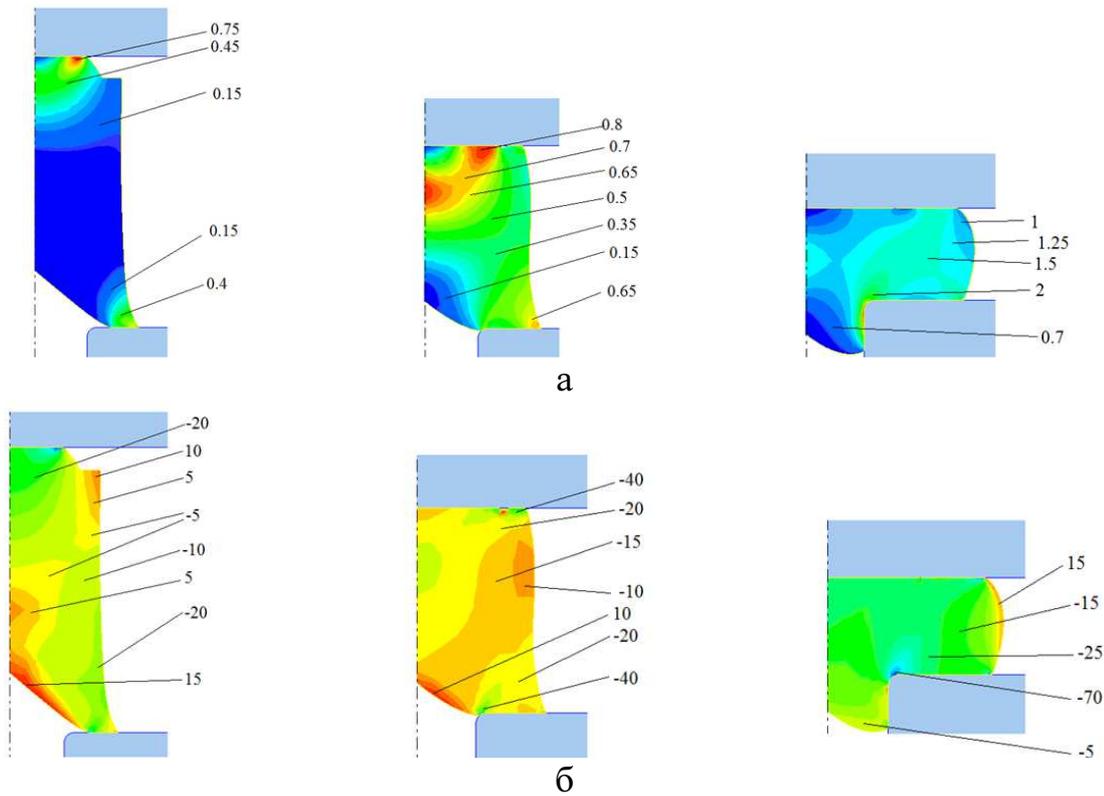


Рисунок 7.15 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений, МПа (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 10,3 тонны без прибыльной части на плите с отверстием диаметром, равным 0,6 среднего диаметра тела слитка

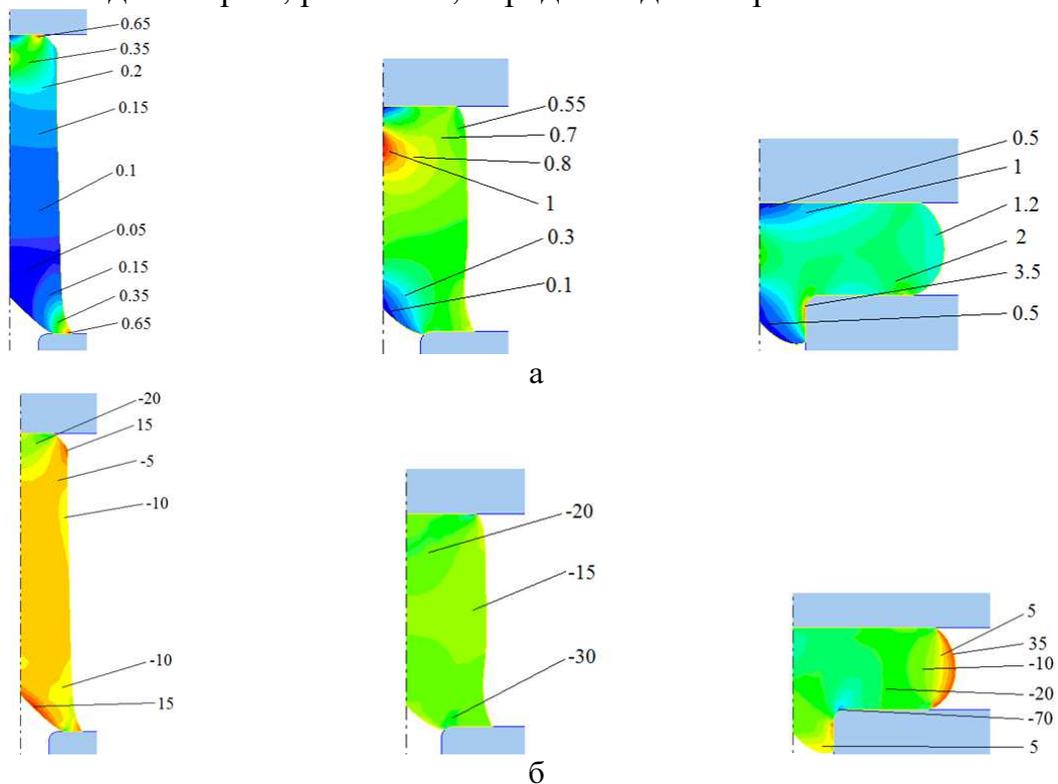


Рисунок 7.16 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений, МПа (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 6 тонн без прибыльной части на плите с отверстием диаметром, равным 0,6 среднего диаметра тела слитка

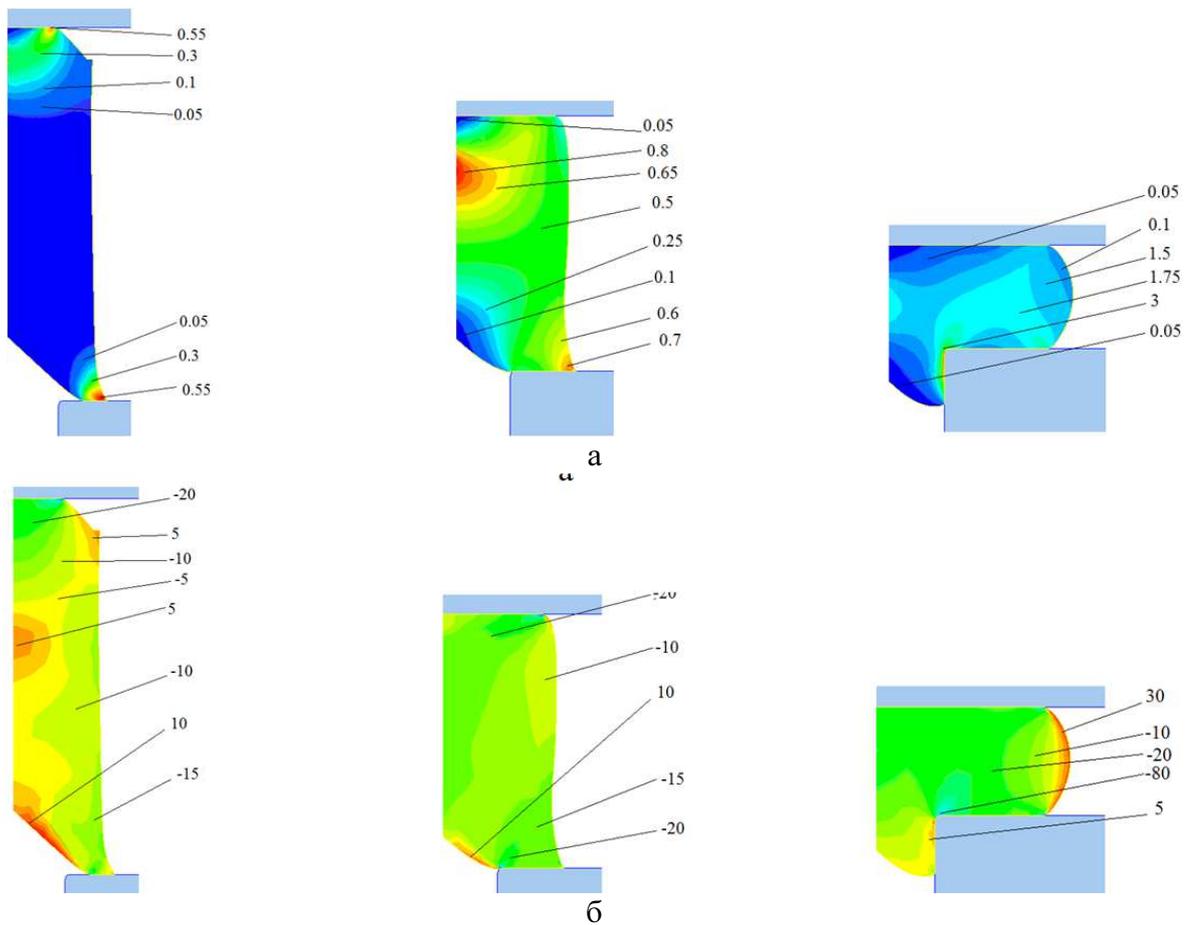


Рисунок 7.17 - Поля распределения логарифмических деформаций (а) и среднего напряжения, МПа (б) при осадке слитка массой 104 тонны без прибыльной части на плите с отверстием, равным 0,6 от среднего диаметра тела слитка

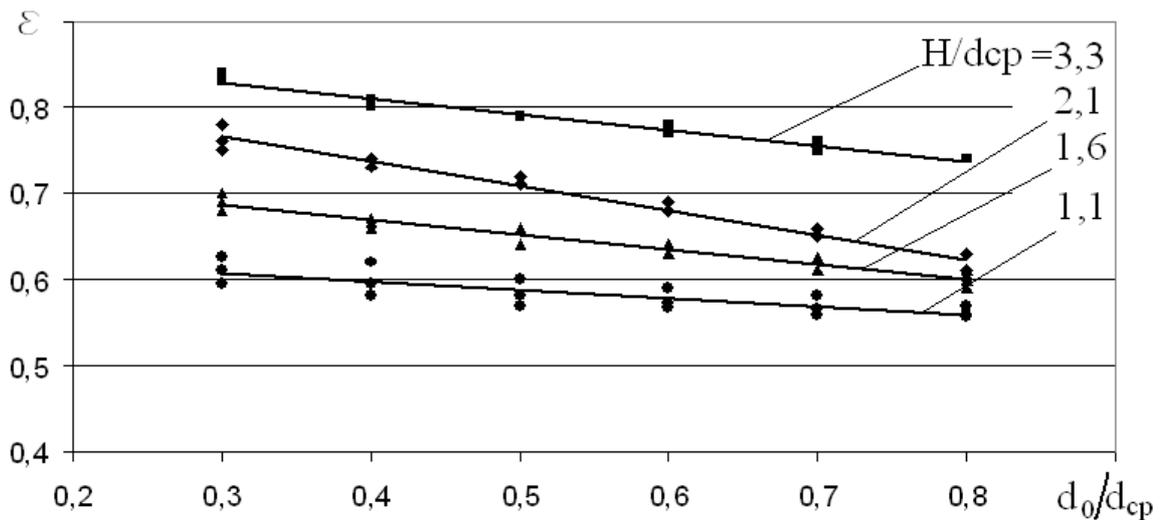


Рисунок 7.18 - График зависимости относительной степени деформации в момент выхода вершины усадочной раковины в отверстие кольца при осадке от относительного диаметра отверстия кольца

плитой с отверстием (см. рис. 7.13 в) в программе Q-From 2D [332-333]. Отверстие в верхней плите принималось равным 0,4, 0,6 и 0,8 от среднего диаметра тела слитка, угол конусности 140° , 150° , 160° и 180° . Моделировалась осадка слитков с $H/D = 1; 1,66; 2; 3,3$ (слитки 136,5 тон, 7,5 тон, 10 тон и 6 тон). Для данной схемы задавались граничные условия, аналогичные предыдущим.

По результатам моделирования получены поля распределения интенсивности логарифмических деформаций и средних напряжений по сечению заготовки по ходу осадки (рис. 7.19, 7.20).

Анализ полей распределения деформаций по сечению заготовки позволяет сделать вывод о том, что деформации рассредоточены достаточно равномерно по телу заготовки, и наибольшие деформации при осадке конусной вогнутой плитой сосредотачиваются непосредственно в центре осаживаемого слитка и в слоях между боковой поверхностью слитка и его центральной частью. Наименьшие деформации сосредоточены в металле, который выдавливается в отверстие плиты, и на торце слитка со стороны плоской плиты, что обусловлено наличием большого трения. Сравнение полей распределения деформаций в схемах осадки плоской плитой и вогнутой плитой показывает, что при одинаковой относительной (высотной) деформации величины логарифмических деформаций, расположенных локально в заготовке, больше при осадке вогнутой плитой. Так при осадке плоской плитой с отверстием слитка массой 10 тон логарифмические деформации в теле заготовки достигают 1,5-1,6, а при осадке такого же слитка вогнутой плитой они достигают 1,8-2.

Средние напряжения, отражающие схему напряженного состояния, по телу заготовки в ходе осадки также распространены достаточно равномерно. Эти напряжения в центре осаживаемой заготовки имеют отрицательное значение, что способствует закрытию внутренних дефектов слитка при осадке. Однако, есть зоны со средними напряжениями, имеющими положительное значение, т.е. зоны всестороннего растяжения. Это боковая поверхность осаживаемой заготовки и часть металла, вытесняемого в отверстие. В связи с

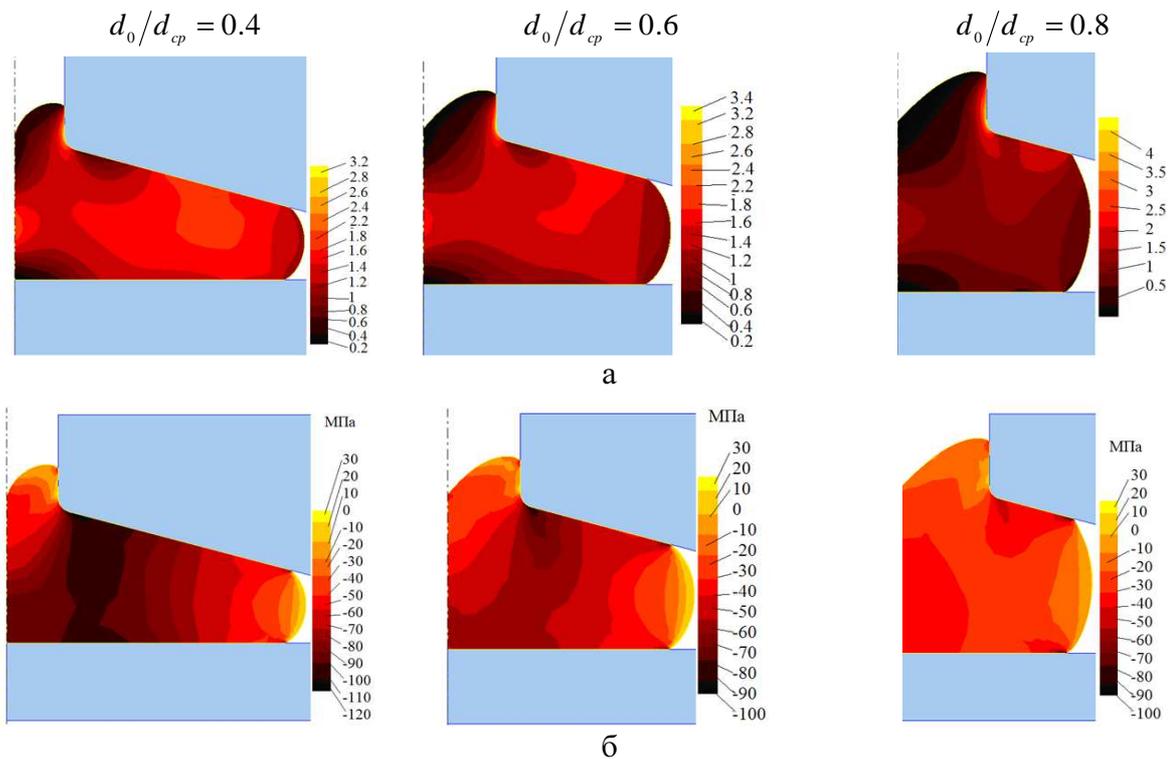


Рисунок 7.19 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 10 тонн без прибыльной части на плите с отверстием и углом конусности 150°

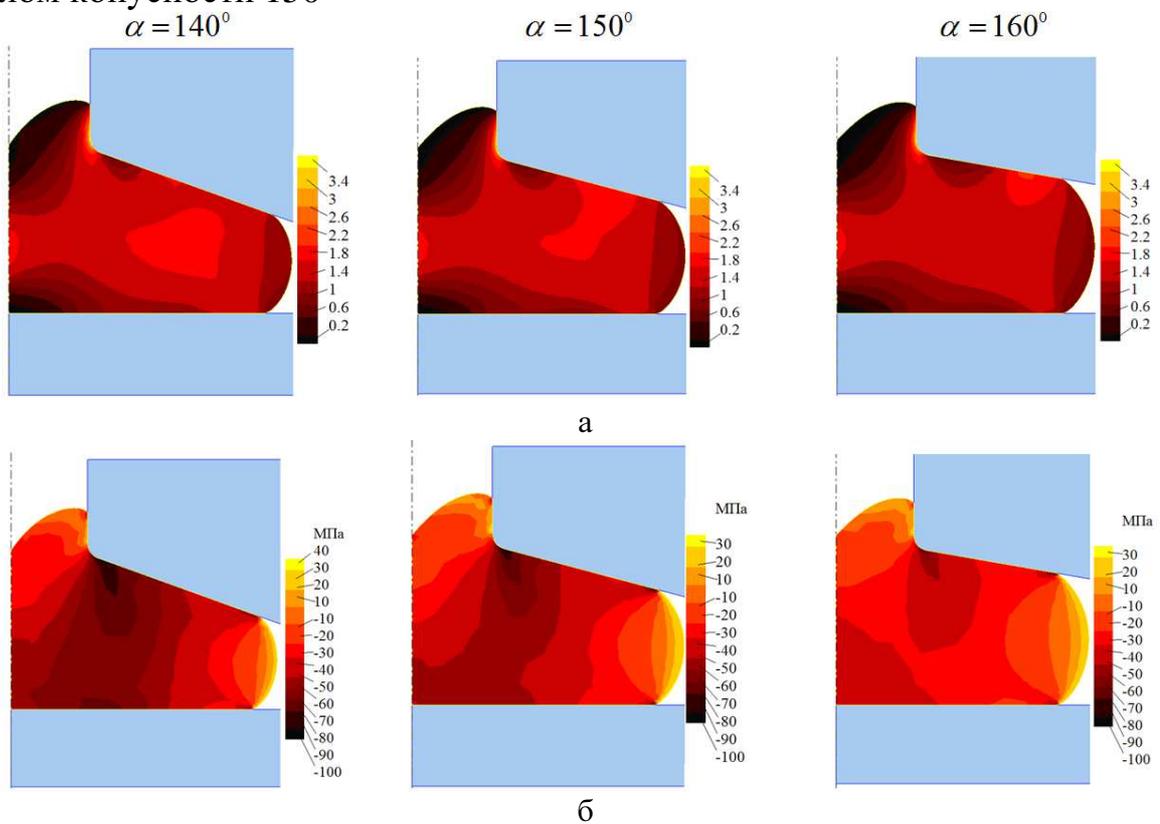


Рисунок 7.20 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 10 тонн без прибыльной части на плите с отверстием, равным 0,6 среднего диаметра тела слитка

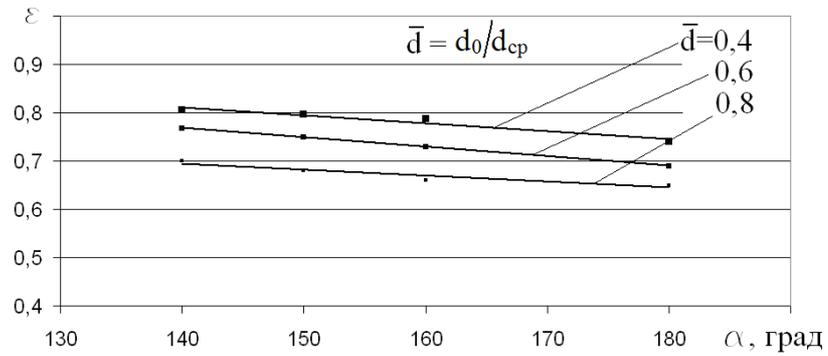
этим можно сделать заключение о том, что перед осадкой слитка необходимо тщательно подготовить его боковую поверхность, т.е. по возможности удалить с поверхности все трещины и литейные дефекты.

Из рис. 7.19, 7.20 видно, что на величину средних напряжений влияет угол конусности плиты, так с увеличением конусности средние напряжения в заготовке увеличиваются. Сравнение полей распределения средних напряжений при осадке вогнутой и плоской плитой показывает, что средние напряжения в заготовке, в основной ее массе, достигают -30 МПа, а при осадке вогнутой плитой с отверстием (угол конусности 140°) достигают $-80..-90$ МПа, что в $2,5 - 3$ раза больше. Таким образом, схема осадки вогнутой плитой с отверстием более выгодна с точки зрения проработки металла заготовки.

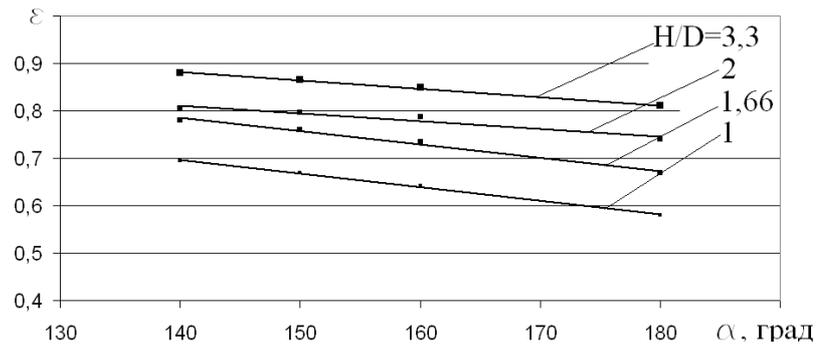
Построены графики зависимости относительной степени осадки слитка, при которой высота усадочной раковины перемещается в отверстие, от геометрических параметров инструмента (угла конусности плиты, величины диаметра отверстия) и слитков (отношение высоты слитка к его диаметру). Графики представлены на рис. 7.21.

Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что с уменьшением величины угла конусности для слитков с любым соотношением высоты к диаметру и при использовании плит с отверстиями любых размеров, относительная степень деформации осадки (при которой вершина усадочной раковины перемещается в отверстие) увеличивается. Также из графиков видно, что с увеличением отверстия плиты величина относительной степени деформации уменьшается. На относительную степень деформации большое влияние оказывает и относительная высота слитка, так наименьшая величина относительной деформации осадки будет при использовании слитка с малым соотношением H/D . Если сравнивать слитки с $H/D = 1$ и $3,3$, то относительная степень деформации, при которой вершина усадочной раковины переместится в отверстие плиты, в первом случае на 25% меньше.

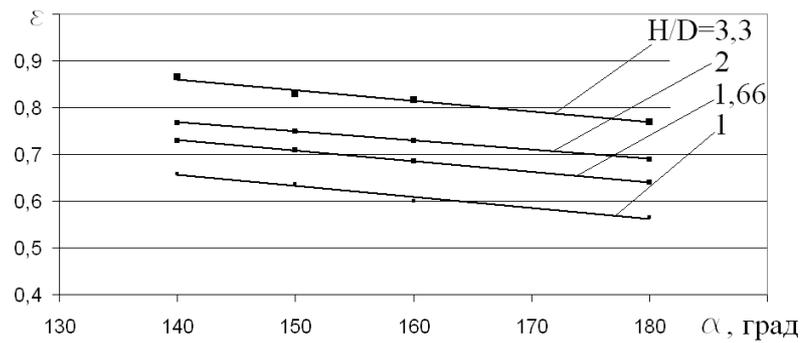
Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что конусность вогнутых плит не способствует затеканию дефектного металла слитка, нахо-



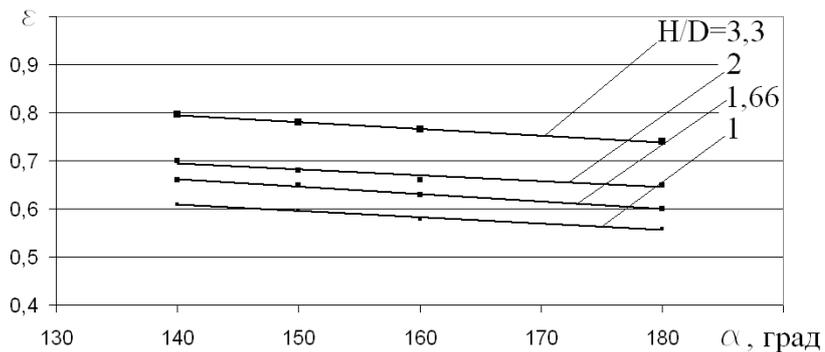
а



б



в



г

Рисунок 7.21 - Графики зависимости относительной степени осадки (отношение хода верхней плиты к высоте слитка), при которой вершина усадочной раковины перемещается в отверстие кольца, от угла конусности кольца (а – $H/D=2$, б – $d_0/d_{cp} = 0.4$, в – $d_0/d_{cp} = 0.6$, г – $d_0/d_{cp} = 0.8$)

дящегося в районе усадочной раковины, в отверстие. Кроме того, в случае последующей прошивки заготовки конусность, образованную на торце заготовки, необходимо устранить дополнительной осадкой плоской плитой. Все это не позволяет рекомендовать данный способковки бесприбыльных слитков.

7.1.2.3 Осадка бесприбыльных слитков выпуклыми плитами

Проведено моделирование осадки бесприбыльного слитка выпуклой плитой с отверстием (см. рис. 7.13 г) в программе Q-From 2D [332-333]. Отверстие в верхней плите принималось 0,4, 0,6 и 0,8 от среднего диаметра тела слитка, угол конусности 140° , 150° и 160° . Моделировалась осадка слитков с $H/D = 1, 1,66, 2$ и $3,3$ (слитки 136,5 тон, 7,5 тон, 10 тон и 6 тон). Для данной схемы задавались граничные условия, аналогичные предыдущим.

По результатам моделирования получены поля распределения интенсивности логарифмических деформаций и средних напряжений по сечению заготовки по ходу осадки (рис. 7.22-7.24).

Анализ полей распределения интенсивности логарифмических деформаций позволяет сделать вывод о том, что наибольшие деформации в заготовке по ходу осадки сосредотачиваются в зоне кромки отверстия выпуклой плиты. Эта зона локальна, и ее размеры малы, в основной массе заготовки деформации распределены достаточно равномерно. На равномерность распределения деформации, как видно из рис. 7.24, оказывает влияние угол конусности плиты с отверстием. С увеличением угла конусности плиты неравномерность распределения деформаций по сечению заготовки уменьшается, что связано с большей деформацией периферийных слоев заготовки. Минимальные деформации в заготовке по ходу осадки сосредоточены в металле, который выдавливается в отверстие плиты и на торце слитка со стороны плоской плиты, что обусловлено наличием там застойной зоны.

Сравнение полей распределения деформаций по сечению слитка для различных схем деформирования показывает, что величина деформаций в за-

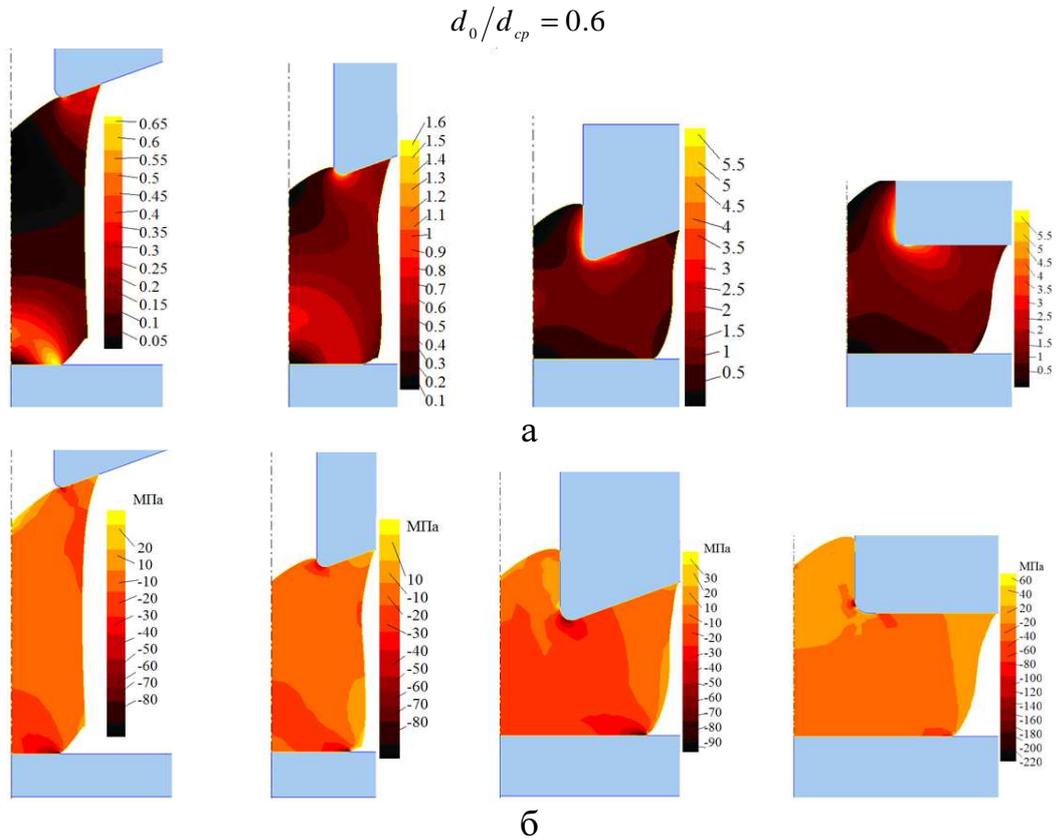


Рисунок 7.22 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений МПа (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 10 тонн выпуклой плитой с отверстием (угол конусности 140^0)

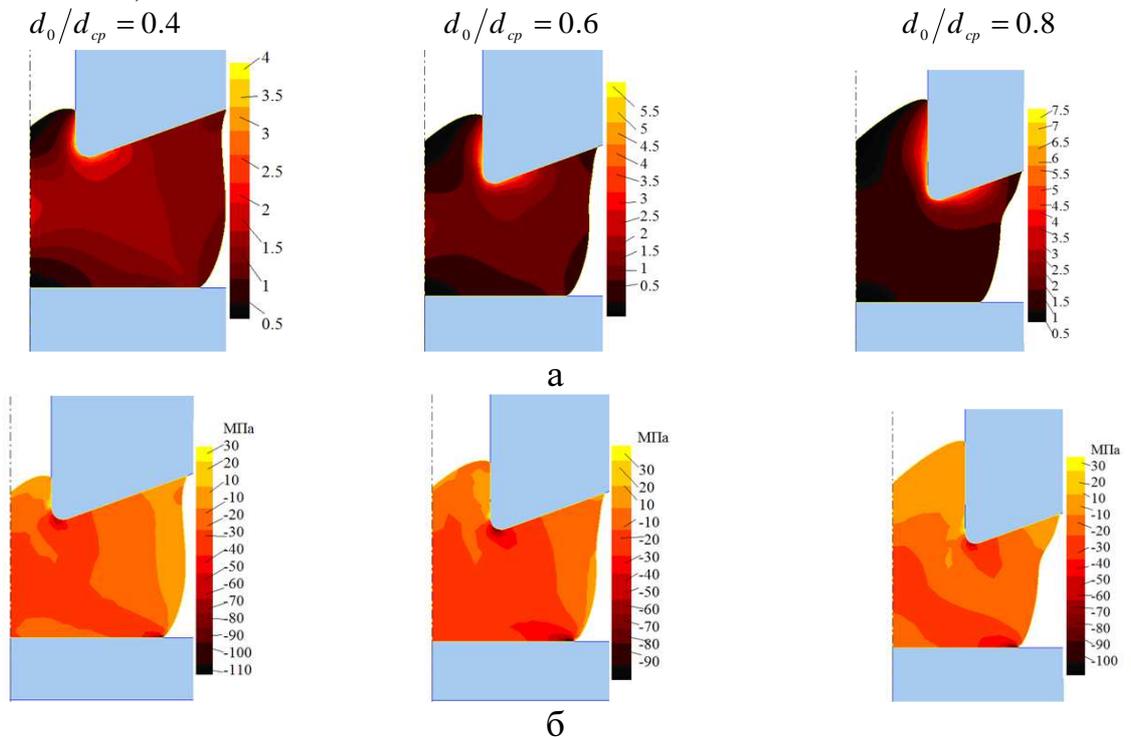


Рисунок 7.23 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 10 тонн без прибыльной части выпуклой плитой с отверстием (угол конусности 140^0)

готовке, полученной осадкой выпуклой плитой, меньше деформаций в заготовке, полученной осадкой плоской плитой с отверстием и намного меньше, чем в случае осадки вогнутой плитой. Так при осадке плоской плитой с отверстием слитка массой 10 тон логарифмические деформации в теле заготовки достигают 1,5-1,6, при осадке такого же слитка вогнутой плитой они достигают 1,8-2, а при осадке выпуклой плитой они достигают в среднем 1,5 единиц.

Средние напряжения в ходе осадки по телу заготовки распространены достаточно равномерно. По ходу осадки средние напряжения имеют отрицательное значение в центре заготовки, что способствует закрытию внутренних дефектов слитка при осадке. Однако есть зоны с напряжениями, имеющими положительное значение, т.е. зоны всестороннего растяжения. Это боковая поверхность осаживаемой заготовки и незначительная часть металла вытесняемого в отверстие.

Из рис. 7.23, 7.24 видно, что на величину средних напряжений не оказывает существенное влияние геометрия инструмента (угол конусности и диаметр отверстия). Сравнение полей распределения средних напряжений при осадке вогнутой, плоской и выпуклой плитой показывает, что средние напряжения в заготовке, в основной ее массе, при осадке плоской плитой и выпуклой плитой равны и достигают -30 МПа.

Построены графики зависимости относительной степени осадки слитка, при которой высота усадочной раковины перемещается в отверстие, от геометрических параметров инструмента (угла конусности плиты, величины диаметра отверстия) и слитков (отношение высоты слитка к его диаметру). Графики представлены на рис. 7.25.

Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что с уменьшением величины угла конусности для слитков с любым соотношением высоты к диаметру и при использовании плит с отверстиями любых размеров, относительная степень деформации осадки (при которой вершина усадочной раковины перемещается в отверстие) уменьшается. Также из графиков видно, что

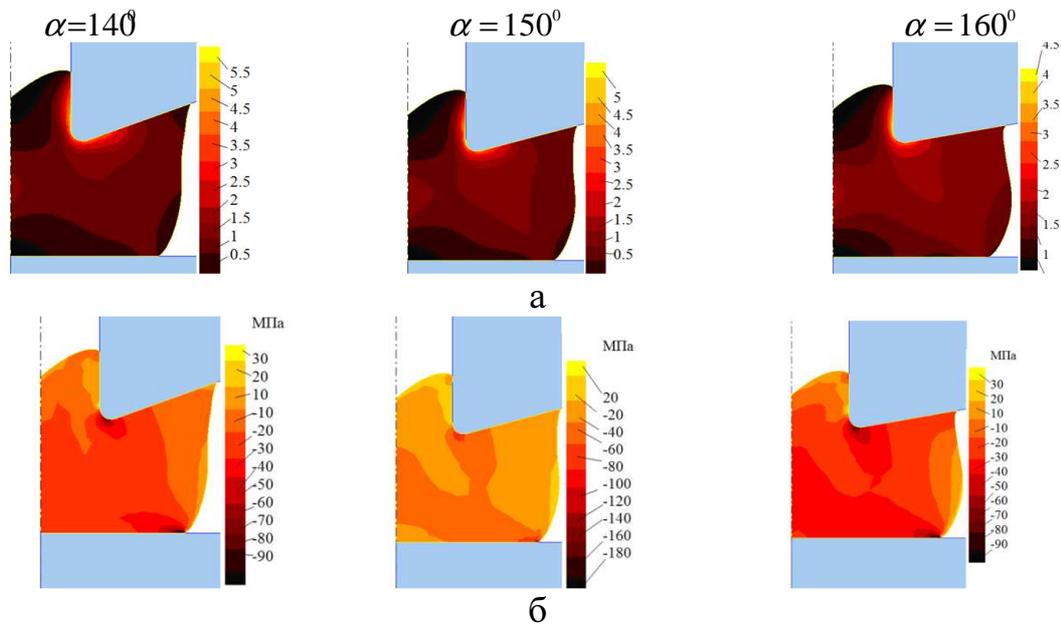


Рисунок 7.24 - Поля распределения интенсивности логарифмических деформаций (а) и средних напряжений (б) по сечению заготовки в процессе осадки слитка массой 10 тонн без прибыльной части выпуклой плитой с отверстием, равным 0,6 среднего диаметра тела слитка

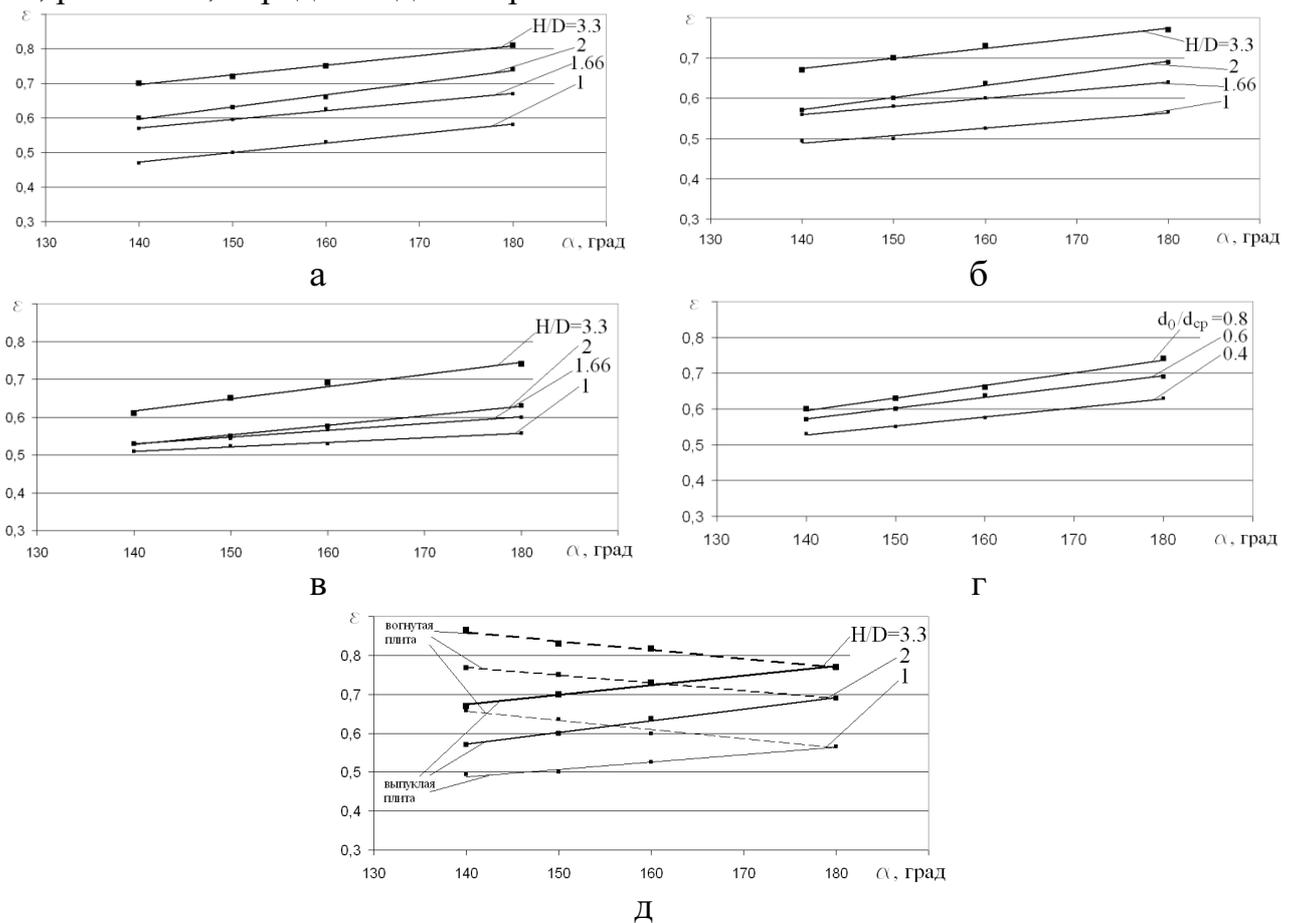


Рисунок 7.25 - Графики зависимости относительной степени осадки, при которой вершина осадочной раковины перемещается в отверстие кольца, от угла конусности кольца (а - $d_0/d_{cp} = 0.4$, б - $d_0/d_{cp} = 0.6$, в - $d_0/d_{cp} = 0.8$, г - $H/D=2$, Д - $d_0/d_{cp} = 0.6$)

с увеличением отверстия плиты величина относительной степени деформации уменьшается. На относительную степень деформации большое влияние оказывает и относительная высота слитка, так наименьшая величина относительной деформации осадки будет при использовании слитка с малым соотношением H/D . Если сравнивать слитки с H/D равным 1 и 3,3, то относительная степень деформации, при которой вершина усадочной раковины переместится в отверстие плиты в первом случае на 25% меньше.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что конусность выпуклых плит существенно влияет на перемещение дефектного металла слитка, находящегося в районе усадочной раковины, в отверстие плиты. Это позволяет рекомендовать данный способковки с последующей правкой плоской плитой с отверстием.

7.1.2.4 Протяжка труб на оправке

Определенная доля номенклатуры поковок ПАО «НКМЗ» - это полые цилиндры и трубы. Традиционной технологией получения таких изделий являются: вырубка цилиндрического блока, осадка, прошивка, раскатка на дорне, протяжка на оправке. В этом случае прямыми потерями являются отходы на выдру после прошивки (около 0,5%), прибыльная часть слитка (около 15%), удаляемая перед осадкой, и угар (около 5%).

При производстве поковок типа труб ПАО «НКМЗ» использует мало-прибыльные слитки сифонной разливки, которые имеют достаточно высокое качество, малую усадочную раковину и незначительную осевую пористость за счет эффективного утепления головной части слитка (рис. 7.26).

Предложено при ковке полых изделий типа труб от блока не рубить металл, относящийся к головной питающей части слитка (низкокачественный металл), а использовать для компенсации кузнечных припусков [334]. Предполагается, что в процессе протяжки данный металл перераспределится в поковке таким образом, что он попадет в припуск и не будет использован в готовой детали. Таким образом, низкокачественный металл на внутренней по-

верхности трубы будет удален с припуском в стружку при последующей механической обработке. Это приведет к снижению металлоемкости изделия.

Моделирование процессаковки полых поковок типа труб из слитков без удаления головной части выполнено с использованием метода конечных элементов. Проведено исследование двух вариантовковки. Первый вариант предполагает осадку и прошивку осаженного блока с расположением низкокачественной части слитка вверху (рис. 7.27). На рис. 7.27 приведены схемы переходовковки и результаты моделирования перераспределения металла. Видно, что в поковке металл низкого качества располагается так, как и предполагалось: основная его часть рассредоточена в области припусков под механическую обработку и не входит в габариты конечной детали. Установлено, что в случаековки по такой технологии в отход пойдет конец трубы длиной 280 мм. В этом случае объем металла, который пойдет в отход, в 1,5 раза меньше объема прибыльной части слитка, которая по традиционной технологии удаляется перед осадкой. Это говорит о существенной экономии металла.

На рис. 7.28 приведен второй вариантковки трубы, когда головная часть слитка находится в нижней части осаженного блока и при протяжке на оправке располагается у бурта оправки на толстом конце.

При протяжке заготовки на оправке данным способом видно, что некачественный металл существенно не перераспределяется вдоль оправки. При этом значительная часть поковки состоит из некачественного металла прибыльной части слитка. Для получения качественной детали от поковки придется удалить 720 мм, чтобы в тело детали не попал некачественный металл.

Таким образом, второй вариантковки труб не рекомендуется при протяжке трубы на оправке, а для максимального использования металла слитка прибыльную часть следует располагать на тонком конце оправки.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что увеличение коэффициента использования металла при изготовлении поковок типа труб возможно за счет использования головной части слитка. При этом

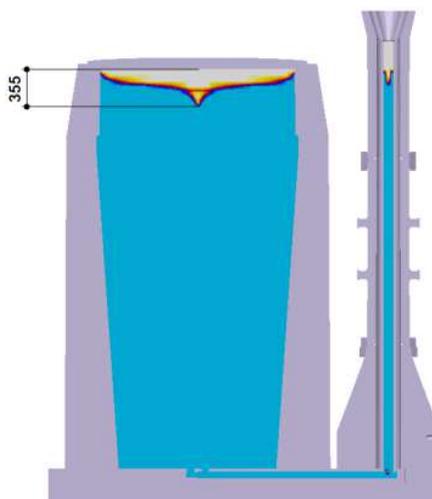


Рисунок 7.26 - Малоприбыльный слиток сифонной разливки

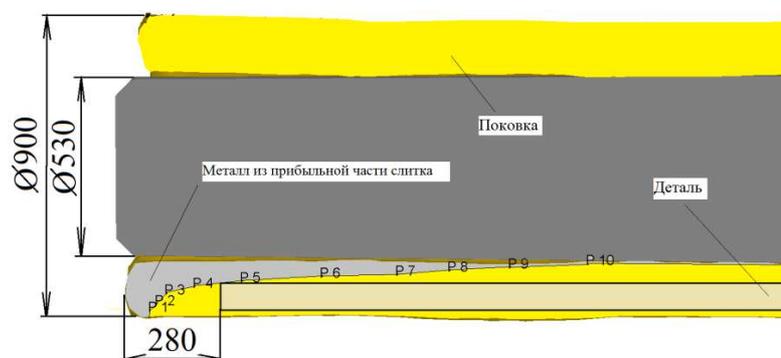
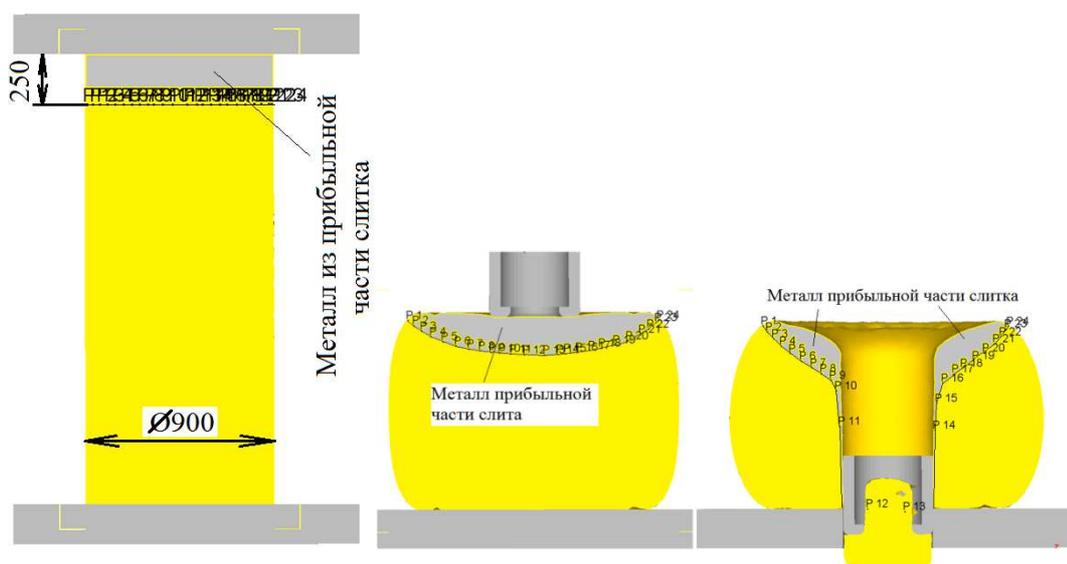


Рисунок 7.27 - Схемы распределения металла по переходам ковки трубы с расположением головной части слитка на тонком конце оправки

в процессековки некачественный металл головной части слитка не удаляется, перед осадкой и в процессе прошивки блок следует располагать прибыльной частью вверх, при протяжке на оправке донная часть слитка должна быть расположена на толстом конце у бурта.

7.2 Управление НДС заготовки регулированием кинематики ее деформирования

Среди поковок типа труб особое место занимают полые изделия с глухим дном. Традиционной схемой их получения является ковка трубы с буртом и заковка полученного бурта. Далее производится заварка полученного отверстия. Более современной схемой производства подобных изделий является прошивка слитка в специальном инструменте [335-338].

Такая схема имеет несколько преимуществ: во-первых, изделия, полученные по данной схеме, имеют повышенную точность (минимальные припуски, отсутствует конусность на внутренней поверхности), во-вторых, возможно получение поковок с глухим дном.

Существуют некоторые недостатки данной схемы получения труб, одним из которых является сложность оснастки. Т.к. внутренний диаметр прошиваемого слитка равен диаметру прошивня и в процессе деформации прошивень разогревается от металла заготовки, а заготовка, наоборот, охлаждается от контакта с инструментом, то возникает необходимость применения в штампе жесткого съемника, позволяющего сорвать прошитую заготовку с прошивня. Сила такого съема может достигать значительных величин.

Устранение данной проблемы является достаточно актуальным и позволит упростить оснастку и оборудование для изготовления поковок прошивкой. Для исследования процесса прошивки слитка использован метод конечных элементов, реализованный в программе QForm 2D.

В качестве исходных данных задавали, материал заготовки сталь 45, исходная температура заготовки 1200 °С, температура инструмента 100 °С, коэффициент трения между заготовкой и инструментом по закону пластиче-

ского трения Зибеля 0,35. Деформирование моделировалось на гидравлическом прессе силой 50МН, скорость деформирования 20 мм/с. Решалась осесимметричная схема деформирования. Диаметр исходной заготовки принимался равным 1000 мм, высота заготовки 1500 мм, диаметры прошивня от 300 до 700 мм.

В процессе прошивки очаг деформации возникает непосредственно в области внедрения инструмента в заготовку, металл из-под торца прошивня течет в радиально-обратном направлении, плавно огибая его кромку (рис. 7.29). Проведено исследование влияния формы торца прошивня на величину зазора между боковой поверхностью прошивня и внутренней поверхностью заготовки. Исследовалось две формы торца: с радиусной переходной кромкой и кромкой с фаской различной величины. Так провели прошивку прошивнем диаметром 400 и 600 мм с радиусом кромки R/d_0 от 0,05 до 0,2 от диаметра прошивня и прошивнем с фаской $d_1/d_0=0.1..0.7$ и углом $\alpha=10^\circ$ и 20° .

Установлено что диаметр прошивня не оказывает существенного влияния на величину зазора Z между прошивнем и заготовкой. Влияние формы и размеров кромки прошивня также незначительно. Так, например, при прошивке заготовки радиусным прошивнем диаметром 400 и 600 мм при увеличении радиуса от 0,05 до 0,2 от диаметра прошивня величина зазора Z изменяется в пределах 0,75-1,3 мм.

В случае применения прошивня с фаской зазор Z несколько больше, чем при использовании радиусного прошивня, но все же остается незначительным и достигает 2,2 мм. Такого зазора явно недостаточно для того, чтобы исключить термическое обжатие заготовки прошивня.

Увеличить радиальную составляющую течения металла в процессе прошивки для увеличения зазора Z не дает стенка контейнера, жестко подпирающая металл. Предлагается проводить прошивку в контейнере с уширением полости у верхней кромки (рис. 7.30). Процесс прошивки в этом случае должен осуществляться поэтапно следующим образом.

На первом этапе заготовка устанавливается в контейнер так, чтобы ее

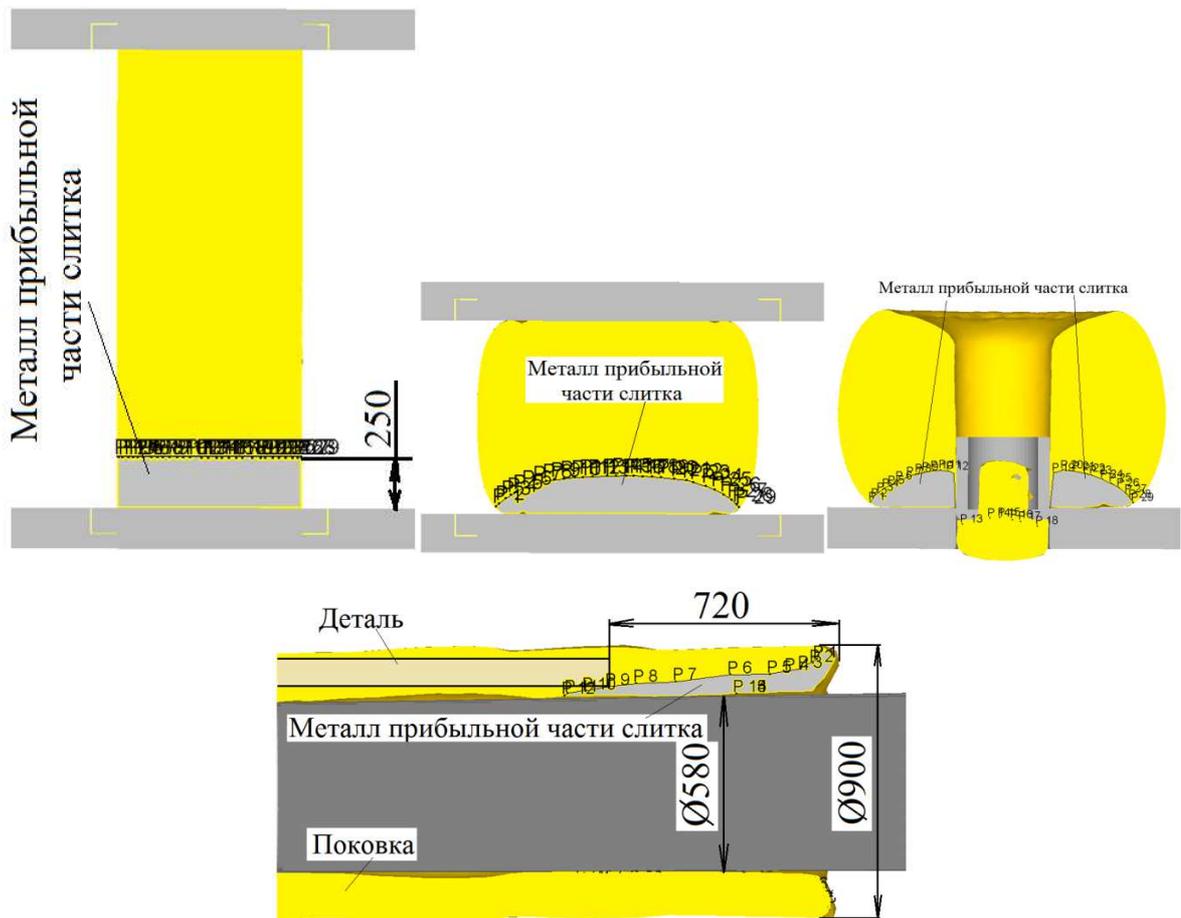


Рисунок 7.28 - Схемы распределения металла с учетом переходов изготовления поковки трубы с расположением прибыльной части слитка на толстом конце оправки

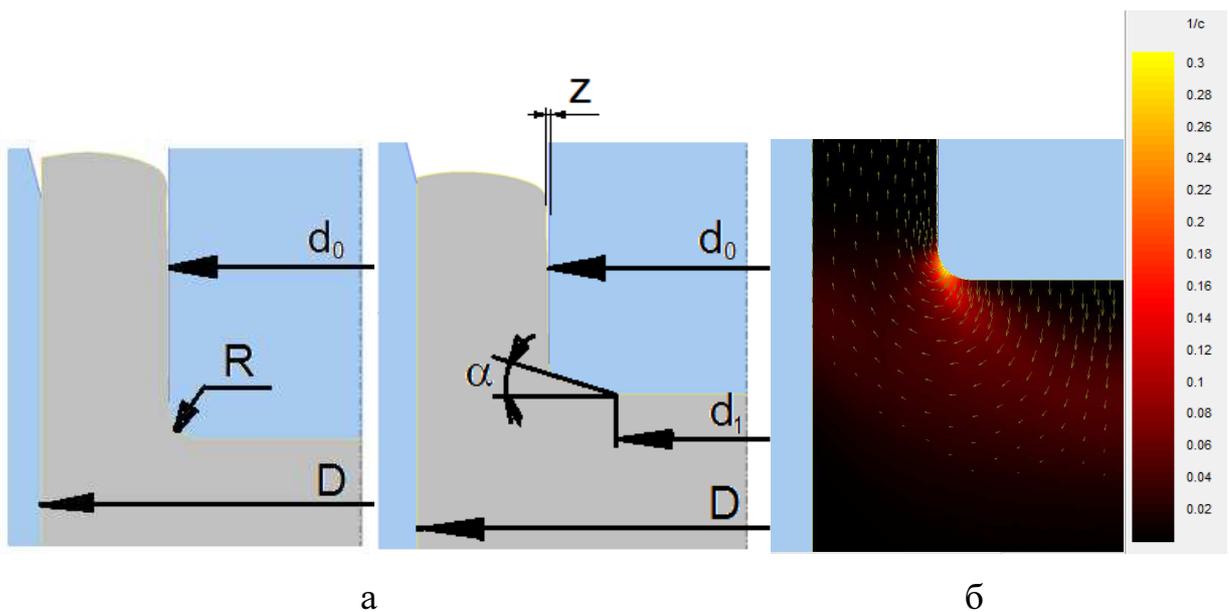


Рисунок 7.29 - Схемы прошивки (а) и поле распределение скоростей деформации (б) в заготовке в процессе прошивки

верхняя часть, подвергаемая прошивке, находилась в расширенной полости. Прошивка производится на величину свободного конца заготовки. После чего путем опускания контейнера или поднятия выталкивателя заготовка перемещается вертикально вверх для выставления следующего участка для прошивки. Таким образом, прошивается вся заготовка до достижения необходимых размеров.

В процессе прошивки свободного конца заготовки, металл течет свободно в радиальном и обратном направлении. Зазор между прошивком и заготовкой при этом имеет значительную величину.

Наружный диаметр заготовки при этом можно определять диаметром полости, но в определенном диапазоне. Проведено исследование увеличения наружного диаметра заготовки при свободной прошивке. Установлено, что большое влияние оказывает на данный параметр диаметр прошиваемого отверстия. Так при прошивке отверстия диаметром 300 мм (0,3 диаметра заготовки) наружный диаметр стенки будет равен 1,02 от исходного диаметра заготовки. При прошивке отверстия диаметром 700 мм наружный диаметр заготовки увеличится в 1,08 раз (см. рис. 7.30).

Определено влияние диаметра прошиваемого отверстия на величину зазора между пуансоном и стенкой заготовки. Установлено, что с увеличением диаметра прошивня зазор также увеличивается, так при прошивке отверстия диаметром 300 мм зазор Z равен 9 мм, при прошивке отверстия диаметром 700 мм зазор увеличивается до 22 мм (рис. 7.31).

Это связано с тем, что чем больше диаметр прошивня, тем большая часть металла в очаге деформации движется в радиальном направлении и тем сложнее менять радиальное направление течения металла на обратное. Ограничить величину зазора возможно, ограничив диаметр свободной полости контейнера, увеличив тем самым подпор металла в радиальном направлении.

Проведено моделирование процесса прошивки заготовки по предлагаемой схеме за 4 нажима. Картины формоизменения заготовки приведены на рис. 7.32. Установлено, что помимо увеличенного зазора между прошивком и

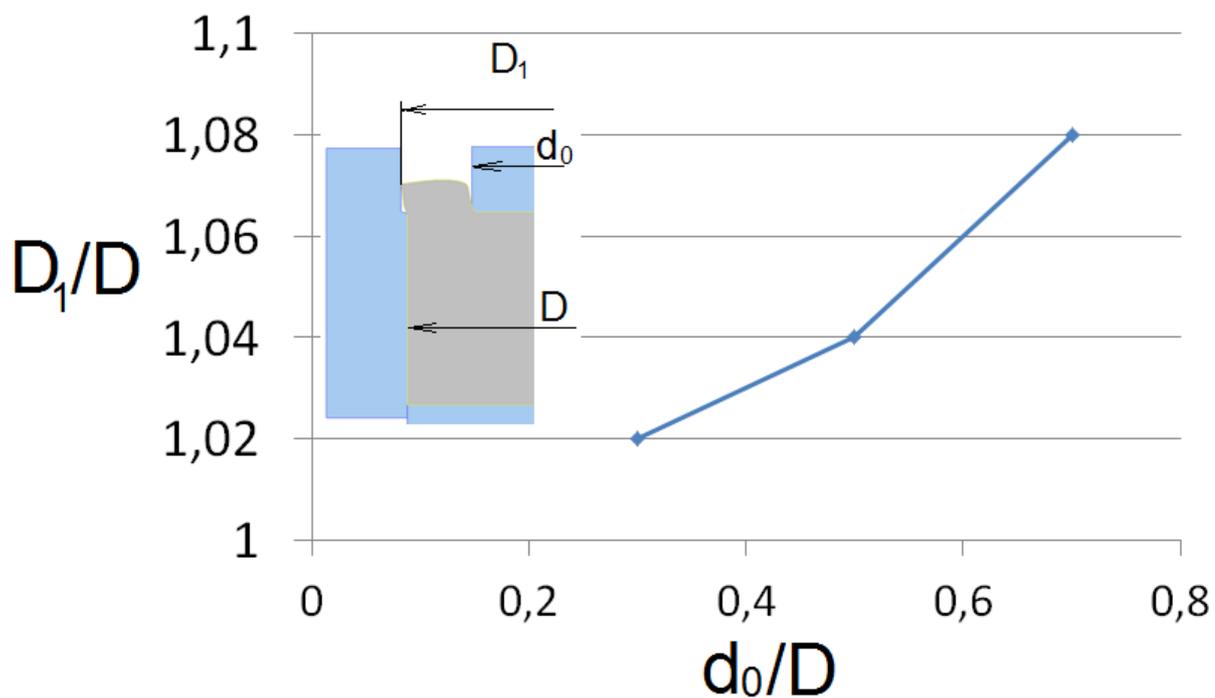


Рисунок 7.30 - График зависимости величины наружного диаметра прошиваемой заготовки от диаметра прошиваемого отверстия

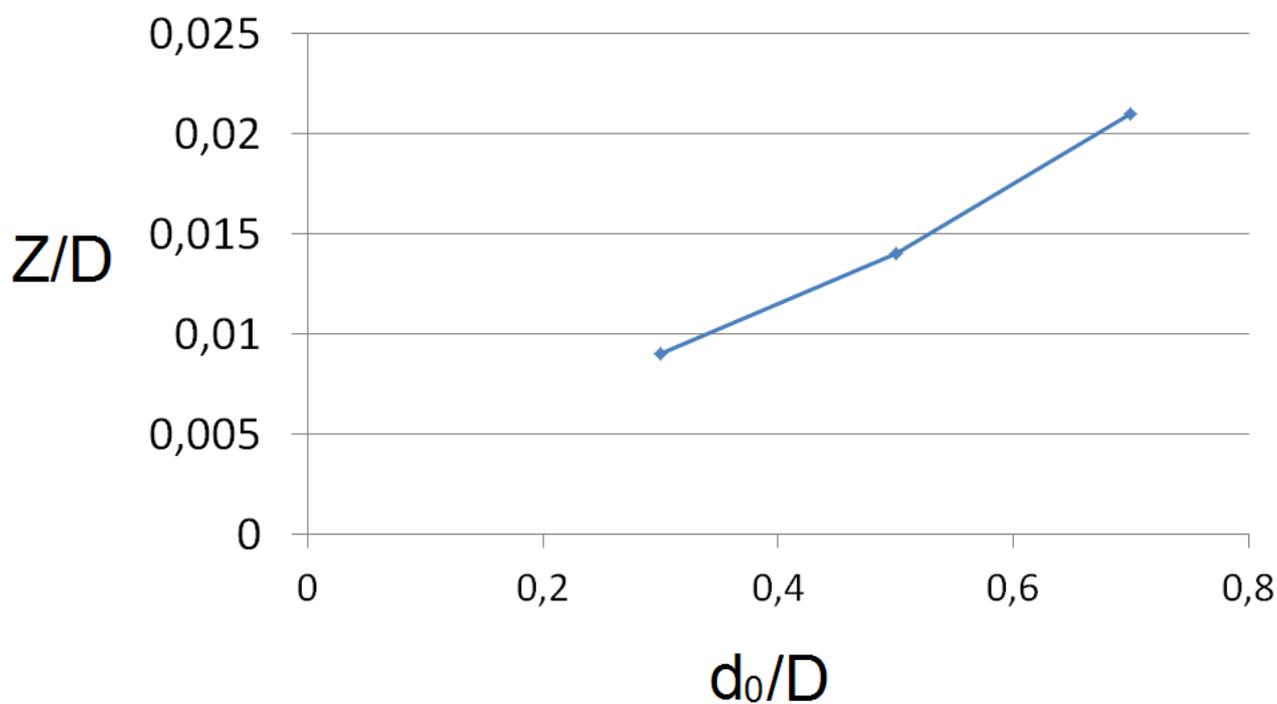


Рисунок 7.31 - График зависимости зазора между прошивком и стенкой заготовки от диаметра прошиваемого отверстия

стенкой заготовки данная схема ковки имеет преимущество в виде пониженной энергоемкости. Так сила выдавливания по предлагаемой схеме на 10-15% ниже силы закрытой прошивки, что положительно отражается на стойкости инструмента. Кроме того установлено, что наружная поверхность заготовки, полученной по данной схеме, имеет волнистую форму, обусловленную поэтапным деформированием и свободным течением металла в радиальном направлении. Данный дефект формы необходимо устранять, что возможно дополнительной протяжкой полученной заготовки, причем протяжка может осуществляться без оправки проглаживанием вырезными бойками.

Разработан режим ковки, позволяющий деформировать заготовку таким образом, чтобы постоянно сохранялся зазор между прошивнем и стенкой поковки для беспрепятственного удаления последнего из поковки.

Предложено прошивку заготовки производить по частям, в специальном контейнере таким образом, чтобы увеличить радиальную составляющую течения металла. Установлены параметры формоизменения заготовки в процессе прошивки по новому режиму. Определено, что с увеличением диаметра прошиваемого отверстия зазор между прошивнем и получаемым изделием также увеличивается, кроме того увеличивается и наружный диаметр заготовки.

7.3 Управление НДС заготовки регулированием ее температурного поля

Предложен способ ковки кольцевых профилированных заготовок раскаткой на оправке обычным кузнечным инструментом. Способ предполагает создание в заготовке неравномерного температурного поля таким образом, чтобы внутренняя часть кольца имела температуру ниже температуры наружной части. В процессе раскатки при деформировании плоским бойком основная деформация будет сосредоточена в той части заготовки, которая имеет повышенную температуру. Внутренняя часть кольца деформироваться будет минимально, т.к. металл имеет более высокие механические свойства.

Вследствие такого формоизменения заготовки форма поковки будет иметь вид кольца с наружной ступицей (рис. 7.33). При этом основное влияние на формоизменение будут оказывать температурное поле и размеры заготовки.

Методом конечных элементов проведено моделирование деформирования заготовки с неравномерным температурным полем. Моделирование проводилось в несколько этапов. На первом этапе моделировался процесс охлаждения внутренней части нагретой кольцевой заготовки. Исходная температура заготовки составляла 1100°C , температура внутренней поверхности заготовки 600°C . Охлаждение производилось на различных заготовках в течение различного времени с целью обеспечения различных температурных полей (табл. 7.3, поле 1, поле 2). Таким образом, достигались поля температур с различными толщинами прогретых слоев. Внутренний диаметр колец составлял 600 мм, наружный диаметр 1400, 1640, 1880 мм. Материал заготовки сталь 35. В таблице 7.3 приведены температурные поля заготовок различных размеров.

В работах [298-300] проведено сравнение полей температур, полученных в заготовке моделированием в программе Deform 3D и экспериментально в производственных условиях. Сравнение показало несущественные отклонения, что говорит о высокой адекватности расчетов [294-300].

На втором этапе производили моделирование процесса раскатки заготовки с неравномерным температурным полем. Деформирование производилось на цилиндрическом дорне диаметром 550 мм плоским бойком шириной 600 мм. Производилось минимум 3 нажима на периферии заготовки.

Как на первом, так и на втором этапе моделирования коэффициент теплопередачи от заготовки инструменту задавался равным $5 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, температура окружающей среды 20°C , температура инструмента 200°C . Скорость движения деформирующего инструмента задавалась равной 10 мм/с, коэффициент трения по закону Зибеля принимался равным 0,35.

В таблице 7.3 приведены различные поля распределения температур, в кольцевой заготовке и постатейное формоизменение заготовки при раскатке

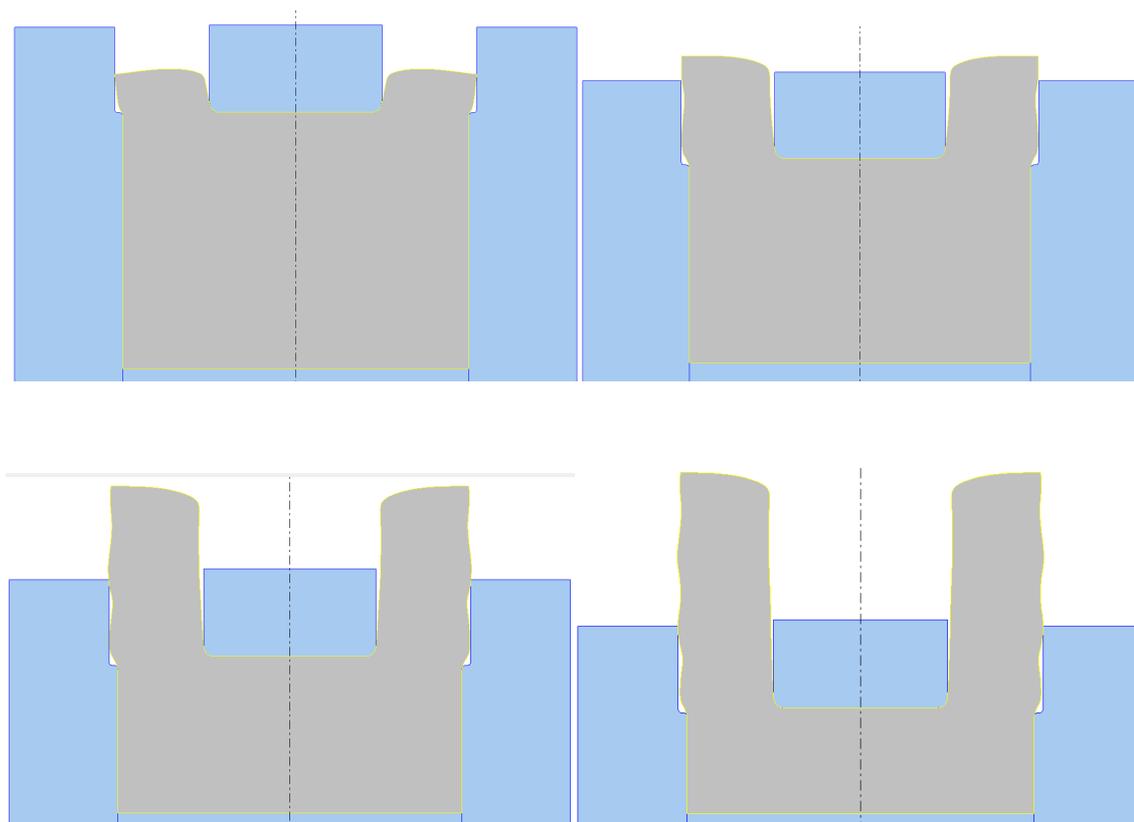


Рисунок 7.32 - Формоизменение заготовки в процессе прошивки

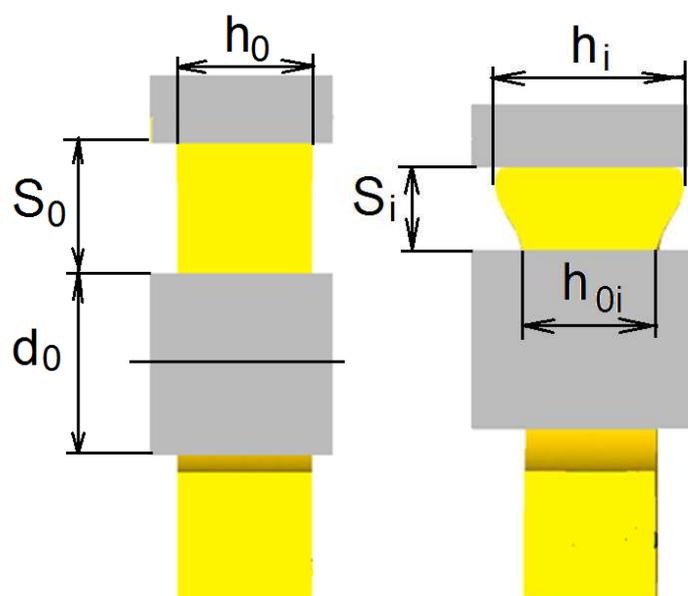
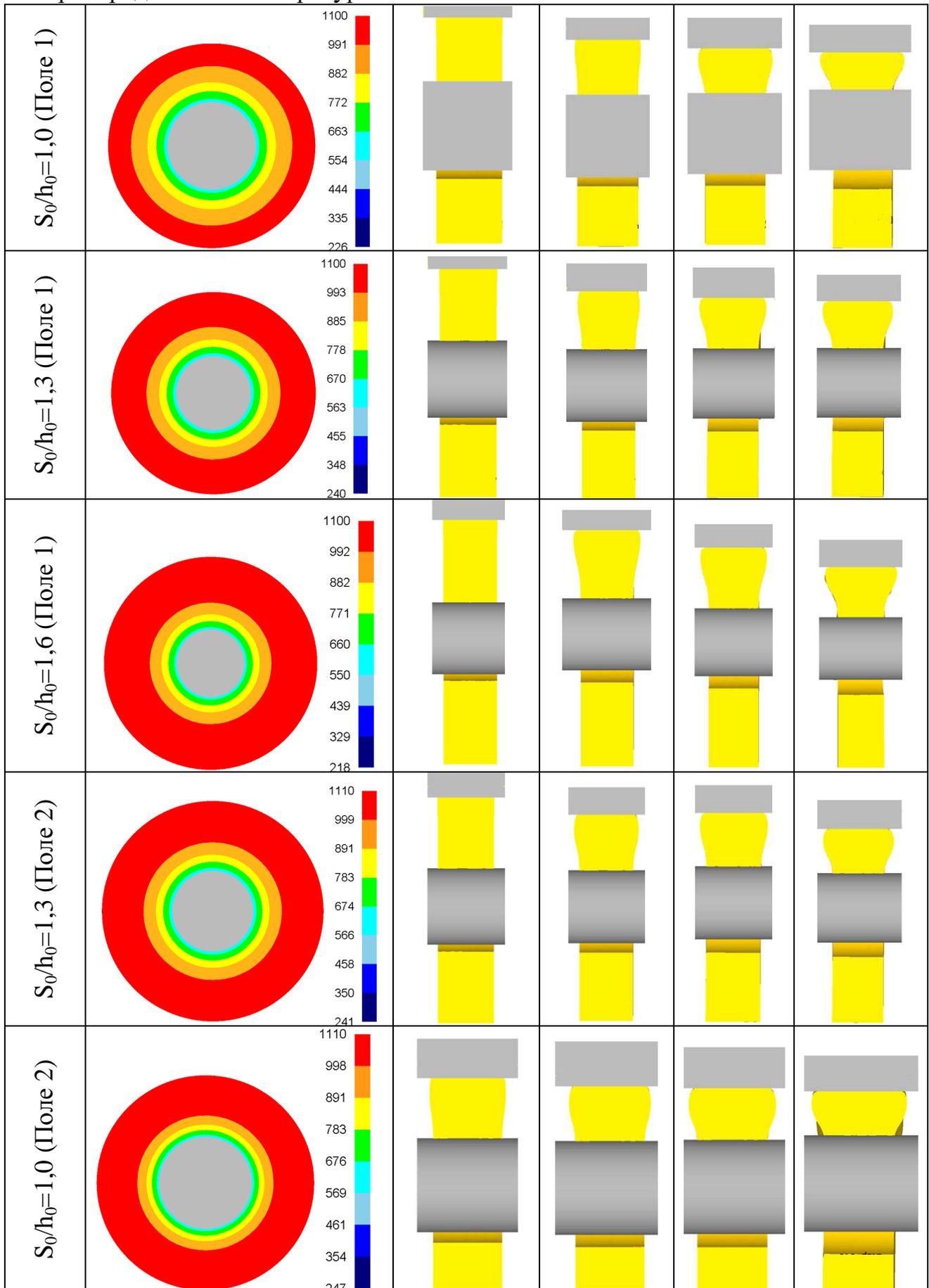


Рисунок 7.33 - Схема процесса раскатки заготовки с неоднородным температурным полем

Таблица 7.3. - Формоизменение заготовки в процессе раскатки и поля распределения температур



плоским бойком на цилиндрическом дорне. Видно, что основная деформация в процессе раскатки сосредотачивается по наружной поверхности заготовки, на контакте между бойком и заготовкой, что связано с низким сопротивлением деформирования металла заготовки в этой области.

Рассматривая поэтапно процесс обжатия заготовки бойком, можно увидеть, что с его увеличением ширина заготовки также растет, причем уширение заготовки достаточно интенсивное. При этом внутренняя часть кольца практически не уширяется, а увеличение внутреннего диаметра кольца минимальное. Сравнение картин формоизменения заготовки с различными полями температур показывает, что в рассматриваемых диапазонах значений распределения температур их влияние минимально.

Наибольшее влияние на формоизменение оказывают размеры заготовки. Так, в случае раскатки заготовки с относительно толстой стенкой изменение ширины кольца более заметно, нежели для заготовки с тонкой стенкой при одинаковом температурном поле.

Построены графики зависимости изменения размеров заготовки от параметров заготовки и параметров температурного поля (рис. 7.34). Из графиков видно, что уширение заготовки прямо пропорционально величине ее обжатия. Так для заготовки с $S_0/h_0=1,0$ при увеличении обжатия от 0,1 до 0,36 относительная ширина кольца на периферии увеличивается от 1,1 до 1,3. Влияние температурного поля на формоизменение заметно, только при достаточно больших обжатиях, равных 0,2 и более.

На рис. 7.34 показано, что наибольший перепад ширины будет наблюдаться у заготовки с наибольшей толщиной стенки ($S_0/h_0=1,6$). Он достигает значения 1,5 при обжатии на 30%. Проведено моделирование раскатки заготовки по всему ее диаметру. Поля распределения деформаций на различных стадиях раскатки приведены на рис. 7.35. Из рис. 7.35 видно, что основная деформация сосредотачивается в периферийных слоях заготовки на различных стадиях деформирования. Моделирование подтверждает предположение о характере формоизменения заготовки и возможность получения профилированных колец с применением традиционного кузнечного инструмента на основании управления температурным полем заготовки.

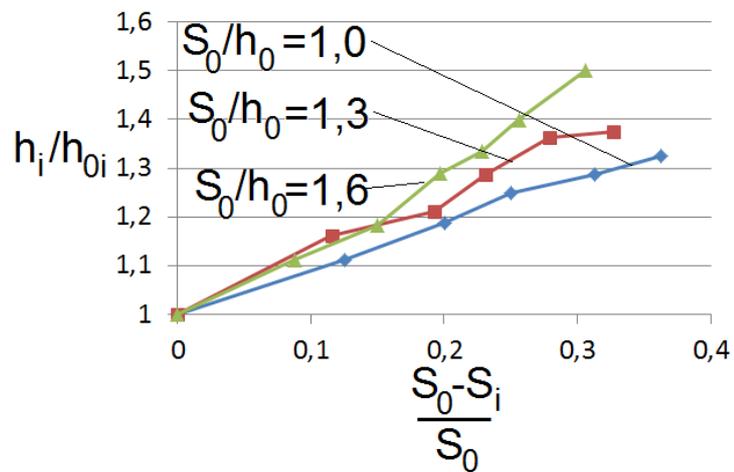
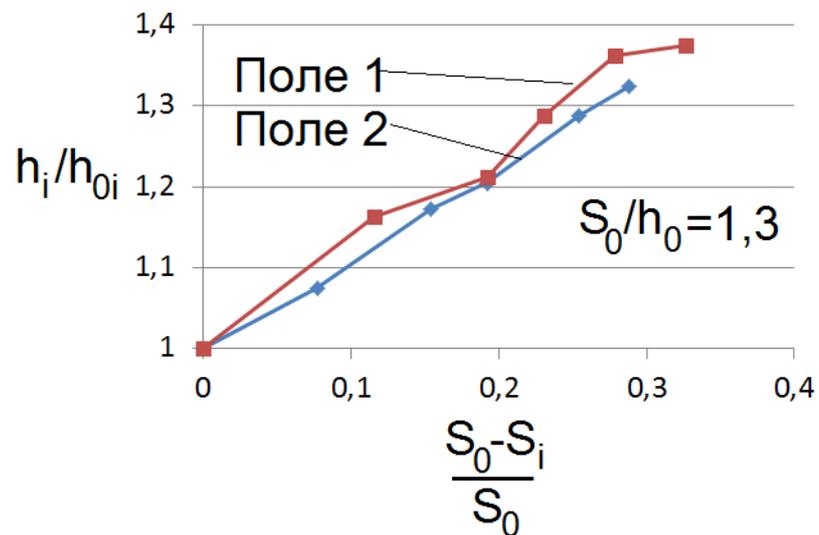
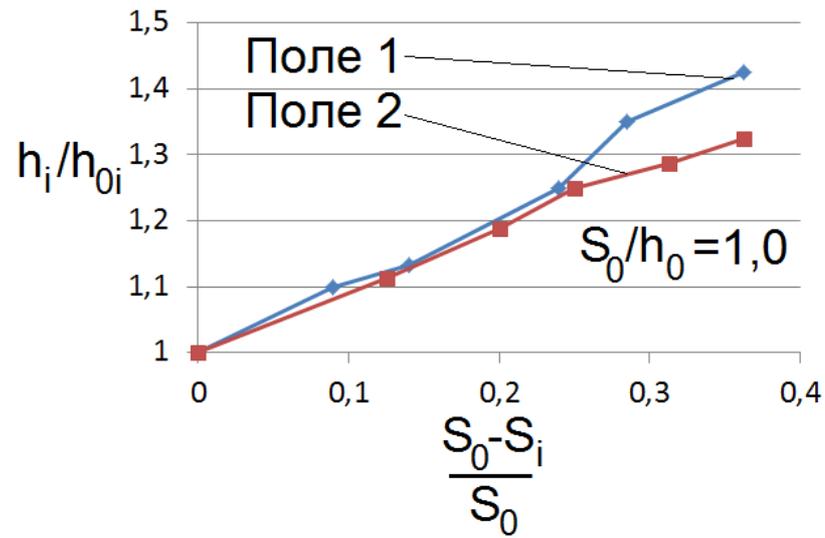


Рисунок 7.34 - Графики зависимости параметров формоизменения заготовки в процессе раскатки от размеров заготовки и температурного поля

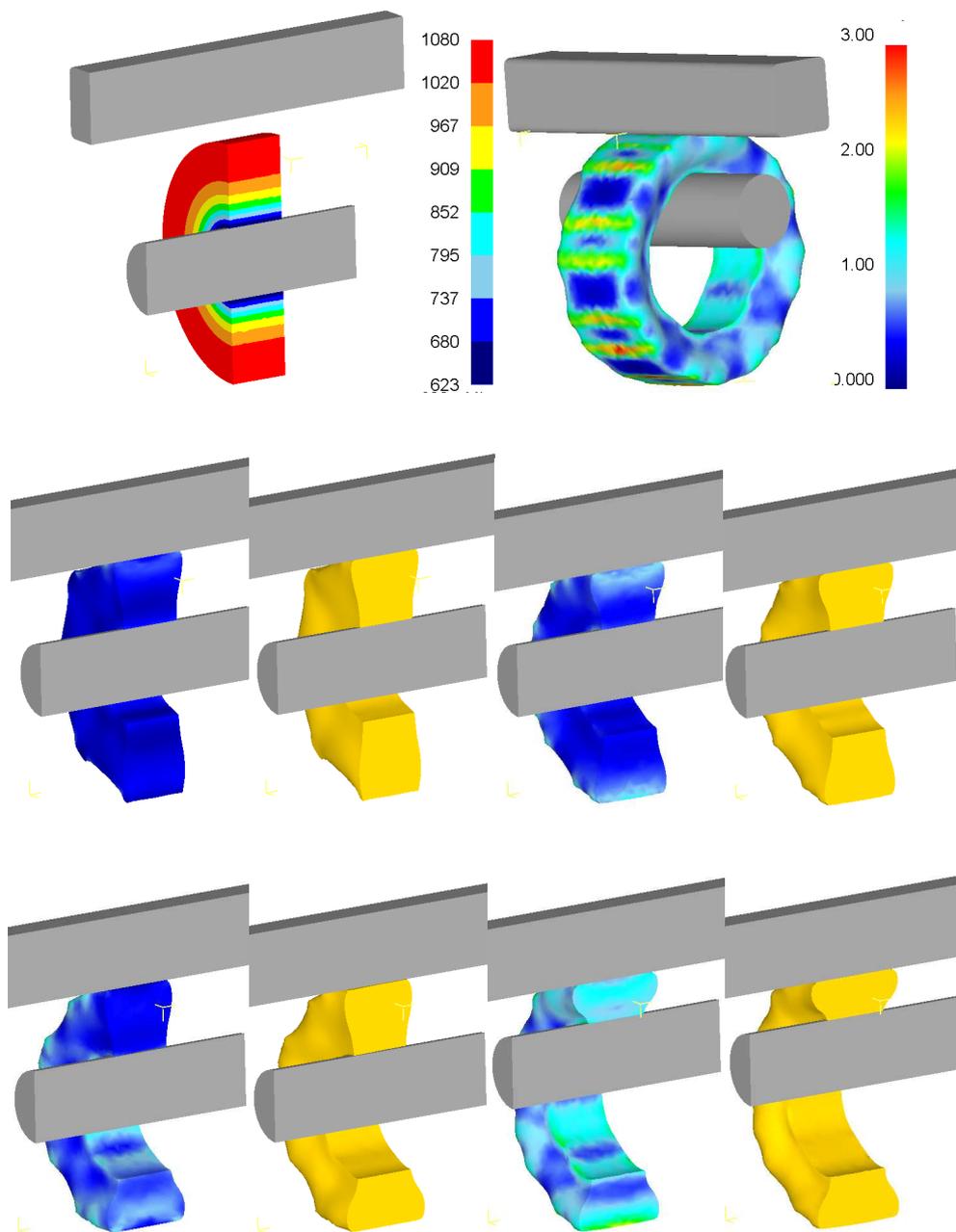


Рисунок 7.35 - Формоизменение заготовки с неоднородным температурным полем в процессе раскатки

Выводы

1. Установлено, что в процессе раскатки конических колец из ступенчатой заготовки может образовываться дефект формы поковки в виде зажима на внешней поверхности. Подобрана рациональная форма заготовки позволяющая избежать появления данного дефекта. На основании физического моделирования получена модель, описывающая влияние геометрических параметров заготовки на ее конечное формоизменение в процессе раскатки ступенчатой заготовки на гладком дорне. Установлено, что раскаткой заготовок со ступенчатой наружной поверхностью возможно получать поковки типа цилиндров с раструбами. Для определения размеров исходной заготовки предложена методика ее расчета.

2. Проведено моделирование процесса осадки плоской верхней плитой на плоском нижнем кольце слитков без прибыльной части с усадочной раковиной из номенклатуры ПАО «НКМЗ» и «Ижорский завод». По результатам моделирования получены поля распределения логарифмических деформаций и среднего напряжения. Установлено, что по ходу осадки наименее проработанной зоной слитка является часть металла под усадочной раковиной, там сосредоточены самые малые деформации. Часть некачественного металла из усадочной раковины в процессе осадки оказывается на торце осаженной заготовки, что должно быть учтено при составлении чертежа поковки, и на торец поковки, который будет соответствовать торцу осаженной заготовки с прибыльной стороны, должен быть назначен повышенный припуск. Установлено влияние диаметра отверстия плиты и отношения высоты тела слитка к его среднему диаметру на величину относительной степени деформации осадки, при которой вершина усадочной раковины будет вытеснена в отверстие. Данные соотношения получены в графическом виде.

3. Установлено, что по ходу осадки бесприбыльного слитка конусной вогнутой плитой с отверстием, в среднем по телу осаженной заготовки деформации сосредоточены достаточно равномерно. Установили, что конус-

ность вогнутых плит не способствует затеканию дефектного металла слитка, находящегося в районе усадочной раковины, в отверстие. Относительная степень деформации при осадке, при которой вершина усадочной раковины перемещается в отверстие плиты, здесь больше, чем при осадке слитка плоской плитой с отверстием.

3. При осадке бесприбыльного слитка выпуклой конусной плитой ее конусность существенно влияет на перемещение дефектного металла слитка, находящегося в районе усадочной раковины, в отверстие плиты. Данную схему можно рекомендовать дляковки сплошных поковок из бесприбыльных слитков, т.к. относительная степень деформации при осадке бесприбыльного слитка при которой вершина усадочной раковины перемещается в отверстие плиты здесь наименьшая из трех рассматриваемых схем. При угле конусности 140° , относительном диаметре отверстия 0,6 и осадке слитка с соотношением высоты к диаметру 2 степень деформации вытеснения вершины усадочной раковины составляет 0,57, что на 20% меньше, чем при осадке плоской плитой.

4. Предложен новый способковки труб из малоприбыльных слитков, который позволяет увеличить коэффициент использования металла при изготовлении поковок типа труб за счет использования головной части слитка. При этом необходимо в процессековки некачественный металл головной части слитка не удалять перед осадкой и в процессе прошивки блок располагать прибыльной частью вверх, при протяжке на оправке донная часть слитка должна быть расположена на толстом конце у бурта.

5. Проведено исследование процессаковки труб с глухим дном прошивкой слитка в контейнере. Разработан режимковки, позволяющий деформировать заготовку таким образом, чтобы постоянно сохранялся зазор между прошивнем и стенкой поковки для беспрепятственного легкого удаления последнего из поковки. Предложено прошивку заготовки производить по частям, в специальном контейнере таким образом, чтобы увеличить радиальную составляющую течения металла. Установлены параметры формоизмене-

ния заготовки в процессе прошивки по новому режиму. Определено, что с увеличением диаметра прошиваемого отверстия зазор между прошивком и получаемым изделием также увеличивается, кроме того увеличивается и наружный диаметр заготовки.

6. Проведено моделирование процесса раскатки поковок типа колец из заготовки с неравномерным температурным полем. Установлены возможности получения профилированных заготовок с использованием стандартного инструмента. Получены графические зависимости описывающие параметры формоизменения заготовки в процессе раскатки неравномерно нагретой заготовки. Определены основные параметры, оказывающие наибольшее влияние на формоизменение заготовки в процессе раскатки.

РАЗДЕЛ 8

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ КОВКИ НА ОСНОВЕ НОВЫХ СПОСОБОВ ГОРЯЧЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

8.1 Методика проектирования технологических процессов ковки крупных поковок

8.1.1 Общие рекомендации

Разработка нового подхода в проектировании процессов ковки крупных поковок, отвечающего последним достижениям науки в области пластического формоизменения материалов, является весьма актуальным и позволит вывести на новый уровень качество проектируемой продукции в виде технологий. Это в свою очередь приведет к повышению технико-экономических показателей производства.

На основе проведенных исследований и предложенных методов расчета процессов ковки крупных поковок разработан новый подход в проектировании технологий ковки. Блок-схема, иллюстрирующая данный подход, приведена на рис. 8.1.

Согласно предложенной методике разработки технологического процесса ковки, на первом этапе происходит сбор и анализ исходных данных об объекте – конечном изделии. Происходит анализ чертежа изделия, типа материала, программы выпуска и технических требований, предъявляемых к изделию согласно технического задания. После сбора и анализа исходных данных необходимо приступить ко второму этапу – составлению чертежа поковки на деталь. Составление чертежа поковки происходит по рекомендациям ГОСТ 7062-90 либо ТУ, действующим на предприятии. После этого приступают к предварительному выбору типа и размеров слитка. Выбор типа слитка обусловлен видом поковки, техническим заданием и возможностями предприятия. После выбора слитка происходит анализ базы стандартных технологий, внедренных в производство, и происходит проверка на соответ-

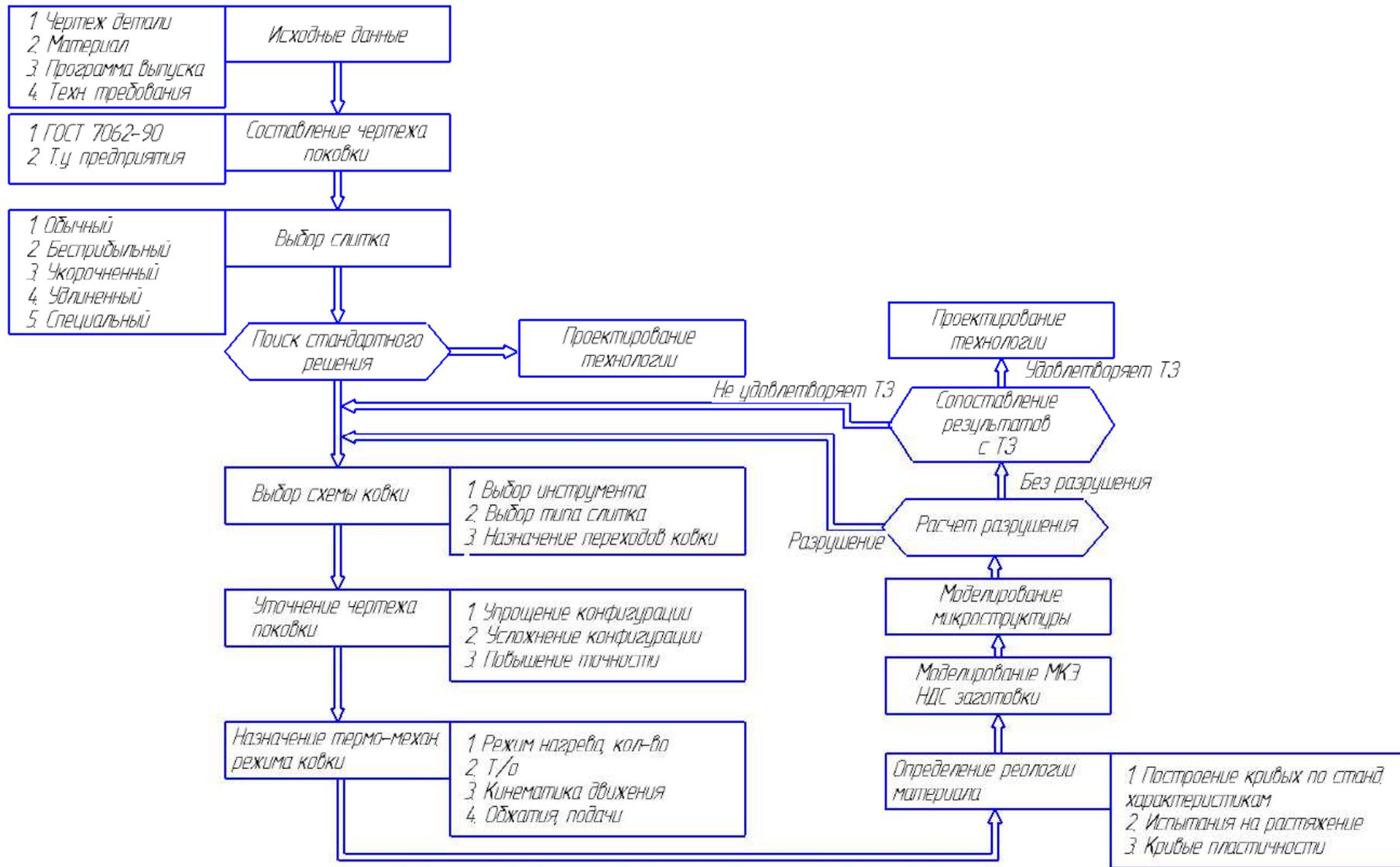


Рисунок 8.1 - Методика разработки технологических процессов ковки крупных поковок

ствие результатов реализации данной технологии требованиям технического задания. В случае, если найдена стандартная технология, реализация которой показала полностью удовлетворительные результаты, происходит проектирование технологического процесса на основании данной технологии.

Если такой технологии не обнаружено, либо имеющаяся технология не дает нужный результат, то необходимо провести цикл исследований по предложенной последовательности. Первое, что необходимо сделать, это выбрать схему ковки. Выбор схемы ковки происходит на основании полученных в 4-7 разделах результатов исследований и исходных данных. Под выбором схемы ковки подразумевается выбор схемы ковочного инструмента, типа слитка и назначения переходов ковки. Следующим этапом является уточнение чертежа поковки с учетом выбранной схемы ковки. Уточнение выражается либо в упрощении конфигурации поковки, уменьшении ее точности либо, наоборот, в повышении точности, отказа от ряда напусков, если таковые имеются. Усложнение конфигурации поковки (повышении коэффициента весовой точности), возможно на основании применения новых схем ковки, приведенных в диссертации. В случае, если произошло уточнение чертежа поковки, ведется пересчет размеров слитка.

На следующем этапе происходит назначение термомеханического режима ковки. Здесь, опираясь на исходные данные, назначается температурный интервал ковки, рассчитывается режим и количество нагревов. Подбирается режим первичной термической обработки поковки. Кроме этого, назначается кинематика движения инструмента (величины обжатий, подачи, их последовательность и т.д.). Механический режим ковки назначается в соответствии с результатами разработок диссертации.

После назначения схемы ковки, размеров инструмента и термомеханического режима ковки необходимо для дальнейших исследований определить реологию материала. Реология задается в виде кривых течения металла для различных температурно-скоростных условий и диаграмм пластичности.

Реология материала может быть определена экспериментально по ис-

пытаниям на растяжение, сжатие и кручение, и теоретически. Теоретическое построение кривых течения металла производится по методу, описанному в 3 разделе, и основано на использовании справочных данных о материале и использовании минимального количества экспериментальных данных.

Следующим этапом является проведение моделирования процессаковки выбранным инструментом по предложенному механическому режиму. Моделирование выполняется методом конечных элементов. Результатами моделирования являются поля распределения параметров напряженно-деформированного состояния заготовки, которые служат исходными данными для дальнейших исследований. Кроме того данные параметры сами по себе выступают критериями, по которым можно определить соответствие результатов, получаемых от реализации предложенной схемыковки, техническому заданию.

На следующем этапе необходимо проводить моделирование изменения микроструктуры металла в процессековки по исследуемой схеме. Алгоритм расчета изменений микроструктуры металла приведен в разделе 3 диссертации. Исходными данными для такого моделирования являются данные, полученные на основании метода конечных элементов. Результатом этого этапа являются поля распределения размеров зерна в объеме заготовки приковке по предложенной схеме. На следующем этапе необходимо произвести расчет возможного разрушения заготовки в процессековки. Данный расчет рекомендуется производить по методу, предложенному в третьем разделе диссертации, с учетом сложной кинематики движения инструмента. В случае, если расчет показывает наличие разрушения металла, необходимо вернуться к пункту выбора схемыковки и пройти последовательно все предыдущие этапы. Если же расчет показывает, что опасности разрушения не существует, то необходимо перейти к следующему этапу – сопоставлению результатов расчетов с требованиями ТЗ. Если все требования выполнены, то следующим шагом будет разработка технологического процессаковки изделия.

8.1.2 Технологические рекомендации проектирования процессов ковки валов

Общая методика проектирования технологических процессовковки различных видов поковок приведена выше. Дадим разъяснения касательно некоторых этапов проектирования технологических процессов для различных видов поковок.

Третий этап подразумевает выбор слитка для изготовления поковки. Основные виды слитков - это обычный кузнечный слиток, малоприбыльный, бесприбыльный, удлиненный, укороченный, специальной конфигурации и т.д. Каждый из данных слитков имеет ряд преимуществ и недостатков. Как указывалось в первом разделе диссертации, на основании исследований, проведенных Марковым О.Е., наиболее целесообразным является выбор укороченного слитка, что обусловлено возможностью отказа от операции осадки без снижения качества изделия.

Выбор схемыковки поковок типа валов будет основан на виде материала и назначения поковки. В случае, если поковка имеет особое назначение, т.е. должна иметь повышенное качество, и материалом изделия не является низкопластичная сталь, рекомендуется производить ковку по следующей схеме (см. раздел 4, 5). На первом этапе производится ковка слитка до формы поперечного сечения в виде прямоугольника (ковка через пластину) с соотношением ширины к высоте 1-1,5. Протяжка в этом случае осуществляется плоскими бойками. Вначале протяжки, т.е. при наличии равномерного температурного поля заготовки протяжку осуществлять с относительной подачей от 0,5 до 1,1 и величиной относительного обжатия, равной 0,1...0,2. После падения температуры поверхности заготовки в процессековки до 1000°С следует осуществлять протяжку с относительной подачей 0,5...1,1 и величиной относительного обжатия 0,1...0,15. При достижении поверхностью заготовки температуры 900°С необходимо осуществлять протяжку с относительной подачей от 0,3 до 1,1 с той же величиной обжатия, а при падении температуры поверхности еще на 100°С необходимо уменьшить величину обжатия

до 0,05...0,1 при тех же подачах. Рекомендуется при последующем проходе производить протяжку со смещением заготовки на половину ширины бойка, что позволит обеспечить более равномерное распределение интенсивности логарифмических деформаций вдоль оси заготовки.

После получения полуфабриката в виде вала с прямоугольным сечением необходимо осуществить его профилирование ступенчатыми бойками (рис. 8.2). Для наибольшей деформационной проработки заготовки профилирование должно осуществляться бойком с углом скоса ступеньки $\alpha=15^\circ \dots 45^\circ$; относительная величина подачи заготовки должна быть равна $f/H=0,5 \dots 1,0$, относительный зазор между бойками $z/H= -0,15 \dots -0,3$, относительная высота ступеньки бойка (относительное обжатие) $h/H= 0,1 \dots 0,2$, относительные размеры заготовки $B/H= 1,5 \dots 2$.

В случае если поковка не имеет особого назначения и изготавливается из пластичного материала, то с целью интенсификации процессаковки рекомендуется применение стандартных комбинированных бойков. При этом для обеспечения благоприятного деформированного состояния заготовки протяжку комбинированными бойками рекомендуется проводить на первом этапе, т.е. при наличии равномерного температурного поля заготовки с относительной подачей от 0,3 до 0,5 и величиной обжатия, равной 0,15...0,25. После падения температуры поверхности заготовки в процессековки до 1000°C следует осуществлять протяжку с относительной подачей 0,5...0,7 и величиной относительного обжатия 0,2...0,25. При достижении поверхностью заготовки температуры 900°C необходимо осуществлять протяжку с относительной подачей от 0,7 до 1,1 с той же величиной обжатия, а при падении температуры поверхности еще на 100°C необходимо уменьшить величину обжатия до 0,15...0,2 при тех же подачах. Рекомендуется при последующем проходе производить протяжку со смещением заготовки на половину ширины бойка, что позволит обеспечить более равномерное распределение интенсивности логарифмических деформаций вдоль оси заготовки.

В случаековки поковок из специального малопластичного материала

рекомендуется применение вырезных бойков с углом выреза 135° . Термомеханический режим ковки в этом случае необходимо подбирать на основании дополнительных исследований с учетом предложенных методов.

В случае ковки поковок их стали X12МФ предложен режим, повышающий технологическую пластичность, который включает выдержку при температуре 1200°C , снижение температуры и выдержку при температуре 1160°C перед ковкой. Установлены рациональные температурные условия ковки слитков стали X12МФ на прессах для плавок с вакуумированием ($1160-950^{\circ}\text{C}$) и без вакуумирования ($1200-1050^{\circ}\text{C}$).

С учетом приведенных рекомендаций необходимо провести соответствующие исследования и разработать технологию ковки вала.

8.1.3 Технологические рекомендации проектирования процессов ковки плит

В случае ковки поковок типа плит предпочтение необходимо отдать слябовому слитку либо в случае отсутствия одного на предприятии укороченному для исключения операции осадки. Слябовые слитки, как и укороченные, позволяют минимизировать количество переходов ковки.

Практически для всех типов плит можно рекомендовать при выборе схемы ковки применение плоских бойков с фаской. Данные бойки необходимо применять для обеспечения минимальной неравномерности распределения деформаций в заготовке при протяжке плит. Необходимо, чтобы боек имел скошенную кромку с углом скоса $\alpha = 10^{\circ}$ и длиной фаски $L/B = 0,35$, ковка должна вестись с постоянной подачей, равной $2/3$ ширины бойка (рис. 8.3). Наименьшая вероятность образования поверхностных трещин у заготовки, протягиваемой бойками с углом фаски 10° и длиной $L/B = 0,45$. С точки зрения наилучшего формоизменения заготовки в процессе протяжки плоскими бойками является боек с углом скоса $10-15^{\circ}$ и относительной длиной скоса, равной $0,35$ от ширины бойка. Таким образом, можно рекомендовать для протяжки плит, плоские бойки с углом скоса $10-15^{\circ}$, и относитель-

ной длиной фаски $L/B = 0,35..0,45$.

В случаековки плит из стали X12МФ рекомендации по назначению термического режима необходимо использовать такие же, как и для валов. Протяжку при этом рекомендуется вести малыми (около 5%) обжатиями с максимальными паузами между нажимами. Перед протяжкой слиток рекомендуется подвергнуть биллетеровке с малыми обжатиями для создания пластичной «рубашки» в заготовке. Каждый последующий проход необходимо вести со смещением бойка на половину его ширины.

Используя данные рекомендации, необходимо провести моделирование процесса протяжки и подобрать на основании полученных данных наиболее подходящий режимковки.

8.1.4 Технологические рекомендации проектирования процессовковки дисков

При разработке технологического процессаковки дисков проводя выбор типа слитка необходимо учитывать, что основной формоизменяющей операцией является осадка. В процессе осадки часть металла находящаяся вдоль его оси течет в поперечном направлении. В случае если слиток будет иметь дефектную осевую зону, то после получения диска данная зона увеличится в поперечном направлении. Такая поковка будет иметь низкое качество. Поэтому исходная заготовка также должна иметь высокое качество, чему соответствует обычный кузнечный слиток с достаточно большой прибыльной частью. В процессе подготовительных операций (биллетеровка) форма заготовки, безусловно, может быть изменена для достижения более высокого качества изделия.

У традиционной осадки есть ряд недостатков, таких, как высокая сила, необходимая для ее осуществления, низкая точность получаемого изделия и высокая неравномерность распределения деформаций поковки.

При выборе схемыковки диска необходимо принять во внимание ряд особенностей. Первое - это форма изделия, в случае, если поковка имеет

сложную форму в виде эксцентрика, то рекомендуется применение схемы ковки с несимметричными плитами, либо протяжка заготовки в виде вала с уступами, имеющими определенный эксцентриситет, и высадка в кольцах.

В случае, если необходимо, чтобы конечное изделие имело высокое качество и высокий уровень деформаций, можно применить операцию выворота с применением специального инструмента в виде выпукло вогнутых плит.

Наиболее перспективной схемой ковки дисков осадкой является осадка профилированной заготовки. Способ осадки профилированных цилиндрических заготовок в виде цилиндра с конусными уступами, позволяет снизить неравномерность распределения деформаций в поперечном сечении заготовки и повысить точность поковок типа дисков, получаемых с применением операции осадки. Наибольшая равномерность распределения деформаций наблюдается при осадке заготовки с уступами, длина которых равна 10...15% длины исходной заготовки. При осадке заготовок с коническими уступами можно уменьшить зону малых деформаций с 10...14% площади поперечного сечения заготовки для осадки цилиндрической заготовки до 2...4% для осадки заготовки с коническими уступами относительным диаметром 0,7. Бочкообразность заготовки уменьшается с увеличением длины уступов и уменьшением их диаметра. В процессе осадки профилированной заготовки на ее боковой поверхности возникают сжимающие напряжения, величина которых тем больше, чем меньше диаметр уступов заготовки. Экспериментально установлено, что при осадке профилированных заготовок со значительной высотой происходит потеря их устойчивости. Рекомендуемое отношение высоты к диаметру средней части профилированной заготовки должно быть меньше 2,5, что возможно при ковке слитков с соотношением высоты к диаметру тела слитка 2,0 и менее.

В случае необходимости осадки относительно высокой заготовки процесс возможно осуществлять в несколько этапов. На первом этапе необходимо осуществить осадку заготовки плоскими плитами, после чего произвести профилирование заготовки разгонкой узким бойком таким образом, чтобы

образовалась вогнутая боковая поверхность. После чего произвести осадку плоскими плитами до необходимых размеров. Данный способ осадки заготовок позволяет существенно снизить бочкообразность. Наибольшая эффективность процесса будет достигаться при использовании узкого бойка с относительной шириной $\bar{X} = 0,1..0,3$, причем исходная цилиндрическая заготовка должна быть с относительной высотой $H/D \geq 1,0$. Используя полученные математические, графические зависимости и приведенную методику (см. раздел 5), необходимо определить параметры процесса осадки разгонкой узким бойком для получения поковок типа дисков с минимальной неравномерностью распределения деформаций по объему и минимальной величиной бочкообразности.

В случае, если не хватает мощности оборудования для осуществления процесса осадки, необходимо применить схему осадки разгонкой. Основной проблемой реализации процесса осадки заготовки разгонкой узким бойком, является недостаток информации по особенностям формоизменения поперечного сечения заготовки. По результатам исследования получена регрессионная модель, позволяющая рассчитывать отклонение формы поперечного сечения заготовки в зависимости от геометрических параметров заготовки и инструмента и режима ковки (см. п. 6.2.2). Используя данную модель, необходимо подобрать механический режим ковки.

В случае ковки дисков из малопластичных материалов необходимо применять режим ковки осадкой с паузами. Расчет величины обжатий и продолжительности пауз необходимо вести по предложенному методу (см. раздел 3). В случае ковки поковок из стали X12MФ режим ковки подбирается на основании рекомендаций, приведенных для валов касательно данного материала.

Как и в предыдущих случаях, выбрав схему ковки, необходимо провести экспресс моделирование, которое покажет, насколько удовлетворяет то или иное принятое решение.

8.1.5 Технологические рекомендации проектирования процессов ковки колец и труб

При разработке технологического процесса ковки полых поковок типа колец и труб, проводя выбор типа слитка, необходимо учитывать, что одной из основных подготовительных операций является прошивка. В процессе прошивки слитка часть металла, находящаяся в осевой зоне, удаляется. Поэтому если к поковке не предъявляются особые требования по качеству, то необходимо отдавать предпочтение бесприбыльному либо малоприбыльному слитку. В случае же изготовления особо высокоответственных поковок необходимо применить слиток с прибылью. В случае применения бесприбыльного слитка необходимо минимизировать количество металла, находящегося в области усадочной раковины слитка, который попадает в тело поковки. Этого можно достичь, применяя предварительную (перед прошивкой) операцию осадки бесприбыльного слитка выпуклой конусной плитой (см. п. 7.1.2).

При выборе схемы ковки кольца необходимо принять во внимание ряд особенностей. Первое - это форма изделия в случае если поковка имеет сложную форму в виде конуса, то рекомендуется применение схемы раскатки ступенчатой полый заготовки на гладком дорне с применением плоского бойка. Такая схема является наиболее рациональной, т.к. позволяет получать поковки, наиболее приближенные к конечному изделию, и применять традиционный ковочный инструмент. При этом необходимо обратить внимание на то, что размеры заготовки необходимо рассчитать по разработанной методике (см. п. 7.1.1).

В случае ковки гладких колец рекомендуется применять традиционный инструмент с использованием цилиндрической гладкой заготовки. Такая схема ковки наиболее распространена в производстве.

При ковке поковок типа труб слиток необходимо выбирать аналогично слитку для колец. В работе предложен способ, позволяющий уменьшить расход металла при производстве поковок типа труб. Способ основан на том, что прибыльная часть слитка не удаляется перед осадкой и прошивкой. По-

сле получения полой кольцевой заготовки прошивкой, в теле которой находится некачественный металл из прибыльной части слитка, она одевается на оправку прибыльной частью от бурта. В процессе протяжки заготовки металл прибыльной части перераспределяется вдоль оправки и попадает в припуск, который удаляется в процессе механообработки. Таким образом, повышается коэффициент использования металла (см. п.п. 7.1.2.4).

8.2 Новые технологические процессы и оснастка для ковки крупных поковок

Ковка поковок типа валов ответственного назначения. Технологические переходы изготовления детали «Ротор». На первом этапе разработки технологического процесса ковки поковки «Ротор» проведен анализ чертежа детали и требований, предъявленных к изделию. Установлено, что данное изделие должно иметь повышенное качество. Вторым этапом разработки технологического процесса, является составление чертежа поковки. В таблице 8.1 приведены размеры детали по различным участкам. На основании ГОСТа 7062-90 назначены припуски и допуски на размеры детали, участки проверены на выполнимость, назначены напуски. Эскиз поковки приведен на рис. 8.4.

Следующим шагом, согласно п.р. 8.1, является выбор типа и размеров слитка. Т.к. поковка должна обладать высоким качеством, то пользуясь традиционным подходом, подбираем обычный кузнечный слиток. На основании расчетов устанавливаем, что это слиток массой 51,6 т. Основные размеры слитка представлены на рисунке 8.5.

Таблица 8.1 – Исходные данные

| № участка | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Уков Уобщ | Сталь |
|-----------|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|------|--------------|-------|
| <i>di</i> | 400 | 1000 | 1100 | 600 | 800 | 500 | 550 | 1000 | 3,5 | 35 |
| <i>Li</i> | 800 | 3000 | 700 | 800 | 200 | 400 | 150 | 200 | | |

Предполагаем, что стандартного решения для технологического про-

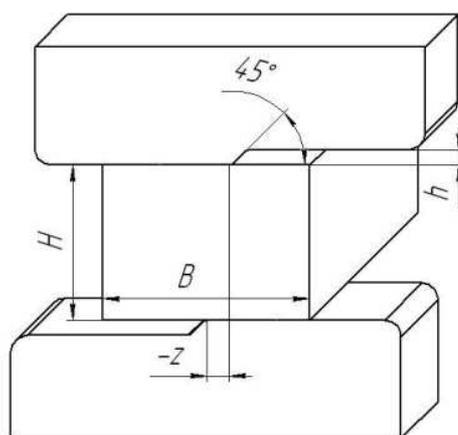


Рисунок 8.2 - Схема профилирования полуфабриката ступенчатыми бойками

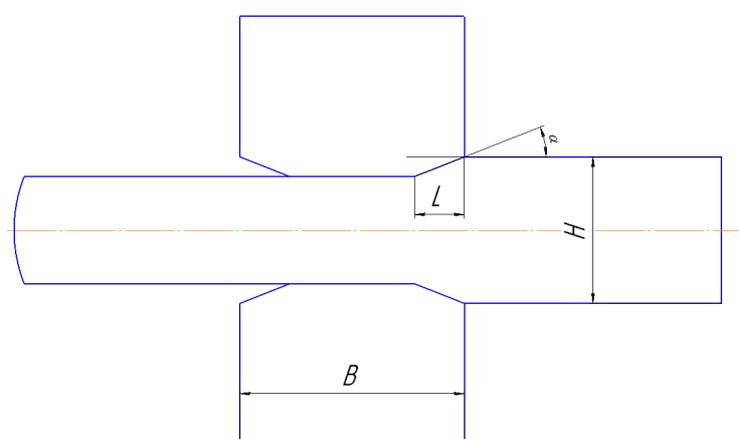


Рисунок 8.3 - Схемаковки поковок типа плит плоскими бойками со скосом

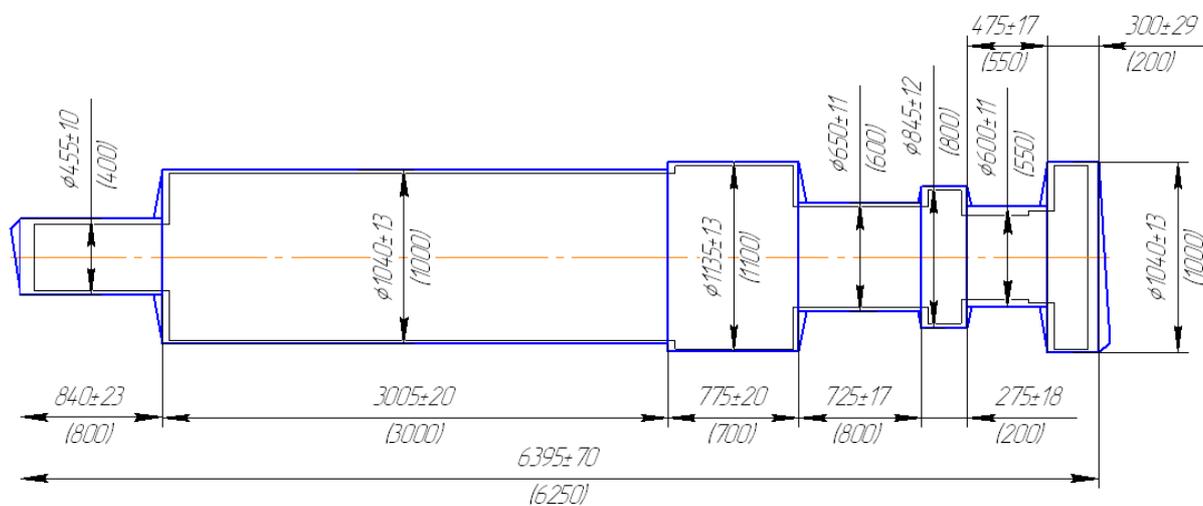


Рисунок 8.4 - Эскиз поковки «Ротор»

цесса ковки данного «ротора» нет. В таком случае необходимо перейти к циклу технологических исследований или, в нашем случае, к рекомендациям, полученным по уже проведенным исследованиям. В первую очередь необходимо подобрать схему ковки. В разделах 4, 5 представлены исследования процессов ковки поковок типа валов, на основании данных исследований можно заключить, что наиболее целесообразной для производства высококачественных изделий является ковка заготовки через пластину с профилированием ступенчатыми бойками. Технология в целом будет предполагать ковку слитка стандартным инструментом на заключительном этапе, но предварительная подготовка заготовки будет производиться специальной оснасткой. Поэтому влияния данной схемы ковки на размеры и точность изделия не будет и чертеж поковки пересматривать не нужно.

На следующем этапе необходимо назначить термомеханический режим ковки. Для заданной марки стали определяем температурный интервал ковки: $T_{\max} = 1250^{\circ}\text{C}$ и $T_{\min} = 750^{\circ}\text{C}$. Температурный интервал подбирается на основании справочных характеристик. Механический режим назначается в соответствии с п.р. 8.1.1. Следующие этапы моделирования проведены в работе в разделах 4, 5 и 8. Данная схема ковки показала наибольшую эффективность. Поэтому переходим непосредственно к проектированию технологии ковки. На рис. 8.6-8.7 приведены переходы заготовки в процессе протяжки.

Рассмотрим конструкцию ступенчатых бойков. Было предложено 2 варианта специальных бойков для протяжки. Первый вариант бойков изображен на рисунке 8.8. Первый вариант специальных бойков предусматривает их использование как плоскими, так и ступенчатыми бойками. Бойки 1 крепятся к рабочему столу прессы с помощью «ласточкиного хвоста». В бойках имеются вставки 2, их съем ведет к возможности протяжки ступенчатыми бойками. Использование вставок ведет к улучшению производства, так как они: 1) уменьшают время на смену инструмента; 2) имеют меньшую стоимость (по сравнению с 2 плоскими и 2 ступенчатыми бойками); 3) возможны замены на новые вставки.

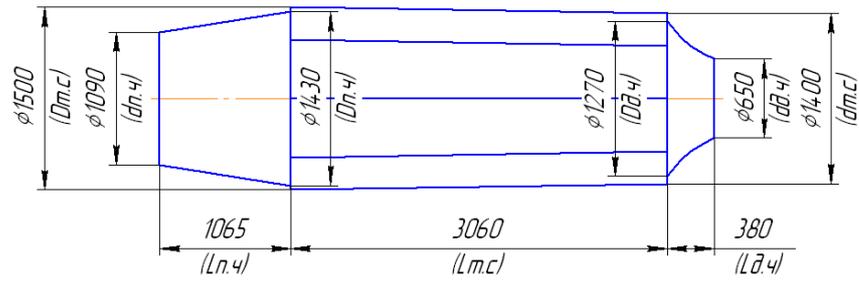


Рисунок 8.5 - Эскиз слитка массой 51,6 т

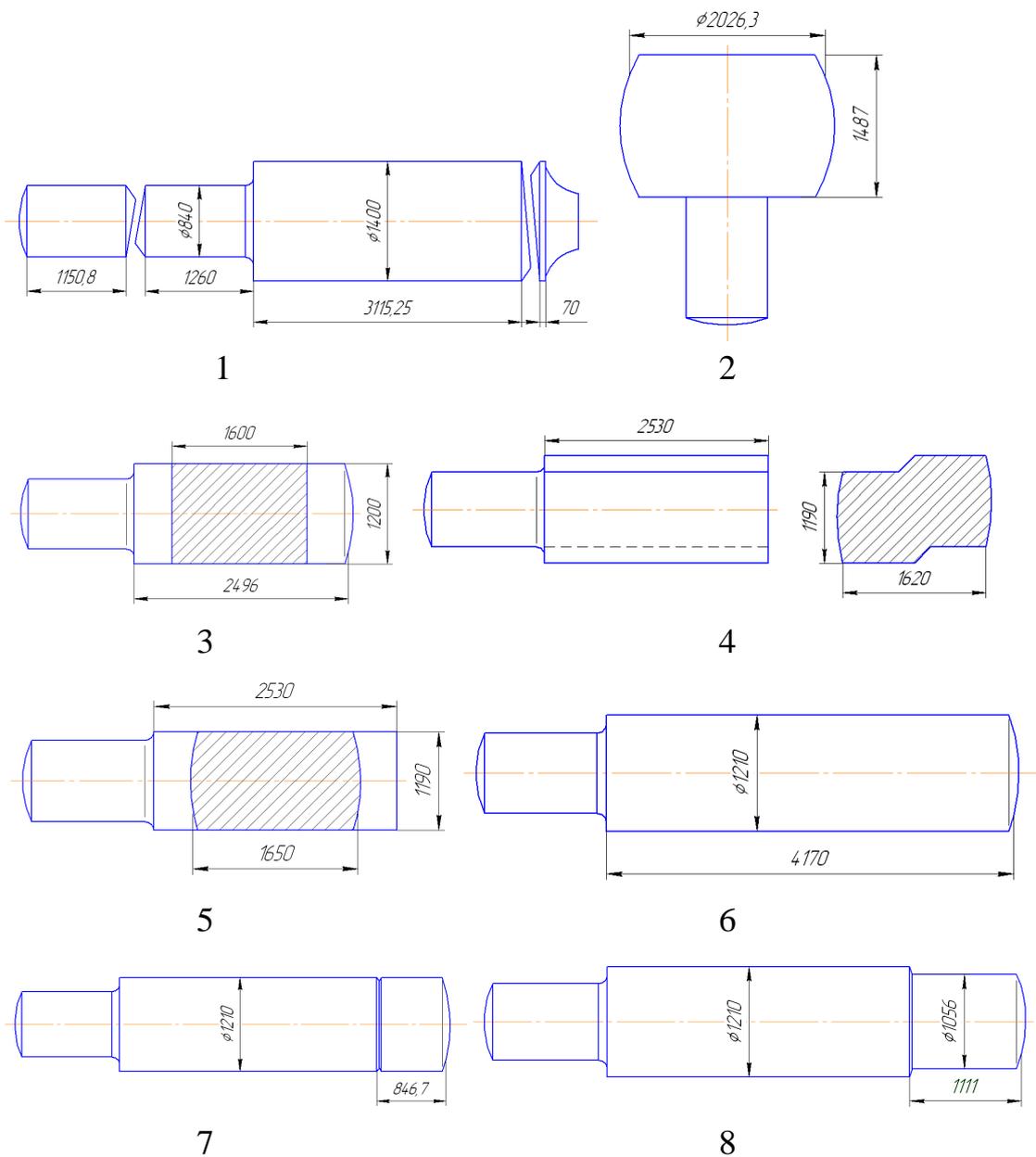


Рисунок 8.6 - Технологические переходыковки поковки «Ротор»

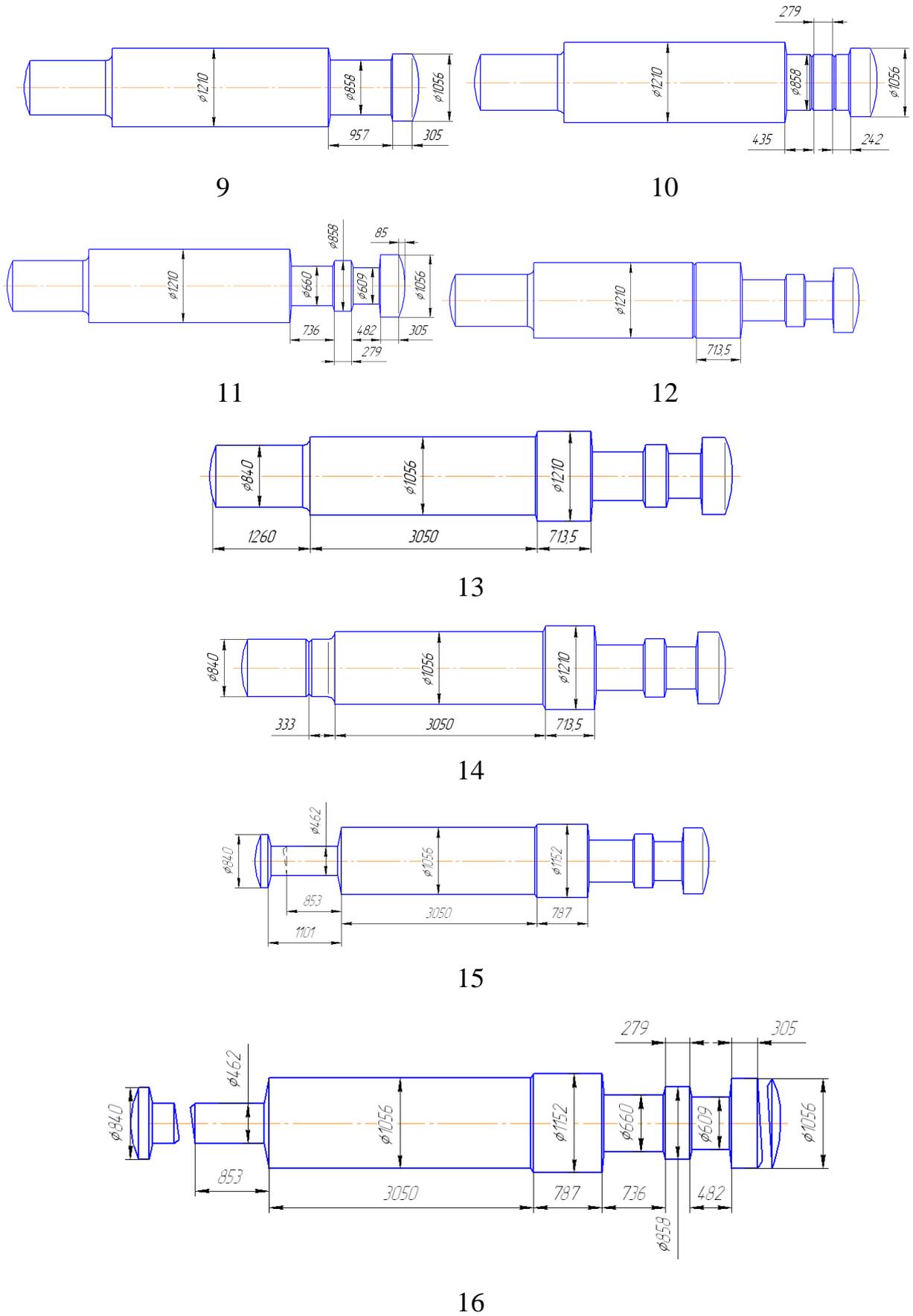


Рисунок 8.7 - Технологические переходыковки поковки «Ротор»

На рисунке 8.9 изображена вставка для первого варианта специальных бойков. Второй вариант бойков изображен на рисунке 8.10. Второй вариант специальных бойков предусматривает их использование как плоскими, так и ступенчатыми бойками. Бойки 1 крепятся к рабочему столу прессы с помощью «ласточкиного хвоста». В бойках имеются вставки 2. В этом варианте имеется два вида вставок, которые необходимо менять: для протяжки плоскими бойками и для протяжки ступенчатыми бойками.

На рисунке 8.11 изображена вставка для протяжки ступенчатыми бойками. На рисунке 8.12 изображена вставка для протяжки плоскими бойками.

Ковка поковок типа колец сложной формы. Технология изготовления детали «Корпус реактора». На первом этапе разработки технологического процесса ковки поковки «Корпус реактора» проведен анализ чертежа детали и требований, предъявленных к изделию. Вторым этапом разработки технологического процесса, является составление чертежа поковки. В таблице 8.2 приведены размеры детали по различным участкам. На основании ГОСТа 7062-90 назначены припуски и допуски на размеры детали, назначены напуски. Согласно традиционным технологиям производства кольцевых деталей, такая форма детали не выполнима, и она накрывается напусками с целью упрощения формы до гладкого кольца (рис. 8.13).

Следующим шагом согласно, п.р. 8.1, является выбор типа и размеров слитка. Т.к. поковка относится к кольцам, то желательно использование бесприбыльного слитка для увеличения коэффициента использования металла. На основании расчетов устанавливаем, что это слиток массой 320 т.

Такая технология предполагает слишком большой отход металла в стружку и экономическая целесообразность ее мала, поэтому необходимо приступить к поиску рационального решения и перейти к циклу технологических исследований или, в нашем случае, к рекомендациям, полученным по уже проведенным исследованиям. В первую очередь необходимо подобрать схему ковки. В разделе 7 представлены исследования процессов ковки повок типа конических колец, на основании данных исследований можно за-

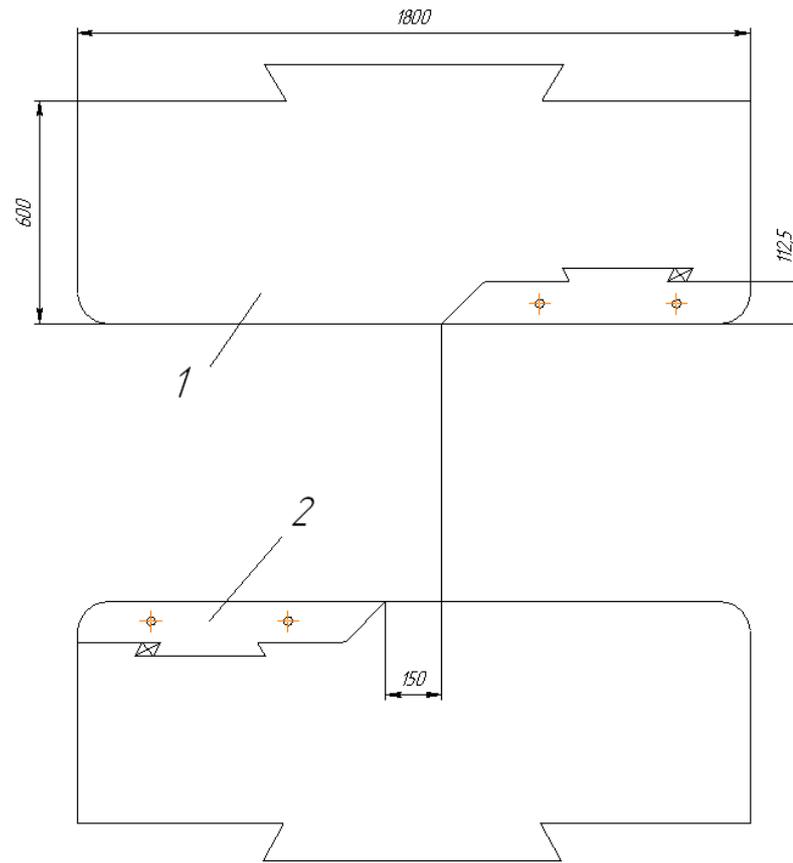


Рисунок 8.8 - Первый вариант специальных бойков

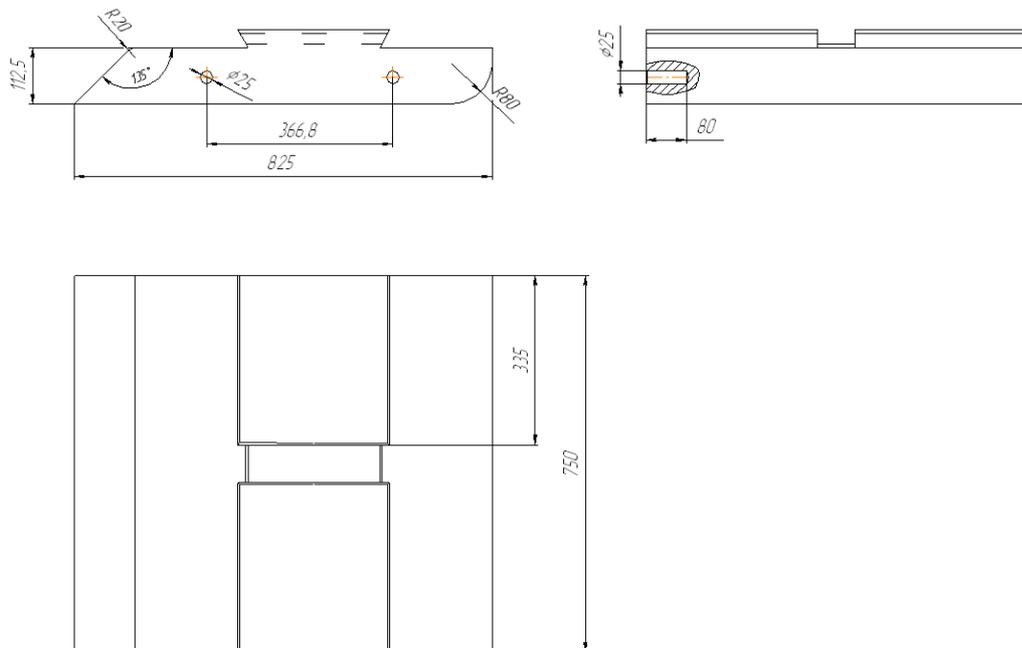


Рисунок 8.9 - Эскиз вставки для первого варианта специальных бойков

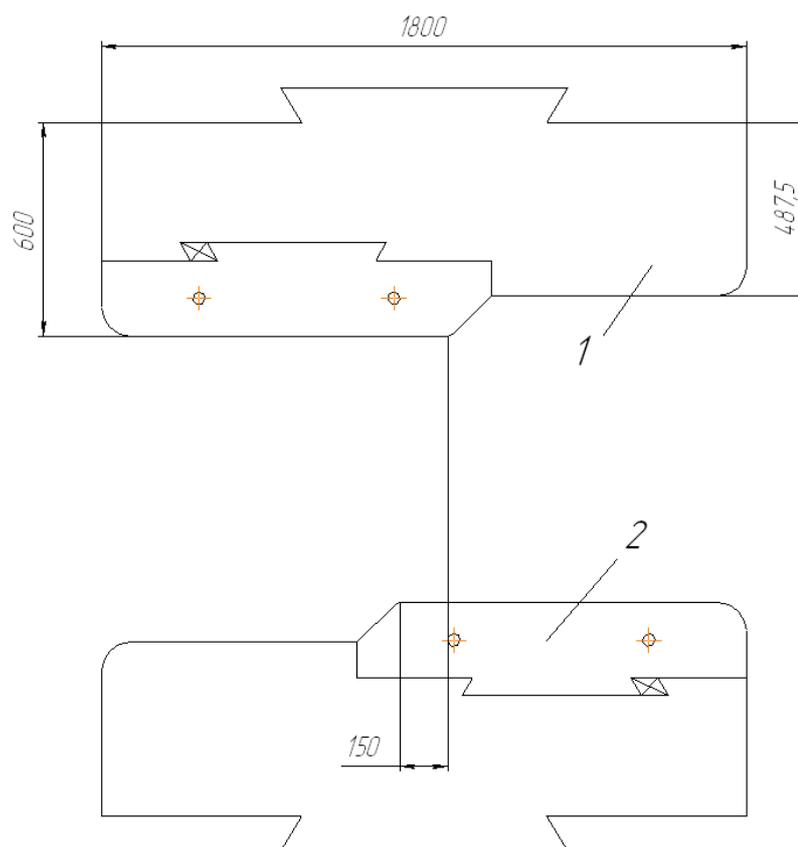


Рисунок 8.10 - Второй вариант специальных бойков

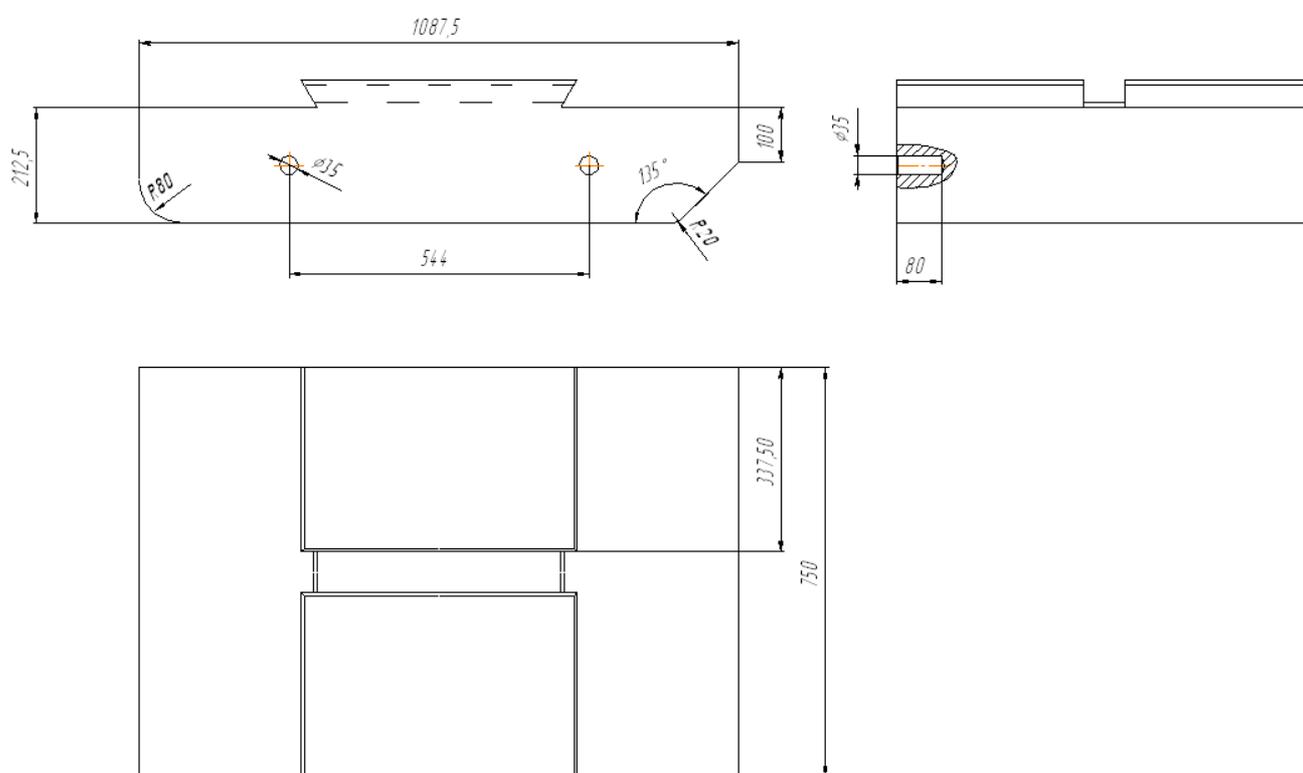


Рисунок 8.11 - Эскиз вставки для протяжки ступенчатыми бойками

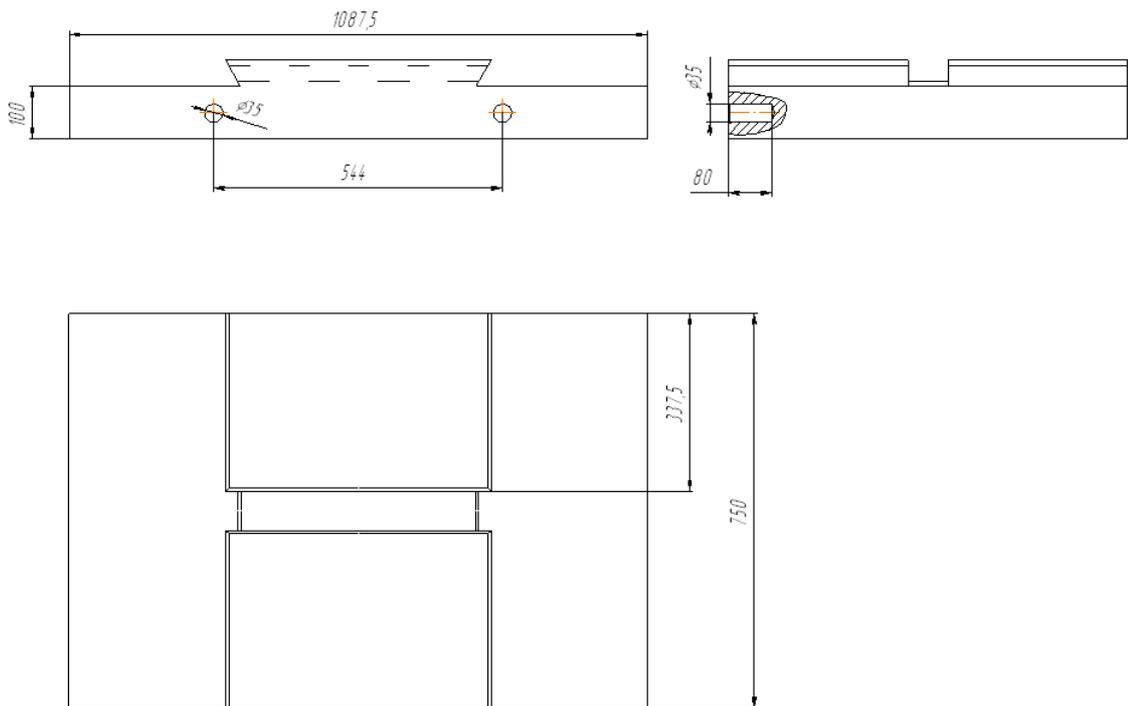


Рисунок 8.12 - Эскиз вставки для протяжки плоскими бойками

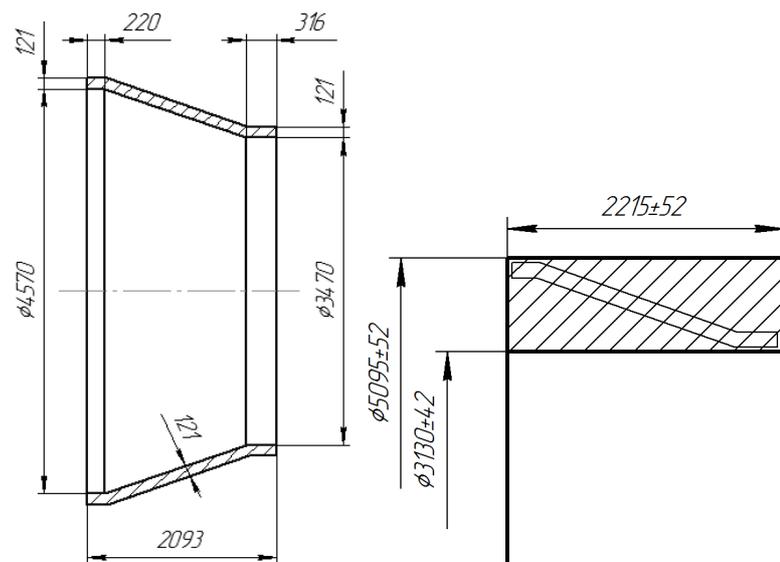


Рисунок 8.13 - Эскиз детали «Конусное кольцо» и ее поковки

ключить, что наиболее целесообразной для производства изделий подобного рода является раскатка полой ступенчатой заготовки. Технология в целом будет предполагать ковку слитка стандартным инструментом: плоским бойком на цилиндрическом дорне. Форма получаемого изделия будет существенно отличаться от той, которая получается по традиционной схеме. Поэтому необходимо пересмотреть чертеж поковки с учетом ГОСТа 7062-90 и схемыковки.

Таблица 8.2 - Исходные данные

| № | 1 | 2 | 3 | Общая | У _{общ} | Сталь |
|-----------------------|------|------|-----|-------|------------------|----------|
| D _{нар} , мм | 4812 | 3712 | | | 3 | 15Х2НМФА |
| D _{отв} , мм | 4570 | 3470 | | | | |
| L _i , мм | 220 | 1557 | 316 | 2093 | | |

Эскиз поковки после корректировки приведен на рис. 8.14. После уточнения эскиза поковки необходимо уточнить массу слитка, т.к. точность получаемого изделия существенно изменилась. Масса слитка составила 104 т. Эскиз слитка приведен на рис. 8.15.

На следующем этапе необходимо назначить термомеханический режимковки. Температурный интервалковки, согласно справочным данным $T_{\max} = 1240^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 900^{\circ}\text{C}$. Общее время нагрева 73,3 ч, время выдержки слитка перед нагревом для выравнивания температур 24 ч, продолжительность нагрева заготовки до выдержки 3 ч, время нагрева после выдержки 48,5 ч. Режимы нагрева и подогрева слитка приведены на рис. 8.16.

Механический режим назначается в соответствии с п. 8.1.4. Следующие этапы моделирования проведены в работе в разделе 7. Данная схемаковки показала наибольшую эффективность. Поэтому переходим непосредственно к проектированию технологииковки.

Расчет количества и вида технологических операций, размеров по переходам. Весь технологический процесс включает в себя следующие операции:

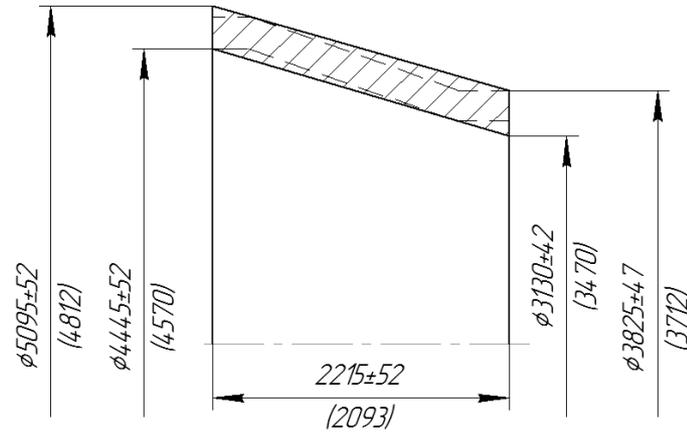


Рисунок 8.14 - Эскиз поковки детали “Корпус реактора”

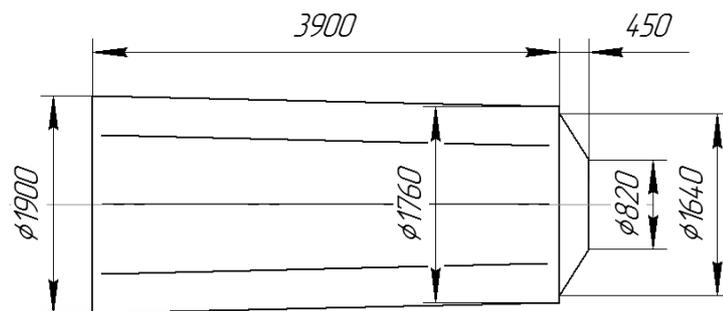


Рисунок 8.15 - Эскиз бесприбыльного кузнечного слитка массой 104 ТОННЫ

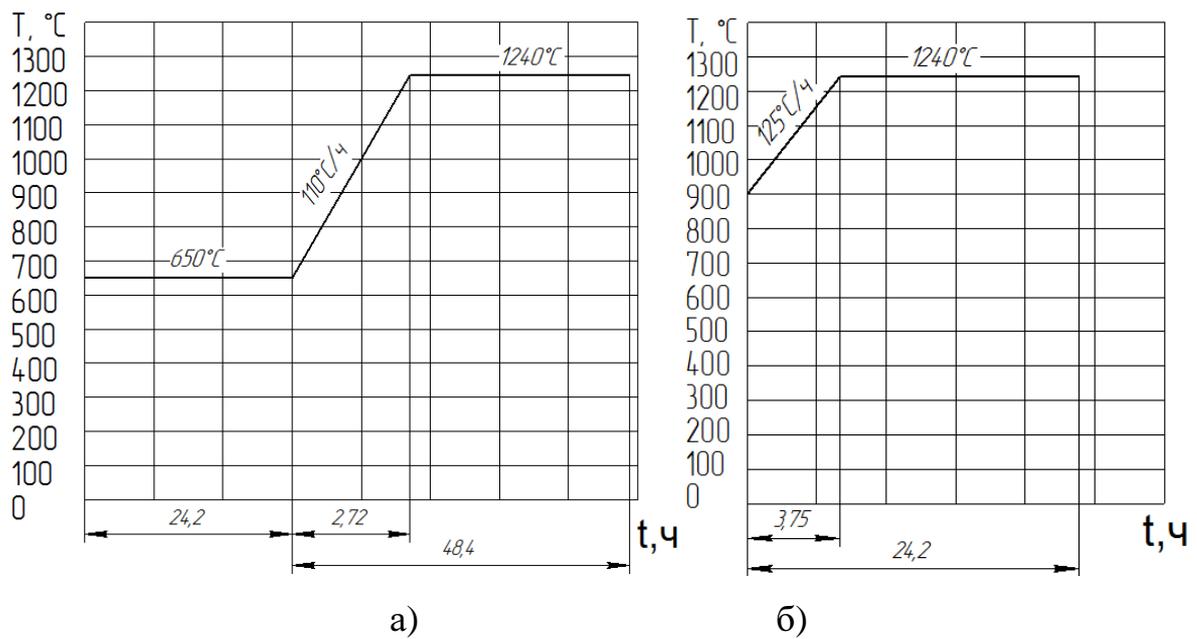


Рисунок 8.16 - Режим нагрева слитка и подогрева недокова: а – нагрев слитка; б – подогрев

1.) Обкатка граней: биллетируем слиток, держа его манипулятором. Диаметр сбиллетированного слитка равен 1760 мм, длина 4092 мм. После рубки донной части слитка длина и объем блока (рис. 8.17) равны 4000 мм и $9,7 \times 10^9$ мм³.

2.) Осадка плоскими плитами (рис. 8.18): диаметр осаженной заготовки равен 2680 мм, высота 1780 мм.

3.) Прошивка отверстия $\varnothing 900$ мм производится полым прошивнем.

4.) Раскатка на дорне плоским бойком для придания заготовке правильной формы. Раскатка заготовки до наружного диаметра 2900 мм. Длина полученного полуфабриката составит 1885 мм (рис. 8.19).

5.) Раскатка заготовки для получения конической обечайки. Размеры заготовки под раскатку конической обечайки проведен согласно разработанной в разделе 7 методике (рис. 8.20).

Внутренний диаметр заготовки под раскатку равен:

$$d_{\text{вн}} = 3130 : 2,2357 = 1400 \text{ мм.}$$

Площадь поперечного сечения поковки:

$$\text{- со стороны меньшего основания } f: f = \frac{\pi \times (3825^2 - 3130^2)}{4} = 3,8 \times 10^6 \text{ мм}^2;$$

$$\text{- со стороны большего основания: } F = \frac{\pi \times (5095^2 - 4445^2)}{4} = 4,87 \times 10^6 \text{ мм}^2.$$

Наружный диаметр $d_{\text{н}}$ заготовки со стороны, соответствующей меньшему основанию поковки:

$$d_{\text{н}} = \frac{\pi \times (d_{\text{н}}^2 - 1400^2)}{4} = 3,8 \times 10^6 \text{ мм}^2,$$

откуда $d_{\text{н}} = 2605$ мм.

Наружный диаметр $D_{\text{н}}$ заготовки со стороны, соответствующей меньшему основанию поковки:

$$D_{\text{н}} = \frac{\pi \times (D_{\text{н}}^2 - 1400^2)}{4} = 4,87 \times 10^6 \text{ мм}^2,$$

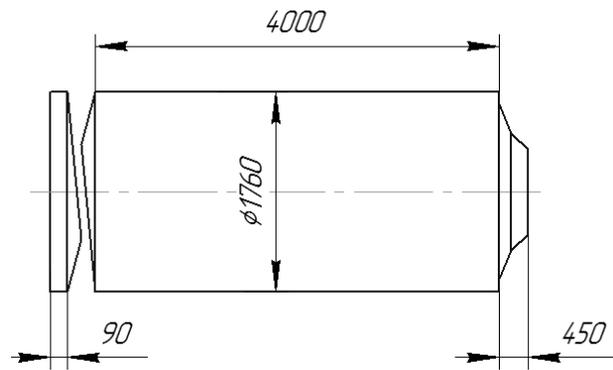


Рисунок 8.17 - Эскиз обкатанного слитка

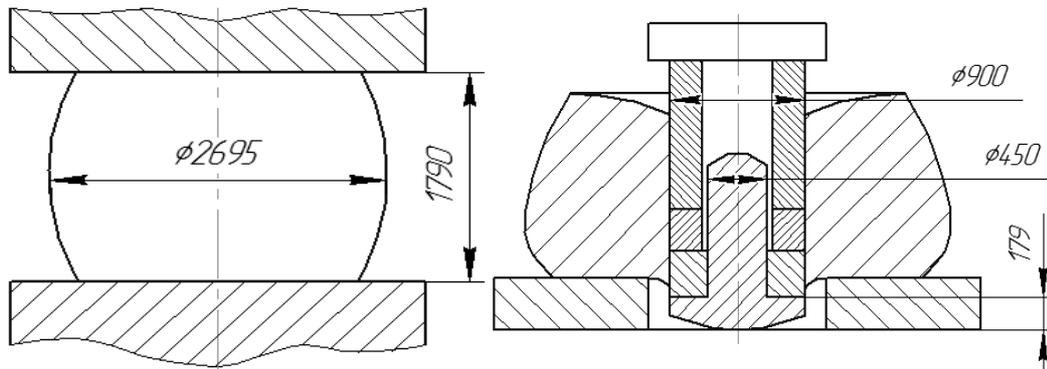


Рисунок 8.18 - Операция осадки плоскими плитами и прошивки пустотелым прошивнем

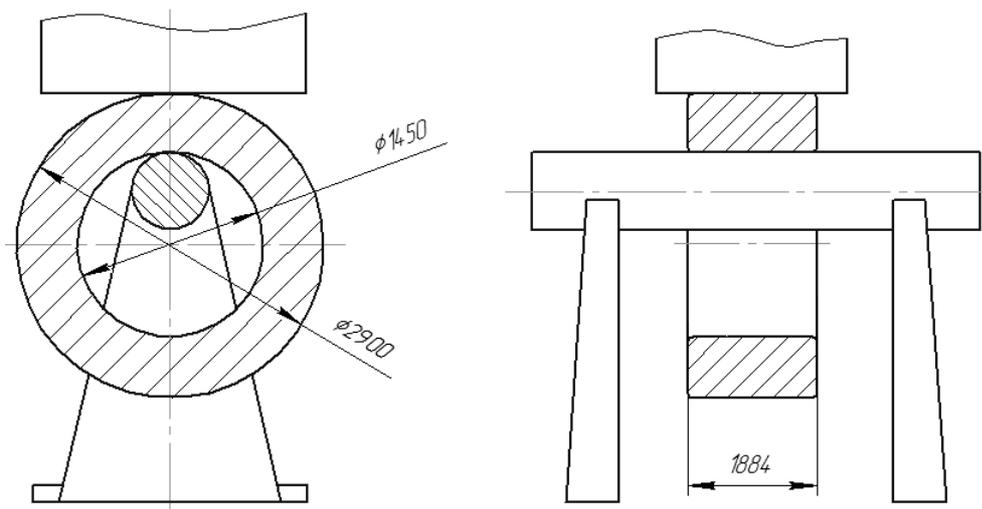


Рисунок 8.19 - Раскатка заготовки до заданных размеров

откуда $D_n = 2855$ мм.

Уширение заготовки с учетом производственного опыта выбираем равным 1,032. Откуда длина заготовки $L = 2215 : 1,032 = 2145$ мм.

$$\text{Объем поковки } V: V = \frac{\pi \times 2145}{4} \times ((5095^2 + 5095 \times 3825 + 3825^2) - (4445^2 \times 4445 \times 3130 + 3130^2)) = 9,3 \times 10^9 \text{ мм}^3.$$

Угар для стали 15Х2НМФА принимаем 1%.

$$\text{Длина } l \text{ ступени заготовки меньшего диаметра. } F \times (2145 - l) + f \times l = 4,87 \times 10^6 \times (2145 - l) + 3,8 \times 10^6 \times l = 9,3 \times 10^9 \times 1,01;$$

откуда $l = 955$ мм.

б.) Раскатка до получения конической обечайки поковочных размеров.

Ковка поковок типа дисков. Технология изготовления детали «Диск».

На первом этапе разработки технологического процессаковки поковки «диск», проведен анализ чертежа детали и требований, предъявленных к изделию. Вторым этапом разработки технологического процесса, является составление чертежа поковки. На рис. 8.21 приведен эскиз поковки. Припуски, допуски и напуски назначены на основании ГОСТ 7062-90.

Следующим шагом, согласно п.р. 8.1, является выбор типа и размеров слитка. Т.к. поковка относится к дискам, то желательно использование обычного кузнечного слитка для получения изделия высокого качества. На основании расчетов устанавливаем, что это слиток массой 7 т. Традиционная технология получения таких поковок заключается в билетировании слитка, рубке блока и осадки плоскими плитами. В таком случае неизбежно образование застойных зон (зон малых деформаций), что при дальнейшей термообработке приведет к структурной неоднородности материала.

Поэтому необходимо приступить к поиску рационального решения и перейти к циклу технологических исследований или в нашем случае к рекомендациям, полученным по уже проведенным исследованиям. В первую очередь необходимо подобрать схемуковки. В разделе 6 представлены исследования процессовковки поковок типа дисков. На основании данных исследо-

ваний можно заключить, что наиболее целесообразной для производства изделий подобного рода является осадка заготовки с уступами. Технология в целом будет предполагать билетеровку, оттяжку уступов заготовки и ее осадку плоскими плитами. Чертеж поковки при этом пересматривать нет необходимости.

На следующем этапе необходимо назначить термомеханический режим ковки. Температурный интервал ковки согласно справочным данным $T_{\max} = 1200^{\circ}\text{C}$, $T_{\min} = 850^{\circ}\text{C}$. Общее время нагрева, 20 ч, время выдержки слитка перед нагревом для выравнивания температур 14 ч, продолжительность нагрева заготовки до выдержки 3 ч.

Механический режим назначается в соответствии с п. 8.1.4. Следующие этапы моделирования проведены в работе в разделе 6. Данная схема ковки показала наибольшую эффективность. Поэтому переходим непосредственно к проектированию технологии ковки.

Расчет количества и вида технологических операций, размеров по переходам. Весь технологический процесс включает в себя следующие операции:

1.) Обкатка граней:

сбиллетировать слиток, отрубить прибыльную часть, разметить и рубить блок в размер. Длина и диаметр блока из расчетов равны соответственно 1750 и 730 мм (рис. 8.22).

2.) Оттяжка уступов заготовки. Оттяжка производится комбинированными бойками, форма уступов коническая, наименьший диаметр уступа 510 мм, длина уступа 360 мм (рис. 8.23) общая длина заготовки 1945 мм.

3.) Осадка заготовки плоскими плитами до поковочных размеров.

4.) Маркировать, и отправить на контроль ОТК.

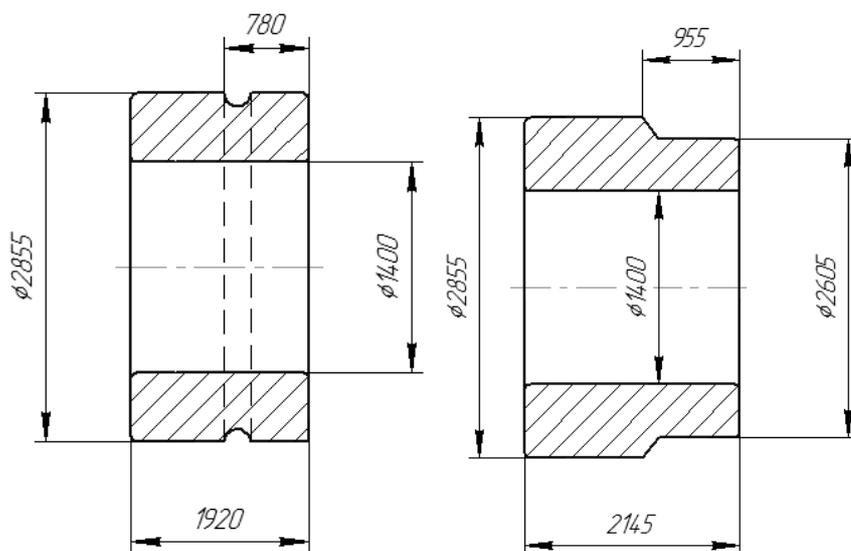


Рисунок 8.20 - Полученная заготовка для раскатки на оправке

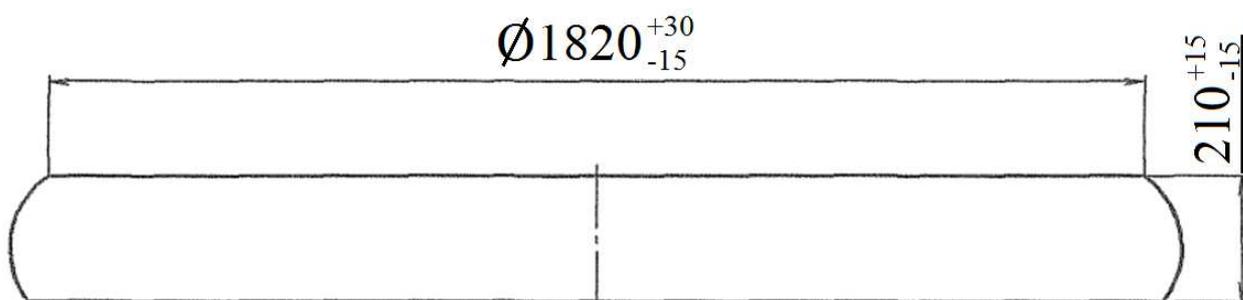


Рисунок 8.21. Эскиз детали «Конусное кольцо» и ее поковки (материал 09Г2С)

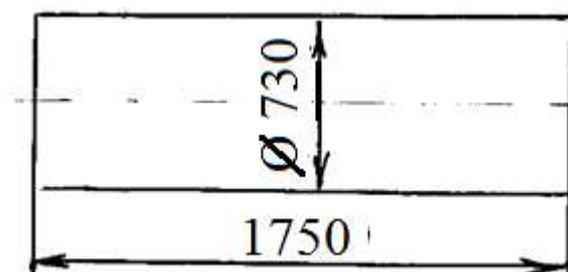


Рисунок 8.22 - Эскиз блока слитка

8.3 Новые способы деформирования и их внедрение

8.3.1. Ковка поковок типа эксцентриков

Способ ковки эксцентриков профилированными плитами [339]. Шифр способа А1Б6В1Г1Д1Е2Ж1 в сочетании с А1Б2В1Г1Д1Е2Ж1 (см. рис. 2.2). Предлагаемый способ позволяет получать после операции осадки на полуфабрикате утолщение несимметричной формы, которое после правки плоскими плитами с отверстиями принимает форму цилиндрического утолщения с осью, не лежащей на оси стержневой части поковки, то есть имеет эксцентриситет. Суть предлагаемого способа поясняется схемами, приведенными на рис. 8.24.

На рисунке показана установка исходной заготовки в верхнюю плоскую плиту с отверстием и нижнюю плиту с отверстием и скосом (см. рис. 8.24 а), осадка заготовки в плоской плите и плите со скосом (см. рис. 8.24 б), кантовка заготовки на 180° и установка ее в плоские плиты с отверстием (см. рис. 8.24 в), правка утолщения плоскими плитами с отверстием (см. рис. 8.24 г).

Изготовление деталей таким способом позволяет повысить их точность и расширить их номенклатуру.

Способ ковки эксцентриков смещением [340]. Шифр способа А1Б2В1Г1Д1Е2Ж1 (см. рис. 2.2). Сначала протяжкой получают заготовку в виде стержня с утолщением, после чего заготовку устанавливают на стойки и смещают утолщение относительно стержневой части заготовки верхним плоским бойком. После этого заготовку с полученным эксцентриситетом устанавливают в плиты с отверстиями и осаживают до необходимой высоты, причем величина эксцентриситета поковки будет обуславливаться эксцентриситетом, который был получен на заготовке перед осадкой. Суть способа представлена в виде схем на рис. 8.25. Предлагаемый способ позволяет получить детали типа эксцентриков с тонким утолщением, изготовление которых усложнено протяжкой и смещением вследствие их возможного смятия.

По запросу ПАО «НКМЗ» проведена разработка и моделирование про-

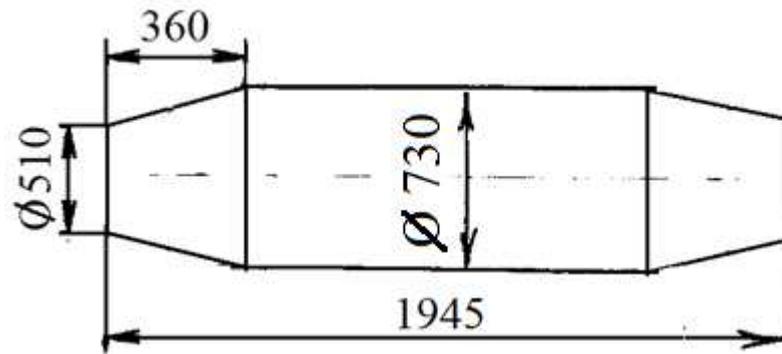


Рисунок 8.23 - Эскиз заготовки после оттяжки конических уступов

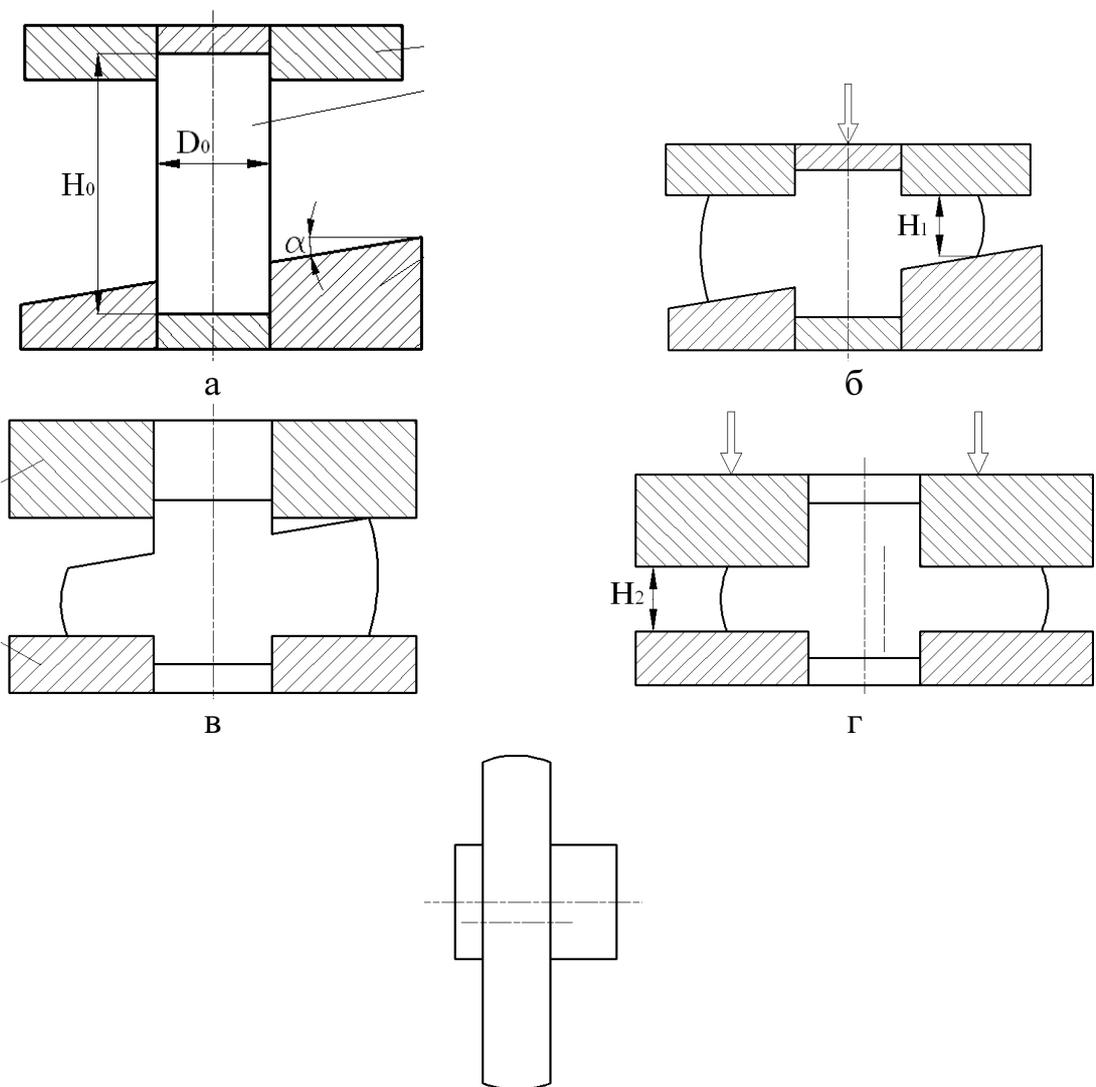


Рисунок 8.24 - Переходы ковки поковок типа эксцентриков

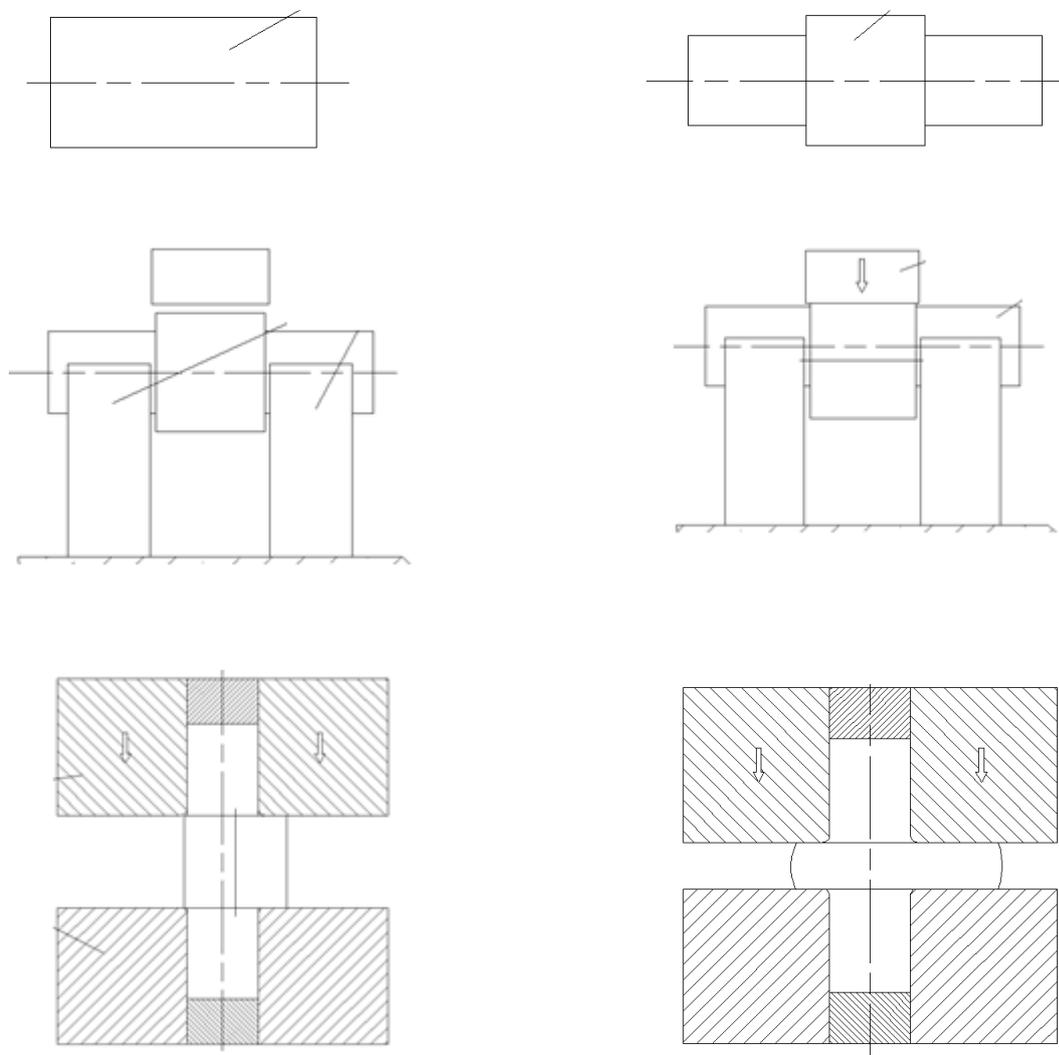


Рисунок 8.25 - Схема ковки поковок типа эксцентриков

цессековки поковки ротор с эксцентриком (рис. 8.26). Проблема заключалась в отсутствии информации по изготовлению поковок такого типа и необходимости определения параметров формоизменения заготовки в процессе высадки утолщения на конце. Традиционно изделия такого рода изготавливались с пониженной точностью, т.е. без эксцентриситета. Утолщение накрывалось напуском, и высаживался цилиндрический фланец без эксцентриситета.

Для увеличения точности было принято решение отковать поковку с фланцем, расположенным эксцентрично по отношению к основной части поковки. Однако было неизвестно, как поведет себя недеформируемый в процессе высадки отросток поковки, т.к. течение металла будет неравномерным. Кроме того, неизвестно было какими геометрическими параметрами должна обладать заготовка перед высадкой (величина исходного эксцентриситета), для того чтобы получить поковку нужных размеров.

На основании полученных в разделе 6 рекомендаций установлено, что исходный эксцентриситет заготовки должен быть равен конечному 100 мм, что отличается от первоначального представления, предложенного на ПАО «НКМЗ». Кроме того проведено исследование высадки утолщения с эксцентриситетом, установлено, что недеформируемый отросток, вследствие неравномерного затекания металла в отверстие подкладного кольца под утолщением, будет искривляться, причем величина искривления составит 160 мм (рис. 8.27).

Дана рекомендация для устройства искривления недеформируемого отростка, которая заключается в увеличении высоты кольца под фланцем для направления течения металла в вертикальной плоскости. Это позволило избавиться от искривления поковки.

С учетом использования данных, полученных в результате моделирования, разработана технология и откована поковка ротора массой 28,7 т, фотография откованной поковки приведена на рис. 8.28.

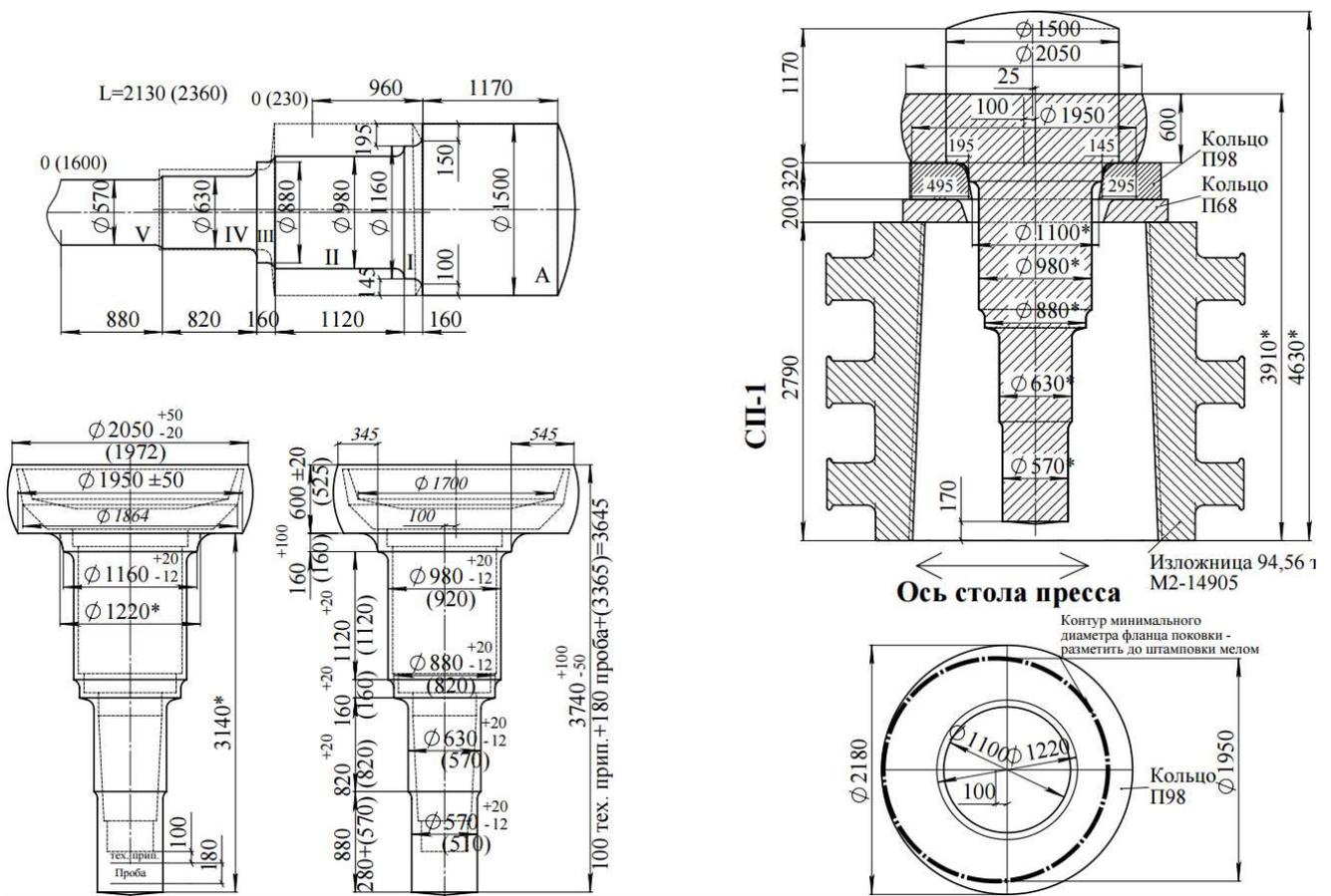


Рисунок 8.26 - Схема поковки и оснастки дляковки изделия «ротор» предложенные на ПАО «НКМЗ»

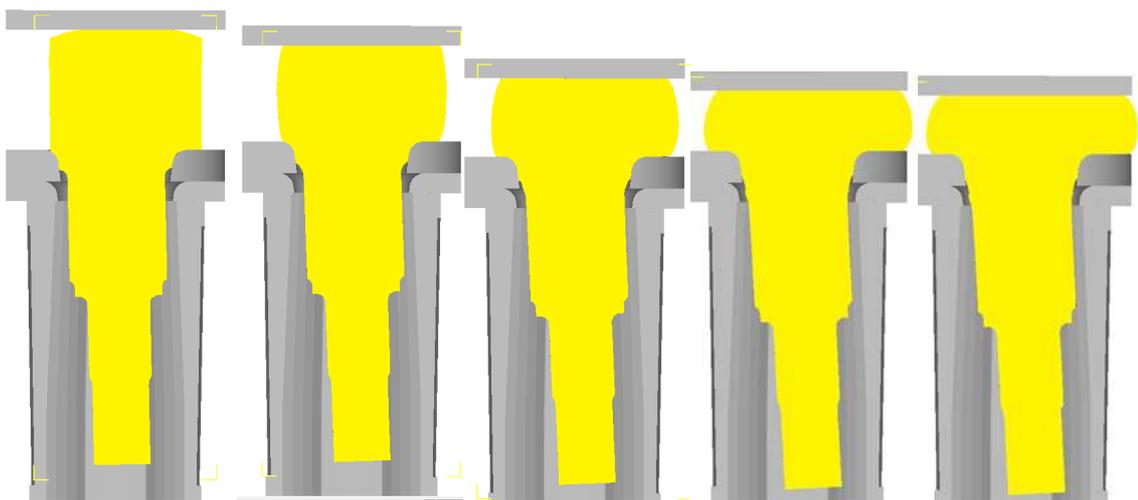


Рисунок 8.27 - Картина формоизменения заготовки в процессе высадки эксцентрично расположенного утолщения



Рисунок 8.28 – Общий вид поковки «ротора»

8.3.2 Ковка поковок типа дисков

Предложены способы, повышающие уровень механических свойств поковки, описанные в разделе 6, это осадка коническими плитами [341] и осадка профилированной заготовки [342].

Способ ковки бесприбыльных слитков осадкой на плоской плите с отверстием [343, 344]. Шифр способа А1Б3В3Г1Д1Е2Ж1 (см. рис. 2.2). Бесприбыльный слиток перед ковкой, устанавливается стороной с усадочной раковиной на нижнюю плиту с отверстием и осаживают его верхней плоской плитой. Металл, который затекает в отверстие кольца служит цапфой для удержания заготовки. После чего полученную заготовку протягивают до необходимых размеров. Ковкой предложенным способом можно получать сплошные поковки высокого качества с высоким коэффициентом использования металла. На рис. 8.29 показаны схемы ковки таких слитков.

Способ ковки бесприбыльных слитков выпуклой плитой [345-346]. Шифр способа А1Б10В3Г1Д1Е2Ж1 в сочетании с А1Б3В3Г1Д1Е2Ж1 (см. рис. 2.2). Выполняется осадка верхней выпуклой плитой с радиусом выпуклости $R_{сф} = (0,4...0,8)R_{заг}$ и нижней плитой с отверстием, причем соотношение диаметра отверстия и заготовки составляет $d_{отв}/D_{заг} = 0,4...0,7$.

При осадке предложенными плитами происходит образование вогнутой боковой поверхности на заготовке за счет приложения нагрузки выпуклым инструментом. Такая форма обеспечивает возникновение сжимающих напряжений, как на поверхности, так и в осевой дефектной зоне заготовки, устраняет трещинообразование, повышает пластичность материала и способствует завариванию внутренних дефектов. Более того, дефекты в донной части слитка будут вытесняться в отверстие в нижней плите, а усадочные дефекты со стороны прибыльной надставки будут раскрываться, уменьшаясь по высоте. Дальнейшая правка верхней плоской плитой и нижней плитой с отверстием не вызовет появления большой бочки, как в известном способе, и даст возможность проработать застойную торцевую зону поковки, что обеспечит

печит хорошую проработку металла заготовки, так как исчезнет зона затрудненных деформаций. Схемы переходовковки по данному способу приведены на рис. 8.30-8.31.

Способковки дисков профилированием узким бойком. Шифр способа А2Б1В1Г1Д4Е1Ж1 в сочетании с А1Б1В2Г1Д1Е2Ж1 (см. рис. 2.2). При изготовлении поволоков типа дисков из цилиндрической заготовки сначала выполняется циклическая локальная осадка узким бойком с рабочим ходом 0,05..0,15 от высоты заготовки с вращением заготовки вокруг оси на угол, который обеспечивает перекрытие бойком части очага деформации предыдущей локальной осадки, причем такая осадка выполняется поочередно с обоих торцов заготовки таким образом, чтобы диаметр $D_1 = (1,1...1,3)D$ и высота $H_1 = (0,1...0,35)H$, после чего осуществляется осадка заготовки плоскими плитами до необходимого размера.

В процессе локального деформирования торцов заготовки узким плоским бойком очаг деформации сосредоточивается только в зоне внедрения бойка в заготовку, этим обеспечивается накопление интенсивных деформаций в торцевых зонах, в которых при осадке плоскими плитами образуется зона малых деформаций. Кроме этого, при локальном деформировании заготовки за счет интенсивного течения металла в зоне ее торцов, боковая поверхность принимает вид вогнутой бочки. При дальнейшей осадке наблюдается накопление деформаций в центральной части заготовки из-за того, что ее диаметр меньше по отношению к диаметру торцевых частей заготовки, что уменьшает неравномерность распределения деформаций в ее объеме.

Образование вогнутой боковой поверхности перед осадкой плоскими плитами приводит к изменению напряженного состояния металла заготовки и, как следствие, к возникновению на боковой поверхности заготовки напряжения сжатия, что уменьшает возможность образования трещин. При дальнейшей осадке вогнутая бочка трансформируется в цилиндрическую поверхность.

Суть способа поясняется схемами, приведенными на рис 8.32. При ков-

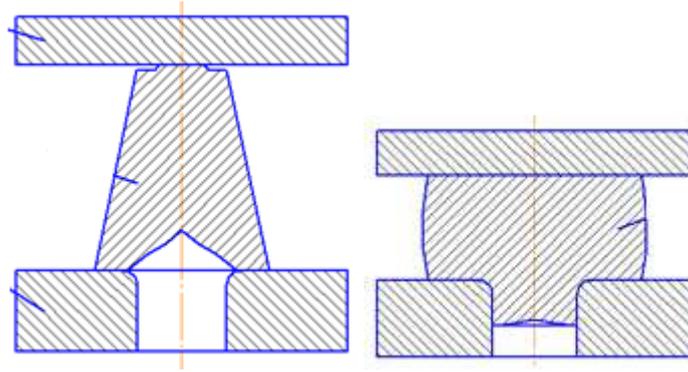


Рисунок 8.29 - Схема осадки бесприбыльного слитка

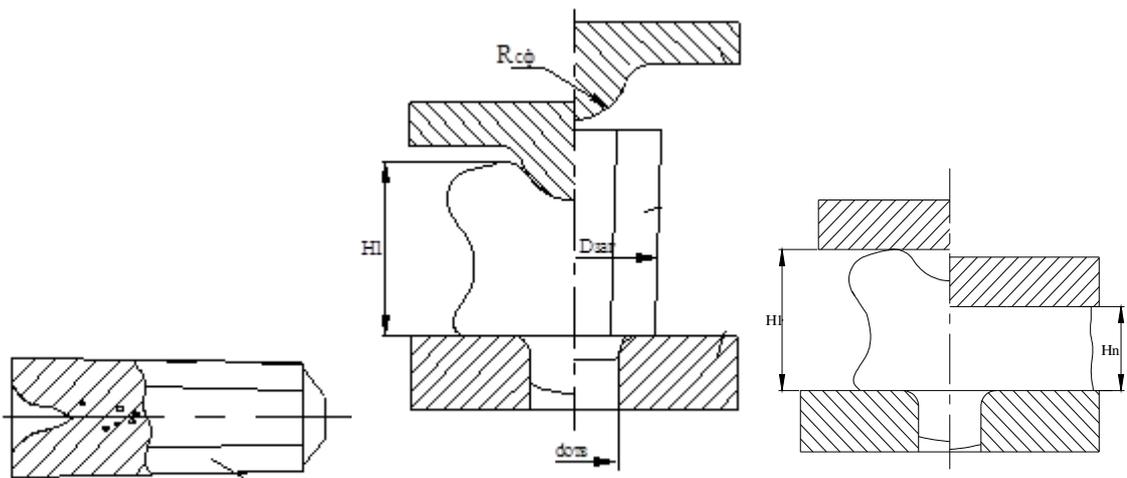


Рисунок 8.30 - Схемаковки бесприбыльных слитков

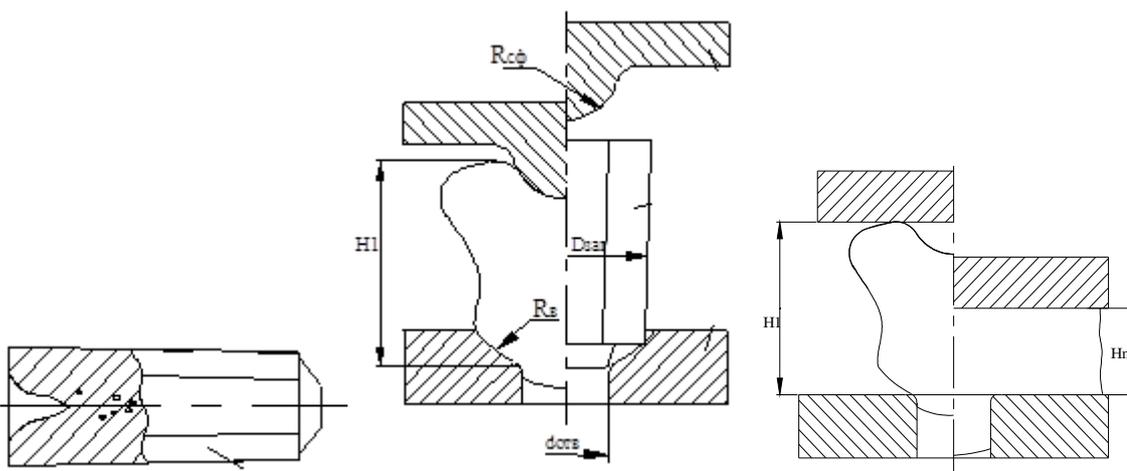
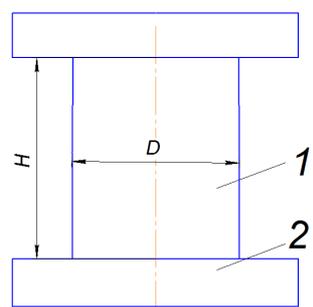


Рисунок 8.31 - Схема осадки бесприбыльного слитка



Вид А

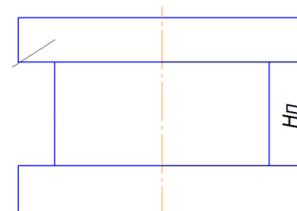
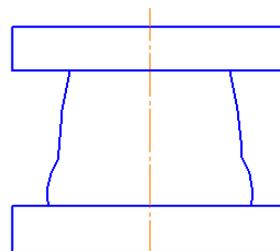
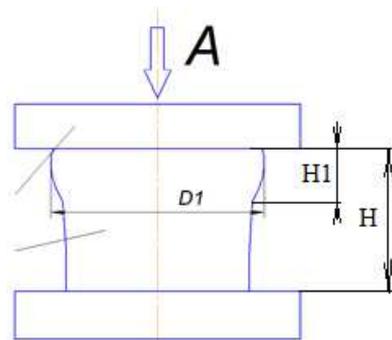
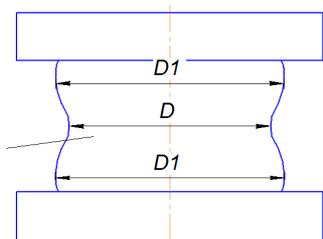
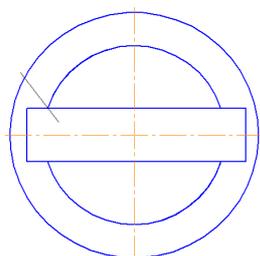


Рисунок 8.32 - Схема локальной осадки поковок типа дисков

ке предлагаемым способом можно получить заготовку с уменьшенной неравномерностью распределения механических свойств и повысить точность поковок типа дисков, которые изготавливаются осадкой. Произведена промышленная апробация предлагаемого способа, получены заготовки с профилированной (вогнутой) боковой поверхностью (см. рис. 8.32).

Способ ковки дисков осадкой заготовки с неравномерным температурным полем. Шифр способа А1Б1В1Г1Д1Е1Ж3 (см. рис. 2.2). Исходная цилиндрическая заготовка, нагретая до низкой температуры, перед осадкой плоскими плитами подвергается форсированному нагреву, таким образом, чтобы в заготовке возникло симметричное неравномерное температурное поле с внешней оболочкой, которая имеет температуру выше температуры сердцевины. После подогрева заготовки до определенной температуры ее устанавливают в плоские плиты и начинают осадку.

При ковке предлагаемым способом можно получать поковки типа дисков с повышенными механическими свойствами и повышенной точности. Схема ковки приведена на рис. 8.33.

При ковке заготовки таким образом, в процессе осадки на первом этапе основная деформация будет сосредотачиваться в зонах контакта инструмента и заготовки за счет того что этот металл имеет большую температуру, чем металл сердцевины и, как следствие, имеет меньшее сопротивление деформации. Деформирование торцов заготовки приведет к существенному уменьшению величины зоны затрудненных деформаций в условиях использования обычного кузнечного инструмента.

Способ ковки профилированных дисков осадкой заготовки с неравномерным температурным полем. Шифр способа А1Б1В1Г1Д1Е2Ж5 (см. рис. 2.2). Нагретая цилиндрическая заготовка перед осадкой плоскими плитами, охлаждается с двух торцов до возникновения в ее продольном сечении неравномерного температурного поля с локальными низкотемпературными зонами, расположенными с двух торцов заготовки симметрично друг к другу. После охлаждения торцов заготовки до определенной температуры, ее уста-

навливают на плоские плиты таким образом, чтобы торцы заготовки контактировали с рабочей поверхностью инструмента, после чего начинают осадку. Схема ковки приведена на рис. 8.34.

При ковке заготовки, таким образом, деформироваться будет только средняя ее часть за счет меньшего сопротивления деформации вследствие большей температуры, причем, чем меньше величина части заготовки с высокой температурой, тем больше будут отrostки в поковке.

В связи с производственной необходимостью и на основании разработанных рекомендаций решена проблема увеличения точности поковок типа дисков, получаемых ковкой осадкой. Проблема заключалась в повышенной металлоемкости изделий, особенно из дорогостоящих титановых материалов, хромистых и никелевых сталей. Кроме того, зачастую поковки, получаемые осадкой обычными ковочными плитами из аустенитных марок сталей, имеют значительную структурную неоднородность, которая вызывается наглицаем зон затрудненных деформаций в заготовке.

Предложен был для реализации способ осадки заготовки с промежуточным профилированием (см. рис. 8.32). Данный способ реализован в производственных условиях. Фотографии процесса профилирования заготовки узким бойком приведены на рис. 8.35.

На ОАО «Русполимет» возникала проблема с получением поковок типа низких дисков с применением операции разгонки. Вследствие малой мощности прессового оборудования в кузнечном цехе поковки из слитков большого развеса осаживают по частям узким бойком проходами. Однако при этом возникает проблема с формоизменением заготовки. Появляется дефект «овальность», т.е. поперечное сечение получаемой поковки имеет не круглое сечение, а овальное. Правка же такой овальности обкаткой поковки невозможна из-за малой открытой высоты прессы. Поэтому это приводило к необходимости закладки дополнительного напуска в поковку для компенсации «овальности».

Предложена разработанная в п.р. 6.2 методика расчета режима осадки

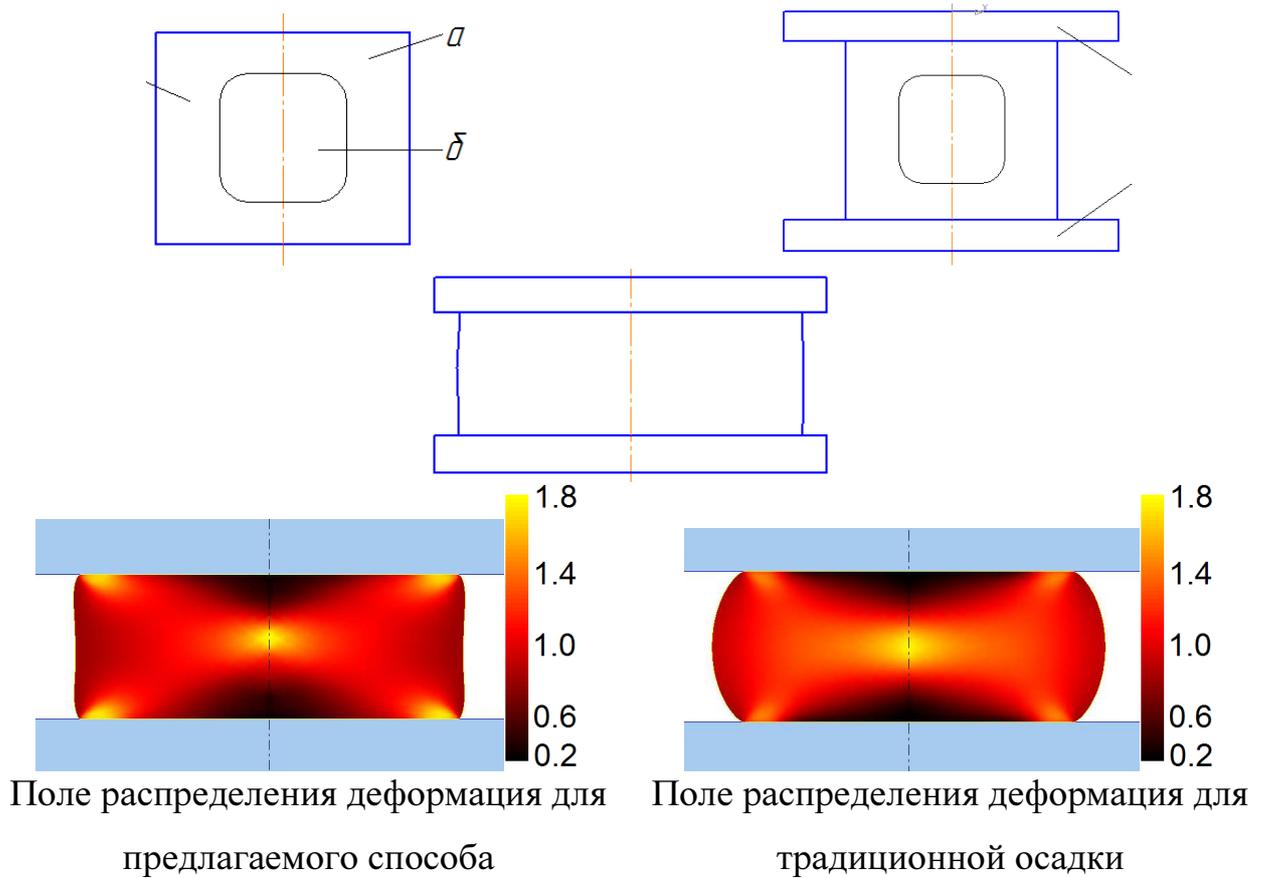


Рисунок 8.33 - Схемаковки поковок типа дисков осадкой заготовки с неоднородным температурным полем

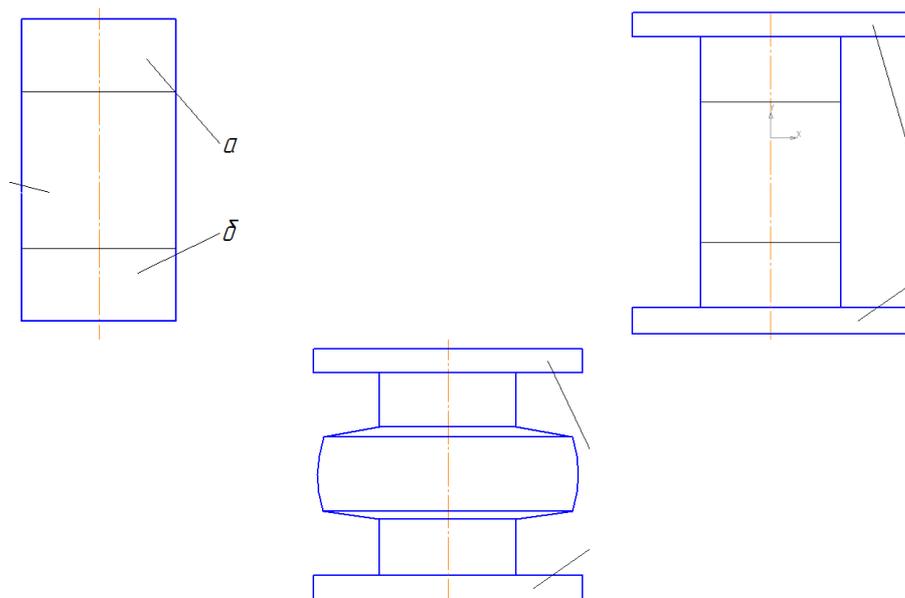


Рисунок 8.34 - Схемаковки профилированных дисков осадкой заготовки с неоднородным температурным полем



Рисунок 8.35 - Профилирование заготовки узким бойком на первой стадии осадки



Рисунок 8.36 - Общий вид поволок из стали X12MФ, полученных осадкой

заготовки протяжкой узким бойком, который компенсирует «овальность» поперечного сечения заготовки. В результате получаются поковки с минимальной овальностью поперечного сечения. Это позволило снизить расходы дорогостоящего металла при изготовлении поковок типа дисков осадкой с разгонкой.

Осадкой получены поковки типа дисков из стали X12МФ без образования поверхностных трещин (рис. 8.36). Осадка производилась по специальному режиму с паузами, расчет продолжительности и количества пауз произведен по предложенному в работе методу. Термический режим подобран по рекомендациям п. 5.1.3.

Рекомендации по расчету и назначению термомеханического режимаковки дисков приняты к промышленному внедрению на ПАО «ЭМСС», ПАО «НКМЗ» и ПАО «МоторСич», что подтверждается соответствующими актами внедрения (прил. В).

8.3.3. Ковка поковок типа валов

Предложены способы протяжки со знакопеременными деформациями протяжкой [347] и ковка, в ступенчатых бойках описанная в третьем разделе [348-349].

Способ ковки валов скошенными бойками [350]. Шифр способа А1Б9В1Г1Д1Е4Ж1 (см. рис. 2.1). При изготовлении валов протяжкой в скошенных бойках с углом α , используется следующая последовательность подач и кантовок заготовки в бойках: «обжатие - кантовка на 90^0 - обжатие - кантовки на 45^0 - обжатие - кантовка на 90^0 », после чего осуществляется подача заготовки и куется следующий ее участок по указанной схеме. При ковке предложенным способом можно получать поковки типа валов с повышенными механическими свойствами и сведенной к минимуму анизотропией механических свойств по сечению поковки. Схема ковки приведена на рис. 8.37.

Способ ковки валов протяжкой заготовки с неравномерным темпера-

турным полем [351]. Шифр способа А1В1В1Г1Д1Е3Ж4 (см. рис. 2.1). Нагретая цилиндрическая заготовка перед ковкой плоскими бойками подвергается охлаждению с двух сторон, таким образом, чтобы в заготовке возникло неравномерное температурное поле с локальными низкотемпературными зонами, расположенными с двух сторон заготовки симметрично друг к другу. После охлаждения поверхности заготовки до определенной температуры ее устанавливают в плоские бойки таким образом, чтобы образовался угол α между плоской поверхностью бойков и нижней границей низкотемпературной зоны заготовки, после чего начинают обжатие заготовки бойками.

При ковке предложенным способом можно получать поковки типа валов с повышенными механическими свойствами при минимальных уковах в плоских бойках. Схемы, поясняющие способ, изображены на рис. 8.38.

Способ дифференцированнойковки валов [352]. Исходная заготовка из стали или сплава сначала подогрывается до температурыковки и протягивается в бойках. Протяжка осуществляется в несколько этапов, на первом этапе заготовка по всей длине протягивается с относительным обжатием до 0,1 от ее диаметра, и относительными подачами до 0,5 за несколько проходов. На очередном этапе протяжка заготовки осуществляется с относительными обжатиями 0,1..0,2 и подачей 0,4..0,7. Последовательность этапов и их количество может варьироваться. Протяжка заготовки осуществляется до поковочных размеров.

При изготовлении поковок предложенным способом после первого этапаковки наибольшие деформации в заготовке расположены у ее поверхности, а центральная часть заготовки остается недеформированной. На втором этапековки с увеличенным обжатием заготовки деформации сосредотачиваются в ее центральной части при накопленных на первом этапе поверхностных деформациях, что дает равномерное распределение деформаций в поперечном сечении заготовки. При этом практически полностью отсутствует зона критических и близких к критическим деформаций, при дальнейшей термической обработке это позволит получить равнозернистую структуру

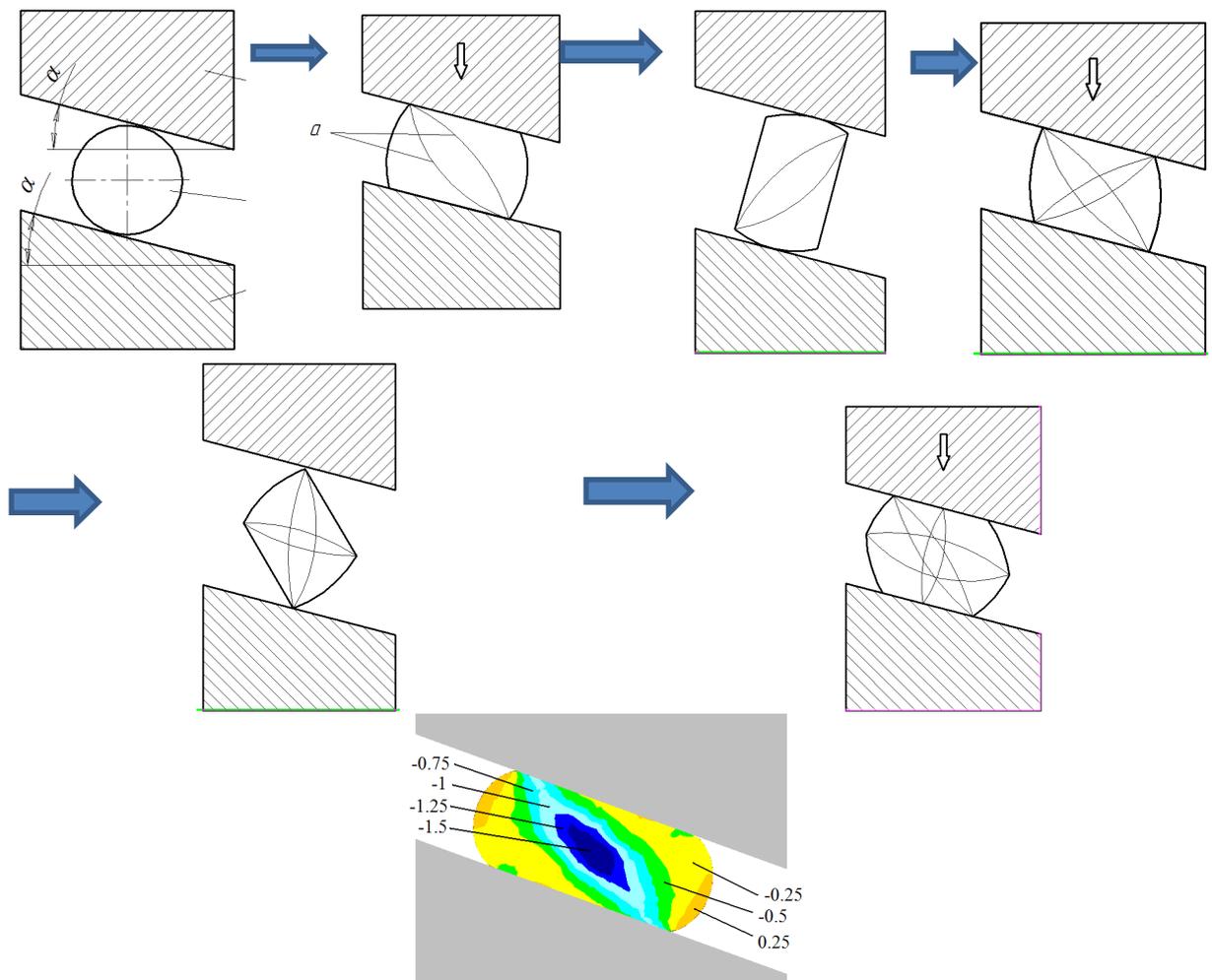


Рисунок 8.37 - Схемаковки поковок типа валов бойками со скосом

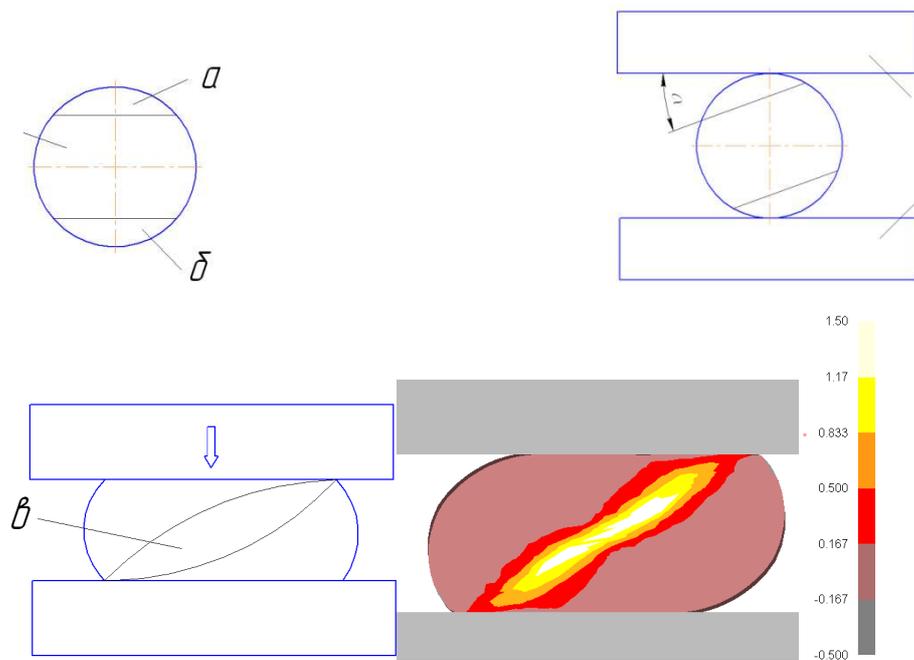


Рисунок 8.38 - Переходыковки поковок типа валов из заготовки с неоднородным температурным полем

изделия. Кроме этого, увеличение обжатия на втором этапе позволяет интенсифицировать процесс вытяжки и уменьшить количество подогревов. При ковке малопластических материалов последовательность этапов должна быть следующей: сначала малые обжатия для проработки поверхностных слоев металла, повышения их пластичности, после чего большие обжатия. При ковке пластичных материалов последовательность может быть любой.

Способковки заготовок из карбидных сталей [353]. Исходная заготовка из малопластичной карбидной стали сначала подогревается до температуры выше верхней границы температурного интервалаковки и ниже температуры, которую описывает линия солидус диаграммы состояния стали на 50-100 °С.

После этого заготовка выдерживается при этой температуре от 2 до 4 часов, охлаждается до верхней границы температурного интервалаковки и протягивается бойками до поковочных размеров. Протяжка осуществляется последовательным чередованием локальных обжатий и подач заготовки в бойках вдоль ее оси, причем каждое локальное обжатие осуществляется дробно со степенью обжатия до 0,05 от диаметра заготовки и паузами до 1 минуты, суммарная степень локального обжатия не превышает 0,25 от диаметра заготовки.

При изготовлении поковок предложенным способом перед ковкой в заготовке карбидная сетка, которая образовалась после литья, коагулируется при нагревании до температуры выше верхней границы температурного интервалаковки и ниже температуры, которую описывает линия солидус диаграммы состояния стали на 50-100 °С, благодаря чему повышается пластичность металла. Кроме этого, паузы между дробными обжатиями при протяжке позволяют частично восстановить пластичность металла, которая израсходовалась в процессе обжатия. Это позволит осуществлять локальное обжатие значительной степени без разрушения металла и, как следствие, исключить при ковке локализации деформаций на поверхности поковки.

При ковке заготовки, таким образом, повышается ее пластичность,

увеличиваются возможности по формообразованию, уменьшается неравномерность распределения деформаций по поперечному сечению заготовки. В производственных условиях многих предприятий при апробацииковки сталей и сплавов новой номенклатуры технологи сталкиваются с рядом проблем, таких, как трещинообразование, незаковы, большое зерно, отклонения геометрии от заданной и т.д. Не определены термомеханические режимыковки таких сталей, как X12MФ, 14X17H2 (ЭИ268). Для X12MФ характерно поперечное трещинообразование, для ЭИ268 характерно продольное трещинообразование. При ковке поковок типа валов из слитков ЭШП ($H/D < 1,5$) регулярно наблюдается дефект формы – торцевая вогнутость. Внешний вид дефектов приведен на рис. 8.39.

Данный перечень дефектов связан с нерациональным подбором термомеханического режимаковки и параметров инструмента.

На основании полученных в разделах 4 и 5 результатов исследований предложен и внедрен ряд рекомендаций, направленных на повышение технологичной пластичности и устранения дефектов формы поковок получаемых ковкой протяжкой в бойках.

В результате внедренных рекомендаций удалось снизить количество брака и получить качественные поковки из малопластичных материалов. Поковки, откованные по новым технологиям, приведены на рис. 8.40.

С целью повышения технологической пластичности дляковки таких марок сталей, как X12MФ и ЭИ268 предложен термомеханический режимковки, разработанный совместно с ПАО «Днепроспецсталь» в п. 5.1.3. Протяжку рекомендовано вести в комбинированных и вырезных бойках по режимам, приведенным в разделе 5. Это позволило добиться равномерного распределения деформаций в поперечном сечении заготовки и устранить появление такого дефекта, как торцевая вогнутость. Опробованаковка по различным режимам, которая подтвердила правильность разработанных рекомендаций.

Внедренные технологииковки длинномерных изделий позволили по-



а



б

Рисунок 8.39 - Откованные поковки типа валов с центральными и поверхностными трещинами



Рисунок 8.40 - Общие виды поковок, полученных с применением разработанных рекомендаций

лучить поковки с качеством удовлетворяющим ТЗ. В приложении Б приведены результаты технологических проб.

8.3.4 Ковка полых поковок

Способ ковки полых деталей из бесприбыльных слитков [354]. Шифр способа АЗБ2В1Г1Д1Е2Ж1 (см. рис. 2.5) в сочетании с А1Б3В3Г1Д1Е2Ж1 (см. рис. 2.2). Бесприбыльный слиток перед прошивкой устанавливают стороной с усадочной раковиной на нижнюю плиту с отверстием и осаживают его верхней плоской плитой, после чего на заготовку сверху устанавливают полый прошивень и удаляют весь дефектный металл, который находится в осевой зоне заготовки. При ковке предложенным способом можно получать заготовки высокого качества из бесприбыльных слитков. Суть способа со схемами ковки приведены на рис. 8.41.

Ковка втулок с раструбами [355]. Шифр способа А1Б1В3Г1Д1Е2Ж1 (см. рис. 2.3). При изготовлении втулок с раструбами сначала ковкой получают полуую цилиндрическую заготовку с буртами, после чего на гладком цилиндрическом дорне осуществляется раскатки этих буртов поочередно плоским бойком.

При ковке предложенным способом можно получать полые поковки в виде цилиндра с двумя конусными участками, расположенными по его краям, причем они могут иметь разную конусность. Суть способа показана на схемах, приведенных на рис. 8.42. Изготовление поковок таким способом позволяет уменьшить материальные затраты на ковку поковок типа втулок с раструбом и расширить сортамент размеров раструбов за счет использования универсального кузнечного инструмента.

Способ ковки труб [356]. Шифр способа А4Б1В1Г1Д1Е2Ж1 (см. рис. 2.4). При изготовлении труб исходная заготовка в виде полого цилиндра со сквозным отверстием протягивается вырезными бойками на конической оправке, дальше протяжка осуществляется на оправке меньшего диаметра, которая состоит из цилиндрической сердцевины и конической втулки с обжатием заготовки за один раз не более 0,1 от внешнего диаметра заготовки, и

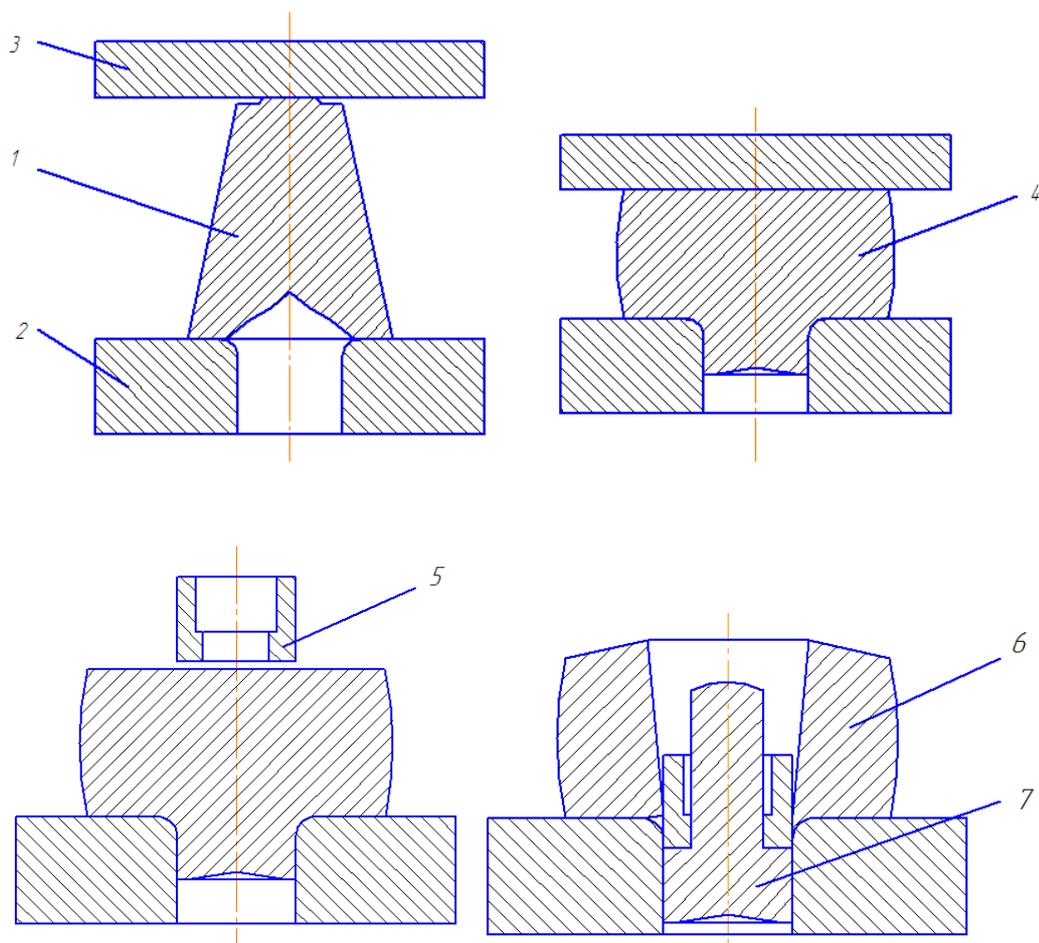


Рисунок 8.41 - Схема прошивки бесприбыльного слитка

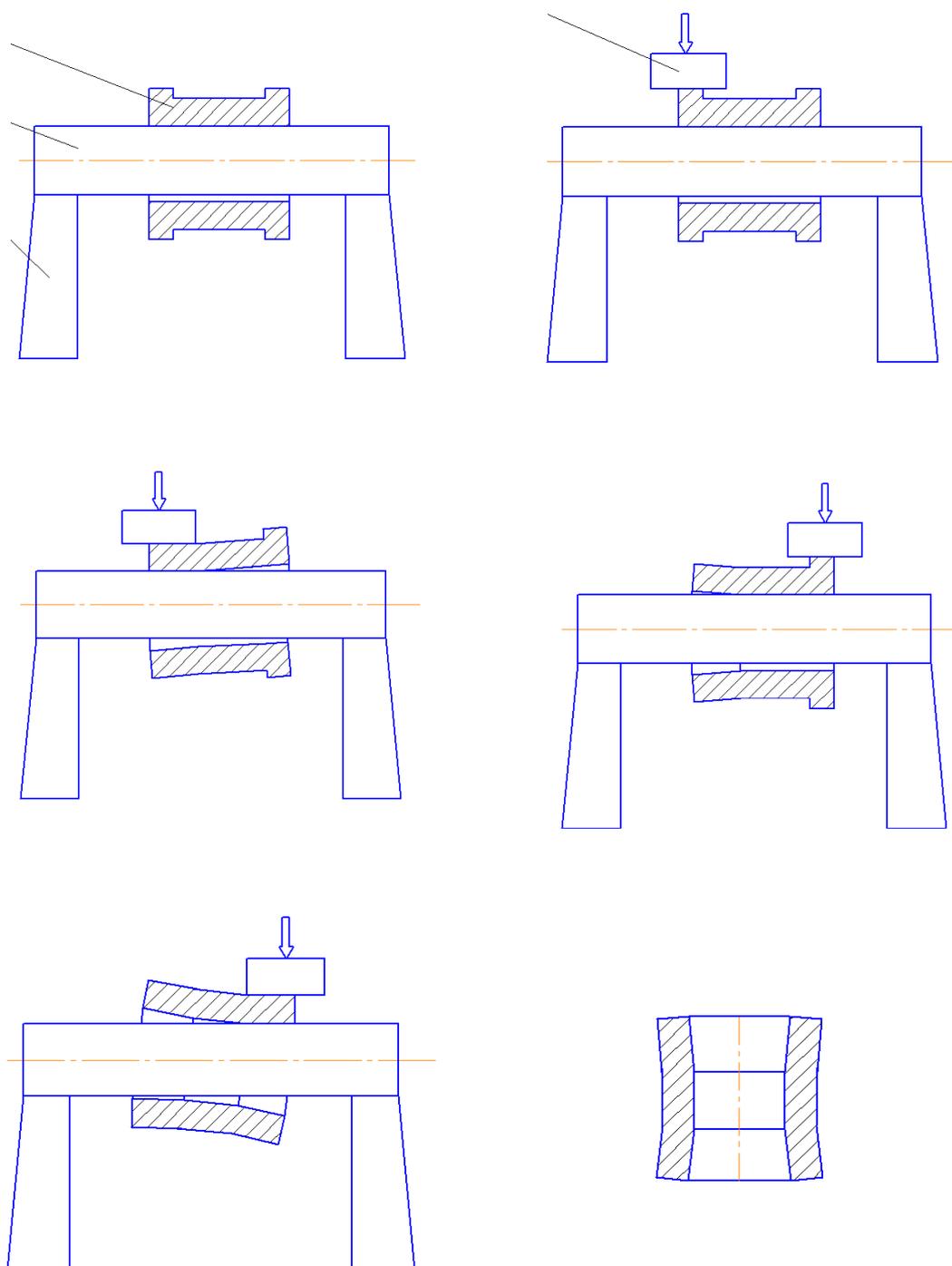


Рисунок 8.42 - Схемаковки поковок типа раструбов раскаткой на дорне

постоянной ее кантовкой на угол $15-30^{\circ}$. Длина втулки равна 1..2 ширины бойка, а угол конуса кольца больше угла трения, и она устанавливается таким образом, чтобы при ковке очаг деформации в металле заготовки контактировал с ее внешней поверхностью. При этом уменьшаются внешний и внутренний диаметры заготовки и увеличивается ее длина. После протяжки по всей длине заготовки происходит замена втулки оправки на меньший размер и осуществляется следующая протяжка заготовки до необходимого размера. Замена втулок оправки и протяжка происходит до тех пор пока не будут достигнуты необходимые размеры поковки (рис. 8.43).

Способ изготовления поковок типа шайб [357]. Шифр способа А1Б1В3Г1Д1Е2Ж1 (см. рис. 2.5) в сочетании с А1Б1В3Г3Д1Е2Ж1 (см. рис. 2.2). При ковке предложенным способом можно получать поковки типа колец со значительным внутренним диаметром и соотношением высоты поковки H к толщине ее стенки S меньше единицы. Суть способа показана на рис. 8.44.

В производственных условиях проведена промышленная апробация процессаковки поковок типа втулок с раструбами. Проведено моделирование процесса раскатки узким бойком на дорне, которое показало возможность реализации данного процесса. На рис. 8.45 показаны фотографии процесса раскатки поковки «втулка с раструбом». В целом получилось уменьшить металлоемкость сложно профилированных полых поковок типа втулок с раструбами.

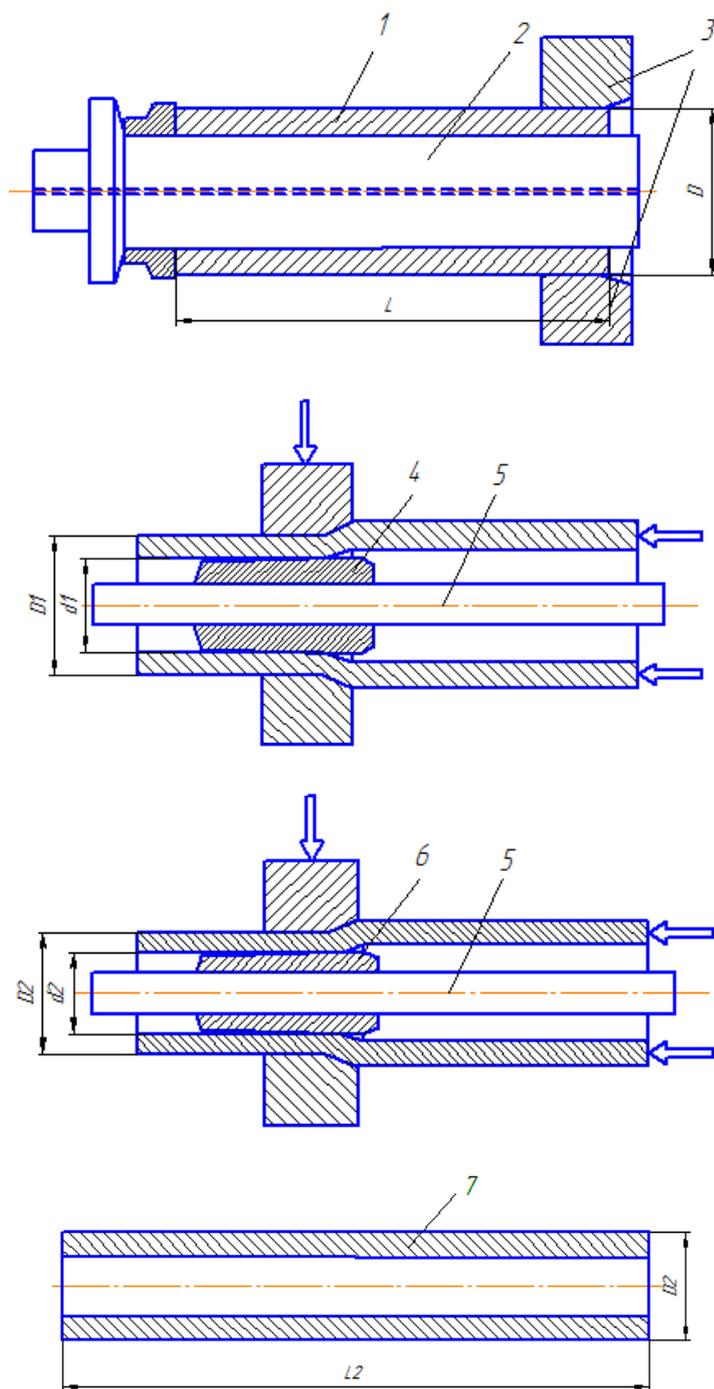


Рисунок 8.43 - Сема протяжки поковок типа труб на составной оправке

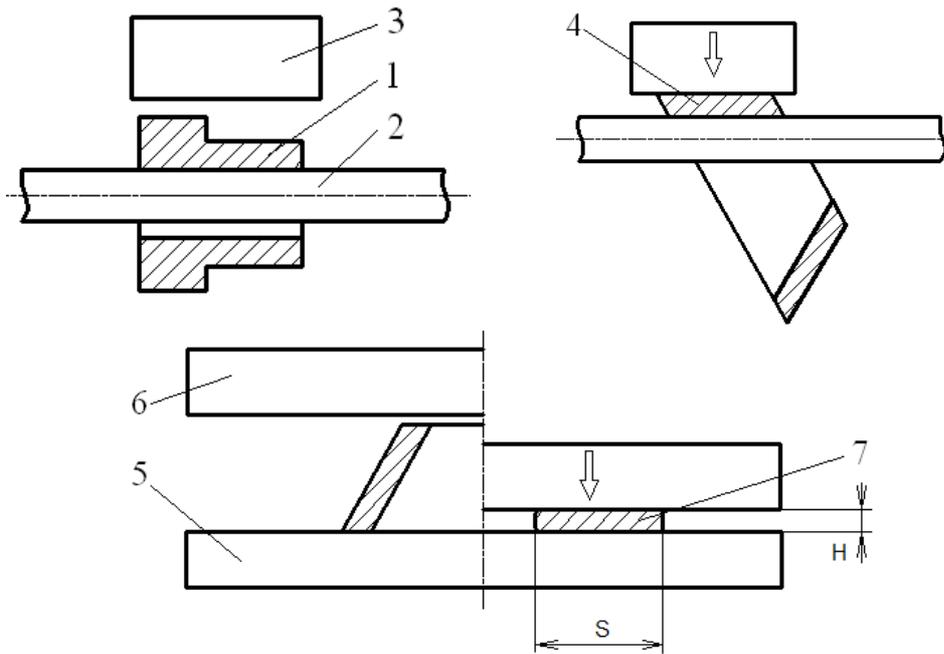
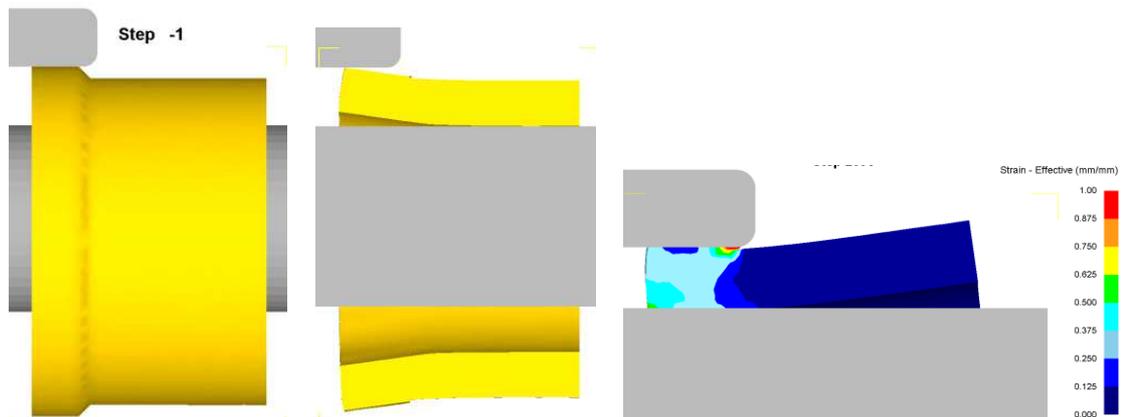


Рисунок 8.44 - Переходы ковки поковок типа шайб



а



б

Рисунок 8.45 - Раскатка поковок типа втулок с раструбом

Выводы

1. Предложен новый подход к проектированию технологических процессов ковки крупных поковок типа валов, плит, колец, труб и дисков, основанный на применении новых методов исследования процессов горячего пластического деформирования. Даны методические рекомендации к проектированию процессов ковки различных видов поковок на основании проведенных исследований с учетом технологических особенностей каждой из поковок.

2. На основании нового подхода в проектировании процессов ковки крупных поковок, разработаны новые процессы ковки деталей «ротор», «корпус реактора» и «диск». Для поковки «ротор» предложен способ ковки с промежуточным профилированием ступенчатыми бойками. Разработана конструкция специальных универсальных бойков. Разработанная технология передана для промышленного освоения на ПАО «Энергомашспецсталь».

Для изделия «корпус реактора» предложена технология позволяющая снизить металлоемкость в 3 раза за счет усложнения формы получаемого ковкой изделия. Технология реализуется с применением традиционного инструмента. Разработка передана для реализации на ПАО «НКМЗ». Для изделия «диск» предложен новый способ осадки, позволяющий устранить в поковке наличие зон затрудненной деформации. Технология передана для промышленного освоения на ОАО «Русполимет».

3. На основе проведенных исследований предложены новые способы ковки поковок типа эксцентриков, дисков, валов, труб и колец. Способы основаны на управлении НДС заготовки основными факторами: фактором формы, кинематическим и температурным фактором. Так предложены способы ковки поковок типа эксцентриков, основанные на использовании специальных несимметричных инструментов. Эти способы позволяют расширить номенклатуру получаемых изделий.

Предложены способы осадки бесприбыльных слитков с применением

специального инструмента в виде профилированных плит, которые позволяют повысить качество получаемых изделий. Предложены способы осадки профилированных заготовок на основе применения специальной формы заготовки и специального кинематического режима деформирования, что позволяет получать поковки типа дисков с повышенными механическими свойствами и повышенной точности.

Предложены новые способыковки поковок типа валов на основе применения специального инструмента, позволяющего обеспечить повышенный уровень сдвиговых деформаций в заготовке. Кроме того, предложен способ получения заданного поля деформаций в заготовке в процессе протяжки на основе управления механическим режимомковки традиционным инструментом.

На основе проведенных исследований предложен ряд способовковки полых поковок типа труб, колец и раструбов на основании применения заготовок и инструмента специальной формы.

4. Проведено промышленное внедрение результатов исследования в видековки ротора с фланцем. Разработанные рекомендации позволили определить особенности формоизменения заготовки поковки ротор в процессе высадки утолщения и определить параметры исходной заготовки и инструмента. Кроме того в производство переданы рекомендации по ковке поковок из стали X12МФ, позволяющие повысить технологическую пластичность заготовки и уменьшить количество брака. Передан и метод расчета предельного формоизменения в процессах горячего пластического деформирования. Суммарный экономический эффект от внедрения разработок на ПАО «НКМЗ» составил 1750 тыс. грн. по уровню цен 2013 г. Ожидаемый экономический эффект составляет 1200 тыс. грн.

5. На ПАО «Энергомашспецсталь» переданы для промышленного освоения рекомендации по ковке поковок типа валов ответственного назначения с промежуточным профилированием заготовки. Кроме того, переданы и опробованы процессыковки поковок типа дисков осадкой, основанные на

предварительном профилировании заготовки, и метод расчета предельного формоизменения процессов горячего деформирования. Переданы и опробованы рекомендации по ковке поковок из малопластичных материалов. Суммарный экономический эффект от внедрения разработок на ПАО «Энергомашспецсталь» составил 720 тыс. грн. по уровню цен на 2013 г. Ожидаемый экономический эффект составляет 1400 тыс. грн.

6. На ПАО «Днепрспецсталь» проведен комплекс исследований по ковке поковок из малопластичных материалов и определен термомеханический режим ковки поковок из стали X12MФ, который позволил существенно снизить количество брака на производстве. Переданы рекомендации по ковке поковок с развитыми макросдвиговыми деформациями. Суммарный экономический эффект от внедрения разработок составил 250 тыс. грн., по уровню цен 2012 г. Ожидаемый экономический эффект составляет 357 тыс. грн.

7. На ПАО «МоторСич» переданы для внедрения рекомендации и методики построения кривых течения металла в широком диапазоне скоростей деформаций по ограниченному количеству стандартных характеристик материала. Передана методика моделирования изменения микроструктуры металла в процессах горячего пластического деформирования. Переданные разработки позволили сократить время подготовки производства изделий, получаемых ковкой, на 30%, снизить количество брака на 10%. Реальный экономический эффект от внедрения составил 600 тыс. грн. по уровню цен на 2015 г. Ожидаемый экономический эффект от внедрения составляет 700 тыс. грн.

8. На ОАО «Русполимет» переданы и внедрены такие разработки, как методика расчета формоизменения заготовки в процессе осадки разгонкой узким бойком, механические режимы и параметры инструмент для ковки поковок типа валов из специальных материалов и сталей, схемы осадки заготовок, обеспечивающие минимальную неравномерность распределения деформаций в объеме заготовки, термический режим ковки малопластичных материалов. Суммарный экономический эффект от внедрения на ОАО «Русполимет» составил 150 тыс. долларов по уровню цен 2013 г.

ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена важная народнохозяйственная проблема повышения технико-экономических параметров технологических процессов ковки крупных поковок за счет развития научных основ процессов горячего пластического деформирования и совершенствования технологических способов и режимов ковки.

1. На основе проведенного литературного анализа определены проблемы традиционного подхода в проектировании технологических процессов ковки крупных поковок из слитков. Установлены основные направления совершенствования данной отрасли знаний, которые заключаются в применении и создании новых подходов проектирования технологических процессов ковки крупных поковок, основанных на новых методах моделирования физических процессов, связанных с горячим пластическим деформированием и совершенствование технологических процессов ковки. На основе метода морфологических карт расширена и формализована область поиска рациональных схем деформирования ковкой.

2. Развита метод оценки технологической деформируемости металла при горячем дробном деформировании, который позволяет прогнозировать предельное формоизменение заготовки в сложных температурно-скоростных условиях деформирования и учитывает эффект восстановления пластичности металла в технологических паузах. На основе предложенного метода разработаны рекомендации по реализации процессов осадки и протяжки, которые позволили повысить технологическую пластичность заготовки на 20%.

3. Разработан метод построения кривых течения металла по справочным характеристикам материала, таким, как предел прочности и предел текучести, что позволяет на основе использования коэффициента чувствительности материала к температурно-скоростным условиям деформирования получать кривые течения металла в широком диапазоне скоростей с минимальным набором данных. Выявлены зависимости коэффициента чувствительно-

сти материала к температурно-скоростным условиям деформации, от температуры, группы материала и уровня скоростей деформации. Предложенный метод позволяет описывать зависимость напряжения течения металла от величины, скорости и температуры деформации с точностью до 20%.

4. Предложена методика оценки эволюции микроструктуры металла в процессах горячего деформирования, основанная на использовании моделей, учитывающих динамическую, статическую рекристаллизацию и рост зерен во время выдержки при высокой температуре. На основе предложенной методики проведены исследования новых схем ковки валов, плит и дисков и установлены поля распределения размеров зерна в объеме заготовок, подтверждающие предположение о влиянии горячей деформации на структуру металла и позволяющие установить оптимальные режимы ковки, которые обеспечили повышение равномерности распределения механических свойств в изделии.

5. На основе анализа схем ковки валов несимметричными плоскими, комбинированными и вырезными бойками установлено, что лучшую схему напряженно-деформированного состояния в заготовке обеспечивают комбинированные несимметричные бойки с углом скоса верхнего бойка от 10 до 20 градусов, углом выреза нижнего бойка от 135 до 145 градусов. Для особо ответственных длинномерных изделий предложен способ ковки ступенчатыми бойками с рациональным углом скоса степени $\alpha = 15^\circ \dots 45^\circ$, относительной подачей заготовки $f/H = 0,5 \dots 1,0$, относительным зазором между бойками $z/H = 0,15 \dots 0,3$ и относительной высотой степени бойка $h/H = 0,1 \dots 0,2$.

6. Установлены закономерности параметров напряженно-деформированного состояния, описывающие распределение величины интенсивности напряжений и деформаций в объеме заготовки при ковке протяжкой длинномерных изделий плоскими, комбинированными и вырезными бойками от формы и градиента температурного поля, а также его расположения по отношению к деформирующему инструменту. Получены графические зависимости параметров НДС заготовки, которые позволили разработать ра-

циональные режимы протяжки поковок валов из углеродистых сталей при различных градиенте и форме (симметричной, несимметричной) температурного поля. Установлены рациональные относительная подача и обжатия заготовки бойками при квазиравномерном распределении температур по ее сечению и при снижении температуры поверхности на 100, 200 и 300 °С, позволяющие получать минимальную неравномерность распределения деформаций в объеме поковки.

7. Разработан режим высокотемпературной термической обработки слитков стали X12МФ, который повышает технологическую пластичность и включает в себя выдержку заготовки при температуре 1200 °С, при которой происходит коагуляция карбидной сетки, снижение температуры и выдержку при температуре 1160 °С перед ковкой. Установлен рациональный температурный интервалковки слитков из стали X12МФ на прессах для плавок с вакуумированием, который находится в пределах 1160-950 °С.

8. На основе теоретических и экспериментальных исследований, установлены закономерности изменения деформированного состояния поковок типа дисков при осадке, которые описывают его изменение в зависимости от формы, размеров плит и бойков, кинематики деформирования, а также градиента температурного поля заготовки. Предложен способ осадки профилированных цилиндрических заготовок в виде цилиндра с конусными уступами, и способ осадки с промежуточной разгонкой, которые позволяют снизить неравномерность распределения деформаций в объеме заготовки и повысить точность поковок типа дисков, получаемых с применением операции осадки. Установлены рациональные параметры осадки разгонкой, такие как, относительная ширина бойка $0,1..0,3$ и высота исходной заготовки $H / D \geq 1,0$. Предложен способковки эксцентриков высадкой в скошенных кольцевых плитах и способковки дисков осадкой цилиндрической заготовки с температурой поверхности большей температуры сердцевины. Установлены рациональные режимыковки бесприбыльных слитков осадкой выпуклыми кольцевыми плитами с углом конусности 140 градусов и относительным диаметром

отверстия, равным 0,6 диаметра слитка.

9. Установлены закономерности формоизменения заготовки в процессах управления полых поковок типа труб и профилированных колец, которые описывают ее изменение в зависимости от формы, размеров инструмента, кинематики деформирования, а также градиента температурного поля заготовки. На основе полученных закономерностей, предложен механизм перераспределения металла заготовки в заданных направлениях за счет согласования режимов обжатий и подач инструмента, а также варьирования параметрами температурного поля. Подобрана рациональная форма заготовки для раскатки конических колец на цилиндрическом дорне плоским бойком и разработана методика расчета технологического процессаковки конических колец. Предложен способковки труб из малоходовых слитков, который позволяет увеличить коэффициент использования металла за счет использования головной части слитка. Способ предусматривает использование в процессековки некачественного металла головной части слитка, который будет перераспределен в припуск под механическую обработку. Снижение металлоемкости изделия достигает 10-15%.

10. Разработана методика проектирования технологических процессовковки поковок типа валов, плит, колец, труб и дисков, которая основана на применении предложенных методов исследования процессов горячего пластического деформирования. Даны методические рекомендации по проектированию процессов и оснастки дляковки полых и сплошных длинномерных поковок на основе проведенных исследований с учетом технологических особенностей каждой из поковок. На основе предложенной методики проектирования технологических процессовковки крупных поковок, разработаны новые процессыковки деталей «ротор», «корпус реактора» и «диск».

11. Проведено промышленное внедрение результатов исследований, описанных в работе, на ПАО «НКМЗ», ОАО «Энергомашспецсталь», ОАО «Днепро-спецсталь», ОАО «МоторСич» и ЗАО «Финпрофиль». К таким разработкам относятся: рекомендацииковки поковки ротора с эксцентриковым

фланцем; рекомендации ковки поковок валов ответственного назначения по схеме протяжки через «пластину» с промежуточным профилированием; рекомендации по ковке слитков из стали X12МФ; метод расчета предельного формоизменения в процессах горячего пластического деформирования; процессы ковки поковок типа дисков осадкой, основанные на предварительном профилировании заготовки, схемы осадки заготовок, обеспечивающие минимальную неравномерность распределения деформаций в объеме заготовки; рекомендации и методики построения кривых течения металла в широком диапазоне скоростей деформаций по ограниченному числу стандартных характеристик материала; методика моделирования эволюции микроструктуры металла в процессах горячего пластического деформирования; методика расчета формоизменения заготовки в процессе осадки разгонкой узким бойком. Внедрение разработок позволило повысить технико-экономические показатели процессов ковки валов, дисков, труб и колец. Суммарный экономический эффект от внедрения разработок составил 2720 тыс. грн., ожидаемый экономический эффект составляет 1657 тыс. грн.

Методы построения кривых течения металла по справочным характеристиками, оценки технологической деформируемости и расчета эволюции микроструктуры металлов в процессах горячего пластического деформирования и рекомендации по проектированию процессов ковки поковок типа валов, плит, дисков, колец и труб введены в учебный процесс Донбасской государственной машиностроительной академии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюрин В.А. Разновидности процессов кузнечной протяжки / В.А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2009. - № 9. – С. 5-8.
2. Охрименко Я.М. Повышение эффективности и качества работы в кузнечном производстве / Я.М. Охрименко // Кузнечно-штамповочное производство. – 2007. - №8 – С. 1-7
3. Соколов Л.Н. Усовершенствование технологииковки комбинированными бойками / Л.Н. Соколов, Б.С. Каргин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1974. – №1 – С. 102-103.
4. Park C.Y. A study of void crushing in large forgings II. Estimation of bonding efficiency by finite-element analysis / C.Y. Park, D.Y. Yang // Journal of Materials Processing Technology. – 1997. – №72 - pp. 32-41
5. Иванушкин П.Ф. Влияние формы бойков на интенсивность протяжки и распределение деформаций / П.Ф. Иванушкин, Б.С. Каргин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1971. – №1 – С. 96-100
6. Modelling of shape anvils in free hot forging of long products / H. Dyja, G. Banaszek, S. Mroz, S. Berski // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – №157-158 - pp. 131–137
7. 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 // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – №169 - pp. 437-444
8. Banaszek G. Theoretical and laboratory modelling of the closure of metallurgical defects during forming of a forging / G. Banaszek, A. Stefanik // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – №177 - pp. 238–242
9. Dyja H. Effect of symmetrical and asymmetrical forging processes on the quality of forged products / H. Dyja, G. Banaszek, S. Berski, S. Mroz // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – №157-158 - pp. 496–501
10. Banaszek G. Numerical analysis of the torsion stretch forging operation

in asymmetric anvils / G. Banaszek, S. Berski, H. Dyja / Metallurgical and Mining Industry. – 2011. – №7. - pp. 98–101

11. А. с. 774756 СССР, МКИ В 21 J 13/22. Комбинированные бойки / А.В. Котелкин, В.А. Петров (СССР). – № 2715513; заявл. 23.01.79; опубл. 30.10.80, Бюл. №40.

12. А. с. 471143 СССР, МКИ В 21 J 13/22. Инструмент дляковки металлов и сплавов / Л.В. Прозоров, Г.А. Пименов, А.А. Костава (СССР). – № 1870592; заявл. 11.01.73; опубл. 25.05.75, Бюл. №19.

13. А. с. 442878 СССР, МКИ В 21 J 13/02. Кузнечный инструмент / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин, С.Д. Баранов (СССР). – № 1623639; заявл. 01.03.71; опубл. 15.09.74, Бюл. №34.

14. А. с. 428841 СССР, МКИ В 21 J 13/02. Инструмент дляковки металлов и сплавов / Я.М. Охрименко, В.Н. Лебедев, В.А. Тюрин, В.П. Барсуков (СССР). – № 1848771; заявл. 23.11.72; опубл. 25.05.74, Бюл. №19.

15. А. с. 393018 СССР, МКИ В 21 J 13/02. Инструмент дляковки / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин, Ю.И. Мищенко, М.С. Экарев (СССР). – № 1643794; заявл. 30.03.71; опубл. 10.08.73, Бюл. №33.

16. Охрименко Я.М. Исследование процесса протяжки с непрямолинейным фронтом подачи / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин, В.П. Барсуков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1971. – №3 – С. 79-82

17. А. с. 339089 СССР, МКИ В 21 J 13/02. Устройство дляковки заготовок / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин (СССР). – № 1666176; заявл. 17.06.71; опубл. 30.03.79, Бюл. №12.

18. Условия развития сдвиговых деформаций при ковке заготовок в ступенчатых бойках / В.К. Воронцов, А.Б. Найзабеков, А.В. Котелкин, В.А. Петров // Известия вузов. Черная металлургия. – 1987. – №5 – С. 50-53

19. Ковка поковок прямоугольного сечения и заготовок штамповых кубиков / А.Б. Найзабеков, А.В. Котелкин, В.А. Петров [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990. - №10 – С. 4-6

20. Найзабеков А.Б. Анализ деформированного состояния и качества заготовок при ковке / А.Б. Найзабеков, В.В. Исаенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1998. - №2 – С. 17-20

21. Марков О.Е. Деформированное состояние при протяжке укороченных слитков бойками со скосом / О.Е. Марков // Научный вестник ДГМА. – 2013. - № 2 (12Е). – С. 70-78

22. Марков О.Є. Розвиток наукових основ проектування та удосконалення технологічних процесів кування крупних поковок зі злитків : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском» / О. Є. Марков – Краматорськ, 2012. - 36 с.

23. А.с. 852426 СССР, МКИ В 21 J 13/22. Кузнечный инструмент / В.О. Кононенко, А.А. Бобров, В.Г. Берез, З.П. Стрельцова, С.С. Семеняга (СССР). – № 2844667/25-27; заявл. 30.11.79; опубл. 07.08.81, Бюл. №29.

24. Машеков С.А. Исследование деформированного состояния заготовок при ковке в вырезных и комбинированных бойках / С.А. Машеков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1995. – №4 – С. 36-39

25. Марченко И.К. Опытковки понунепрерывнолитых слитков в бойках специальной конструкции / И.К. Марченко, Ю.С. Холодняк, Н.Л. Ярмач // Кузнечно-штамповочное производство. – 1989. – №11 – С. 26-27

26. Тюрин В.А. Инновационные технологииковки / В.А. Тюрин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – №5 – С. 27-29

27. Пат. 2240199 РФ, МКИ В 21 J 13/02. Инструмент для радиальнойковки / А.М. Володин, Л.Г. Конев, В.А. Лазоркин – № 2003110916/02; заявл. 16.04.2003; опубл. 20.11.2004, Бюл. №2

28. А. с. 564075 СССР, МКИ В 21 J 13/02. Инструмент дляковки металла / В.М. Сегал, Д.А. Павлик (СССР). – № 2320449; заявл. 09.02.76; опубл. 05.07.77, Бюл. №25

29. Сегал В.М. Технологические особенностиковки-протяжки с продольным сдвигом бойков / В.М. Сегал, В.И. Резников, Д.А. Павлик // Кузнеч-

но-штамповочное производство. – 1980. – №11 – С. 8-10

30. Улучшение качества металла при продольной ковке / Я.М. Охрименко, В.А. Тюрин, В.Н. Лебедев, А.И. Гринюк // Известия вузов. Черная металлургия. – 1971. – №4 – С. 96-99

31. Белова Л.П. Влияние схемыковки на деформирование центральных слоев заготовки / Л.П. Белова, В.А. Тюрин, А.Н. Дубков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1962. – №5 – С. 70-74

32. Трубин В.Н. Ковка крупных поковок. Ч. 2 / В.Н. Трубин, В.А. Шелехов. – М.: Машиностроение, 1965. – 296 с.

33. Тарновский И.Я. Свободная ковка на прессах / И.Я. Тарновский, В.Н. Трубин, М.Г. Златкин. – М.: Машиностроение, 1967. – 328 с.

34. Технологические особенностиковки заготовок с неоднородным температурным полем / В.А. Тюрин, А.В. Храбров, В.Н. Дубков, Л.П. Белова // Известия вузов. Черная металлургия. – 1980. – №9 – С. 96-99

35. Пименов Г.А. Исследование условийковки крупных поковок из стали 60ХН: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Пименов Г.А. – М., 1968. – 213 с.

36. Марков О.Е. Автоматизированное проектирование технологических процессовковки крупных поковок: учеб. пособие для студ. спец. «Обработка металлов давлением» по дисц. «Технологияковки» / О.Е. Марков, Л.Н. Соколов. – Краматорск: ДГМА, 2007. – 236 с. - ISBN 978-966-379-180-7.

37. Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства: учебник для вузов / Я.М. Охрименко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1976. – 560 с.

38. Пат. 90962 Україна, МПК В 21 К1/28. Спосіб кування дисків з уступами / Чухліб В.Л., Ашкелянєць А.В. заявник та власник Національна металургійна академія України, Дніпропетровськ. - № а200814963; заявл. 10.07.09.; опубл. 10.06.10, Бюл. № 11.

39. А. с. 1449218 МКИ В 21 J 5/00. Способ изготовления поковок типа дисков / В.А. Тюрин, В.И. Куролес, А.В. Хабаров (СССР). – № 3874014/31-

27; заявл. 26.03.85; опубл. 07.01.89, Бюл. № 1.

40. Пат. 33423 Украина, МПК В 21 J 1/00. Способ осадки слитка вогнутыми плитами с отверстием / Марков О.Е.; заявитель и патентообладатель Марков О.Е. – № u200800984; заявл. 28.01.2008; опубл. 25.06.2008, Бюл. № 12.

41. Пат. 59105 Украина, МПК В 21 J 1/04. Способ осадки крупных слитков коническими плитами / Алиев И.С., Марков О.Е., Жбанков Я.Г.; заявитель и патентообладатель ДГМА, Краматорск - № u201009178; заявл. 21.07.2010; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9.

42. Камнев П.В. Совершенствованиековки крупных поковок / П.В. Камнев. - Л.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

43. А. с. 904852 МКИ В 21 J 1/04. Способковки крупных слитков / В.Н. Орленко, В.О. Кононенко, П.П. Кальченко (СССР). – № 2922165/25-27, заявл. 07.05.80; опубл. 15.02.82, Бюл. № 6.

44. Марков О. Е. Закрытие осевых дефектов при осадке заготовок с вогнутым поперечным сечением / О. Е. Марков // Научный вестник ДГМА.– 2013. – № 1. – С.12-19.

45. Zhanga Z. J. Simulation of 42CrMo steel billet upsetting and its defects analyses during forming process based on the software DEFORM-3D / Z.J. Zhanga, L. X. Donga, L. L. Liu // Materials Science and Engineering A. – 2009. – №499 – pp. 49-52.

46. Жбанков Я. Г. Исследование процесса профилирования заготовки на вогнутую бочку разгонкой узким бойком / Я. Г. Жбанков // Вестник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 35. – С.12–22.

47. А. с. 1091972 СССР, МКИ В 21 J 13/22. 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.

48. А. с. 1260094 СССР, МКИ В 21 J 13/22. Способковки дисков / В.Д. Арефьев, Е.Д. Горохов, А.В. Пакало, А.Ю. Петунин (СССР). –

№ 3855930; заявл. 19.02.85; опубл. 30.09.86, Бюл. №36.

49. Current steel forgings and their properties for steam generator of nuclear power plant / Suzuki Komei, Ikuo Sato, Mikio Kusuhashi, Hisashi Tsukada // Nuclear Engineering and Design. – 2000. – №198 - pp. 15–23

50. Hamzah Ssemakula Close-die forging of large Cu-lids by a method of low force requirement / Hamzah Ssemakula, Ulf Ståhlberg, Kent Öberg // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. – Vol. 178 - pp. 119-127

51. А. с. 1292893 В 21 J 5/00. Способ осадки / М.С. Валетов, А.Б. Илюкович, И.В. Мураш (СССР). – № 3904814/25-27; заявл. 06.06.85; опубл. 28.02.87, Бюл. № 8

52. Youn S. S. Aluminium powder forging process using a rotating platen / S. S. Youn, J.H. Park, C.W. Park // Institute of Materials Engineering Australasia. – 2004 - № 28 - pp. 212-217

53. Соколов Л. Н. Теория и технологияковки / Л. Н. Соколов. – К.: Выща школа, 1989. – 317 с.

54. А. с. 368924 МКИ В 21 К 1/32. Способковки заготовок типа дисков со ступицей / И.О. Катков, В.М. Манаев, В.Д. Сошин (СССР). - № 1623459/25-27 – заявл. 23.11.1971; опубл. 08.11.1973, Бюл. № 10.

55. Кобелев О.А. Разработка эффективных ресурсосберегающих технологий производства крупногабаритных моноблочных плит и изделий из них : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : 05.16.05 «Обработка металлов давлением»/ О.А. Кобелев. – Москва, 2010. – 47 с.

56. А. с. 295597 МКИ В 21 J 1/06. Способ нагрева слитков дляковки / Я.М. Охрименко, К.В. Игнатъев, В.А. Тюрин, А.И. Гринюк (СССР). - № 1311438 – заявл. 06.03.1969; опубл. 12.02.1971, Бюл. № 8.

57. Kowalski J. Experimental investigation of the strain state in the ring-forging process / J. Kowalski, B. Hoderly // Journal of Mechanical Working Technology. – 1987. – №14 – pp. 309-324

58. А. с. 685407 МКИ В 21 К 1/32. Способ раскатки колец и оправка для его осуществления / Б.О. Темкин, Э.Л. Рагинский, В.Ф. Касатонов,

В.А. Петров, А.В. Котелкин (СССР). - № 2471187/25-27; заявл. 11.04.77; опубл. 15.09.1979, Бюл.№34

59 Ковка кольцевых поковок с использованием волнистой оправки / Б.О. Темкин, В.Ф. Касатонов, В.А. Петров [и др.]// Кузнечно-штамповочное производство. – 1983. - №9 – С. 15-16

60. Солонцов С.С. Формоизменение кольцевых заготовок при горячей раскатке поковок с тавровым профилем поперечного сечения / С.С.Солонцов, М.Я. Альшиц // Кузнечно-штамповочное производство. – 1970. - №2 - С. 1-4

61. А. с. 963662 МКИ В 21 J 1/04. Способ изготовления полых поковок / В.Д. Арефьев, А.В. Пакало, А.И. Зубков, А.Ю. Петунин (СССР). – № 3275778/25-27; заявл. 05.02.81; опубл. 07.10.1982, Бюл. №37

62. А. с. 902960 МКИ В 21 J 1/04. Способ изготовления кольцевых поковок / В.Д. Арефьев, А.В. Пакало, С.И. Данилин (СССР). – № 2882187/25-27; заявл. 14.02.80; опубл. 07.02.82, Бюл. №5

63. Recent Progress of Large and Integrated Forgings for Nuclear Power Plants / H.Tsukada, K. Suzuki, M. Shimazaki, I. Sato // The 3rd JSME: ASME Joint International Conference on Nuclear Engineering, 23–27 April 1995. – Kyoto. – 1995. – pp. 439-444

64. Modeling flow stress constitutive behavior of SA508-3 steel for nuclear reactor pressure vessels / Mingyue Sun, Luhan Hao, Shijian Li, Dianzhong Li // Journal of Nuclear Materials. – 2011. - №418 pp. 269–280

65. А. с. 946763 МКИ В 21 J 1/04. Способ изготовления полых поковок / С.А. Балугев, Н.И. Лаун, В.М. Кулабухов (СССР). – № 3210038; заявл. 01.12.80; опубл. 30.07.1982, Бюл. №28

66. А. с. 863135 МКИ В 21 К 1/38. Способ изготовления полых поковок / В.Д. Арефьев, Г.С. Рябцев А.Ю. Петунин, Б.Г. Восходов (СССР). – № 2869192; заявл. 12.12.79; опубл. 15.09.81, Бюл.№ 34

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

68. Балугев С.А. Изготовление поковок втулок ПЖТ из полой литой заготовки / С.А. Балугев, С.С. Львова, Е.Л. Линденбаум // Кузнечно-штамповочное производство. – 1986. - №11 - С. 27 - 28

69. Manufacturing process and properties of nuclear rpv shell ring forged from hollow ingot / Nobuo Ohashi, Teiichi Enami, Hiroshige Wanaka, Kazuo Aso // Nuclear Engineering and Design. – 1984. - №81 – pp. 193-205

70. New Manufacturing Techniques of Large Forged Shell Rings for Pressure Vessels / K. Saito, A. Namba, K. Aso [and other] // Journal of Material Shaping Technology. – 1987. – Vol. 5 – pp. 9-15

71. Опыт изготовления крупногабаритных конических обечаек ковкой / В.Д. Арефьев, А.В. Пакало, Г.С. Рябцев [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. - 1985. - №1. - С. 10-12.

72. State of the art in the manufacture of heavy forgings for reactor components in the federal republic of germanym / M. Erve, F. Papouschek, K. Fischer, Ch. Maidorn // Nuclear Engineering and Design. – 1988. - № 108 – pp. 487-495

73. А. с. 948513 МКИ В21 J 1/04. Способ изготовления полых поковок / В.Д. Арефьев, А.В. Пакало, А.И. Зубков, В.Д. Соболев, А.Ю. Петунин (СССР). – № 3226620; заявл. 11.12.80; опубл. 07.08.82, Бюл.№29

74. Current forging technology for integrated type steel forgings for nuclear steam supply system components / S. Kawaguchi, H. Moritani, H. Tsukada, K. Suzuki // Nuclear Engineering and Design. – 1984. - №81 - pp. 219-229

75. Ultra-large size austenitic stainless steel forgings for a fast breeder reactor: development, manufacturing and properties achieved / H. Tsukada, K. Suzuki, I. Sato, R. Miura // Nuclear Engineering and Design. – 1987. – Vol. 102 – pp. 495-503

76. А.с. 1006032 МКИ В 21 К 1/38. Способ изготовления полых конических поковок / И.П. Шелаев, В.О. Кононенко, Л.Ф. Дикий, И.Б. Кучерук-Кучеренко, Н.И. Лаун (СССР) – № 3366330; заявл. 16.12.81; опубл. 23.03.83, Бюл. № 11

77. Lianggang Guo Towards a steady forming condition for radial–axial ring rolling / Lianggang Guo, He Yang // International Journal of Mechanical Sciences. – 2011. – Vol. 53 – pp. 286–299

78. А. с. 871942 МКИ В 21 Н 1/06. Инструмент для раскатки колец / В.Д. Арефьев, Э.Л. Рогожин, И.Н. Лебедьинский, Е.П. Субботин (СССР) – №2880769; заявл. 06.02.1980; опубл. 15.10.1981, Бюл. № 38

79. А. с. 604615 МКИ В21К1/38. Устройство для кузнечной раскатки полых поковок / Н.П. Шляхин, А.А. Мишулин, Б.А. Деревянко, А.И. Русанов (СССР) – № 2322151; заявл. 11.02.1976; опубл. 30.04.1978, Бюл. №16

80. А. с. 1189559 МКИ В 21 J 1/04. Способ изготовления полых цилиндрических изделий / Г.А. Шутков, В.Г. Зорин, Н.П. Шляхин, А.М. Кузьменко, Б.А. Деревянко, В.Д. Полянский (СССР) – № 3706487; заявл. 06.01.1984; опубл. 07.11.1985, Бюл. №41

81. Quantitative design methodology for flat ring rolling process / Wujiao Xu, Qiaoli Wang, Xue Zhou, Xiaobing Yang // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 81 – pp. 280-285

82. Соколов Л.Н. Методика проектирования технологических процессовковки крупных поковок: учеб. пособие для студ. спец. «Обработка металлов давлением» по дисциплине «Технологияковки» / Л.Н. Соколов, О.Е. Марков. – Краматорск: ДГМА, 2006. – 120 с.

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

84. А. с. 1017421 МКИ В 21 J 5/00. Способ изготовления полых цилиндрических поковок / В.А. Савин, Е.К. Сташук, В.П. Борисов, В.П. Быков, А.А. Бабаскин, П.П. Кальченко (СССР) – № 3360643; заявл. 04.12.81; опубл. 15.05.1983, Бюл. №18

85. А. с. 1814955 МКИ В 21 J 5/00. Способ протяжки полых заготовок / Г.А. Пименов, О.А. Кобелев, В.П. Кучунов, А.Г. Токарев, В.Д. Рогаль, В.Н. Звонорев (СССР) – № 4802775; заявл. 30.01.1990; опубл. 15.05.1993,

Бюл. №18

86. Совершенствование процессовковки крупногабаритных полых поковок / М.П. Шляхин, Б.А. Деревянко, И.Н. Лыткин, Н.А. Мусташи // Кузнечно-штамповочное производство. – 1981. - №6 - С. 35-36

87. Ghaci A. Study of the effects of die geometry on deformation in the radial forging process / A. Ghaci, M.R. Movahhedy, A. Karimi Taheri //Journal of material processes technology. – 2005. - №170 – pp. 156-163

88. 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. – 2012. – Vol. 38 – pp. 147–153

89. Способковки цилиндров с глухим дном / Ф.Н. Голиков, А.Л. Юровских, Р.Ш. Рубин, И.С. Катков // Кузнечно-штамповочное производство. - 1967. - №5 – С. 12-15

90. А.с. 1338949 МКИ В 21 J 5/00. Способковки полых поковок большого диаметра / Э.В. Веретелликов, А.К. Онищенко, А.А. Мишулин, И.П. Силиверстова, А.М. Кузьменко (СССР) – №3991993; заявл. 23.10.1985; опубл. 23.09.1987, Бюл. №35.

91. Manufacturing processes and properties of nuclear RPV shell ring forged from hollow ingot / Ohashi Nobuo, Enami Teilchi, Wanaka Hiroshige, Sao Keruo // Nuclear engineering and design. – 1984. - №81 – pp.193-205

92. Comperison of mechanical and metallurgical properties of hollo and solid forged products / A. Taherizadeh, A. Najafizadeh, R. Shateri , J.J. Sonas // Fournal of materials processing technology. - 2006. - №178 – pp. 181-187

93. Hamzah Ssemakula A study of pore closure in the manufacturing of heavy rings / Hamzah Ssemakula, Ulf Stahlberg // Journal of Materials Processing Technology. – 1998. – Vol. 84 - pp. 25-37

94. Волокушин В.Ф. Металловедение и термическая обработка / В.Ф. Волокушин. - Изд. «Книга-Вега», 2011. – 518 с.

95. Гудцрв Н.Т. Д.К. Чернов и наука о металлах / Гудцрв Н.Т. – М. Ме-

таллургия, 1950. – 564 с.

96. Кальнер В.Д. Контроль качества термической обработки стальных полуфабрикатов и деталей / Кальнер В.Д. – М. Машиностроение, 1984. – 383 с.

97. Кан Р.У. Физическое металловедение / Кан Р.У., Хаазен П. – М.: Металлургия, 1987 – 663 с.

98. Гуляев А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. - М.: Металлургия. – 1986 г. – 544 с.

99. Dobrzański L.A. Influence of hot-working conditions on a structure of high-manganese austenitic steels / L.A. Dobrzański, A. Grajcar, W. Borek // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2008. – Vol. 29 - pp. 139-142

100. EBSD study of a hot deformed austenitic stainless steel / H. Mirzadeha, J.M. Cabreraa, A. Najafizadehb, P.R. Calvillo // Materials Science and Engineering A. – 2012. – Vol. 538 - pp. 236–245

101. Xuyue Yang Isochronal annealing behavior of magnesium alloy AZ31 after hot deformation / Xuyue Yang, Hiromi Miura and Taku Sakai // Materials Transactions. – 2005. - Vol. 46 - pp. 2981-2987

102. Kuc D. Technological plasticity and structure in stainless steels during hot-working / D. Kuc, G. Niewielski // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2009. – Vol. 32 - pp. 154-161

103. Барыкин Н.П. Влияние технологических параметров радиально-сдвиговой прокатки на структуру стали 45 / Н.П. Барыкин, Н.В. Лопатин // Кузнечно-штамповочное производство. – 2007. - №4 – С. 17-20.

104. Кривошеев В.П. Разработка, исследование и внедрение технологииковки крупных слитков из валковых сталей через пластину с обжимом бойком с выпуклым рабочим профилем: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 / Кривошеев Виктор Петрович. – К., 1995. – 221 с.

105. Ezatpour H.R. Influence of hot deformation strain rate on the mechanical properties and microstructure of K310 cold work tool steel / H.R. Ezatpour,

S.A. Sajjadi, M. Haddad-Sabzevar // *Materials Science and Engineering A.* – 2010. - №527 - pp. 1299-1305

106. Thermo-mechanical properties of ultra high strength steel 22SiMn2TiB at elevated temperature / Zengmin Shi, Kai Liu, Maoqiu Wang [and other] // *Materials Science and Engineering A.* – 2011. - №528 - pp. 3681–3688

107. Hot deformation and processing maps of Inconel 690 superalloy / Shengli Guo, Defu Li, Haijia Pen [and other] // *Journal of Nuclear Materials.* – 2011. - №410 - pp. 52-58

108. Effect of hot deformation on phase transformation kinetics of 86CrMoV7 steel / Furen Xiao, Bo Liao, Guiying Qiao, Shuzhe Guan // *Materials Characterization.* – 2006. - №57 - pp. 306–313

109. Effect of hot rolling temperature on grain size and precipitation hardening in a Ti-microalloyed low-carbon martensitic steel / Y. Han, J. Shi, L. Xu [and other] // *Materials Science and Engineering A.* – 2012 - №553 - pp. 192-199

110. A. Babakhani Investigation on the effects of hot forging parameters on the austenite grain size of vanadium microalloyed forging steel (30MSV6) / A. Babakhania, S.M.R. Ziaei, A.R. Kiani-Rashid // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2010. - №490 - pp. 572–575

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

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

113. Мигачев Б.А. Влияние циклическойковки на механические свойства поковок из конструкционной углеродистой и легированной сталей / Б.А. Мигачев, В.П. Волков // *Кузнечно-штамповочное производство.* – 1985. - №12 - С. 11-13

114. Соколов Л.Н. Упрочнение-разупрочнение при ковке / Л.Н. Соколов // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. праць.* - Краматорськ, 2002. – С. 183-

187.

115. Высокотемпературное упрочнение и разупрочнение металлов и сплавов: справочник / В.Н. Ефимов, Л.Н. Соколов, В.В. Савицкий, М.Л. Жадкевич. – Киев: Наук. думка, 1992. – 104 с. – ISBN 5-12-003380-6.

116. Дзугутов М.Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов / Дзугутов М.Я. – М. Металлургия, 1977. - 480 с.

117. Легранд С.В. Исследование по жаропрочным сплавам / Легранд С.В. – М. Металлургия, 1956. - с. 124-129

118. Ефимов В. Н. Интенсификация и повышение эффективности процессов горячей обработки давлением металлов и сплавов на основе учета термического разупрочнения : автореф. дис. на соискание степени д-ра техн. наук : спец. 05.03.05 «Процессы и машины обработки давлением» / Ефимов В. Н. ; ДГМА. – Краматорск. - 1986. – 36 с.

119. Голубев Т.М. Влияние вибрационной нагрузки на распределение пластических деформаций при горячей осадке / Т.М. Голубев, В.Н. Яворовский // Известия вузов. Черная металлургия. - 1968. - №8. - С. 93-95

120. Пакет программ «Мелиса» для решения технологических задач ОМД методом линий скольжения / В.В. Герасимов, Н.А. Логозяк, Р.А. Вайсбурд, В.Л. Колмогоров // Известия вузов. Черная металлургия. - 1997. - № 9. - С. 32-36.

121. Белова Л.П. Исследование очага деформации при обжатии круглой заготовки комбинированными бойками / Л.П. Белова, В.А. Тюрин, А.Н. Дубков // Кузнечно-штамповочное производство. – 1981. – № 4. – С. 14–17.

122. Потапкин В.Ф. К вопросу об одномерном математическом моделировании процесса плющения круглой проволоки / В.Ф. Потапкин, А.В. Сатонин, С.Н. Шаркова // Известия вузов. Черная металлургия. – 1998. – № 11. – С. 72–73.

123. Тюрин В.А. Теория и процессы ковки слитков на пресах / Тю-

рин В.А. – М.: Машиностроение, 1979. – 240 с.

124. Унксов Е.П. Выбор метода расчета технологических процессов при обработке металлов давлением / Е.П. Унксов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1982. - № 8. – С. 24-26.

125. Математическое моделирование свободнойковки (осадки) на основе решения вариационной задачи на безусловный экстремум / В.Л. Колмогоров, А.И. Голомидов, С.В. Карпов, В.П. Федотов // Известия вузов. Черная металлургия. – 1981. - № 12 – С. 42-43.

126. Гун Г.Я. Теория обработки металлов давлением / Г.Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.

127. Васильев К.И. Компьютерное моделирование процесса формоизменения цилиндрической заготовки при открытой осадке / К.И. Васильев, М.В. Соловьёв, Е.А. Королёва // Кузнечно-штамповочное производство. – 2005. - № 9 – С. 41-43

128. Воронцов А.Л. Пластическое течение при осадке полых заготовок / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2007. - № 1. – С. 3-8

129. Воронцов А.Л. Общая теория контурной осадки / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2008. - № 3. – С. 8-15

130. Воронцов А.Л. Определение силовых и геометрических параметров контурной осадки / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2008. - № 4. – С. 3-12

131. Попов Е.А. Проблематика теории обработки давлением / Е.А. Попов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1981. - № 8. – С. 6-9

132. Лехов О.С. Теоретическое исследование процесса поперечной деформации заготовок круглого сечения / О.С. Лехов, В.И. Одинокоев, А.В. Песков // Известия вузов. Черная металлургия. – 1995. - № 2. – С. 21-24

133. Соколов Л.Н. О влиянии скорости деформации на усилие при ковке слитков / Л.Н. Соколов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. праць. – Краматорськ, 2003.

– С. 275-279

134. Карпов С.В. Анализ кривых текучести среднеуглеродистых сталей при температурах горячей деформации / С.В. Карпов, А.С. Вражкин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2001. - № 6. – С. 20-23

135. Сопротивление горячей деформации углеродистых сталей обыкновенного качества / В.С. Зайцев, В.А. Третьяков, В.М. Басуров [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. – 2000. -- № 9. – С. 31-33

136. Сатонин А.В. К расчету сопротивления деформации металлов и сплавов при их горячей прокатке / А.В. Сатонин // Известия вузов. Черная металлургия. – 1999. - № 4. – С. 74-75

137. Шинкаренко О.М. Построение математической модели сопротивления поковки деформированию при наличии разупрочнения / О.М. Шинкаренко, Е.С. Корчак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. праць. – Краматорськ, 2003. – С. 484-486.

138. Акаро И.Л. Аппроксимация зависимости временного сопротивления и напряжения текучести стали от температуры, деформации и скорости деформации / И.Л. Акаро // Кузнечно-штамповочное производство. - 1995. - № 6. - С. 4-5

139. Соколов Л.Н. Упрочнение-разупрочнение при ковке / Л.Н. Соколов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. праць. - Краматорськ, 2002. – С. 183-187

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

141. Гринкевич В.А. Экспериментально-расчетный метод решения краевых задач ОМД / В.А. Гриневич, Г.Г. Шломчак, В.Н. Данченко // Сучасні

проблеми металургії. Наукові вісті. Т. 5. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: Системні технології. – 2002. – С. 115-118.

142. Жульєв С.И. Применение методов математического моделирования для выбора оптимальной геометрии кузнечных слитков / С.И. Жульєв, Е.И. Бузинов // Технол. машиностр. – 2006. – № 4. – С. 5-8.

143. Жульєв С.И. Система автоматизированного проектирования процессов кристаллизации иковки слитков / С.И. Жульєв, Е.И. Бузинов, М.Е. Живов // Технол. машиностр. – 2003. - № 2. – С. 3-6.

144. Жульєв С.И. Автоматизированное проектирование технологииковки / С.И. Жульєв, Е.И. Бузинов // Междун. науч техн. конф. «Современные проблемы металлургического производства», Волгоград, 1-3 окт., 2002: сб. трудов. Волгоград: Политехник. – 2002. – С. 214-216.

145. Моделирование процессаковки щеки кривошипа составного колчатого вала / П.А. Петров, Ян Синчак, А. Лукашек-Солек, С. Беднарек // Изв. Тульск. гос. ун-та. Сер. Мех. деформир. тверд. тела и обраб. мет. давлением. – 2005. – № 2. – С. 60-70.

146. Hartley P. Numerical simulation of the forging process / P. Hartley, I. Pillinger // Comput. Meth. Appl. Mech. and Eng. – 2006. – vol. 195. – pp. 6676-6690.

147. Голенков В.А. Математическое моделирование процессов ОМД на персональном компьютере / В.А. Голенков, З.П. Зыкова, В.И. Кондрашов. – М.: Машиностроение, 1994. – 272 с.

148. 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, 2002. – С. 57–62.

149. Орлов Г.А. Конечно-элементное представление напряжений в процессах осесимметричной пластической деформации / Г.А. Орлов, В.П. Федоров // Известия вузов. Черная металлургия. – 1988. – № 8. – С. 49–52.

150. Тюрин В.А. Мировая вузовская наука – инновационным технологиямковки / В.А. Тюрин, В.В. Овечкин // Известия вузов. Черная металлургия. – 2002. – № 3. – С. 45–48.
151. Mori Ken-ichiro Some improvments of the Rigid / Ken-ichiro Mori, Susumo Shima, Kozo Osakada // Plastic Finite Element Method Journal of the Japan society for Technologie of Plasticity. – 1980. – vol 21. – № 234. – P. 593.
152. Немзер Г.Г. Исследование теплофизических свойств стали / Г.Г. Немзер, М.А. Аронов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1980. – № 3. – С. 26–30.
153. Towards an optimisation of forging processes using geometric parameters / Ibrahim Khoury, Giraud-Moreau Laurence, Pascal Lafon, Carl Labergere // J. Mater. Process. Technol. – 2006. – vol. 177. – pp. 224–227.
154. Just Hendrik Blick in das Innere eines Freiformschmiedeprozesses / Hendrik Just // Stahl und Eisen. – 2006. - Vol.126 - pp. 70–72.
155. Optimization of open die forging of round shapes using FEM analysis / S.K. Choi, M.S. Chun, C.J. Van Tyne, Moon Y.H. // J. Mater. Process. Technol. – 2006. - № 1. – pp. 88–95.
156. Новый принцип разработки САПР ТПковки / А.В. Коновалов, С.В. Арзамасцев, О.Ю. Муйземнек [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. – 2007. - № 1. – С. 42-47.
157. Юст Х. Сущность процесса свободнойковки / Х. Юст // Черная металлургия. – 2007. – С. 46–48.
158. Зенкевич О. Методы конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
159. Тюрин В.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Тюрин, А.И. Мохов. – ВолгГТУ, Волгоград. – 2000. – 416 с.
160. 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.
161. Рябичева Л.А. Применение метода термомеханических коэффици-

ентов 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.

162. Гринкевич В.А. Применение дискретного метода переменной вязкости для моделирования пластической деформации металлов со сложной реологией / В.А. Гринкевич // Теория и практика металлургии. – 2001. – № 5. – С. 25–29.

163. 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, 2000. – С. 21-23.

164. 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.

165. 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.

166. 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.

167. Condition of closing voids in solid cylinders during hot forging / C. Zhenshan, R Guangsheng, X. Binque [and other] // Tsinghua Univ. Sci. and Technol. - 2003. - № 2. - pp. 227-229.

168. Weides G. Optimisation of the forging process of profiled discs for low pressure turbine rotors by FEM simulation / Weides G., Blaes N., Bokelmann D. //

17 International Forge Masters Meeting, Santander, Spaine, 3-7 Nov. 2008.

169. Бочаров Ю.А. Второй Европейский семинар по моделированию процессов в обработке давлением / Ю.А. Бочаров, В.И. Балаганский // Кузнечно-штамповочное производство. - 2002. - № 9. - С. 38-41.

170. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Численные методы / В.М. Данченко, А.А. Миленин, В.И. Кузьменко [и др.]. - Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 448 с.

171. Кухарь В.Д. Моделирование разделительных операций ОМД методом конечных элементов / В.Д. Кухарь, А.В. Чистяков // Кузнечно-штамповочное производство. - 2002. - № 6. - С. 41-45.

172. 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.

173. 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.

174. Миленин А.А. Проблемы разработки и применения трехмерных численных моделей для оптимизации процессов прокатки / А.А. Миленин // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т. 5. Пластична деформація металів. - Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. - С. 36-46.

175. 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.

176. Effect of symmetrical and asymmetrical forging processes on the quality of forgings produced / G. Banaszek, A.A. Milenin, H. Dyja, S. Mroz // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Т. 5. Пластична деформація мета-

лів. - Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. - С. 237-244.

177. 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.

178. Hardening in relation with microstructure evolution of high purity α -titanium deformed under monotonic and cyclic simple shear loadings at room temperature / S. Bouviera, N. Benmhenni, W. Tirry [and other] // *Materials Science and Engineering A*. - 2012. - Vol. 535 - pp. 12-21

179. Effect of prior strain on continuous recrystallization in AZ31 magnesium alloy after hot deformation / Xuyue Yang, Yasumasa Okabe, Hiromi Miura, Taku Sakai // *Materials Science and Engineering A*. - 2012. - Vol. 535 - pp. 209-215

180. Hot deformation behavior and cold workability of Cu-12Mn-13Zn-1Sn-1Al-0.1Si-0.1Ce alloy with white chromaticity / Na Liu, Zhou Li, Genying Xu [and other] // *Materials Science and Engineering A*. - 2012. - Vol. 553 - pp. 67-73

181. Dariusz Kuc Influence of deformation parameters and initial grain size on the microstructure of austenitic steels after hot-working processes / Dariusz Kuc, Grzegorz Niewielski, Jan Cwajn // *Materials Characterization*. - 2006. - Vol. 56 - pp. 318-324

182. Jorge-Badiola D. Study by EBSD of the development of the substructure in a hot deformed 304 stainless steel / D. Jorge-Badiola, A. Iza-Mendi, I. Guti errez // *Materials Science and Engineering A*. - 2005. - Vol. 394 - pp. 445-454

183. Constitutive equation for elevated temperature flow behavior of Ti-NiNb alloy based on orthogonal analysis / Meili Xiao, Fuguo Li, Wei Zhao, Genlin Yang // *Materials and Design*. - 2012. - Vol. 35. - pp. 184-193

184. Kugler G. Modeling the dynamic recrystallization under multi-stage hot deformation / G. Kugler, R. Turk // *Acta Materialia*. - 2004. - Vol. 52. - pp. 4659-

4668

185. Platt J.P. Grainsize evolution in ductile shear zones: Implications for strain localization and the strength of the lithosphere / J.P. Platt, W.M. Behr // *Acta Materialia*. – 2004. – Vol. 52. - pp. 4659–4668

186. Effect of Shear Deformation on Microstructural Evolution of Ni-30Fe Alloy during Hot Deformation / Jae-Young Cho, Tadanobu Inoue, Fuxing Yin, Kotobu Nagai // *Materials Transactions*. – 2004. – Vol. 45. - pp. 2966 -2973.

187. Brand A.J. Microstructural Simulation of Nickel Base Alloy Inconel 718 in Production of Turbine Discs / A. J. Brand, K. Karhausen, R. Kopp // *Materials Science and Technology*. – 1996. – vol. 12. – pp. 963-969.

188. Zhou L.X. Effects of Dynamic and Metadynamic Recrystallization on Microstructure of Wrought IN718 due to Hot Deformation / L. X. Zhou, T.N. Baker // *Materials Science and Engineering A*. – 1995. – vol. 196. – pp. 89-95.

189. The Hot Deformation Behavior of an As-Cast Alloy 718 Ingot / M.J. Weis, M. C. Mataya, S. W. Thompson, D. K. Matlock // *Superalloy 718 – Metallurgy and Applications*. – 1989. – pp. 135-154.

190. Metallurgical Aspects of Forge Modeling in Alloy 718 / P. E. Mosser, G. Leconte, J. Leray, A. Lasalmonie // *Superalloy 718 – Metallurgy and Applications*. – 1989. – pp. 179-188.

191. Microstructural Modeling of Metadynamic Recrystallization in Hot Working of IN 718 Superalloy / S. C. Medeiros, Y. V. R. K. Prasad, W. G. Frazier, R. Srinivasan // *Materials Science and Engineering A*. – 2000. – vol. 293. – pp. 198-207.

192. Mathematical Modeling of the Hot-Deformation Behavior of Superalloy 718 / J.M. Zhang, Z.Y. Gao, J.Y. Zhuang, Z.Y. Zhong // *Metallurgical and Materials Transactions A* – 1999. – vol. 30A. – pp. 2701-2712.

193. Zhao D. High Temperature Deformation Behavior of Cast Alloy 718 / D. Zhao, S. Guillard, A. T. Male // *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*. – 1997. – pp. 193-204.

194. Grain Growth Model of IN718 During Holding Period after Hot Deformation / J. M. Zhang, Z. Y. Gao, J. Y. Zhuang, Z. Y. Zhong // Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – vol. 101. – pp. 25-30.

195. Fei Chen Recrystallization of 30Cr2Ni4MoV ultra-super-critical rotor steel during hot deformation. Part III: Metadynamic recrystallization / Fei Chen, Zhenshan Cui, Dashan Sui, Bo Fu // Materials Science and Engineering A. -2012. – vol. 540. – pp. 46– 54

196. Prediction of mechanical properties of heavy forgings / J. Sinczak, J. Majta, M. Glowacki, M. Pietrzyk // Journal of Materials Processing Technology. – 1998. – vol. 80–81. – pp. 166–173

197. Jeong H.S. Microstructure prediction of Nimonic 80A for large exhaust valve during hot closed die forging / H.S. Jeong, J.R. Choa, H.C. Park // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. –vol. 162–163. – pp. 504–511

198. Yong-Soon Janga Application of the finite element method to predict microstructure evolution in the hot forging of steel / Yong-Soon Janga, Dae-Cheol Kob, Byung-Min Kim // Journal of Materials Processing Technology. – 2000. – vol. 101. – pp. 85-94

199. Simulation of microstructures for Alloy 718 blade forging using 3D FEM simulator / Young-Sang Na, Jong-Taek Yeoma, Nho-Kwang Park, Jai-Young Lee // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – vol. 141. – pp. 337–342

200. Duan Xing-Wang Microstructure Evolution of Multi-Heat Forging and Numerical Simulation for 316LN Steel / Duan Xing-Wang, Chen Hui-Qin and Liu Jian-Sheng // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2014. – vol. 7. – pp. 1012-1016

201. Wen-wu HE Simulation and Analysis on Microstructure Evolution of Large Generator Retaining Ring during Multi-fire Forging / Wen-wu He, Jian-sheng Liu, Hui-qin Chen, Hui-guang Guo // Advanced Materials Research Vols. – 2010. – vol. 97-101. – pp. 176-181.

202. Повышение пластичности хромонокелевых и титановых сплавов

при немонотонном деформировании и термической обработке / В.А. Матвийчук, В.М. Михалевич, В.А. Фомичев, В.П. Егоров // Ресурсосберегающая технология и оборудование штамповочного производства в машиностроении : сб. научн. тр. – Рыбинск, 1989. – С. 32-37.

203. Mikhalevich, V.M. Plasticity with cyclic hot working / V. M. Mikhalevich // *Strength of Materials*. - 1994, 26 (6) , pp. 407-412.

204. Ефимов В.Н. Математическая модель разрушения дробно-деформированного в горячем состоянии металла / В.Н. Ефимов, И.С. Зельцер, И.С. Алиев // *Металлы*. – 1989. - №6. – С. 129-134

205. Людвиг П. Основы технологической механики. Расчеты на прочность. – М.: Машиностроение, 1970. - Вып. 15. – С. 130-166

206. Дель Г.Д. Технологическая механика / Г.Д. Дель. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.

207. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.

208. Особенности напряженно-деформированное состояния в шейке цилиндрического образца / А. В. Грушко, В. А. Огородников, И. Ю. Кирица, Н. П. Еленич // *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов*. — 2009. — №1(20) — С. 25—29. — ISBN 878-966-379-325-2.

209. Грушко А.В. Определение кривой течения материала по стандартным механическим характеристикам / А.В. Грушко // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія *Машинобудування*. - №60. - С. 223-227

210. Ефимов М.В. Ковка крупных валов без применения осадки слитка / М.В. Ефимов, Ю.Н. Станков, О.Е. Марков // *Металлообработка*. – Москва, 2012. - № 2(68). - С. 39-42.

211. Osborn A.F. *Applied imagination* / Osborn A.F., Scribener's Sons, 1963 – 417 p.

212. Taylor D.W. Does group participation in brainstorming facilitate or inhibit creative thinking? / D.W. Taylor, P.C. Berry, C.H. Blok // *Administr. Sci.*

Quart. – 1958. – v. 3. – pp. 22-47

213. Broadbent G.H. The psychological background / G.H. Broadbent // Proc. Of the Conf. on the Teaching of Design, Design methods in Architecture. – 1966.

214. Gordon W.J.J. Synectics: the development of creative capacity / Gordon W.J.J. - Harper&Row, New York, 1961. – 180 p.

215. Broadbent G.H. The design method / Broadbent G.H. – Butterworths, London. – 1966. – 174 p.

216. Jones J.C. A method of systematic design / J.C. Jones // Conf. on design methods, Pergamon, Oxford. – 1963.

217. Norris K.W. The morphological approach to engineering design / K.W. Norris // Conf. on Design Methods, Oxford. – 1963.

218. Zwicky F. The morphological method of analysis and construction / Zwicky F. - Courant, Anniversary. – 1948.

219. Алиев И.С. Факторы, влияющие на параметрыковки крупных поковок / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, А.В. Периг // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2013. -№1. – С. 27-45.

220. Факторы управления напряженно-деформированным состоянием заготовки при ковке крупных поковок / И.С. Алиев, О.Е. Марков, Я.Г. Жбанков [и др.] // Тезисы докладов V научно-технической конференции молодых специалистов «Энергомашспецсталь-2013», 22-24 травня 2013. – Краматорск. 2013. - С. 39-41.

221. Алиев И. С. Факторы управления напряженно-деформированным состоянием заготовки в процессахковки крупных поковок / И. С. Алиев, Я. Г. Жбанков // Международный промышленный журнал «Мир техники и технологий». – Чугуев, 2013. – № 10–11 (142–143). – С. 38–46.

222. Jafarzadeh H. Numerical and Experimental Studies of Splines Produced by Injection Forging Process / Jafarzadeh H., Zadshakoyan M. // Materials and Manufacturing Processes. – 2011. – vol. 5. – pp. 703-712.

223. Three-Dimensional Nonlinear Finite Element Analysis of Hot Radial

Forging Process for Large Diameter Tubes / J. Chen, K. Chandrashekhara, V.L. Richards, S.N. Lekakh // Materials and Manufacturing Processes. – 2010. – vol. 7. – pp. 669-678

224. Thermal–Elastic–Plastic Simulation of Internal Stress Fields of Quenched Steel 40Cr Cylindrical Specimens by FEM / Ligang Liu, Bo Liao, Da Li [and other] // Materials and Manufacturing Processes. – 2011. – vol. 5. – pp. 732-739

225. Analysis and FEM Simulation of Temperature Field in Wet Surface Grinding / C. Mao, Z.X. Zhou, Y.H. Ren, B. Zhang // Materials and Manufacturing Processes. – 2010 – vol.6. – pp. 399-406

226. Abbas Vafaeseefat Finite Element Simulation for Blank Shape Optimization in Sheet Metal Forming / Abbas Vafaeseefat // Materials and Manufacturing Processes. – 2011. – vol. 1. – pp. 93-98

227. Du Y.Y. Finite Element Simulation of Cold Isostatic Pressing of the Selective Laser-Sintered Components / Y.Y. Du, Y.S. Shi, Q.S. Wei // Materials and Manufacturing Processes. – 2010. – vol. 12. – pp. 1389-1396

228. Джонсон В. Механика процессов выдавливания металла / В. Джонсон, Х. Кудо. – М. : Металлургия, 1966. – 317 с.

229. Теорияковки и штамповки / Е.П. Унксов, У. Джонсон, В.Л. Колмогоров [под ред. Е.П. Унксова, А.Г. Овчинникова]. – М. : Машиностроение. – 1999. – 598 с.

230. Степанский Л.Г. Расчёты процессов обработки металлов давлением / Л.Г. Степанский – М. : Машиностроение, 1982. – 217 с.

231. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Учебник для вузов / В.Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.

232. Евстратов В.А. Теория обработки металлов давлением / В.А. Евстратов – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьк. ун-те, 1981. – 248 с.

233. Алюшин Ю.А. Энергетические основы механики. Учеб. пособие для вузов / Ю.А. Алюшин – М.: Машиностроение, 1999. – 192 с.

234. Теоретические основыковки и горячей объемной штамповки / Е.М. Макушок, А.С. Матусевич, В.П. Северденко, В.М. Сегал. – Мн. : Наука и техника, 1968. – 408 с.

235. Яковченко А.В. Аналитические методы моделирования нестационарных процессов обработки металлов давлением / Яковченко А.В.– Донецк : ДонНИИЧермет, 1997. – 177 с.

236. Теория обработки металлов давлением / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго и др. – М. : Металлургия, 1963. – 672 с.

237. Чучин О.В. Кинематически возможные поля скоростей при выдавливании в разъемных матрицах / О.В. Чучин, В.Г. Бойко, Р.С. Борисов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ, 2000. – С. 52–56.

238. Вайсбурд Р.А. Исследование деформаций при осадке дисков на плите с отверстием / Р.А. Вайсбурд, Д.С. Жиров // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 5. – С. 12–15.

239. Дмитриев А.М. Прогнозирование утяжин при штамповке / А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов // Справ. Инж. ж. – 2004. – № 11. – С. 29–32.

240. Алиев И.С. Прогнозирование дефектообразования при выдавливании / И.С. Алиев, К. Крюгер // Теория, технология оборудования и автоматизация обработки металлов давлением, резанием: Сб. науч. тр. Вып. 1. – Тула : ТулГУ, 1999. – С. 87–90.

241. Соколов Л.Н. Распределение деформаций при ковке поковок прямоугольного сечения для схемы протяжки круг-уголок-пластина / Л.Н. Соколов, О.Е. Марков // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. праць ДДМА. - Краматорськ, 2001. – С. 341-346.

242. Золотухин Н.М. О подобии процессов горячего деформирования металлов / Н.М. Золотухин // Кузнечно-штамповочное производство. - 1960. - № 3. - С. 1-3.

243. Изготовление заготовок и деталей пластическим деформированием / Авдеев В.М., Аксенов Л.Б., И.С. Алиев [и др.]; под ред. К.Н. Богоявленского, В.В. Риса, А.М. Шелестова. - Л.: Политехника, 1991. - 351 с.

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

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

246. Красильников Н.А. Разработка методов интенсивной пластической деформации для получения ультрамелкозернистых металлов и сплавов с повышенными свойствами: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.01 / Н.А. Красильников. – Уфа, 2005. – 254 с.

247. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: справочник / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия. - 1983. - 352 с.

245. Михалевич В.М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень / В.М. Михалевич. - Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 1998. – 195 с.

249. Матвийчук В. А. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: Монография / В.А. Матвийчук, И.С. Алиев. – Краматорск: ДГМА, 2009. – 268 с.

250. Жбанков Я. Г. Восстановление пластичности паузами при горячем деформировании / Я. Г. Жбанков // V Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов». – Москва, 26–29 ноября 2013. –С. 237–238.

251. Жбанков Я.Г. Моделирование изменений микроструктуры металла в процессе горячего пластического деформирования / Я.Г. Жбанков // Вісник НТУ «ХП». - 2014. - №0 44 (1087). - С. 34-39

252. Грушко О.В. Определение кривой течения материала по стандартным механическим характеристикам/ О.В. Грушко // Вісник Національного

технічного університету України «КП». Серія «Машиностроение». – 2010. - № 60. – С. 133-137.

253. Грушко А. В. Построение кривых течения материалов с учетом шейкообразования / А. В. Грушко, В. А. Огородников, В. И. Музыкачук // Кузнечно-штамповочное производство «Обработка металлов давлением». — 2007. — № 8. — С. 16—20. — ISSN 0234-8241.

254. Томсен Э. Механика пластических деформаций при обработке металлов / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобояши. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.

255. Агеев Н.П. Механические испытания металлов при высоких температурах и кратковременной ползучести / Н.П. Агеев, С.И. Каротушин. - М.: Металлургия, 1968. – 280 с.

256. Соколов Л.Д. Сопротивление металлов пластической деформации / Соколов Л.Д. - М.: Металлургиздат, 1963. – 284 с.

257. Витман В.В. О влиянии скорости деформирования на хладноломкость стали / В.В. Витман, В. А. Степанов // Журнал технической физики. - 1939. - Т. 9. - С. 1069-1077.

258. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин. - М. : Металлургия, 1976. – 488 с.

259. Ковка и штамповка: справочник : в 4 т. / [под ред. Е.И. Семенова и др.]. – М. : Машиностроение, Т. 1, 1985. – 567 с.

260. Соколов Л.М. Теорія обробки металів тиском : навчальний посібник / Л. М. Соколов, С. Г. Прийменко, С. В. Мартинов. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – 236 с.

261. Study on hot deformation characteristics of 12%Cr ultra-super-critical rotor steel using processing maps and Zener–Hollomon parameter / Zhenhua Wang, Wantang Fu, Baozhong Wang [and other]// Materials Characterization. - 2010. – Vol. 61. – pp. 25–30

262. Influences of silicon on the work hardening behavior and hot defor-

mation behavior of Fe–25wt%Mn–(Si, Al) TWIP steel / Dejun Li, Yaorong Feng, Shengyin Song [and other] // *Journal of Alloys and Compounds*. - 2015. – Vol. 618. – pp. 768-775

263. Hot deformation characteristic and processing map of superaustenitic stainless steel S32654 / Pu Enxiang, Zheng Wenjie, Xiang Jinzhong [and other] // *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*. – 2014. - vol. 598. – pp. 174-182

264. Deformation characteristic and prediction of flow stress for as-cast 21Cr economical duplex stainless steel under hot compression / De-Ning Zou, Kun Wu, Ying Han [and other] // *Materials & Design*. – 2013. – Vol. 51. – pp. 975–982

265. Constitutive description for the design of hot-working operations of a 20MnCr5 steel grade / Eli Saúl Puchi-Cabrera, Jean-Dominique Guérin, Mirentxu Dubar [and other] // *Materials & Design*. – 2014. – vol. 62. – pp. 255–264

266. Zhinan Yanga Study on hot deformation behaviour and processing maps of low carbon bainitic steel / Zhinan Yanga, Fucheng Zhang, Chunlei Zhenga, Ming Zhanga, Bo Lvc, Lin Qu // *Materials & Design*. – 2015. – Vol. 66. - pp. 258–266

267. Hot deformation behaviour of an Nb- N-bearing austenitic stainless steel biomaterial / E.S. Silva, R.C. Sousa, A.M. Jorge Jr., O. Balancin // *Materials Science and Engineering A*. – 2012. – 524. - pp. 69-75

268. Processing maps and hot workability of Super304H austenitic heat-resistant stainless steel / Shuping Tan, Zhenhua Wang, Shichang Cheng [and other] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – Vol. 517. – pp. 312–315

269. Staker M.R. The effects of strain, strain rate and temperature on grain refinement and hot workability of type 305 stainless steel / M.R. Staker, N.J. Grant // *Materials Science and Engineering*. – 1985. – Vol. 75. – pp. 137-150

270. Lin Y.C. Effects of strain on the workability of a high strength low alloy steel in hot compression / Y.C. Lin, Ge Liu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – Vol. 523. – pp. 139–144

271. Optimization of Hot Workability in Superaustenitic Stainless Steel

654SMO / En-xiang Pu, Wen-jie ZHENG, Zhi-gang SONG [and other] // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2014. – Vol. 21. – pp. 975–982

272. Richard K.C. Nkhoma Hot workability of AISI 321 and AISI 304 austenitic stainless steels / Richard K.C. Nkhoma, Charles W. Siyasiya, Waldo E. Stumpf // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – Vol. 595. – pp. 103–112

273. El Mehtedi M. Hot workability in process modeling of a bearing steel by using combined constitutive equations and dynamic material model / M. El Mehtedi, F. Gabrielli, S. Spigarelli // Materials and Design. – 2014. – vol. 53. – pp. 398-404

274. Wang Xiaofeng Influence of cerium on hot workability of 00Cr25Ni7Mo5N super duplex stainless steel / Wang Xiaofeng, Chen Weiqing // Journal of Rare Earths. – 2010. – vol. 28. - pp. 295-300

275. Akbarzadeh A. Hot workability of a high carbon high chromium tool steel / A. Akbarzadeh, S. Naghdy // Materials & Design. – 2013. – Vol. 46. – pp. 654–659

276. The effect of rare earth alloying on the hot workability of duplex stainless steel — A study using processing map / Xiaocong Ma, Zijun Ana, Lei Chena [and other] // Materials & Design. – 2015. – vol. 86. - pp. 848-854

277. Жбанков Я.Г. Восстановление пластичности при изотермическом горячем дробном деформировании / Я. Г. Жбанков, Л. И. Алиева, В. М. Михалевич // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2013. - № 7. - С.12-17.

278. Aliiev I. Strong shear deformations in billet during heavy forging by special anvils / I. Aliiev, I. Zhbankov, L. Tagan // XIII International Scientific Conference. New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering, Czestochowa. - 2012 – pp. 348-355.

279. Алиев И.С. Протяжка заготовок с дополнительными сдвиговыми деформациями / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган // Кузнечно-штамповочное производство. – 2012. - №7. - С. 18-24.

280. Aliiev I. The forging of billet by special instrument with asymmetric

form / I. Aliiev, I. Zhbankov // 12th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" – RaDMI 2012, Vrnjačka Banja, Serbia, 13-17 September 2012. – 2012. – Vol. 2. – pp. 153-159. – ISBN 978-86-6075-037-4.

281. Жбанков Я.Г. Деформированное состояние заготовки при протяжке бойками со скосом / Я.Г. Жбанков // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. - № 8. - 306 с.

282. Жбанков Я.Г. Ковка слитков протяжкой с интенсивными сдвигами / Я.Г. Жбанков // IX Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». Москва. - 2012. - С.554-556

283. Исследование процесса протяжки заготовок бойками со скосом / Я.Г. Жбанков, В.И. Шимко, Л.В. Таган, А.В. Шкира // Кузнечно-штамповочное производство. -2013. - №1. – С. 13-18.

284. Zhbankov I. G. Intensive Shear Deformation in Billets During Forging with Specially Formed Anvils / I. G. Zhbankov, A. V. Perig // Materials and Manufacturing Processes (Thomson Reuters 2011 Impact Factor: 1.058). – 2013. – Vol. 28. – pp. 577-583.

285. Алиев И.С. Моделирование кузнечной протяжки в комбинированных бойках несимметричной формы / И. С. Алиев, Я. Г. Жбанков, Л. В. Таган // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Сер. : Машинобудування. - 2013. - № 3. - С. 77-83.

286. Комбинированная пластическая деформация со сдвигом для получения крупных заготовок / Л.И. Алиева, Я. Г. Жбанков, М. А. Маркова, Л. В. Таган // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск , 2013. – № 3 (36). – С. 3–9.

287. Алиева Л.И. Ковка поковок типа валов с продольным сдвигом специальными бойками / Л.И. Алиева, Я.Г. Жбанков, В.Ю. Станков // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2013. - №43 (1016). – С. 3-10

288. Ковка поковок типа валов через пластину с применением операции продольного сдвига / Я.Г. Жбанков, Л.И. Алиева, Р.А. Загородних, Л.В. Таган // Труды VII международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в металлургии». – 2013. - С. 68-80

289. Алиев И.С. Ковка слитков бойками ступенчатой формы / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган // Машини і пластична деформація металів. Тези доповідей II міжнародної науково-технічної конференції. Запоріжжя. – 2012. - С. 69-70.

290. Zhbankov I. G. New schemes of forging plates, shafts, and discs / I.G. Zhbankov, A.V. Perig, L.I. Aliieva // Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. - 2015. - ISSN 0268-3768 (Print). ISSN 1433-3015 (Online) – Access: DOI: 10.1007/s00170-015-7377-7

291. Алиев И.С. Исследование процесса ковки плит плоскими бойками со скосом / И. С. Алиев, Я. Г. Жбанков, И. А. Грачев // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением : материалы международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию кафедры Е4 «Высокоэнергетические устройства автоматических систем» БГТУ «ВОЕНМЕХ» 14–17 октября 2014 года. – СПб : Балт. гос. техн. ун-т, 2014. – С. 23–28.

292. Алиев И.С. Исследование процесса ковки плит бойками со скосом / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, И.А. Грачев // Обработка материалов давлением. – 2014. – № 2 (39). – С. 69-74

293. Жбанков Я. Г. Численное моделирование исчерпания ресурса пластичности при равноканальном многоугловом прессовании / Я. Г. Жбанков, А. В. Периг, С. В. Мартынов // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: Материалы 5-й международной научно-практической конференции 29 февраля – 1 марта 2012 г., г. Ростов-на-Дону. В рамках 15-й международной агропромышленной выставки «Интерагро-маш-2012» / под ред. Ю. Ф. Лачуга, Б. Ч. Месхи, В.И. Пахомов и др. – Ро-

стов-на-Дону : ДГТУ. – 2012. – С. 203–207. – ISBN 978-5-7890-0694-8.

294. Жбанков Я.Г. Влияние относительной подачи и величины обжатия на напряженно-деформированное состояние поковки при протяжке / Я.Г. Жбанков, А.А. Швец // Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти. Тези доповідей IV міжнародної науково-технічної конференції. Київ, 14-17 травня 2013. – С. 96-97.

295. Жбанков Я.Г. Способы управления качеством крупных поковок / Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган, А.А. Швец // Тезисы докладов V научно-технической конференции молодых специалистов «Энергомашспецсталь-2013». Краматорск, 22-24 травня 2013. – С. 26-28.

296. Жбанков Я.Г. Дифференцированная ковка протяжкой плоскими бойками / Я.Г. Жбанков, А.А. Швец, М.И. Гунько // Обработка материалов давлением: сб. научн. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2013. – № 2 (35). – С. 60-65.

297. Управление напряженно-деформированным состоянием заготовки в процессах ковки крупных поковок / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган, А.А. Швец // Обработка материалов давлением: сб. научн. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2013. - №2(35). - С. 50-57.

298. Жбанков Я. Г. Исследование напряженного состояния заготовки при протяжке с неоднородным температурным полем комбинированными бойками / Я.Г. Жбанков, А.А. Швец, М.А. Турчанин // Вестник ДГМА. – 2013. – № 2 (31). – С. 21-25

299. Заблоцкий В.К. Исследование деформированного состояния заготовки при протяжке с неоднородным температурным полем комбинированными бойками / В.К. Заблоцкий, Я.Г. Жбанков, А.А. Швец // Обработка материалов давлением: сб. научн. трудов. – Краматорск: ДГМА, - 2013. - № 4 (37). - С. 70-73

300. Заблоцкий В. К. Протяжка заготовок с неоднородным температурным полем / В.К. Заблоцкий, А.А. Швец, В.В. Панов // Научный вестник ДГМА. - № 2 (12Е). - 2013. - С. 52 - 62

301. Жбанков Я.Г. Интенсификация сдвиговых деформаций при ковке заготовок с неоднородным температурным полем / Я.Г. Жбанков // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. - №2. – С. 42-47.

302. Повышение деформируемости слитков стали X12MФ / И.Н. Логозинский, А.Н. Тумко, Я.Г. Жбанков [и др.]// *Обработка материалов давлением: сб. научн. трудов*. – Краматорск: ДГМА, - 2013. - №2(35) - С. 66 - 69.

303. Жбанков Я.Г. Повышение качества крупных поковок за счет снижения отклонений формы в виде утяжин / Я.Г. Жбанков, А.А. Швец, П.П. Кальченко // *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали одинадцятої Міжнародної науково-технічної конференції. Краматорськ, 4-6 июня 2013*. – С. 48.

304. Протяжка коротких заготовок без образования дефекта зажим / И.С. Алиев, П.П. Кальченко, Я.Г. Жбанков [и др.] // *Материалы международной научно-технической конференции «Современные технологии обработки металлов давлением: моделирование, проектирование, производство»*. – 2013. - С. 93-96

305. Прогнозирование трещинообразования в процессе протяжки заготовок плоскими бойками / Я.Г. Жбанков, О.Е. Марков, А.А. Швец, Л.В. Таган // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. - 2013. - № 10. - С. 7-13

306. Effect of 2θ-Punch Shape on Material Waste during ECAE through a 2θ-Die / A. V. Perig, A. F. Tarasov, I. G. Zhibankov & S. N. Romanko // *Materials and Manufacturing Processes (Mater. Manuf. Process., Thomson Reuters 2012 Impact Factor: 1.297, Ranking: 14/39 Engineering, Manufacturing; 113/239 Materials Science, Multidisciplinary)*. – 2013. – ISSN 1042-6914 (Print)

307. Perig A. V. Effect of Die Radii on Material Waste during Equal Channel Angular Extrusion / A. V. Perig, I. G. Zhibankov, V. A. Palamarchuk // *Materials and Manufacturing Processes (Thomson Reuters 2012 Impact Factor: 1.297, Ranking: 14/39 Engineering, Manufacturing; 113/239 Materials Science, Multidis-*

ciplinary). – 2013. – Vol. 28. – Iss. 8. – pp. 910-915. – ISSN 1042-6914 (Print)

308. Shape Effect of Angular Die External Wall on Strain Unevenness during Equal Channel Angular Extrusion / A.V. Perig, I.G. Zhbakov, I.A. Matveyev, V.A. Palamarchuk // *Materials and Manufacturing Processes* (Thomson Reuters 2012 Impact Factor: 1.297, Ranking: 14/39 Engineering, Manufacturing; 113/239 Materials Science, Multidisciplinary). – 2013. – Vol. 28. – Iss. 8. – pp. 916-922. – ISSN 1042-6914 (Print)

309. Жбанков Я.Г. Численное моделирование пластического течения материала при равноканальном угловом прессовании через штамп с подвижным дном / Я.Г. Жбанков, А.В. Периг, О.А. Жукова // *Вестник национального технического университета «ХПИ»* – Харьков: ХПИ, 2011 - №45. – С. 76-84.

310. Жбанков Я.Г. Ковка деталей типа эксцентриков / Я.Г. Жбанков // *Теоретичні та прикладні задачі обробки металів тиском та авто технічних експертиз. Збірник тез доповідей міжнародної науково-технічної конференції. Вінниця, 2011* – С. 150-151.

311. Жбанков Я.Г. Ковка эксцентрика / Я.Г. Жбанков // *Сборник тезисов. Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов ОАО «Энергомашспецсталь»*, 2011 – С. 36-38.

312. Жбанков Я.Г. Технология изготовления стержневых деталей типа эксцентриков / Я.Г. Жбанков // *Обработка материалов давлением: сб. научн. трудов.* – Краматорск: ДГМА, 2011. - №2(27) – С. 66-72.

313. Алиев И.С. Ковка эксцентриковых валов смещением и последовательной осадкой в кольцах / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган // *Обработка материалов давлением: сб. научн. трудов.* – Краматорск: ДГМА, 2011. - №3(28) – С. 72-77.

314. Жбанков Я.Г. Уменьшение неравномерности распределения деформаций при осадке профилированных заготовок / Я.Г. Жбанков, В.В. Панов, О.Е. Марков // *Тезисы докладов V научно-технической конференции молодых специалистов «Энергомашспецсталь-2013»*. Краматорск, 22-

24 травня 2013. – С. 28-30.

315. Жбанков Я.Г. Влияние формы и размеров заготовки на напряженно-деформированное состояние в процессе осадки / Я.Г. Жбанков, О.Е. Марков, Р.И. Сивак // Республиканский журнал. Технология производства металлов и вторичных материалов. – 2013. - №1(23) – С. 109-118.

316. Жбанков Я.Г. Определение рациональных параметров профилированных заготовок, подвергаемых осадке плоскими плитами / Я. Г. Жбанков, О. Е. Марков, Р. И. Сивак // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2013. - № 8. - С. 8-15.

317. Марков О.Е. Влияние профилирования укороченных слитков на напряженно-деформированное состояние и закрытие осевых дефектов при ковке плит / О.Е. Марков, Я. Г. Жбанков, А. А. Швец // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2013. - № 9. - С. 32-37.

318. Zhbankov I. G. Rational Parameters of Profiled Workpieces for Upsetting Process / I. G. Zhbankov, O.E. Markov, A. V. Perig // Int. J. of Advanced Manufacturing Technology, 2014. – Vol. 71. – № 5–8. – P. 808 – 810. – ISSN 0268–3768.

319. Алиев И.С. Осадка выпукло-вогнутыми плитами / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, О.А. Жукова // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Краматорск, 2010 – С. 8.

320. Влияние операции выворота поковки коническими плитами на распределение / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, О.Е. Марков, С.А. Близнюк // Обработка материалов давлением: сб. научн. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2010. - №3(24) – С. 64-68.

321. Жбанков Я.Г. Исследование процесса осадки узким бойком / Я.Г. Жбанков // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2014. - №5(290). – С. 29-35.

322. Жбанков Я.Г. Исследование процессаковки крупных дисков осад-

кой узким бойком на прессах малой мощности / Я.Г. Жбанков, О.Е. Марков, С.В. Мартынов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2015. - № 3. - С. 10-15.

323. Элементы штамповки в процессахковки крупных поковок / Л.И. Алиева, Я.Г. Жбанков, В.Н. Злыгорев, Л.В. Таган // Обработка материалов давлением: сб. научн. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 20-27

324. Жбанков Я. Г. Влияние горячей деформации и термической обработки на структуру стали 40Х / Я. Г. Жбанков, В. И. Шимко, С. А. Амелин // Перспективные технологии, материалы и оборудование в литейном производстве: материалы IV Международной научно-технической конференции, 30 сентября – 4 октября 2013. – Краматорск : ДГМА, 2013. – С. 104–106.

325. Жбанков Я.Г. Ковка конических обечаек / Я.Г. Жбанков, Таган Л.В., Шкира А.В. // Научный вестник ДГМА. – 2011. - №2(8Е) – С. 8-14.

326. Гуляев Б.Б. О расчете утепленных прибылей / Б.Б. Гуляев. - Труды НТО ЧМ. – М.: Metallurgizdat, 1955. - С. 258

327. Дюдкин Д.А. Усадочные раковины в стальных слитках и заготовках / Д.А. Дюдкин, Л.И. Крупман, Д.М. Максименко. – М. : Metallurgiya, 1983. - 136 с.

328. Тумко А.Н. Моделированиековки на молоте части слитка с усадочной раковиной / А.Н. Тумко // Metallургическая и горная промышленность. 2011 – №7. – С. 161-165.

329. Алиев И.С. Осадка бесприбыльных слитков на плите с отверстием / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган // Обработка материалов давлением: сб. научн. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2011. - №4(29) – С. 94-102.

330. Алиев И.С. Осадка бесприбыльных слитков на плите с отверстием / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган // Обработка материалов давлением: сб. научн. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2012. - №1(30) – С. 90-100.

331. Алиев И.С. Ковка крупных поковок из бесприбыльных слитков

осадкой плоской плитой с отверстием / И.С. Алиев, Я.Г. Жбанков, Л.В. Таган // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції. 2012 – С. 8.

332. Жбанков Я.Г. Ковка бесприбыльных слитков плитами различной конфигурации / Я.Г. Жбанков, А.В. Шкира, Л.В. Таган // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції. 2012 – С. 34.

333. Zhbakov I. G. Forging of Ingots Without Hot Tops / I. G. Zhbakov, A. V. Perig // Materials and Manufacturing Processes (Thomson Reuters 2011 Impact Factor: 1.058). – 2013. – Vol. 28. – Iss. 3. – pp. 229-235. – ISSN 1042-6914 (Print).

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

335. Aliieva L. Analysis of billet deformation during the combined radial-backward extrusion / L. Aliieva, N. Grudkina, I. Zhbakov // XIII International Scientific Conference. New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering, Czestochowa, 2012 – pp. 389-396.

336. Алиева Л.И. Моделирование малоотходной штамповки полых деталей из сплошных заготовок / Л.И. Алиева, Е.Н. Бондарева, Я.Г. Жбанков // Научный вестник ДГМА. – 2010. - №1(6Е). – С. 15-21.

337. Новые способы выдавливания для безотходного изготовления полых деталей типа втулок и колец / Л.И. Алиева, О.В. Чучин, Я.Г. Жбанков, Е.Н. Бондарева // Обработка материалов давлением: сб. научн. трудов. – Краматорск: ДГМА, 2010. - №3(24). – С. 86-91.

338. Пат. 2453390 РФ, МКИ В 21 К21 /00. Способ изготовления крупногабаритных бесшовных труб / И.Н. Лебединский, Б.Г. Пектемиров, С.В. Габов - № 2010136444/02; заявл. 30.08.2010; опубл. 20.06.2012, Бюл. №17.

339. Пат. 73653 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб кування ексцентриків / Жбанков Я.Г.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u201105864; заявл. 10.05.2011; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 19/2012

340. Пат. 69008 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб кування ексцентриків / Алієв І.С., Жбанков Я.Г.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u201108271; заявл. 01.07.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8/2012

341. Пат. 2332277 РФ, МКИ В 21 J 13/02. Способ изготовления кольцевой детали / Басюк С.Т., Гринберг И.В. - № 2006136119/02; заявл. 13.10.2006; опубл. 27.08.2008, Бюл. №24

342. Пат. 86620 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб осадження заготовок / Алієв І.С., Жбанков Я.Г., Швець О.А., Станков Ю.М., Панов В.В, Сивак Р.І.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u201306942; заявл. 03.06.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1/2014

343. Пат. 20770 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб осаджування ковальського зливка / Алієв І.С., Марков О.Є., Жбанков Я.Г.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u200608382; заявл. 26.07.2006; опубл. 15.02.2007, Бюл. № 2/2007

344. Пат. 69058 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб виготовлення якісних заготовок із злитків без прибуткової частини / Жбанков Я.Г., Марков О.Є.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u201109301; заявл. 25.07.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8/2012

345. Пат. 25828 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб кування бездодаткових злиwkів / Алієв І.С., Марков О.Є., Жбанков Я.Г.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u200703593; заявл. 02.04.2007; опубл. 27.08.2007, Бюл. № 13/2007

346. Пат. 28703 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб осадження безприбуткових злиwkів / Алієв І.С., Марков О.Є., Жбанков Я.Г.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u200706155; заявл. 04.06.2007; опубл. 25.12.2007, Бюл. № 21/2007

347. Пат. 59106 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб кування плит / Алієв І.С., Жбанков Я.Г., Марков О.Є.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u201009179; заявл. 21.07.2010; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9/2011

348. Пат. 82189 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб пластичного деформування виробів / Алієва Л.І., Деревенько І.А., Жбанков Я.Г., Таган Л.В.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u201301279; заявл. 04.02.2013; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14/2013

349. Пат. 93867 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб кування валів / Жбанков Я.Г., Швець О.А.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u201401546; заявл. 17.02.2014; опубл. 27.10.2014, Бюл. № 20/2014

350. Пат. 74406 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб кування валів / Жбанков Я.Г., Таган Л.В.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u201204704; заявл. 17.04.2012; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20/2012

351. Пат. 81227 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб кування заготовок / Алієв І.С., Жбанков Я.Г., Швець О.А.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u201214890; заявл. 25.12.2012; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12/2013

352. Пат. 81347 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб диференційованого кування заготовок / Алієв І.С., Жбанков Я.Г., Швець О.А.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u201300720; заявл. 21.01.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12/2013

353. Пат. 84077 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб протягування заготовок із карбідних сталей / Алієв І.С., Тумко О.М., Жбанков Я.Г., Логозинський І.М.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u201304306; заявл. 05.04.2013; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 19/2013

354. Пат. 69059 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб виготовлення суцільних поковок із зливків без прибуткової частини / Марков О.Є. Жбанков Я.Г.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u201109306; заявл. 25.07.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8/2012

355. Пат. 70801 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб кування деталей типу втулок із розтрубами / Алієв І.С., Жбанков Я.Г., Таган Л.В., Шкіра О.В.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u201114584; заявл. 08.12.2011; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12/2012

356. Пат. 74327 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб кування циліндрів / Жбанков Я.Г.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u201204054; заявл. 02.04.2012; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20/2012

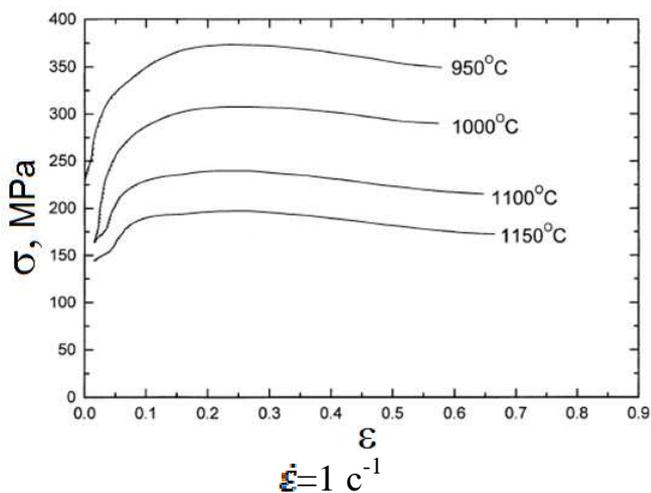
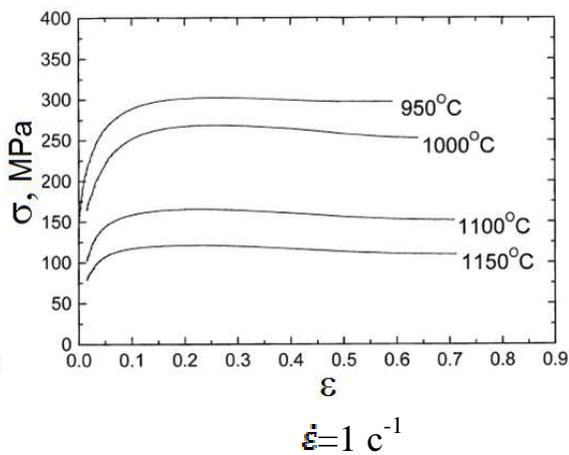
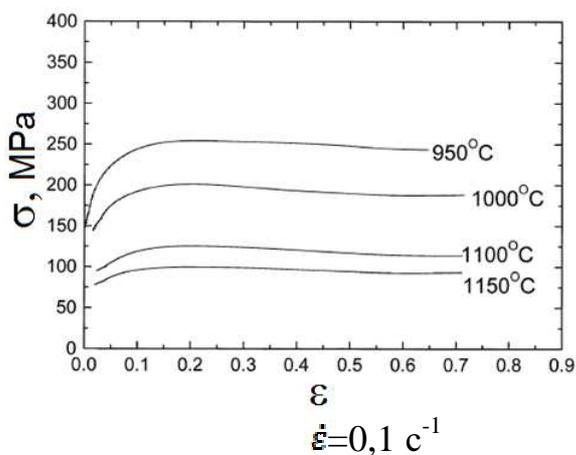
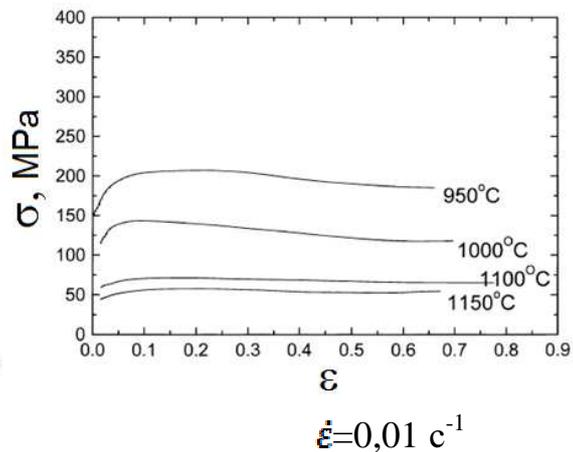
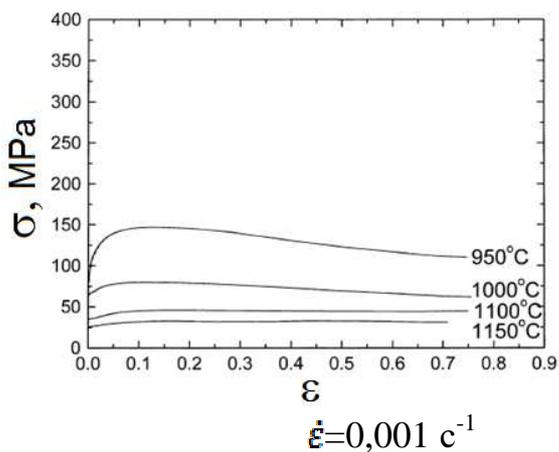
357. Пат. 68991 Україна, МПК(2006) В21J 1/04. Спосіб виготовлення поковок із отвором / Жбанков Я.Г.; заявник та власник ДДМА, Краматорськ. - № u201105861; заявл. 10.05.2011; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8/2012

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Механические свойства металлов и сплавов при различных температурно-скоростных условиях

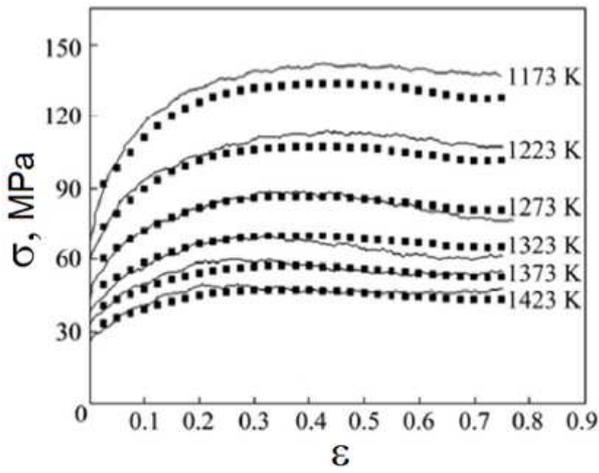
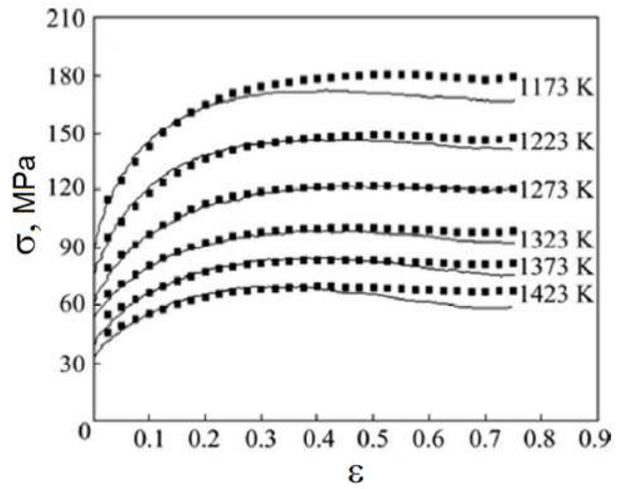
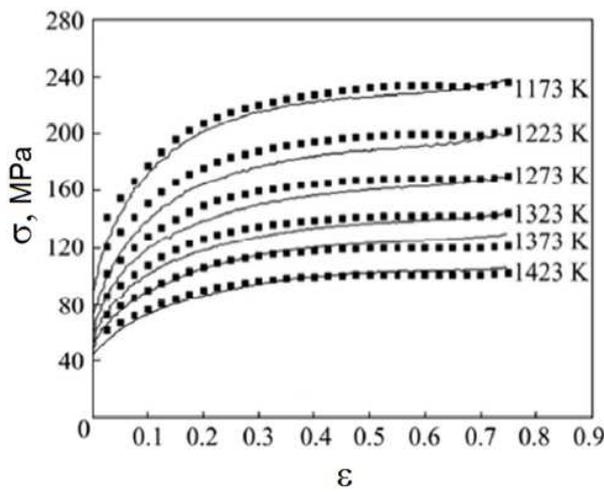
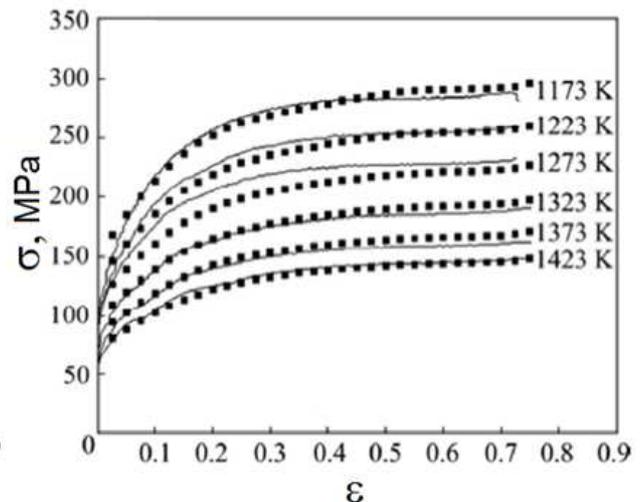
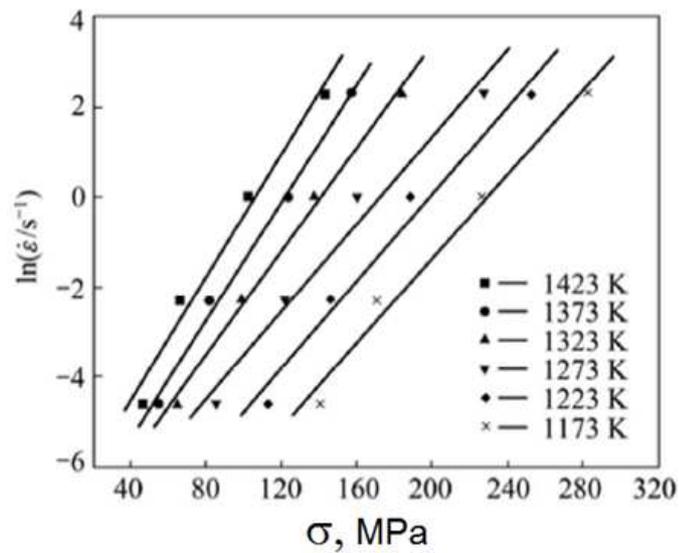
Материал 1

| C | W | Cr | V | Mn | Si | Ni | Mo | Cu | S | P |
|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 0,95 | 18,41 | 4,35 | 0,99 | 0,31 | 0,51 | 0,08 | 0,11 | 0,09 | 0,022 | 0,043 |



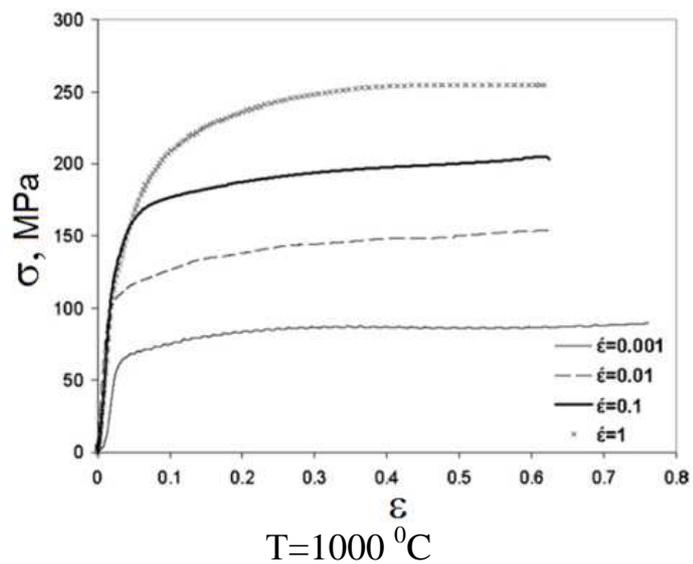
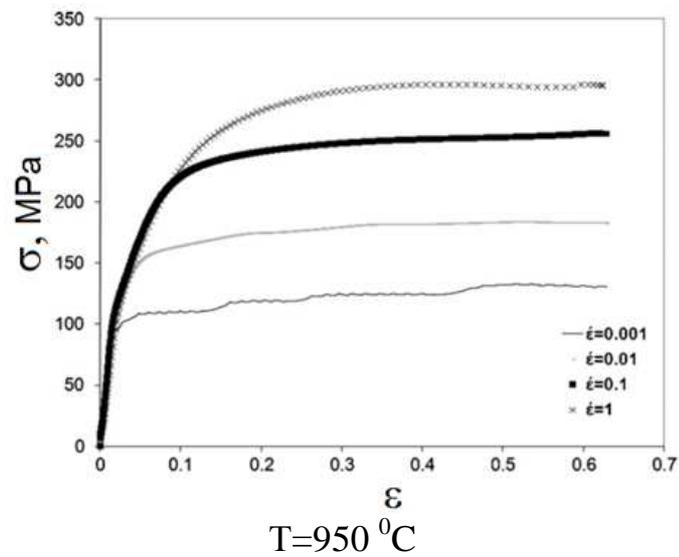
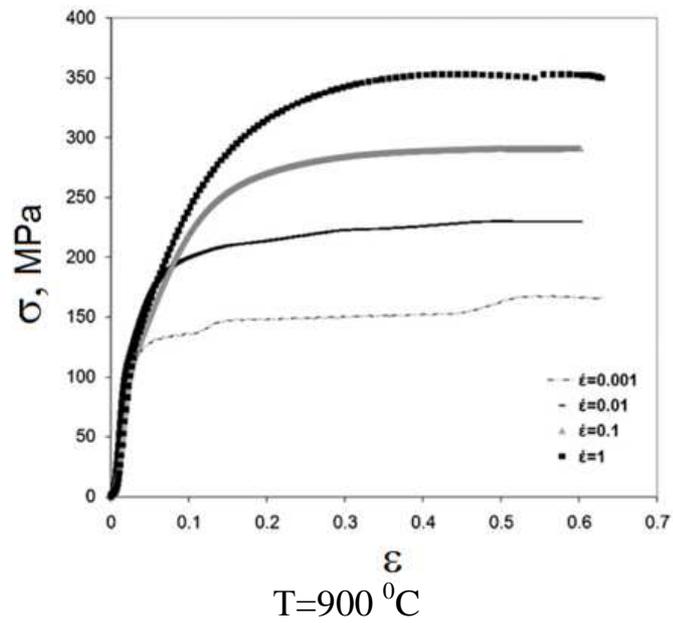
Материал 2

| C | Si | P | S | Cr |
|-----|----|------|------|----|
| 0,2 | 1 | 0.04 | 0.03 | 13 |


 $\dot{\epsilon}=0,01 \text{ c}^{-1}$

 $\dot{\epsilon}=0,1 \text{ c}^{-1}$

 $\dot{\epsilon}=1 \text{ c}^{-1}$

 $\dot{\epsilon}=10 \text{ c}^{-1}$


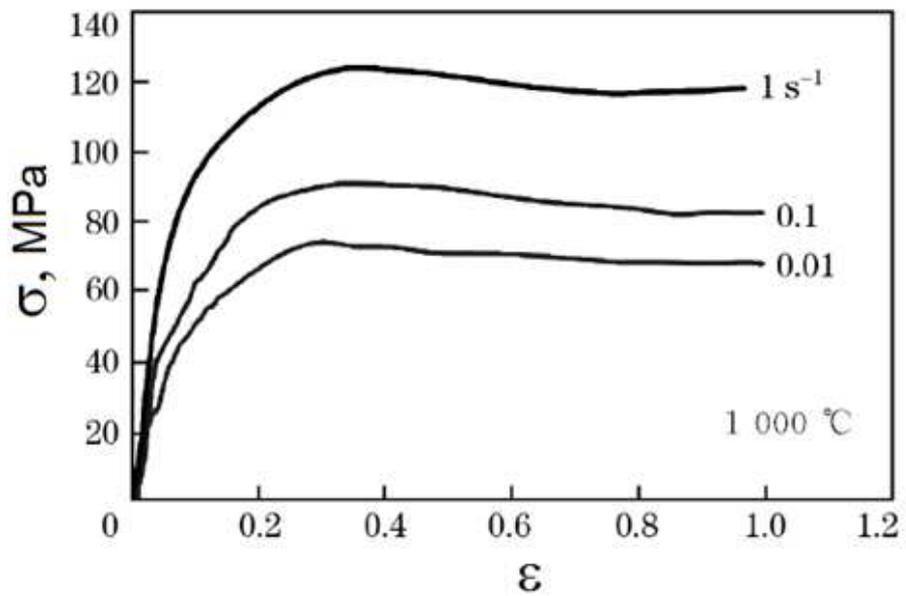
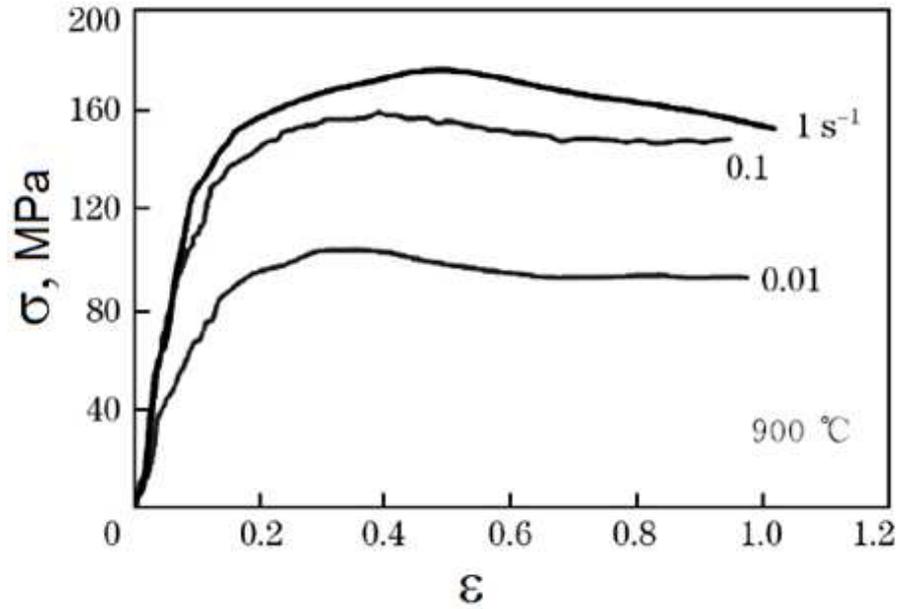
Материал 3

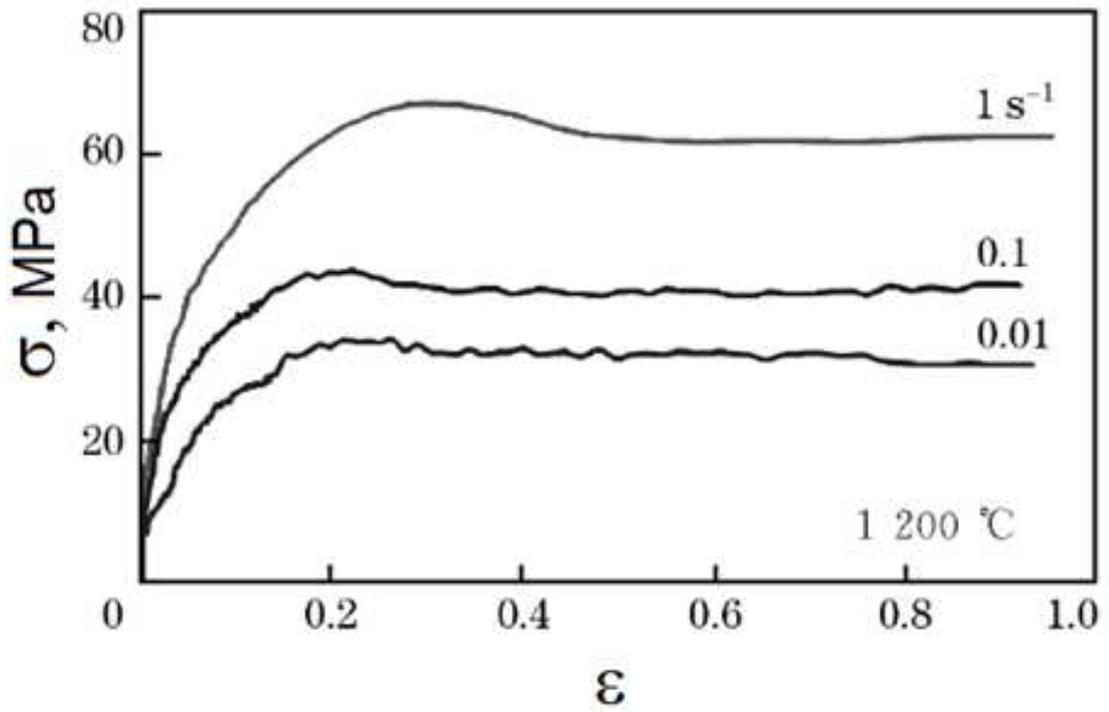
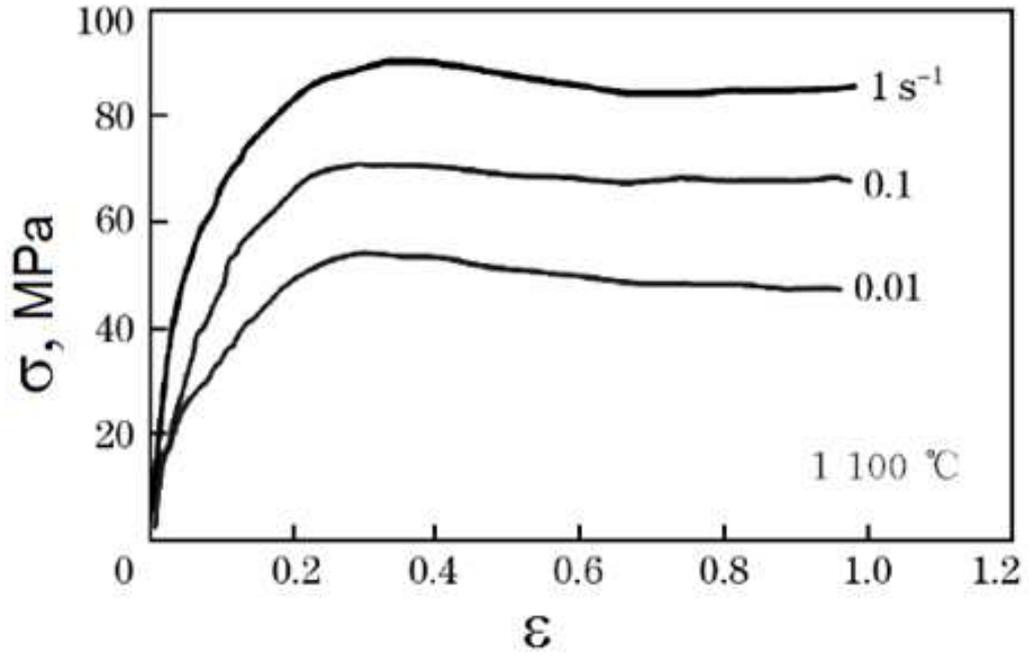
| C | Cr | Ni | Mo | Mn |
|------|----|----|-----|-----|
| 0,02 | 28 | 33 | 3.5 | 0.6 |



Материал 4

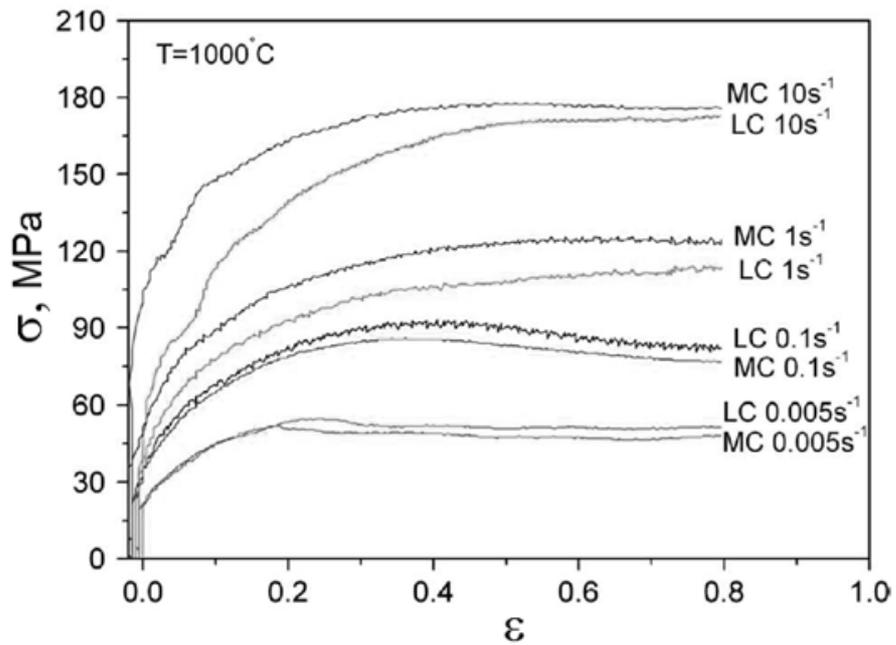
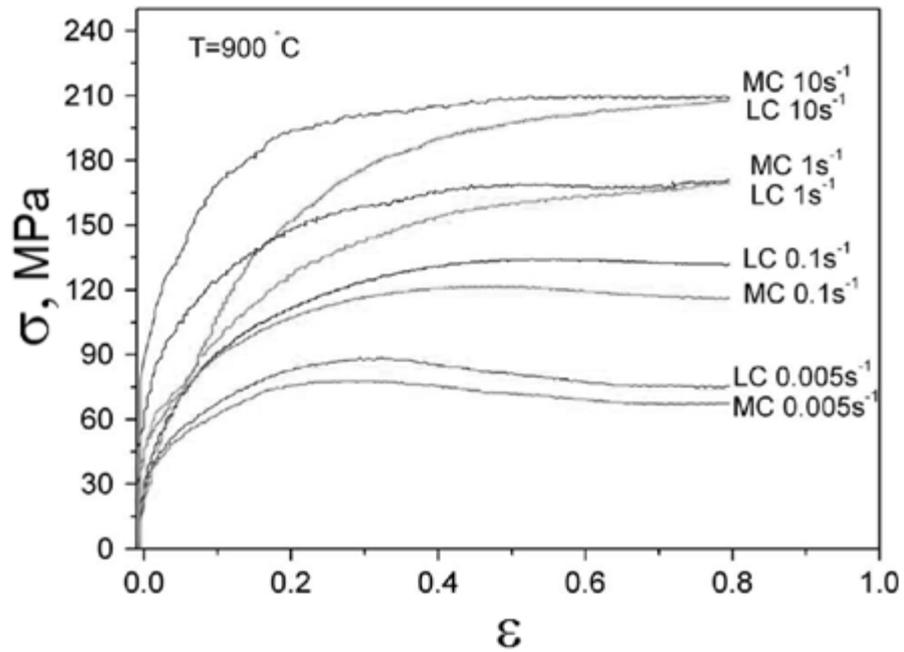
| C | Mn | Si | Cr | Mo | Ni | S | P |
|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 0,41 | 0.66 | 0.33 | 0.72 | 0.26 | 1.82 | <0.01 | <0.01 |





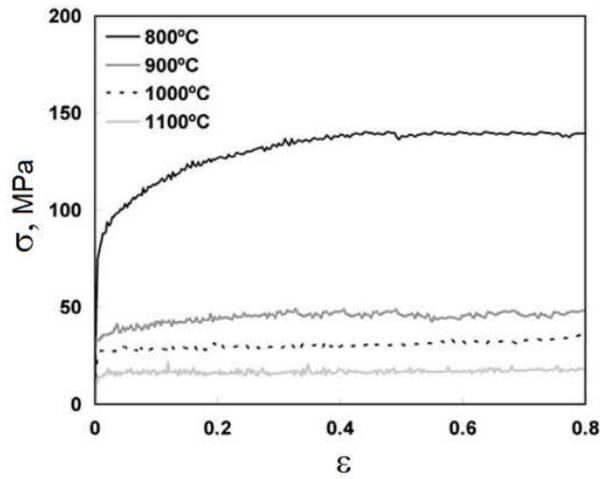
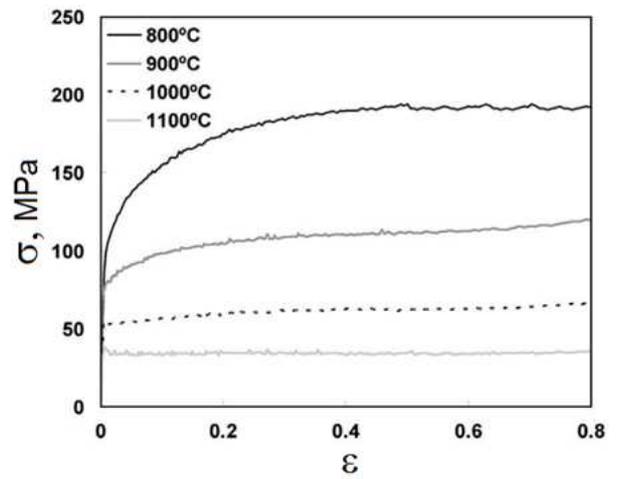
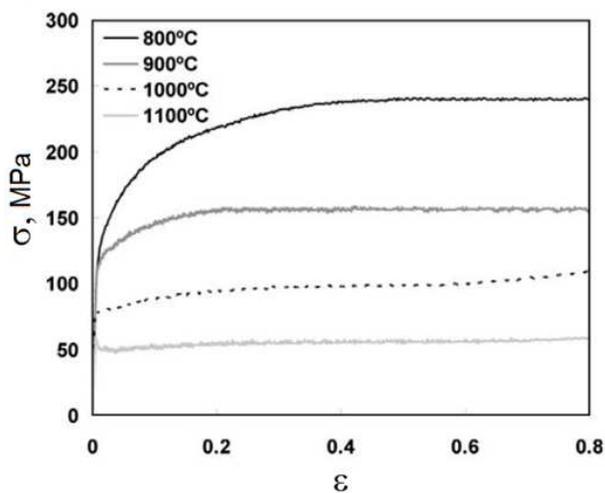
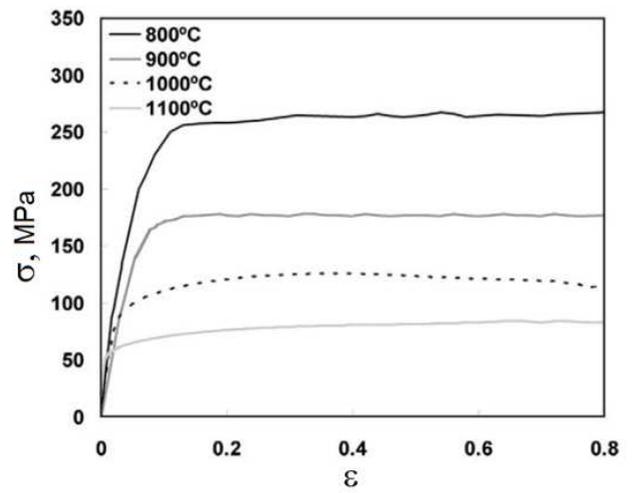
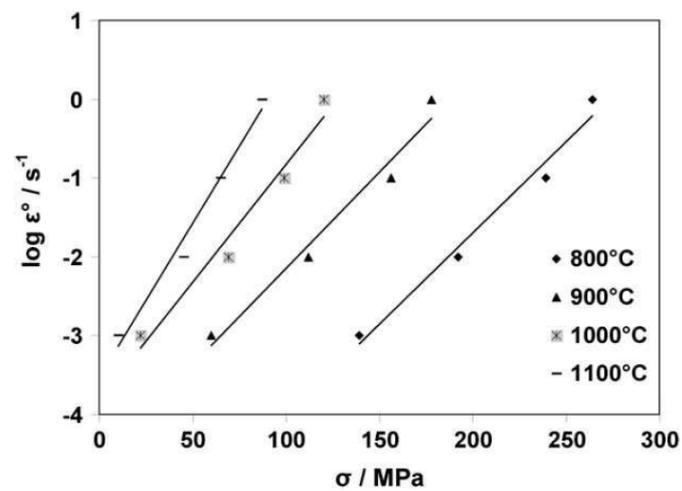
Материал 5

| Steel | C | Si | Mn | V | S | P | N | Al |
|-------|-------|------|------|-------|--------|--------|--------|-------|
| MC | 0.055 | 0.38 | 1.45 | 0.08 | 0.003 | 0.0057 | 0.0073 | 0.001 |
| LC | 0.37 | 0.38 | 1.46 | 0.089 | 0.0042 | 0.0058 | 0.0071 | 0.001 |



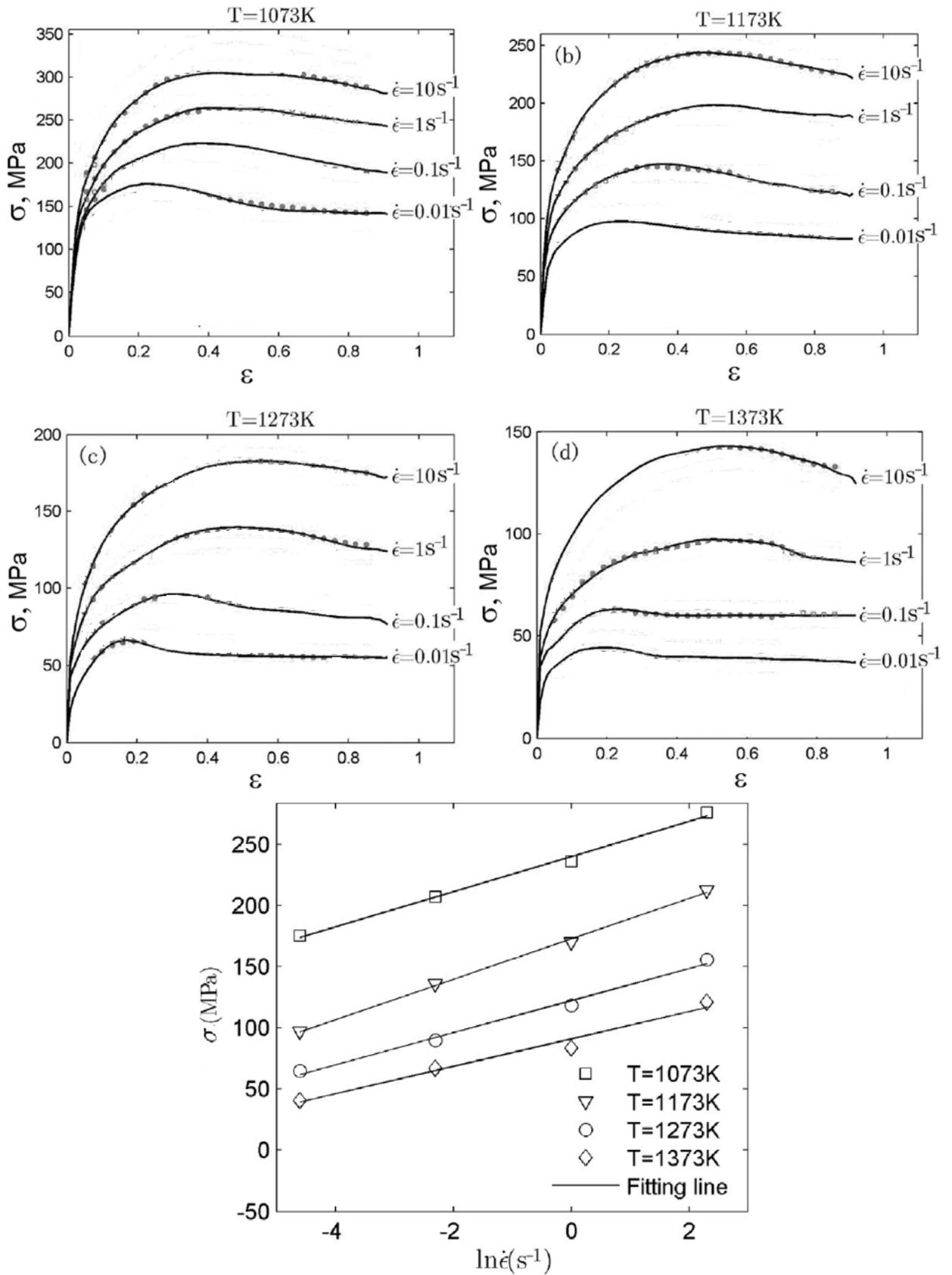
Материал 6

| C | Cr | Ni | Mo | Si | Mn | S | P | V | Cu | W |
|-------|------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|------|------|
| 0,025 | 22.8 | 5.2 | 2.6 | 0.3 | 1.5 | 0.001 | 0.025 | 0.088 | 0.23 | 0.03 |


 $\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ c}^{-1}$

 $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ c}^{-1}$

 $\dot{\epsilon} = 0.1 \text{ c}^{-1}$

 $\dot{\epsilon} = 1 \text{ c}^{-1}$


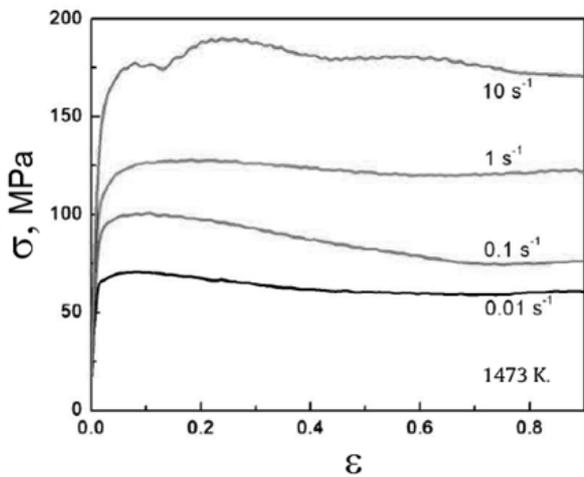
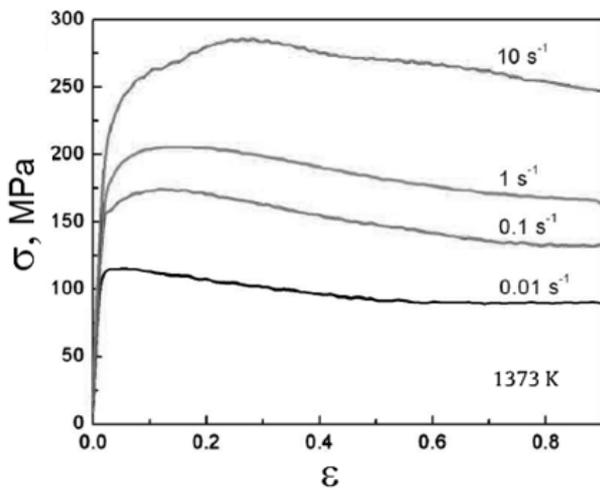
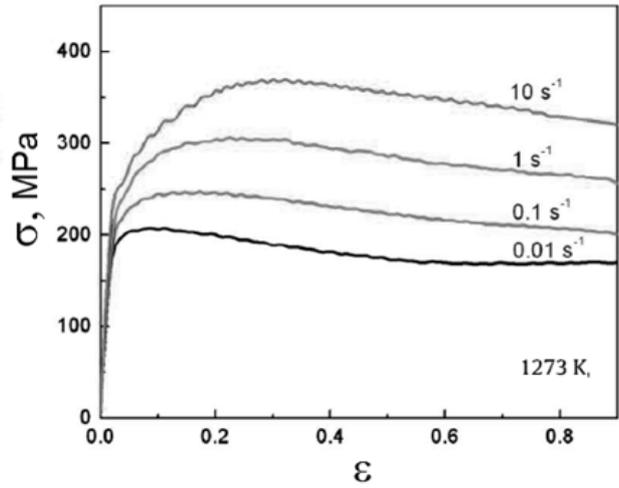
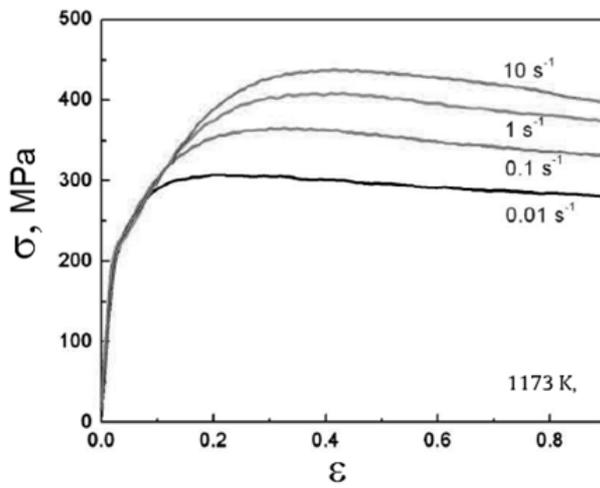
Материал 7

| C | Si | Mn | Cr | P | Mo | S |
|------|------|-----|----|-------|-----|-------|
| 0.35 | >0.4 | 0.7 | 1 | 0.025 | 0.3 | 0.035 |



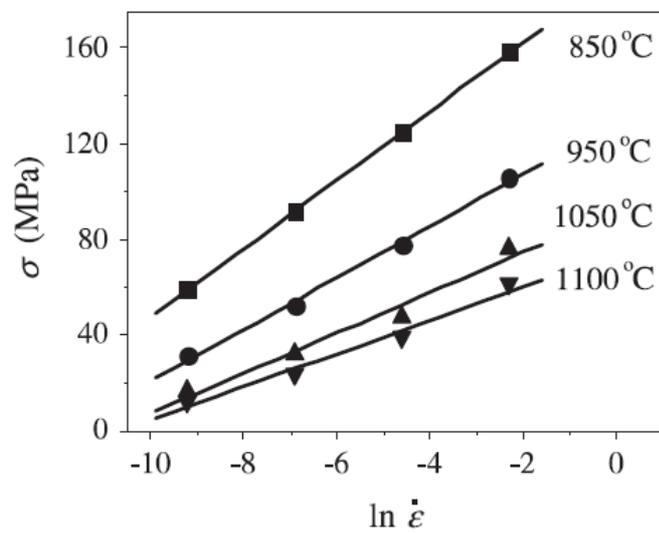
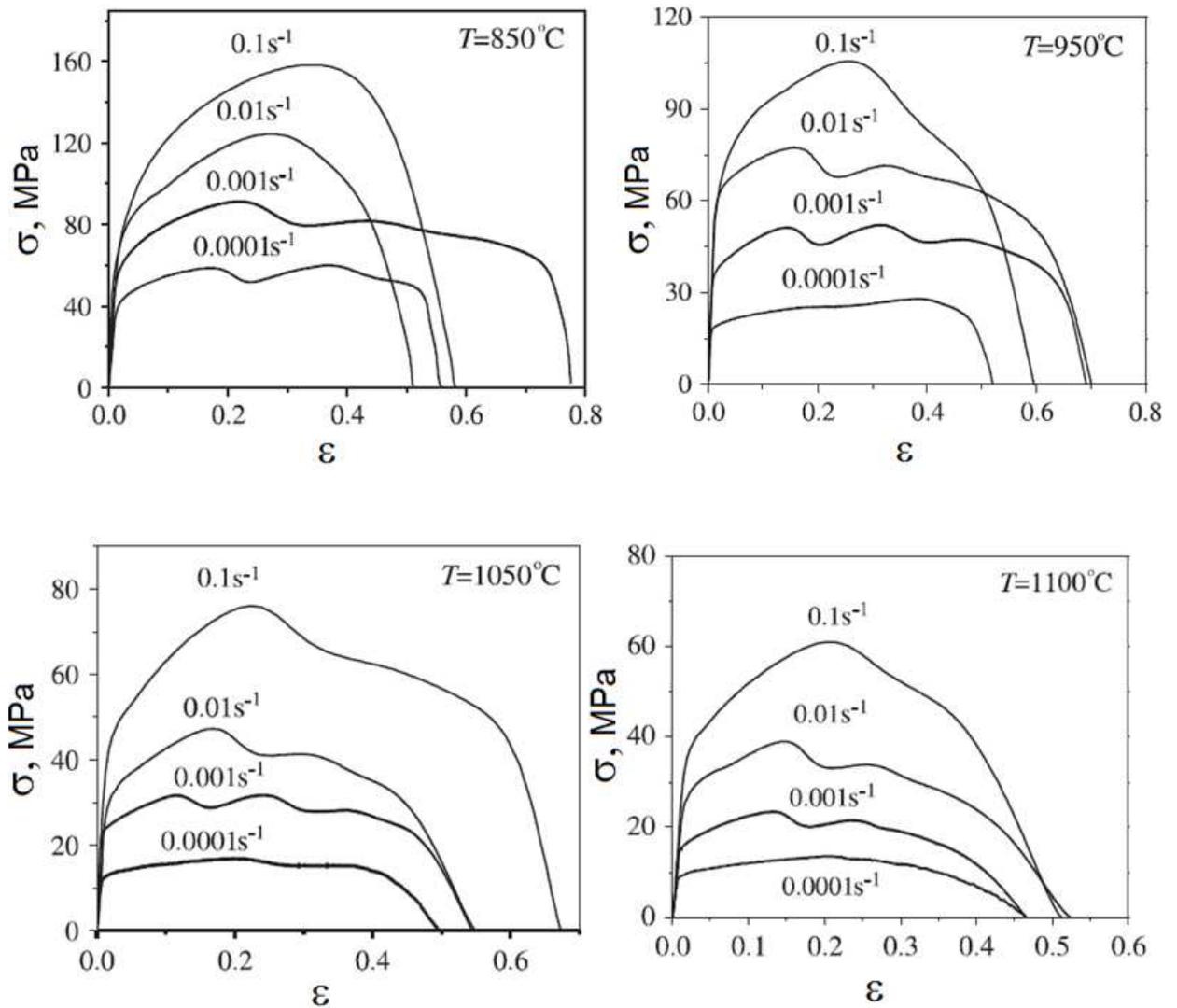
Материал 8

| C | Si | Mn | Cr | Ni | Mo | N | Cu |
|-------|-----|-----|----|----|-----|-----|------|
| 0.015 | 0.5 | 0.7 | 20 | 18 | 6.2 | 0.2 | 0.65 |



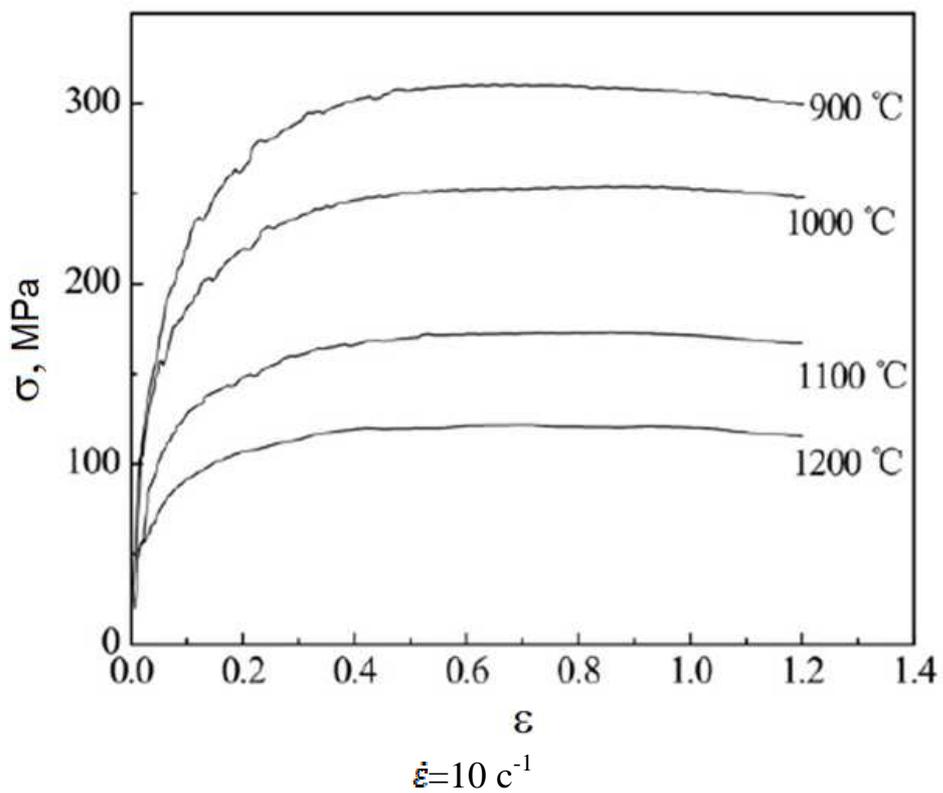
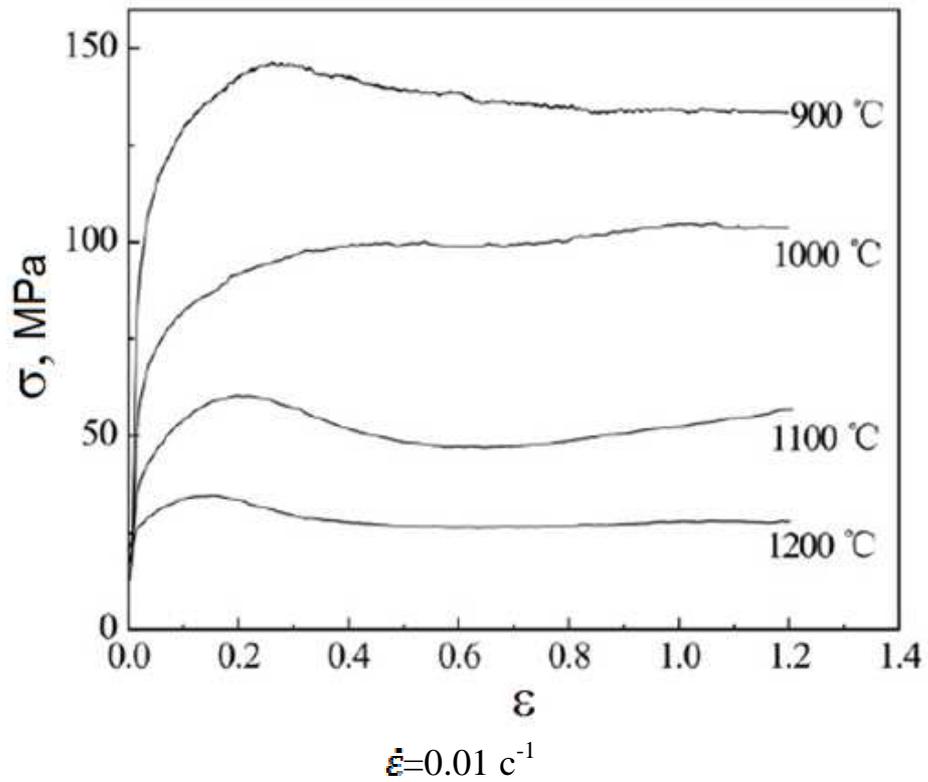
Материал 9

| C | Si | Mn | Cr | S | Mo | P | Cu |
|------|------|-----|-----|-------|------|-------|-------|
| 0.38 | 0.17 | 0.5 | 0.9 | <0.04 | 0.15 | <0.04 | <0.30 |



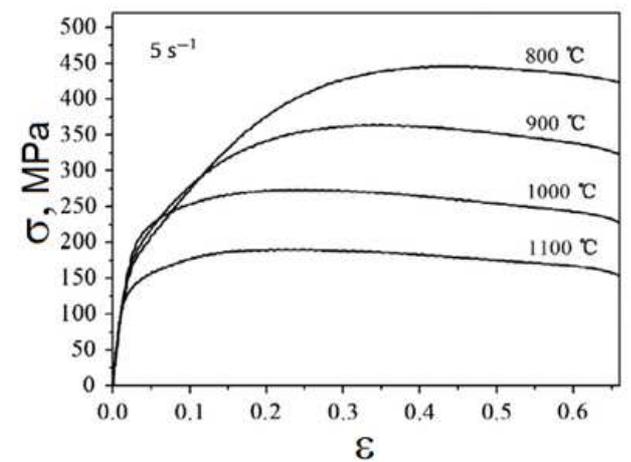
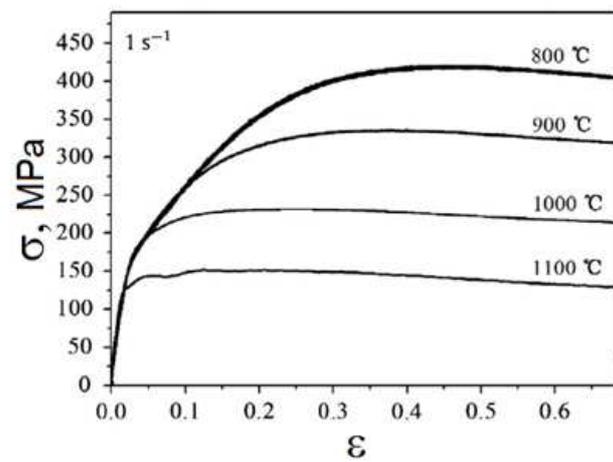
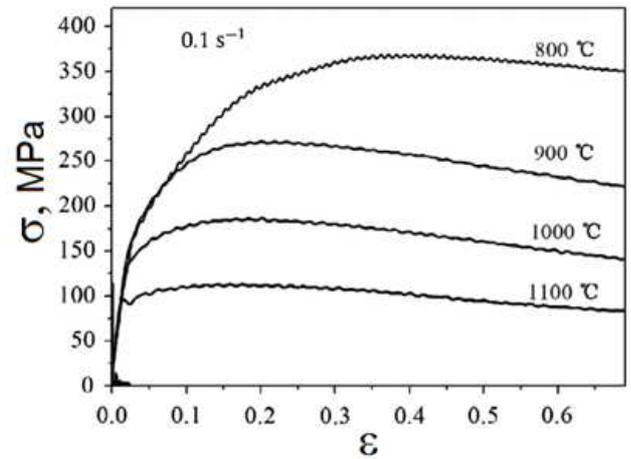
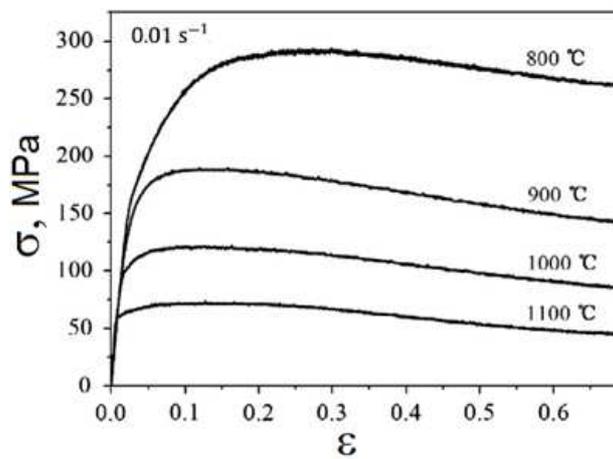
Материал 10

| C | Cr | Mo | Ni | W | V | Mn | Nb | N |
|------|-------|------|-----|------|------|------|------|--------|
| 0.13 | 10.45 | 1.18 | 0.7 | 0.76 | 0.23 | 0.17 | 0.02 | 0.0232 |



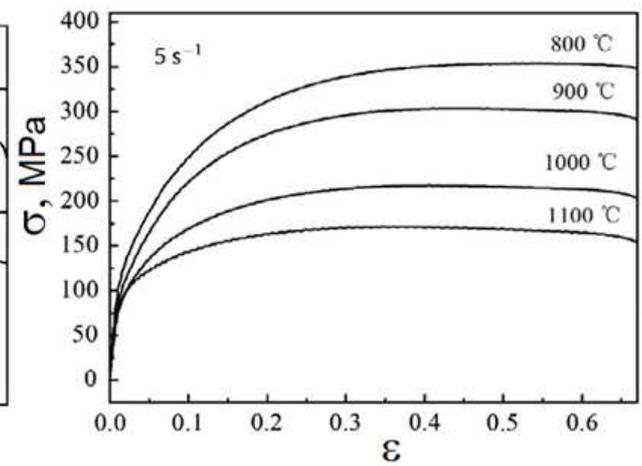
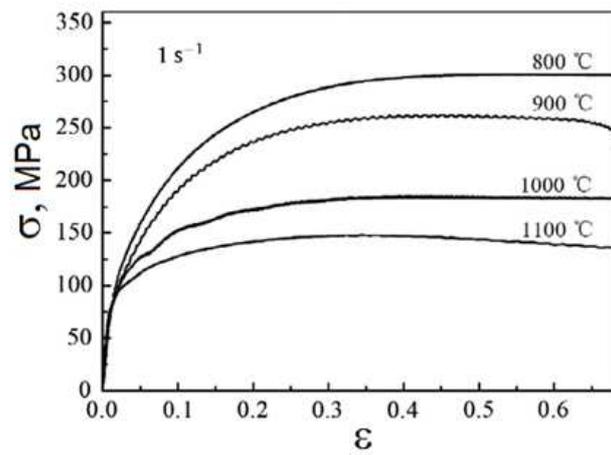
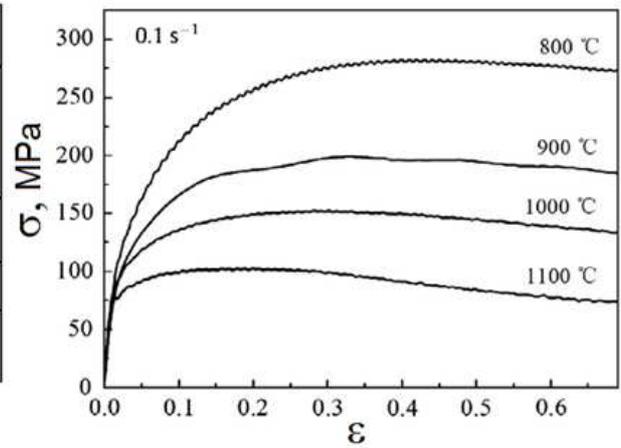
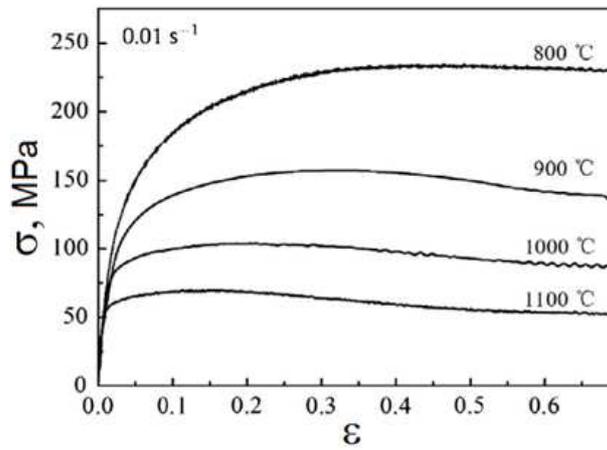
Материал 11

| C | Mn | Al | Si | P | S |
|-------|-------|------|------|-------|--------|
| 0.019 | 25.08 | 3.05 | 3.02 | 0.011 | 0.0087 |



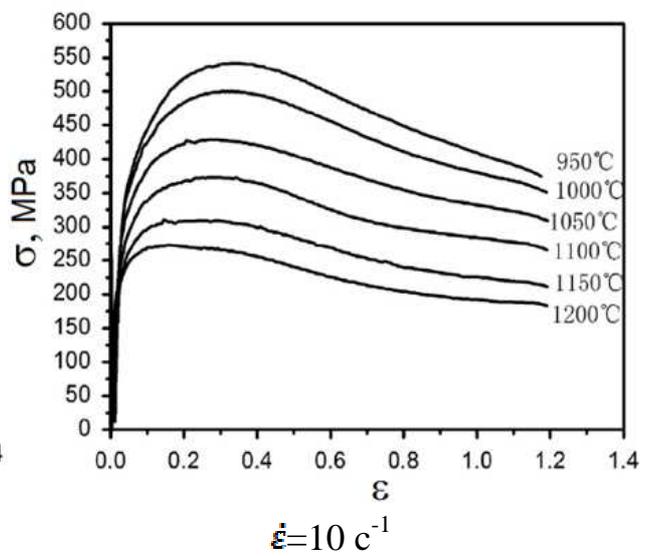
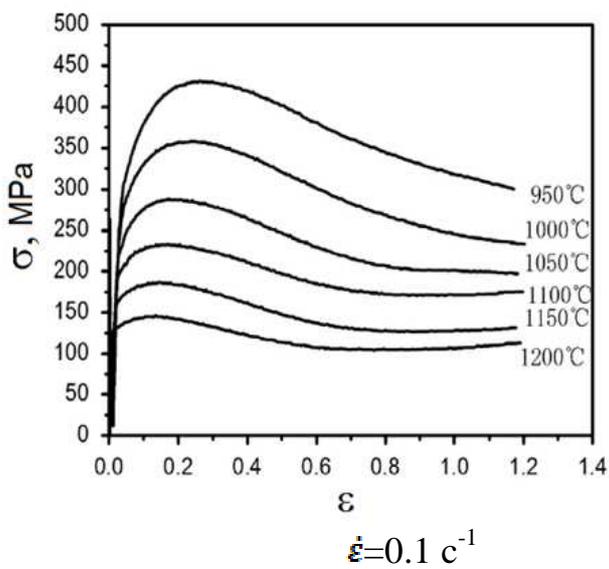
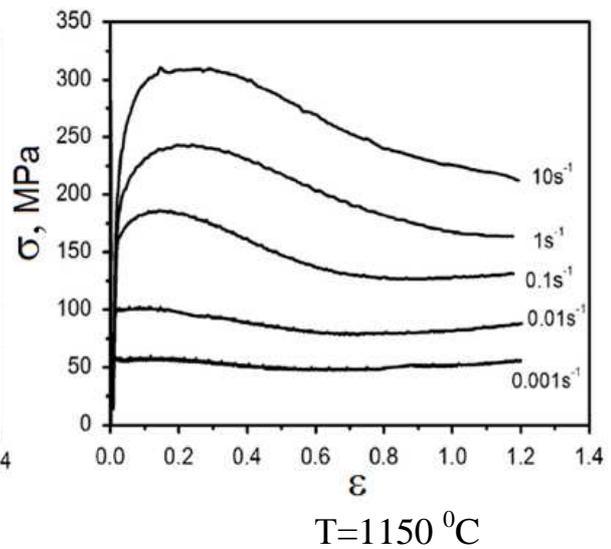
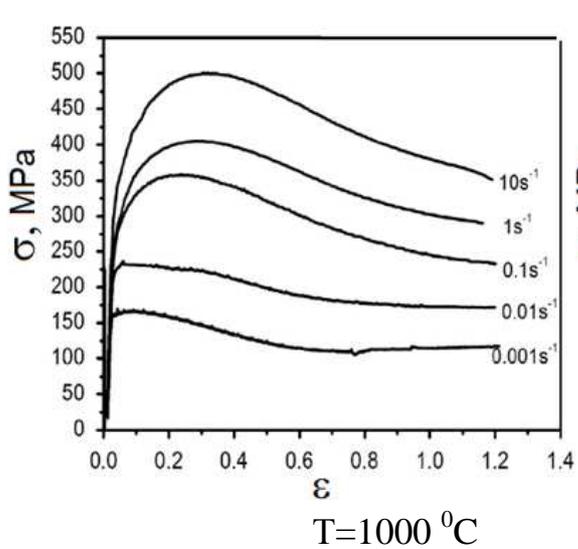
Материал 12

| C | Mn | Al | P | S |
|-------|-------|------|------|--------|
| 0.017 | 24.87 | 2.97 | 0.01 | 0.0086 |



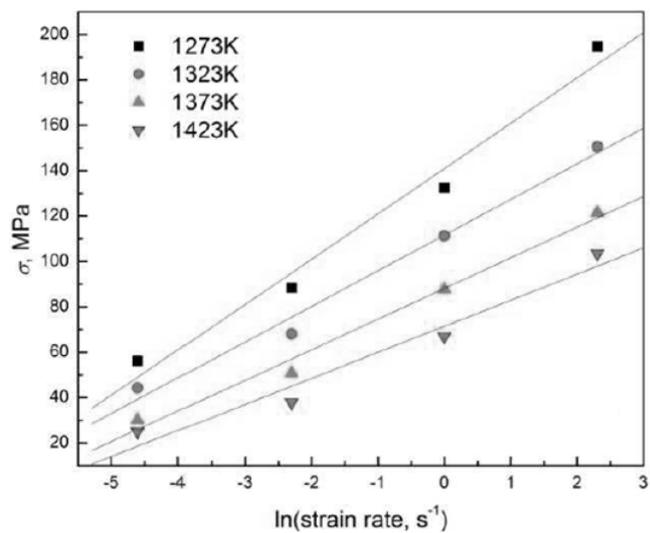
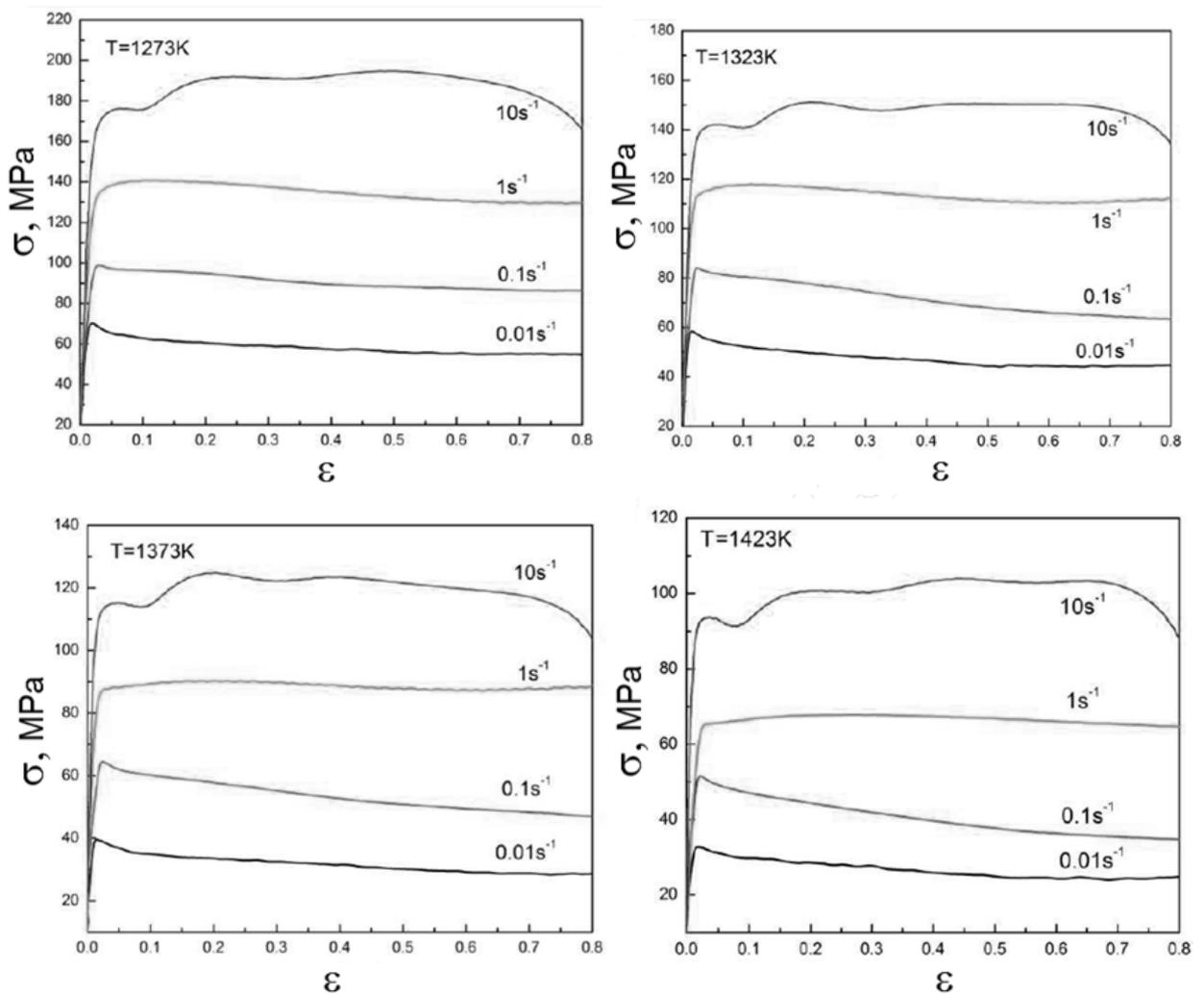
Материал 13

| C | Si | Mn | Cr | Ni | Cu | Mo | N | P | S |
|-------|------|------|-------|-------|-----|------|------|--------|------|
| 0.013 | 0.48 | 2.81 | 24.77 | 22.12 | 0.3 | 7.05 | 0.41 | 0.0063 | 0.01 |



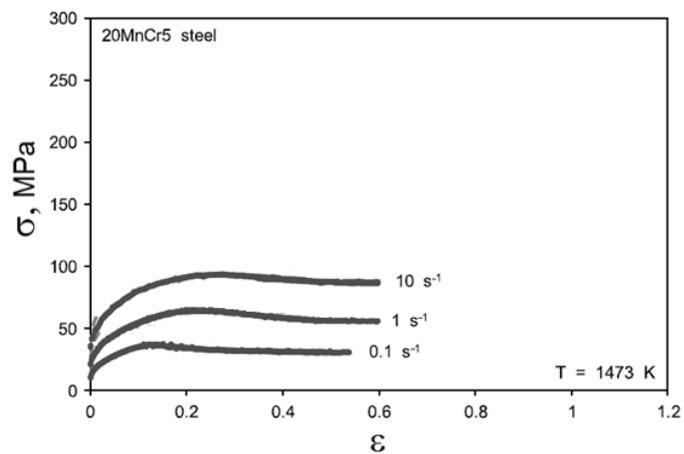
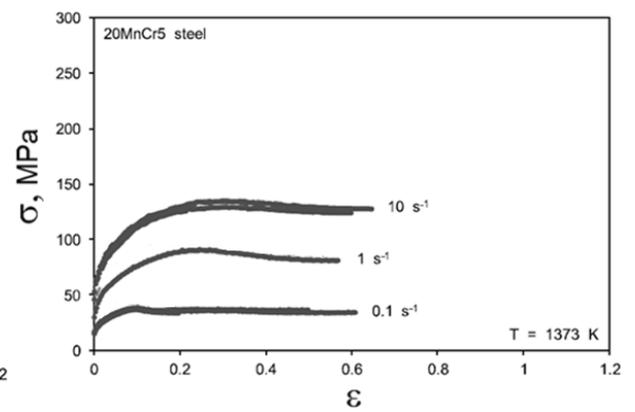
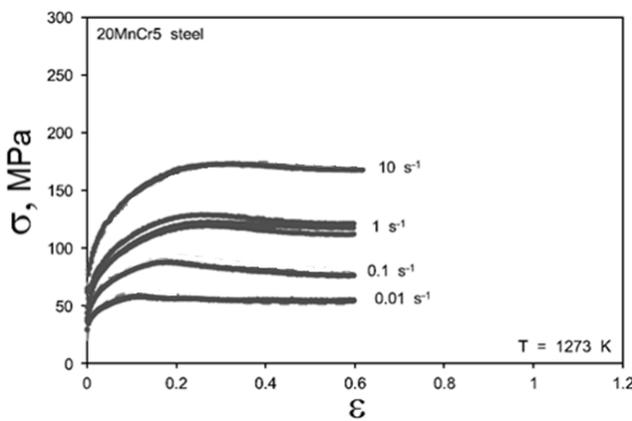
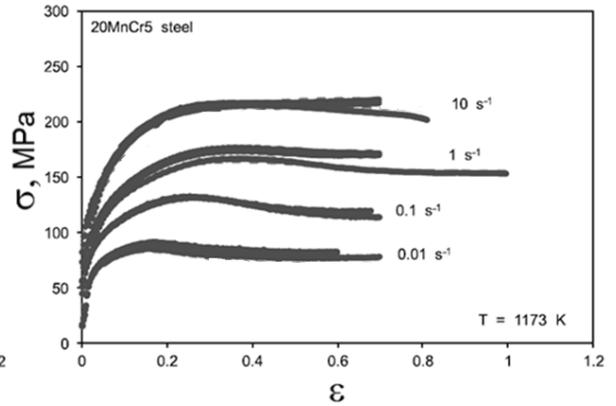
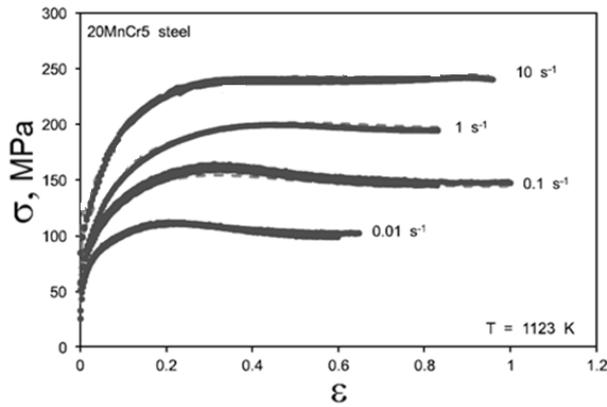
Материал 14

| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Cu | Mo | N |
|------|------|------|-------|--------|-------|------|------|------|-------|
| 0.02 | 0.58 | 4.65 | 0.027 | 0.0043 | 21.03 | 1.26 | 0.02 | 0.03 | 0.236 |



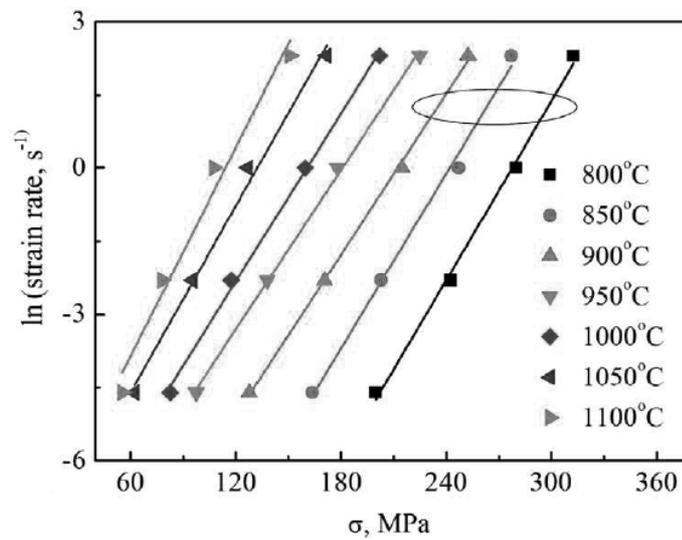
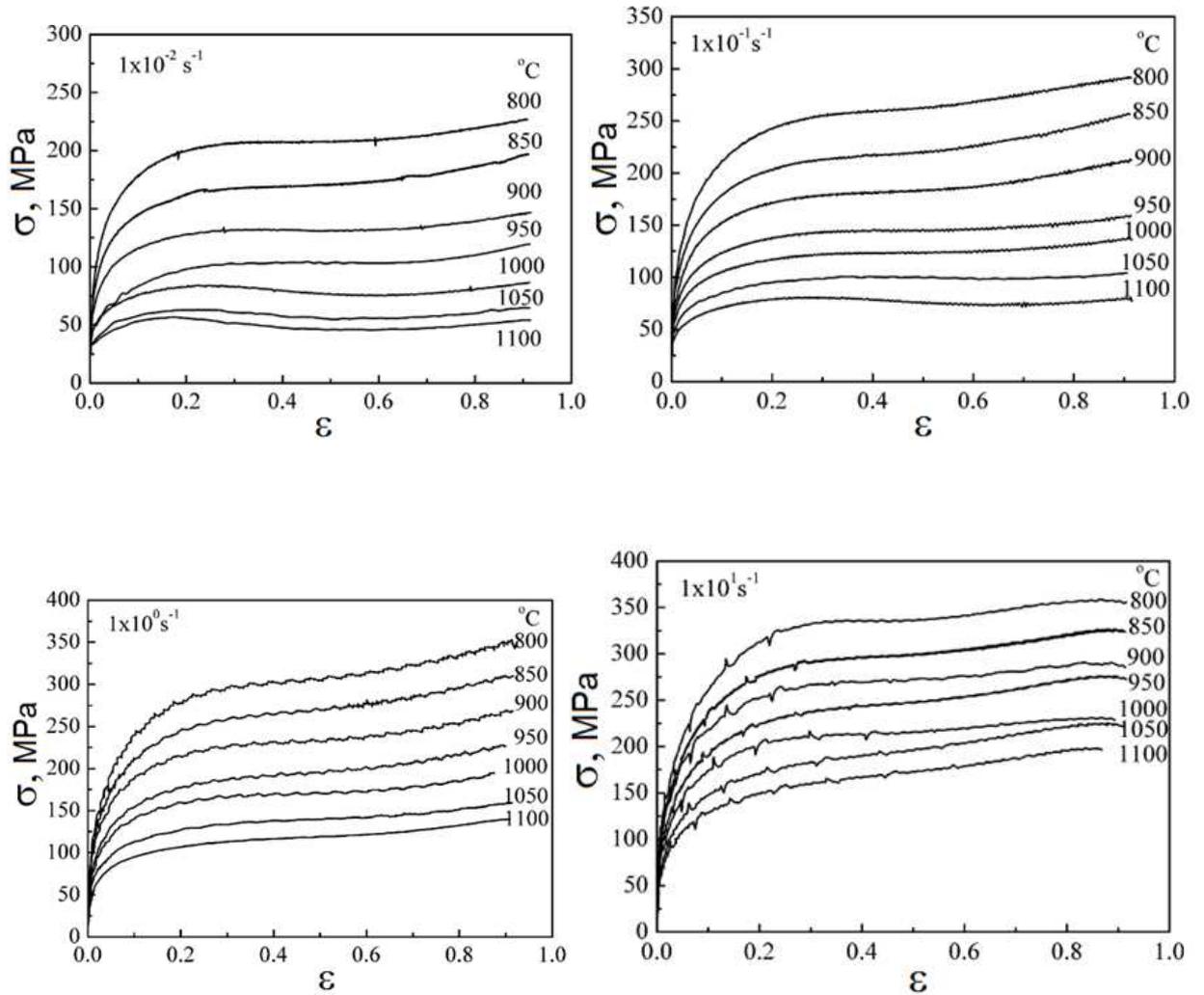
Материал 15

| C | Mn | Cr | Si | S | P |
|------|------|-----|-----|-------|-------|
| 0.19 | 1.25 | 1.2 | 0.4 | 0.035 | 0.035 |



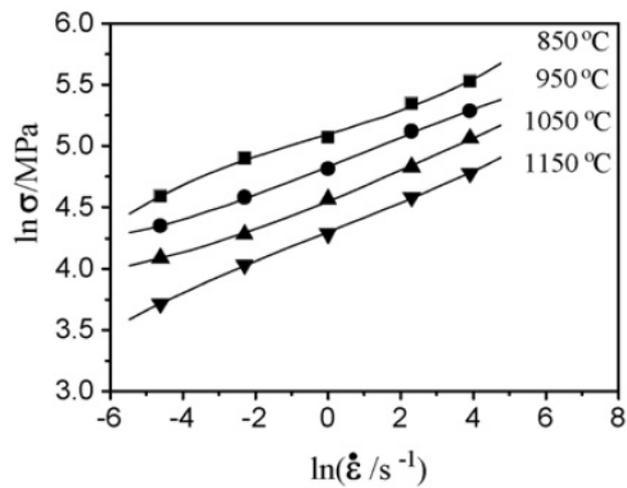
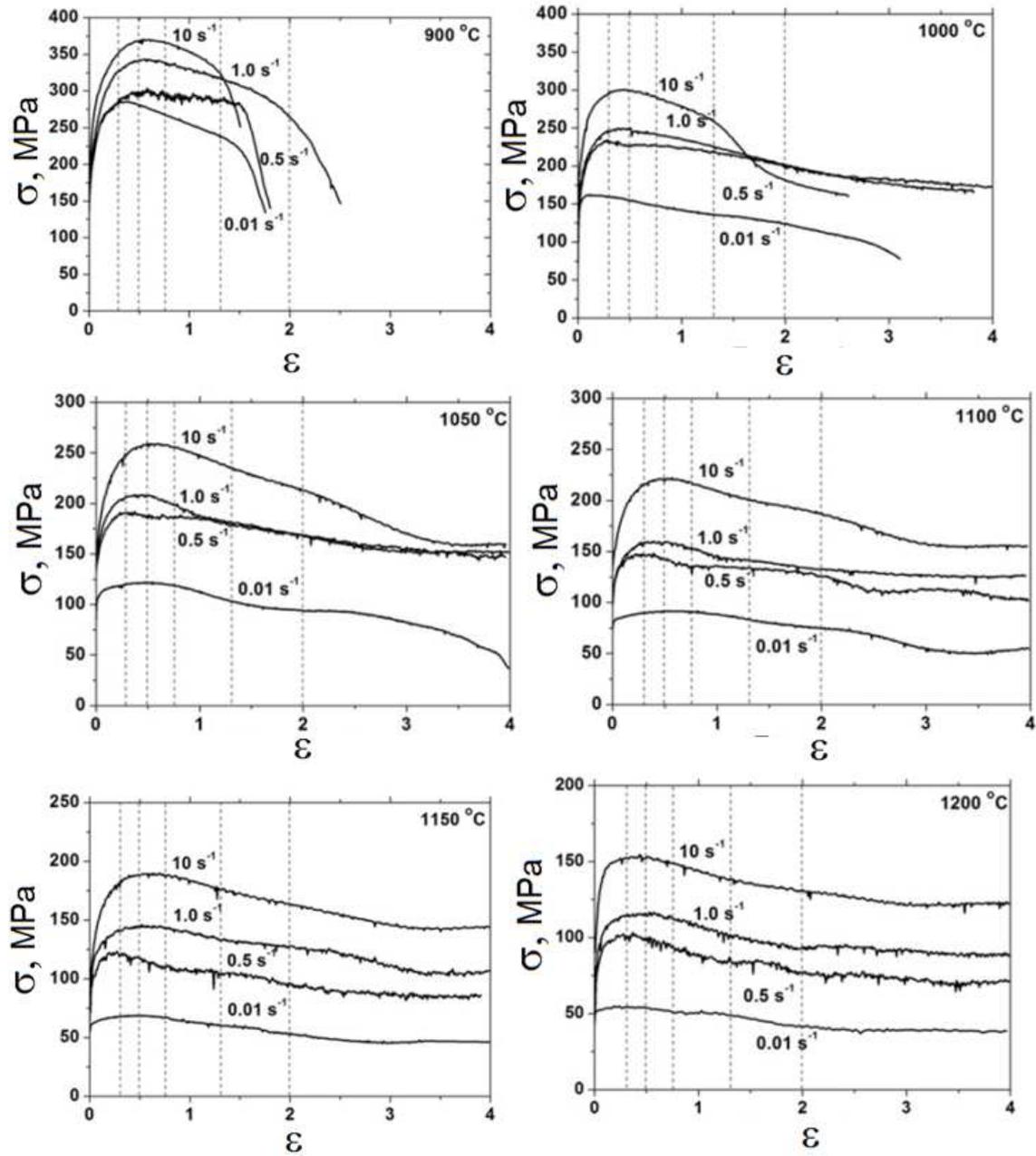
Материал 16

| C | Mn | Si | Cr | Ni | Al | Mo | S | P |
|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 0.29 | 1.63 | 1.25 | 1.23 | 0.44 | 0.55 | 0.39 | 0.001 | 0.004 |



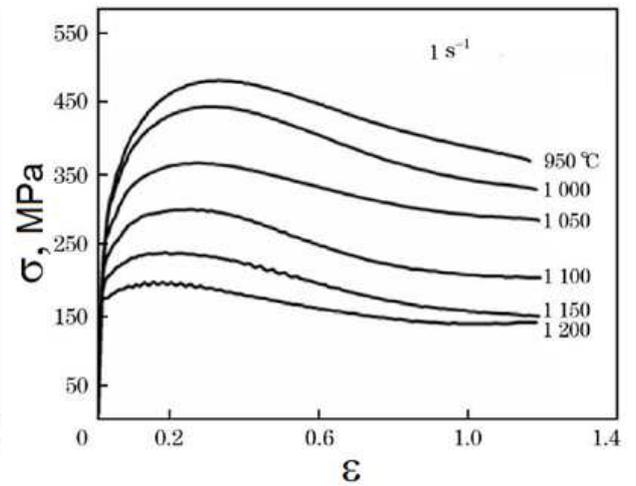
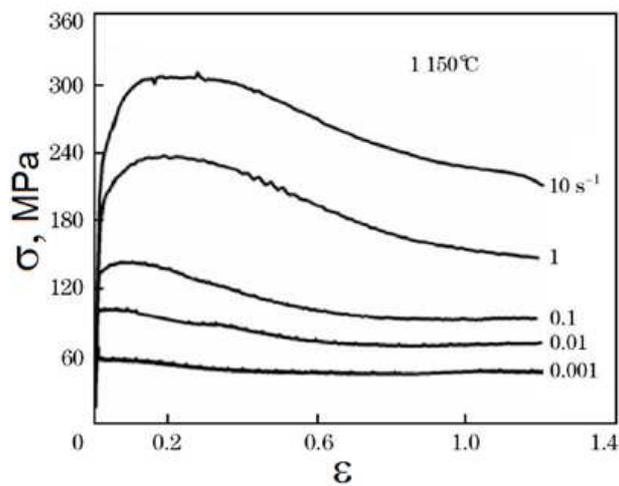
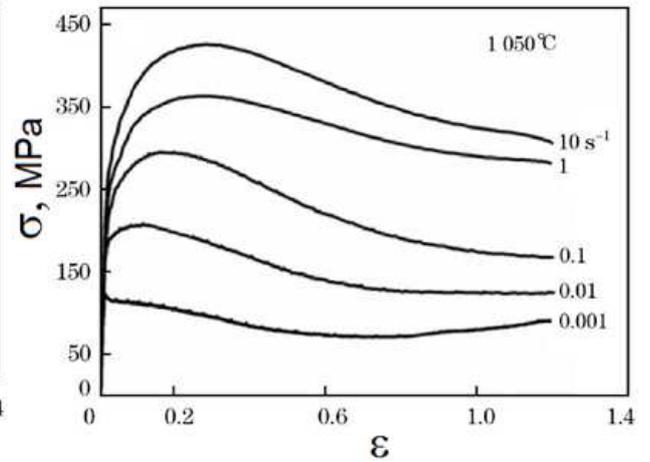
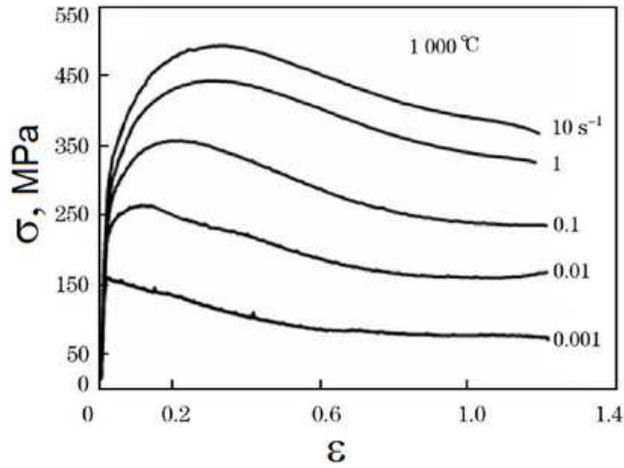
Материал 17

| C | Si | Mn | Ni | Cr | Mo | S | P | N | Nb |
|-------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| 0.032 | 0.37 | 4.04 | 10.6 | 20.3 | 2.47 | 0.001 | 0.022 | 0.36 | 0.29 |



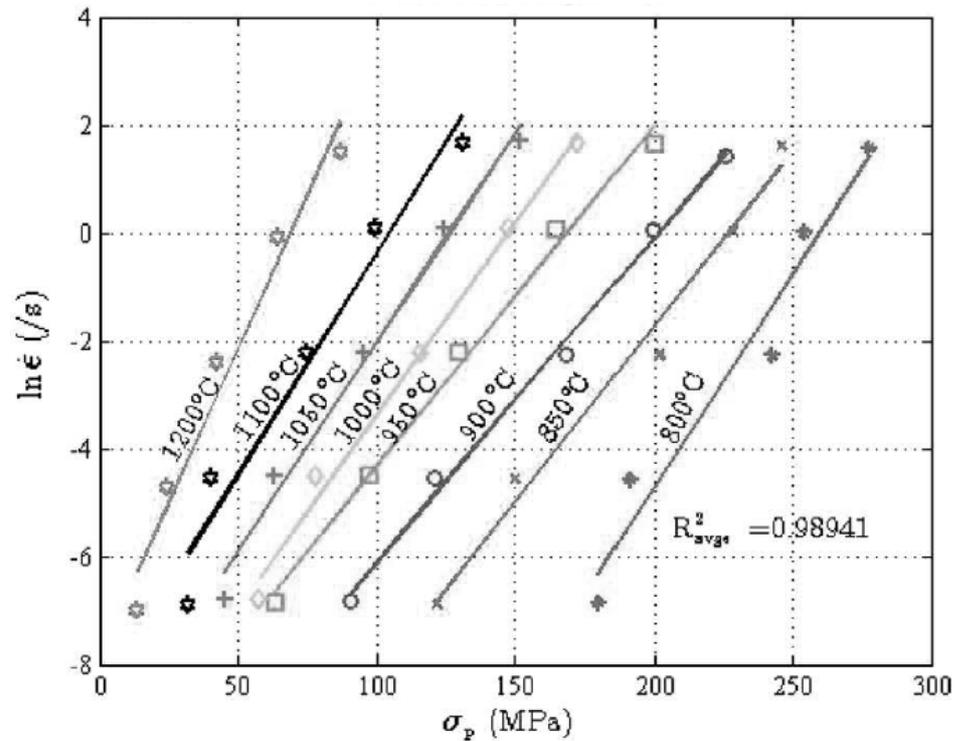
Материал 18

| C | Si | Mn | Cr | Ni | Cu | Mo | N |
|-------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| 0.017 | 0.36 | 2.88 | 24.51 | 22.35 | 0.36 | 7.24 | 0.45 |



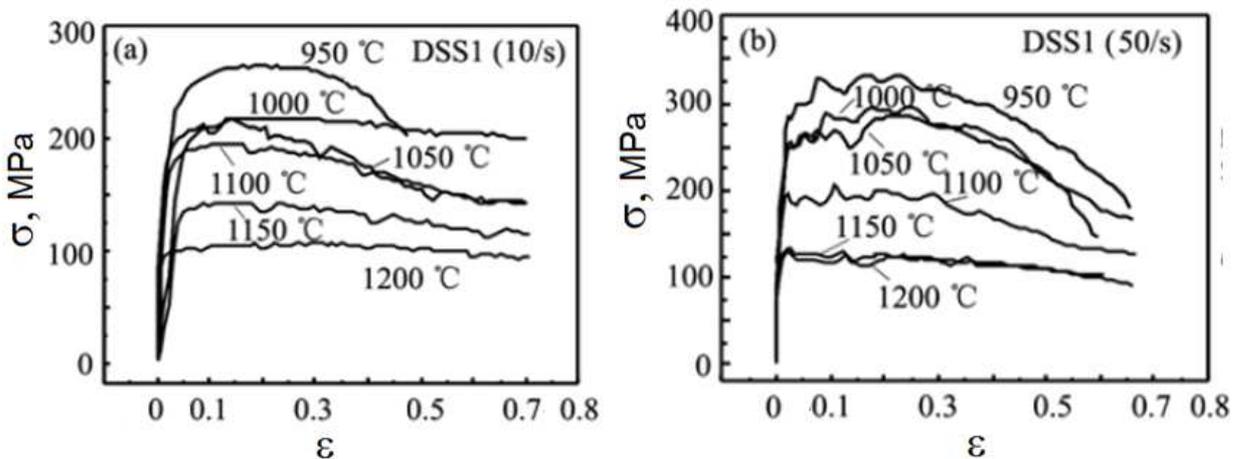
Материал 19

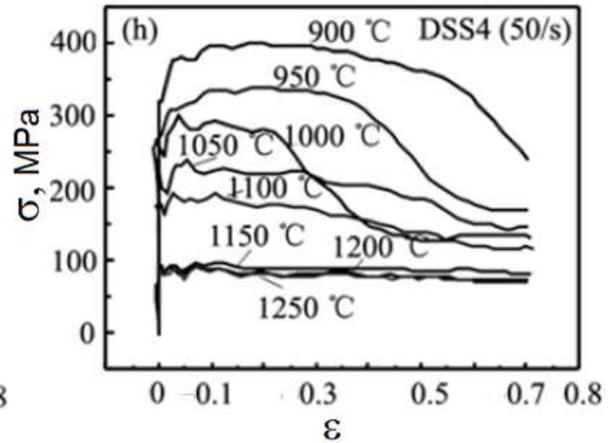
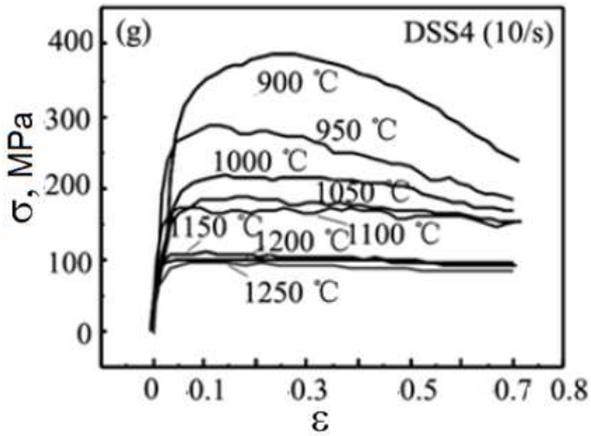
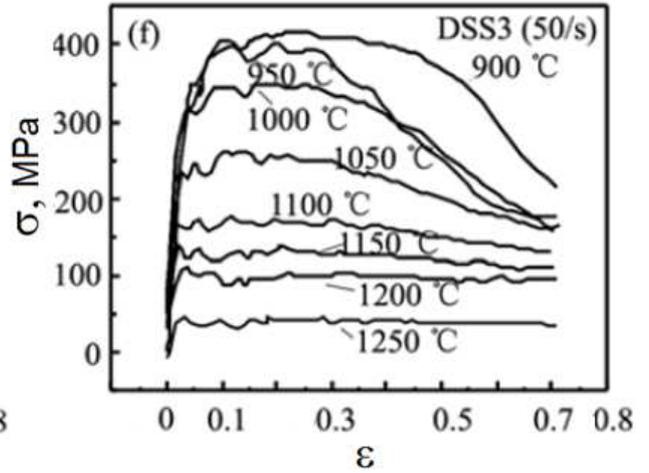
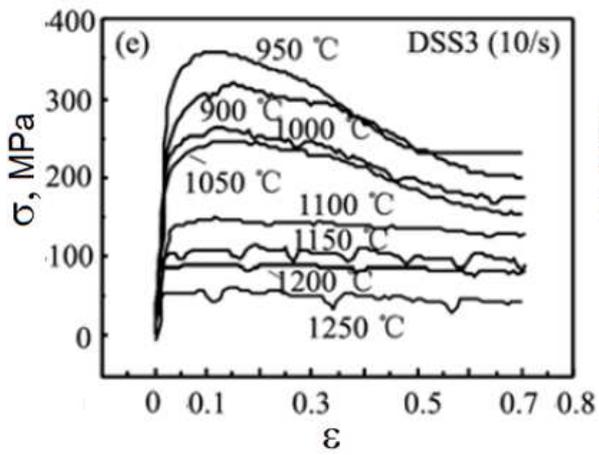
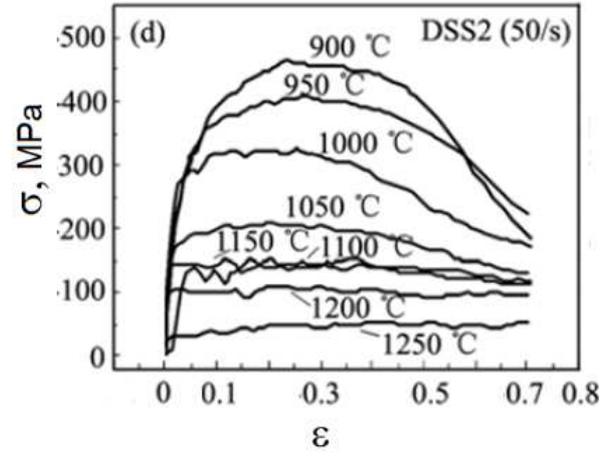
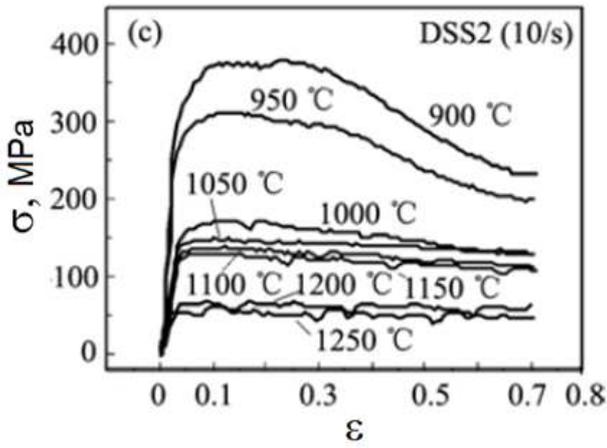
| C | Cr | Si | Mn | N | Ti | Al | B | Co | Ni |
|-------|-------|------|------|------|-------|-------|--------|------|------|
| 0.027 | 17.13 | 0.59 | 1.08 | 0.01 | 0.346 | 0.012 | 0.0003 | 0.09 | 9.11 |



Материал 20

| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | N | Ce |
|------|-------|------|------|-------|--------|-------|------|------|------|-------|
| DSS1 | 0.007 | 0.66 | 1.13 | 0.023 | 0.0053 | 24.84 | 6.99 | 3.65 | 0.3 | - |
| DSS2 | 0.008 | 0.61 | 1.05 | 0.007 | 0.0055 | 24.84 | 7.01 | 3.88 | 0.25 | 0.03 |
| DSS3 | 0.008 | 0.7 | 1.05 | 0.009 | 0.0049 | 24.87 | 6.96 | 4.05 | 0.3 | 0.047 |
| DSS4 | 0.009 | 0.67 | 1.05 | 0.006 | 0.0044 | 25 | 7.03 | 4.15 | 0.3 | 0.062 |



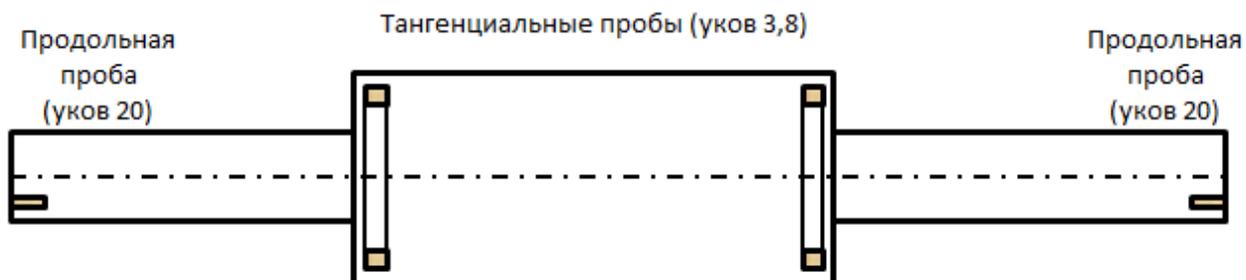


ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Результаты испытаний технологических проб поковки вал

Марка стали 45Х, плавка №613140316

Термообработка: закалка + отпуск



Химический состав стали

| С | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Al | Cu |
|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|
| 0,44 | 0,31 | 0,58 | 0,015 | 0,004 | 0,92 | 0,17 | 0,04 | 0,008 | 0,15 |

| Дата передачи | № поковки | Тип пробы | № пробы-диаграммы | KCU, Дж/см ² | KCV, Дж/см ² | σ _т , Н/мм ² | σ _в , Н/мм ² |
|---------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 07.05.14 | 8323-1 | тангенциальные | 15-711 | 172 | 132 | 522 | 713 |
| | | | | 178 | 126 | | |
| | | | 15-710 | 221 | 186 | 552 | 725 |
| | | 218 | | 183 | | | |
| | | продольные | 15-591 | 101 | 71 | 475 | 695 |
| | | | | 110 | 74 | | |
| | 15-592 | | 144 | 74 | 470 | 698 | |
| | | 139 | 83 | | | | |
| | 8323-2 | тангенциальные | 15-683 | 162 | 124 | 553 | 729 |
| | | | | 166 | 120 | | |
| | | | 15-682 | 170 | 132 | 547 | 719 |
| | | 173 | | 126 | | | |
| | | продольные | 15-625 | 98 | 76 | 488 | 708 |
| | | | | 97 | 74 | | |
| | 15-626 | | 85 | 61 | 520 | 723 | |
| | | 90 | 63 | | | | |
| | 8324-2 | тангенциальные | 15-707 | 169 | 135 | 546 | 715 |
| | | | | 174 | 131 | | |
| | | | 15-706 | 166 | 97 | 537 | 724 |
| | | 161 | | 99 | | | |
| | | продольные | 15-597 | 113 | 74 | 439 | 671 |
| 110 | | | | 71 | | | |
| 15-598 | 115 | | 88 | 489 | 701 | | |
| | 113 | 86 | | | | | |
| 8322--1 | тангенциальные | 15-696 | 131 | 96 | 547 | 708 | |

| | | | | | | | |
|------------|----------|----------------|----------|-----|------|-----|-----|
| | | | | 153 | 92 | | |
| | | | 15-697 | 164 | 113 | 545 | 713 |
| | | | | 169 | 108 | | |
| | | продольные | 15-587 | 137 | 45 | 480 | 692 |
| | | | | 129 | 42 | | |
| | | | 15-588 | 116 | 80 | 473 | 692 |
| | | 110 | | 76 | | | |
| 16.05.14 | 8321-2 | тангенциальные | 15-684 | 173 | 113 | 561 | 741 |
| | | | | 178 | 110 | | |
| | | | 15-685 | 153 | 101 | 569 | 747 |
| | | 147 | | 98 | | | |
| | | продольные | 15-623 | 112 | 63 | 545 | 832 |
| | | | | 123 | 74 | | |
| | 15-624 | | 179 | 85 | 496 | 702 | |
| | | | 163 | 93 | | | |
| | 8325-1 | тангенциальные | 15-702 | 142 | 101 | 541 | 722 |
| | | | | 135 | 98 | | |
| | | | 15-703 | 147 | 104 | 526 | 710 |
| | | 141 | | 102 | | | |
| продольные | | 15-595 | 110 | 74 | 456 | 688 | |
| | | | 106 | 71 | | | |
| | 15-596 | 103 | 71 | 479 | 712 | | |
| 107 | | 65 | | | | | |
| 30.05.14 | 8325-2 | тангенциальные | 15-704 | 156 | 113 | 518 | 697 |
| | | | | 164 | 109 | | |
| | | | 15-705 | 157 | 113 | 517 | 696 |
| | | 167 | | 108 | | | |
| | | продольные | 15-593-1 | 124 | 20 ? | 454 | 675 |
| | | | | 120 | 25 ? | | |
| | 15-594-1 | | 180 | 96 | 461 | 670 | |
| | | 172 | 86 | | | | |
| | 8321-1 | тангенциальные | 15-686 | 188 | 164 | 525 | 706 |
| | | | | 197 | 167 | | |
| | | | 15-687 | 168 | 113 | 531 | 693 |
| | | 174 | | 128 | | | |
| продольные | | 15-621-1 | 168 | 47 | 487 | 689 | |
| | | | 162 | 43 | | | |
| | 15-622-1 | 159 | 69 | 472 | 675 | | |
| | | 153 | 64 | | | | |

| № образца | Начальные размеры образца, мм | | | | Усиление, Н | | |
|-----------|---|-----------------------|--|----------------------|----------------|------------------|----------------|
| | толщ. a ₀ или диаметр d ₀ | ширина b ₀ | площадь сечения F ₀ , мм ² | длина l ₀ | P ₁ | P _{0.2} | P _c |
| 2 no | 79 | 79 | 79 | 79 | | | |
| 15-587 | 10,0 | 796,50 | 796,50 | 38200 | | | 55100 |
| " | 10,0 | 79 | 79 | 37200 | | | 53950 |
| 15-588 | 10,0 | 791,50 | 791,50 | 37400 | | | 54700 |
| " | 10,0 | 788 | 788 | 36900 | | | 54000 |

| № машины | Напряжение, Н/мм ² | | | Линия носка папуля I _{кн} | Удлинение δ ₀ , % | Диаметр носка папуля d _{кн} | Относительное сужение φ ₀ , % | Температура, °C | № образца | Ударный нагиб | | | | Твердость | Полный контролер |
|----------|-------------------------------|------------------|----------------|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|--|-----------------|-----------|---------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------|-----------|------------------|
| | σ | σ _{0.2} | σ _b | | | | | | | тип образца | температура, °C | работа уара, Дж | ударная вязкость, Дж/см ² | | |
| | ≥294 | ≥491 | ≥18 | | ≥35 | | | | 11 | 11 | ≥398 | 137 | 201 | Т. Сидур | |
| | 480 | 692 | 60,8 | 216 | 60 | 64 | 64 | 7700 | 1 | 11 | 397 | 137 | 201 | | |
| | 471 | 683 | 61,22 | 59 | 59 | 66 | 66 | " | " | 11 | 45 | 42 | | | |
| | 473 | 692 | 61,3 | 226 | 60 | 64 | 64 | 7700 | 1 | 11 | 116 | 116 | 201 | | |
| | 468 | 685 | 61,4 | 228 | 59 | 65 | 65 | " | " | 11 | 110 | 110 | | | |
| | | | | | | | | | 11 | 11 | 80 | 80 | | | |
| | | | | | | | | | " | " | 76 | 76 | | | |

| Напряжение, Н | Начальные размеры образца, мм | | | Усиление, Н | | | |
|---------------|---|-----------------------|--|----------------------|----------------|------------------|----------------|
| | толщ. a ₀ или диаметр d ₀ | ширина b ₀ | площадь сечения F ₀ , мм ² | длина l ₀ | P ₁ | P _{0.2} | P _c |
| 294 | 10,0 | 79 | 79 | 79 | | | |
| 439 | 10,0 | 796,50 | 796,50 | 38200 | | | 53750 |
| 443 | 10,0 | 79 | 79 | 37200 | | | 53600 |
| 489 | 10,0 | 785 | 785 | 37400 | | | 55000 |
| 495 | 10,0 | 788 | 788 | 36900 | | | 55550 |

| Напряжение, Н/мм ² | Линия носка папуля I _{кн} | | | Удлинение δ ₀ , % | Диаметр носка папуля d _{кн} | Относительное сужение φ ₀ , % | Температура, °C | № машины | Ударный нагиб | | | | Твердость | Полный контролер |
|-------------------------------|------------------------------------|------------------|----------------|------------------------------|--------------------------------------|--|-----------------|----------|---------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------|-----------|------------------|
| | σ | σ _{0.2} | σ _b | | | | | | тип образца | температура, °C | работа уара, Дж | ударная вязкость, Дж/см ² | | |
| ≥294 | ≥491 | ≥18 | | ≥35 | | | | 11 | 11 | ≥398 | 137 | 201 | Т. Сидур | |
| 439 | 671 | 60,8 | 216 | 60 | 64 | 64 | 7700 | 1 | 11 | 397 | 137 | 201 | | |
| 443 | 676 | 61,22 | 59 | 59 | 66 | 66 | " | " | 11 | 45 | 42 | | | |
| 489 | 701 | 61,3 | 226 | 60 | 64 | 64 | 7700 | 1 | 11 | 116 | 116 | 201 | | |
| 495 | 705 | 61,4 | 228 | 59 | 65 | 65 | " | " | 11 | 110 | 110 | | | |
| | | | | | | | | 11 | 11 | 80 | 80 | | | |
| | | | | | | | | " | " | 76 | 76 | | | |

| Напряженность, Н/мм ² | Удлинение, Н/мм ² | | Линия носка пашины, % | Удлинение 2 ^{го} | Линия носка пашины, % | Относительное удлинение 2 ^{го} | Линия носка пашины, % | Относительное удлинение 2 ^{го} | Температура, °C | № машины | № образца | Ударный изгиб | | | Твердость | Полный контролер |
|----------------------------------|------------------------------|------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---|-----------------------|---|-----------------|----------|-----------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------|------------------|
| | σ | σ _{0.2} | | | | | | | | | | σ _{0.01} | температура, °C | работа уара, Дж | | |
| 7294 | 7491 | 718 | 735 | 71 | 7392 | 7392 | 7392 | 7392 | 7392 | 7392 | 7392 | 7392 | 7392 | 7392 | 7392 | 7392 |
| 545 | 532 | 518 | 502 | 518 | 518 | 518 | 518 | 518 | 518 | 518 | 518 | 518 | 518 | 518 | 518 | 518 |
| 532 | 518 | 502 | 488 | 488 | 488 | 488 | 488 | 488 | 488 | 488 | 488 | 488 | 488 | 488 | 488 | 488 |
| 496 | 484 | 470 | 456 | 456 | 456 | 456 | 456 | 456 | 456 | 456 | 456 | 456 | 456 | 456 | 456 | 456 |
| 484 | 470 | 456 | 442 | 442 | 442 | 442 | 442 | 442 | 442 | 442 | 442 | 442 | 442 | 442 | 442 | 442 |
| 488 | 474 | 460 | 446 | 446 | 446 | 446 | 446 | 446 | 446 | 446 | 446 | 446 | 446 | 446 | 446 | 446 |
| 520 | 511 | 502 | 493 | 493 | 493 | 493 | 493 | 493 | 493 | 493 | 493 | 493 | 493 | 493 | 493 | 493 |
| 511 | 502 | 493 | 484 | 484 | 484 | 484 | 484 | 484 | 484 | 484 | 484 | 484 | 484 | 484 | 484 | 484 |

| Напряженность осн образца | № образца | Начальные размеры образца, мм | | | | Удлинение, Н | | |
|---------------------------|------------|---|-----------------------|--|----------------------|----------------|------------------|-------------------|
| | | толщ. а ₀ или диаметр d ₀ | ширина b ₀ | площадь сечения F ₀ , мм ² | длина l ₀ | R _r | R _{0.2} | R _{0.01} |
| 7294 | 15-623-100 | 100 | 79 | 787 | 50 | 39100 | 55300 | 55300 |
| 545 | 1003 | 100 | 79 | 787 | 50 | 39100 | 55300 | 55300 |
| 532 | 1003 | 100 | 79 | 787 | 50 | 39100 | 55300 | 55300 |
| 496 | 1003 | 100 | 79 | 787 | 50 | 39100 | 55300 | 55300 |
| 484 | 1003 | 100 | 79 | 787 | 50 | 39100 | 55300 | 55300 |
| 488 | 1003 | 100 | 79 | 787 | 50 | 39100 | 55300 | 55300 |
| 520 | 1003 | 100 | 79 | 787 | 50 | 39100 | 55300 | 55300 |
| 511 | 1003 | 100 | 79 | 787 | 50 | 39100 | 55300 | 55300 |

Форма № 312 59

| Напряжение, В/кВ: | И/мм: | | Линия носке проволоки | Относительное удлинение δ, % | Диаметр носка проволоки | Относительное сужение φ, % | Температура, °С | № машины | Ударный изгиб | | | | Температура | Полная контрольная | | |
|-------------------|-------|------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------|----------|------------------|-------------------|-------------|-----------------|-------------|--------------------|------------------|--------------------------|
| | φ | φ _{0.2} | | | | | | | φ _{0.1} | φ _{0.05} | тип образца | температура, °С | | | работа удара, Дж | Ударная вязкость, Дж/см² |
| ≥ 294 | ≥ 491 | ≥ 14 | ≥ 30 | 11 | ≥ 294 | 223 | 217 | 212 | 142 | 135 | 101 | 98 | 147 | 141 | 104 | 102 |
| 561 | 741 | 605 | 61 | 1 | 62 | 61 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 |
| 553 | 735 | 607 | 62 | 1 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 |
| 569 | 747 | 606 | 59 | 1 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 | 64 |
| 575 | 753 | 604 | 56 | 1 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 | 66 |
| 541 | 722 | 617 | 62 | 1 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 |
| 530 | 714 | 618 | 62 | 1 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 |
| 526 | 710 | 608 | 62 | 1 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 | 62 |
| 517 | 703 | 612 | 63 | 1 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61 | 61 |

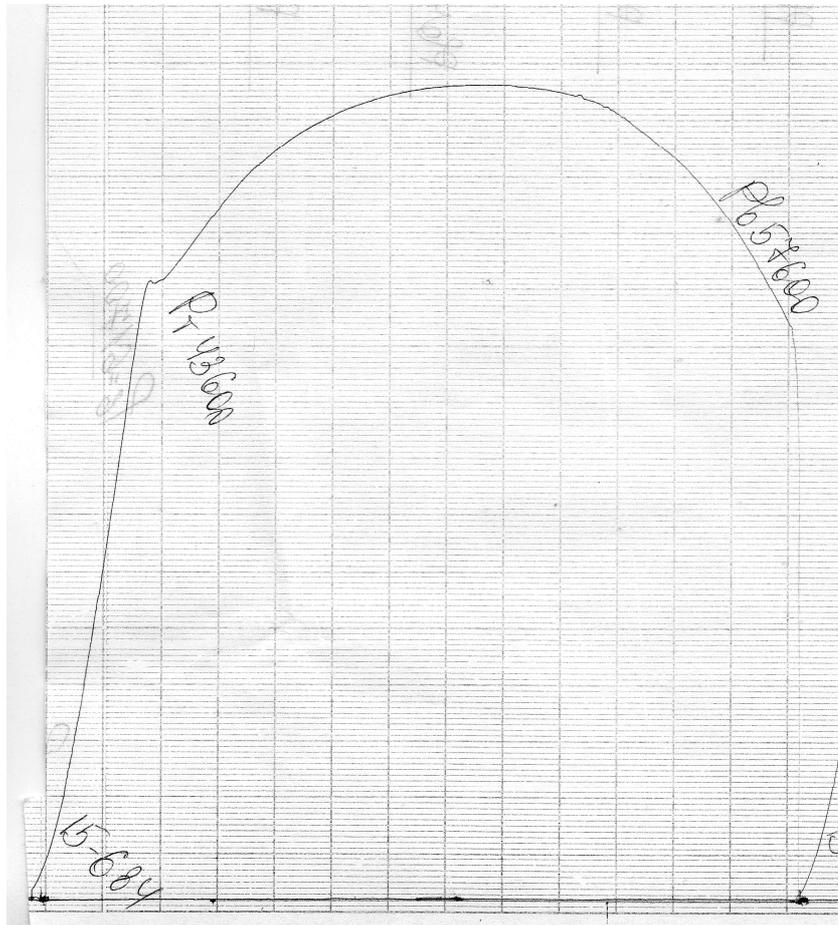
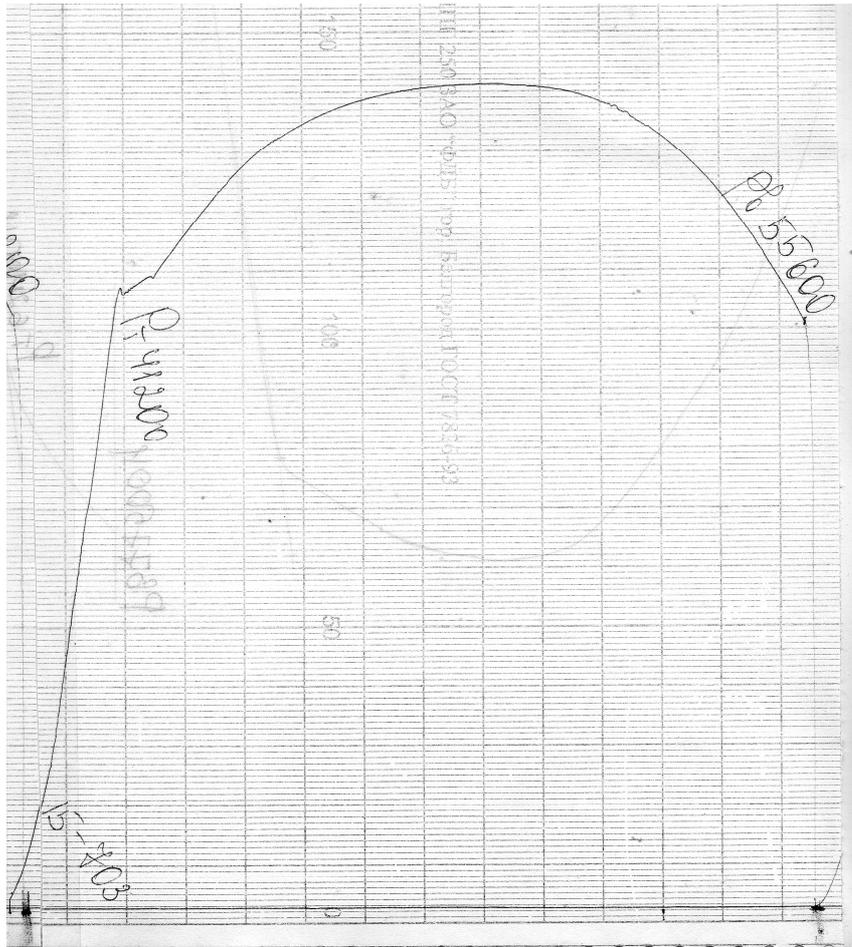
| Напряжение | № образца | Начальные размеры образца, мм | | | | Удлинение, Н | | |
|------------|-----------|---|-----------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------|------------------|-------------------|
| | | толщ. а ₀ или диаметр φ ₀ | ширина b ₀ | площадь сечения F ₀ , мм² | длина l ₀ | R _{0.2} | R _{0.1} | R _{0.05} |
| 294 | 5 | терменсы | | | | | | |
| 561 | 15-884 | 995 | 477 | 50 | 43600 | | | 57600 |
| 553 | 7 | 100 | 485 | 50 | 43400 | | | 57700 |
| 569 | 15-685 | 997 | 480 | 50 | 44400 | | | 58250 |
| 575 | 8 | 1002 | 488 | 50 | 45300 | | | 59350 |
| 541 | 15-702 | 1001 | 487 | 50 | 42600 | | | 56800 |
| 530 | 7 | 999 | 483 | 50 | 41500 | | | 55900 |
| 526 | 15-703 | 996 | 483 | 50 | 41200 | | | 55600 |
| 517 | 8 | 1001 | 487 | 50 | 40700 | | | 55300 |

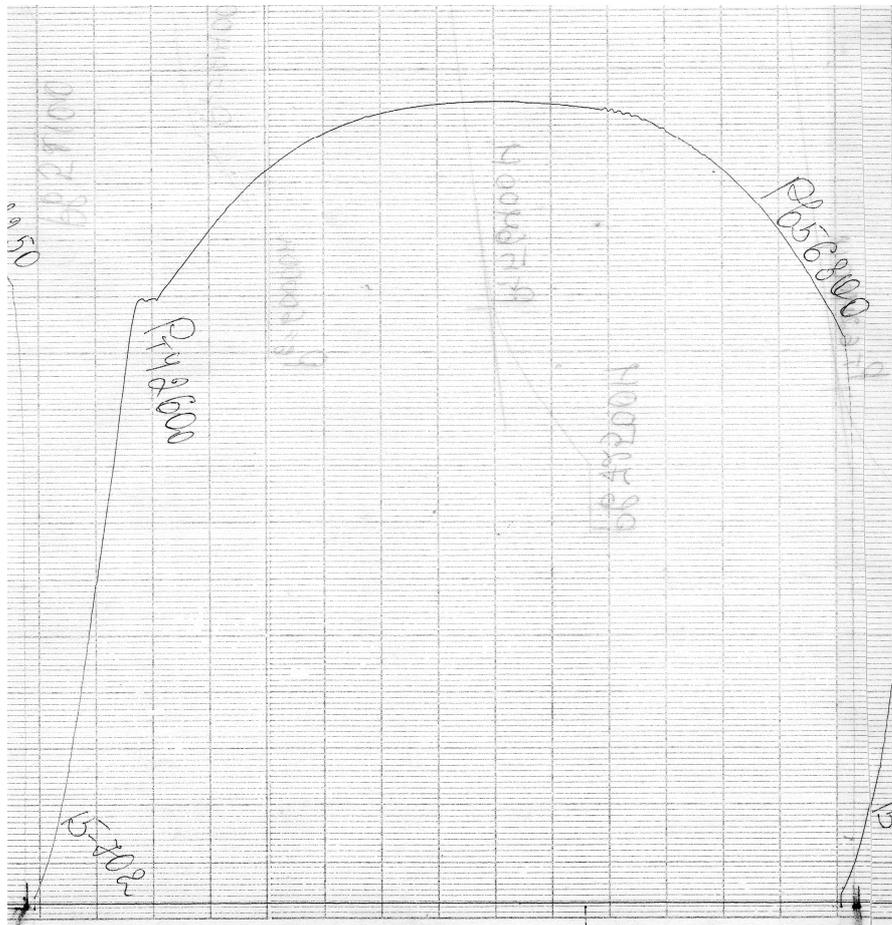
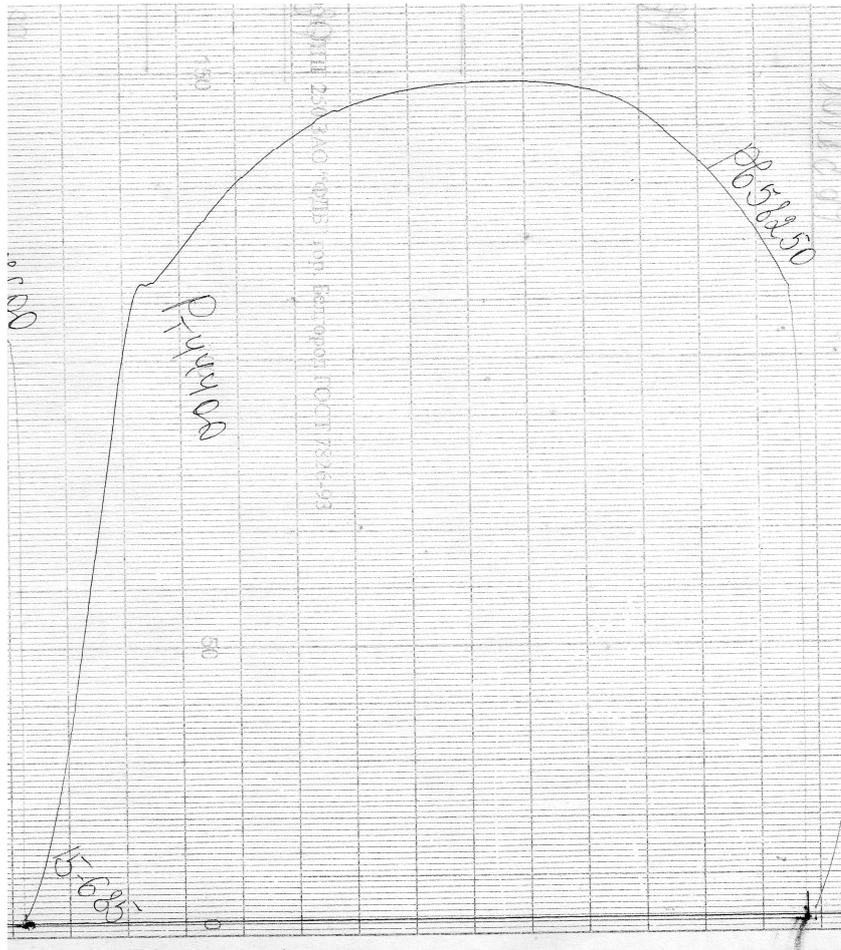
| Направление осн образца | № образца | Начальные размеры образца, мм | | | | Усиление, Н | | |
|-------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|----------|----------------|------------------|-------------------|--------------------|
| | | толщ. до | ширина до | длина до | Р ₁ | Р _{0.2} | Р _{0.01} | Р _{0.005} |
| 22-2 | 207 | 1003 | 79 | 5037400 | | | | 55000 |
| 100 | 100 | 785 | 36500 | 53800 | | | | |
| 15-590 | 1003 | 79 | 5039200 | 56250 | | | | 55000 |
| 1001 | 1001 | 787 | 36500 | 56400 | | | | |
| 15-590 | 1004 | 791 | 5037600 | 55000 | | | | 55000 |
| 1002 | 1002 | 788 | 37900 | 55100 | | | | |
| 15-590 | 1002 | 788 | 5037000 | 55000 | | | | 55000 |
| 100 | 100 | 785 | 36100 | 53900 | | | | |
| 15-590 | 1010 | 785 | 5036000 | 54000 | | | | 54000 |
| 1002 | 1002 | 788 | 36650 | 54700 | | | | |
| 15-590 | 997 | 780 | 5037400 | 55500 | | | | 55500 |
| 100 | 100 | 785 | 36750 | 55200 | | | | |

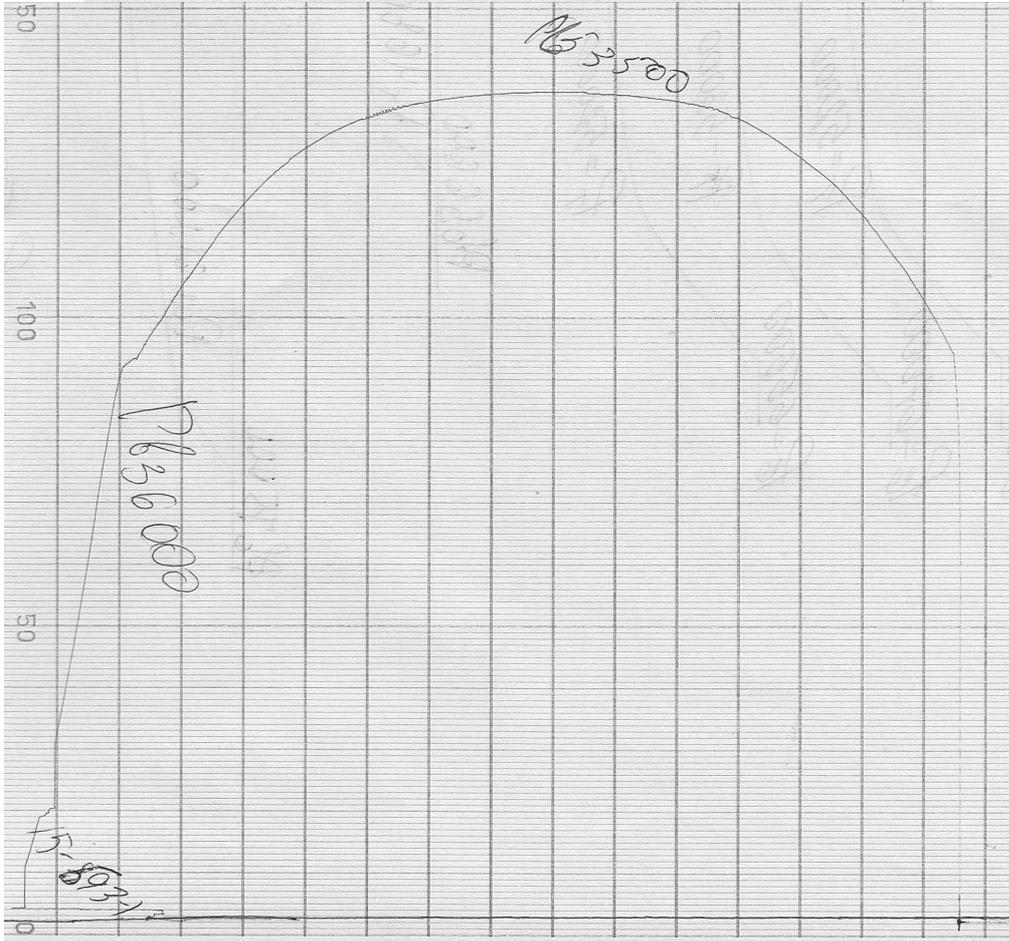
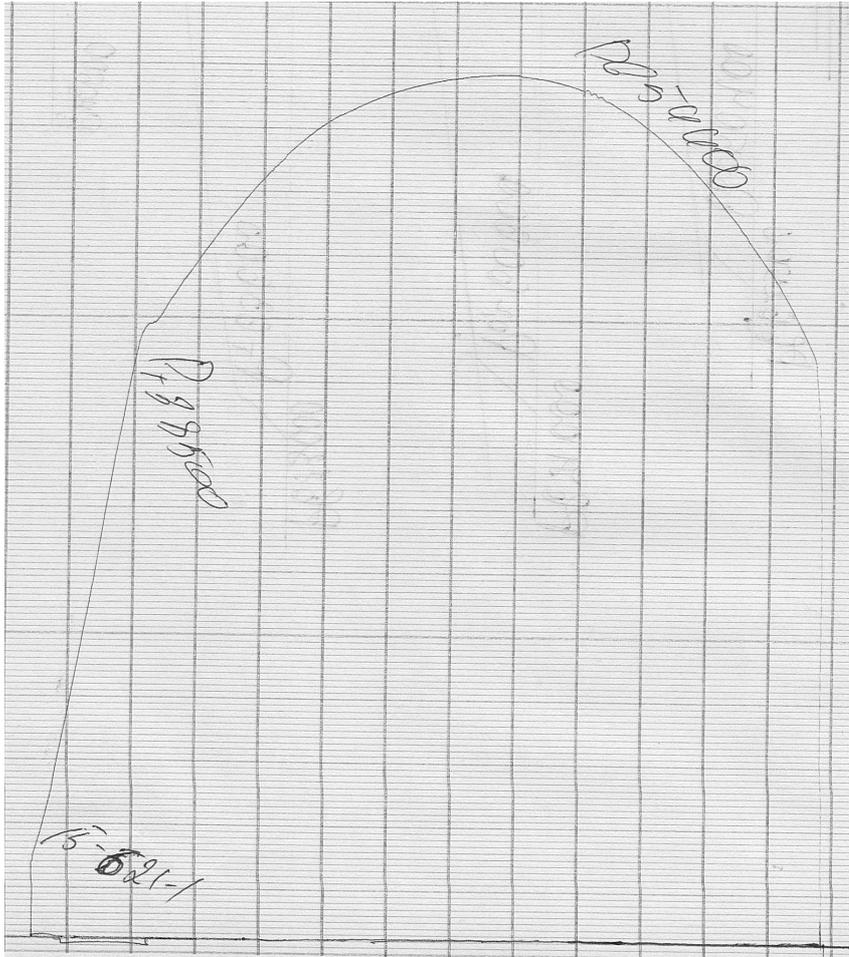
| Напряжение, Н/мм ² | Линия носка образца | Удлинение % | Диаметр носка образца до изогн. | Относительное сужение % | Температура, °C | № машины | Ударный изгиб | | | Твердость | Плотность контроля |
|-------------------------------|---------------------|-------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------|----------|---------------|-----------------|-----|-----------|--------------------|
| | | | | | | | тип образца | температура, °C | Дж | | |
| 2294 | 18 | 18 | 608216 | 64 | 7100 | 14 | 14 | 392 | 132 | 207 | 207 |
| 473 | 608216 | 64 | 685 | 59 | 65 | 11 | 11 | 82 | 77 | 212 | 212 |
| 465 | 61 | 22 | 59 | 65 | 65 | 11 | 11 | 82 | 77 | 212 | 212 |
| 496 | 601202 | 60 | 712 | 60 | 64 | 11 | 11 | 82 | 77 | 212 | 212 |
| 502 | 6020 | 60 | 717 | 60 | 64 | 11 | 11 | 82 | 77 | 212 | 212 |
| 475 | 607246 | 63 | 695 | 60 | 63 | 11 | 11 | 82 | 77 | 212 | 212 |
| 481 | 60521 | 62 | 699 | 60 | 62 | 11 | 11 | 82 | 77 | 212 | 212 |
| 470 | 603206 | 63 | 698 | 60 | 63 | 11 | 11 | 82 | 77 | 212 | 212 |
| 460 | 604208 | 60 | 687 | 60 | 64 | 11 | 11 | 82 | 77 | 212 | 212 |
| 456 | 617234 | 62 | 688 | 61 | 62 | 11 | 11 | 82 | 77 | 212 | 212 |
| 465 | 61523 | 62 | 694 | 61 | 62 | 11 | 11 | 82 | 77 | 212 | 212 |
| 479 | 60521 | 60 | 712 | 60 | 64 | 11 | 11 | 82 | 77 | 212 | 212 |
| 468 | 607214 | 59 | 703 | 60 | 65 | 11 | 11 | 82 | 77 | 212 | 212 |

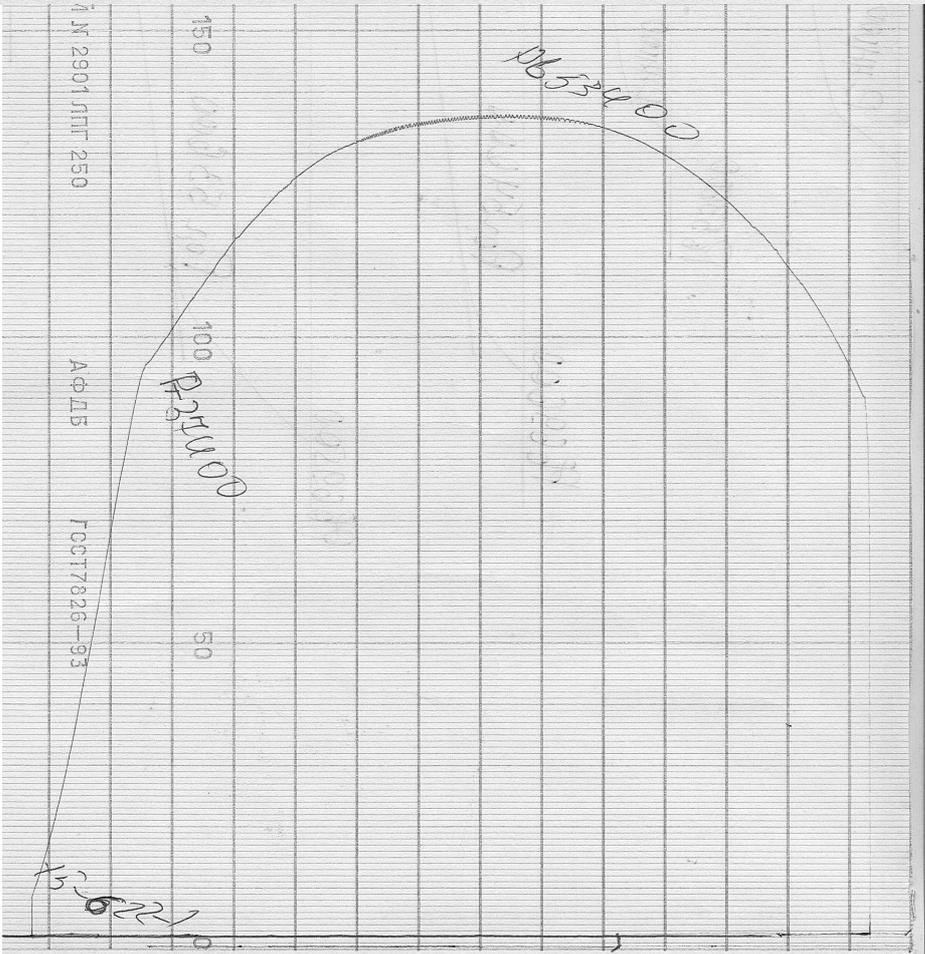
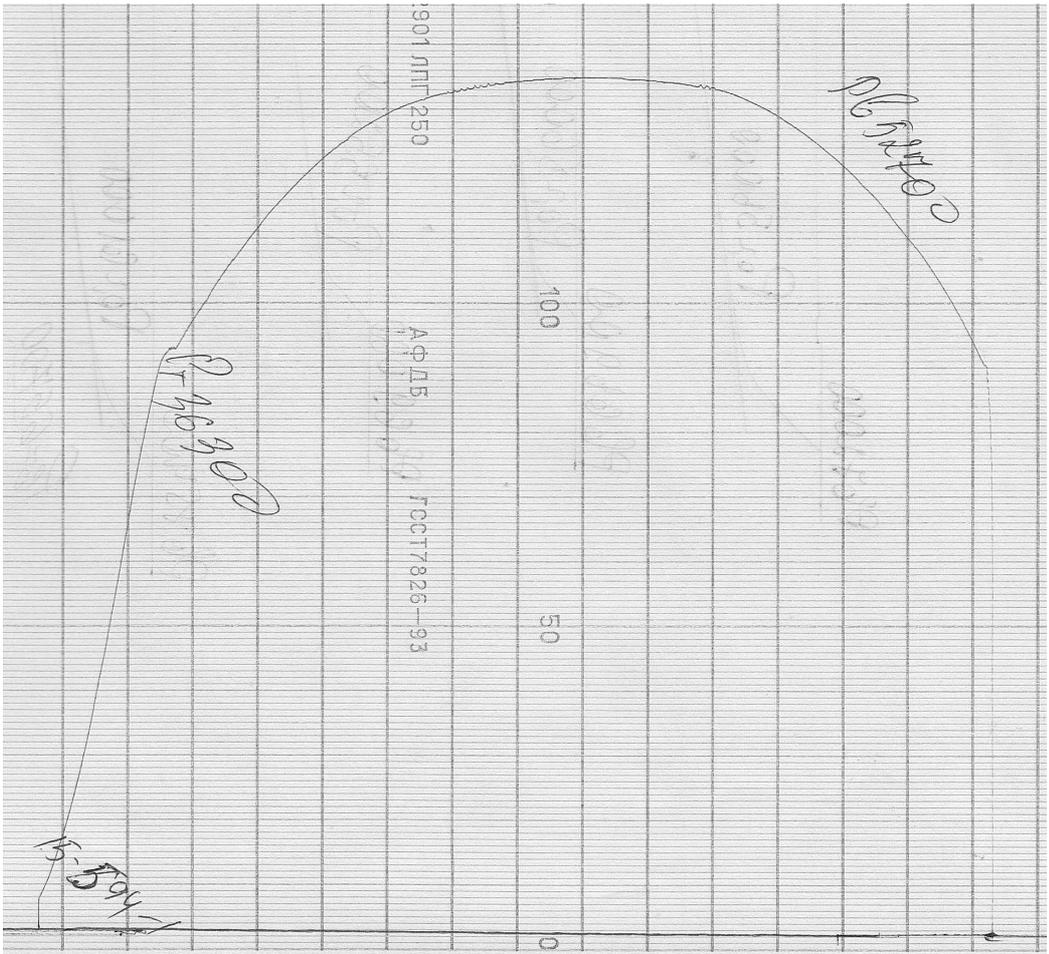
| Напряженность осн образца | № образца | Начальные размеры образца, мм | | | | Усиление, Н | | | Напряженность, П/мм ² | | Ударный изгиб | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-----------|--|-----------------------|--|----------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|--|--------------------------------------|--|-----------------|----------|-------------|-----------------|------------------|--------------------------------------|--------|
| | | толщ. d ₀ или d ₀₁ | ширина b ₀ | площадь сечения F ₀ , мм ² | длина l ₀ | P ₁ | P ₀₁ | P ₂ | σ | σ ₀₁ | σ ₀₂ | Линия носка пашины L _{пн} | Относительное удлинение ε ₀ % | Диаметр носка пашины d _{пн} | Относительное сужение φ ₀ % | Температура, °C | № машины | Тип образца | Температура, °C | Работа удара, Дж | Ударная нагрузка, Дж/см ² | |
| 2-1 | 1 | 1007 | 8149 | 47 | 46600 | | | 5596 | 839 | 572 | 144 | 66 | 56 | 7900 | 1 | 7900 | 1 | 1 | 7900 | 71 | 210-80 | 210-80 |
| 409 | 15-749 | 98 | | 48250 | 46600 | | | 5596 | 839 | 572 | 144 | 66 | 56 | 7900 | " | 7900 | " | " | 7900 | 71 | 252 | 252 |
| 25 | 20 | 26 | 26 | | | | | ≥ 294 | ≥ 491 | ≥ 14 | ≥ 30 | ≥ 30 | ≥ 30 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | ≥ 294 | ≥ 294 | ≥ 294 |
| манс | 15-683 | 995 | 777 | 50 | 42500 | | | 547 | 719 | 686 | 232 | 60 | 64 | 7900 | 11 | 7900 | 11 | 11 | 7900 | 11 | 216 | 216 |
| " | " | 100 | 785 | 50 | 41100 | | | 523 | 701 | 627 | 254 | 59 | 65 | " | " | " | " | " | " | 170 | 170 | 170 |
| манс | 15-683 | 100 | 785 | 50 | 43400 | | | 553 | 729 | 629 | 244 | 62 | 62 | 7900 | 11 | 7900 | 11 | 11 | 7900 | 11 | 219 | 219 |
| " | " | 100 | 787 | 50 | 43000 | | | 547 | 712 | 626 | 252 | 60 | 69 | " | " | " | " | " | " | 173 | 173 | 173 |
| манс | 15-696 | 98 | 782 | 50 | 42800 | | | 547 | 708 | 632 | 264 | 61 | 63 | 7900 | 1 | 7900 | 1 | 1 | 7900 | 131 | 213 | 213 |
| " | " | 100 | 787 | 50 | | | | 554 | 731 | 629 | 255 | 63 | 60 | " | " | " | " | " | " | 153 | 153 | 153 |
| манс | 15-697 | 99 | 783 | 50 | 42700 | | | 545 | 713 | 626 | 252 | 64 | 59 | 7900 | " | 7900 | " | " | 7900 | 92 | 214 | 214 |
| " | " | 995 | 777 | 50 | 40800 | | | 525 | 706 | 631 | 262 | 62 | 61 | " | " | " | " | " | " | 164 | 164 | 164 |
| " | " | | | | | | | | | | | | | " | " | " | " | " | " | 169 | 169 | 169 |
| " | " | | | | | | | | | | | | | " | " | " | " | " | " | 113 | 113 | 113 |
| " | " | | | | | | | | | | | | | " | " | " | " | " | " | 108 | 108 | 108 |

EA









Результаты испытаний технологических проб
поковки кольцо на ОАО «Русполимет»

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| AMS 5666 | Ni | Cr | Mo | Nb + Ta | Fe | Ti | C | Mn | Si | S | P | Al | Co |
| | 58.0 min | 20 - 23 | 8 - 10 | 3.15 - 4.15 | 5.0 max | 0.40 max | 0.10 max | 0.50 max | 0.50 max | 0.15 max | 0.15 max | 0.40 max | 1.0 max |
| AMS 5662 | C | Mn | P | S | Si | Cr | Ni | Mo | Cb | Ta | Ti | Co | Fe |
| | 0.08 | 0.35 | 0.01 | 0.01 | 0.35 | 17-21 | 50-55 | 2.8-3.3 | 4.75-5.5 | 0.05 | 0.65-1.15 | 1.0 | Rem |

ОАО "Русполимет"
 Центральная заводская лаборатория
 Лаборатория физико-механических испытаний

607010 г. Кулебаки
 Нижегородской обл.
 ул. Восстания, 1

ПРОТОКОЛ № 340, серия 343
результатов испытаний на растяжение
 от 05.08.2013 г.

| Заказчик | Вид продукции | | | | Оборудование | |
|---|---------------|-----------------|--------------------------|----------------------|--|------------------------------|
| ПМО | КОЛЬЦО | | | | Испытательная машина Тип: Insight 100 № 10242192 | Экстензометр Тип: 634.31F |
| Марка материала | Номер заказа | Номер плавки | Партия или номер изделия | Шифр | НД на продукцию | |
| AMS5662 | - | 332755 PVCBT | 7100 | 86621910-1 ЕД-III | AMS5662 M | |
| Режим термообработки | | | | | НД на методы испытания | |
| Подразделение: Закалка с 1778° F (970° C), выдержка 6 час., охлаждение-масло ЦЗЛ: Нагрев при 1328° F (720° C), выдержка 8 часов, охлаждение с печью до 1148° F (620° C) в течение 2 часов, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе. (общее время дисперсионного упрочнения 18 ч.) | | | | | ASTME 8 | |

Номер накладной 1112 от 03.08.2013 г.

Дата получения образца: 05.08.2013 г.

Дата проведения испытаний: 05.08.2013 г.

Результаты испытаний на растяжение

| Диаметр образца | | Скорость испытания | | | | Температура испытания | Предел прочности на растяжение σ_B | | Предел текучести при смещении 0,2 % $\sigma_{0,2}$ | | Относительное удлинение δ | Относительное сужение ψ | Расположение места разрыва | |
|-----------------|------|----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|---|------------|--|------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | | до предела текучести | | за пределом текучести | | | | | | | | | | |
| дюйм | мм | дюйм/мин | мм/мин | дюйм/мин | мм/мин | °F | °C | kzi | МПа | kzi | МПа | % | | |
| 0,237 | 6,03 | 0,018 | 0,450 | 0,394 | 10,000 | 75,2 | 24,0 | 188,9 | 1303 | 160,8 | 1109 | 21,0 | 31,0 | По центру расчётной длины |
| AMS 5662M | | | | | | | | ≥ 185 | ≥ 1276 | ≥ 150 | ≥ 1034 | ≥ 12 | ≥ 15 | |

1. Результаты испытания касаются только образцов, подвергнутых испытанию.
2. Перепечатка заключения без разрешения начальника испытательной лаборатории запрещается.
3. Сведения, содержащиеся в данном протоколе относительно маркировки и отбора проб, основаны на предоставленной заказчиком информации.

Заключение: Результаты испытаний механических свойств соответствуют AMS 5662M.

Ведущий инженер лаборатории
 физико-механических
 испытаний: _____

Подпись

Воицина О.В.

Фамилия, инициалы

« _____ » _____ г.

Инженер-технолог: _____

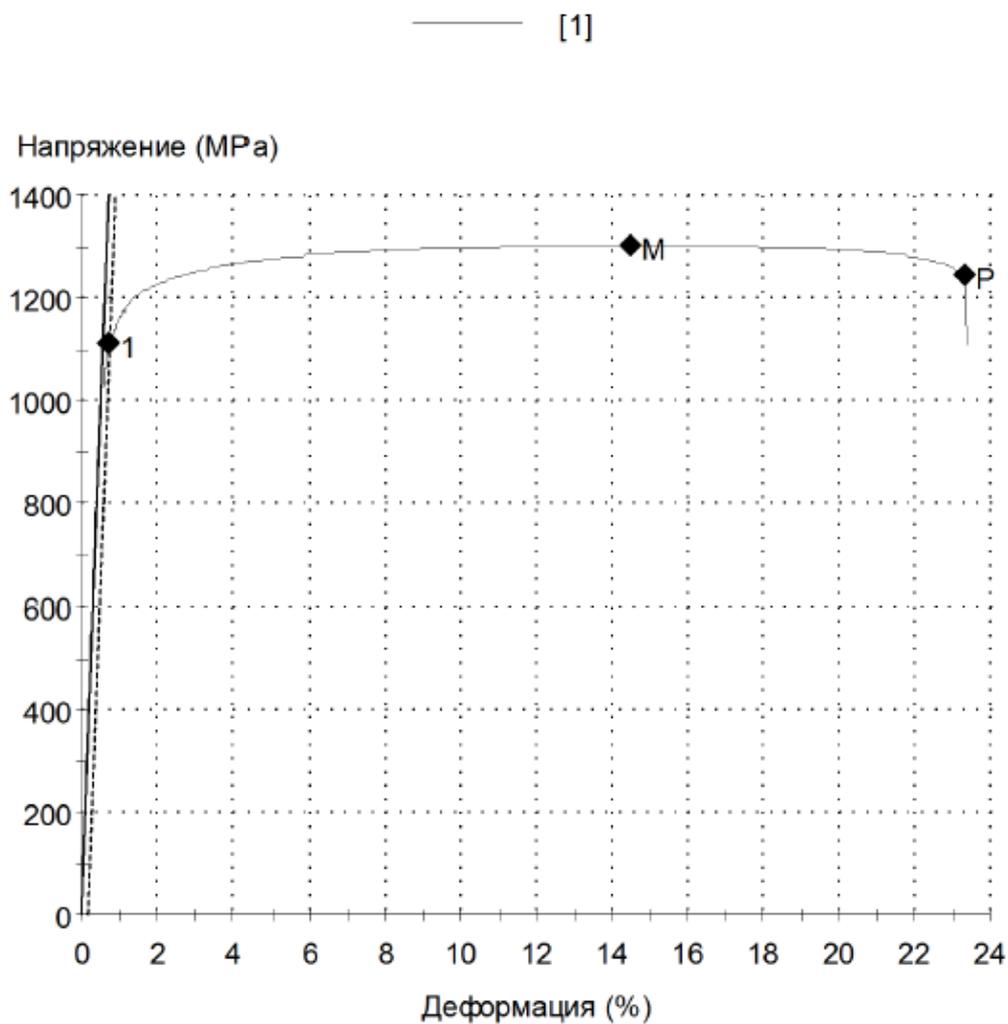
Подпись

Бычкова И.А.

Фамилия, инициалы

« _____ » _____ г.

График растяжения



ОАО "Русполимет"
Центральная заводская лаборатория
Лаборатория физико-механических испытаний

607010 г. Кулебаки
Нижегородской обл.
ул. Восстания, 1

ПРОТОКОЛ № 341, серия 296
результатов испытаний на растяжение
от 05.08.2013 г.

| | | | | | | |
|---|---------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|--|--------------------------------------|
| Заказчик | Вид продукции | | | | Оборудование | |
| <i>ПМО</i> | <i>КОЛЬЦО</i> | | | | Испытательная машина Тип: Insight 100 № 10242192 | <i>Экстензометр</i> Тип: 632.53 E |
| Марка материала | Номер заказа | Номер плавки | Партия или номер изделия | Шифр | НД на продукцию | |
| <i>AMS 5662</i> | - | <i>332755</i> <i>PVCBT</i> | <i>7100</i> | <i>86621910-1</i> <i>ЕД-1П</i> | <i>AMS5662 M</i> | |
| Режим термообработки | | | | | НД на методы испытания | |
| Подразделение: Закалка с 1778° F (970° C), выдержка 6 час., охлаждение- масло ЦЗЛ : Нагрев при 1328° F (720° C), выдержка 8 часов, охлаждение с печью до 1148 °F (620° C) в течение 2 часов, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе. (общее время дисперсионного упрочнения 18 ч.) | | | | | <i>ASTM E 21</i> | |

Номер накладной 1112 от 03.08.2013 г.

Дата получения образца: 05.08.2013 г.

Дата проведения испытаний: 05.08.2013 г.

Результаты испытаний на растяжение

| Диаметр образца | | Скорость испытания | | | | Температура испытания | | Предел прочности на растяжение σ_B | | Предел текучести при смещении 0,2 % $\sigma_{0.2}$ | | Относительное удлинение δ | Относительное сужение ψ | Расположение места разрыва |
|------------------|-------------|----------------------|-----------------------|--------------|--------------|-----------------------|------------|---|-------------|--|------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| | | до предела текучести | за пределом текучести | | | | | | | | | | | |
| дюйм | мм | дюйм/мин | мм/мин | дюйм/мин | мм/мин | °F | °C | ksi | МПа | ksi | МПа | % | | |
| <i>0,250</i> | <i>6,36</i> | <i>0,0062</i> | <i>0,159</i> | <i>0,063</i> | <i>1,590</i> | <i>1200</i> | <i>649</i> | <i>150,4</i> | <i>1037</i> | <i>135,5</i> | <i>934</i> | <i>23,5</i> | <i>40,0</i> | <i>По центру расчетной длины</i> |
| <i>AMS5662 M</i> | | | | | | | | ≥ 145 | ≥ 1000 | ≥ 125 | ≥ 862 | ≥ 12 | ≥ 15 | |

1. Результаты испытания касаются только образцов, подвергнутых испытанию.
2. Перепечатка заключения без разрешения начальника испытательной лаборатории запрещается.
3. Сведения, содержащиеся в данном протоколе относительно маркировки и отбора проб, основаны на предоставленной заказчиком информации.

Заключение: Результаты испытаний механических свойств соответствуют *AMS5662 M*.

Ведущий инженер лаборатории физико-механических испытаний:

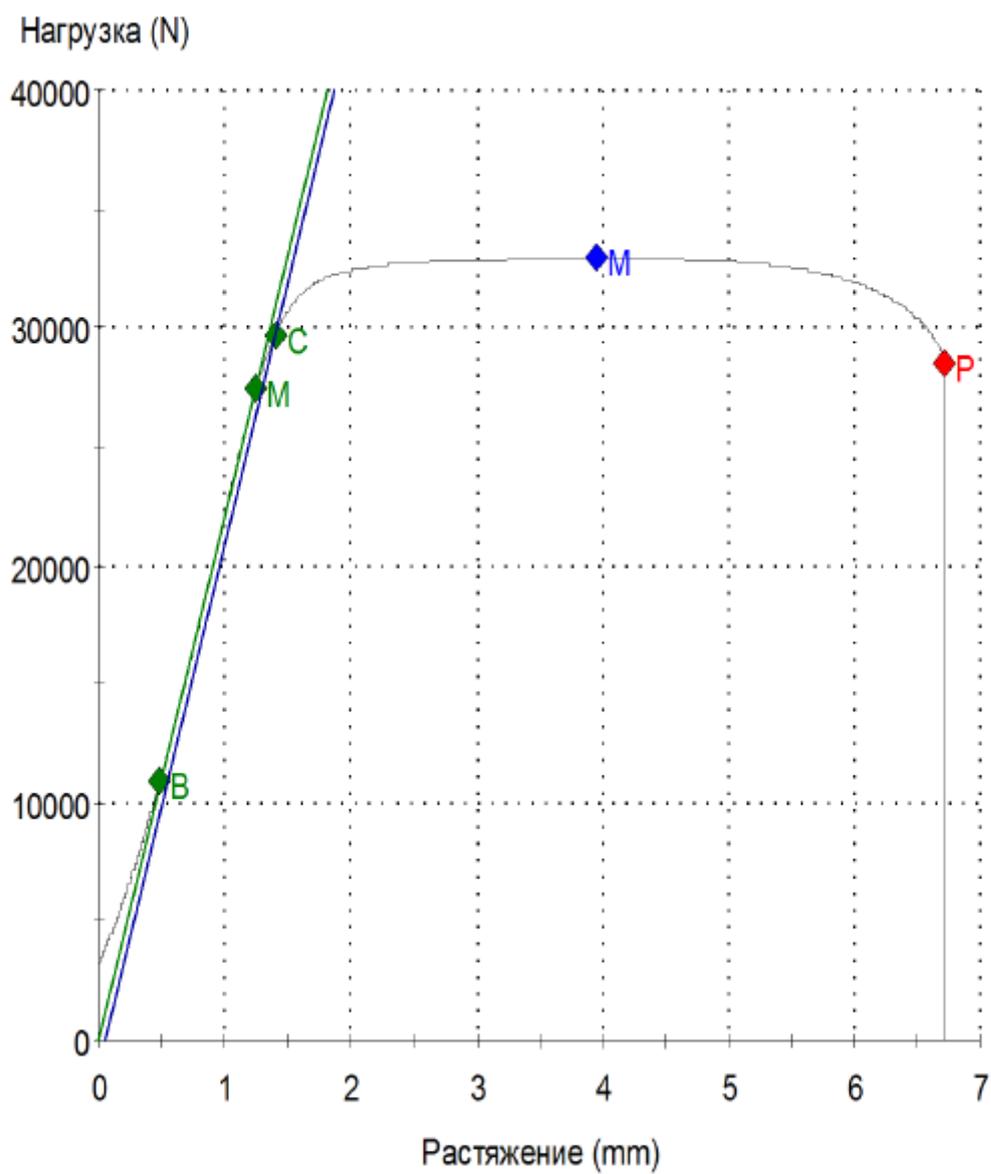
Вошинина О.В.

Подпись: _____
Фамилия, инициалы
« _____ » _____ г.

Инженер-технолог:

Бычкова И.А.

Подпись: _____
Фамилия, инициалы
« _____ » _____ г.

График растяжения

ОАО "Русполимет"
Центральная заводская лаборатория
Лаборатория физико-механических испытаний

607010 г. Кулебаки
Нижегородской обл.
ул. Восстания, 1

ПРОТОКОЛ № 339, серия 175
результатов испытаний на растяжение
от 05.08.2013 г.

| | | | | | | |
|--|---------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|--|--------------------------------------|
| Заказчик | Вид продукции | | | | Оборудование | |
| <i>ПМО</i> | <i>КОЛЬЦО</i> | | | | Испытательная машина Тип: Insight 100 № 10242192 | <i>Экстензометр</i> Тип: 632.53 E |
| Марка материала | Номер заказа | Номер плавки | Партия или номер изделия | Шифр | НД на продукцию | |
| <i>AMS 5662</i> | - | <i>M4N72-2 PVBXX</i> | <i>7105</i> | <i>86621910-1 ЕД-III</i> | <i>AMS5662 M</i> | |
| Режим термообработки | | | | | НД на методы испытания | |
| Подразделение: Заказка с 1778° F (970° C), выдержка 6 час., охлаждение- масло ЦЗЛ: Нагрев при 1328° F (720° C), выдержка 8 часов, охлаждение с печью до 1148° F (620° C) в течение 2 часов, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе. (общее время дисперсионного упрочнения 18 ч.) | | | | | <i>ASTM E 21</i> | |

Номер накладной 1111 от 03.08.2013 г.

Дата получения образца: 05.08.2013 г.

Дата проведения испытаний: 05.08.2013 г.

Результаты испытаний на растяжение

| Диаметр образца | | Скорость испытания | | | | Температура испытания | | Предел прочности на растяжение σ_B | | Предел текучести при смещении 0,2 % $\sigma_{0,2}$ | | Относительное удлинение δ | Относительное сужение ψ | Расположение места разрыва |
|------------------|------|----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|-----|---|-------------|--|------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | | до предела текучести | | за пределом текучести | | | | | | | | | | |
| дюйм | мм | дюйм/мин | мм/мин | дюйм/мин | мм/мин | °F | °C | ksi | МПа | ksi | МПа | % | | |
| 0,252 | 6,41 | 0,0062 | 0,159 | 0,063 | 1,590 | 1200 | 649 | 150,7 | 1039 | 138,8 | 957 | 17,0 | 36,0 | По центру расчетной длины |
| <i>AMS5662 M</i> | | | | | | | | ≥ 145 | ≥ 1000 | ≥ 125 | ≥ 862 | ≥ 12 | ≥ 15 | |

1. Результаты испытания касаются только образцов, подвергнутых испытанию.
2. Перепечатка заключения без разрешения начальника испытательной лаборатории запрещается.
3. Сведения, содержащиеся в данном протоколе относительно маркировки и отбора проб, основаны на предоставленной заказчиком информации.

Заключение: Результаты испытаний механических свойств соответствуют *AMS5662 M*.

Ведущий инженер лаборатории

физико-механических

испытаний:

Вопнина О.В.

Подпись

Фамилия, инициалы

«_____» _____ г.

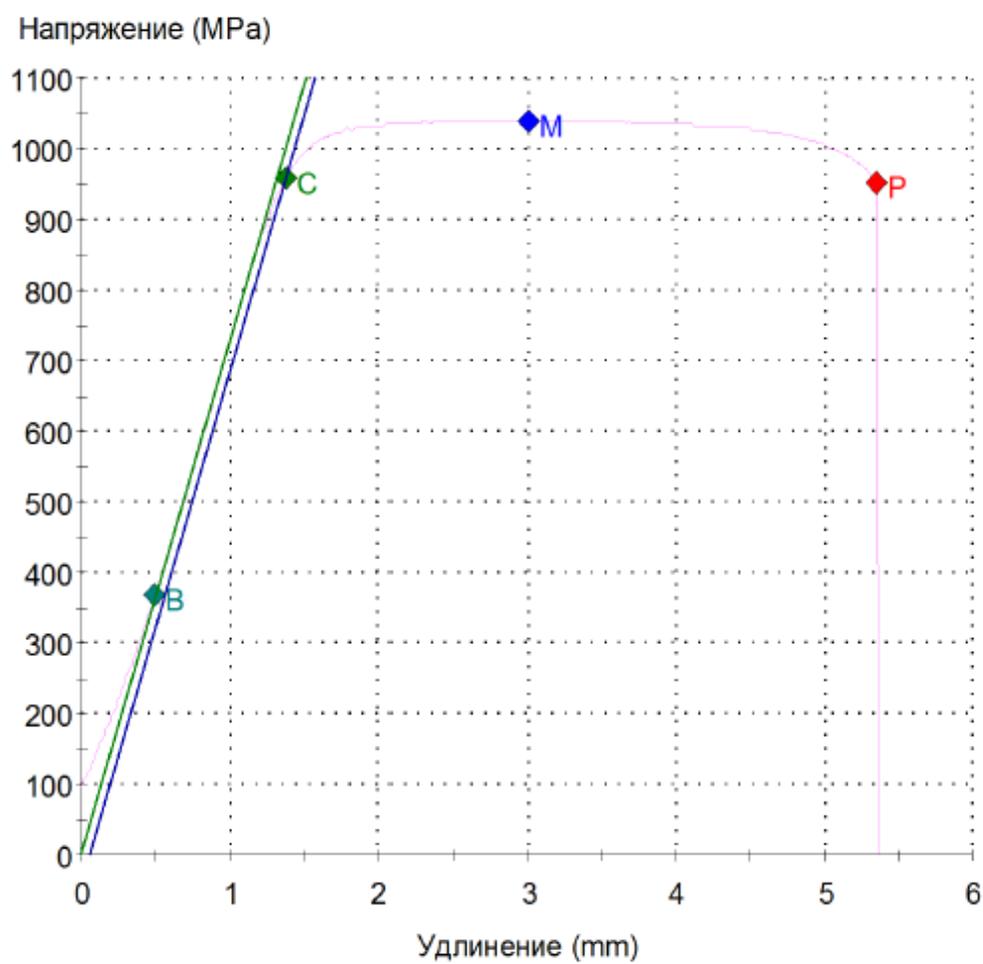
Инженер-технолог:

Бычкова И.А.

Подпись

Фамилия, инициалы

«_____» _____ г.

График растяжения

ОАО "Русполимет"
Центральная заводская лаборатория
Лаборатория физико-механических испытаний

607010 г. Кулебаки
Нижегородской обл.
ул. Восстания, 1

ПРОТОКОЛ № 332, серия 333
результатов испытаний на растяжение
от 31.07.2013 г.

| Заказчик | | Вид продукции | | | | Оборудование | |
|--|--------------|---------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------|--|------------------------------|
| ПМО | | Кольцо | | | | Испытательная машина Тип: Insight 100 № 10242192 | Экстензометр Тип: 634.31F |
| Марка материала | Номер заказа | Номер плавки | Партия или номер изделия | Шифр | НД на продукцию | | |
| AMS 5666 | - | 324394 | 140/1 | VV3827054-903A ОМЮ-105ТА | AMS 5666F | | |
| Режим термообработки | | | | | | НД на методы испытания | |
| Подразделение: отжиг: 1598 °F (870°C), выдержка 1 час, охлаждение на воздухе | | | | | | ASTM A 370 | |

Номер накладной 1085 от 29.07.2013 г.

Дата получения образца: 31.07.2013 г.

Дата проведения испытаний: 31.07.2013 г.

Результаты испытаний на растяжение

| Диаметр образца | | Скорость испытания | | | | Температура испытания | | Предел прочности на растяжение σ_B | | Предел текучести при смещении 0,2 % $\sigma_{0,2}$ | | Относительное удлинение δ | Относительное сужение ψ | Расположение места разрыва |
|-----------------|------|----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|------|---|------------|--|------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | | до предела текучести | | за пределом текучести | | | | | | | | | | |
| дюйм | мм | дюйм/мин | мм/мин | дюйм/мин | мм/мин | °F | °C | ksi | МПа | ksi | МПа | % | | |
| 0,248 | 6,30 | 0,079 | 2,000 | 0,394 | 10,000 | 75,2 | 24,0 | 127,4 | 879 | 74,6 | 514 | 48,0 | 47,0 | По центру расчётной длины |
| AMS 5666F | | | | | | | | ≥ 120 | ≥ 827 | ≥ 60 | ≥ 414 | ≥ 30 | - | |

1. Результаты испытания касаются только образцов, подвергнутых испытаниям.
2. Перепечатка заключения без разрешения начальника испытательной лаборатории запрещается.
3. Сведения, содержащиеся в данном протоколе относительно маркировки и отбора проб, основаны на предоставленной заказчиком информации.

Заключение: Результаты испытаний механических свойств соответствуют AMS 5666F.

Ведущий инженер лаборатории
физико-механических
испытаний: _____

Подпись

Вопнина О.В.

Фамилия, инициалы

«_____» _____ г.

Инженер-технолог: _____

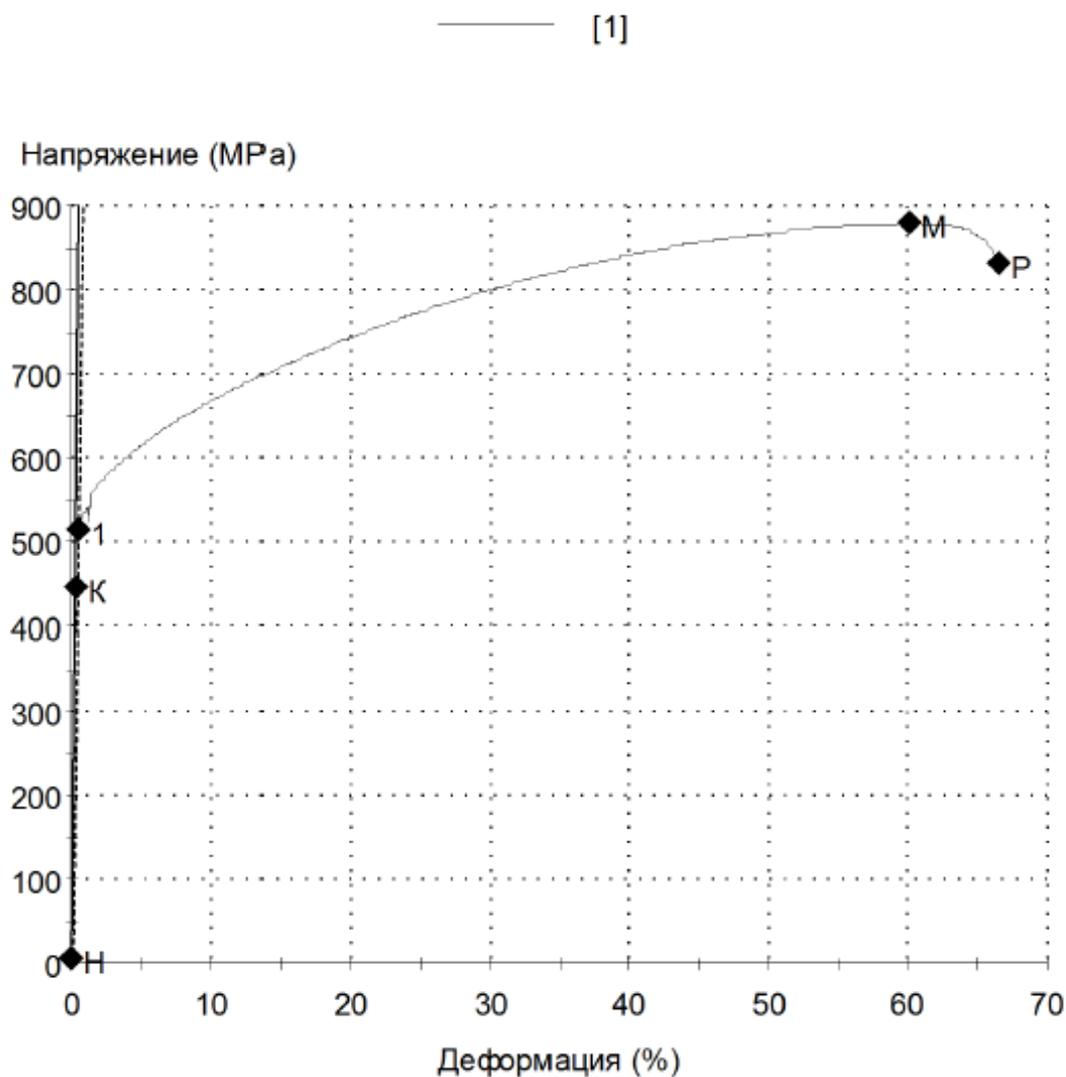
Подпись

Бычкова И.А.

Фамилия, инициалы

«_____» _____ г.

График растяжения



ОАО "Русполимет"
Центральная заводская лаборатория
Лаборатория физико-механических испытаний

607010 г. Кулебаки
Нижегородской обл.
ул. Восстания, 1

ПРОТОКОЛ № 325, серия 325
результатов испытаний на растяжение
от 29.07.2013 г.

| | | | | | | |
|--|---------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------------|--|------------------------------|
| Заказчик | Вид продукции | | | | Оборудование | |
| <i>КПП-2</i> | <i>Кольцо</i> | | | | Испытательная машина Тип: Insight 100 № 10242192 | Экстензометр Тип: 634.31F |
| Марка материала | Номер заказа | Номер плавки | Партия или номер изделия | Шифр | НД на продукцию | |
| <i>AMS 5666</i> | - | <i>324296 PVBUK</i> | <i>0051</i> | <i>86661311 ЕД-103Б</i> | <i>AMS 5666F</i> | |
| Режим термообработки | | | | | НД на методы испытания | |
| Подразделение: отжиг: 1598 °F (870°C), выдержка 1 час, охлаждение на воздухе | | | | | <i>ASTM A 370</i> | |

Номер накладной 1052 от 27.07.2013 г.

Дата получения образца: 29.07.2013 г.

Дата проведения испытаний: 29.07.2013 г.

Результаты испытаний на растяжение

| Диаметр образца | | Скорость испытания | | | | Температура испытания | | Предел прочности на растяжение σ_B | | Предел текучести при смещении 0,2 % $\sigma_{0,2}$ | | Относительное удлинение δ | Относительное сужение ψ | Расположение места разрыва |
|------------------|-------------|----------------------|--------------|-----------------------|---------------|-----------------------|-------------|---|------------|--|------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| | | до предела текучести | | за пределом текучести | | | | | | | | | | |
| дюйм | мм | дюйм/мин | мм/мин | дюйм/мин | мм/мин | °F | °C | ksi | МПа | ksi | МПа | % | | |
| <i>0,246</i> | <i>6,26</i> | <i>0,079</i> | <i>2,000</i> | <i>0,394</i> | <i>10,000</i> | <i>75,2</i> | <i>24,0</i> | <i>136,2</i> | <i>939</i> | <i>94,9</i> | <i>654</i> | <i>40,0</i> | <i>55,0</i> | <i>По центру расчётной длины</i> |
| <i>AMS 5666F</i> | | | | | | | | ≥ 120 | ≥ 827 | ≥ 60 | ≥ 414 | ≥ 30 | - | |

1. Результаты испытания касаются только образцов, подвергнутых испытаниям.

2. Перепечатка заключения без разрешения начальника испытательной лаборатории запрещается.

3. Сведения, содержащиеся в данном протоколе относительно маркировки и отбора проб, основаны на предоставленной заказчиком информации.

Заключение: Результаты испытаний механических свойств соответствуют AMS 5666F.

Ведущий инженер лаборатории
физико-механических
испытаний: _____

Подпись

Вощинина О.В.

Фамилия, инициалы

« _____ » _____ г.

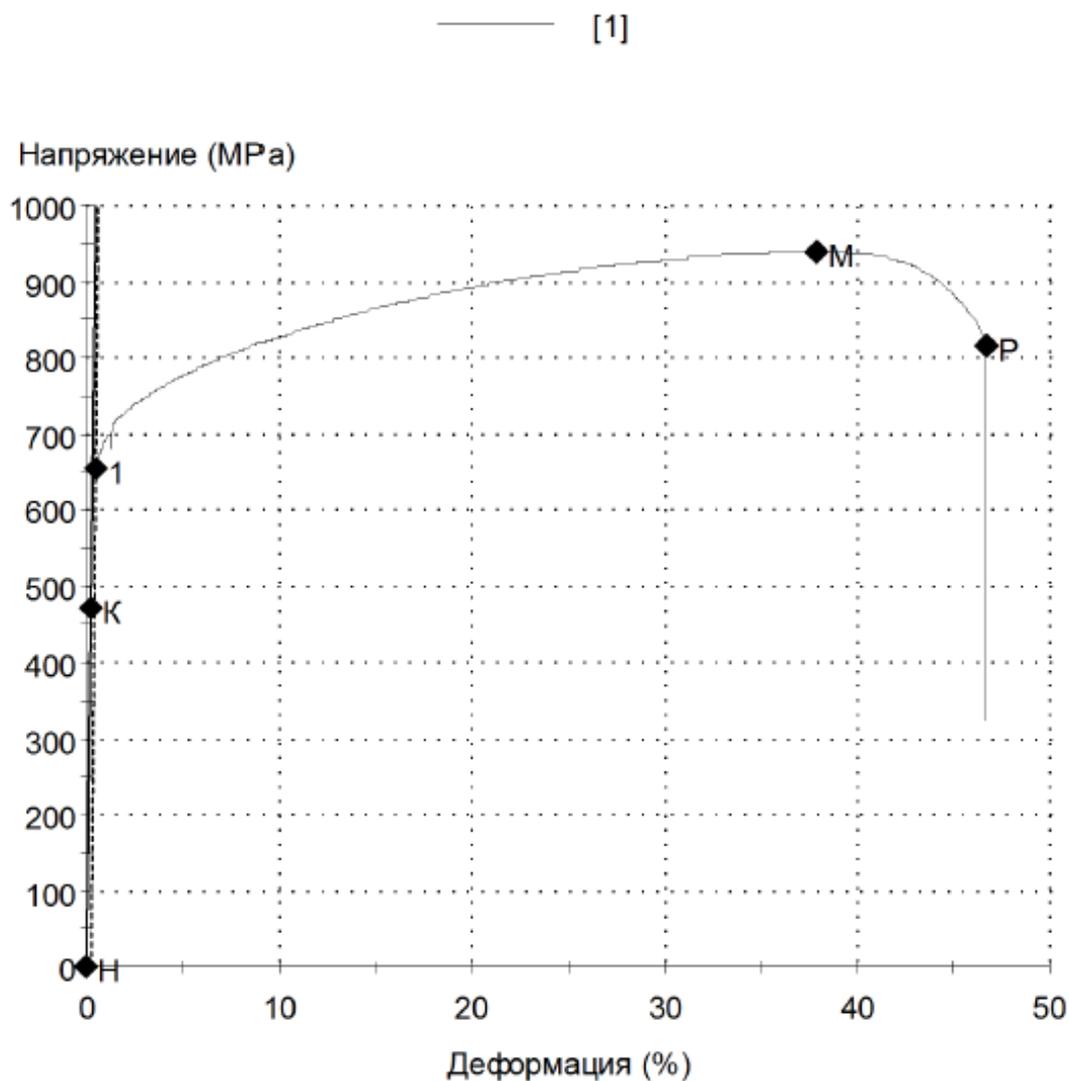
Инженер-технолог: _____

Подпись

Бычкова И.А.

Фамилия, инициалы

« _____ » _____ г.

График растяжения

ОАО "Русполимет"
Центральная заводская лаборатория
Лаборатория физико-механических испытаний

607010 г. Кулебаки
Нижегородской обл.
ул. Восстания, 1

ПРОТОКОЛ № 324, серия 324
результатов испытаний на растяжение
от 29.07.2013 г.

| | | | | | | |
|--|---------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|
| Заказчик | Вид продукции | | | | Оборудование | |
| <i>KПП-2</i> | <i>Кольцо</i> | | | | Испытательная машина Тип: Insight 100 № 10242192 | <i>Экстензометр</i> Тип: 634.31F |
| Марка материала | Номер заказа | Номер плавки | Партия или номер изделия | Шифр | НД на продукцию | |
| <i>AMS 5666</i> | - | <i>E15-47</i> <i>PVCAP</i> | <i>0031</i> | <i>86661311-1</i> <i>ЕД-104Б</i> | <i>AMS 5666F</i> | |
| Режим термообработки | | | | | НД на методы испытания | |
| Подразделение: отжиг: 1598 °F (870°C), выдержка 1 час, охлаждение на воздухе | | | | | <i>ASTM A 370</i> | |

Номер накладной 1053 от 27.07.2013 г.

Дата получения образца: 29.07.2013 г.

Дата проведения испытаний: 29.07.2013 г.

Результаты испытаний на растяжение

| Диаметр образца | | Скорость испытания | | | | Температура испытания | | Предел прочности на растяжение σ_b | | Предел текучести при смещении 0,2 % $\sigma_{0,2}$ | | Относительное удлинение δ | Относительное сужение ψ | Расположение места разрыва |
|------------------|-------------|----------------------|--------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-------------|---|------------|--|------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| | | до предела текучести | | за пределом текучести | | | | | | | | | | |
| дюйм | мм | дюйм/мин | мм/мин | дюйм/мин | мм/мин | °F | °C | ksi | МПа | ksi | МПа | % | | |
| <i>0,246</i> | <i>6,25</i> | <i>0,079</i> | <i>2,000</i> | <i>0,394</i> | <i>10,00</i> <i>0</i> | <i>75,2</i> | <i>24,0</i> | <i>131,4</i> | <i>906</i> | <i>82,6</i> | <i>569</i> | <i>45,0</i> | <i>50,0</i> | <i>По центру расчётной длины</i> |
| <i>AMS 5666F</i> | | | | | | | | ≥ 120 | ≥ 827 | ≥ 60 | ≥ 414 | ≥ 30 | - | |

1. Результаты испытания касаются только образцов, подвергнутых испытаниям.

2. Перепечатка заключения без разрешения начальника испытательной лаборатории запрещается.

3. Сведения, содержащиеся в данном протоколе относительно маркировки и отбора проб, основаны на предоставленной заказчиком информации.

Заключение: Результаты испытаний механических свойств соответствуют AMS 5666F.

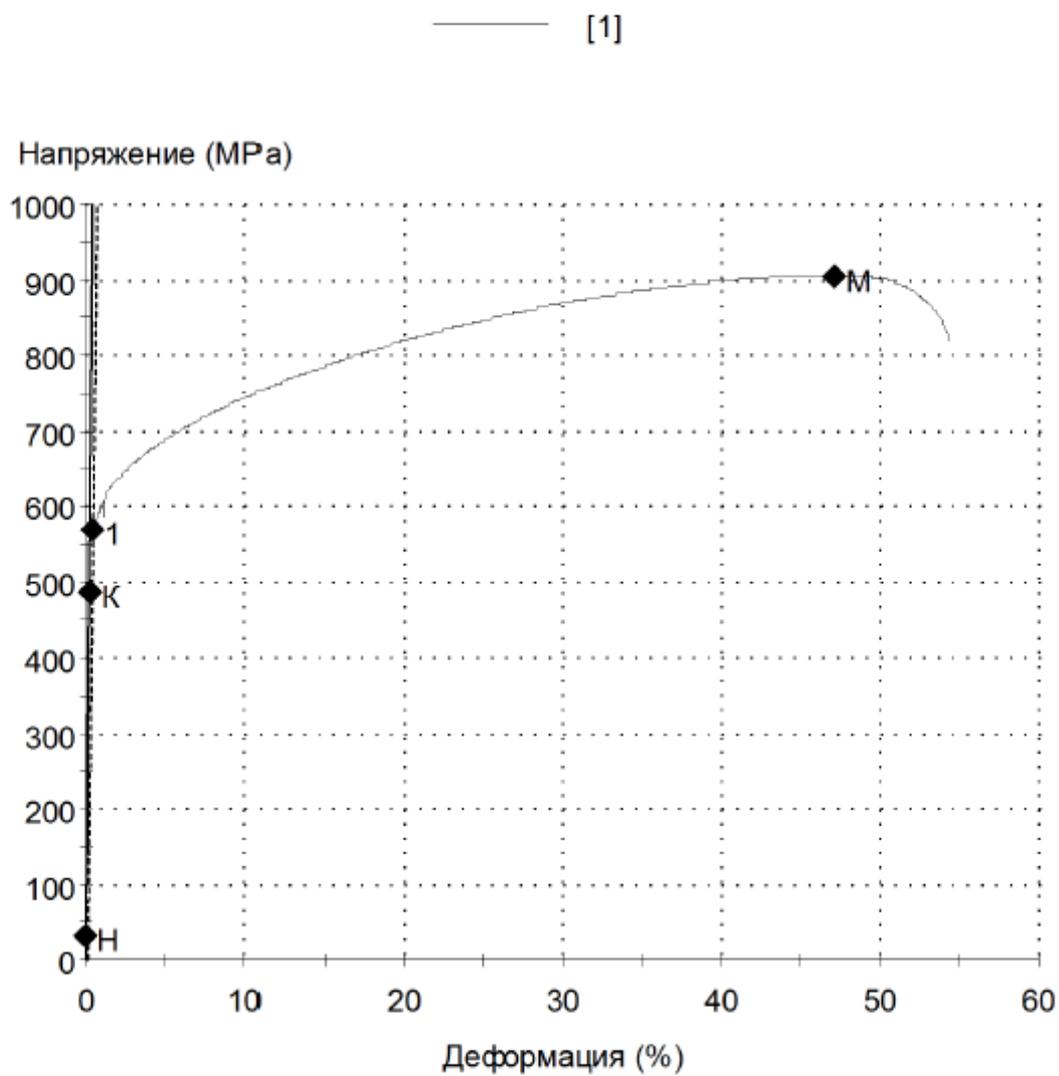
Ведущий инженер лаборатории
физико-механических
испытаний:

Подпись Вошнина О.В.
Фамилия, инициалы
« _____ » _____ г.

Инженер-технолог:

Подпись Бычкова И.А.
Фамилия, инициалы
« _____ » _____ г.

График растяжения



ОАО "Русполлимет"
Центральная заводская лаборатория
Лаборатория физико-механических испытаний

607010 г. Кулебаки
Нижегородской обл.
ул. Восстания, 1

ПРОТОКОЛ № 323, серия 323
результатов испытаний на растяжение
от 29.07.2013 г.

| Заказчик | | Вид продукции | | | | Оборудование | |
|--|--------------|-----------------|--------------------------|---------------------|-----------------|--|------------------------------|
| КПП-2 | | Кольцо | | | | Испытательная машина Тип: Insight 100 № 10242192 | Экстензометр Тип: 634.31F |
| Марка материала | Номер заказа | Номер плавки | Партия или номер изделия | Шифр | НД на продукцию | | |
| AMS 5666 | - | 340930 PVCAR | 0047 | 86661311 ЕД-103Б | AMS 5666F | | |
| Режим термообработки | | | | | | НД на методы испытания | |
| Подразделение: отжиг: 1598 °F (870°C), выдержка 1 час, охлаждение на воздухе | | | | | | ASTM A 370 | |

Номер накладной 1054 от 27.07.2013 г.

Дата получения образца: 29.07.2013 г.

Дата проведения испытаний: 29.07.2013 г.

Результаты испытаний на растяжение

| Диаметр образца | | Скорость испытания | | | | Температура испытания | | Предел прочности на растяжение σ_B | | Предел текучести при смещении 0,2 % $\sigma_{0,2}$ | | Относительное удлинение δ | Относительное сужение ψ | Расположение места разрыва |
|-----------------|------|----------------------|--------|-----------------------|--------|-----------------------|------|---|------------|--|------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| | | до предела текучести | | за пределом текучести | | | | | | | | | | |
| дюйм | мм | дюйм/мин | мм/мин | дюйм/мин | мм/мин | °F | °C | ksi | МПа | ksi | МПа | % | | |
| 0,246 | 6,25 | 0,079 | 2,000 | 0,394 | 10,000 | 75,2 | 24,0 | 131,2 | 904 | 89,2 | 615 | 45,0 | 50,0 | По центру расчётной длины |
| AMS 5666F | | | | | | | | ≥ 120 | ≥ 827 | ≥ 60 | ≥ 414 | ≥ 30 | - | |

1. Результаты испытания касаются только образцов, подвергнутых испытаниям.
2. Перепечатка заключения без разрешения начальника испытательной лаборатории запрещается.
3. Сведения, содержащиеся в данном протоколе относительно маркировки и отбора проб, основаны на предоставленной заказчиком информации.

Заключение: Результаты испытаний механических свойств соответствуют AMS 5666F.

Ведущий инженер лаборатории
физико-механических
испытаний:

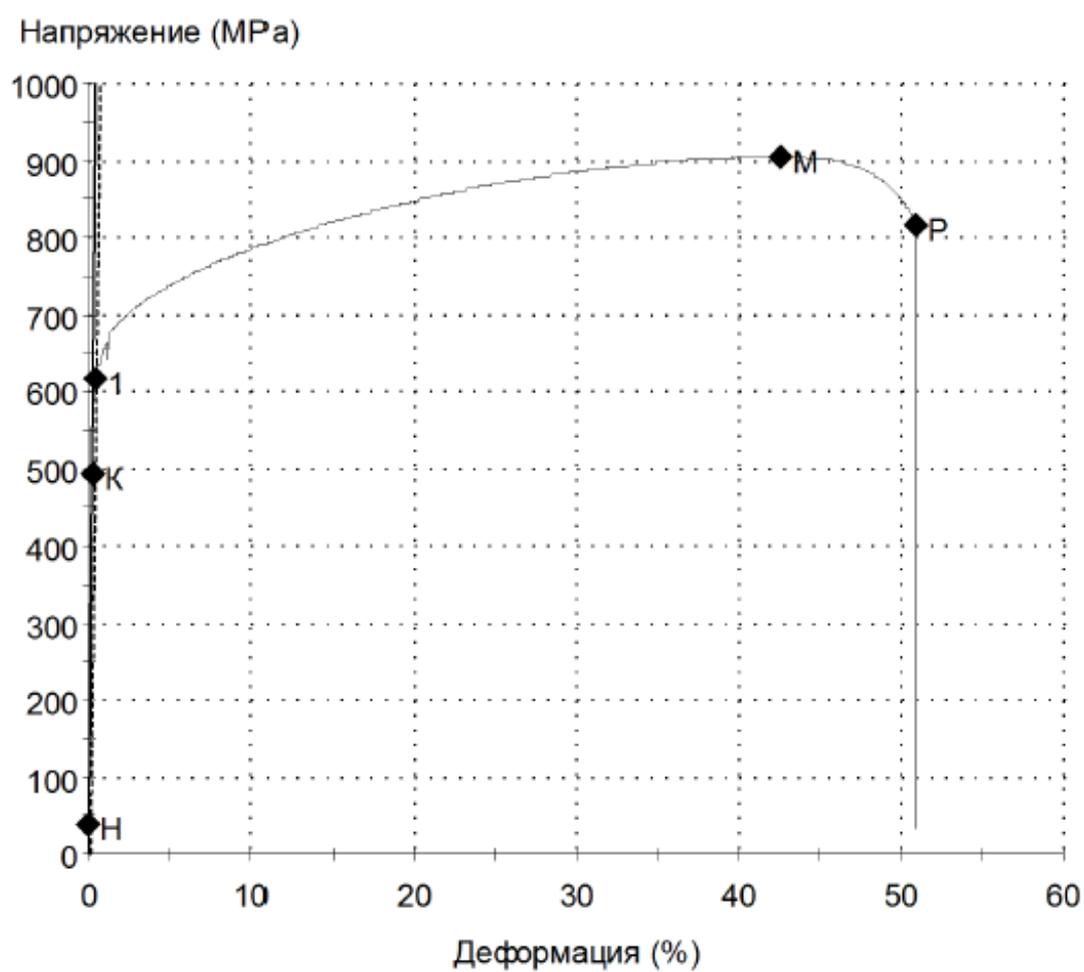
Вошинина О.В.
Подпись
Фамилия, инициалы
«_____» _____ г.

Инженер-технолог:

Бычкова И.А.
Подпись
Фамилия, инициалы
«_____» _____ г.

График растяжения

— [1]



ОАО "Русполимет"
Центральная заводская лаборатория
Лаборатория физико-механических испытаний

607010 г. Кулебаки
Нижегородской обл.
ул. Восстания, 1

ПРОТОКОЛ № 322, серия 322
результатов испытаний на растяжение
от 28.07.2013 г.

| | | | | | | |
|--|---------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|--|-------------------------------------|
| Заказчик | Вид продукции | | | | Оборудование | |
| <i>ПМО</i> | <i>Кольцо</i> | | | | Испытательная машина Тип: Insight 100 № 10242192 | <i>Экстензометр</i> Тип: 634.31F |
| Марка материала | Номер заказа | Номер плавки | Партия или номер изделия | Шифр | НД на продукцию | |
| <i>AMS 5666</i> | - | <i>E15-48 PVCAT</i> | <i>6</i> | <i>ОЕД-116Т</i> | <i>AMS 5666F</i> | |
| Режим термообработки | | | | | НД на методы испытания | |
| Подразделение: отжиг: 1598 °F (870°C), выдержка 1 час, охлаждение на воздухе | | | | | <i>ASTM A 370</i> | |

Номер накладной 1070 от 27.07.2013 г.

Дата получения образца: 28.07.2013 г.

Дата проведения испытаний: 28.07.2013 г.

Результаты испытаний на растяжение

| Диаметр образца | | Скорость испытания | | | | Температура испытания | | Предел прочности на растяжение σ_B | | Предел текучести при смещении 0,2 % $\sigma_{0,2}$ | | Относительное удлинение δ | Относительное сужение ψ | Расположение места разрыва |
|------------------|-------------|----------------------|--------------|-----------------------|---------------|-----------------------|-------------|---|------------|--|------------|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| | | до предела текучести | | за пределом текучести | | | | | | | | | | |
| дюйм | мм | дюйм/мин | мм/мин | дюйм/мин | мм/мин | °F | °C | ksi | МПа | ksi | МПа | % | | |
| <i>0,246</i> | <i>6,26</i> | <i>0,079</i> | <i>2,000</i> | <i>0,394</i> | <i>10,000</i> | <i>75,2</i> | <i>24,0</i> | <i>134,4</i> | <i>927</i> | <i>79,3</i> | <i>547</i> | <i>46,0</i> | <i>55,0</i> | <i>По центру расчётной длины</i> |
| <i>AMS 5666F</i> | | | | | | | | ≥ 120 | ≥ 827 | ≥ 60 | ≥ 414 | ≥ 30 | - | |

1. Результаты испытания касаются только образцов, подвергнутых испытанию.
2. Перепечатка заключения без разрешения начальника испытательной лаборатории запрещается.
3. Сведения, содержащиеся в данном протоколе относительно маркировки и отбора проб, основаны на предоставленной заказчиком информации.

Заключение: Результаты испытаний механических свойств соответствуют AMS 5666F.

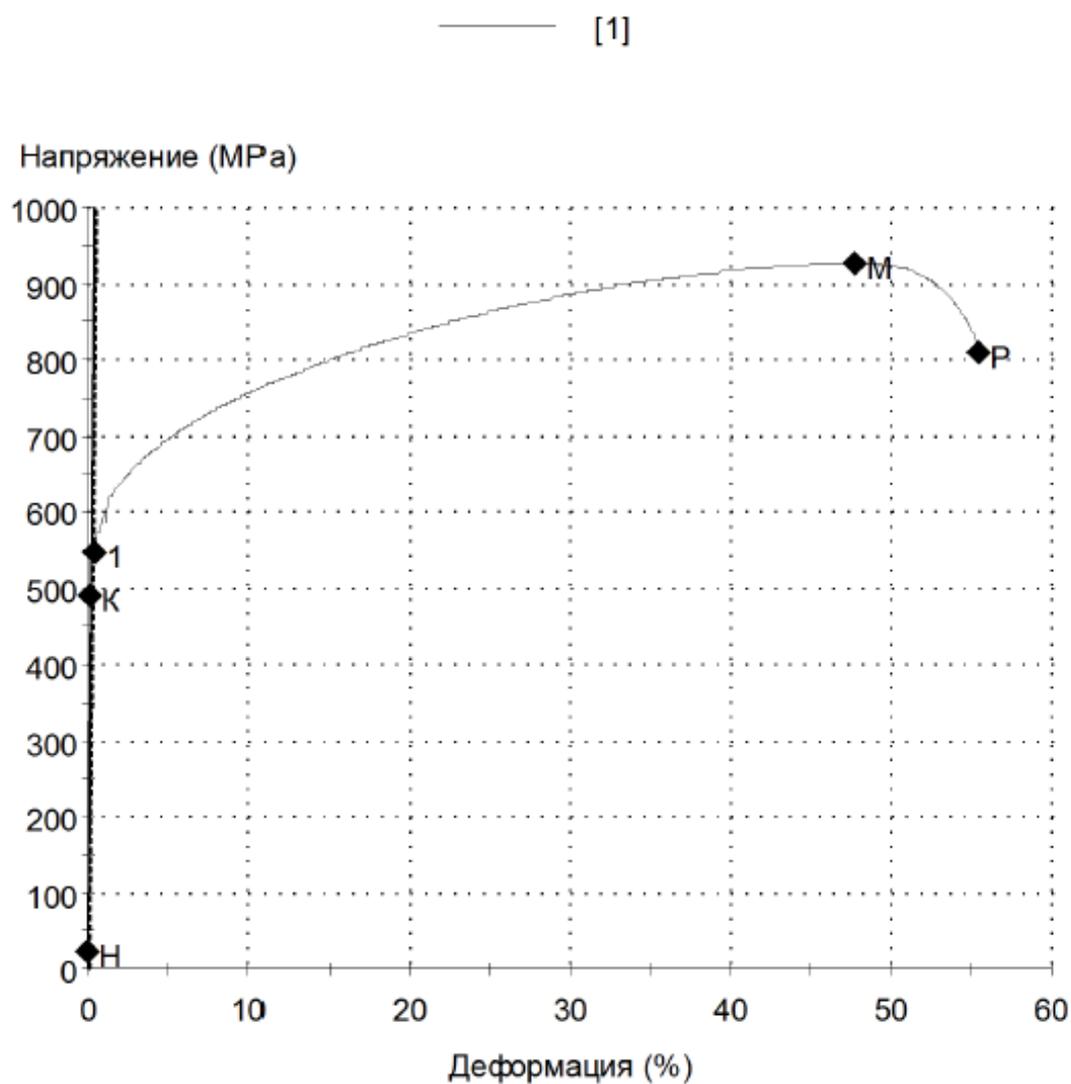
Ведущий инженер лаборатории
физико-механических
испытаний:

Подпись Вошина О.В.
Фамилия, инициалы
«_____» _____ г.

Инженер-технолог:

Подпись Бычкова И.А.
Фамилия, инициалы
«_____» _____ г.

График растяжения



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Акты внедрения результатов исследований



«Затверджую»

Керівник передільного
виробництва – головний
прокатник ПАТ
«Дніпроспецсталь»



О.О. Ярошенко
31.07. 2012 р.

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

Комісія у складі представників ПАТ «Дніпроспецсталь»: заступник начальника центральної заводської лабораторії к.т.н. Тумко О.М., начальника ковальського-пресового цеху Лесничего В.Г., та представників Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА): проректор з наукової роботи та зовнішніх зв'язків проф., д.т.н., Алієв І.С., проф. кафедри «Автоматизовані металургійні машини та обладнання», д.т.н., Сатонін О.В. склали цей акт в тім, що в результати проведених спільних наукових досліджень докторантів кафедри «Обробка металів тиском» Маркова О.Є., Жбанкова Я.Г. та аспіранта Таган Л.В. впроваджені на ПАТ «Дніпроспецсталь» наступні результати:

- нові ресурсозберігаючі технологічні процеси та режими кування крупних поковок зі зливків нової конфігурації на основі використання



нових способів деформування спеціальним інструментом, що забезпечує підвищення якості поковок;

рекомендації та методики з розробки нових енергозберігаючих технологічних процесів кування крупних поковок, креслення ковальського оснащення що забезпечують додаткові макрозсувні деформації та появу в осьовій зоні стискаючих напружень які сприяють заварюванню внутрішніх дефектів;

- нова конструкція виливниці для виготовлення ковальських зливків із спрямованою кристалізацією, що забезпечує підвищення якості ковальських заготовок та коефіцієнту виходу придатного;

- програмне забезпечення з автоматизованого розрахунку та скінчено-елементного моделювання процесів кування крупних поковок «Big Forge».

Нові технологічні процеси кування забезпечили збільшення коефіцієнту виходу придатного при виготовленні крупних поковок з 55-65% до 68-77 %, за рахунок зменшення прибуткової частини злитка, придатного залишку та кількості угару; знизити коефіцієнт уковування з 5 до 2,5 без зменшення механічних властивостей деталей відповідального призначення, за рахунок використання нових схем кування що забезпечують інтенсивні деформації макрозсуву та усунення енергоємних операцій, це дозволило зменшити кількість нагрівань та витрати природного газу на 25-35% та підвищити продуктивність процесів кування. Це в цілому дозволило знизити матеріальні витрати на виробництво крупних поковок на 10-15%.



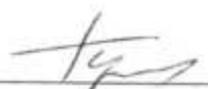
Реальний економічний ефект становив 600 тис. грн. за рівнем цін 2012 року. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 1100 тис. грн. за рівнем цін на 2012 рік.

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

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

ПАО «Дніпроспецсталь»

Заступник начальника центральної заводської лабораторії, к.т.н.

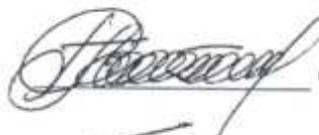

 О.М. Тумко
 Начальник ковальського-пресового цеху


 В.Г. Лесничий

ДІМА

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


 І.С. Алієв
 Проф. кафедри «Автоматизовані металургійні машини та обладнання», д.т.н.


 О.В. Сатонін

[02.02.079-210]

| | | |
|--|---|--|
| МОТОР СІЧ | Україна | МОТОР СІЧ |
| 69068, м. Запоріжжя, пр. Моторобудівників, 15 Факс: (061) 720-50-00 E-mail: motor@motorsich.com www.motorsich.com |  | 69068, г. Запоріжжя, пр. Моторостроїтелів, 15 Факс: (061) 720-50-00 E-mail: motor@motorsich.com www.motorsich.com |
|  | | |
| | | «Затверджую» Технічний директор, к.т.н. П.Д. Жеманюк « » _____ |

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Комісія у складі: головного технолога, к.т.н. Мозгового В.Ф. і зас. начальника управління головного технолога, д.т.н., проф. Качана О.Я. склала цей акт в тім, що за науково-технічними дослідженнями докторанта кафедри «Обробка металів тиском» Донбаської державної машинобудівної академії Жбанкова Я.Г. впроваджено на АТ «Мотор Січ» наступні результати:

- рекомендації та методика з розрахунку відновлення пластичності металів в процесі паузи при ізотермічному гарячому деформуванні, що дозволило встановити раціональні режими виготовлення поковок та підвищити технологічну пластичність низько пластичних металів;

- рекомендації та методика з побудови кривих течії металів за значеннями стандартних величин в вигляді межі течії $\sigma_{0.2}$ та міцності σ_B , що дозволяє встановлювати механічні властивості вуглецевих та легованих сталей в різних швидкісних діапазонах при певних температурах і значно спрощує та прискорює розрахунки процесів пластичного деформування в нових процесів в ковальському виробництві ПАТ «Мотор Січ»;

- методика моделювання мікроструктури виробів із сталей в процесах гарячого пластичного деформування, що дозволяє встановити раціональні режими кування і штампування;

- технологічні процеси гарячого деформування поковок типу дисків та валів які забезпечили підвищення якості та зниження браку.

Нові технологічні рекомендації забезпечили зменшення кількості браку на 10% за рахунок підвищення технологічної пластичності низько пластичних металів. Методика моделювання мікроструктури в процесах гарячого деформування дозволила отримувати вироби із прогнозованими властивостями. Рекомендації з розрахунку механічних властивостей метала за стандартними величинами, дозволили скоротити витрати на проведення механічних випробувань та скоротити на 30% час, що витрачається на підготовку технологічного процесу пов'язаний із розрахунками технологічних процесів методом скінчених елементів.

Це в цілому дозволило знизити матеріальні витрати на виробництво поковок на 5–10 %.

Реальний економічний ефект становив 600 тис. грн. за рівнем цін 2015 року. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 1100 тис. грн. за рівнем цін на 2015 рік.

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

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

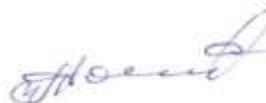
Головний технолог, к.т.н.



В.Ф. Мозговой

Зас. начальника

Управління Головного технолога,
д.т.н., проф.



О.Я. Качан

«Затверджую»

Директор металургійного виробництва

ПАТ «НКМЗ»

Олешко В.М.



Акт впровадження

Комісія у складі представників ПАТ «НКМЗ»: начальник технічного бюро поковок, к.т.н. Грачов І.А., заст. начальника ковальсько-пресового цеха №3 Міщенко С.Л., та представників Донбаської державної машинобудівної академії (ДЦМА): заступник завідувача кафедри «Обробка металів тиском», к.т.н., Абхарі П.Б., доц. кафедри «Обробка металів тиском», д.т.н., Марков О.Є. склали цей акт в тім, що в результаті проведених спільних наукових досліджень докторантів кафедри «Обробка металів тиском» Алієвої Л.І., Жбанкова Я.Г. та аспірантів Таган Л.В., Швець О.А. впроваджені на ПАТ «НКМЗ» наступні результати:

- нові технологічні процеси кування поковок типу циліндрів та труб на базі використання операції закритого прошивання та наступного протягування заготовки, що забезпечують зменшення кількості переходів кування та як наслідок зменшення кількості нагрівів;

- нові технологічні процеси кування поковок типу дисків із використанням елементів штампування видавлюванням, що дозволяють підвищити точність поковок, та зменшити об'єм напусків;

- методики розрахунку параметрів формозміни в процесах кування крупних поковок що основані на використанні схем комбінованого штампування;

- нові технологічні процеси кування що основані на комбінованому кінематичному та силовому впливі інструменту на заготовку.

Нові технологічні процеси кування забезпечили зменшення кількості переходів кування та дозволили зменшити кількість підігрівів та витрати природного газу на 10–15% та підвищити продуктивність процесів кування. Крім цього підвищилась точність поковок та зменшилась металоємність виготовлення поковок типу дисків на 5%. Це в цілому дозволило знизити матеріальні витрати на виробництво крупних поковок на 5–10%.

Реальний економічний ефект становив 900 тис. грн. за рівнем цін 2013 року. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 1 700 тис. грн. за рівнем цін на 2013 рік.

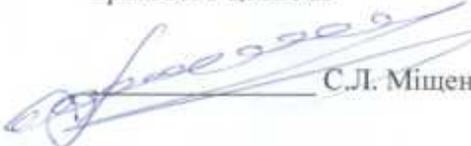
Акт призначений для спеціалізованих вчених рад з захисту докторських та кандидатських дисертацій та не є основою для висунення фінансових вимог.

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

ПАТ «НКМЗ»

Начальник технічного бюро
поковок, к.т.н.

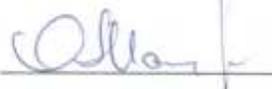

І.А. Грачов
Заст. начальника ковальсько-
пресового цеха №3


С.Л. Міщенко

ДДМА

Заст. завідувача кафедри «Обробка
металів тиском», к.т.н.


П.Б. Абхарі
Доц. кафедри «Обробка металів
тиском», д.т.н.


О.Є.Марков

«УТВЕРЖДАЮ»:

Директор производства
металлургического и шахтно-
проходческого оборудования
ПАО «Новокраматорский
машиностроительный завод»

к.т.н. Титаренко А.И.



«15» 02 2013

Акт внедрения результатов комплекса научно-исследовательских работ проведенных между ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» и Донбасской государственной машиностроительной академией

В результате проведенных совместных научных исследований под руководством д.т.н., проф. Алиева И.С. внедрены на ПАО «НKMЗ» следующие результаты:

- методы расчета деформированного состояния заготовки в процессах пластического деформирования по схемам, обеспечивающим комбинирование кинематического и силового влияния инструмента на заготовку;
- методики расчета предельного формоизменения в процессах пластического деформирования, которые позволяют прогнозировать образование трещин в зависимости от термомеханического режима штамповки,ковки и прокатки;
- режимы пластического деформирования заготовок с неоднородным температурным полем, которые обеспечивают повышение качества конечного изделия за счет увеличения уровня

деформаций, которые возникают в центральной дефектной зоне исходной заготовки;

- новые схемы пластического деформирования, которые обеспечивают повышение уровня сдвиговых деформаций в заготовке и как следствие повышают качество конечного изделия.

Новые технологические разработки обеспечили уменьшение себестоимости продукции ПАО «НКМЗ».

За счет снижения трудоемкости проектно-технологических работ, а также за счет расширения сортамента, повышения качества и увеличения выхода годного металлопродукции, экономический эффект составил 2 500 тыс. грн. по уровню цен 2013 года.

Настоящий акт предназначен для специализированных ученых советов по защите докторских и кандидатских диссертаций и не является основанием для предъявления финансовых требований.

Расчет экономического эффекта не приводится, так как содержит элементы коммерческой тайны ПАО «НКМЗ».

Главный конструктор производства
металлургического и шахтно-проходческого
оборудования



Ю.В. Сусь

УТВЕРЖДАЮ:

Директор

ЧАО «Финпрофиль»

пгт. Печенеги

 Башкова В.В.

« 2 » 09 2014 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Результаты научно-технических разработок докторантов кафедры «Обработка металлов давлением» Донбасской государственной машиностроительной академии внедрены в ЧАО «Финпрофиль». Внедрение получили следующие технологические разработки:

- математические модели процессов пластического деформирования сложнопрофилированных изделий;
- технологические расчеты, проведенные на основе метода конечных элементов, узлов и деталей гидравлического пресса;
- расчеты инструмента для производства изделий сложных конфигураций с повышенной точностью.

Экономический эффект за счёт уточнения размеров деталей и узлов пресса и снижения его металлоемкости, а также за счет внедрения других технологических разработок составляет 20 тыс. грн. по уровню цен на конец 2014 года. Ожидаемый эффект составляет 240 тыс. грн. По уровню цен на конец 2014 года. Расчеты экономического эффекта не прилагаются, т.к. содержат элементы коммерческой тайны ЧАО «Финпрофиль». Данный акт не является основанием для предъявления, каких либо экономических претензий.

Технический директор
ЧАО «Финпрофиль»
Горохов В.А.



«Затверджую»

Заступник директора з виробництва

ПАТ «Енергомашспецсталь»


 The image shows a handwritten signature in blue ink over a blue circular official stamp. The stamp contains the text: 'ПАТ «ЕНЕРГОМАШ СПЕЦСТАЛЬ»', '00210602', and 'Україна м. Кривий Ріг'. The signature is written over the stamp and extends to the right.

Алієв С.В.

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

Комісія у складі представників ПАТ «Енергомашспецсталь»: начальник технічного управління Панов В.В., заступник начальника технічного управління Станкова Ю.М., та представників Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА): проректор з наукової роботи та зовнішніх зв'язків проф., д.т.н., Алієв І.С., проф. кафедри «Автоматизовані металургійні машини та обладнання», д.т.н., Сатонін О.В. склали цей акт в тім, що в результаті проведених спільних наукових досліджень докторантів кафедри «Обробка металів тиском» Алієвої Л.І., Жбанкова Я.Г. та аспірантів Таган Л.В., Швець О.А. впроваджені на ПАТ «Енергомашспецсталь» наступні результати:

- нові технологічні процеси кування поковок валів і дисків із використанням операції осадження, що базуються на попередньому профілюванні вихідної заготовки в вигляді злитка, і забезпечують підвищення однорідності та рівня механічних властивостей поковки;

- методика розрахунку накопичення пошкоджень в процесах деформування заготовок за складними режимами та розроблені на її основі нові технології виготовлення поковок що забезпечують підвищення технологічної деформуємості, зменшують кількість нагрівань та відсоток браку пов'язаний із поверхневими тріщинами;

- нові технологічні процеси що основані на використанні схем деформування із комбінованим кінематичним та силовим впливом інструменту на заготовку.

Нові технологічні процеси кування забезпечили підвищення якості поковок, дозволили зменшити кількість підігрівів та витрати природного газу на 15–20% та підвищити продуктивність процесів кування. Це в цілому дозволило знизити матеріальні витрати на виробництво крупних поковок на 5–10%.

Реальний економічний ефект становив 550 тис. грн. за рівнем цін 2013 року. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 1000 тис. грн. за рівнем цін на 2013 рік.

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

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

ПАТ «Енергомашспецсталь»

Начальника технічного
управління


_____ В.В. Панов

Заступник начальника технічного
управління

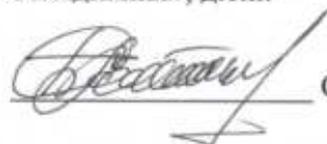

_____ Ю.М. Станков

ДЦМА

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


_____ І.С. Алієв

Проф. кафедри «Автоматизовані
металургійні машини та
обладнання», д.т.н.


_____ О.В. Сатонін

Затверджую

Головний директор
 ПАТ «Енергомашспецсталь»
 О.А. Селютін

11 2014



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

В результаті проведених спільних наукових досліджень докторанта кафедри «Обробка металів тиском» Жбанкова Я.Г. та аспіранта Таган Л.В. впроваджені на ПАТ «Енергомашспецсталь» наступні результати:

- нові ресурсозберігаючі технологічні процеси кування крупних поковок типу дисків зі зливків на основі використання нових способів деформування, що забезпечують підвищення якості поковок за рахунок зменшення неоднорідності розподілу деформацій в поковці;
- рекомендації та методика розрахунку нових енергозберігаючих процесів кування крупних поковок типу дисків на основі способу осадження ковальських зливків вузьким бойком, що забезпечують отримання виробів з мінімальними відхиленнями форми та напусками;
- методику розрахунку режимів кування малопластичних матеріалів деформуванням із паузами, що забезпечує підвищення

технологічної пластичності матеріалів, що використовуються на ПАТ «Енергомашспецсталь».

Нові технологічні процеси кування забезпечили збільшення коефіцієнту виходу придатного при виготовленні крупних поковок на 5-30%, за рахунок зменшення величини напусків, підвищення точності поковок; знизити об'єм браку поковок типу дисків, що виготовляються з мало пластичних матеріалів із застосуванням операції осадження. Це в цілому дозволило знизити матеріальні витрати на виробництво крупних поковок типу дисків на 10–15%.

Реальний економічний ефект становив 500 тис. грн. за рівнем цін на грудень 2014 року. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 1000 тис. грн. за рівнем цін на грудень 2014 року.

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

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

ПАО «Енергомашспецсталь»

Начальник центральної заводської лабораторії

 А.М. Коломоєць

Начальник ковальського-пресового цеху

 В.В. Панов

ДІМА

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

 І.С. Алієв

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

 О.С. Марков

ЗАТВЕРДЖУЮ:
ректор Донбаської державної
машинобудівної академії
проф. Федорінов В.А.

« 03 » _____ 2012 р.

ДОВІДКА

про пайову участь доцента, к. т. н. Маркова Олега Євгенійовича, ст. викл., к. т. н. Жбанкова Ярослава Геннадійовича і аспірантки Таган Любові Вікторівни в економічному ефекті від результатів впровадження спільних науково-дослідних робіт Донбаської державної машинобудівної академії з ПАТ «Дніпроспецсталь».

Результати дисертаційних робіт докторанта, доцента, к. т. н. Маркова О. Є., ст. викл., к. т. н. Жбанкова Я. Г. і аспірантки Таган Л. В., а саме:

- нові ресурсозберігаючі технологічні процеси кування крупних поковок (валів, плит, дисків, кілець) зі зливків нової конфігурації на основі використання нових способів деформування спеціальним інструментом, що забезпечує підвищення якості поковок;

- рекомендації та методики з розробки нових енергозберігаючих технологічних процесів кування крупних поковок, креслення ковальського оснащення що забезпечують додаткові макросувні деформації та появу в осьовій зоні стискаючих напружень які сприяють заварюванню внутрішніх дефектів;

- нова конструкція виливниці для виготовлення ковальських зливків із спрямованою кристалізацією, що забезпечує підвищення якості ковальських заготовок та коефіцієнту виходу придатного;

- програмне забезпечення з автоматизованого розрахунку та скінчено-елементного моделювання процесів кування крупних поковок «Big Forge».

були використанні на ПАТ «Дніпроспецсталь» у рамках спільних науково-дослідних робіт з вдосконалення технології та оснащення для виробництва крупних поковок відповідального призначення. Реальний економічний ефект становив 600 тис. грн. за рівнем цін 2012 року. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 1100 тис. грн. за рівнем цін на 2012 рік.

Пайова участь виконавців роботи складала:

| П.І.Б. | Відсоток, % | Економічний ефект, грн. | |
|---------------|----------------|-------------------------|------------|
| | | Реальний | Очікуваний |
| Марков О. Є. | 41,6% | 250 000 | 457 600 |
| Жбанков Я. Г. | 41,6% | 250 000 | 457 600 |
| Таган Л. В. | 16,8% | 100 000 | 184 800 |
| Усього | 100% | 600 000 | 1 100 000 |

Керівник науково-дослідної роботи,
д. т. н., проф.



I.S. Aliev

ЗАТВЕРДЖУЮ:ректор Донбаської державної
машинобудівної академії
проф. Федорінов В.А.

«04» _____ 2013 р.

ДОВІДКА

про пайову участь доцента к.т.н. Алієвої Лейли Іграмотдинівни та ст. викл., к. т. н. Жбанкова Ярослава Геннадійовича в економічному ефекті від результатів впровадження спільних науково-дослідних робіт Донбаської державної машинобудівної академії з ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод».

Результати дисертаційної роботи докторанта доцента Алієвої Л.І. та докторанта ст. викл., к. т. н. Жбанкова Я. Г., а саме:

- методи розрахунку деформованого стану заготовки в процесах пластичного деформування за схемами, що забезпечують комбінований кінематичний та силовий вплив інструменту на заготовку;

- методики розрахунку граничної формозміни в процесах пластичного деформування, що дозволяють прогнозувати утворення тріщин в залежності від термомеханічного режиму штампування, кування та прокатки;

- нові схеми пластичного деформування, які забезпечують підвищення рівня деформацій зсуву в заготовці і як наслідок підвищують якість кінцевого виробу;

були використані на ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» у рамках спільних науково-дослідних робіт з вдосконалення технологій та обладнання для виробництва гарячекатаних та холоднокатаних листів та полос. Економічний ефект становив 2500 тис. грн. за рівнем цін 2013 року.

Пайова участь виконавця роботи складає:

| П.І.Б. | Відсоток, % | Економічний ефект, грн. |
|---------------|----------------|-------------------------|
| Алієва Л.І. | 30% | 750 000 |
| Жбанков Я. Г. | 28% | 700 000 |

Керівник науково-дослідної роботи,
д. т. н., проф.



I.S. Алієв

ЗАТВЕРДЖУЮ:
ректор Донбаської державної
машинобудівної академії
проф. Федорін В.А.



« 26 » 04 2013 р.

ДОВІДКА

про пайову участь доцента, к. т. н. Алієвої Лейли Іграмотдинівни, ст. викл., к. т. н. Жбанкова Ярослава Геннадійовича і аспірантів Таган Любові Вікторівни і Швеця Олексія Анатолійовича в економічному ефекті від результатів впровадження спільних науково-дослідних робіт Донбаської державної машинобудівної академії з ПАТ «Енергомашспецсталь».

Результати дисертаційних робіт докторантів, доцента, к. т. н. Алієвої Л.І., ст. викл., к. т. н. Жбанкова Я. Г. і аспірантів Таган Л. В., Швеця О.А., а саме:

- нові технологічні процеси кування поковок валів і дисків із використанням операції осадження, що базуються на попередньому профілюванні вихідної заготовки в вигляді злитка, і забезпечують підвищення однорідності та рівня механічних властивостей поковки;

- методика розрахунку накопичення пошкоджень в процесах деформування заготовок за складними режимами та розроблені на її основі нові технології виготовлення поковок що забезпечують підвищення технологічної деформуємості, зменшують кількість нагрівань та відсоток браку пов'язаний із поверхневими тріщинами;

- нові технологічні процеси що ґрунтуються на використанні схем деформування із комбінованим кінематичним та силовим впливом інструменту на заготовку. були використанні на ПАТ «Енергомашспецсталь» у рамках спільних науково-дослідних робіт з вдосконалення технологій та оснащення для виробництва крупних поковок відповідального призначення. Реальний економічний ефект становив 550 тис. грн. за рівнем цін 2013 року. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 1000 тис. грн. за рівнем цін на 2013 рік.

Пайова участь виконавців роботи складає:

| П.І.Б. | Відсоток, % | Економічний ефект, грн. | |
|---------------|----------------|-------------------------|------------|
| | | Реальний | Очікуваний |
| Алієва Л.І. | 40% | 220 000 | 400 000 |
| Жбанков Я. Г. | 40% | 220 000 | 400 000 |
| Таган Л. В. | 10% | 55 000 | 100 000 |
| Швець О.А. | 10% | 55 000 | 100 000 |
| Усього | 100% | 550 000 | 1 000 000 |

Керівник науково-дослідної роботи,
д. т. н., проф.

І.С. Алієва