

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



На правах рукописи

Таупек Иван Михайлович

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

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
доцент П.Л. Алексеев

Москва – 2015

Оглавление

Введение	3
Глава 1 Литературный обзор	7
1.1 Состояние технологииковки	7
1.2 Способы экспериментальных исследований процессовковки	17
1.3 Моделирование операций ОМД с использованием численных методов	22
1.4 Примеры компьютерного моделирования операцийковки	31
Глава 2 Методики моделирования процессовковки	35
2.1 Сравнение программ конечно-элементного моделирования	35
2.2. Создание реологической модели материала в DEFORM	45
2.3 Оценка деформации металла при протяжке с помощью исследования пробного объёма	50
Глава 3 Методика проектирования и моделирования технологического процессаковки валка	77
3.1 Проектирование технологического процесса и задание условий моделирования	77
3.2 Анализ результатов моделирования операций технологического процесса	80
Глава 4 Влияние технологических параметров на проработку осевой зоны заготовки при ковке на РОМ	119
4.1 Моделирование процесса	120
4.3 Построение уравнений регрессии влияния технологических факторов процесса	126
Глава 5 Результаты анализа и совершенствования технологических процессов	134
5.1 Анализ технологического процессаковки круглой штанги	134
5.2 Анализ технологического процессаковки полой поковки на РОМ	149
5.3 Совершенствование процессаковки валка для сортопрокатного стана	162
Заключение	173
Список литературы	175
Приложения	182

Введение

Кованные гладкие и ступенчатые валы являются ответственными деталями машиностроения, широко применяемым в промышленности. К ним относятся такие разнообразные изделия как прокатные валки, ротора турбин и др. Повышение их качества является актуальной задачей.

В настоящее время одними из ключевых параметров, необходимых для получения высококачественных изделий ответственного назначения способамиковки являются исследование и управление деформационным состоянием металла. При этом многие аспекты различных процессовковки еще недостаточно изучены, что сдерживает разработку технологий, позволяющих совершенствовать существующие и разрабатывать новые технологические процессы изготовления деталей. Во многом это связано со сложностью процессов, происходящих при пластическом течении металла. Классические методы исследования по большей части применяются для относительно простых процессов (либо требуют ввода допущений и упрощений). Применяемые различные приближенные теоретические методы сложны в освоении и требуют тщательного подхода при их применении. Поэтому с вступлением в век информационных технологий всё большее место в процессе исследований технологических процессовковки (и обработки металлов давлением в целом) занимает компьютерное моделирование с использованием программных комплексов, основанных на численных методах решения дифференциальных уравнений. Значительная часть подобных программных пакетов использует метод конечных элементов.

Первые опыты внедрения компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением в западной промышленности относятся к 80-ым, а в отечественной – к 90-ым годам XX века. Шаг за шагом исследование с использованием конечно-элементных программных пакетов стали важным и повседневным этапом разработки и совершенствования технологических процессов по всему миру.

Современные программные комплексы позволяют с высокой степенью достоверности и точности определять форму готовой поковки, распределения температуры, деформаций и напряжений по её объёму, потоки течения металла, возможность разрушения заготовки, износ инструмента. Применение подобных вычислительных комплексов позволяет исследовать, отработать и оптимизировать технологические процессы, используя лишь компьютер, а не дорогостоящие промышленные эксперименты. Благодаря этому существенно сокращаются сроки получения результатов, возникает возможность рассмотреть огромное количество вариантов протекания интересующего процесса, а также буквально заглянуть внутрь него, что приводит к серьезным изменениям в подходе к разработке технологических процессов.

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

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Провести анализ путей совершенствования технологических процессов ковки валов с применением компьютерного моделирования.
2. Провести сравнение различных программных пакетов конечно-элементного моделирования на примере осадки цилиндрических образцов. Осуществить научно обоснованный выбор программного средства компьютерного моделирования для проведения исследований.
3. Разработать методику обработки справочных данных для построения математической модели реологических свойств материала в программном комплексе DEFORM. Провести проверку адекватности результатов моделирования деформации образцов с импортированием в систему моделирования результатов обработки справочных данных по реологии материала.
4. Разработать методику оценки деформации металла при моделировании технологических процессов ковки валов. Используя данную методику оценить влияние различных типов бойков на напряжённо-деформированное состояние (НДС) заготовки при протяжке.
5. Установить влияние технологических факторов процесса ковки вала на радиально-обжимной машине на напряжённо-деформированное состояние металла в осевой зоне заготовки и разработать математические модели процесса, позволяющие оценить значения НДС.
6. Выполнить моделирование в программных пакетах, использующих метод конечных элементов, технологических процессов ковки крупногабаритных заготовок с целью установления связи между показателями качества готовых изделий и технологическими режимами обработки, формы инструмента и размерами заготовки.
7. Разработать рекомендации по промышленной реализации разработанных мероприятий по совершенствованию режимов ковки крупногабаритных заготовок.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана методика обработки справочных данных для построения математической модели реологических свойств материалов для применения в программном комплексе DEFORM. Используя данную методику, созданы модели для жаропрочных сплавов ХН56ВМТЮ (ЭП199) и ХН62ВМЮТ (ЭП708).

2. Создана методика оценки деформации металла с помощью исследования пробного объёма, позволяющая наглядно оценить направление течения и характер формоизменения металла в отдельных областях заготовки.
3. Созданы математические модели влияния технологических параметров процесса ковки валов на радиально-обжимной машине (величина угла заходного участка бойка и продольная подача) на напряжённо–деформированное состояние металла (значения интенсивности напряжений и интенсивности деформаций) осевой зоны заготовки из жаропрочного сплава ХН56ВМТЮ (ЭП199), позволяющие уточнить существующие методики анализа процесса радиальной ковки.

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

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

Произведен анализ технологического процесса ковки валка для сортопрокатного стана из стали 9Х2МФ на прессе усилием 30 МН в условиях кузнечно-прессового цеха ОАО «ЭЗТМ». Результаты моделирования позволили разработать способы совершенствования применяемого технологического процесса и устранить появление таких дефектов, как продольные торцевые трещины в шейке валка и подприбыльные кольцевые трещины. Для их устранения было предложено и внедрено в технологический процесс использование: верхней сферической плиты для осадки, а также изменение последовательности единичных обжатий и подач при протяжке, позволившее значительно уменьшить (вплоть до полного устранения) появление дефектов.

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

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Сравнение программ конечно-элементного моделирования на примере DEFORM и Simufact Forming.
2. Обработка справочных данных для создания реологической модели материала в DEFORM на примере жаропрочного сплава ХН56ВМТЮ (ЭП199).
3. Оценка деформации металла с помощью исследования пробного объёма в процессе протяжки цилиндрической заготовки с использованием бойков различных типов.
4. Проектирование, моделирование и анализ технологического процесса ковки валка для сортопрокатного стана из стали 9Х2МФ.
5. Влияние технологических параметров на напряжённо–деформированное состояние осевой зоны заготовки при ковке на радиально–обжимной машине.
6. Результаты анализа и совершенствования технологических процессов ковки гладких и ступенчатых валов.

Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры ММТ Электростальского политехнического института, кафедры ТОММ Старооскольского технологического института, и отдельно, заведующей отделом аспирантуры и науки СТИ НИТУ МИСиС Евгении Георгиевне Кабуловой, оказавшим большую помощь и незаменимую поддержку при выполнении данной работы.

Глава 1 Литературный обзор

1.1 Состояние технологииковки

Ковка является сложным процессом горячей обработки металлов давлением, поскольку обычно состоит из ряда последовательно чередующихся, самостоятельных кузнечных операций, которые в общем случае сопровождаются продольными перемещениями и поворотами заготовки вокруг оси. Операцииковки характеризуются дискретной деформацией: обжатие заготовки и отдых металла в момент возвращения деформирующего инструмента в исходное положение. Широкому распространению свободнойковки в промышленности способствует её универсальность: разнообразие операций позволяют получать поковки простых и сложных форм, номенклатура которых исчисляется десятками тысяч наименований [1, 2]. Исходной заготовкой для кузнечного производства является продукция сталеплавильного производства.

При ковке для деформации заготовки применяют ковочные молоты и ковочные гидравлические прессы, а также другое деформирующее оборудование, например, радиально – ковочные машины. Схемы кузнечных операций одинаковы дляковки относительно небольших поковок (массой до нескольких сот килограммов), изготавливаемых на молотах, и для более крупных поковок, изготавливаемых на прессах. Деформации заготовок выполняются на плоских или вырезных бойках с применением разнообразного универсального инструмента. Верхний боек совершает при этом возвратно-поступательное движение. При ковке на молоте деформация заготовки происходит за счет кинетической энергии падающих частей молота, а при ковке на прессе – под действием жидкости высокого давления [3 – 5].

Ковка существенно улучшает строение и свойства металла и, как следствие, механические свойства готового изделия, происходит преобразование литой дендритной структуры в деформированную волокнистую, устраняются дефекты – поры и раковины. Операции свободнойковки позволяют получать заготовки с высокой анизотропией свойств, распределением которой можно управлять, что особенно необходимо для производства деталей ответственного назначения.

Технологическим процессомковки называют совокупность действий, непосредственно связанных с изменением формы исходной заготовки, ее свойств и состояния, а также транспортированием, от момента поступления заготовки в обработку до получения готовой поковки [6, 7].

Характеристика операций свободнойковки. Общий технологический процесс свободнойковки состоит из следующего небольшого количества операций: нагрева металла, собственноковки на деформирующем оборудовании, первичной термической обработки, контроля качества поковок. Процессковки обычно сопровождается промежуточными подогревами заготовки (один или более раз в зависимости от сложности и размера поковки).

Операции, применяемые при свободнойковке, можно подразделить на: предварительные, основные, вспомогательные и отделочные. Каждая кузнечная операция определяется характером деформирования и применяемым инструментом.

Одной из основных операций свободнойковки, во многом ответственной за итоговые механические характеристики будущего изделия, является протяжка. Это формоизменяющая операция, в процессе которой производится удлинение заготовки или ее части за счет уменьшения площади поперечного сечения. Операция осуществляется последовательными обжатиями смежных участков заготовки, выполняемых в определенном порядке.

Протяжка способствует устранению внутренних дефектов (пустот) и улучшает механические свойства металла в осевом направлении заготовки. Благоприятной является протяжка с последующим обжимом по всей длине перед кантовкой. Ковку участками – поясами – при обычной конструкции бойков (с параллельными рабочими поверхностями) допускают только в технологически неизбежных случаях (например, при протяжке полых поковок с оправками) или при получении коротких участков [1].

Значительная продолжительностьковки объясняется в большой степени многочисленностью обжатий, необходимых при протяжке. Именно периодичность обжатий, наличие большого числа стыков обжатых участков, а также весьма благоприятные условия для сдвиговой деформации обеспечивают ковке высокую турбулентность деформации, что способствует быстрому и разнонаправленному разрушению дендритов, сопровождающемуся интенсивным повышением механических свойств металла [2, 8].

При протяжке различают переходы и проходы. Простейший переход состоит из обжатия и подачи. Чаще при протяжке применяют более сложные переходы с кантовкой заготовки между соседними обжатиями и подачей после каждого двух обжатий. Смежные переходы на длине протягиваемой заготовки составляют проход. Протяжка может быть однопроходной, двухпроходной и т. д., но она всегда многопереходная.

При ковке переходами с кантовкой места зон затрудненной деформации и бокового бочкообразования чередуются, что уменьшает неравномерность деформации.

Протяжка заготовки может осуществляться различными способами. В работе [1] приведены три способа протяжки плоскими бойками:

1. После каждого обжатия следует кантовка на 90° в одну и ту же сторону. После каждых четырех обжатий следует подача. Этот способ протяжки более трудоемок, его применяют только при ковке твердой инструментальной стали. Считается, что данный способ способствует уменьшению внутренних напряжений. Однако на стыках подач неравномерность деформации получается значительной.

2. После каждого перехода следует подача и очередной переход и так до конца протяжки.

3. Обжатия и подачи следуют одни за другими на всю длину протяжки (на весь проход), затем следует кантовка и последовательное обжатие заготовок с другой стороны. Этот способ протяжки применяют для мелких и средних (по массе) заготовок из углеродистой и легированной сталей. Если в результате прохода по большой длине заготовка искривляется, то ее кантуют на 180° , выравнивают, и лишь затем после кантовки на 90° следует очередной проход.

Периодичность обжатий, наличие большого числа стыков обжатых участков, а также весьма благоприятные условия для сдвиговой деформации обеспечивают ковке высокую турбулентность деформации, что способствует быстрому и разнонаправленному разрушению дендритов, сопровождающемуся интенсивным повышением механических свойств металла. Если при прессовании и прокатке необходимы для этой цели коэффициенты деформации, равные соответственно 7 – 10, то для протяжки углеродистой стали достаточен коэффициент уковки 1,5 – 2,0 и только для легированной стали он должен быть равен 3 – 4. При протяжке слитков механические свойства металла вдоль и поперек волокна значительно увеличиваются до достижения коэффициента уковки 2,5 – 4. С дальнейшим повышением уковки относительное удлинение и сужение, а также ударная вязкость вдоль волокон несколько возрастают, а поперек волокон уменьшаются. После уковки 10 механические свойства существенно не изменяются [2].

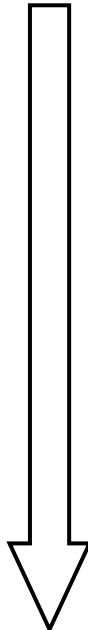
Эффективность протяжки в значительной степени определяется величиной относительных подач. При работе с минимальными подачами для уменьшения уширения или максимальными обжатыми для повышения интенсивности протяжки возможно образование зажимов. При протяжке с большими подачами получается наименьшее число обжатий и переходов и повышенная производительность. Но при этом поверхность заготовки получается неровной и увеличивается расходуемая энергия, также сопровождается значительным уширением. На практике величину относительной подачи принимают в пределах 0,4 – 0,7.

В литературных источниках, например [1, 2, 11], не рекомендуется осуществлять протяжку круглых заготовок на круглые большей длины в плоских бойках из-за появления растягивающих напряжений и возможности трещинообразования в осевой области заготовки.

При протяжке на круг плоскими бойками круглые заготовки вначале превращают в квадратные со стороной квадрата, равной диаметру поковки, затем сбивают углы и округляют заготовку. Высоколегированные стали, склонные к трещинообразованию, проковывают на пластину (для заварки пустот и трещин), а затем перековывают на нужный профиль. С круга на круг куют в вырезных бойках (с круглым вырезом – радиусные или овальные и угловым вырезом с закруглением в вершине углов — ромбические бойки). Широко применяют комбинированные бойки – верхний плоский, нижний вырезной.

Ковкость металлов. Одной из технологических характеристик металлов и сплавов является ковкость — способность подвергаться ковке и другим видам обработки давлением (прокатка, волочение, прессование, штамповка). Ковкость характеризуется двумя показателями: пластичностью, т.е. способностью подвергаться деформации без разрушения, и сопротивлением деформации. У ковких металлов (сталь, латунь, дюралюминий и некоторые другие медные, алюминиевые, магниевые, никелевые сплавы) относительно высокая пластичность сочетается с низким сопротивлением деформации. По ковкости металлы и сплавы разделяются от сильно ковких, до относительно хрупких. В работе [10] описана классификация обрабатываемых свободной ковкой металлов и сплавов по значению относительной ковкости (таблица 1.1).

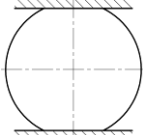
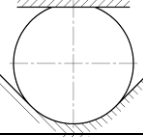
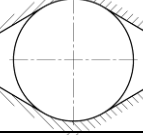
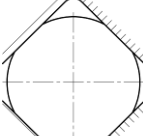
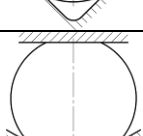
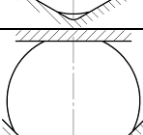
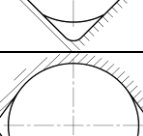
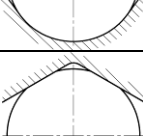
Таблица 1.1 – Ковкость металлов и сплавов

Алюминиевые сплавы	<div>Наиболее ковкие</div>  <div>Наименее ковкие</div>
Магниевые сплавы	
Медные сплавы	
Углеродистые и малолегированные стали	
Мартенситные нержавеющие стали	
Мартенситностареющие стали	
Аустенитные нержавеющие стали	
Никелевые сплавы	
Дисперсионно упрочняемые (стареющие) нержавеющие стали	
Титановые сплавы	
Жаропрочные сплавы на основе железа	
Жаропрочные сплавы на основе кобальта	
Ниобиевые сплавы	
Танталовые сплавы	
Молибденовые сплавы	
Жаропрочные сплавы на основе никеля	
Вольфрамовые сплавы	
Бериллиевые сплавы	

В зависимости от ковкости металла заготовки обычно подвергаются протяжке в различных типах бойков. В [1, 8] приведены рекомендации по различным типам бойков, применяемым при протяжке, в зависимости от пластичности заготовки. Основные типы бойков

дляковки металлов с различной пластичностью приведены в таблице 1.2. Применение плоских бойков может вызвать появление зоны растягивающих напряжений в осевой части поковки, что, в свою очередь, создаёт неблагоприятное напряжённое состояние металла и может привести к появлению трещин и разрывов. Весьма благоприятными являются условия в вырезных радиальных бойках с углом охвата 120° , характеризующиеся незначительной протяженностью зоны растягивающих напряжений.

Таблица 1.2 – Применяемые для протяжки типы бойков

Эскиз	Описание и область применения
	Плоские для протяжки на квадрат или пластину
	Комбинированные с углом охвата 90° для металлов с высокой пластичностью, обеспечивают низкую интенсивность протяжки
	Радиусные с углом охвата 60° для металлов с повышенной пластичностью, обеспечивают пониженную интенсивность протяжки
	Вырезные с углом выреза 90° для металлов с недостаточной пластичностью, обеспечивают высокую интенсивность протяжки
	Комбинированные с углом выреза 120° для металлов средней пластичности, обеспечивают среднюю интенсивность протяжки
	Комбинированные с углом выреза 90° для металлов средней пластичности, обеспечивают среднюю интенсивность протяжки
	Радиусные с углом охвата 120° для малопластичных металлов, обеспечивают весьма высокую интенсивность протяжки
	Ромбические с углом выреза 120° для недостаточно пластичных металлов, обеспечивают высокую интенсивность протяжки

Классификации режимов ковки. В работе [12] приведена классификация разновидностей операций протяжки исходя из формы рабочего инструмента и заготовки и их взаимодействия. Предложены следующие основные классификационные признаки:

1. Форма инструмента,
2. Форма поэтапных заготовок (исходной, промежуточных и окончательной),
3. Позиционирование заготовки относительно инструмента,
4. Сочетание форм двух объектов «системы»,
5. Приемы ковки (например, изменение последовательности позиционирования по пункту 3 и сочетаний по п. 4, в частности различные режимы кантовки, более сложное нагружение, например, наложение макросдвигов и кручения).

В работе [13] рассматривается более сложный вариант классификации процессов протяжки, учитывающий помимо формы заготовки и инструмента также кинематические и температурные факторы. Авторы рассматривают влияние данных факторов на напряжённо-состояние поковки. При этом все анализируемые факторы разбиваются на три основные группы:

- фактор формы, в который входит форма инструмента и заготовки;
- кинематический фактор;
- температурный фактор.

Фактор формы определяется формой инструмента и формой исходной заготовки. Так ковка одной и той же заготовки различными бойками получить одинаковое изделие, но напряжённое и деформированное состояние металла будут различным. Применение того или иного инструмента обусловлено материалом исходной заготовки, его качеством, формой и необходимыми свойствами конечного изделия. Форма заготовки также может оказывать значительное влияние на 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 является линейное вертикальное перемещение деформирующего инструмента, которое реализуется на гидравлических ковочных прессах и ковочных молотах. Также достаточно часто встречается 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. Более 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 является эффективным

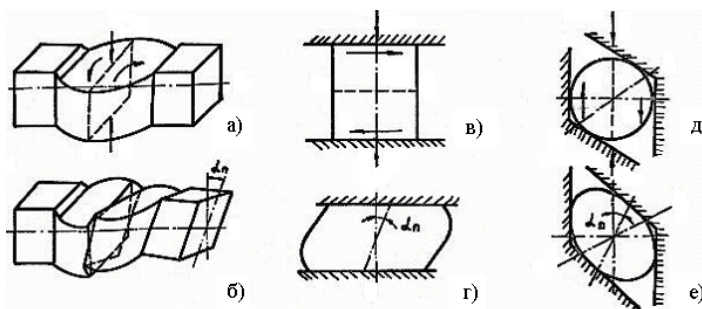
инструментом в управлении деформированным состоянием заготовки. Ковка заготовок с паузами позволяет управлять и напряженным состоянием заготовки за счет ее разупрочнения.

Температурный фактор определяется температурным полем заготовки и её температурным состоянием. Заготовка может быть нагрета выше температуры рекристаллизации (это подавляющее большинство процессовковки крупных поковок), её температура может быть 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.

Различные сочетания данных факторов позволяют управлять напряжённо – деформированным состоянием поковки в процессе протяжки, что в итоге позволяет получить готовое изделие с необходимыми механическими свойствами.

Ковка с применением макросдвигов. Основным инструментом управления пластическим течением металла являются макросдвиги. В работе [14] рассматриваются особенности процессов пластического деформирования, при которых сдвигу подвергают одну часть обрабатываемой заготовки относительно другой её части, т.е. накладывают деформацию макросдвига. Естественные макросдвиги происходят по границам физического очага деформаций и являются следствием локализации пластической деформации в области границ физического очага деформаций. Они сопровождают единичные нормальные обжатия заготовки. Дополнительные макросдвиги происходят по плоскостям (или поверхностям) сдвига одной части деформируемой заготовки относительно другой, осуществляемого дополнительно к нормальному обжатию заготовки. Если заготовку деформируют только путем сдвига (например, как при отрезке), то происходит только макросдвиг одной части заготовки относительно другой. При макросдвиге, дополнительном к нормальному обжатию, действуют еще и естественные макросдвиги по границам очага деформаций.

В декартовой системе координат можно выделить три главные плоскости приложения макросдвигов, показанные на рисунке 1.1. В каждой плоскости могут быть два направления макросдвига вдоль каждой из выделенных главных осей или поворот в плоскости сдвига одной части заготовки относительно другой части ее вокруг оси, перпендикулярной этой плоскости. В каждой плоскости, по каждой оси можно чередовать макросдвиги со сменой знака перемещения, создавая знакопеременные макросдвиги.



а) – в поперечной вертикальной, в) – в поперечной горизонтальной, д) – в продольной вертикальной, б), г), е) – заготовки после обжатия.

α_n – угол макросдвига

Рисунок 1.1 – Схемы деформации заготовок с наложением макросдвигов

Исходя из анализа работ [14, 15] можно сделать выводы, что ковка с применением макросдвигов позволяет:

- при малых уковах (порядка 2 – 3) обеспечить преобразование дендритной структуры металла в деформированную и в итоге получить однородную, равноосную и мелкозернистую структуру по всему сечению поковки;
- значительно уменьшить неравномерность деформаций вплоть до полного устранения зон затрудненной деформации;
- управлять направлением течением металла с целью регулирования анизотропии, например, путем образования «закрученных» элементов макростроения поковки;

Ковка на радиально-обжимных машинах. Радиальная ковка была впервые разработана в Австрии в 1946 году. Первая радиально-обжимная (РОМ) машина с четырьмя бойками была построена также в Австрии в начале 60-х годов. После этого число и мощность машин радиальнойковки продолжили расти. На данный момент по всему миру эксплуатируется более 400 РОМ, с максимальными усилиямиковки до 30 МН на боёк. В настоящее время на РОМ обрабатывают сплошные и полые заготовки диаметром до 850 мм [15]. В литературных источниках часто фигурирует иное название данного вида оборудования: радиально-ковочная машина (РКМ). Метод радиальнойковки обеспечивает высокую точность заготовок, высокую производительность процесса и малые потери металла [16].

Радиальная ковка обеспечивает:

- возможность формоизменения материалов без разрушения до значительных деформаций;
- более высокую производительность, чем при традиционной ковке на современных быстроходных гидропрессах (при обработке низколегированных сталей в 4 раза, высоколегированных в 6 раз);
- высокую точность получаемых изделий;

- низкую шероховатость поверхности (при холодном обжатии высота микронеровностей 0,63–0,16 мкм, при горячем – 25–200 мкм);
- снижение потребления энергии вследствие исключения многократных подогревов;
- повышение качества структуры металла поковок и уровня их механических свойств;

Изделия, произведенные методом радиальнойковки, часто обладают улучшенными механическими, или эксплуатационными свойствами по сравнению с производимыми традиционными способамиковки (на прессах или молотах). Высокое качество поверхности готовых поковок делает излишней или сводит до минимума последующую механическую обработку [15]. С целью сохранения качества поверхности заготовок и их прямолинейности упрочняющую термообработку обычно проводят перед холодным радиальным обжатием. Формирование внутренней поверхности полых изделий, как правило, не требует дальнейшей механической обработки, в том числе при формировании винтовых канавок по внутреннему диаметру. Например, при использовании профилированной оправки возможно получать орудийные стволы уже с нарезами на внутренней поверхности. Причём данные нарезы служат дольше, чем полученные средствами механической обработки, т.к. не происходит перерезания волокнистой структуры металла, а есликовка велась в холодном состоянии, то поверхностные слои ствола упрочняются за счёт пластической деформации [10].

Ковка в ковочном блоке. Четырёхбойковые ковочные блоки предназначены для четырехсторонней радиальнойковки на гидравлических ковочных прессах. Блоки крепятся на гидравлические ковочные пресса как обычные ковочные бойки. Как указано в работах [17, 18] данные устройства применяются дляковки слитков и заготовок из всех пластически деформируемых марок сталей, сплавов и цветных металлов.

В четырёхбойковом ковочном блоке бойки кроме движения в радиальном направлении, как это имеет место в РОМ, перемещаются также и в тангенциальном направлении, за счёт чего создаются дополнительные сдвиговые деформации в поперечном сечении заготовки. Благодаря этому, а также за счёт увеличенных единичных обжатий заготовки (по сравнению с ковкой на РОМ) достигается глубокая проработка литой структуры металла. При изготовлении в ковочном блоке дефекты в виде пористости в материале поковки отсутствуют, а качество металла поковок полученных ковкой в блоке выше качества металла поковок полученных ковкой на РОМ. Применение ковочного блока позволяет получить поковку более высокого качества с плотной макроструктурой, высоким уровнем механических свойств.

Основной операцией на ковочном блоке является операция протяжки слитков и заготовок, а также отделочные операции – проглаживание и обкатка.

В четырёхбойковых ковочных блоках можно ковать слитки и заготовки круглого, квадратного и многогранного поперечного сечения. При этом заготовки могут быть

постоянного и переменного по длине поперечного сечения. Слитки и заготовки могут быть сплошные и полые. Получаемые поковки могут быть круглого, квадратного и прямоугольного поперечного сечения, а также поковки переменного круглого поперечного сечения. Четырехбойковый ковочный блок позволяет также получать полые поковки переменного поперечного сечения из исходной полый заготовки.

При ковке в четырехбойковом ковочном блоке осуществляется более интенсивная деформация металла при каждом единичном обжатии, что позволяет производить ковку на большем промежутке времени в оптимальном температурном интервале. Количество проходов при этом уменьшается в несколько раз. Благодаря уменьшению количества проходов и эффекту деформационного разогрева, из технологии удастся исключить несколько дополнительных межоперационных подогревов или полностью от них отказаться. Коэффициент уковки за один нагрев слитка или заготовки может составлять от 4 до 9.

Четырехсторонняя схема обжатия в четырехбойковом ковочном блоке обеспечивает сжимающие напряжения в поверхностной зоне заготовки, что позволяет выполнять ковку без поверхностных дефектов.

Основу технологии составляет способ протяжки, включающий обжатия заготовки двумя парами бойков, расположенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, с приложением к ней одновременно усилия нормального обжатия и усилия сдвига в направлении нижнего бойка, подачи и кантовки заготовки после каждого прохода на угол 45° . При этом, как указано в работе [19] в зависимости от размеров поперечного сечения слитка, и готовой поковки может быть несколько способов ковки четырьмя бойками в ковочном блоке. Одна из технологий предусматривает чередования в промежуточных проходах заготовок с квадратным и восьмигранным поперечными сечениями. Для более интенсивной деформационной проработки литой структуры металла слиток обжимают с такими степенями деформации, при которых часть металла вытесняется в пространство между бойками. В результате происходит дополнительная сдвиговая деформация объемов металла на участке обжимаемой заготовки. После кантовки заготовки на угол 45° вытесненные объемы металла вдавливают в заготовку с большой степенью деформации, обеспечивая за счет этого интенсивную деформационную проработку литой структуры металла заготовки, включая осевую зону. Такая четырехбойковая схема обжатия создает сжимающие напряжения не только на поверхности, но и по всему поперечному сечению заготовки, что приводит к уменьшению толщины дефектного поверхностного слоя металла (или полному его отсутствию), а также к устранению внутренних дефектов литой структуры металла.

Использование четырехбойковых ковочных устройств на гидравлических ковочных прессах обеспечивает следующие преимущества в сравнении с традиционными технологиямиковки двумя бойками:

- возможностьковки малопластичных и труднодеформируемых сталей и сплавов, обусловленная благоприятным напряженно-деформированным состоянием металла в очаге деформации;
- увеличение производительности процессаковки в среднем в два раза, благодаря отсутствию бокового уширения, а значит меньшему количеству ходов пресса, которое требуется для получения поковки заданного размера и формы;
- снижение удельных затрат электроэнергии на ковку, а также затрат энергоносителей на подогрев металла и уменьшение потерь металла в угар, благодаря сокращению количества межоперационных подогревов заготовки;
- повышенная размерная точность поковок после калибровки в устройстве, что позволяет уменьшить в 2-2,5 раза допуски и в 1,5 раза припуски на последующую механическую обработку;
- увеличение выхода годного на 10-12%;

К недостаткам четырехбойковых ковочных устройств необходимо отнести высокую стоимость и сложность изготовления по сравнению с традиционным кузнечным инструментом, что не позволяет интенсивно внедрять данные устройства в производство.

1.2 Способы экспериментальных исследований процессовковки

В работе [20] основные методы экспериментальных исследований процессов ОМД разделяются на три основные группы:

1. с физическим расчленением исследуемого объекта;
2. с частичным нарушением сплошности объекта;
3. без физического расчленения объекта исследования.

Метод координатных сеток

Одним из наиболее распространенных экспериментальных методов исследования течения металла и определения напряжённого состояния при ОМД является метод координатных (делительных) сеток.

Сущность метода заключается в следующем. Деформируемый образец разрезают вдоль его оси по одной из диаметральных плоскостей (плоскость симметрии) на две половинки. На плоской поверхности одной из них делают продольные и поперечные риски с постоянным шагом, образующие прямоугольную сетку (нанесение сетки можно производить и типографским способом). Затем на поверхность разъема наносят какой-либо разделительный состав (жидкое стекло, сплав Вуда), предохраняющий от сваривания, после чего обе половинки складывают, скрепляют друг с другом и деформируют. После деформации образец разъединяют и по изменениям формы и размеров ячеек сетки судят о характере и величине деформации в различных его точках [20 – 23]. Сами ячейки сетки могут быть различной формы, в зависимости от целей исследования.

Сравнение двух любых соседствующих ячеек показывает деформацию ячейки за некоторый интервал времени. При этом предполагается, что в пределах ячейки она однородна и равна среднему значению по объему, ограниченному ячейкой.

Помимо получения данных, необходимых для вычисления деформаций (а через них напряжений), координатные сетки позволяют наглядно проследить потоки течения металла. Так на рисунке 1.2 представлена реальная координатная сетка, нанесённая на осаживаемый образец [8].

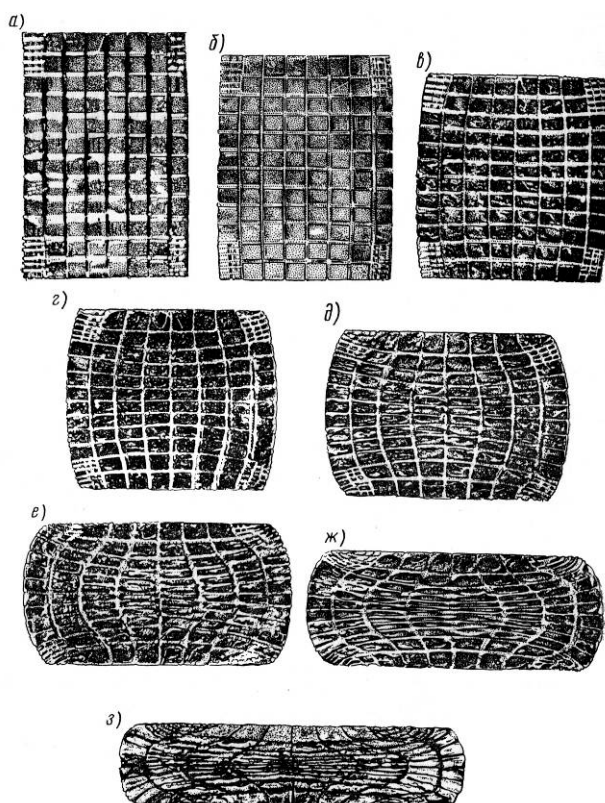


Рисунок 1.2 – Формоизменение координатной сетки при осадке

Шаги формоизменения сетки запечатлены при увеличении степени деформации на 10%. Уже начиная с шага 2 (30% степень деформации) видно возникновение неравномерности деформации вследствие сил поверхностного трения между образцом и рабочим инструментом, затрудняющими течение металла в радиальном направлении и создающие под инструментом зоны затруднённой деформации. В то время как в центральной зоне заготовки наблюдается значительное течение металла в радиальном направлении. При дальнейшем протекании процесса радиальное течение металла в центральной зоне заготовки продолжает увеличиваться, как и продолжает возрастать неравномерность деформации. К концу процесса (шаг 3, 70% деформация) ячейки в куполообразных зонах затруднённой деформации под инструментом искажены гораздо меньше, по сравнению с центром, где сетка полностью искривлена, а ячейки вытянуты по направлению к боковым поверхностям. Искажение ячеек по бокам не столь сильное, как в центральной области, но больше чем под инструментом: также произошло их сплющивание в вертикальном направлении и растягивание в радиальном.

Визуализация зон деформации металлографическими методами

В работе [20] приводится описание метода определения зон деформации в заготовке при помощи различных металлографических методов. При этом заготовка сначала деформируется, после чего разрезается по интересующему сечению.

Широкое применение нашел метод исследования неравномерности распределения деформации, основанный на различной способности к травлению однородного металла в зависимости от степени его деформирования. Повышенная растворимость в кислотах наблюдается у холоднодеформированного металла по сравнению с недеформированным. Этим методом выявлено, например, существование конических поверхностей скольжения.

Поверхностно-оптические эффекты. В современной теории обработки металлов давлением исходят из представления, что весь объем осаживаемого тела расчленен на отдельные области с преимущественным направлением течения металла в каждой из них. Поверхности, разграничивающие эти области, в пересечении с контактной поверхностью образуют систему нейтральных линий. Вследствие различной ориентировки скольжения металла на отдельных участках контактной плоскости при осаживании, светоотражательная способность поверхности образца на этих участках становится неодинаковой.

Для наблюдения зон деформации целесообразно использовать изменение (после деформирования) светоотражательной способности поверхностей с рисками от механической обработки. В тех случаях, когда требуется лишь качественно представить распределение зон деформаций на поверхности образца, её перед деформированием иногда покрывают лаком (или

тушью). При определенной степени деформации на пленке лака (или туши) появляются трещинки или она отстает от образца [21, 23].

Рекристаллизация. В случае неоднородно деформированного тела, при соответствующих температурно-скоростных условиях получается резко неоднородная структура. В одних местах тела структура будет рекристаллизованная, в других – частично рекристаллизованная, в третьих – без признаков рекристаллизации. Так, в зонах с очень большими деформациями во время отжига перед закалкой происходит интенсивная собирательная рекристаллизация, в результате которой появляются крупнокристаллические области. При температуре, лишь несколько превышающей точку начала рекристаллизации, зерна, претерпевшие значительную деформацию, рекристаллизируются с образованием мелкой структуры, в то время как недеформированные или почти деформированные зерна не дробятся, а, наоборот, растут, так как увеличение степени деформации приводит к увеличению числа центров рекристаллизации, следовательно, и числа рекристаллизованных зерен, что при данном объекте тела дает уменьшение их размеров.

Фракционное расплавление. Большие пластические деформации сопровождаются, как правило, изменением структуры и свойств вещества. Иногда изменения настолько значительны, что одно и то же тело в начале и конце деформации представляет разные вещества. В частности, при деформации с упрочнением изменяются магнитные свойства металла, а по границам плоскостей скольжения кристаллит приобретает спонтанную намагниченность. Упрочнение металлов при пластической деформации связано с распадом твердого раствора и изменением других физических свойств (например, уменьшением теплопроводности). При неравномерной деформации распад твердого раствора происходит не по всему объему заготовки, а лишь в зонах локализации наибольших деформаций.

Применение метода полей линий скольжения

При анализе процессов обработки металлов давлением широкое распространение получил метод линий скольжения. Данный метод, применяемый для решений плоских (и отчасти осесимметричных) задач, описан ещё в работах М. Леви (1871 г.), Г. Генки и Л. Прандтля (1920-е годы). Дальнейшее развитие он получил в работах как отечественных, так и зарубежных исследователей [21, 22].

Метод заключается в анализе рисунков, возникающих на поверхности металла, подвергнутого деформации. Теоретические исследования показали, что рисунки совпадают с линиями, вдоль которых отсутствуют деформации растяжения или сжатия. Такие линии называются линиями скольжения и совпадают с характеристиками системы дифференциальных уравнений плоской задачи. В случае плоской деформации линии скольжения совпадают и с

траекториями максимальных касательных напряжений. При условии пластичности Сен-Венана линии скольжения совпадают с траекториями максимальных касательных напряжений в сжатых-растянутых частях заготовок и в случае плоского напряженного состояния [24, 25].

В любой точке сечения тела, находящегося в состоянии плоской пластической деформации, имеются два ортогональных направления, вдоль которых касательные напряжения принимают наибольшее значение. Поле этих направлений образует ортогональную сетку, состоящую из двух систем линий, касательные к которым совпадают с направлениями наибольших касательных напряжений [27].

В работе [5] приведены результаты построения полей линий скольжения при обжатии полой заготовки на оправке в комбинированных бойках, показанные на рисунке 1.3.

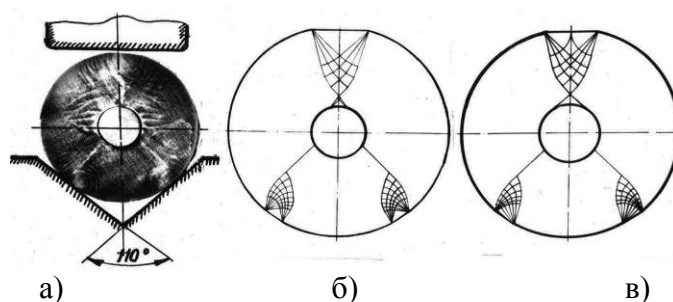


Рисунок 1.3 – Построенные поля линий скольжения

Обжатие производилось в бойках с вырезом 110° (рисунок 1.3а) при минимальном и максимальном коэффициенте трения. Построенные поля линий скольжения показаны соответственно на рисунках 1.3б и 1.3в.

Широкое развитие метода линий скольжения для исследования пластического формоизменения металлов обусловлено тем, что он позволяет определить поле напряжений и скоростей течения в сечениях деформируемого металла и проводить исследование в отдельных зонах. Метод линий скольжения позволяет решать сложные задачи пластического течения металла путем нахождения возможного поля линий скольжения и выявления эпюр распределения напряжения и скоростей деформации. Применение этого метода ограничивается некоторыми условиями, какими являются однородность, изотропность и неупрочняемость деформируемого металла. Однако он не является универсальным, т.к., строго говоря, применим, только для задач плоской деформации, в которых скорости деформации и напряжения изменяются в одной плоскости и не зависят от третьей оси координат [28].

Поляризационно-оптический метод. Поля сеток линий скольжения можно получить методами фотоупругости (в котором используется плоское напряженное состояние) и фотопластичности (с использованием плоского деформированного состояния), как описано в работах [23, 29]. Применение оптически активных материалов (галлоидных солей серебра, ОНС

- оптически неактивного в упругой области стекла, желатиноглицеринового студня и др.) и оптически активных клеек и покрытий (эпоксидных смол) позволяет наблюдать в поляризованном свете конфигурацию и протяженность зон деформации, а также рассчитывать соответствующие характеристики неравномерности деформации. При просвечивании нагруженного оптически активного материала пучком света с круговой поляризацией в материале возникают характерные изохромы (линии одинаковой окраски), регистрирующие накопленную, суммарную деформацию, зависящую от истории нагружения.

Картина изохром фиксирует:

- конфигурацию и протяженность фактического очага деформаций;
- нагружение и разгрузку по ходу процесса;
- неравномерность распределения высотных и продольных деформаций сдвига;
- наличие зон, подвергнутых наибольшей и наименьшей пластической деформации.

Применение метода оптически чувствительных клеек позволяет получить качественную интерференционную картину при степенях деформации 20-25% по всему фактическому очагу деформации. При просвечивании в линейном поляризованном свете наблюдаются изоклины - линии одинакового наклона главных нормальных напряжений.

1.3 Моделирование операций ОМД с использованием численных методов

Все вышеперечисленные методы исследования подразумевают проведение физического эксперимента, с последующей обработкой заготовки, которая часто включает рассечение на части для доступа к интересующим областям. Далеко не всегда подобная методика является приемлемой, кроме того в большинстве своём физический эксперимент не позволяет получить подробные данные о напряжённо-деформационном состоянии внутри заготовки во время его проведения. Однако существуют методы численного моделирования процессов ОМД, которые позволяют с высокой степенью точности получать данные о напряжённо-деформационном и тепловом состоянии, как любой области заготовки, так и рабочего инструмента. Причём данные могут быть получены как в любой отдельный момент, так и за всё время протекания исследуемого процесса [30, 31].

В работе [32] отмечается, что при решении различных прикладных задач часто применяются упрощённые (инженерные) модели. Например, при определении реакции технологических процессов на набор различных условий. Модели могут быть основаны на замкнутом виде уравнений, которые допускают аналитические решения реакций поведения описываемой системы. Однако во многих случаях, особенно для сложных систем, нахождение аналитической формы решения не представляется возможным. Для решения подобных задач

применяются численные методы, позволяющие получать приближённые решения при моделировании поведения системы. Численные методы используются во многих видах инженерных моделей, а благодаря широкой доступности и растущей вычислительной мощности компьютеров увеличивается их точность и гибкость применения.

В целом, инженерные модели, использующие численные методы, описываются через дифференциальные уравнения, которые определяют взаимосвязь физических взаимодействий, или поведение системы. Например, дифференциальные уравнения, используемые в механике сплошных сред (МСС), теплообмене, массопереносе, гидродинамике и термодинамике. Сами дифференциальные уравнения также делятся на обычные и уравнения в частных производных. Уравнения в частных производных необходимы, когда описываемое поведение системы является функцией времени и пространства или более чем одной пространственной переменной. Однако если рассматриваемая задача может быть упрощена до одной независимой переменной (времени или одной пространственной переменной), то можно использовать обыкновенные дифференциальные уравнения, которые позволяют понять влияние конкретных параметров на поведение рассматриваемого процесса, или объекта [33 – 35].

Существует несколько методов для решения дифференциальных уравнений. Численные алгоритмы для решения дифференциальных уравнений состоят из методов сосредоточенных параметров (англ. *lumped-parameter methods*), или так называемых сеточных методах решения (такие, как метод конечных элементов). Если рассматриваемая задача может быть упрощена для использования обыкновенных дифференциальных уравнений, то применяется модель сосредоточенных параметров, которая может помочь в понимании влияния некоторых параметров на процесс. Однако эти методы не являются моделями пространственной изменчивости напрямую, и их параметры не всегда имеют прямой физический смысл [33].

Для численного решения дифференциальных уравнений в частных производных было разработано несколько методов:

- Метод конечных элементов (МКЭ)
- Метод граничного элемента (МГЭ)
- Метод конечных разностей (МКР)
- Метод конечных объёмов (МКО)

Каждый из них имеет различную пригодность для различных типов задач. Например, МКР часто применяется в механике жидкости и газа, но редко используется в механике деформируемого твёрдого тела и строительной механике. Метод конечных элементов является наиболее распространённым для линейной и нелинейной механики сплошных сред, хотя у МГЭ есть преимущества при решении некоторых конкретных задач МСС.

С постоянным увеличением вычислительных мощностей компьютеров, данные численные методы стали очень эффективны при инженерном анализе статических задач, динамических условий (где расчет инерционных и/или демпфирующих сил включает производные по времени), или квазистатических условиях, когда скорость зависимости пластичности может требовать проведения реальной оценки времени (но где силами инерции ещё можно пренебречь).

В программных комплексах, связанных с механикой сплошных сред, МКЭ является наиболее распространенным методом, хотя у МГЭ есть некоторые преимущества при решении отдельных задач. МКР доказала свою эффективность при решении задач механики жидкости и газа, но редко используется в механике деформируемого твердого тела и строительной механике. Тем не менее, МКР – это простой и эффективный метод решения обыкновенных дифференциальных уравнений в областях с простыми границами. При этом для каждого узла сетки, неизвестные значения функции находятся путём, замены дифференциального уравнения на разностное.

МКЭ и МГЭ являются наиболее распространенными методами при моделировании процессов объемной деформации. Применение этих компьютерных моделей является важным инструментом в удовлетворении требований к размерным допускам, шероховатости поверхности и постоянстве свойств готового изделия.

Сеточные (дискретно-элементные) численные методы включают в себя различные методы, такие как метод конечных элементов, метод граничного элемента метод конечных разностей и метод конечных объёмов. Эти численные методы дают приближительные решения путем преобразования сложной модели МСС в дискретный набор небольших задач с конечным числом степеней свободы. Расчётные сетки создаются из таких структурных элементов, как прямолинейные блоки. А для лучшего соблюдения макроскопических условий или описания границ применяются неструктурированные сетки с элементами различного размера (например, тетраэдров, гексаэдров, шестигранников, призм и т.д.).

Выбор метода зависит от различных типов уравнений и граничных условий. В рамках этих методов можно использовать структурированные или неструктурированные сетки. Структурированные сетки создаются с помощью прямолинейных, гексаэдральных элементов. Это простой в использовании тип сетки, однако, с её помощью бывает трудно точно описать сложную геометрию детали. Неструктурированные сетки могут быть любой формы – тетраэдры, гексаэдры, шестигранные, призмы и так далее. Многие недостатки использования структурированной сетки устраняются посредством применения сетки данного типа.

После создания дискретно–элементной модели при помощи математических методов создаются наборы уравнений равновесия для каждого элемента и всей модели. Путем задания

различных граничных условий и нагрузок к модели, достигается одновременное решение набора уравнений, что в результате обеспечивает получение итоговых ответов в любом месте модели, пока обеспечивается непрерывность и равновесие расчёта. Процесс решения – это, по сути, компьютерный расчёт численного метода, где интерполяция функций (полиномов) используются для приведения непрерывного характера функции к конечному множеству точек.

У моделей на основе сеточного метода есть преимущества по сравнению с замкнутой формой решения, т.к. они более охотно дают решения для объектов неупорядоченной формы, материалов с переменными свойствами, и неравномерными граничными условиями. Построение дискретно-элементной сеточной модели для численного решения может быть необходимым, если при моделировании имеются следующие условия:

- сложной формы (что часто встречается при объёмной деформации);
- содержит различный фазовый состав;
- имеет непостоянные свойства, такие как смена фаз;
- имеется нелинейный физический процесс, например, если коэффициент теплопередачи является функцией от температуры.

Во многих случаях сеточные модели дополнены не сеточным символическим или аналитическим моделированием. Это делается для принятия решения о выборе подходящих граничных условий в сеточной части задачи, потому что именно граничные условия влияют на эффективность моделирования и определяют форму итогового решения. Аналитические модели всегда полезны для различий между механизмами, которые должны моделироваться по отдельности, или в виде единого набора.

Метод конечных элементов. Метод конечных элементов основан на идее аппроксимации непрерывной функции (в физической интерпретации - температуры, давления, перемещения и т.д.) дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей, называемых конечными элементами. Исследуемая геометрическая область разбивается на элементы таким образом, чтобы на каждом из них неизвестная функция аппроксимировалась пробной функцией (как правило, полиномом). Причем эти пробные функции должны удовлетворять граничным условиям непрерывности, совпадающим с граничными условиями, налагаемыми самой задачей [36, 37].

Применение МКЭ в процессах обработки металлов давлением принесло большие перемены в методики их разработки, которые ранее осуществлялись на основе подхода проб и ошибок. Например, МКЭ позволяет легко прогнозировать формоизменение при свободной ковке, а также фиксировать подробную историю изменения температуры, деформации и скорости деформации в каждой отдельной материальной точке заготовки. Моделирование

термомеханических процессов может быть основано на модели механики сплошных сред, явления переноса (тепловой поток), и металлургических явлений (например, рост зерен и рекристаллизации) [38 – 41]. Одним из наиболее распространенных программных комплексов, использующих при моделировании метод конечных элементов является DEFORM, разработанный американской компанией Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC).

Метод граничного элемента. МГЭ – это метод, представляющий собой сложную структуру или компонент в виде компьютерной модели предназначенный для определения его реакции на набор заданных условий. Как и в МКЭ, модель формируется посредством разделения конструкции на мелкие элементы, чтобы сформировать общую модель. Однако, в отличие от МКЭ, здесь только поверхность (или граница) объекта требует снижения размерности задачи, тем самым значительно снижая затраты на вычисления для получения решения [42]. МГЭ имеет более ограниченный диапазон применения, чем МКЭ. В целом он применим в основном для линейных эллиптических дифференциальных уравнений в частных производных. Это также требует пересмотра управляющих дифференциальных уравнений в частных производных в интегральное уравнение Фредгольма, которое относится к ряду физических задач. Например, эллиптические дифференциальные уравнения в частных производных, такие, как уравнение Лапласа или уравнение Гельмгольца можно переформулировать как интегральное уравнение Фредгольма и затем решить при помощи МКР. Преимущество заключается в том, что при этом сетка должна покрывать только границы области [43].

Метод конечных разностей. Может быть эффективным инструментом при анализе различных деформационных задач при прокатке и прессовании. Как и МКЭ, использование МКР при моделировании операций ОМД может потребовать рассмотрения упругопластического поведения материала и упруго-вязкопластических задач, затрагивающих большие значения деформации. Предполагается что упругие деформации (а также пластические или вязкопластические) будут большие. Когда деформации достигают очень больших значений, исходная сетка может настолько исказиться, что интерполяция полиномов уже неспособна смоделировать геометрию элементов и соответствующих им переменных состояния. Для продолжения расчёта необходим процесс пересоздания сетки под изменившуюся геометрию [44].

Метод конечных объёмов. Также является численным методом решения дифференциальных уравнений в частных производных. Ключевое различие между методом конечных элементов и методом конечных объёмов, применяемыми при моделировании процессов пластической деформации тел, схематично показано на рисунке 1.4 [45].

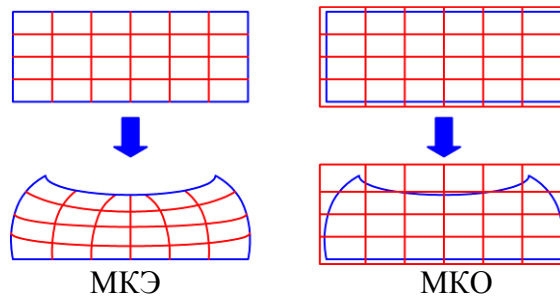


Рисунок 1.4 – Схема деформации тела при моделировании с помощью МКЭ и МКО

При использовании МКЭ материал заготовки «соединён» с элементами сетки и при его деформации формоизменяется вместе с ней. В МКО, материал не «присоединён» к элементам. Поэтому, когда материал деформируется, он «перетекает» из одного элемента сетки в другой, в то время как сама сетка не искажается. Наружная поверхность материала заготовки улавливается посредством треугольных граней [46].

В принципе, оба метода могут быть использованы при моделировании большинства операций ОМД, но некоторые различия процессов накладывают приоритеты при их применении. Тот факт, что при МКО элементы сетки не деформируются с материалом, делает его чрезвычайно эффективным и точным при моделировании трёхмерных задач горячей штамповки, связанных со сложным течением материала. Все другие процессы ОМД, а также моделирование напряжений в инструменты наиболее эффективно и точно моделируются с использованием МКЭ. Ввиду этого метод конечных элементов получил более широкое распространение в универсальных программных комплексах.

Качество КЭ-сетки определяется на основании различных факторов:

Скорость сходимости решения. Чем лучше качество сетки, тем выше скорость сходимости. Низкое качество сетки может привести к тому, что решение может вообще не сойтись.

Точность решения. Чем лучше качество сетки, тем точнее будет решение. Для улучшения качества сетки, необходимое для точного решения может потребоваться измельчение сетки в определенных областях, где располагаются большие градиенты искомого поля. Также это означает, что, если сетка недостаточно измельчена, точность решения носит более ограниченный характер. Таким образом, требуемая точность, в свою очередь, определяет качество сетки.

Время расчёта. Чем больше общее количество элементов находится в сетке, тем больше и время расчёта. Немаловажную роль играет мощность используемых компьютеров, а также оптимизация программного кода под конкретное оборудование.

Основные формы элементов. В двухмерных сетках применяется два типа элементов: треугольный и четырёхугольный. Треугольный элемент является наиболее простым в создании

и часто применяется в неструктурированных сетках. В то время как четырёхугольный элемент чаще используется в упорядоченных сетках [46].

Основными элементами трёхмерных сеток являются: тетраэдр, тетрагональная пирамида, тригональная призма, и гексаэдр. Они все имеют трехсторонние и четырехсторонние грани. Также возможно построение трёхмерных элементов: призмы и гексаэдра из двумерных элементов треугольника и четырехугольника путём вытягивания на заданную высоту [47, 48].

Основные элементы трёхмерных сеток представлены на рисунке 1.5.

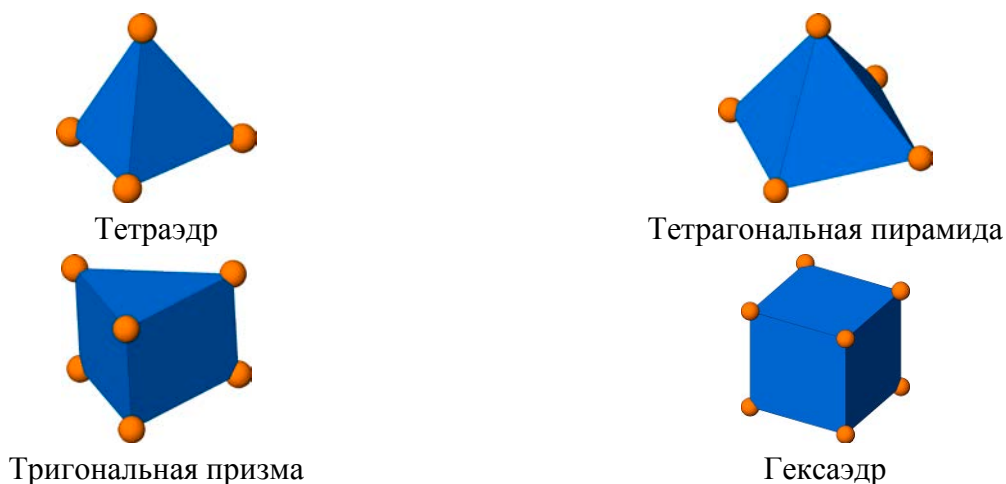


Рисунок 1.5 – Формы элементов сетки

Характеристики трёхмерных элементов сетки:

- *тетраэдр*: 4 вершины, 6 ребер, в сетке может граничить с 4 треугольными гранями. В большинстве случаев объёмная тетраэдрическая сетка может быть сгенерирована автоматически;
- *тетрагональная пирамида*: 5 вершин, 8 ребер, в сетке может граничить с 4 треугольными и 1 четырехугольной гранями. Эффективно используются в качестве переходных звеньев между элементами с квадратными и треугольными гранями в смешанных гибридных сетках;
- *тригональная призма*: 6 вершин, 9 ребер, в сетке может граничить с 2 треугольными и 3 четырехугольными гранями. Преимущество этого типа элемента заключается в том, что он качественно описывает граничный слой.
- *гексаэдр* (топологический куб): 8 вершин, 12 ребер, в сетке может граничить с 6 четырехугольными гранями. При одном и том же количестве элементов в сетке, наибольшая точность решения достигается при использовании данного типа элементов.

Тетрагональная пирамида и тригональная призма при вычислениях могут рассматриваться как вырожденные шестигранники, где некоторые рёбра были сведены к нулю.

Как уже упоминалось ранее, наиболее точным является гексаэдральный тип элемента с 8 узлами, и 8 точками интеграции: в каждом узле есть 3 степени свободы. Количество степеней свободы в 3 раза больше, чем общее количество узлов, за вычетом кинематических граничных условий, т.е. узлы, могут быть ограничены в перемещении в одном направлении в зависимости от типа граничных условий. Степени свободы связаны с каждым неизвестным узловым перемещением. Это означает, что у элемента может быть 24 узловых перемещения и 24 узловых силы. Матрицы жесткости, которая соотносит вектор узловых перемещений и вектор узловых сил имеет размерность $[24 \times 24]$. У тетраэдрального элемента 4 узла, с 12 перемещениями и 12 силами, а матрица жесткости имеет размер $[12 \times 12]$. Поэтому при равном количестве элементов в сетке гексаэдральный тип обеспечивает более высокую точность.

На рисунке 1.6 показано разбиение исходного куба (а) на гексаэдральную (б) и тетраэдральную (в) сетку, выполненное в программном комплексе DEFORM-3D. При этом было использовано 64 гексаэдра, а для обеспечения соответствующей точности понадобится уже 512 тетраэдров.

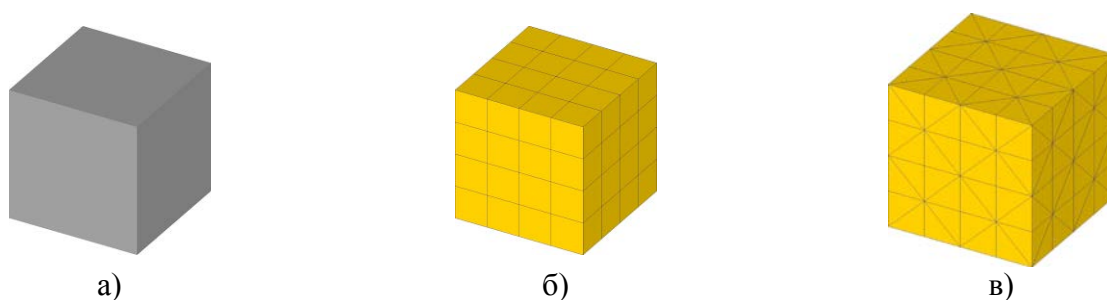


Рисунок 1.6 – Варианты построения КЭ сетки

Однако при всех достоинствах гексаэдральная сетка не всегда может корректно описать сложную форму геометрии объектов при таких процессах ОМД, как например, свободная ковка, или штамповка. Поэтому во многих программных комплексах (DEFORM-3D, QForm и др.) по-умолчанию применяются тетраэдральные элементы [49 – 51].

Типы конечно-элементных сеток. Представленные на рисунке 1.7 сетки являются структурированными, т.е. выполненными из элементов одного размера. Преимуществом подобной сетки является упорядоченность элементов и мест их контакта, что несколько увеличивает скорость расчёта. Недостатком является трудность описания сложной геометрии: некоторые области могут оказаться меньше размера отдельного элемента. Поэтому приходится либо пренебрегать мелкими деталями геометрии, либо уменьшать размер элемента, что приводит к увеличению времени расчёта.

Для корректного описания сложной геометрии построение сетки возможно и из элементов различного размера. При моделировании некоторых процессов, таких как свободная ковка, часть заготовки не подвергается деформации, и нет необходимости создавать по всему объёму сетку одинаковой плотности. При этом в области (или областях) заготовки, не подвергаемой деформации, элементы будут больше, а непосредственно в очаге деформации – меньше, чем в среднем по остальной сетке. Подобное изменение позволяет уменьшить общее число элементов сетки, и как следствие ускорить выполнение расчёта. Кроме того, измельчённая в очаге деформации сетка позволяет получить более достоверные данные.

В качестве примера на рисунке 1.7а изображена исходная модель биллета.

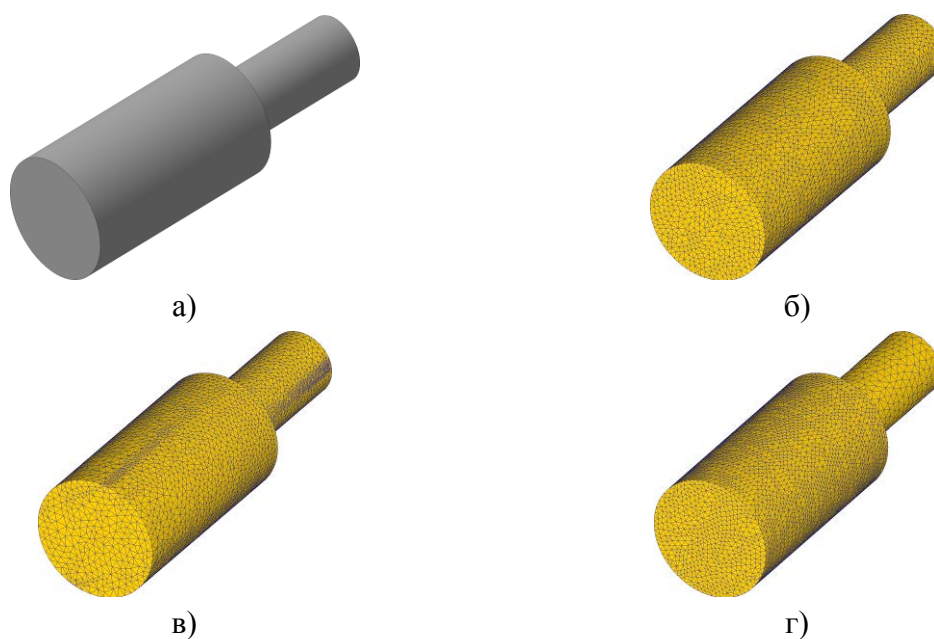


Рисунок 1.7 – Варианты разбиения сетки

При дальнейшей ковке деформации будет подвергаться тело биллета, в то время как цапфа останется нетронутой и необходима только для удержания и дальнейшего позиционирования заготовки. Полностью отказаться от цапфы в модели нельзя, т.к. между ней и телом биллета будет происходить теплообмен, заметно влияющий на скорость остывания задней части поковки, однако КЭ–сетку в цапфе можно сделать менее плотной. Варианты исходных данных для построения сетки приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Различные условия разбиения сетки

	Общее количество элементов	Соотношение элементов	Минимальный размер грани элемента, мм	Максимальный размер грани элемента, мм
1	50000	1:1	31	31
2		1:10	5,6	56
3		1:1 + окно плотности (10:1)	24	76

Первый вариант описывает построение равномерной сетки по всему объёму заготовки, ему соответствует рисунок 1.7б. При этом все элементы получились одинакового размера. Во втором варианте рассматривается построение из элементов, различающихся в размерах в 10 раз, созданная сетка показана на рисунке 1.7в. Как видно, наблюдается случайное расположение областей с элементами различного размера: как в теле биллета, так и в цапфе. Данное распределение элементов не является оптимальным, хотя при дальнейшем сильном формоизменении заготовки будет происходить пересоздание сетки, при котором более сложная форма область биллета будет состоять из элементов малого размера. Третий вариант описывает сетку, в которой тело биллета состоит из элементов со сравнительно малым различием в размерах, а для цапфы дополнительно была задана область изменения плотности сетки, в которой размеры элементов увеличены в 10 раз по отношению к телу биллета, что наглядно видно на рисунке 1.8г.

1.4 Примеры компьютерного моделирования операцийковки

В работе [52] описано совершенствование технологического процессаковки прокатного вала с помощью моделирования в комплексе DEFORM. Сначала было проведено сравнение результатов моделирования процессаковки слитков с реальной производственной технологиейковки рабочего прокатного вала. Полученные результаты по формоизменению и тепловому состоянию заготовки в процессековки соответствовали реальным производственным данным. Так, отклонение размеров заготовки по переходамковки совпало с реальными данными карт фиксации с точностью 3 – 5%. Полученные в результате конечно-элементного моделирования утяжины на переходе с бочки вала на шейки были отмечены на реальной поковке. Температура реальных поковок послековки составляла $\approx 830^{\circ}\text{C}$, средняя по результатам численного моделирования $\approx 810^{\circ}\text{C}$. На основании полученных данных был сделан вывод о высокой степени достоверности результатов моделирования в комплексе DEFORM по формоизменению, прогнозированию поверхностных дефектов формы, получению информации о напряженно-деформированном и тепловом состоянии заготовки в процессековки. Далее производилось моделирование предлагаемого усовершенствованного технологического процесса, который предполагал применение укороченного слитка меньшей массы (25 т взамен 32 т у исходного) с соотношением $H/D=0,7$, конусностью на две стороны 20% (у исходного слитка соотношение $H/D=2,4$, конусность 5%), с коэффициентом выхода годного 83% (против 65,5% у исходного). Предлагаемый технологический процесс исключал применение операцийоттяжки цапфы и биллетировки, осадки слитка и связанный с этими операциями подогрев. Это позволило снизить трудоёмкость и энергоёмкость процесса в среднем на 25-35%. Форма слитка в

предлагаемом технологическом процессе позволила добиться значения коэффициента укова, не ниже, чем в базовом варианте, что означает отсутствие снижения механических свойств готового валка. По итогам работы авторы делают вывод о высокой эффективности комплекса DEFORM для моделирования процессовковки крупных поковок из слитков и рекомендации его применения для исследователей и технологов, работающих в областиковки крупных поковок.

В работе [53] описано моделирование процесса радиальнойковки в четырёхбойковом ковочном блоке при помощи комплекса DEFORM. Авторы анализируют существующий технологический процесс применяемый для блока, установленного на прессе усилием 20 МН на заводе компании «Sidenor» в г. Рейноса (провинция Кантабрия, Испания). Для большей точности полученных результатов авторами в программный комплекс также были заданы кривые упрочнения деформируемой стали, которые были получены на пластометре Gleeble. Также было создано несколько моделей бойков ковочного блока: плоские и с различными углами заходных участков (10°, 15°, 20°). В сравнение участвовали и обычные плоские бойки, применяемые на прессе. Моделирование позволило получить картины напряжённо–деформированного состояния и течения металла при различных типах применяемого инструмента. Полученные данные подтвердили теоретические предположения о более благоприятном напряжённом состоянии поковки при протяжке в ковочном блоке: ниже значения растягивающих напряжений, что в свою очередь, снижает риск появления таких дефектов как трещины и разрывы. Также при использовании блока отмечается более равномерное распределение деформаций по сечению заготовки, при этом в осевой зоне наблюдаются более высокие значения, чем при протяжке в двух бойках. На основании результатов моделирования были выработаны рекомендации по совершенствованию существующего технологического процесса.

В работе [54] описано исследование процесса протяжки с использованием бойков с наклонными рабочими поверхностями. Применение подобных бойков вызывает значительные дополнительные макросдвиги, которые положительно влияют на проработку структуры заготовки и, как следствие, на механические свойства готовых изделий. Авторы рассматривают бойки с различным углом наклона рабочих поверхностей: 5°, 10°, 15°, 20°. Также учитывались различные величины относительных подач. Для моделирования процессов применялся комплекс DEFORM. Также были проведены физические эксперименты со свинцовыми и стальными образцами. На свинцовые образцы была нанесена координатная сетка, а у стальных анализировалось изменение микроструктуры. Итоги численного моделирования показали, что для обеспечения максимального уровня сдвиговых деформаций (возникающих из-за макросдвигов) протяжку необходимо осуществлять в бойках с углом наклона 10–15° и относительной подачи равной, или близкой к 1, с единичными обжатиями не менее 30 – 40%.

Физическое моделирование также подтвердило данные выводы. На основании полученных данных авторами были установлены зависимости влияния величины относительной подачи и геометрии инструмента на НДС заготовок, а также даны практические рекомендации по выбору параметров инструмента и режимов протяжки.

В работе [55] при помощи конечно–элементного моделирования в комплексе DEFORM анализируется влияние бойков различных типов на напряженно–деформационное состояние заготовки при протяжке. Авторы сравнивают следующие типы бойков: плоские, вырезные ромбические (с углом выреза 135°) и со скрещивающимися рабочими поверхностями. Исходная цилиндрическая заготовка содержит реологические свойства стали X37CrMoV51, полученные с пластометра. Итоги моделирования показали, разные типы бойков вносят значительные различия в картину напряжённо–деформированного состояния. Так при протяжке в плоских бойках в осевой зоне поковки возникают значительные растягивающие напряжения, в то время как при использовании двух других типов бойков картина более благоприятная. Кроме того скрещенные бойки создают более равномерное распределение деформаций по всему сечению поковки за счёт возникновения макросдвигов. Максимальные значения деформаций достигаются при протяжке в вырезных бойках. На основании анализа полученных данных авторы делают вывод о целесообразности первичной протяжке заготовки в бойках со скрещенными поверхностями, для создания равномерного распределения ещё на начальном этапе процесса. В дальнейшем бойки предлагается заменить на вырезные ромбические – для получения более высоких итоговых значений деформаций вследствие интенсивной протяжки. Также предлагается комбинировать данные типы бойков для получения заданных механических свойств готового изделия.

Влияние макросдвигов на напряжённо–деформационное состояние поковки рассматривается и в работе [56]. Авторы анализировали применение трапециевидных бойков на протяжку заготовки из стали 40X в форме параллелепипеда. Для этого осуществлялось моделирование процесса в программном комплексе MSC.SuperForge. Итоги моделирования показали, что макросдвиговые деформации локализовались в переходных участках рабочей поверхности трапециевидного инструмента и на участках заготовки, находящихся под данными участками. Авторы делают вывод, что подобное распределение деформаций по сечению заготовки позволяет путем подбора рациональных деформационных режимов ковки получать поковки с мелкозернисто структурой, что, в свою очередь, способствует равномерному распределению механических свойств по сечению поковок. Так же отмечается возможность появления дефектов на поверхности поковок, вызванных особой формой инструмента. Для их предотвращения необходимо переходные участки инструмента изготавливать с радиусными скруглениями.

В работе [57] авторами рассматривается моделирование процесса осадки биллета, содержащего осевые трещины (образовавшиеся на этапе затвердевания исходного слитка). Геометрические параметры и размещение трещин были получены путем ультразвуковых исследований и перископического осмотра осевых каналов. Далее на основе полученных данных в трёхмерной модели биллета производилось построение пустот, имитирующих трещины. Данные операции выполнялись для моделей слитка с выпуклой и вогнутой донной частью. После чего моделировались операции нагрева и осадки. Результаты моделирования показали, что при осадке происходило как залечивание одних трещин, так и увеличение других. Увеличивались расположенные ближе к донной части слитка, что вызвано их неблагоприятно пространственной ориентацией: направлении наибольших напряжений. Также установлено, что применение слитков измененной геометрии обеспечивало более благоприятные условия для залечивания трещин.

Глава 2 Методики моделирования процессовковки

Моделирование рассматриваемых в данной работе процессов осуществлялось по следующей общей методике, показанной на рисунке 2.1.

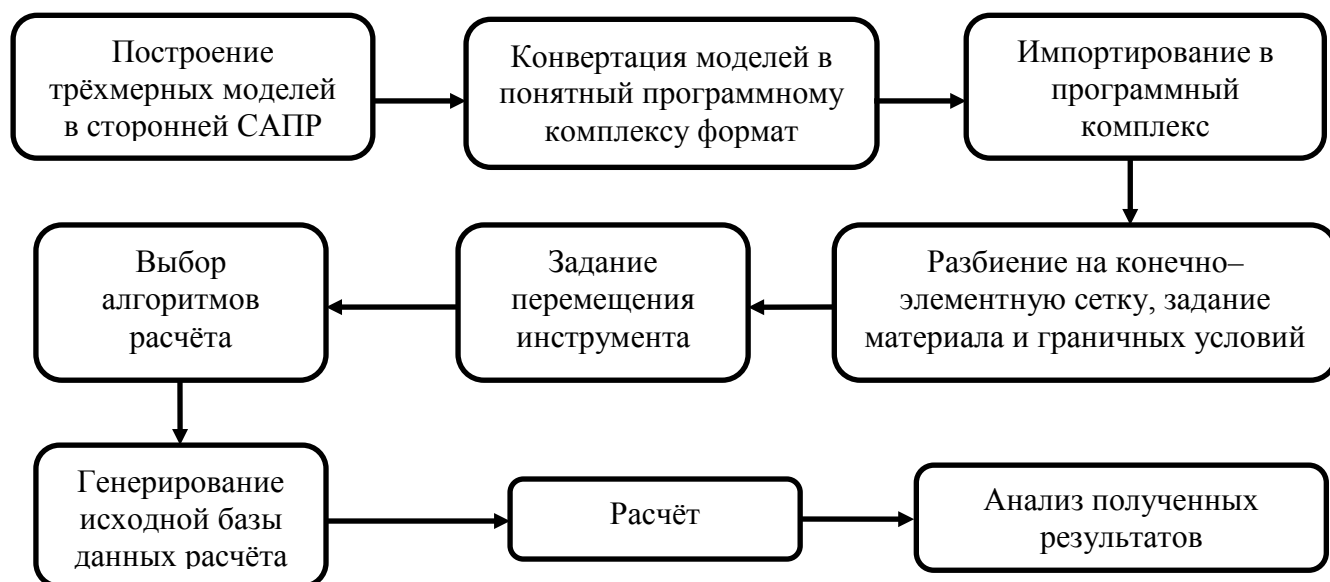


Рисунок 2.1 – Последовательность операций при моделировании

Построение трёхмерных моделей выполнялось в графическом редакторе SolidWorks. Выбор данного программного обеспечения обусловлен его возможностью конвертировать трёхмерные сборки моделей в формате STL (с которым может работать подавляющее большинство расчётных САПР) таким образом, что для каждого компонента сборки создается отдельный файл, связанный с остальными единой системой координат. Это облегчает последующее импортирование объектов в расчётный программный комплекс, т.к. при этом отпадает необходимость дополнительно позиционировать модели перед расчётом.

2.1 Сравнение программ конечно-элементного моделирования

Для проверки результатов моделирования полученных при использовании различных конечно-элементных программных комплексов, было произведено сравнение двух из них: Simufact Forming, разработанной Simufact Engineering GmbH V.11.0 (ФРГ), и DEFORM V.10.1 (США), которое заключалось в моделировании процесса осадки высокого цилиндрического образца, со следующими исходными размерами: диаметр 800 мм, высота 3000 (соотношение $H_0/D_0 : 3,75$ ($D_0/H_0 : 0,27$)).

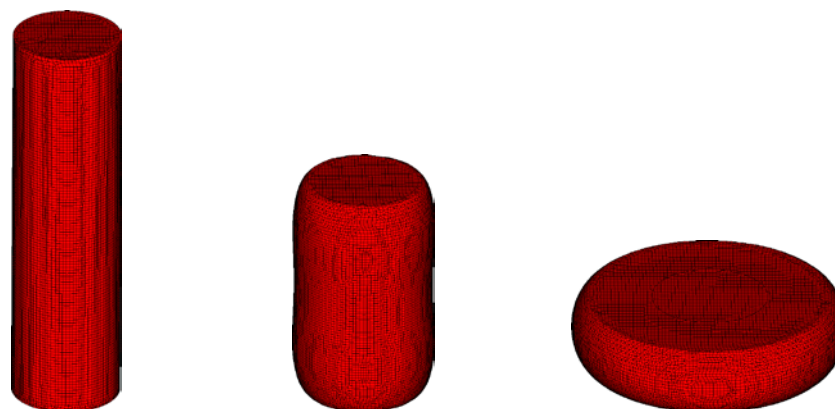
Комплекс DEROFM использует для моделирования метод конечных элементов, а Simufact Forming позволяет для некоторого типа задач (в том числе осадки) задействовать также метод конечных объёмов. Для исключения дополнительного влияния различных методик на итоговые данные, в данной задаче использовался только метод конечных элементов. При этом в DEFORM применялась тетраэдральная сетка [58], а в Simufact Forming – гексаэдральная [59]. Применение различных типов элементов привело к различному количеству самих элементов в построенных сетках. Например, при разбиении длина стороны одного элемента в Simufact Forming была выбрана 25 мм, а общее количество составило 29042 штук. При задании подобных условий построения в DEFORM сетка состояла бы из 126276 элементов, что было избыточно, т.к. могло значительно замедлить расчёт. Поэтому было принято решение использовать относительный тип построения сетки, состоящей из 40000 элементов и соотношением элементов 1:1. Исходные данные для построения конечно–элементных сеток представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Исходные данные конечно–элементных сеток

Программный комплекс	Общее количество элементов	Длина стороны элемента, мм
Simufact Forming	29042	25
DEFORM	40000	44

Встроенная база данных материалов обоих программных комплексов не содержит сортамента отечественных марок сталей и сплавов, поэтому при моделировании в Simufact Forming и DEFORM заготовкам были присвоены реологические свойства стали С45 (немецкий аналог отечественной стали 45). В DEFORM данная реологическая модель также отвечает за американскую сталь AISI–1045. Температура заготовки на момент начала деформации была равномерна по всему сечению и составляла 1200 °С. Для описания сил трения, возникающих между рабочим инструментом и поковкой, использовался закон Амонтона–Кулона [60], фактор трения составлял 0,3. Скорость перемещения верхней плиты была постоянной и составляла 50 мм/сек. Итоговая степень деформации для всех образцов составляла 83,3 %.

Результаты моделирования осадки заготовок на различных стадиях процесса в Simufact Forming показаны на рисунке 2.2, а в DEFORM – на рисунке 2.3.

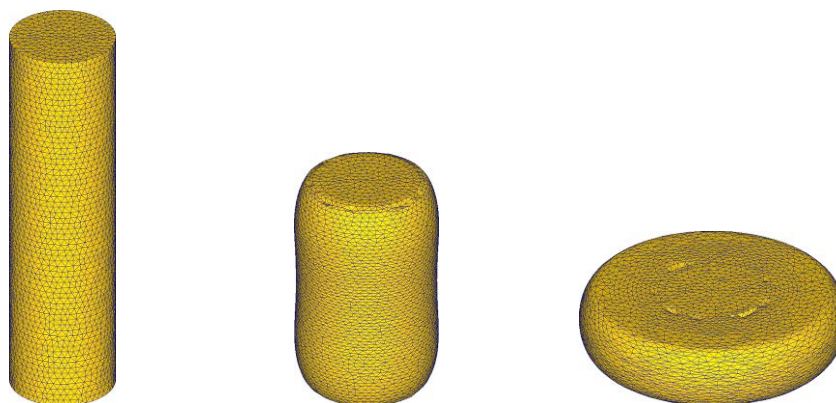


Исходная заготовка

Середина процесса

После осадки

Рисунок 2.2 – Формоизменение заготовки при моделировании в Simufact Forming



Исходная заготовка

Середина процесса

После осадки

Рисунок 2.3 – Формоизменение заготовки при моделировании в DEFORM

Как видно из рисунков, обе программы описывают формоизменение заготовки с небольшими различиями. На обоих образцах видно появление двойного бочкообразования, характерного для осаживаемых высоких заготовок.

Согласно данным из литературных источников [8, 11] при осадке высоких образцов в них образуются различные зоны распределения деформаций, показанные на рисунке 2.4. Так, к рабочему инструменту примыкают зоны 1 – области затруднённой деформации, с ними граничат зоны локализованной деформации 2, в которых действуют максимальные тангенциальные напряжения под углом 45° к оси образца. На боковых поверхностях появляются зоны 3, в которых возникают растягивающие напряжения (в данном случае таких зон две и они расположены в верхней и нижней частях заготовки). В центре заготовки образуется зона 4 с равномерным распределением наиболее высоких значений деформации (рисунок 2.4а). В начальной стадии процесса происходит двойное бочкообразование, которое исчезает при продолжении процесса. При этом происходит слияние двух зон 3 в одну, а также переход зоны 4 в поверхностных слоях металла в область 3, которая теперь остаётся единой кольцевой зоной (рисунок 2.4б). Далее зона 4 полностью поглощается зонами 2, которые после

объединения образуют общую, имеющую крестообразную форму (рисунок 2.4в). При дальнейшей осадке наблюдается развитие зон 1, которые до этого не претерпевали значительных изменений: значения деформаций в них были гораздо ниже, чем в других зонах. В финальной стадии процесса зоны 1 разделяются на 1', в которой значения деформаций так и остаются крайне небольшими и, окружающей её, 1'', с более высокими значениями, также в эту область частично перемещается и зона 3, уже имеющая более высокие (по сравнению с 1') значения деформаций (рисунок 2.4г).

Описанные области не имеют резко очерченных границ и, в свою очередь, характеризуются неравномерностью деформации (зональной неравномерностью) [8].

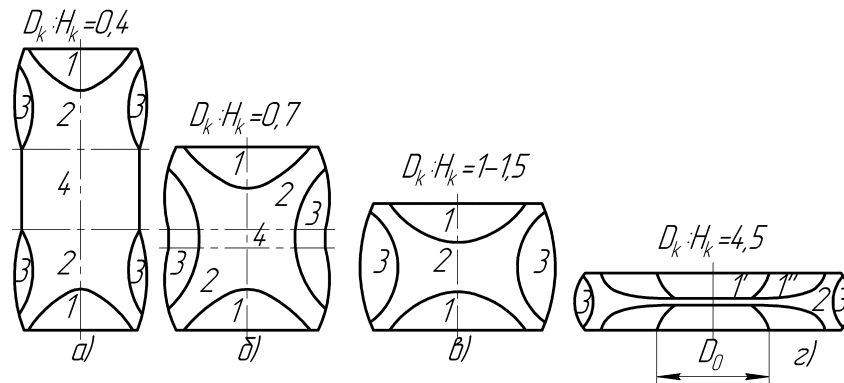


Рисунок 2.4 – Форма зон в объёме осаживаемого высокого цилиндрического образца

Распределение накопленных деформаций в сечении заготовки при моделировании осадки образца в Simufact Forming показано на рисунке 2.6. Значения в процентах под изображениями показывают степень относительной деформации. Для большей наглядности была выбрана шкала с резким цветовым переходом от одного значения к другому, позволяющая наблюдать образование и развитие различных зон. Как описывалось выше, при реальной осадке границы стыковки зон размыты.

Полученные результаты совпадают с описанными ранее: непосредственно под осадочными плитами происходит образование как зон затруднённой деформации, так и кольцевых зон (рисунок 2.5а). При этом происходит двойное бочкообразование, которое сопровождается развитием двух выраженных очагов деформации в верхней и нижней частях заготовки под зонами затруднённой деформации (рисунок 2.5б и 2.5в). При дальнейшей осадке происходит их соприкосновение (рисунок 2.5г), с последующим слиянием и развитием получившегося общего очага в центральной области заготовки, что вызывает распространение повышенных значений деформации преимущественно в радиальном направлении (рисунок 2.5д и 2.5е). Получившаяся в итоге зона оказывается сплюснута сверху и снизу зонами затруднённой деформации, которые, по сути, выступают в роли продолжения осадочных плит [8].

Боковые области имеют более низкие значения деформаций, т.к. при осадке они не контактировали ни с рабочим инструментом, ни с зонами затруднённой деформации, а перемещение их внешней поверхности не было чем-либо ограничено, т.е. не испытывало внешнего давления и происходило свободное течение металла.

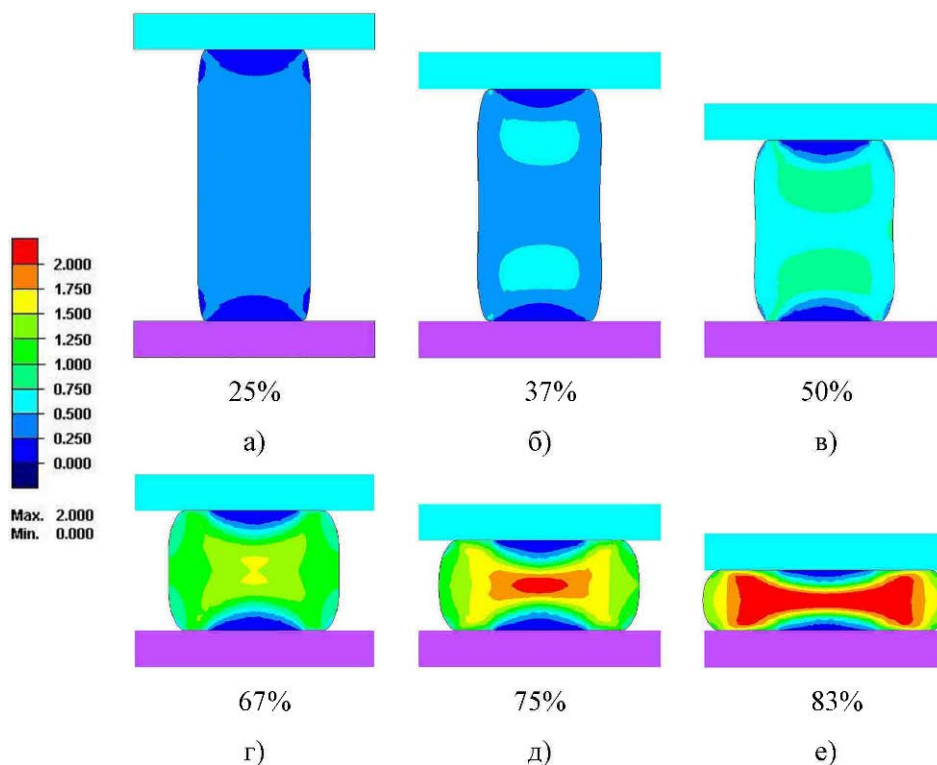


Рисунок 2.5 – Распределение накопленных деформаций при осадке в Simufact Forming

На протяжении большей части процесса величина зон затруднённой деформации изменяется мало. Лишь при больших степенях деформации (более 75 – 80%) происходит расслоение зон на центральную часть с минимальными значениями деформаций и окружающую её область с более высокими значениями (полученными в том числе и путём перехода в них металла с боковой поверхности заготовки), причём данное расслоение наблюдается больше в вертикальном направлении. Уменьшению зон в горизонтальном направлении препятствуют силы контактного трения, которые также являются причиной появления данных областей. После окончания осадки непосредственного соединения зон затруднённой деформации не происходит: между ними остаётся прослойка металла с максимальными значениями деформаций.

Распределение интенсивности напряжений при осадке образца в Simufact Forming показано на рисунке 2.6.

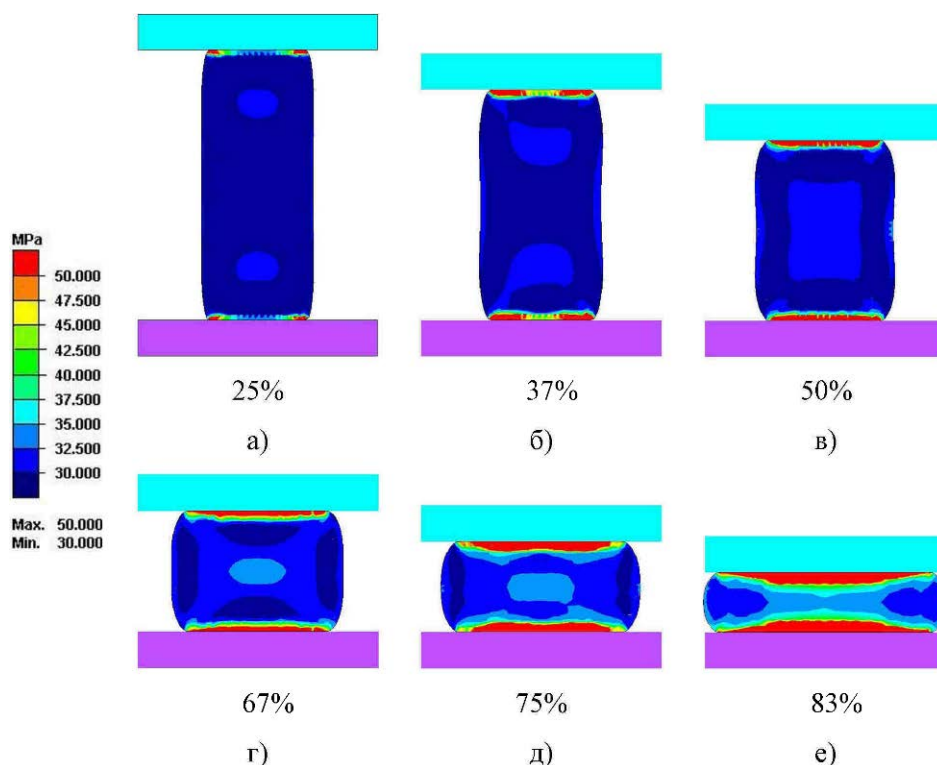


Рисунок 2.6 – Распределение интенсивности напряжений при осадке в Simufact Forming

В начальных стадиях процесса наибольшие значения напряжений проявляются в зоне контакта плит и заготовки, это вызвано как более интенсивным остыванием заготовки вследствие теплообмена, так и силами трения, препятствующими течению поверхностных слоёв металла в радиальном направлении. Также наблюдается возникновение очагов повышенных значений в местах образования очагов деформации под зонами затруднённой деформации (рисунок 2.6а и 2.6б). При дальнейшей осадке происходит слияние этих очагов в один (рисунок 2.6в).

При дальнейшем процессе полученный очаг повышенных значений приобретает крестообразную форму, при этом также увеличиваются области с наибольшими напряжениями в зонах контакта заготовки с плитами (рисунок 2.6г и 2.6д). В финале процесса вышеупомянутые зоны практически соприкасаются, при этом в боковых областях наблюдаются наиболее низкие значения напряжений (рисунок 2.6е). Несмотря на наиболее высокие значения интенсивности напряжений в местах контакта металла с плитами именно в данных областях образуются зоны затруднённой деформации. Подобная картина во многом вызвана силами контактного трения, которые затрудняют перемещение металла в радиальном направлении.

При моделировании процессов в комплексе DEFORM размерность шкалы отображения накопленных деформаций была аналогична применяемой в Simufact Forming. В то время как для интенсивности напряжений её пришлось увеличить в два раза: максимальное значение шкалы составляло 100 МПа. Это было необходимо для более наглядного отображения

распределения напряжений по сечению заготовки и связано как с особенностями моделирования в различных комплексах (например, с применением различных типов элементов), так и с условиями условий процесса (различные программные комплексы используют различные данные для описания реологических свойств используемых материалов).

На рисунке 2.7 показано распределение накопленных деформаций при осадке образца в DEFORM. В целом по распределению накопленных деформаций оно идентично моделированию, полученному с использованием Simufact Forming (рисунок 2.6): также явно выраженные зоны затруднённой деформации под осадочными плитами, которые полностью не исчезают до самого конца процесса, но и не происходит их непосредственной стыковки.

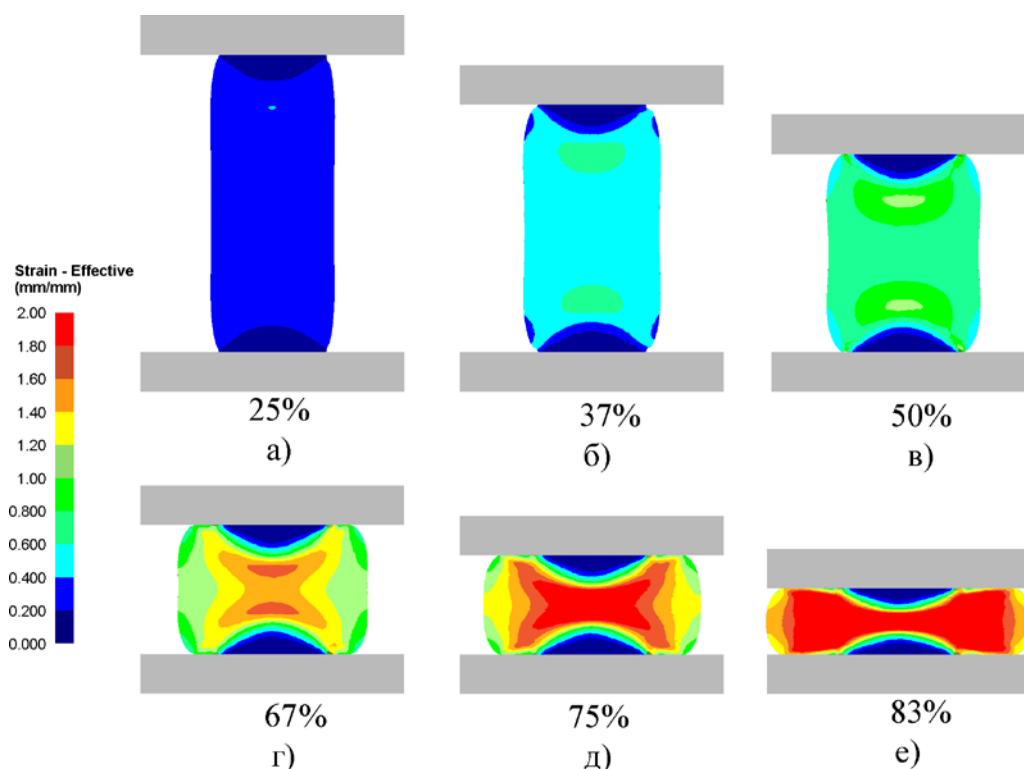


Рисунок 2.7 – Распределение накопленных деформаций при осадке в DEFORM

Но есть и отличия: более ярко выражены две области с повышенными значениями деформаций, в верхней и нижней областях заготовки которые во второй половине процесса стыкуются и объединяются в одну. При степени деформации более 50% несколько изменяются границы области с максимальными значениями деформации: в финальных стадиях процесса она занимает больший объём в центре заготовки. Отчасти это можно объяснить различиями в цветах применяемых шкал отображения: в DEFORM они менее контрастны и поэтому визуально могут сливаться друг с другом, но во многом это следствие различий расчётов.

Распределение интенсивности напряжений при осадке образца в DEFORM показано на рисунке 2.8. Здесь различия в распределении значений более существенны: области с

максимальными значениями также сконцентрированы под бойками, но их значения выше, а их распространение вглубь заготовки – наоборот меньше.

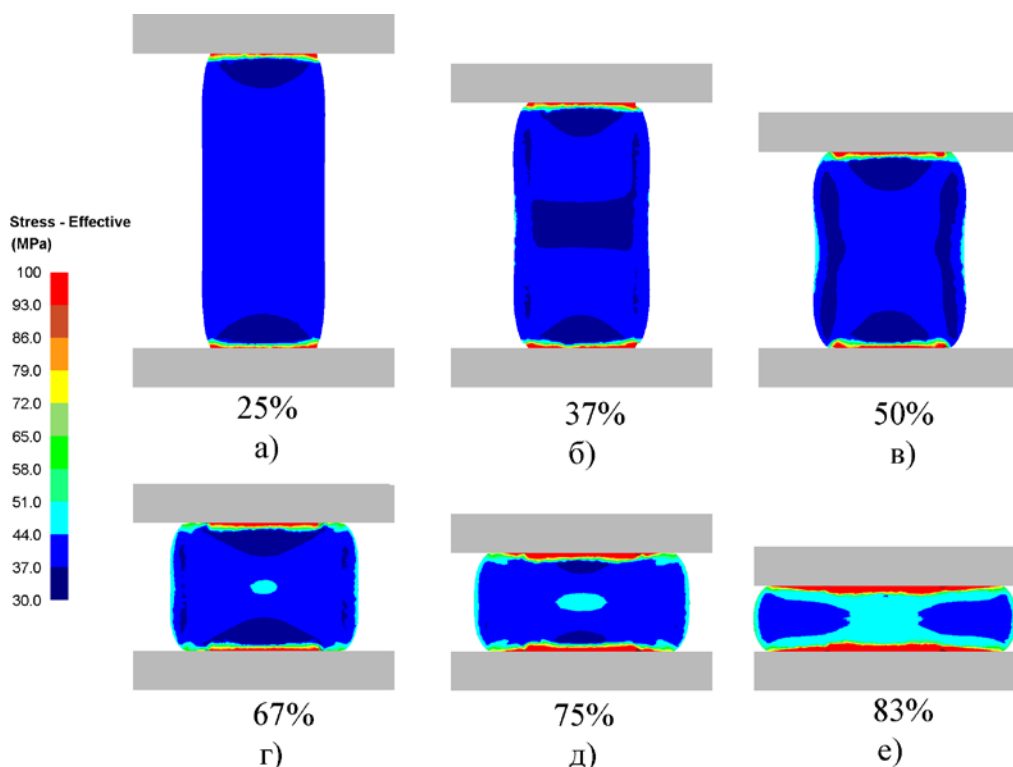


Рисунок 2.8 – Распределение интенсивности напряжений при осадке в DEFORM

Также более явно выражены области зон затруднённой деформации под плитами, где значения интенсивности напряжений относительно низкие (при этом абсолютные значения напряжений превышают полученные при моделировании в Simufact Forming и показанные на рисунке 2.7).

В целом, сравнение результатов позволяет сделать вывод об общей качественной схожести полученных результатов при моделировании. А для накопленных деформаций значения совпали и количественно.

Разница в полученных данных во многом объясняется различиями в исходных значениях реологических свойств материалов, применяемых в программных комплексах. Для более подробного анализа следует обратиться к кривым деформационного упрочнения, описывающим изменение предела текучести, служащего основным способом задания свойств материала. Для стали С45 кривые, применяемые в Simufact Forming, показаны на рисунке 2.9.

Из рисунка видно, что в данном программном комплексе заложены значения предела текучести в температурном диапазоне 800 – 1250 °С. При этом используются следующие скорости деформации: 0,01 и 150 с⁻¹. Данные кривые строятся на основе уравнения GMT:

$$\sigma_F = C_1 \cdot e^{(C_2 \cdot T)} \cdot \varphi^{(n_1 \cdot T + n_2)} \cdot e^{\left(\frac{l_1 \cdot T + l_2}{\dot{\varphi}}\right)} \cdot \dot{\varphi}^{(m_1 \cdot T + m_2)}, \quad (2.1)$$

где: T – значения температуры;

φ – степень деформации;

•

$\dot{\varphi}$ – скорость деформации;

$C_1; C_2; n_1; n_2; l_1; l_2; m_1; m_2$ – константы, подобранные для стали С45

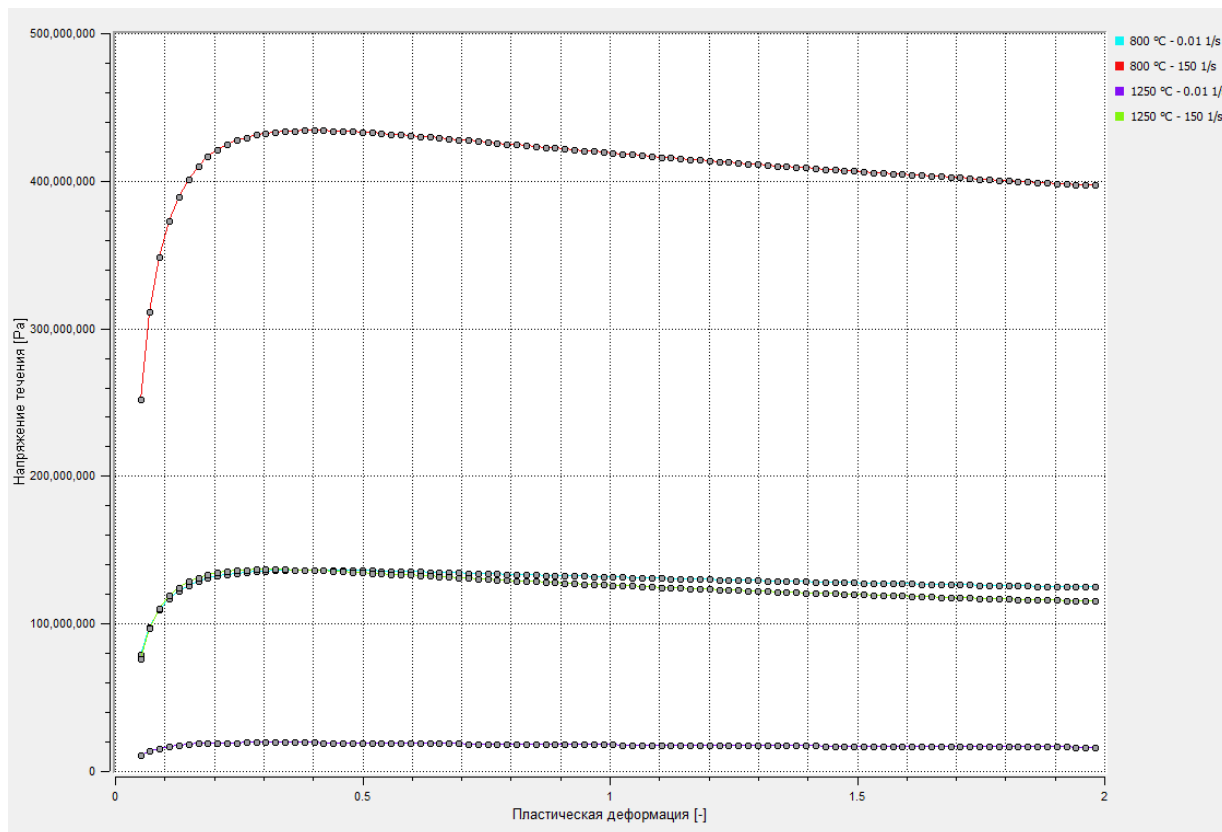


Рисунок 2.11 – Кривые деформационного упрочнения стали С45 в Simufact Forming

Для материала устанавливаются диапазоны значений температуры, степени и скорости деформации. Исходя из опытных данных определяются константы уравнения, позволяющие описать реологические свойства в диапазоне изменяющихся значений. При выходе за границы диапазона происходит экстраполяция значений предела текучести, при этом, чем больше выход за диапазон, тем менее точным получается полученный результат.

Описать более значительный диапазон значений (например от 20 °C до 1250 °C) одним уравнением затруднительно, поэтому для различных температурных интервалов применяются различные наборы констант уравнения.

Недостатком данной методики задания реологических свойств является сложность получения исходных данных, т.к. параметры кривых упрочнения задаются через коэффициенты уравнения, а не напрямую с пластометров или из справочников.

В DEFORM представлена другая методика: данные по кривым упрочнения вводятся в прямом виде, как показано на рисунке 2.10. Данные могут быть представлены для широкого диапазона температур и скоростей деформаций. Для стали AISI - 1045 задан температурный диапазон 900 – 1370 °С, а для скорости деформации использованы следующие значения: 0,01 и 100 с⁻¹. Значения за пределами данного диапазона также экстраполируются, а внутри него – интерполируются.

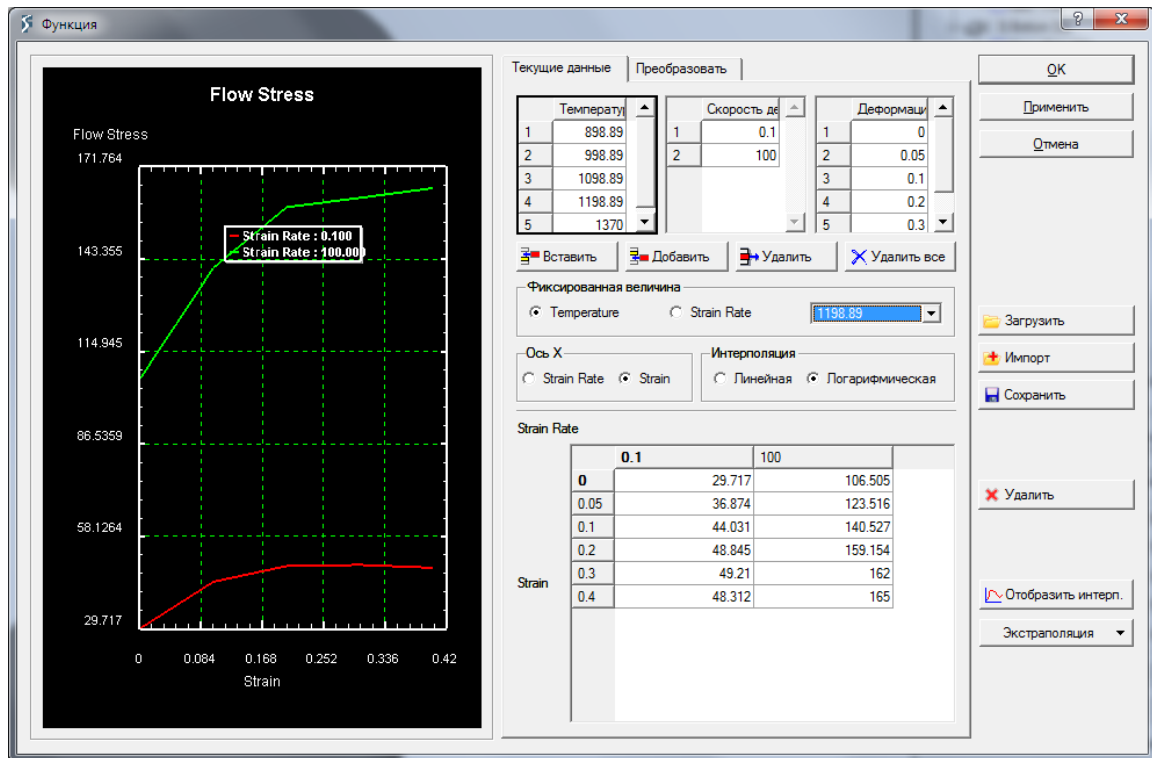


Рисунок 2.10 – Значения предела текучести для стали AISI-1045

Сами кривые упрочнения можно описать следующим уравнением:

$$\sigma_T = \sigma_0 \cdot \left(\bar{\varepsilon}, \dot{\bar{\varepsilon}}, T \right), \quad (2.2)$$

где: σ_0 – начальное значение предела текучести;

$\bar{\varepsilon}$ – степень деформации;

$\dot{\bar{\varepsilon}}$ – скорость деформации;

T – температура.

Описание реологических свойств материала при помощи данного уравнения является более понятным, а также часто используется в отечественной справочной литературе, что делает его более удобным для применения. Следует отметить, что подобный способ задания

данных (в виде таблиц) присутствует и в Simufact Forming, но он не является основным и не используется в значительной части реологических моделей материалов.

Сравнение реологических свойств материалов, по умолчанию заложенных в базы данных программных комплексов, выявило заметное расхождение в значениях. Причём это расхождение наблюдалось как между различными программами, так и с различными отечественными источниками [61 – 63]. Данное обстоятельство в значительной мере объясняет расхождение полученных при моделировании значений.

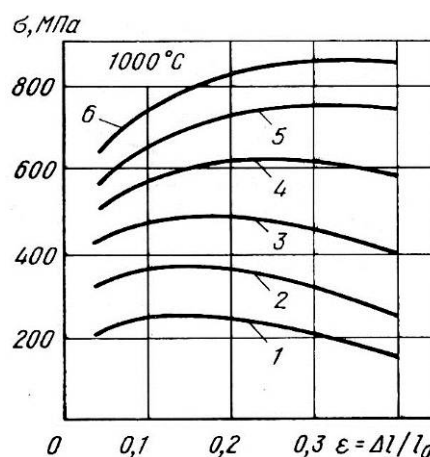
Для дальнейшего моделирования было принято решение использовать программный комплекс DEFORM, позволяющий более простой ввод и редактирование характеристик материалов. Также в дальнейшем данные для реологии применяемых сталей и сплавов брались из литературных источников, либо из результатов исследований заводских лабораторий.

2.2. Создание реологической модели материала в DEFORM

База данных применяемых в комплексе DEFORM материалов ориентирована на зарубежные стандарты и, как следствие, в ней отсутствуют отечественные марки сталей и сплавов. Более того, она содержит лишь наиболее распространённые марки, что часто затрудняет подбор аналогов. Так, если для конструкционных углеродистых сталей подобрать соответствия между отечественным и зарубежным сортаментом легко, то для высоколегированных (особенно быстрорежущих и жаропрочных) сплавов уже гораздо сложнее.

Как было рассмотрено ранее, большинство физических и механических свойств материалов в DEFORM описывается в виде графиков изменения параметров, построенных при помощи задания массивов данных. Например, так задаются как кривые упрочнения, так и температурные параметры: теплоёмкость и теплопроводность. Чем больше значений внесено и чем больший диапазон изменений они охватывают, тем ближе модель к реальным свойствам применяемого материала. Однако параметры можно задавать и в виде одного значения – константы, но это заметно снижает итоговую точность моделирования.

Непосредственно для задания механических свойств материала необходимо получить кривую упрочнения, которая для горячей обработки металлов давлением описывается уравнением (2.2). Получить данные кривые можно как напрямую с современного пластометра (например, Gleeble 3800), так и используя справочные данные. На рисунке 2.11 приведен пример кривых упрочнения для жаропрочного сплава ХН56ВМТЮ (ЭП199), взятых из [56].



Скорость деформации с^{-1} : 1 – 0,01; 2 – 0,5; 3 – 1; 4 – 10; 5 – 50; 6 – 100

Рисунок 2.11 – Кривые упрочнения сплава ХН56ВМТЮ для 1000 °С

Далее существует несколько путей обработки данных. Например, можно при помощи графика из справочника и линейки определить нужные значения. Если измерять данные для одной марки, то преимуществом данного способа является его быстрота. Однако если необходимо получить данные для множества марок в различных диапазонах параметров, то этот способ довольно утомителен, т.к. приходится довольно много времени проводить над небольшим рисунком, делая постоянные измерения вручную и переводя их в нужный масштаб. Итоговый результат может содержать ошибки, полученные из-за рутинности данной операции, а их исправление потребует заново проводить измерения и пересчёт в используемый масштаб, что также занимает значительное время.

Иным способом является обработка исходных данных при помощи программ САПР. Для этого необходимо сначала отсканировать нужную страницу с графиками кривых упрочнения. К сожалению, не всегда удастся получить хорошее изображение напрямую со сканера, тогда необходимо произвести ретуширование. В большинстве случаев достаточно изменить баланс яркости и контрастности, чтобы получить высококонтрастное изображение (в идеале битовое чёрно-белое). Современные графические редакторы (такие как Adobe Photoshop, Paint.NET и др.) позволяют автоматизировать данные операции. Затем изображение импортируется в любую чертёжную САПР: AutoDesk AutoCAD, NanoCAD, Компас – 3D, где подбирается масштаб отображения, при котором одному делению по шкале абсцисс (равному 1 МПа) соответствует 1 мм чертежа. Вообще можно использовать любой масштаб, но данный является наиболее интуитивно понятным, т.к. при расчетах шаг изменения предела текучести обычно соответствует 1 МПа. Кривые упрочнения обводятся при помощи инструмента «Spline» («Сплайн» в отечественных программах), как показано на рисунке 2.12.

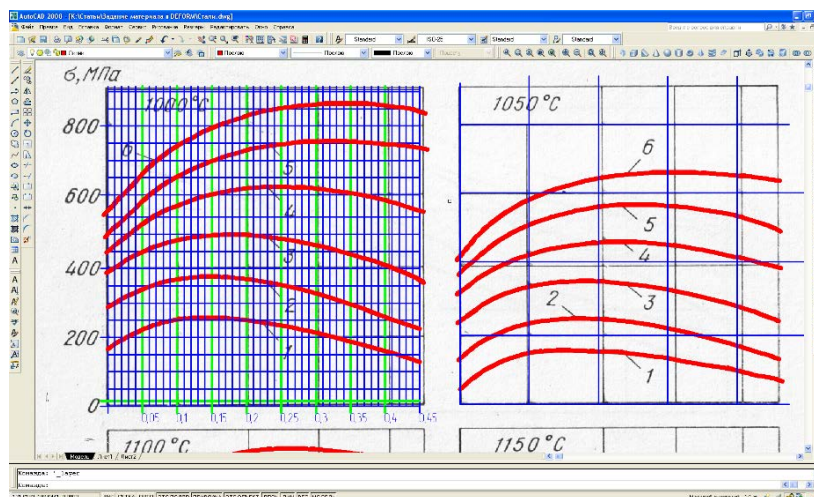


Рисунок 2.12 – Обработка данных в программе САПР

Чем больше опорных точек будет использовано и чем точнее будет повторена кривая, тем точнее будут итоговые данные. Для удобства восприятия и дальнейших замеров можно произвести дополнительные построения в виде линий сетки.

Далее производится вычисление значений в опорных точках, для чего применяется инструмент линейного размера, рисунок 2.13.

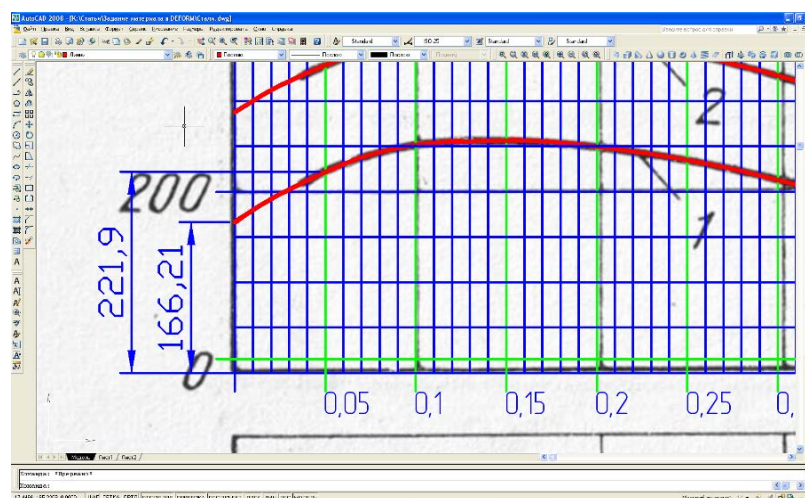


Рисунок 2.13 – Результат обработки данных

Для вышеописанного способа есть и возможности для дополнительной автоматизации: путём применения программ для автоматического распознавания чертежей (например, RxSpotlight Pro) позволяющих перевести растровое изображение кривых упрочнения в векторный формат, для дальнейшей обработки. Однако для успеха подобной операции желательно иметь высококонтрастное исходное изображение (желательно вообще битовое чёрно-белое) высокого разрешения (порядка 600 dpi), в противном случае у программы могут возникнуть сложности при распознавании линий чертежа. К тому же полученное векторное

изображение нужно будет привести в соответствие в необходимом масштабом. Поэтому подобная автоматизация оправдана при сборе данных для большого количества материалов.

Полученные значения заносятся в таблицы. Удобнее всего данную операцию производить в табличном процессоре Microsoft Excel, Open Office, или Libre Office. Данные для сплава ЭП199 (ХН56ВМТЮ) и температуры 1000 °С приведены в таблице 2.3. Подобные таблицы составляются для всего диапазона температур, при которых производились испытания. Далее полученные данные необходимо ввести в DEFORM. Для этого имеется отдельный инструментарий, позволяющий как создавать новые, так и редактировать существующие материалы. Окно непосредственного ввода данных представлено на рисунке 2.14.

Таблица 2.3 – Пример обработанных данных по кривым упрочнения для сплава ХН56ВМТЮ

Т = 1000 °С	скорость деформации, с ⁻¹					
	0,01	0,5	1	10	50	100
	Сопротивление деформации σ_s , МПа					
0	166	288	390	435	486	553
0,05	222	340	433	515	580	661
0,1	252	369	468	568	652	742
0,15	256	377	481	601	698	794
0,2	250	369	483	618	730	829
0,25	235	354	472	622	747	852
0,3	213	328	453	618	754	861
0,35	188	296	427	605	755	865
0,4	160	259	395	584	747	859
0,45	128	225	344	554	736	841

Для удобства восприятия производится автоматическое построение графиков. Температурные свойства материала (теплопроводность и теплоемкость) также задаются аналогичным способом.

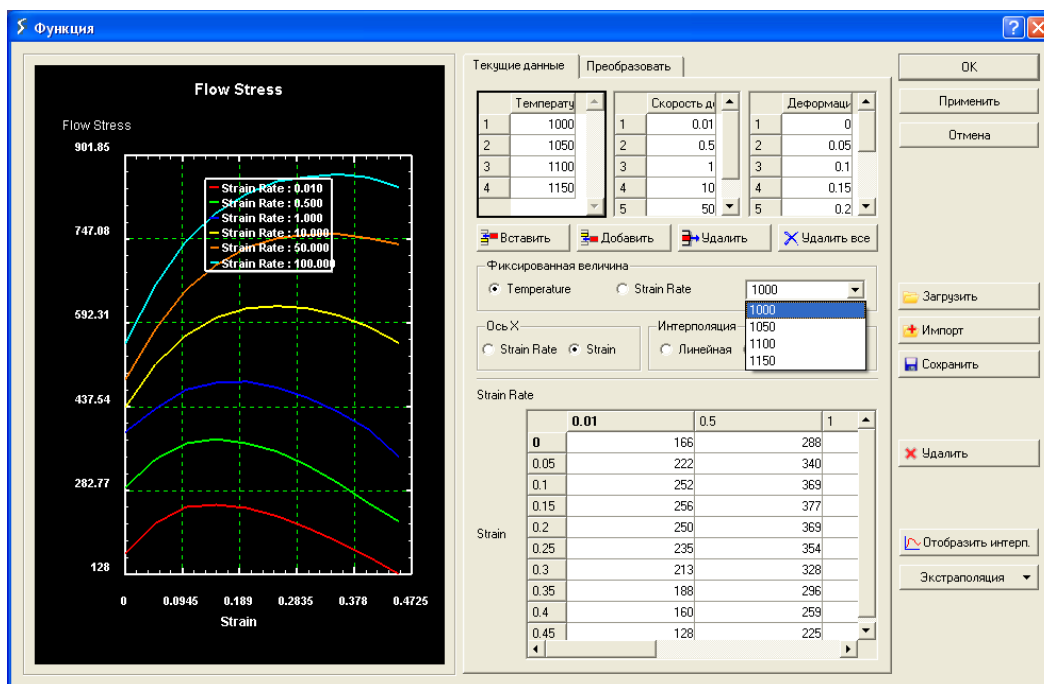


Рисунок 2.14 – Итог задания реологических свойств сплава ХН56ВМТЮ

Необходимость задания реологических свойств материала может быть вызвана несоответствием температурно-скоростных условий деформирования и исходных реологических данных. В качестве примера на рисунке 2.15 показаны артефакты моделирования, вызванные недостатками модели реологических свойств, возникшие при моделированииковки на РОМ.

Заметны нехарактерные для процесса выступы на поверхности заготовки, состоящие из отдельных элементов сетки. Розовым отмечены места зажимов, также нехарактерные для подобного процесса. Само поведение внешних слоёв также имело мало общего с реальностью: наблюдалась излишняя пластичность (что во многом и вызвала зажимы) и частое перестроение сетки.

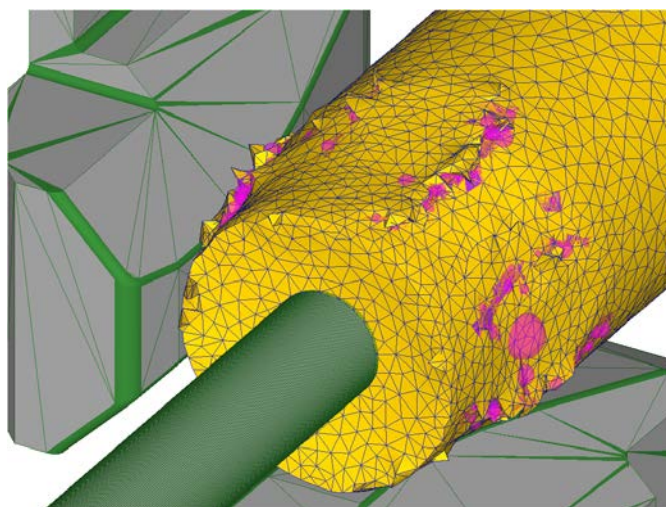


Рисунок 2.15 – Артефакты моделирования, вызванные недостатками модели реологических свойств

Причиной данных явлений стал выход за заложенный в реологическую модель диапазон скоростей деформации. В используемой изначально модели были описаны свойства материала при скорости деформации вплоть до 1 с^{-1} , в то время как при моделировании скорость деформации достигала вплоть до 14 с^{-1} , а средние значения составляли порядка $5 - 7 \text{ с}^{-1}$. Для описания изменившихся параметров процесса DEFORM начинал экстраполировать значения предела текучести, однако в данном случае (ввиду необходимости экстраполяции в пиковых значениях более чем на порядок) это привело к появлению многочисленных ошибок и некорректному расчету: пластичность более деформированных внешних слоёв заготовки значительно возрастала, и они буквально сползали с менее пластичной основы. Причиной этого была особенность реологических свойств сплава: изначальное повышение значений предела текучести, сопровождающее увеличение степени деформации, в дальнейшем переходит в понижение значений, а некорректная экстраполяция данных значительно увеличила пластичность металла в более деформированных областях. Для продолжения моделирования была задана иная реологическая модель сплава, охватывающая весь диапазон возникающих скоростей деформации.

2.3 Оценка деформации металла при протяжке с помощью исследования пробного объёма

Протяжка заготовки является одной из основных операций ковки, позволяющей изменить форму поперечного сечения, увеличить длину поковки. При единичных обжатиях происходят естественные макросдвиги металла, возникающие вследствие локализации пластической деформации в области границ физического очага деформаций. Однако, кроме естественных макросдвигов, возможно появление и дополнительных, которые могут оказывать заметное воздействие на проработку структуры металла при ковке и, как следствие, к механическим свойствам готовой поковки. Одним из способов управления подобными макросдвигами при ковке является применение различных типов бойков, которые осуществляют перемещения металла дополнительно к нормальному обжатию заготовки [14].

Для детального рассмотрения деформированного состояния и направления потоков металла была рассмотрена деформация *пробного объёма* – ограниченных областей (в данном случае исходной сферической формы), расположенных в различных местах заготовки. Сферическая форма делает пробный объём схожим с эллипсоидом деформации, но в отличие от него, позволяет оценить напряжённое состояние не в определённой точке, а в ограниченной области. Также пробный объём при деформации искажается не только по основным

координатным осям, а по всей поверхности сферы, что позволяет определить направления потоков металла в объёме заготовки.

При моделировании процесса протяжки использовался модуль Multiple Operations инженерного программного комплекса DEFORM, позволяющий задавать последовательность различных операций с последующим их выполнением [58].

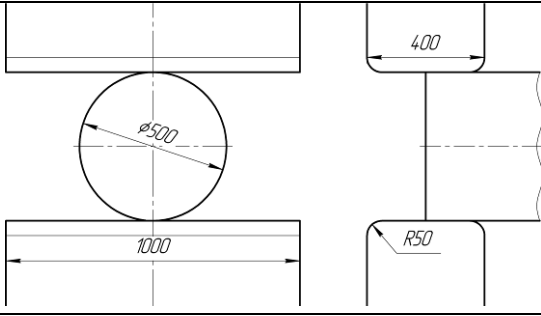
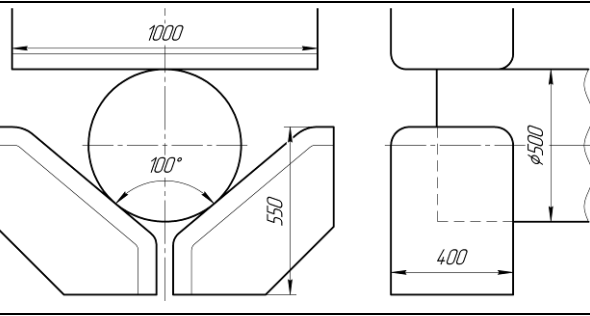
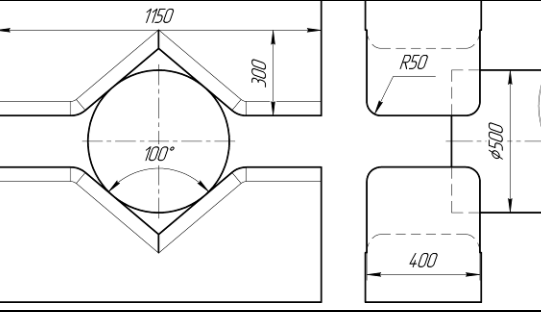
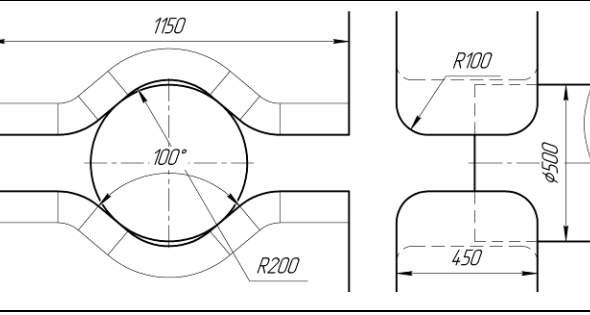
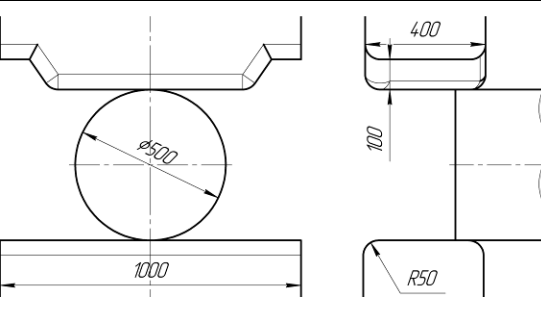
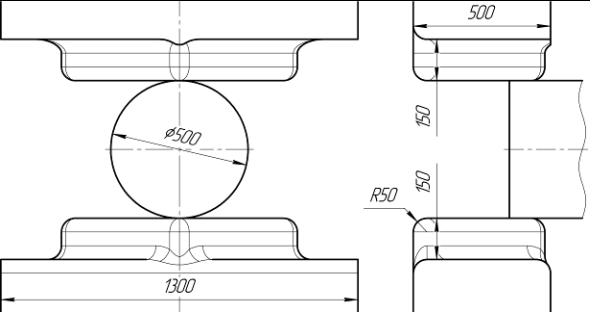
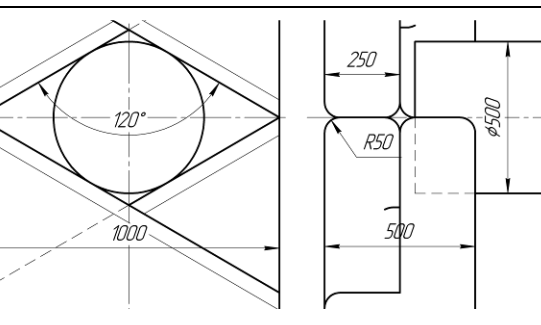
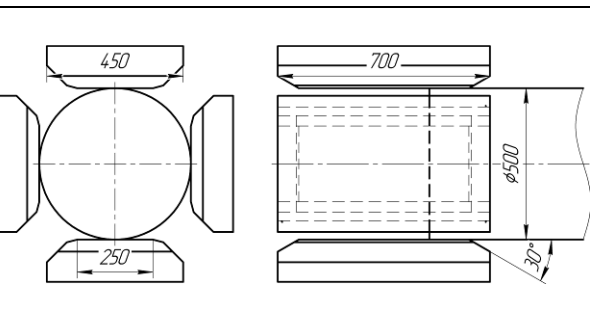
Для всех типов бойков применялась одинаковая цилиндрическая заготовка диаметром 500 мм и длиной 1000 мм. Заготовке были присвоены реологические свойства жаропрочного сплава ЭП708 (ХН62ВМЮТ) [64]. Для попадания в необходимый интервал скоростей деформации, заданный характеристиками материала, скорость перемещения бойков была задана постоянной, равной 150 мм/сек. Для всех типов бойков выполнялось два прохода с кантовкой заготовки на 90° в конце первого прохода (для некоторых вырезных бойков угол кантовки отличался). Степень деформации в каждом проходе составляла 20 %, таким образом, после первого прохода высота заготовки составляла 400 мм, а после второго порядка 410 мм. Данные значения близки к критическим максимальным деформациям за одно обжатие для малопластичного сплава ЭП708, но они позволяют наглядно оценить течение металла в объёме поковки. Перед началом деформации заготовке по всему сечению присваивалась температура в 1200 °С, затем моделировалась транспортировка от печи до пресса: путём охлаждения на воздухе в течение 120 секунд, что создавало необходимый градиент температуры. Бойкам присваивалась постоянная температура 150 °С. Количество элементов и соотношение элементов в конечно–элементной сетке заготовок было одинаково для всех процессов и составляло 32000 и 1:2 соответственно. Бойки на сетку не разбивались и выполнялись в виде абсолютно жёстких тел.

Для моделирования были выбраны бойки следующих типов:

- плоские;
- комбинированные с углом выреза нижнего бойка 100°;
- вырезные ромбические с углом выреза 100°;
- вырезные круглые с радиусом выреза 200 мм и углом выреза 100°;
- комбинированные с непрямолинейным фронтом подачи;
- с непрямолинейным фронтом подачи;
- вырезные со скрещивающимися рабочими поверхностями, угол выреза 120°;
- четырёхбойковый ковочный блок.

Размеры применяемых бойков и исходное положение заготовки для всех случаев моделирования приведено в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Применяемые бойки

плоские	комбинированные
	
вырезные ромбические	вырезные круглые
	
комбинированные с непрямолинейным фронтом подачи	с непрямолинейным фронтом подачи
	
со скрещивающимися рабочими поверхностями	ковочный блок
	

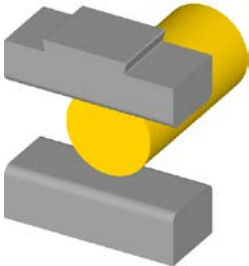

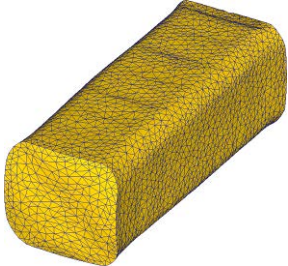
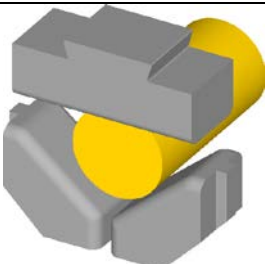
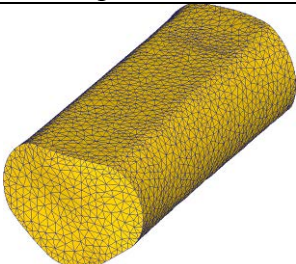
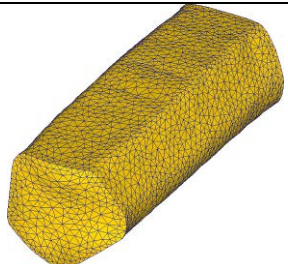
Модели бойков и заготовки были построены в комплексе SolidWorks, далее собраны в сборки и импортированы в модуль DEFORM Multiple Operations. Выбор данного модуля вместо стандартного Препроцессора связан с его возможностями задавать последовательно серию различных операций, расчёт которых также производится автоматически. Эта возможность заметно облегчает моделирование такой операции как протяжка.

Позиционирование заготовки и её охлаждение между обжатиями заменялась отдельной операцией модуля Multiple Operations, при которой заготовка перемещалась на нужное место (имитировалась подача) и остывала в течение 3 сек. Продольная подача поковки была одинакова для большинства типов бойков и составляла 150 мм. Исключение составлял ковочный блок – 200 мм.

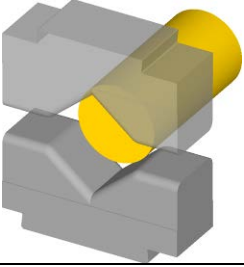
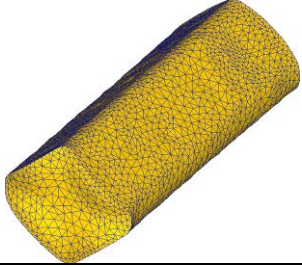
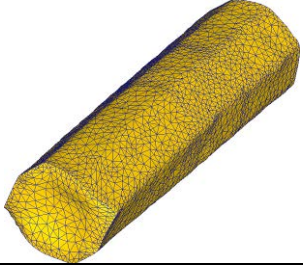
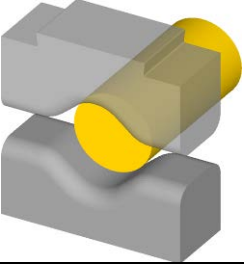
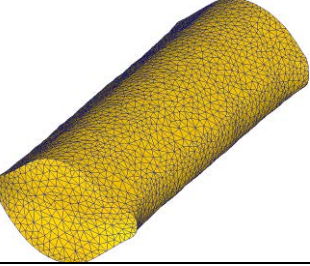
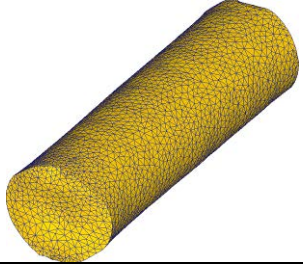
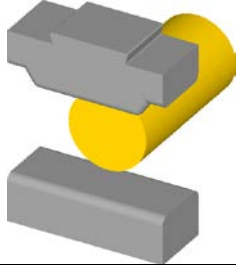
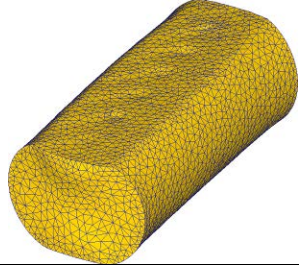
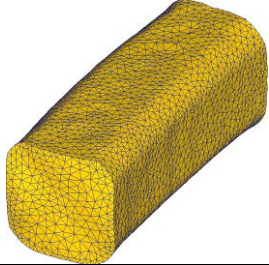
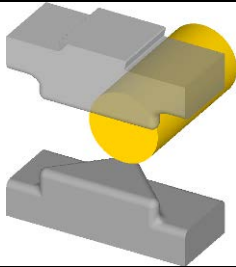
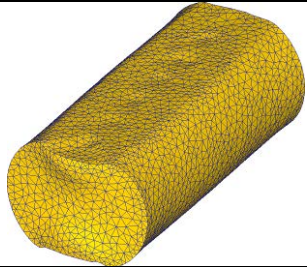
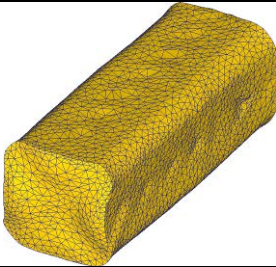
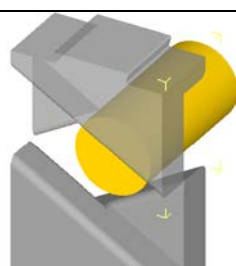
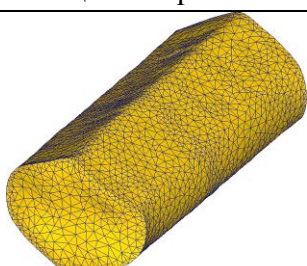
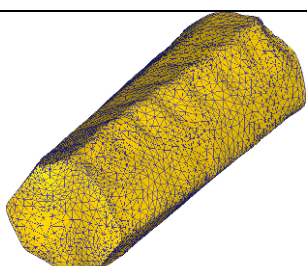
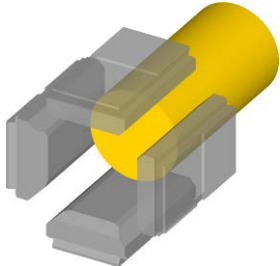
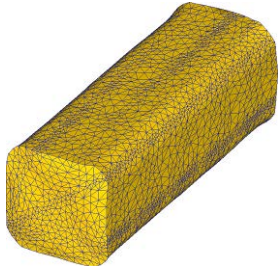
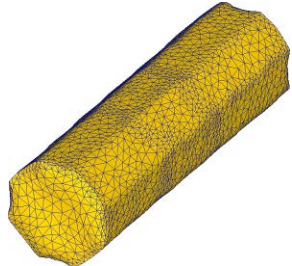
Работа манипулятора моделировалась следующим образом: на одной из концов заготовки (который в реальном процессе удерживает манипулятор) выбирались узлы КЭ сетки. Далее перемещение этих узлов ограничивалось одним направлением, совпадающий с направлением перемещения верхнего бойка (по оси Z), а два других направления (оси X и Y) фиксировались путём присваивания им скоростей перемещения равных 0 мм/сек. Это обеспечило свободное перемещение заготовки по оси перемещения верхнего бойка. После протяжки части заготовки зафиксированные узлы на одной стороне освобождались и одновременно таким же образом закреплялись узлы на противоположном конце. Таким образом, моделировался перехват заготовки в манипуляторе. Для описания сил трения, возникающих между рабочим инструментом и поковкой использовался закон Амонтона–Кулона, фактор трения составлял 0,3. Коэффициент теплообмена принимался равным 5 Н/сек/мм/С° ($5000 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

Построенные на их основе трёхмерные модели, совмещённые в сборки, а также результаты моделирования приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Сборки моделей и формоизменение заготовок

Общий вид	Форма после первого прохода	Форма после второго прохода
1	2	3
плоские бойки		
		
комбинированные бойки		
		

Продолжение таблицы 2.5

1	2	3
вырезные ромбические бойки		
		
вырезные круглые бойки		
		
комбинированные бойки с непрямолинейным фронтом подачи		
		
бойки с непрямолинейным фронтом подачи		
		
бойки со скрещивающимися рабочими поверхностями		
		
ковочный блок		
		

Как видно, при одинаковом относительном обжатии, форма заготовок заметно отличается в зависимости от типа применяемого бойка. В реальных процесса разные бойки применяются для получения различных поковок, но для моделирования данным правилом пренебрегли, т.к. основной задачей было исследовать влияние формы бойков на НДС заготовки и потоки течения металла при протяжке (особенно с учётом возникающих макросдвигов).

Для моделирования формоизменения пробного объёма в заготовке были рассчитаны координаты для 227 контрольных точек, образующих сферу: 216 из которых применялись для построения 9 окружностей по 9 точек в каждой, а оставшиеся 11 составляли продольную ось. Диаметр полученной сферы составлял 20 мм. Подобный размер был выбран исходя из плотности конечно-элементной сетки: в сферу попадало сразу несколько элементов, что увеличивало точность итоговых результатов. Далее массив точек загружался в Постпроцессор DEFORM и производилось отслеживание перемещения каждой точки.

После расчёта на основе имеющегося массива точек в Компас-3D с помощью поверхностных кривых создавался каркас сферы. Точки и построенный каркас для исходной сферы в различных плоскостях отображения показаны на рисунках 2.16а – 2.16в. Для удобства восприятия и интерпретации результатов каркас «обтягивался» плоскими поверхностями. В итоге получалась сфера, показанная на рисунках 2.16г – 2.16е.

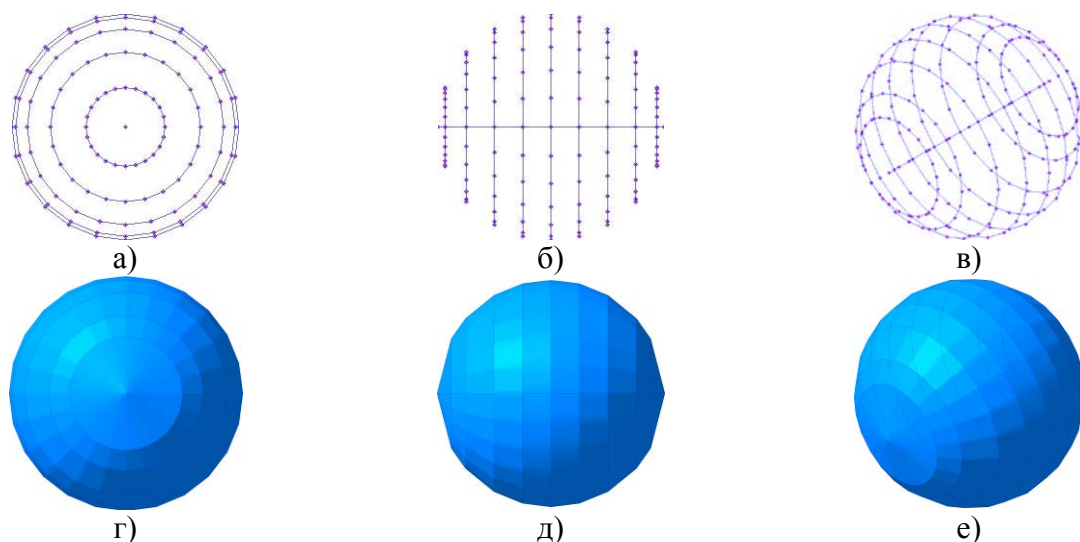
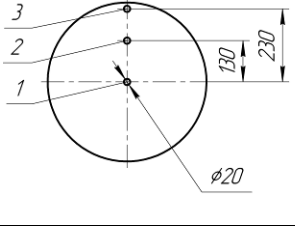
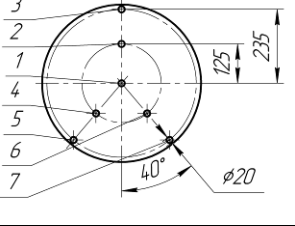
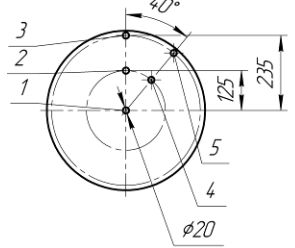
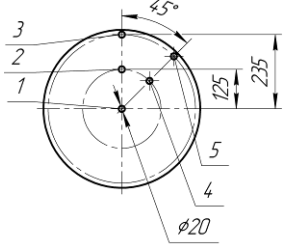
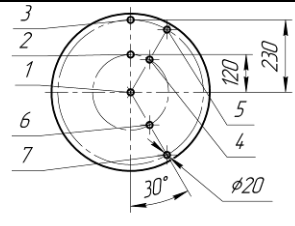
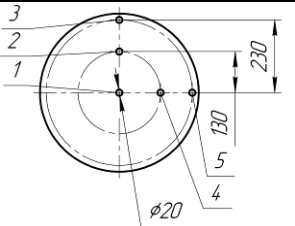


Рисунок 2.16 – Расположение контрольных точек и построенная на их основе пробный объём

Массив координатных точек помещался в передней части заготовки, на расстоянии 200 мм от края в продольном направлении. Подобное расположение совместно с величиной подачи позволило им находиться непосредственно в очагах деформаций единичных обжатий. Положение сфер в поперечном сечении различалось для различных типов бойков и представлено в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Варианты расположения пробных объёмов

для плоских бойков и бойков с непрямолинейным фронтом подачи	для комбинированных бойков
	
для вырезных ромбических бойков	для вырезных круглых бойков
	
для бойков со скрещивающимися рабочими поверхностями	для ковочного блока
	

Размещение сфер в радиальном направлении зависело от предполагаемых потоков течения металла: на прямой линии между центром заготовки и местом соприкосновения с бойками. Для восприятия масштаба на рисунке 2.17 показана сфера №1, помещённая в применяемую заготовку.

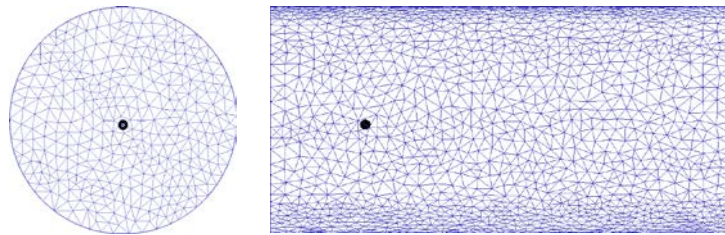


Рисунок 2.17 – Расположение пробного объёма №1 в заготовке

Координаты каждой сферы рассчитывались отдельно, т.к. это облегчало дальнейшую обработку данных, ускоряло время отдельного расчёта и снижало вероятность сбоя в работе программного комплекса.

Из всего расчёта выбирались отдельные шаги (обычно это было два шага – после каждого из проходов), из которых извлекались данные по местоположению контрольных точек.

Обработка полученных данных велась следующим образом: после расчёта перемещений точек их координаты записывались в отдельный файл, который в дальнейшем обрабатывался в Excel. Обработка заключалась в разбиении массива координат на отдельные файлы, которые затем импортировались в Компас–3D, где на их основании строились поверхностные кривые, а затем деформированные сферы. Для ускорения операций обработки и предотвращения возможных ошибок, в Excel был написан макрос, который выполнял значительную часть рутинной работы. Построения в Компас–3D выполнялись вручную. Всего было создано и рассчитано 83 сферы.

Для более детальной оценки изменения размеров сфер до и после деформации на них, как показано на рисунке 2.18а, наносились рассчитанные точки.

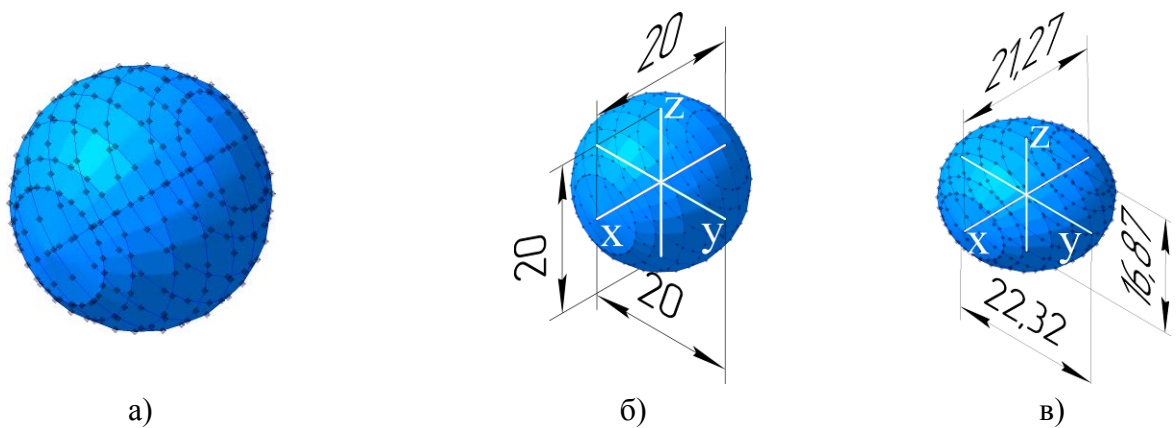


Рисунок 2.18 – Стадии построения и формоизменения пробного объёма

Далее производилось построение координатных осей: X – продольной (красного цвета), Y – поперечной (зелёного) и Z – вертикальной (белого), как показано на рисунке 2.18б, также производилось измерение их длины. Построение осей производилось через определённые точки, что позволило измерять изменение длины осей после деформации и изменения положения сфер, как показано на рисунке 2.18в. При наклоне осей производилось построение дополнительных конструктивных плоскостей, расположенных вдоль осей, по которым производились измерения. Это позволило оценить истинные размеры осей. Данные измерения производились для всех построенных сфер.

Следует отметить, что данная методика измерения размеров только основных осей не позволяет количественно оценить изменение кривизны поверхностей сфер (которая по большей части показывает направление макросдвигов металла), поэтому её оценка проводится путём визуального осмотра и сравнения деформированной и исходной сфер для определения направления движения потоков металла в объёме заготовки.

Дальнейшим этапом развития методики является оценка смещения каждой точки в трёхмерных координатах, образующей сферу относительно базовой точки (которой может стать

центральная точка), что позволит более детально определить течение металла. Производство подобных детальных вычислений выходит за рамки данной работы и поэтому на данном этапе исследований не выполнялось.

Результаты формоизменения сфер для различных типов бойков после первого и второго проходов, а также изменения размеров основных осей представлены в таблицах 2.6 – 2.20. Для более полной картины деформированного состояния после каждого из проходов на заготовки наносились продольный и поперечный разрезы, показанные на рисунках 2.19 – 2.34.

Таблица 2.6 – Формоизменение пробного объёма при использовании плоских бойков

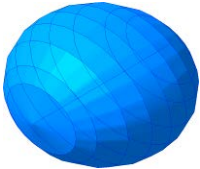
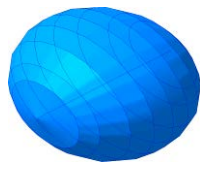
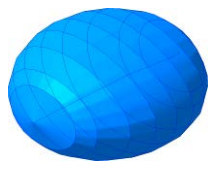
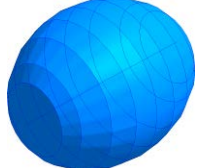
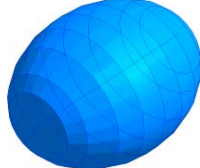
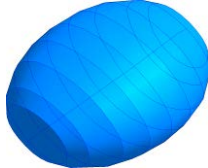
№ прохода	№ пробного объёма		
	1	2	3
1			
2			

Таблица 2.7 – Изменение размеров пробного объёма по основным осям при протяжке в плоских бойках

№	Абсолютные значения, мм						Относительные значения, %								
	Первый проход			Второй проход			Первый проход			Второй проход			Первый проход		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	21,3	22,3	16,9	23,7	18,8	18	6,5	11,5	-15,5	11,3	-15,7	6,5	18,5	-6	-10
2	21,7	22,6	16,3	24	19,6	16,8	8,5	13,0	-18,5	10,6	-13,3	3,1	20	-2	-16
3	23,7	21,3	15,2	25,8	20,3	14,3	18,5	6,5	-24,0	8,9	-4,7	-5,9	29	1,5	-28,5

Как видно, при протяжке в плоских бойках все три сферы испытывают как сжимающие деформации в вертикальном направлении, так и растягивающие в поперечном и продольных направлениях. После первого прохода сферы видоизменяются в расплюснутые эллипсоиды. При этом, чем ближе к поверхности, тем больше величина сжатия в вертикальном направлении.

Искажение второй и третьей сферы, заметное по изменению угла центральной оси, повороту и вертикальному смещению плоскостей, отображает потоки течения металла в объёме поковки. Наиболее искажённой оказывается третья сфера, расположенная в месте наибольшего сосредоточения деформаций. В данной области наблюдается значительное течение металла не только в вертикальном, но и в продольном направлении (оно вызывает появление утяжины на торцевых поверхностях поковки), постепенно уменьшающееся по мере приближения к

центральной области. Поэтому первая сфера, как раз расположенная в осевой зоне удлинится в продольном направлении более равномерно, а после второго прохода приобретает форму эллипсоида, вытянутого только по одной, продольной, оси. В то время как две другие сферы деформированы более неравномерно и по всем трём осям. Подобное различие в искажениях сфер согласуется с теоретическими предположениями и практическими наблюдениями: при протяжке в плоских бойках (особенно при сравнительно небольших обжатиях) осевая зона может быть проработана (измельчена литая структура слитка) значительно меньше, чем приповерхностные области.

Подобное распределение накопленных деформаций после первого прохода показано на рисунке 2.19. Максимальные значения концентрируются по границам единичных обжатий в периферийных областях. По мере перехода к осевой области значения деформаций уменьшаются. Сама осевая зона также неоднородна: имеются области с более высокими значениями, расстояние между которыми равно величине подачи.

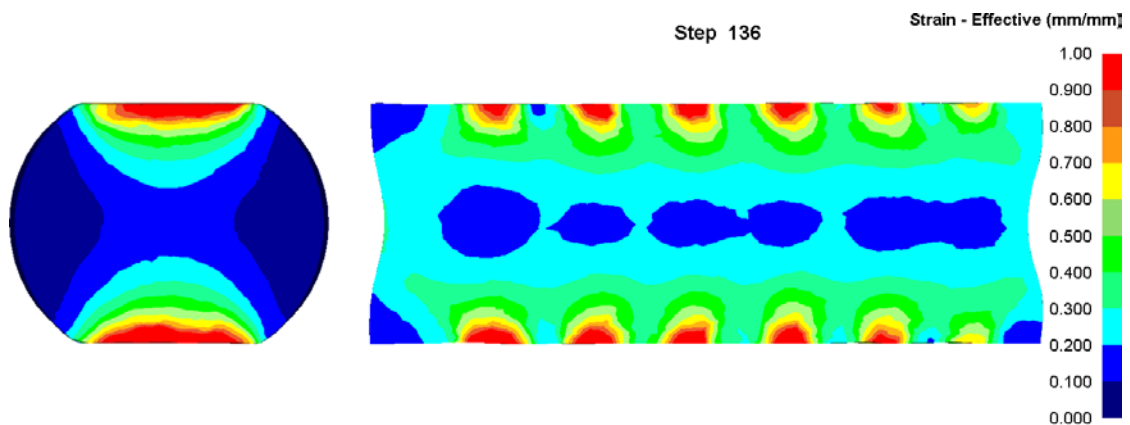


Рисунок 2.19 – Распределение накопленных деформаций при использовании плоских бойков после первого прохода

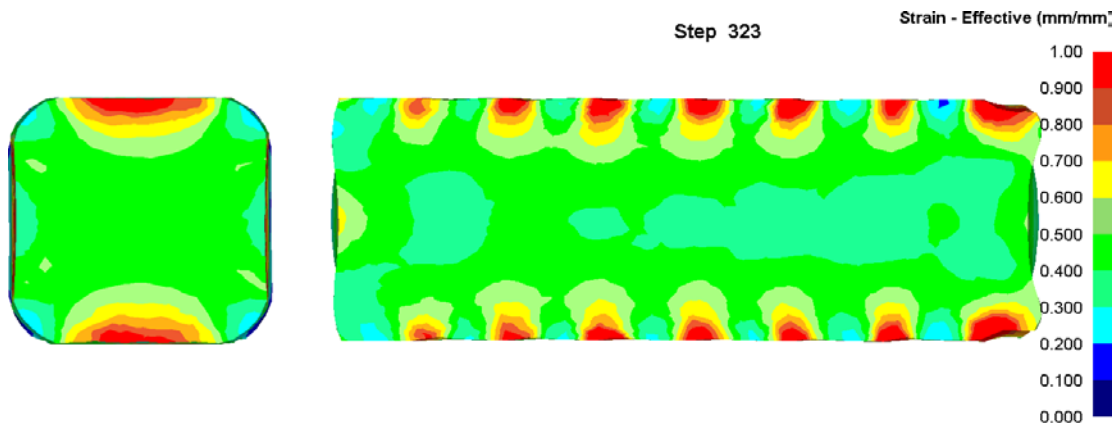
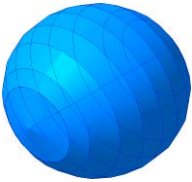
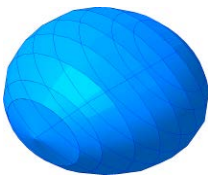
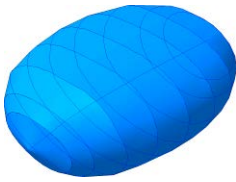

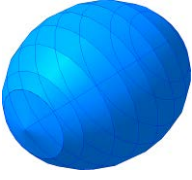
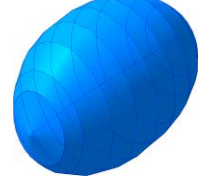
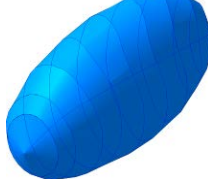
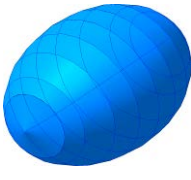
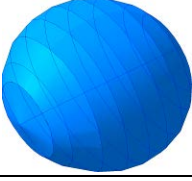
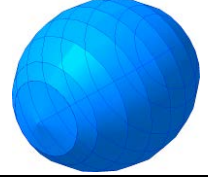
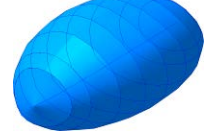
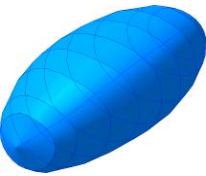
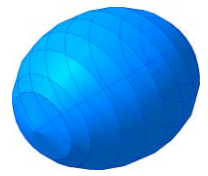
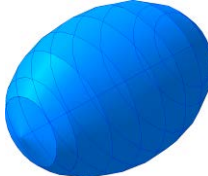


Рисунок 2.20 – Распределение накопленных деформаций при использовании плоских бойков после второго прохода

Из рисунка 2.20 видно, что после второго прохода распределение деформаций в осевой зоне выравнивается, что также соответствует ранее описанному изменению формы первой сферы. В поверхностных слоях градиент распределения деформаций не выравнивается, поэтому вторая и особенно третья сферы остаются эллипсоидами. При этом следует учитывать, что сферы из второго прохода для удобства отображения в таблицах повернуты на 90° , они испытали значительную деформацию: т.к. после кантовки они были вытянуты в вертикальном направлении (более протяженная ось поперечного сечения была обращена к рабочим поверхностям бойков), а после второго прохода вновь сжались по вертикальной оси.

При использовании комбинированных бойков в картине формоизменения сфер происходят заметные изменения (таблицы 2.8 и 2.9).

Таблица 2.8 – Формоизменение пробного объёма при использовании комбинированных бойков

№ прохода	№ пробного объёма			
	1	2	3	4
1				
2				
	5	6	7	
1				
2				

Как видно, сфера 3 деформируется в вертикальном направлении сильнее, а сферы 4, 5 и 6, 7 испытывают сжатие в перпендикулярном к месту соприкосновения к нижнему бойку направлению. При этом, области поверхности обращённые к месту контакта с бойками (условный верх) деформированы значительно сильнее (вплоть до превращения выпуклой поверхности сферы в плоскую для сфер 3 и 7). После второго прохода картина меняется ещё сильнее: например сфера 3 помимо удлинения в продольном направлении испытывает

неравномерные деформации в радиальном направлении, что соответствует потокам течения металла после кантовки заготовки. Происходит искажение отдельных окружностей сфер в продольном направлении, что свидетельствует о неравномерных потоках течения металла в объеме заготовки. Сфера 1, расположенная в центральной области после первого прохода деформируется с трёх сторон, при этом более заметно влияние верхнего плоского бойка (в реальном процессе также наибольшая вытяжка наблюдается под верхним бойком).

После второго прохода также наблюдается преимущественно продольная деформация (вытяжка) сферы, но на её поверхности также видны следы течения металла, вызванные двумя рабочими поверхностями нижнего вырезного бойка. Форма деформированной сферы ближе к осесимметричному эллипсоиду (в сравнении с плоскими бойками), что свидетельствует о наличии сжимающих напряжений в центральной части поковки.

Таблица 2.9 – Изменение размеров пробного объема по основным осям при протяжке в комбинированных бойках

№	Абсолютные значения, мм						Относительные значения, %								
	Первый проход			Второй проход			Первый проход			Второй проход			Первый проход		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	20,9	20,7	18,6	22,8	18,7	18,7	4,5	3,5	-7,0	9,1	-9,7	0,5	14	-6,5	-6,5
2	22,4	23	15,6	24,9	20,3	16	12,0	15,0	-22,0	11,2	-11,7	2,6	24,5	1,5	-20
3	28,2	21,9	12,3	31,1	19,9	12,2	41,0	9,5	-38,5	10,3	-9,1	-0,8	55,5	-0,5	-39
4	21,3	20,3	18,6	23	19	18,7	6,5	1,5	-7,0	8,0	-6,4	0,5	15	-5	-6,5
5	24,5	18,8	17,7	27,5	18,5	16,6	22,5	-6,0	-11,5	12,2	-1,6	-6,2	37,5	-7,5	-17
6	21,2	19,3	20	23,3	18,2	19,4	6,0	-3,5	0,0	9,9	-5,7	-3,0	16,5	-9	-3
7	24,6	18,9	17,2	27,1	18	16,3	23,0	-5,5	-14,0	10,2	-4,8	-5,2	35,5	-10	-18,5

Распределения накопленных деформаций, показанные на рисунках 2.21 и 2.22, подтверждают причины формоизменения пробного объема.

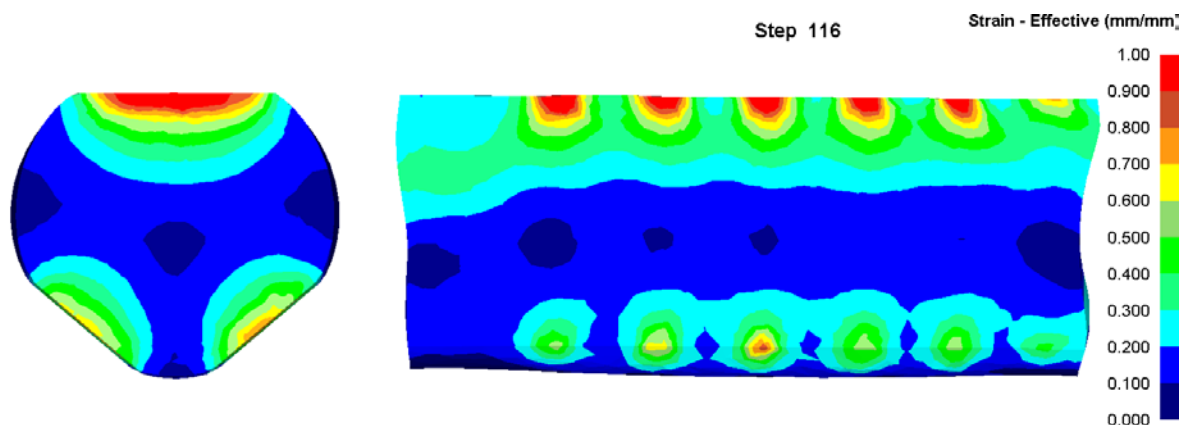


Рисунок 2.21 – Распределение накопленных деформаций при использовании комбинированных бойков после первого прохода

После первого прохода образуется три главных очага деформации, причём под верхним бойком наблюдаются максимальные значения. Проработка центральной зоны более равномерная, но конкретные значения деформаций оказываются несколько ниже, чем при использовании плоских бойков. Однако, после второго прохода распределение деформаций в осевой зоне более равномерное. При этом возникли значительные перепады в значениях деформаций между центральной зоной и периферийными областями. Можно предположить, что при дальнейшей кантовке и протяжке деформации распределяться более равномерно, но перепады между центральной и периферийной областями поковки всё равно сохранятся.

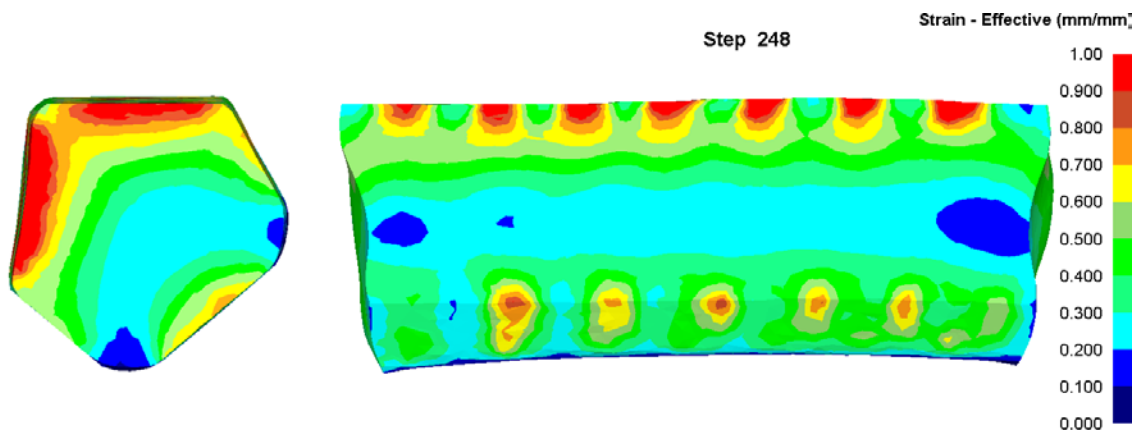


Рисунок 2.22 – Распределение накопленных деформаций при использовании комбинированных бойков после второго прохода

После протяжки в ромбических бойках сферы деформируются до эллипсоида, вытянутого по двум осям: продольной и вертикальной (таблицы 2.10 и 2.11). Подобная картина объясняется течением металла по нормали от места контакта заготовки с бойками к центру. Поэтому сфера 3 деформирована в поперечной плоскости значительно сильнее сферы 1. Сферы 4 и 5, находящиеся на прямом пути течения металла значительно деформируются в направлении потока перемещения. Деформация неравномерна: поверхность, обращённая к бойку, сжата, а обратная значительно и неравномерно выгнута. Также заметны искажения продольной оси сферы в вертикальной плоскости и смещения окружностей, образующих сферу.

После второго прохода сфера 1 приобретает форму вытянутого по продольной оси осесимметричного эллипсоида. Деформация остальных сфер происходит как по продольной, так и по поперечной плоскости. Это связано с кантовкой заготовки и соответственным изменением положения сфер. При этом все сферы имеют неправильную форму, с различными деформациями поверхностей и изгибом осей и смещением отдельных окружностей. Однако, продольные искажения окружностей сравнительно невелики, что свидетельствует о равномерном течении металла в продольном направлении и вызвано более значительным охватом заготовки бойками.

Таблица 2.10 – Формоизменение пробного объёма при использовании вырезных ромбических бойков

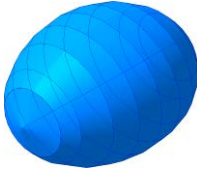
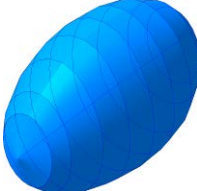
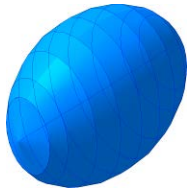
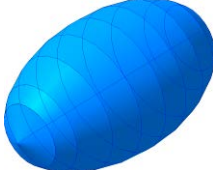
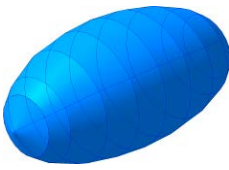
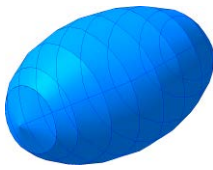
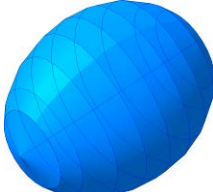
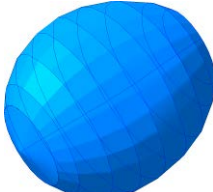
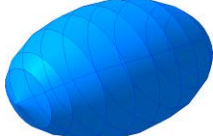
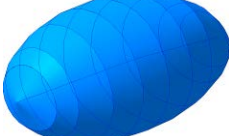
№ прохода	№ пробного объёма		
	1	2	3
1			
2			
	4	5	
1			
2			

Таблица 2.11 – Изменение размеров пробного объёма по основным осям при протяжке в вырезных ромбических бойках

№	Абсолютные значения, мм						Относительные значения, %								
	Первый проход			Второй проход			Первый проход			Второй проход			Первый проход		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	24,3	18,9	17,2	28,7	16,8	16,2	21,5	-5,5	-14	18,1	-11,1	-5,8	43,5	-16	-19
2	26	16,1	19,6	30,4	17,2	16	30,0	-19,5	-2,0	16,9	6,8	-18,4	52	-14	-20
3	24,8	15,4	21,1	25,9	19	16,2	24,0	-23,0	5,5	4,4	23,4	-23,2	29,5	-5	-19
4	25,2	19,6	16,6	29,9	16,5	16,5	26,0	-2,0	-17,0	18,7	-15,8	-0,6	49,5	-17,5	-17,5
5	25,3	20	16	30,4	15,3	16,7	26,5	0,0	-20,0	20,2	-23,5	4,4	52	-23,5	-16,5

Распределение накопленных деформаций, изображённое на рисунках 2.23 и 2.24, подтверждает полученные искажение сфер: наблюдаются четыре очага деформации, соответствующие местам контакта заготовки с бойками.

При этом после первого прохода центральная и боковые области деформированы более слабо. Второй проход изменяет картину распределения: максимальные значения деформации распределяются по кольцевой зоне периферийных слоёв, при этом также прорабатывается и осевая область. Общее значение деформаций после двух проходов, несмотря на появление

кольцевой области более равномерное, чем при использовании как плоских, так и комбинированных бойков. Проработка осевой зоны также более интенсивная.

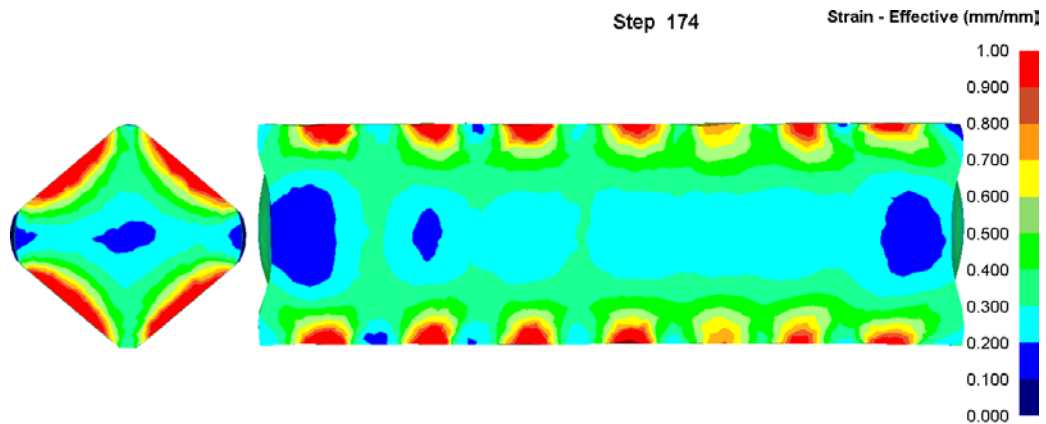


Рисунок 2.23 – Распределение накопленных деформаций при использовании вырезных ромбических бойков после первого прохода

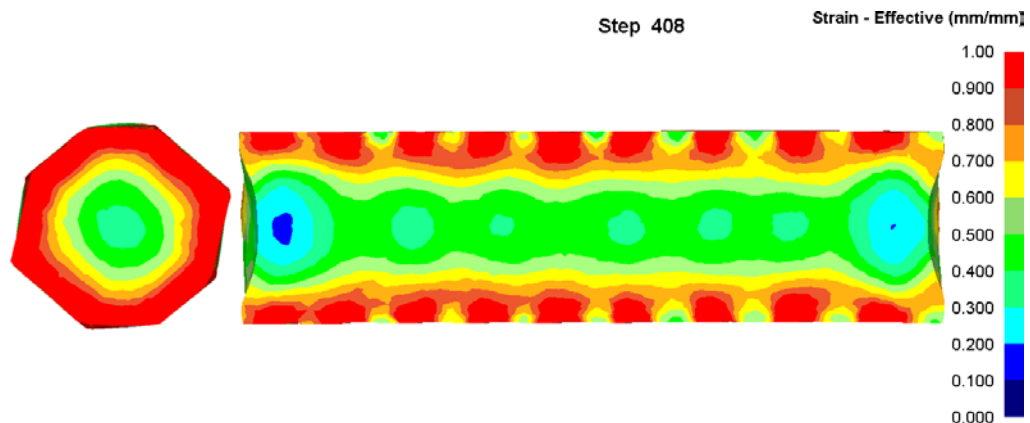


Рисунок 2.24 – Распределение накопленных деформаций при использовании вырезных ромбических бойков после второго прохода

При протяжке в вырезных круглых бойках после первого прохода происходит более значительное (по сравнению с ромбическими бойками) вытягивание сфер 1, 2, 3 в продольном направлении, и менее – в поперечном (таблицы 2.12 и 2.13). Это объясняется более полным охватом заготовки поверхностью бойков, который не даёт металлу в данной области течь в поперечном направлении. Передние области сфер 2 и 3 оказались непосредственно в потоке смещения металла при единичном обжатии и поэтому деформированы более сильно. При этом произошло заметное смещение образующих окружностей данных областей, как в продольном, так и в поперечном направлении. Это наглядно показывает различие в течении металла в очаге деформации и сопряжённых с ним областях. Сферы 4 и 5 оказываются значительно вытянуты как в продольном, так и поперечном направлениях. В данных областях (расположенных на

прямой линии между центром заготовки и соприкосновением с бойками) происходит течение металла вдоль плоских поверхностей бойков (и вдоль поперечной оси заготовки и сфер).

Второй проход изменяет форму сфер на эллипсоиды, вытянутые вдоль продольной оси, с деформированными в продольном направлении образующими окружностями. Сфера 1 получается осесимметричной, а остальные – искажены вдоль направлений течения металла в поперечном направлении заготовки.

Таблица 2.12 – Формоизменение пробного объема при использовании вырезных круглых бойков

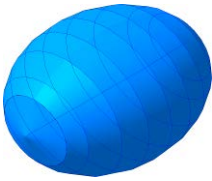
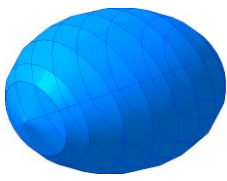
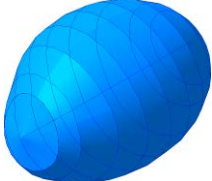
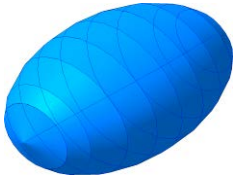
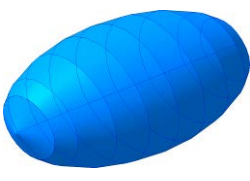
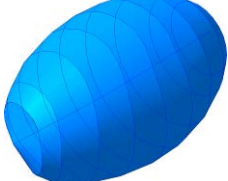
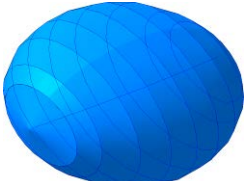
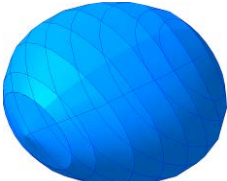
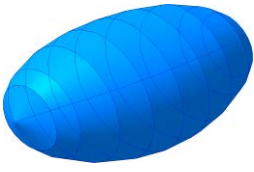
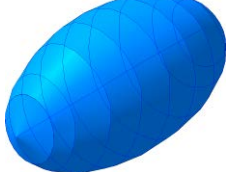
№ прохода	№ пробного объема		
	1	2	3
1			
2			
	4	5	
1			
2			

Таблица 2.13 – Изменение размеров пробного объема по основным осям при протяжке в вырезных круглых бойках

№	Абсолютные значения, мм						Относительные значения, %								
	Первый проход			Второй проход			Первый проход			Второй проход			Первый проход		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	25,7	19,9	16,3	29,2	15,6	18,3	28,5	-0,5	-18,5	13,6	-21,6	12,3	46	-22	-8,5
2	27	18,6	16,7	30	16	16,8	35	-7	-16,5	11,1	-14	0,6	50	-20	-16
3	24,3	17,9	17,1	27,3	17	16,5	21,5	-10,5	-14,5	12,3	-5	-3,5	36,5	-15	-17,5
4	26,7	19,9	15,5	30,2	16,1	17,1	33,5	-0,5	-22,5	13,1	-19,1	10,3	51	-19,5	-14,5
5	23,5	20,4	15,2	26,2	18,2	15,1	17,5	2	-24	11,5	-10,8	-0,7	31	-9	-24,5

Распределение накопленных деформаций в осевой зоне заготовки после первого прохода более равномерное, чем при применяемых до этого бойках (рисунки 2.25 и 2.26).

Максимальные значения деформаций концентрируются в местах контакта с бойками и занимают более значительную область, чем при применении ромбических бойков. Сами максимальные значения при этом оказываются несколько ниже. При этом в центральной области величина деформаций в среднем выше, чем в ромбических бойках.

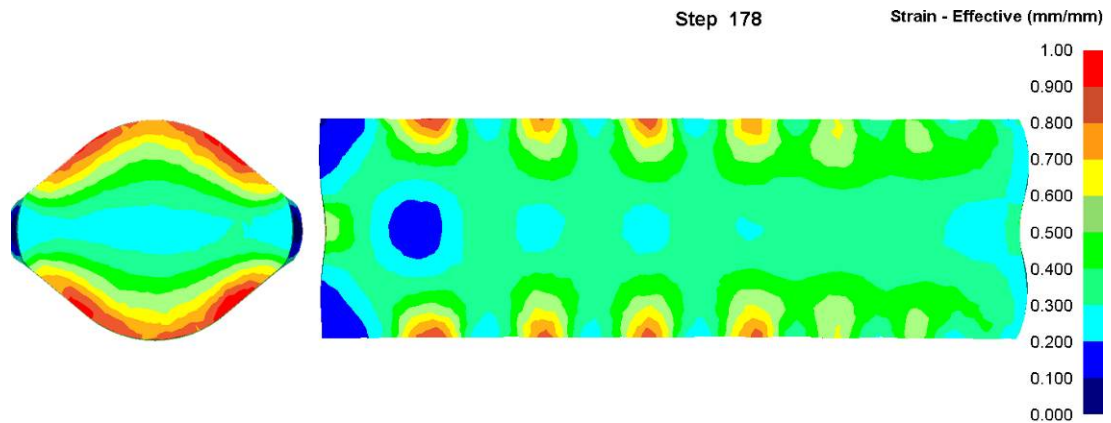


Рисунок 2.25 – Распределение накопленных деформаций при использовании вырезных круглых бойков после первого прохода

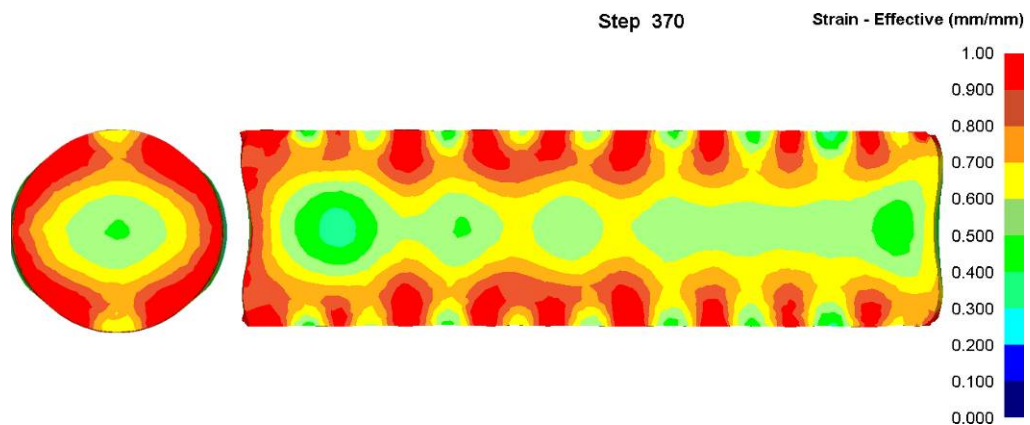


Рисунок 2.26 – Распределение накопленных деформаций при использовании вырезных круглых бойков после второго прохода

После второго прохода кольцевая зона максимальных значений накопленных деформаций в периферийной области практически полностью замыкается. Два перешейка с пониженными значениями объясняются большим охватом заготовки в первом проходе и, как следствие, малым уширением, которое не способствовало возможности большой деформации в данных областях после кантовки. Значения деформаций в осевой зоне снова оказываются выше, чем при использовании ранее рассмотренных типов бойков. С другой стороны в периферийных слоях наблюдаются области с пониженными значениями деформаций, что также объясняется широким охватом бойков: силы трения мешают продольному перемещению металла. По этой же причине не образуется большой утяжины.

Применение верхнего бойка с непрямолинейным фронтом подачи совместно с плоским нижним вызывает более значительное по сравнению с обоими плоскими бойками

деформирование сфер в поперечном направлении, и менее – в продольном (таблицы 2.14 и 2.15). В остальном же формоизменение после первого прохода мало отличается от случая применения плоских бойков: в вертикальной плоскости происходит наибольшее сжатие.

Таблица 2.14 – Формоизменение пробного объёма при использовании комбинированные бойков с непрямолинейным фронтом подачи

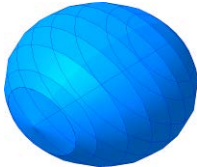

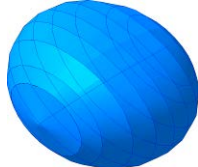
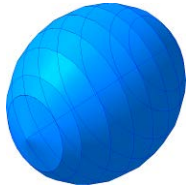
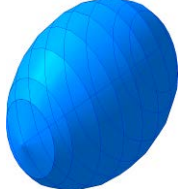
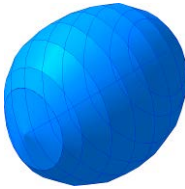
№ прохода	№ пробного объёма		
	1	2	3
1			
2			

Таблица 2.15 – Изменение размеров пробного объёма по основным осям при протяжке в комбинированных бойках с непрямолинейным фронтом подачи

№	Абсолютные значения, мм						Относительные значения, %								
	Первый проход			Второй проход			Первый проход			Второй проход			Первый проход		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	21,7	22,1	16,9	22,6	19,7	17,8	8,5	10,5	-15,5	4,1	-10,9	5,3	13	-1,5	-11
2	23,4	22,9	15,4	24,5	21,4	15,6	17	14,5	-23	4,7	-6,6	1,3	22,5	7	-22
3	21,3	22,8	16,4	22,1	21,9	16,4	6,5	14	-18	3,8	-3,9	0	10,5	9,5	-18

После второго прохода различия более заметны: все три сферы остаются вытянуты в поперечной (после кантовки это вертикальная) плоскости. При этом наблюдаются как изгибы продольных осей, так и смещения и искажения образующих окружностей, что свидетельствует о сложном течении металла с макросдвигами.

Распределение накопленных деформаций, показанное на рисунках 2.27 и 2.28, также отличается от случая применения плоских бойков: возникает заметная неравномерность. После первого прохода деформации, полученные от верхнего бойка с непрямолинейным фронтом подачи заметно больше, чем от нижнего плоского. Также они распространяются на большей площади, что хорошо заметно на поперечном разрезе. Это связано с постепенным увеличением контактной поверхности, и как следствие, уменьшением зоны затруднённой деформации под бойком. Обратной стороной данного течения металла является появление заметной утяжины, которая под верхним бойком получается больше, чем под нижним. После второго прохода

центральная часть деформирована более равномерно, однако сами значения оказываются ниже, чем при использовании плоских бойков.

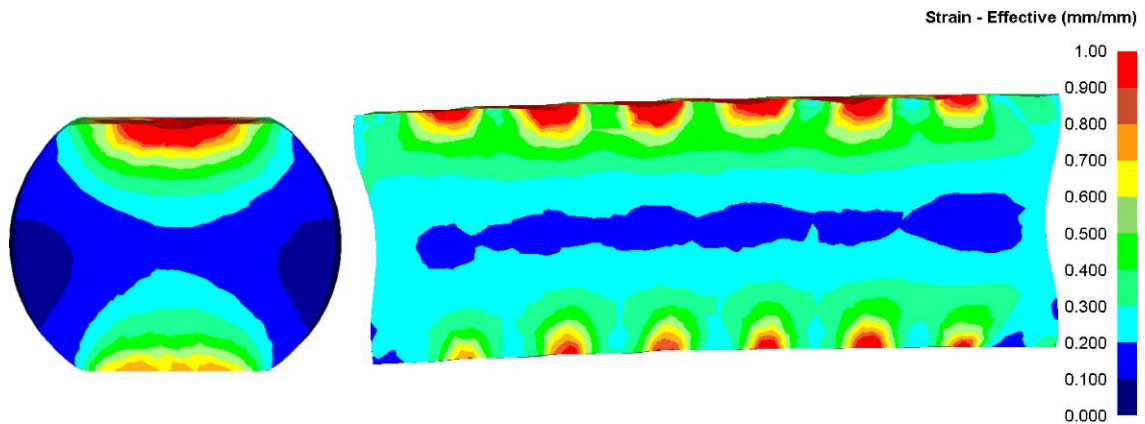


Рисунок 2.27 – Распределение накопленных деформаций при использовании комбинированные бойков с непрямолинейным фронтом подачи после первого прохода

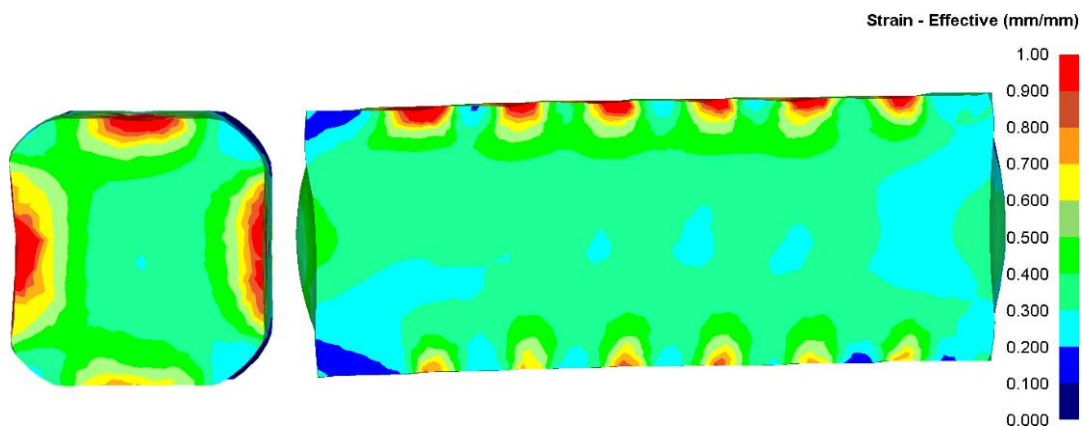


Рисунок 2.28 – Распределение накопленных деформаций при использовании комбинированные бойков с непрямолинейным фронтом подачи после второго прохода

Применение двух бойков с непрямолинейным фронтом подачи вызывает более равномерную деформацию сфер в вертикальном направлении (таблицы 2.16 и 2.17). Также сфера 3 в задней части деформирована несколько больше, чем в передней. Это вызвано попаданием данной области непосредственно в макросдвиг металла в заготовке. После второго прохода форма сферы 1 оказывается близка к осесимметричному вытянутому вдоль продольной оси эллипсоиду, в то время как сферы 2 и 3 остаются довольно сильно вытянуты в двух направлениях: продольном и поперечном. Это позволяет сделать вывод о сложном течении металла при протяжке заготовки данными бойками.

Таблица 2.16 – Формоизменение пробного объёма при использовании бойков с непрямолинейным фронтом подачи

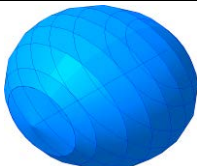
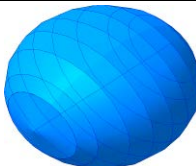
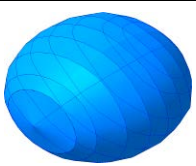
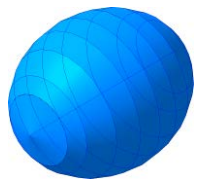
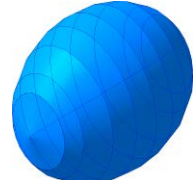
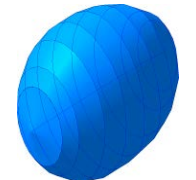
№ прохода	№ пробного объёма		
	1	2	3
1			
2			

Таблица 2.17 – Изменение размеров пробного объёма по основным осям при протяжке в бойках с непрямолинейным фронтом подачи

№	Абсолютные значения, мм						Относительные значения, %								
	Первый проход			Второй проход			Первый проход			Второй проход			Первый проход		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	21,3	22	17,2	23,1	18,4	18,8	6,5	10	-14	8,5	-16,4	9,3	15,5	-8	-6
2	22,1	22,3	16,5	23,8	20	16,9	10,5	11,5	-17,5	7,7	-10,3	2,4	19	0	-15,5
3	20,9	21	15,4	22,3	19,5	15,4	4,5	5	-23	6,7	-7,1	0,0	11,5	-2,5	-23

Распределение накопленных деформаций становится более равномерным относительно мест контакта с рабочим инструментом, а проработанным оказывается больший объём металла даже после первого прохода (рисунок 2.29). Здесь заметную роль играет направление течения потоков металла, на которую влияет V-образная форма рабочих поверхностей бойков и постепенное увеличение контактных поверхностей при протяжке. В результате течение металла ориентировано к центру заготовки больше, чем при применении плоских бойков, однако, в непосредственно центральной области наблюдается зона с пониженными значениями деформаций, причём она непрерывна.

После второго прохода распределение деформаций претерпевает изменения: от осевой зоны к поверхности происходит постепенное увеличение значений (рисунок 2.30). При этом на расстоянии, равном не менее половины радиуса от центра поковки разница в значениях сравнительно мала. Очаги максимальных значений расположены в периферийных областях заготовки – в местах контакта с бойками. Их расположение, в отличие от использования только одного бойка с непрямолинейным фронтом подачи, симметрично.

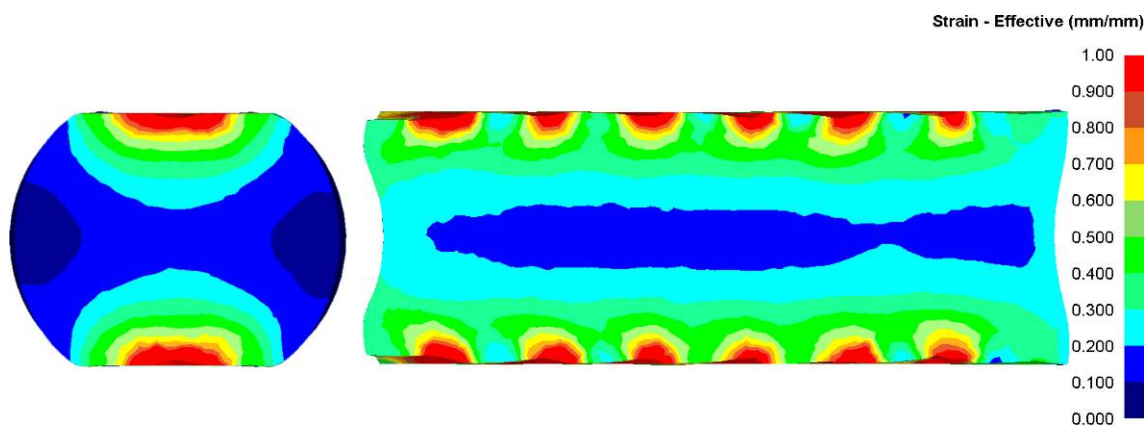


Рисунок 2.29 – Распределение накопленных деформаций при использовании бойков с непрямолинейным фронтом подачи после первого прохода

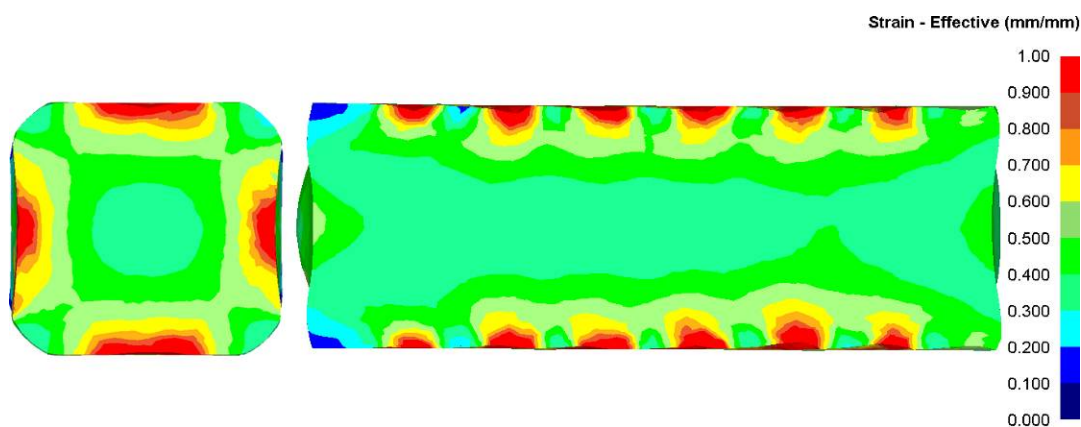
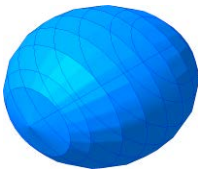
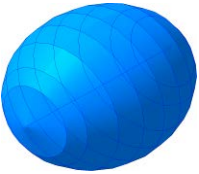
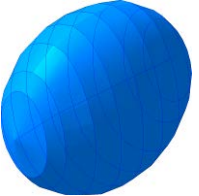
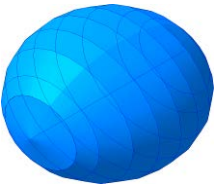
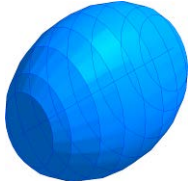
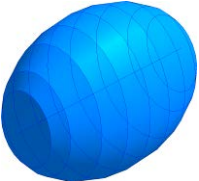
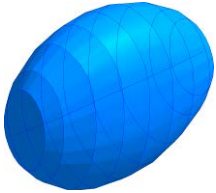
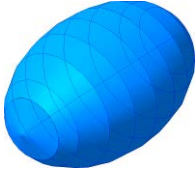

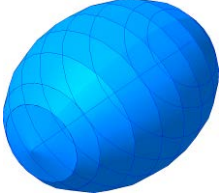
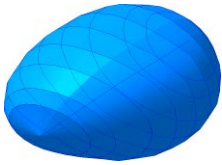
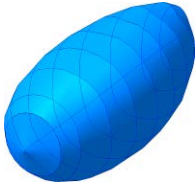
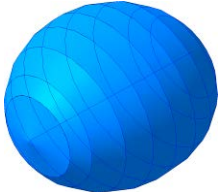
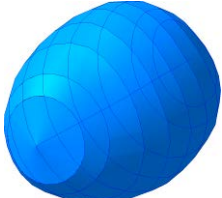


Рисунок 2.30 – Распределение накопленных деформаций при использовании бойков с непрямолинейным фронтом подачи после второго прохода

При протяжке заготовки в бойках со скрещивающимися рабочими поверхностями искажения всех сфер более значительны и неоднородны (таблица 2.18 и 2.19). Сфера 1, характеризующая течение металла в осевой зоне, после двух проходов остаётся эллипсоидом, растянутым по двум осям: продольной и вертикальной и сжатым в поперечной. По мере подачи заготовки в бойки происходит искажение сфер в различных направлениях, преимущественно перпендикулярно местам соприкосновения заготовки с рабочими поверхностями бойков, этим и объясняется сплющивание не по основным осям, а под углом порядка 120° от вертикальной оси.

При дальнейшей протяжке сжатие сфер 1 и 2 происходит преимущественной по вертикальной оси, при этом, если первая сфера в итоге «поворачивается» и оказывается более значительно сжата в вертикальном направлении, чем в поперечном, то вторая приблизительно равномерно по обоим направлениям. В то время как сфера 3, которая находится в верхней области выреза бойка, сжимается преимущественно в поперечном направлении. Подобная неравномерность для трёх сфер вызвана возникающими макросдвигами по всему поперечному сечению поковки.

Таблица 2.18 – Формоизменение пробного объёма при использовании бойков со скрещивающимися рабочими поверхностями

№ прохода	№ пробного объёма			
	1	2	3	4
1				
2				
	5	6	7	
1				
2				

Сферы 4 – 7 располагаются на прямой линии между местом контакта бойков и центром заготовки, потому по мере подачи испытывают деформации направленные в противоположные направления (сначала проходя через первую часть бойка, а затем и через вторую). Это приводит к значительному неравномерному искажению их формы: так на поверхности сфер 5 и 7 (расположенных в периферийной области заготовки) видны вмятины, вызванные макросдвиговым течением металла.

Таблица 2.19 – Изменение размеров пробного объёма по основным осям при протяжке в бойках со скрещенными рабочими поверхностями

№	Абсолютные значения, мм						Относительные значения, %								
	Первый проход			Второй проход			Первый проход			Второй проход			Первый проход		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	22,6	20,7	17,2	24,3	16,3	20,1	13,0	3,5	-14,0	7,5	-21,3	16,9	21,5	-18,5	0,5
2	23	19	18,4	25	15,7	20,5	15,0	-5,0	-8,0	8,7	-17,4	11,4	25	-21,5	2,5
3	24,6	15,6	22,3	26,9	14,7	21,6	23,0	-22,0	11,5	9,3	-5,8	-3,1	34,5	-26,5	8
4	23,6	21,4	16,3	25,6	17,2	19	18,0	7,0	-18,5	8,5	-19,6	16,6	28	-14	-5
5	24,8	21,5	15	26,8	19	15,5	24,0	7,5	-25,0	8,1	-11,6	3,3	34	-5	-22,5
6	22,5	19,4	18,6	24,2	16,6	19,6	12,5	-3,0	-7,0	7,6	-14,4	5,4	21	-17	-2
7	21,1	19,2	18,7	22,9	18,2	17,9	5,5	-4,0	-6,5	8,5	-5,2	-4,3	14,5	-9	-10,5

Картина формоизменения при втором проходе несколько меняется: если первая сфера деформируется аналогично первому проходу, только с меньшей интенсивностью, то у второй и третьей кроме сжатия происходит сдвиг отдельных окружностей, образующих сферы, друг относительно друга. Подобное отличие от первого прохода объясняется кантовкой заготовки: после неё вторая и третья сферы оказываются расположены в боковой области. При этом заметно, что смещение окружностей у сферы 3 довольно значительно: если у сферы 2 это скорее наклон окружностей относительно центральной оси, то у третьей сферы это именно смещение. Вместе с окружностями происходит заметный изгиб и самой оси. Сферы 5 и 7 оказываются деформированы ещё сильнее: сдвиг окружностей происходит по всем координатным осям, на поверхности наблюдаются значительные впадины и выступы. Также сильно искажена продольная ось сферы. Это объясняется тем, что при подаче в 150 мм сфера успевает пройти через обе пары рабочих плоскостей бойков, длина которых составляет 250 мм (а за вычетом скруглений – вообще 150 мм), последовательно деформируясь и испытывая смещение отдельных областей за счёт макросдвигов.

Распределение накопленных деформаций, показанное на рисунках 2.31 и 2.32 согласуется с формоизменением сфер. После первого прохода на верхней и нижней поверхности заготовки образуются расположенные в шахматном порядке очаги деформации. Подобное расположение очагов объясняет неравномерное искажение сфер, размещённых в периферийной области, относительно вертикальной оси.

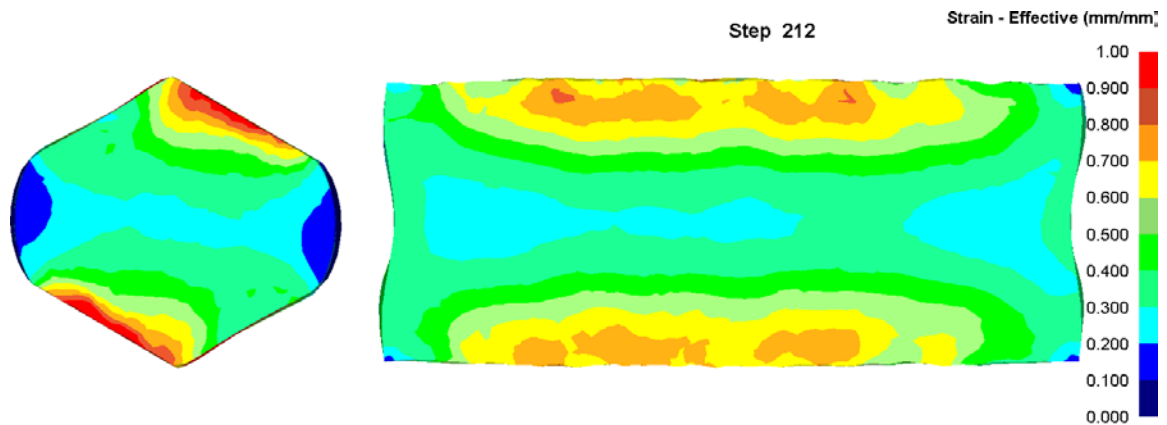


Рисунок 2.31 – Распределение накопленных деформаций при использовании бойков со скрещивающимися рабочими поверхностями после первого прохода

Сами деформации проникают на более значительную глубину, чем при протяжке другими типами бойков. Накопленные деформации в осевой зоне также оказывается выше, чем при использовании вырезных ромбических и круглых бойков. Максимальные значения деформаций находятся в верхней и нижней областях поковки. При этом после второго прохода

зоны с высокими значениями занимает практически всю длину поковки без пробелов, что также не достигалось при протяжке в других типах бойков.

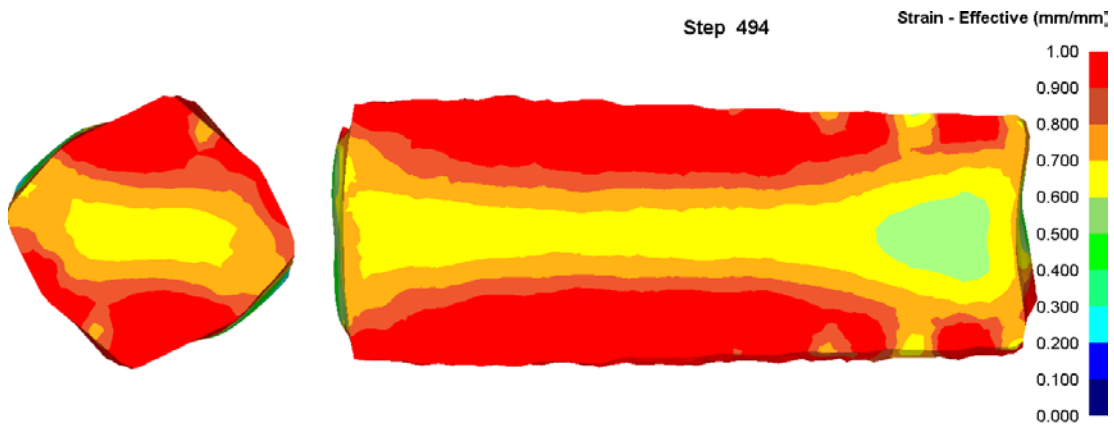


Рисунок 2.32 – Распределение накопленных деформаций при использовании бойков со скрещивающимися рабочими поверхностями после второго прохода

Как видно из полученных данных, применение скрещенных бойков вносит значительное изменение в схему течения металла при протяжке. Явно проявляются описанные в литературных источниках [8, 9] макросдвиги. По сравнению с протяжкой в других типах бойков металл заготовки подвергается более значительной проработке даже при одинаковых степенях относительной деформации.

При использовании ковочного блока также происходит сложное деформирование сфер (таблицы 2.20 и 2.21). После первого прохода сфера 1 вытягивается в продольном направлении, и сжимается в двух остальных. Причём сжатие происходит на одинаковую величину, таким образом, поперечным сечением полученного эллипсоида является правильная окружность, что может служить подтверждением равномерной поперечной деформации. Подобная картина наблюдается как в первом, так и во втором проходе. Сферы 2 и 4 деформируются иначе: после первого прохода происходит вытягивание вдоль продольной и поперечной осей, а также сжатие по направлению, перпендикулярному плоскости ближайшего к ним бойка. После второго прохода форма приближается к сфере 1, но поперечное сечение образовано несколько искажёнными неправильными окружностями, что связано с потоками течения металла. Они не полностью компенсируют первоначальную деформацию, т.к. боковые бойки перемещаются не по прямой траектории, а под углом 45° к горизонтальной и вертикальной осям.

Сферы 3 и 5, расположенные под бойками, после прохода деформированы сравнительно одинаково: сжатие по оси перемещения бойка, и растяжение по двум другим. Также происходит заметный наклон образующих окружностей. После второго прохода происходит сжатие эллипсоидов в поперечном направлении, но в поперечном сечении они остаются в виде

неправильных окружностей. Причём у сферы 5 это окружность близка к наклоненному эллипсу, а у 3 – именно к неправильной окружности. Также наблюдается искажение окружностей по всем трём координатным осям (но не столь интенсивное, как при использовании бойков со скрещивающимися рабочими поверхностями), что свидетельствует о дополнительных деформациях, вызванных макросдвигами металла. Причём, в отличие от бойков со скрещенными рабочими поверхностями, данные искажения одинаковы для всех окружностей каждой сферы, т.е. макросдвиги затрагивают больший объём металла и более упорядочены.

Таблица 2.20 – Формоизменение пробного объёма при использовании ковочного блока

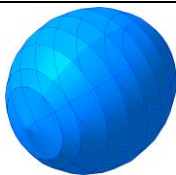
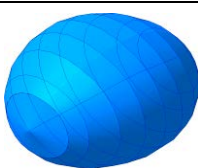
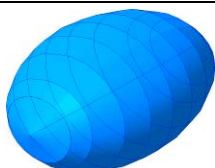
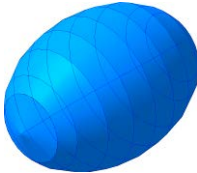
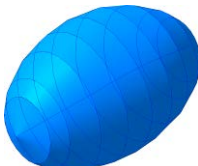
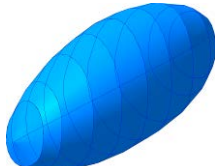
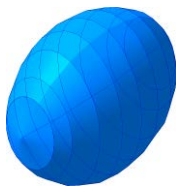
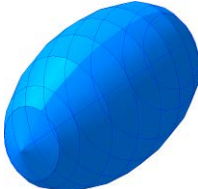
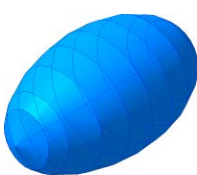
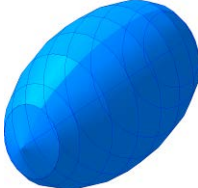
№ прохода	№ сферы		
	1	2	3
1			
2			
	4	5	
1			
2			

Таблица 2.21 – Изменение размеров пробного объёма по основным осям при использовании ковочного блока

№	Абсолютные значения, мм						Относительные значения, %								
	Первый проход			Второй проход			Первый проход			Второй проход			Первый проход		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	22	19,1	19	25,5	17,8	17,7	10	-4,5	-5	15,9	-6,8	-6,8	27,5	-11	-11,5
2	24,2	20,2	16,8	28	16,6	17,4	21	1	-16	15,7	-17,8	3,6	40	-17	-13
3	26	20,2	14,5	29,5	17,8	14,7	30	1	-27,5	13,5	-11,9	1,4	47,5	-11	-26,5
4	24	16,3	20,3	28,2	16,7	16	20	-18,5	1,5	17,5	2,5	-21,2	41	-16,5	-20
5	27,6	15,2	20,6	31,8	15,3	17,6	38	-24	3	15,2	0,7	-14,6	59	-23,5	-12

Картины распределения накопленных деформаций показывают заметную неравномерность значений в продольном сечении (рисунки 2.33 и 2.34).

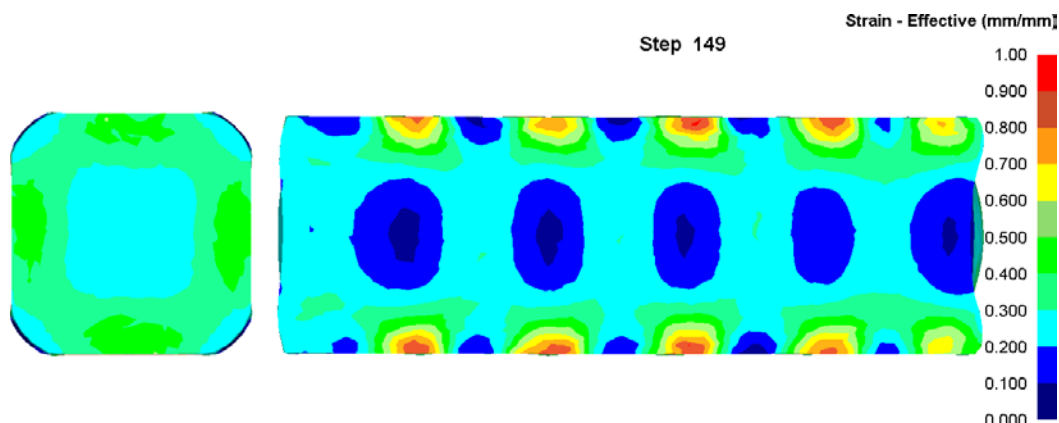


Рисунок 2.33 – Распределение накопленных деформаций при использовании ковочного блока после первого прохода

Чередование деформированных и практически недеформированных областей вызвано особенностями процесса: течение металла преимущественно к осевой зоне происходит по границе очага деформации, которая в данном случае находится в заходном участке бойка. Величина заходного участка мала и поэтому деформация происходит в значительной степени на плоском участке, где преобладает не радиальное течение металла, а продольное и происходит удлинение заготовки без проработки отдельных областей в осевой зоне. Расстояние между недеформированными областями соответствует величине подачи. При этом деформированные области отличаются сравнительно высокой степенью однородности значений деформаций.

После второго прохода распределение деформаций в осевой зоне несколько улучшается. При этом возникает заметное расслоение значений в поперечном сечении: периферийные слои прорабатываются заметно лучше осевой области.

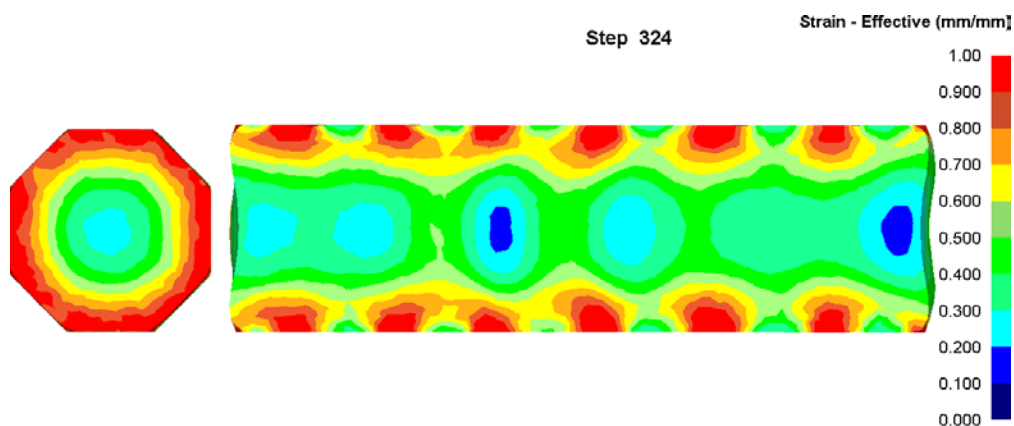


Рисунок 2.34 – Распределение накопленных деформаций при использовании ковочного блока после второго прохода

Решением подобной неоднородности значений деформации может служить уменьшение величин подач. При протяжке в плоских бойках это может привести к появлению растягивающих напряжений в осевой зоне, но в ковочном блоке заготовка обжимается сразу с четырёх сторон, поэтому появление высоких растягивающих напряжений крайне маловероятно.

Другим способом является такое сочетание подач, при котором после кантовки в очаг деформации попадала ранее мало проработанная область (т.е. сместить места обжатий на половину величины подачи).

Предложенная методика оценки формоизменения пробного объёма позволяет наглядно оценить деформационное состояние в отдельных областях поковки. Изменение форм сфер наглядно показало направление возникающих макросдвигов и течений металла при применении различных типов бойков. Исходя из анализа полученных данных можно сделать вывод, что наибольшие дополнительные макросдвиги возникают при применении бойков со скрещивающимися рабочими поверхностями.

Помимо макросдвигов формоизменение сфер показывает и потоки течения металла при протяжке, что, совместно с картинами распределения деформаций, позволяет предположить возможную итоговую проработку литой структуры заготовки и, как следствие, возможные механические свойства готового изделия.

Следует отметить, что разработанная методика отслеживания заданных точек, описывающих различные элементарные объёмы при моделировании деформации заготовки, обладает достаточной степенью универсальности. В частности, с помощью неё производилось моделирование и анализ формоизменения графитовых включений в высокопрочном чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ) при различных способах ОМД, описанное в работах [65, 66]. Результаты моделирований с высокой степенью достоверности совпали с экспериментальными данными.

Глава 3 Методика проектирования и моделирования технологического процесса ковки валка

3.1 Проектирование технологического процесса и задание условий моделирования

Описание методики производится на примере разработки и моделирования процесса ковки валка сортопрокатного стана из стали 9Х2МФ [67] на прессе усилием 30МН, в условиях кузнечно–прессового цеха ОАО «ЭЗТМ».

Согласно [68, 69], а также технологическим рекомендациям ОАО «ЭЗТМ» на исходный чертёж были назначены необходимые термические припуски. После назначения припусков производилось вычисление размеров и составление чертежа поковки, итог которых показан на рисунке 3.1.

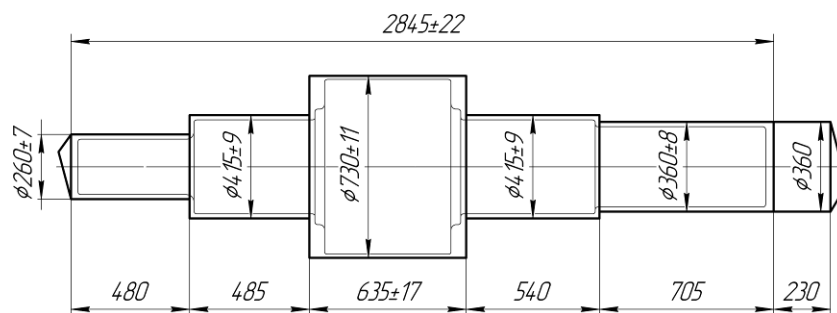


Рисунок 3.1 – Чертёж поковки валка

Для более наглядной визуализации вышеописанных стадий в Компас–3D были построены трёхмерные модели самого валка (рисунок 3.2а), валка с припусками (рисунок 3.2б) и итоговой поковки (рисунок 3.2в). Также трёхмерная модель позволила упростить и автоматизировать расчёты массы поковки, которая составила 4143 кг.

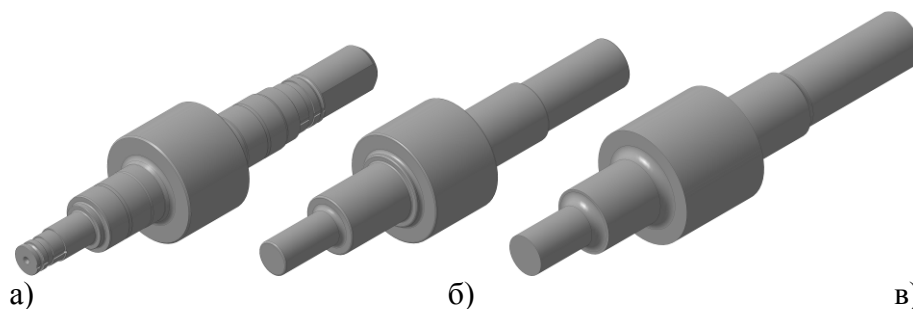


Рисунок 3.2 – Построенные модели валка и поковки

Исходя из сортамента предприятия, был выбран нормальный слиток массой 6 т, габаритные размеры которого изображены на рисунке 3.3

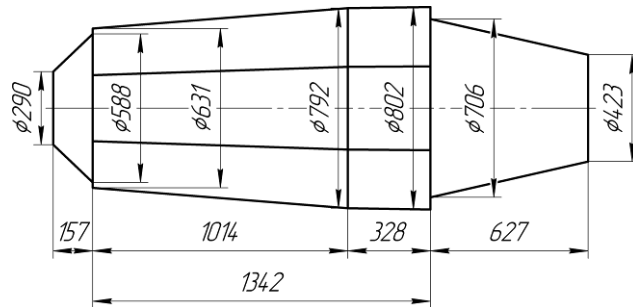
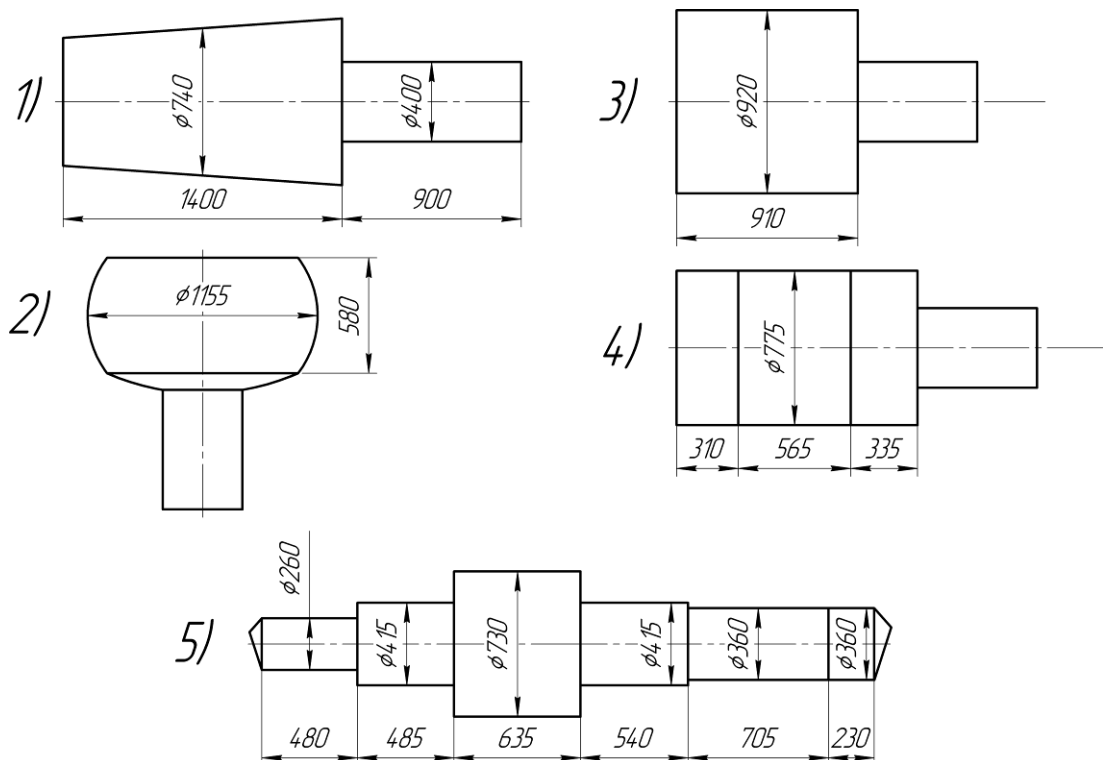


Рисунок 3.3 – Эскиз применяемого слитка

На основе литературных источников [66 – 71] и технологических рекомендаций ОАО «ЭЗТМ» был спроектирован технологический процесс, согласно которому ковка ведётся в несколько переходов, показанных на рисунке 3.4. Для дальнейшего моделирования на основе чертежей в SolidWorks были построены трёхмерные модели исходного слитка и применяемого рабочего инструмента.



1 – билетировка, 2 – осадка сферической плитой, 3 – протяжка до диаметра 920 мм,

4 – протяжка до диаметра 5 – протяжка до итоговых размеров

Рисунок 3.4 – Основные технологические операции

Технологический процесс выглядит следующим образом: сначала у исходного слитка, нагретого до температуры 1200 °С, отковывается цапфа, после чего производится её обрезать до длины 900 мм. Затем следует биллетировка на конус до среднего диаметра 740 мм. Применение биллетировки на конус (а не до цилиндрической формы) позволяет сократить время проведения данной операции. Данные операции производятся в вырезных бойках, (показаны на рисунке 3.5а). По окончании биллетировки производится обрезать донной части. Далее биллет подогревается до температуры 1200 °С и осаживается до высоты 580 мм, нижняя осадочная плита является сферической (рисунок 3.5б), верхняя осадочная плита не применяется, используется подвижная траверса прессы (рисунок 3.5в). После осадки биллет без дополнительного подогрева протягивается в плоских бойках, (рисунок 3.5г) до диаметра 920 мм. Затем производится подогрев до 1200 °С и биллет протягивается до диаметра 775 мм. По окончании протяжки следует разметка на три части, осуществляемая при помощи пережимки (рисунок 3.5з). Далее очередной подогрев до 1200°С и протяжка в комбинированных бойках (рисунок 3.5д). Затем, без дополнительного подогрева, начинается протяжка до итоговых размеров в комбинированных бойках (рисунок 3.5е). За время данной операции предусмотрен один дополнительный подогрев до температуры 1200 °С.

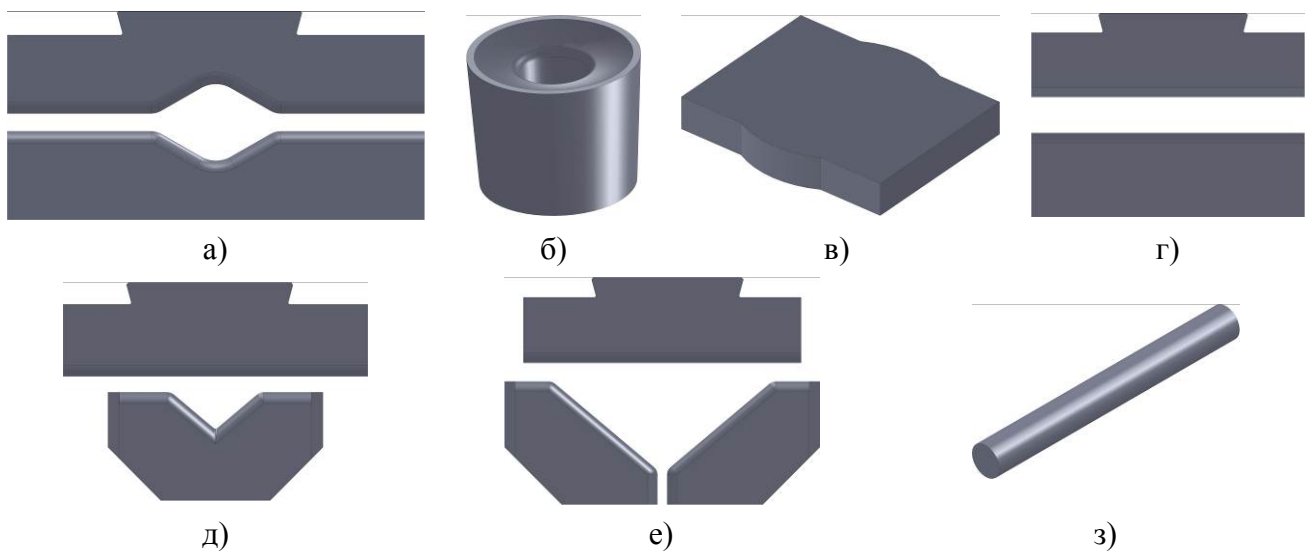


Рисунок 3.5 – Трёхмерные модели рабочего инструмента

Моделирование процесса осуществлялось следующим образом: трёхмерные модели применяемого рабочего инструмента и слитка совмещались в сборку и импортировалась в модуль DEFORM Multiple Operations, где модель слитка разбивалась на конечно-элементную сетку, состоящую из 45000 элементов. В процессе моделирования при удлинении заготовки возникла необходимость в постепенном увеличении число элементов для достоверного описания её более сложной изменённой формы. Итоговое значение составило 55000 элементов.

Модели бойков на КЭ сетку не разбивались. Бойкам присваивалась постоянная температура 400 °С. Подобное допущение основано на отдельном моделировании: изначально бойки нагревались до данной температуры, после чего производилось их охлаждение. За времяковки, падение температуры составило порядка 50°С, при этом не учитывался разогрев вследствие контакта с заготовкой. Таким образом, присвоенная постоянная температура довольно точно имитирует тепловое поле подогретых бойков. Как уже описывалось в Главе 2, исходная база материалов DEFORM не содержит отечественных марок сталей и сплавов, поэтому вместо 9Х2МФ слитку присваивались реологические свойства наиболее близкого зарубежного аналога – немецкой стали DIN–42CrMo4. Для описания сил трения, возникающих между рабочим инструментом и поковкой использовался закон Амонтона – Кулона, коэффициент составлял 0,35. Коэффициент теплообмена принимался равным 5 Н/сек/мм/С° (5000 Вт/м² · °С). После описания условий моделирования производилось задание последовательных операций обжати и кантовки заготовки, и запускался расчёт. В ходе расчёта процесс периодически прерывался для корректировки режимов деформаций и позиционирования заготовки.

По окончании расчёта производился анализ полученных данных. Были рассмотрены: внешний вид поковки при различных операциях, напряжённ–деформационное состояние и тепловые поля, оценена проработка структуры. Для детальной оценки на заготовку наносились сечения: в продольном и поперечных направлениях. В ряде случаев для точного определения значений НДС на сечения наносились контрольные точки, по которым происходило автоматическое построение графика значений, измеренных в данных точках.

3.2 Анализ результатов моделирования операций технологического процесса

Нагрев слитка

Первоначальной моделируемой операцией являлся нагрев слитка. Выбор времени нагрева осуществлялся согласно [72 – 74]. График нагрева приведён на рисунке 3.6: сначала следует выдержка при 600 °С в течение 3,5 часов, далее в течение 4 часов происходит постепенный подъём температуры до 1200 °С и выдержка при данной температуре. Согласно [74] минимальное время выдержки составляет 2,5 часа, максимально допустимое – 9,5. Таким образом, итоговое время нагрева составляет от 10 до 17 часов. При моделировании использовался следующий вариант нагрева: температура исходного слитка по всему сечению составляла 20 °С, время нагрева было максимальным – 17 часов. Это позволило рассмотреть наиболее неблагоприятный вариант с полностью остывшим слитком и выяснить необходимое время его нагрева.

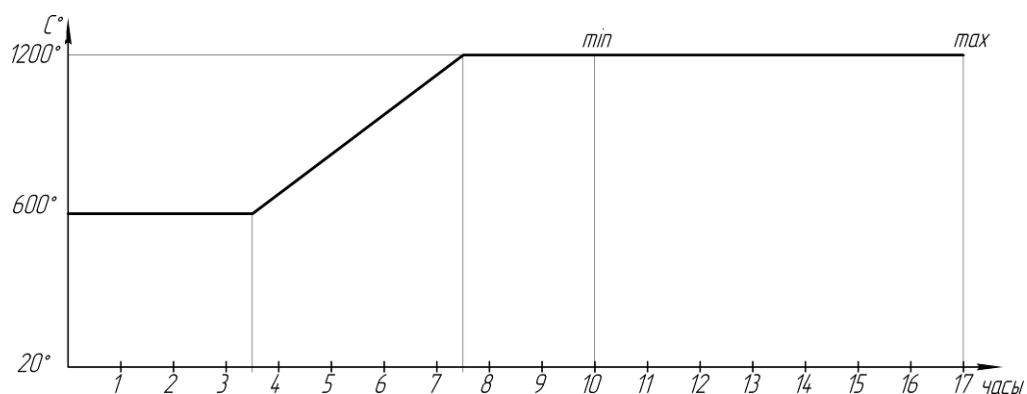


Рисунок 3.6 – График нагрева

По окончании расчёта на модель слитка был нанесён расположенный посередине продольный разрез и задан ряд контрольных точек, в которых и производилось измерение температуры. Расположение контрольных точек показано на рисунке 3.7. Данные с контрольных точек были экспортированы в Microsoft Excel, где на их основании были построены графики изменения температуры во времени, приведённые на рисунке 3.8.



Рисунок 3.7 – Расположение контрольных точек

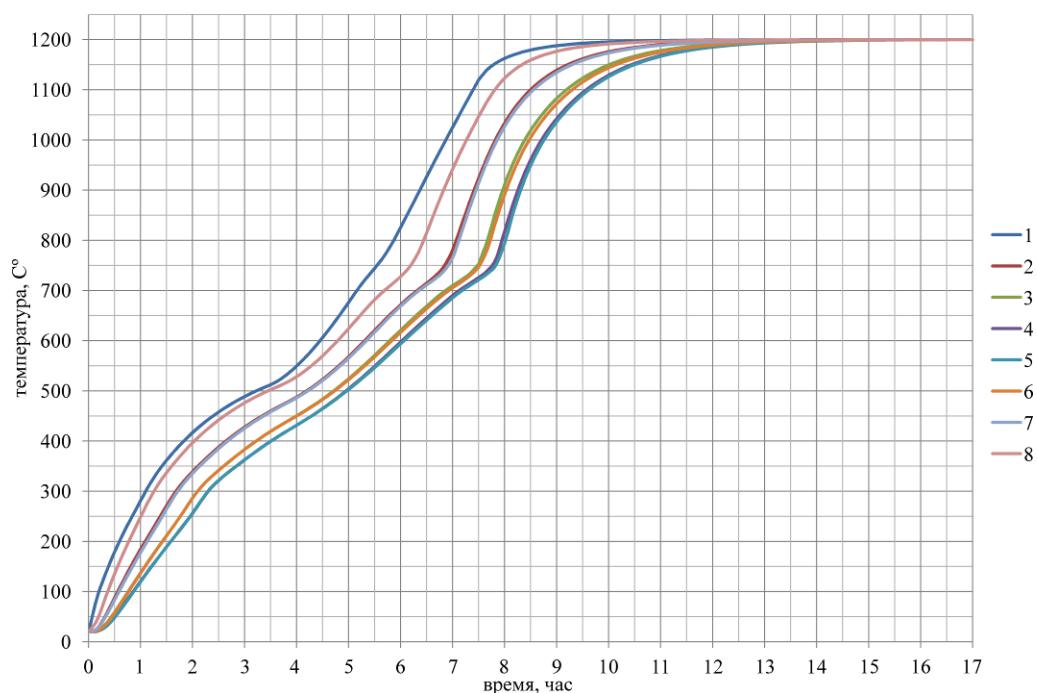


Рисунок 3.8 – Изменение температуры в контрольных точках

Графическое отображение температурного поля слитка по достижении минимального времени нагрева показано на рисунке 3.9.

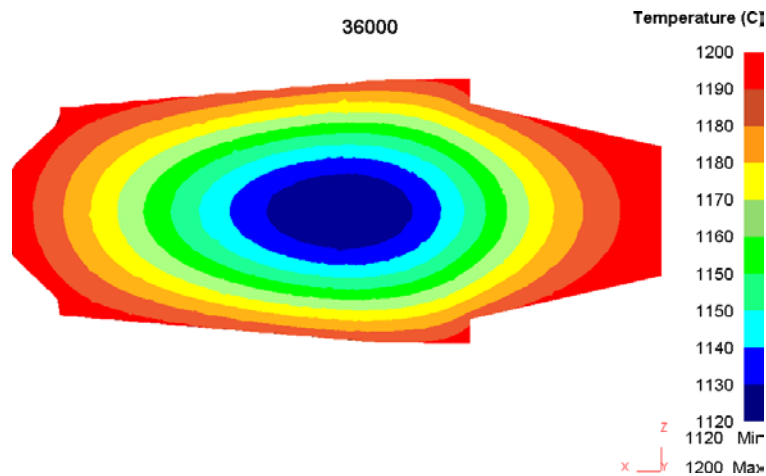


Рисунок 3.9 – Температурное поле слитка после минимального времени нагрева

Исходя из анализа полученных данных можно сделать вывод, что минимального времени нагрева (10 часов) не хватает для равномерного прогрева слитка, охлаждённого до 20 °С – перепад температур между внешними и внутренними слоями превышает 80 °С. Также следует учитывать, что рассматриваются условия, когда температура печи и время нагрева выдерживаются полностью, что не всегда происходит в реальном процессе, следовательно, перепад температур может быть больше. С другой стороны, если исходная заготовка имеет температуру порядка 450 °С (что согласно [74] ещё позволяет классифицировать её как холодную), то минимального времени нагрева должно хватить для полноценного прогрева всего сечения.

На основании полученных результатов и для упрощения моделирования в дальнейших операциях исходная температура слитка и подогретой поковки будет приниматься равномерной по всему сечению, и составлять 1200 °С.

Биллетировка слитка

Перед биллетировкой, для имитирования транспортировки слитка от нагревательной печи к прессу, производилось его охлаждение длительностью 120 с. Непосредственно сама операция ковки начиналась с цапфы. После каждого обжатия производилась кантовка на угол от 30° до 90°, в зависимости от образуемого поперечного сечения поковки. По достижении участком круглой формы поперечного сечения производилась продольная подача заготовки. Величина большинства подач составляла 2/3 об ширины бойка (порядка 300–330 мм). После

отковки цапфы производилась её рубка до нужной длины. Сама операция рубки была выполнена отдельной булевой операцией. Далее осуществлялась биллетировка слитка, при которой была выбрана аналогичная последовательность обжатий. Величина подачи заготовки была постоянной и также составляла $\frac{2}{3}$ от ширины бойка. По окончании операции осуществлялась отрубка донной части, также выполненная булевой операцией. Как видно из рисунка 3.10 полученный биллет имеет форму усечённого конуса с характерными ступенчатыми переходами. Длина данных переходов равна величине шага подачи. Размеры полученного биллета совпадают со значениями, полученными по технологическим расчетам.

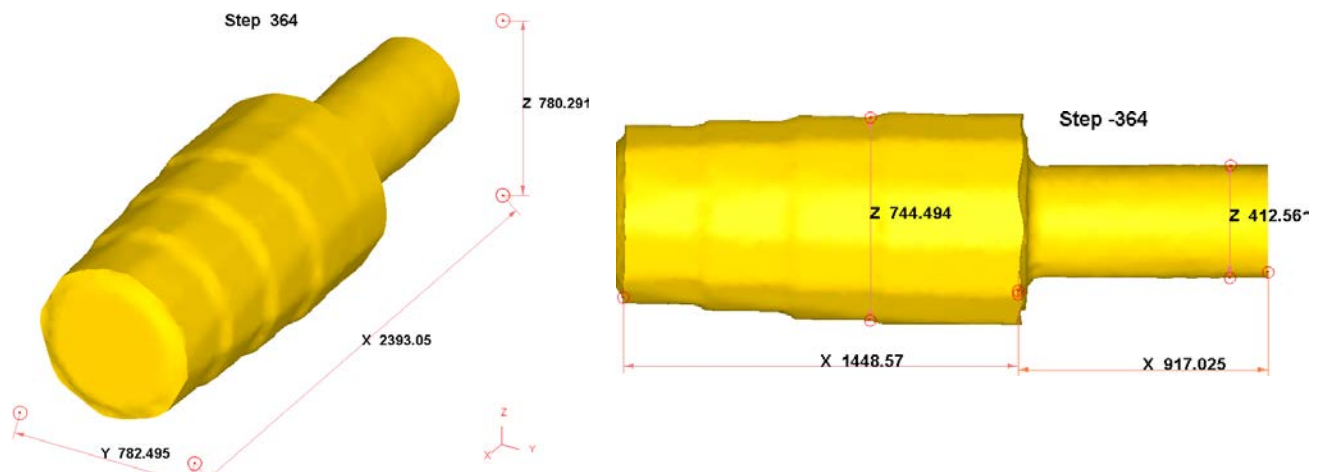


Рисунок 3.10 – Размеры и форма биллета

Тепловое поле на поверхности готового биллета перед обрубкой цапфы показано на рисунке 3.11, как видно, среднее значение температуры составляет 920 – 950 °С, что находится выше нижней температуры ковки, составляющей 850 °С.

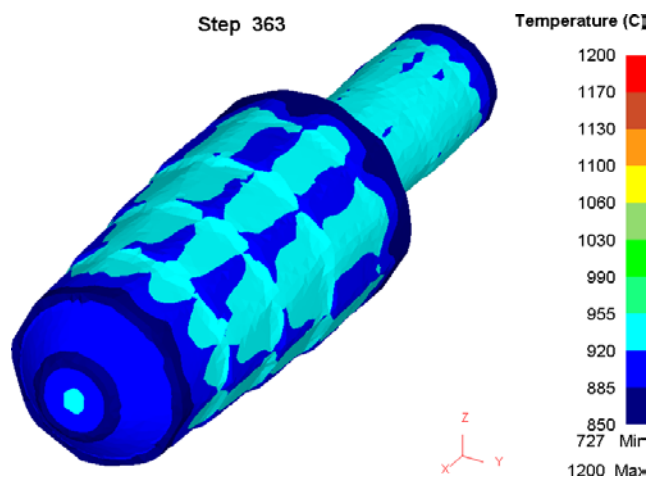


Рисунок 3.11 – Температурное поле на поверхности биллета

Распределение температуры по сечению биллета показано на рисунке 3.12, из которого видно, что области с пониженной температурой не проникают в центральную область поковки. Для более точного определения температуры был задан ряд контрольных точек, в которых производились измерения. Результаты приведены на графике зависимости распределения температуры от сечения поковки, из которого можно сделать вывод, что даже у поверхности температура металла не опускается ниже 900°C.

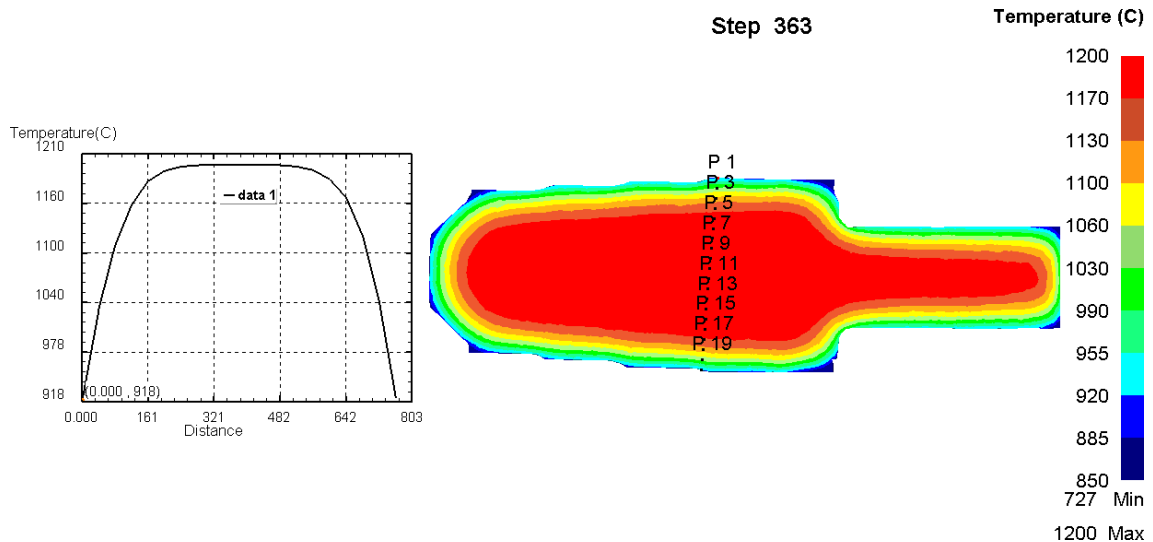


Рисунок 3.12 – Температурное поле в продольном сечении биллета

При этом присутствуют области с температурой ниже 850 °C, но они расположены либо в задней части цапфы, либо в острых выступающих гранях биллета, которые имеют небольшие размеры и охлаждаются быстрее остальной части металла. В реальном процессе в данных областях начинается образование окалины. Также представленный график позволяет определить размеры сформировавшейся пластической рубашки, описанной в [1]: порядка 140–160 мм от поверхности поковки (области крутого подъёма и спуска на графике). Относительно небольшая кольцевая зона из металла с пониженной температурой связана с небольшим временем операции и большим поперечным сечением слитка: остывание внутренних слоёв занимает длительное время.

Анализ напряжённого состояния позволяет о напряжениях сжатия, сконцентрированных и достигающих максимальных значений в местах контакта бойков со слитком, при этом они распространяются вплоть до осевой зоны. Растягивающие напряжения возникают в боковых областях, не контактирующих с бойками, наибольших значений они преимущественно достигают только в поверхностном и приповерхностном слоях металла, что вызвано пониженной пластичностью вследствие охлаждения (размер данных областей также составляет 150 – 160 мм от поверхности). В осевой зоне слитка возникают либо напряжения сжатия, либо

небольшие растягивающие напряжения, при этом последние также распространяются по большей части в приповерхностной области, ограниченной охлажденными слоями металла. Также растягивающие напряжения возникают за очагом деформации, непосредственно перед цапфой. Подобное распределение можно объяснить продольным течением металла вследствие вытяжки.

Распределение деформаций по сечению биллета показано на рисунке 3.13, для большей наглядности в них выбрана шкала отображения результатов, дающая представление о распределении деформаций в теле биллета.

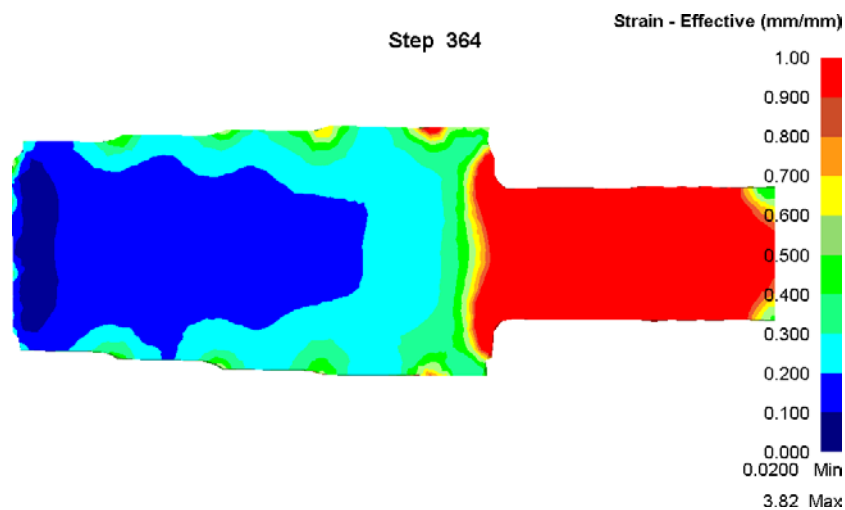


Рисунок 3.13 – Распределение накопленных деформаций по сечению биллета

Величина деформаций в цапфе выше, но т.к. данная область будет в дальнейшем отсечена, то конкретные значения не слишком важны. Из рисунка видно, что распределение накопленных деформаций в теле биллета неравномерно: ближе к цапфе наблюдается более интенсивная проработка, это вызвано исходной конусностью применяемого слитка, вследствие чего в данной области происходит более значительный уков. В большей части заготовки деформации концентрируются в приповерхностном слое.

После анализа полученных данных можно сделать вывод о благоприятном напряжённом состоянии слитка при биллетировке: в осевой зоне возникают преимущественно напряжения сжатия. Растягивающие напряжения возникают в приповерхностных слоях, при этом достигая высоких значений в относительно небольшом объёме слитка, в дальнейшем вследствие кантовки данные области также испытывают напряжения сжатия.

Небольшие обжатия, при помощи которых производится биллетировка, не приводят к сколько-нибудь значительной проработке осевой зоны поковки, однако это и не является основной целью операции. Полученная форма и размеры биллета соответствует необходимой для производства дальнейших операций.

Осадка биллета

Следующей технологической операцией является осадка биллета. Перед ней производился подогрев биллета и дальнейшее охлаждение в течении 120 сек. Для осадки применялась нижняя сферическая осадочная плита, в качестве верхней плиты применялась схематическая модель подвижной траверсы прессы. Положение биллета в инструменте при осадке показано на рисунке 3.14а, а внешний вид после осадки – 3.14б.

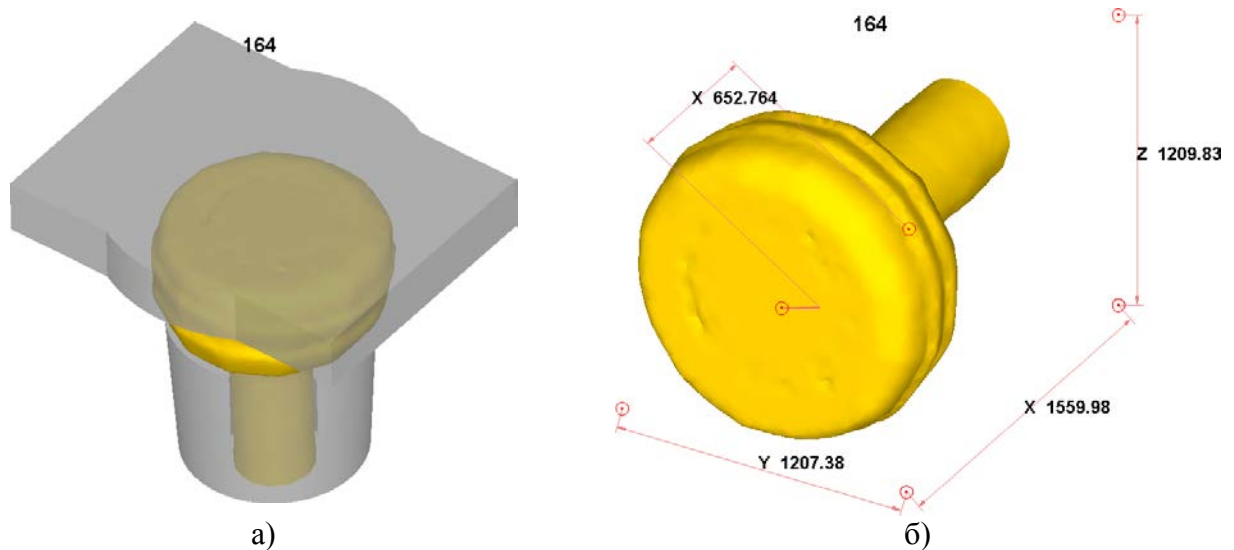


Рисунок 3.14 – Внешний вид биллета после осадки

Из рисунка видно, что полученная заготовка имеет на верхней поверхности некоторые неровности, вызванные формой исходно биллета, полученного после обрубки донной части. Их появление вызвано понижением пластичности верхней приповерхностной области биллета вследствие продолжительного контакта с траверсой прессы. При дальнейшей осадке происходит переход боковой поверхности на верхнюю и их стык происходит по границам охлажденной области. При этом пластичность боковой поверхности выше, что и вызывает появление сравнительно небольших складок. На боковой поверхности осаженой заготовки можно наблюдать ряд складок, причиной появления которых служат полученные при биллетировке биллета ступенчатые уступы. При этом в целом боковая поверхность заготовки после осадки имеет выпуклую форму.

Размеры заготовки после биллетирования также показаны на рисунке 3.14б. Как видно получившийся диаметр несколько превышает расчётный. Объяснением этого служат выступы на боковой поверхности заготовки: размеры были автоматически высчитаны по крайним габаритам модели.

Распределение накопленных деформаций в продольном сечении заготовки показано на рисунке 3.15. Наименьшие значения возникают в верхней части заготовки, в месте её контакта с траверсой прессы.

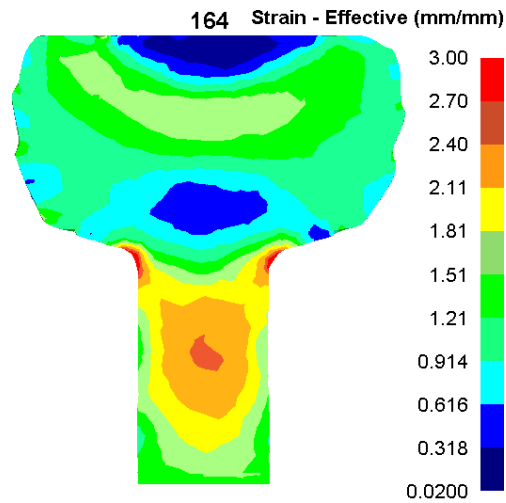


Рисунок 3.15 – Распределение накопленных деформаций по поверхности биллета после осадки

Причиной этого служит образовавшаяся зона затруднённой деформации, образованная с одной стороны силами контактного трения между поверхностью заготовки и инструментом, а с другой стороны – понижением пластичности металла заготовки вследствие более интенсивного охлаждения. Вторая зона затруднённой деформации возникает в нижней части заготовки. При этом верхняя зона затруднённой деформации оказывается больше и имеет более низкие значения деформаций. Причина этого в большем пятне контакта заготовки с траверсой прессы, чем с нижней осадочной плитой. Высокие значения деформаций возникают в центральной области тела биллета.

Для определения направления течения потоков металла был использован пробный объём, описанный в Главе 2. Места размещения сфер показаны на рисунке 3.16.

Было использовано две сферы, расположенные на осевой линии: одна в центре биллета, вторая – в передней части. Выбор подобного расположения обусловлен важностью получения данных из осевой зоны как в бочке, так и в шейке будущего вала. Диаметр сфер составлял 20 мм. Отслеживание формоизменения осуществлялось после операции биллетирования.

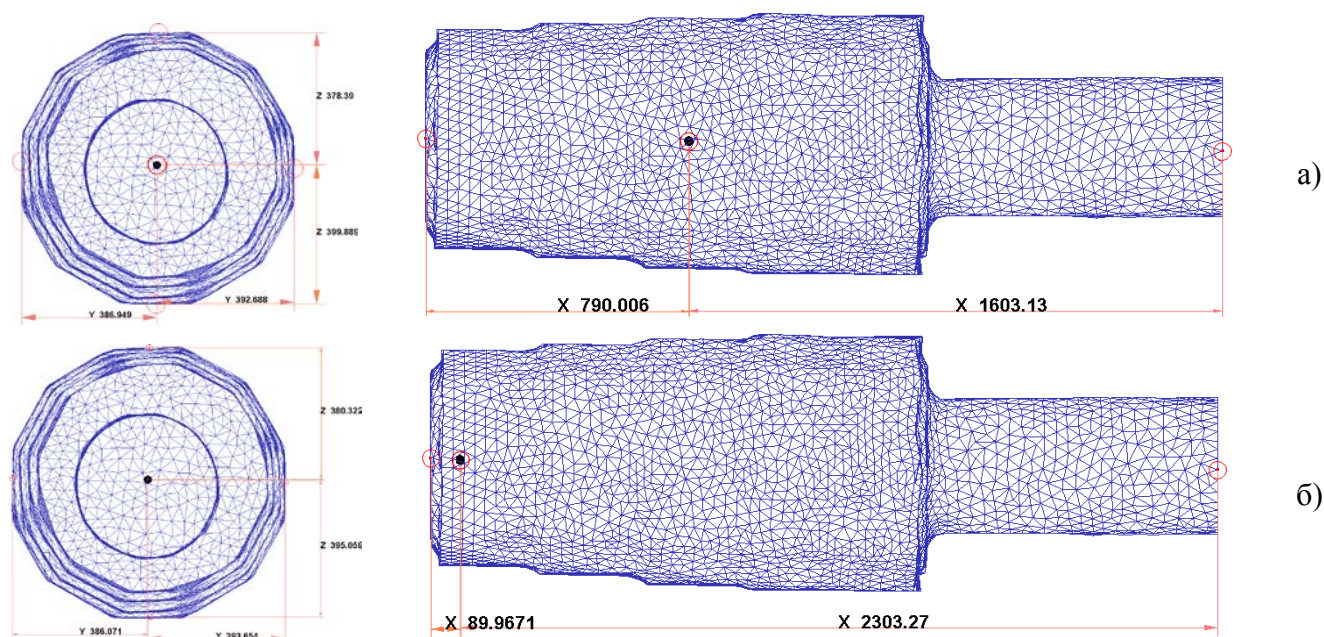


Рисунок 3.16 – Места размещения пробного объёма

Результаты формоизменения пробных объёмов показаны на рисунке 3.17, а изменения размеров основных осей – в таблице 3.1. Заметно значительное различие в форме деформированных сфер: находившаяся в центре (рисунок 3.17а) попала в область с наибольшей деформацией и значительно сжата в продольной оси и практически равномерно растянута по остальным двум. В то время как сфера из передней части билета (рисунок 3.17б) практически не деформирована, т.к. полностью находилась в зоне затруднённой деформации.



Рисунок 3.17 – Форма сфер после осадки

Таблица 3.1 – Изменение размеров сфер по основным осям при осадке

Сфера	Абсолютные значения, мм			Относительные значения, %			Суммарные изменения, %		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
а)	4	44,4	44,6	-80,0	122,0	123,0	-80	122	123
б)	19,4	20,4	20,3	-3,0	2,0	1,5	-3	2	1,5

На рисунке 3.18 показаны векторы скоростей перемещения металла: как видно, из осевой зоны металл перемещается в радиальном направлении, в то же время низкая пластичность металла и силы контактного трения не позволяют таким же образом смещается металлу в

местах соприкосновения с инструментом, что и вызывает появление зон затруднённой деформации.

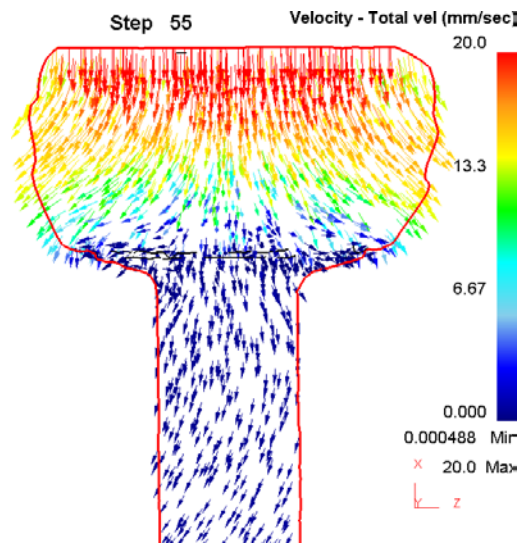


Рисунок 3.18 – Векторное распределение скоростей перемещения металла

Распределение температуры по поверхности заготовки показано на рисунке 3.19. Из него наглядно видны зоны контакта заготовки с инструментом, в которых температура снизилась ниже 600 °С. В реальном процессе в данных местах происходит интенсивное образование окалины, но DEFORM не позволяет это отобразить. На остальной поверхности заготовки наблюдается равномерное распространение температуры в 1040 – 1060 °С.

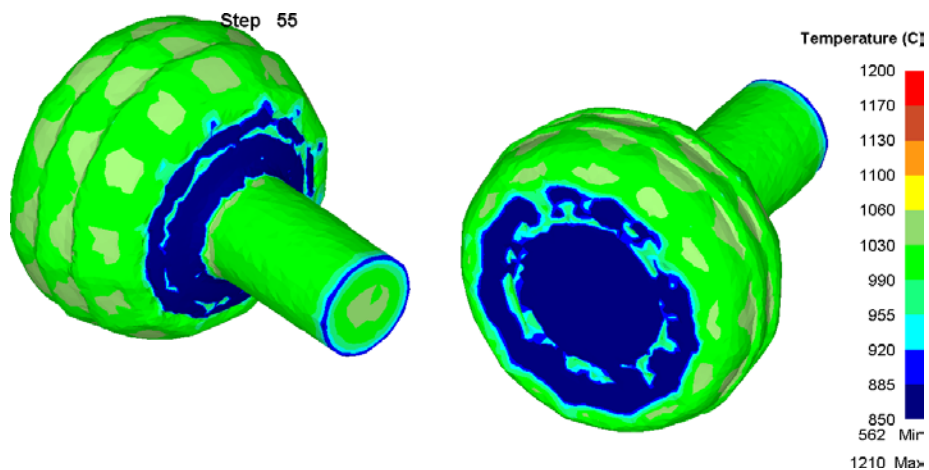


Рисунок 3.19 – Распределение температуры по поверхности биллета после осадки

Распределение температуры по сечению заготовки показано на рисунке 3.20. Как видно, вследствие небольшого времени протекания операции пластическая рубашка имеет небольшие размеры: порядка 120 – 130 мм. При этом в местах соприкосновения заготовки и рабочего инструмента температура опускается значительно ниже, чем в других областях – до 580 °С.

Однако даже в данной области пониженная температура не проникает вглубь заготовки более чем на 150 мм. В месте касания с нижней садочной плитой картина схожая.

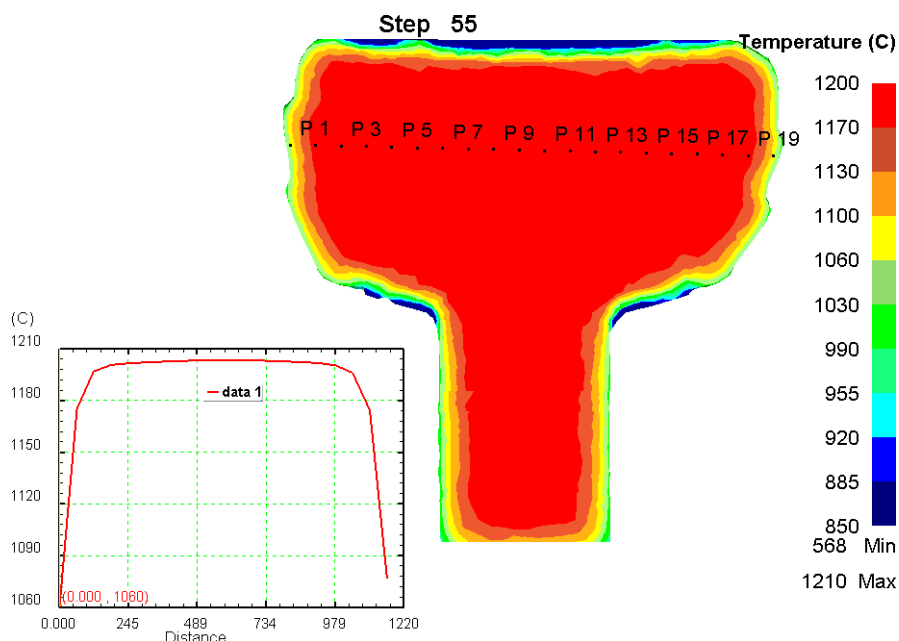


Рисунок 3.20 – Распределение температуры по сечению биллета после осадки

Деформационный разогрев, возникающий при осадке показан на разрезе заготовки на рисунке 3.21. Как видно он занимает всю центральную область, при этом сама величина разогрева невелика и не поднимает температуру выше 1210 °С. Столь большой размер области с разогревом вызван высокой степенью деформации значительного объёма металла в центральной зоне биллета.

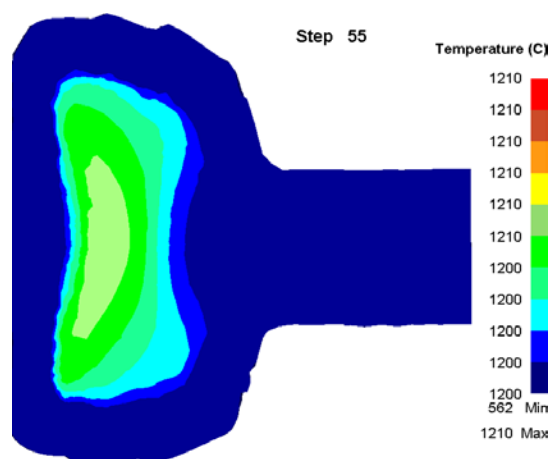


Рисунок 3.21 – Распределение деформационного разогрева по сечению биллета после осадки

Распределение интенсивности напряжений по сечению заготовки показано на рисунке 3.22.

164 Stress - Effective (MPa)

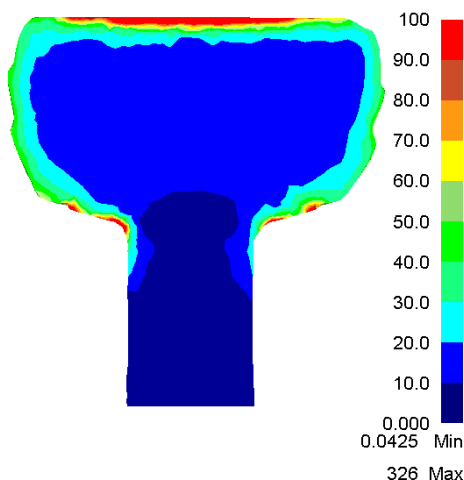


Рисунок 3.22 – Распределение интенсивности напряжений по сечению биллета при осадке

Как видно, напряжения распространяются по уже привычной закономерности: повышенные значения концентрируются в приповерхностных слоях, соответствующих остывающей пластической рубашке. Максимальные значения проявляются в местах контакта инструмента с заготовкой. При осадке время единичного контакта многократно превосходит время контакта при протяжке, поэтому охлаждение поверхностного слоя более интенсивное, что вызывает значительное падение пластичности и, как следствие резкий рост интенсивности напряжений.

Распределение максимальных главных напряжений по сечению заготовки показано на рисунке 3.23. Их распределение характерно для операции осадки: в центральной зоне заготовки возникает область с напряжениями сжатия, а по периметру – растяжения. При этом максимальных значений растягивающие напряжения достигают в местах контакта с рабочим инструментом.

164 Stress - Max principal (MPa)

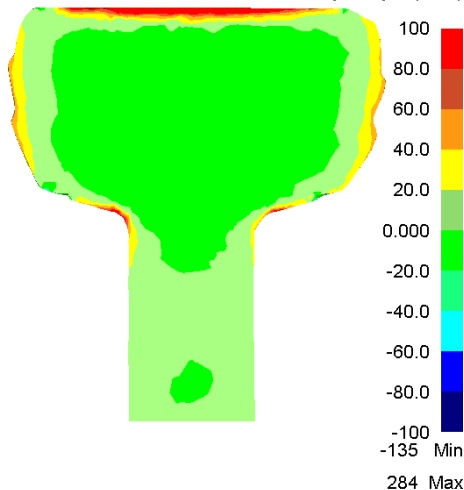


Рисунок 3.23 – Распределение главных напряжений по сечению биллета при осадке

После анализа полученных данных можно сделать вывод о благоприятном напряжённом состоянии билета при осадке: при деформировании в осевой зоне образуется область с напряжениями сжатия, что благоприятно сказывается на заживлении пор и малых пустот, которые могли образоваться при разливке слитка. Растягивающие напряжения распространяются по приповерхностному слою билета. Также происходит интенсивная деформация осевой зоны, которая приводит к разрушению литой структуры слитка. При этом в верхней и нижней частях билета формируются обширные зоны затруднённой деформации, в которых разрушения литой структуры не происходит. В поверхностном слое над верхней зоной вследствие уменьшения пластичности металла возникают высокие растягивающие напряжения, которые могут привести к появлению поверхностных дефектов, однако глубина распространения данных напряжений невелика.

Плоская верхняя поверхность осажённой заготовки, имеющая в центральной области зону с пониженной пластичностью, при дальнейшей протяжке может начать изгибаться внутрь заготовки, образуя вогнутую полость, которая в дальнейшем может образовывать утяжину.

Протяжка заготовки до диаметра 920 мм

Следующей технологической операцией была протяжка осажённой заготовки, которая производилась без дополнительного подогрева. Операция осуществлялась в плоских бойках по следующим переходам: из круга (осажённая заготовка) в промежуточный квадрат, показанный на рисунке 3.24а, у которого далее производилась сбивка углов до получения восьмигранника и финальной обкаткой до круга диаметром 920 мм. Полученная поковка изображена на рисунке 3.24б. Размеры полученной заготовки позволяют проведение дальнейших операций.

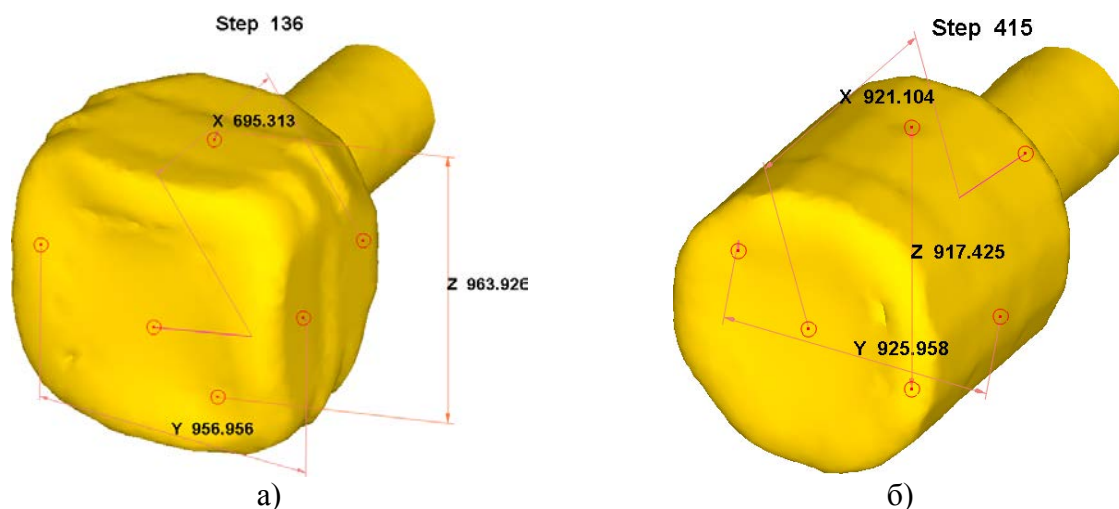


Рисунок 3.24 – Общий вид поковки во время протяжки в плоских бойках

Протяжка начиналась с передней части заготовки и была поступательной: производился проход по всей длине биллета, после чего следовала кантовка на 90° , 45° , или $22,5^\circ$. При обкатке итогового круга кантовка осуществлялась после каждого единичного обжата, а подача – после достижения участком круглого поперечного сечения. Величина подачи в большинстве случаев составляла $2/3$ от ширины бойка ($300 - 330$ мм), за исключением крайних участков биллета (обычно их длина была несколько меньше). При подобной схеме протяжки, высказанное ранее предположение про возможность образования на передней грани заготовки вогнутой поверхности подтвердилось. Как видно причинами столь интенсивного увеличения полости является изначальная плоская поверхность передней части заготовки и распределение подач, при котором деформирующаяся зона в передней части заготовки имеет небольшую протяжённость, порядка $1/3 - 1/2$ от ширины бойка. Совместно оба этих факторы вызывают заметное продольное течение периферийных слоёв металла. При этом небольшая по длине (а в начале процесса и по ширине) контактная поверхность не может создать достаточных сил трения для уменьшения подобного течения.

После образования первоначальной вогнутой поверхности и при дальнейшей протяжке течение металла в радиальном направлении уменьшается, а в продольном увеличивается, т.к. передний край поковки, на который также приходится давление от бойков, становится, по сути, кольцом, зажатым с одного торца, у которого не закреплена внутренняя поверхность. Итогом подобной схемы протяжки является появление заметной вогнутой полости – начальной стадии развития торцевой утяжины. Итоговый перепад между гребнем вогнутой поверхности торца заготовки и его донной частью превышает 50 мм, что отображено на рисунке 3.25.

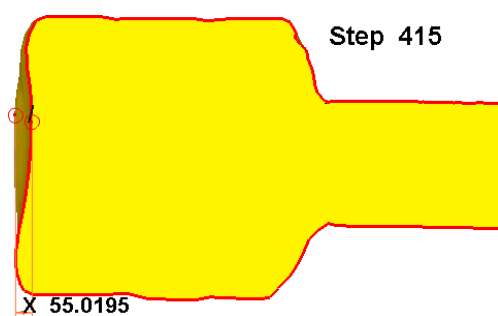


Рисунок 3.25 – Продольное сечение поковки после протяжки до круглого профиля

Распределение температуры на поверхности заготовки в конечной стадии процесса показано на рисунке 3.26, а в продольном сечении – на рисунке 3.27.

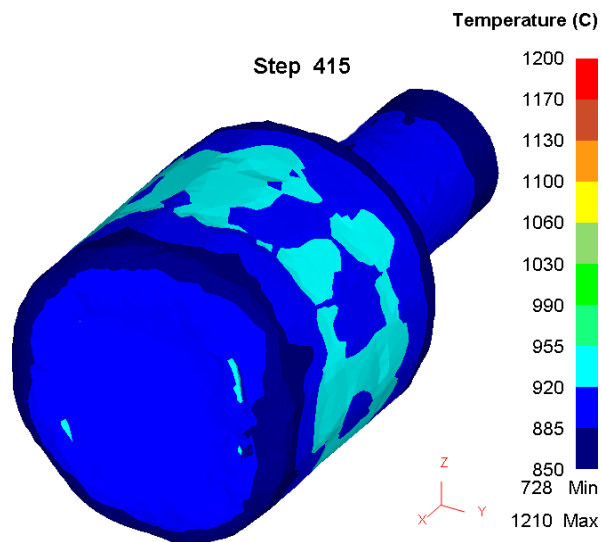


Рисунок 3.26 – Температурное поле на поверхности поковки после получения круглого профиля

Анализируя их можно сделать вывод о постепенном прогреве мест с пониженной температурой, образовавшихся при осадке, за счёт высокой температуры внутри заготовки.

Примером является прогрев переднего торца заготовки, охлаждённого до этого длительным контактом с траверсой прессы при осадке. Подобная картина изменения температуры показывает, что наибольшее влияние данная охлаждённая область ввиду отличия пластичности будет иметь в начале процесса. К концу протяжки практически вся поверхность заготовки имеет температуру выше 850 °С. Охлаждённые периферийные слои, образующие пластическую рубашку распространяется вглубь заготовки со всех сторон на 190 – 210 мм.

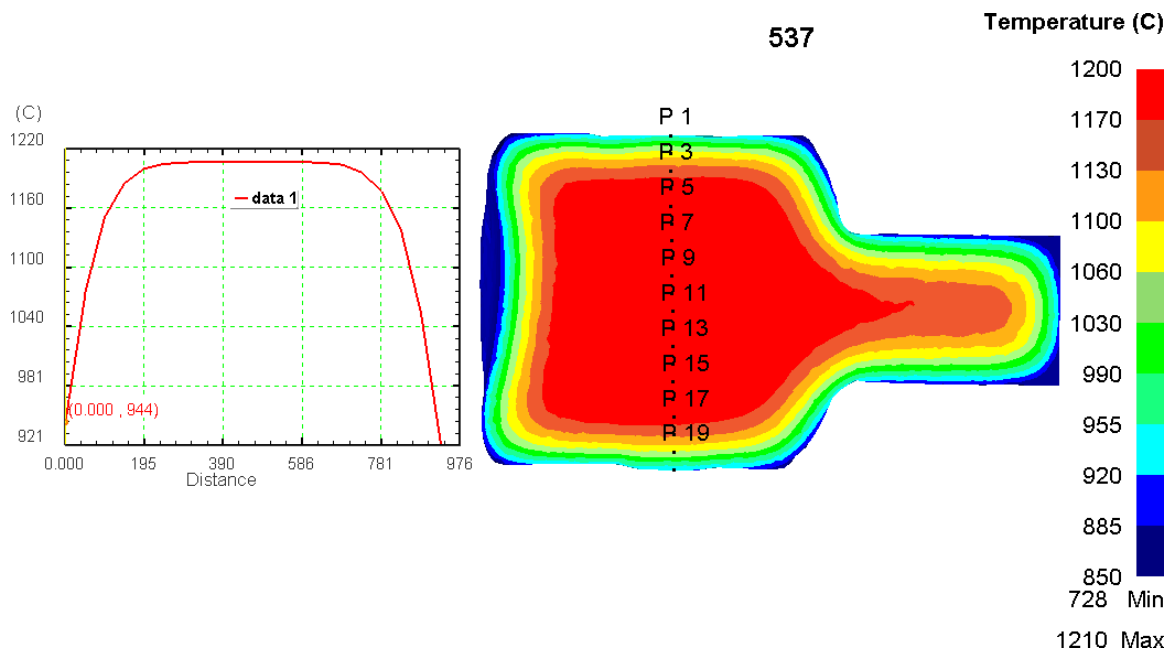


Рисунок 3.27 – Температурное поле поковки в продольном сечении после получения круглого профиля

После анализа полученных данных собранных за весь процесс моделирования данной операции протяжки, можно сделать вывод, что в начальной стадии происходит постепенное увеличение температуры деформационного разогрева, которое продолжается в течение всей операции. К моменту её окончания в центральной части поковки температура остаётся на 10 – 15 °C выше, чем в начале процесса. При этом происходит некоторое уменьшение разогретой области, однако она продолжает поддерживать высокую (порядка 1190 – 1200 °C) температуру в окружающих слоях металла. Причиной такой картины является интенсивная деформация при протяжке. Картина деформационного разогрева в конечной стадии рассматриваемого процесса показана на рисунке 3.28.

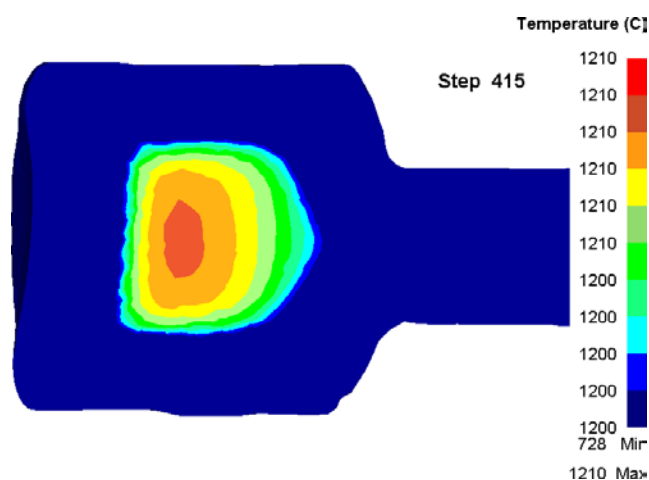


Рисунок 3.28 – Деформационный разогрев после протяжки

Распределение накопленных деформаций в продольном сечении заготовки после обкатки показано на рисунке 3.29.

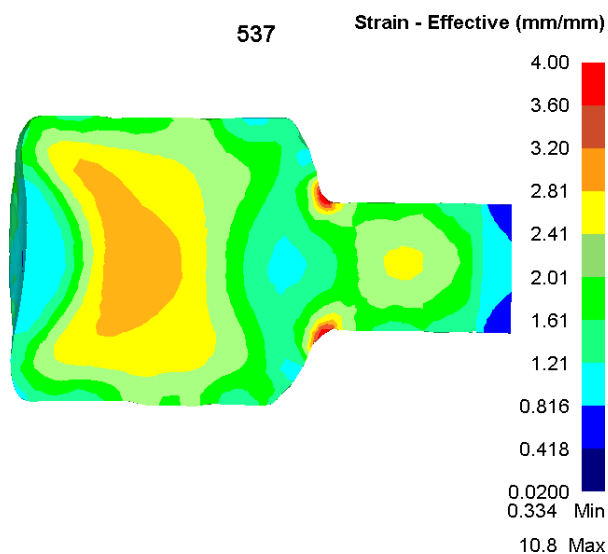


Рисунок 3.29 – Распределение накопленных деформаций в продольном сечении поковки

Наибольшие значения деформаций возникают в центральной части поковки. Также произошло уменьшение двух областей с пониженными значениями (бывшие зоны затруднённой деформацией) в передней и задней частях поковки. Подобная неблагоприятная картина распределения деформаций будет устранена при дальнейших операциях: на данные области приходится шейки будущего валка, которые имеют меньший диаметр, нежели его бочка, а значит, испытают больший уков.

Формоизменение сфер показано на рисунке 3.30, а изменения размеров основных осей – в таблице 3.2. Протяжка вызывает вытягивание деформированных сфер в продольной оси и сравнительно равномерное сжатие в двух остальных. Сфера из центральной области (рисунок 3.30а) вытягивается более значительно, чем расположенная в передней части (рисунок 3.30б). Подобная картина объясняется разницей диаметров заготовки в местах положения сфер после осадки и, как следствие, различными значениями продольной вытяжки.



Рисунок 3.30 – Форма сфер после протяжке до диаметра 920 мм

Таблица 3.2 – Изменение размеров сфер по основным осям после протяжке до диаметра 920 мм

Сфера	Абсолютные значения, мм			Относительные значения, %			Суммарные изменения, %		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
а)	8,5	31,5	29,9	112,5	-29,1	-33,0	-57,5	57,5	49,5
б)	26,9	17,5	17	38,7	-14,2	-16,3	34,5	-12,5	-15

В виду большого количества собранных данных, далее в работе будут приводиться картины напряжённого состояния заготовки во время различных стадий протяжки, которые наиболее ярко характеризуют отдельные стадии процесса. На рисунке 3.31 показано распределение интенсивности напряжений при получении промежуточного квадрата, а на 3.32 – распределение максимальных главных напряжений. Здесь и далее на рисунке а) приведено поперечное сечение поковки, проходящее по очагу деформации, а на б) – продольное сечение.

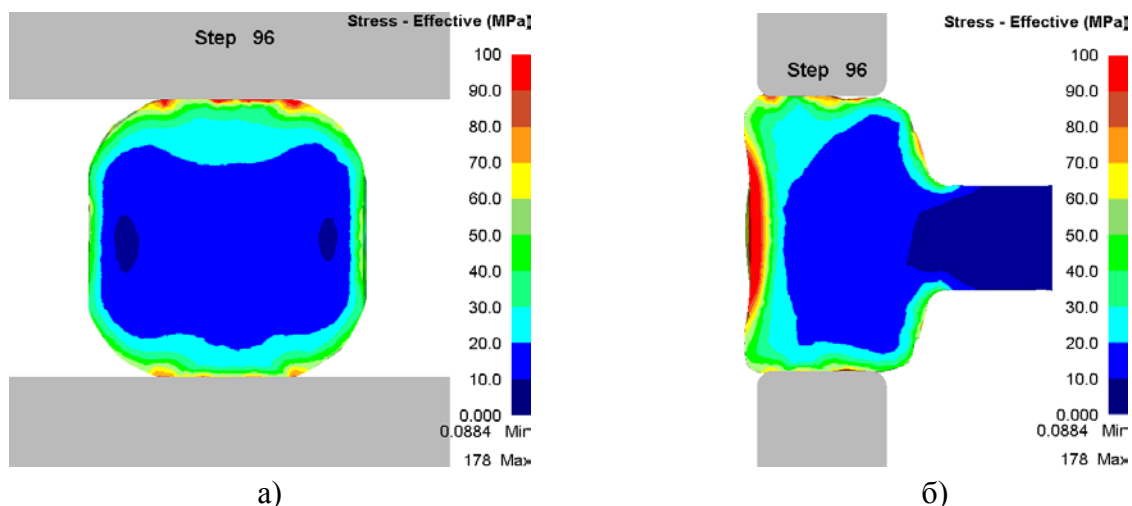


Рисунок 3.31 – Распределение интенсивности напряжений при получении промежуточного квадрата

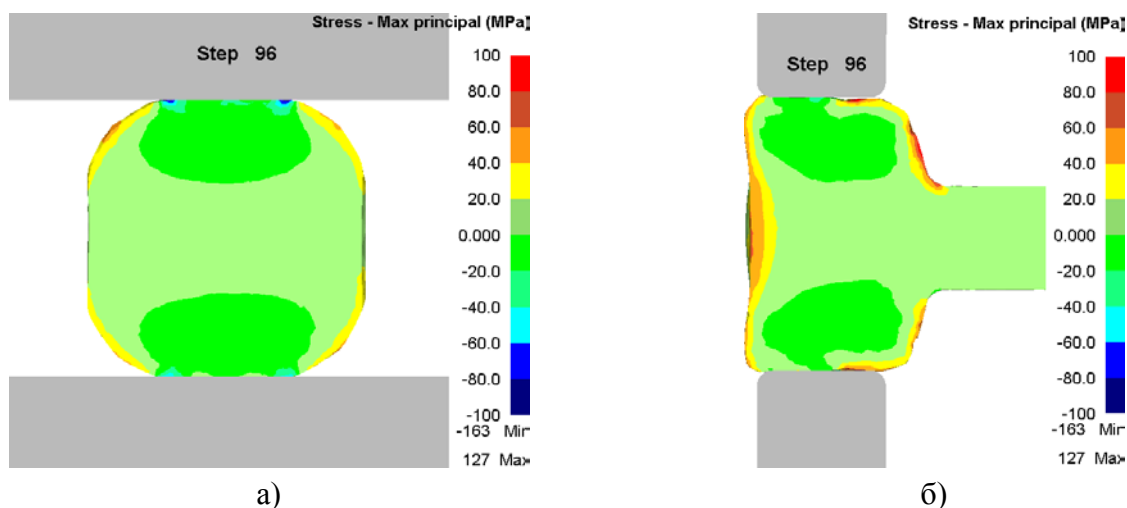


Рисунок 3.32 – Распределение максимальных главных напряжений в продольном сечении при получении промежуточного квадрата

В начальной стадии процесса контактная поверхность круглой заготовки с плоскими бойками относительно небольшая, что вызывает малое распространение напряжений сжатия: они концентрируются в областях, расположенных непосредственно под рабочим инструментом и не проникают до осевой зоны, где возникают растягивающие напряжения.

Также большое влияние оказывает охлажденная зона с малой пластичностью, расположенная в передней части заготовки. В ней возникают максимальные значения интенсивности напряжений и значительные растягивающие напряжения. В боковых областях также наблюдаются растягивающие напряжения, но их значения достигают относительно небольших величин. Пластическая рубашка имеет сравнительно небольшие размеры: порядка 130 – 150 мм.

При дальнейшей протяжке промежуточного квадрата площадь контактной поверхности бойков с заготовкой возрастает, что приводит к увеличению областей с сжимающими

напряжениями, расположенными под инструментом. Картина напряжённого состояния поковки при данном этапе протяжки показана на рисунках 3.33 и 3.34.

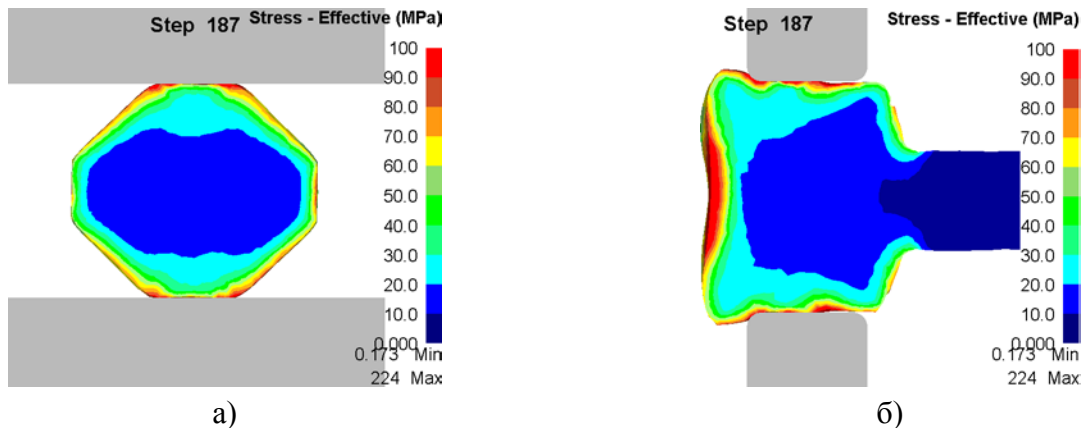


Рисунок 3.33 – Распределение интенсивности напряжений при сбивке углов

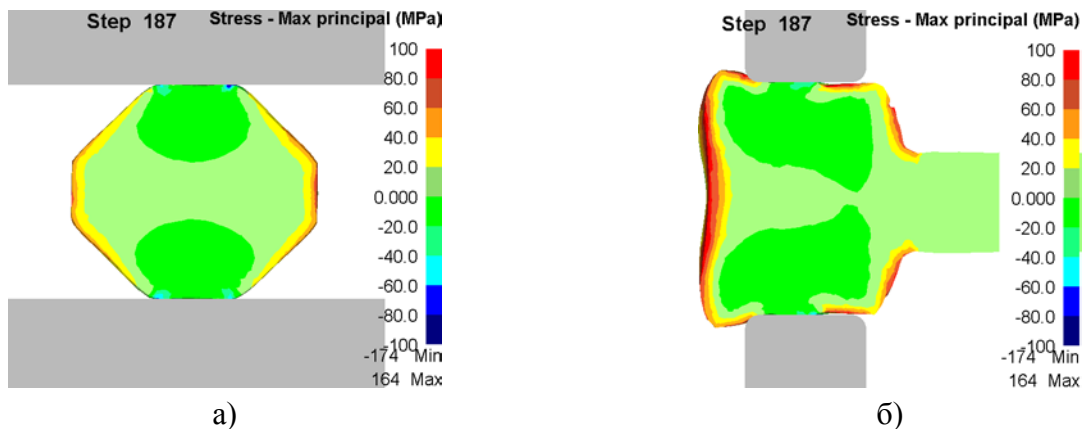


Рисунок 3.34 – Распределение максимальных главных напряжений в поперечном сечении при сбивке углов

Из иллюстраций видно, что сжимающие напряжения не проникают до осевой зоны заготовки, а достигают максимальных значений в боковых периферийных областях, что вызвано более низкой температурой поверхности, в том числе, вследствие интенсивного теплообмена с бойками. Повышенные значения интенсивности напряжений также появляются не только под бойками, но и на боковых поверхностях. Главный максимум напряжений всё ещё находится в передней части поковки, но размер данной области несколько уменьшается, причиной чего является прогрев от внутренних слоёв металла, и, как следствие, повышение пластичности. Глубина проникновения пластической рубашки увеличивается слабо.

Протяжка и обкатка восьмигранника, показанная на рисунках 3.35 и 3.36, характеризуется уменьшением площади контактной поверхности, однако, в связи с уменьшением поперечного сечения заготовки, значительного уменьшения областей,

испытывающих напряжение сжатия, не происходит. Хотя они также не проникают непосредственно до осевой зоны заготовки, но несколько увеличивают свой объём.

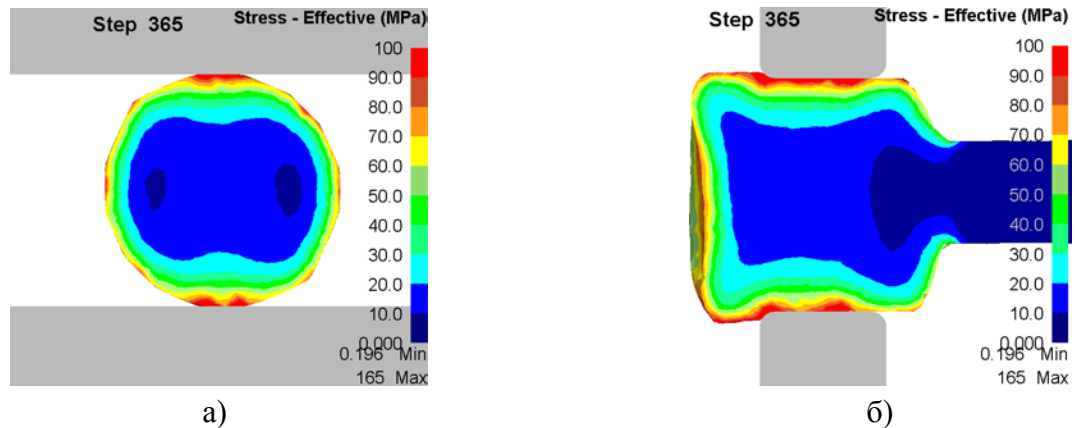


Рисунок 3.35 – Распределение интенсивности напряжений при обкатке восьмигранника

Подобную картину могут объяснить деформационный разогрев и общий большой размер поковки: они тормозят продвижение пластической рубашки к центральной области (она всё ещё проникает на 150 – 160 мм). В результате на поверхности пластичность продолжает снижаться, а в центральной области даже несколько возрастает. Это и приводит к тому, что сжатие центра заготовки и прилегающей к нему области происходит не только от места контакта бойков, но и от прилегающей поверхности, а боковые стороны становятся менее податливыми к растяжению, что также повышает области распространения сжимающих напряжений. При этом понижение пластичности внешних слоёв заготовки вызывает увеличение значений растягивающих напряжений, возникающих в боковых областях. В передней части заготовки продолжается уменьшение области с пониженной температурой.

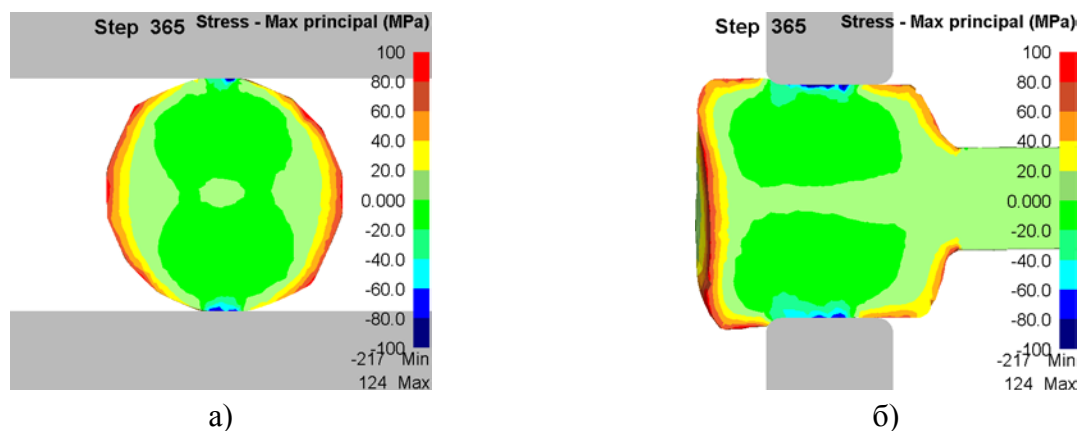


Рисунок 3.36 – Распределение максимальных главных напряжений при обкатке восьмигранника

Финальная протяжка до круглого сечения характеризуется небольшими обжатиями, которые также сопровождаются небольшими площадями контактных поверхностей, однако полностью сформированная пластическая рубашка привела к появлению больших областей с сжимающими напряжениями, концентрирующимися под местами контакта с бойками и распространяющимися практически через всё сечение поковки. Однако в боковых приповерхностных областях также возникают высокие растягивающие напряжения.

Интенсивность напряжений также достигает максимальных значений в кольцевой периферийной области. При этом сама пластическая рубашка остаётся довольно тонкой: порядка 180 – 190 мм. Причиной этого также является деформационный разогрев. Ярко выраженная область с пониженной пластичностью в передней части поковки практически исчезла: произошло её нагревание за счёт тепла центральной области металла.

В целом напряжённое состояние заготовки при протяжке в плоских бойках нельзя охарактеризовать как полностью благоприятное, особенно в начальной стадии процесса. Вследствие малых контактных поверхностей и двух перпендикулярных точек приложения усилия происходит развитие растягивающих напряжений в осевой и боковых областях. Ситуация улучшается при достижении заготовкой квадратного сечения, но присутствие растягивающих напряжений в центре и по бокам сохраняется. Образование пластической рубашки и деформационный разогрев несколько улучшают ситуацию, особенно при получении и протяжке до восьмигранного поперечного сечения.

Финальная часть процесса характеризуется довольно благоприятной картиной напряжённого состояния для осевой части поковки и неблагоприятной для поверхностных и приповерхностных боковых областей. Возникающие в них высокие растягивающие напряжения могут вызывать появление таких дефектов как трещины и разрывы при несоблюдении температурного режима.

Протяжка заготовки до диаметра 775 мм

Согласно применяемому технологическому процессу далее следует замена плоских бойков на комбинированные, подогрев поковки и протяжка до диаметра 775 мм, по достижении которого при помощи пережимки производится разметка. Внешний вид поковки перед разметкой показан на рисунке 3.37.

В ходе протяжки, как и предполагалось, произошло увеличение торцевой полости. Причиной интенсивного развития является выбранный режим протяжки поковки: начало со стороны утяжины, совместно с величиной подачи ($\frac{2}{3}$ от ширины бойка).

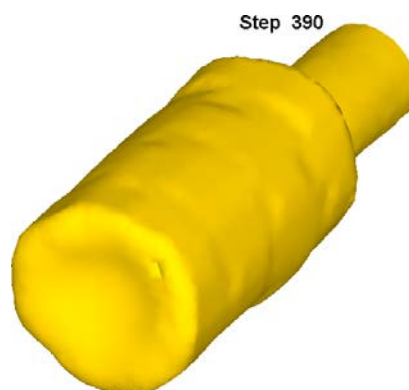


Рисунок 3.37 – Внешний вид поковки

Глубина полости на момент начала протяжки уже составляла более 50 мм, что привело к тому, что немалая часть металла из выступающей торцевой части перемещалась не в радиальном, а в продольном направлении. Кроме того, т.к. в вогнутой передней части поковки не было металла, то её края стали смыкаться, дополнительно увеличивая длину и уменьшая диаметр. Размеры образовавшейся полости показаны на рисунке 3.38

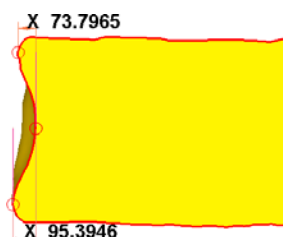


Рисунок 3.38 – Размеры полости

Распределение накопленных деформаций в продольном сечении поковки показано на рисунке 3.39.

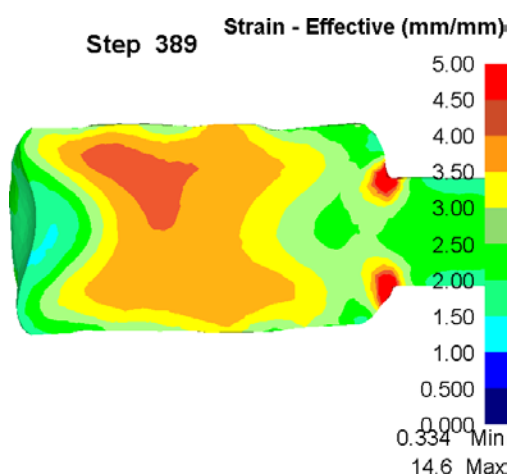


Рисунок 3.39 – Распределение накопленных деформаций после протяжки

Как видно после анализа полученных данных, наиболее проработанная часть находится в середине поковки, которая в дальнейшем станет бочкой валка. Наименее проработанной является передняя часть, но в дальнейшем она будет испытывать наибольший уков. В прибыльной части также находится область, содержащая пониженные значения, но при дальнейшей протяжке уков тоже будет достаточным для итоговой проработки структуры. В месте перехода цапфы в тело поковки наблюдаются довольно высокие значения деформаций, что является важным, т.к. в дальнейшем именно эта область станет приводным концом валка, испытывающим высокие нагрузки.

Формоизменение сфер показано на рисунке 3.40, а изменения размеров основных осей – в таблице 3.3. В целом, картина соответствует предыдущей операции: значительное удлинение в продольном направлении и сжатие в двух остальных, причём более выраженное по оси Y для сферы в центре (рисунок 3.40а), чем для сферы в торцевой части (рисунок 3.40б).



Рисунок 3.40 – Форма сфер после протяжки до диаметра 775 мм

Таблица 3.3 – Изменение размеров сфер по основным осям после протяжке до диаметра 775 мм

Сфера	Абсолютные значения, мм			Относительные значения, %			Суммарные изменения, %		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
а)	12,5	25,2	26	47,1	-20,0	-13,0	-37,5	26	30
б)	44,9	13,7	13,6	66,9	-21,7	-20,0	124,5	-31,5	-32

Это вызвано смещением массива точек относительно продольной оси, вследствие применения комбинированных бойков и, как следствие, неравномерным течением металла от верхнего и нижнего бойка.

Распределение температуры на поверхности поковки после протяжки показано на рисунке 3.41, а в продольном сечении – на рисунке 3.42. Из них видно, что интенсивному охлаждению подвергаются кольцевые поверхности передней и задней кромок поковки, в то время как температура остальной поверхности составляет порядка 950 °С.

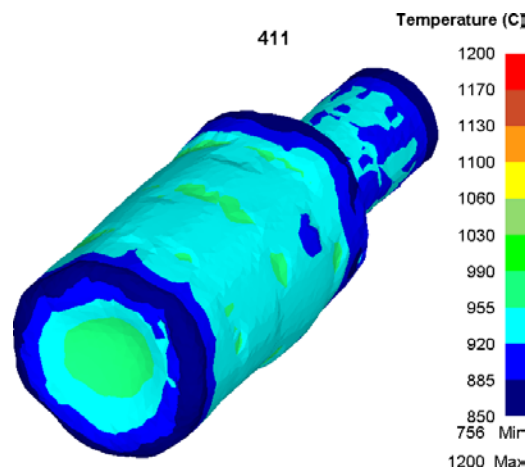


Рисунок 3.41 – Температурное поле на поверхности поковки перед разметкой

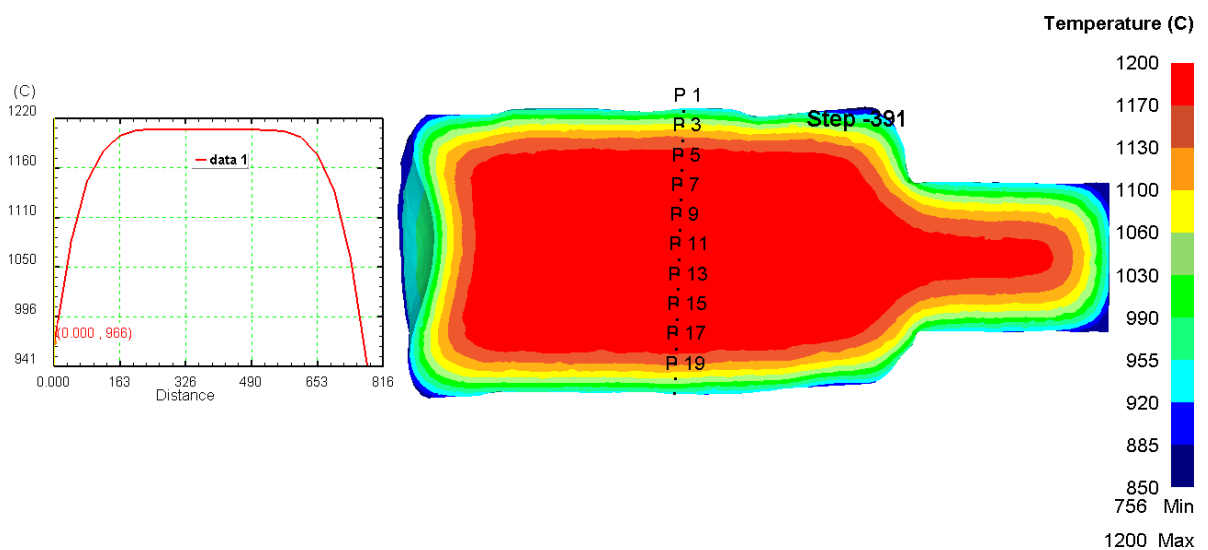


Рисунок 3.42 – Температурное поле в продольном сечении перед разметкой

Распределение деформационного разогрева по сечению поковки показано на рисунке 3.43. Разогретая область занимает весь объём центральной части поковки. При этом температура в ней уже не поднимается выше исходной (1200 °C), но продолжает поддерживаться на данном уровне и подогревать прилегающие области.

Распределение интенсивности напряжений показано на рисунке 3.44. С заменой нижнего бойка на вырезной произошло изменение в распределении напряжений: вместе с сохранением распределения повышенных значений в кольцевой приповерхностной зоне, появились максимумы значений в месте контакта с бойками, теперь их три. Причём наиболее ярко выделяется область под верхним бойком, что связано с тем, что при использовании комбинированных бойков обжатие под верхним плоским бойком оказывается несколько больше, чем под нижним вырезным.

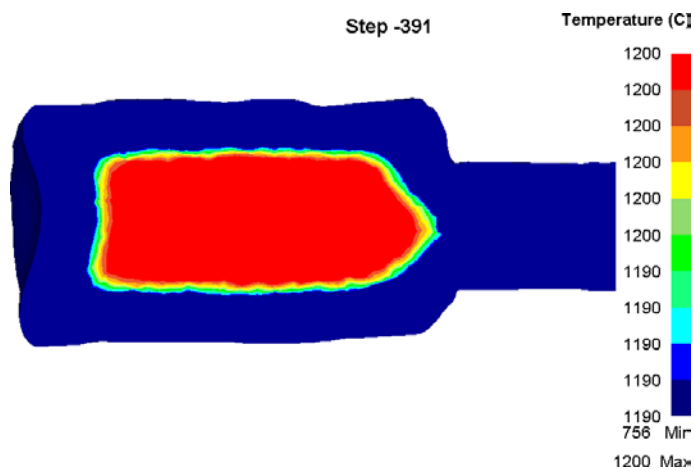


Рисунок 3.43 – Деформационный разогрев в продольном сечении перед разметкой

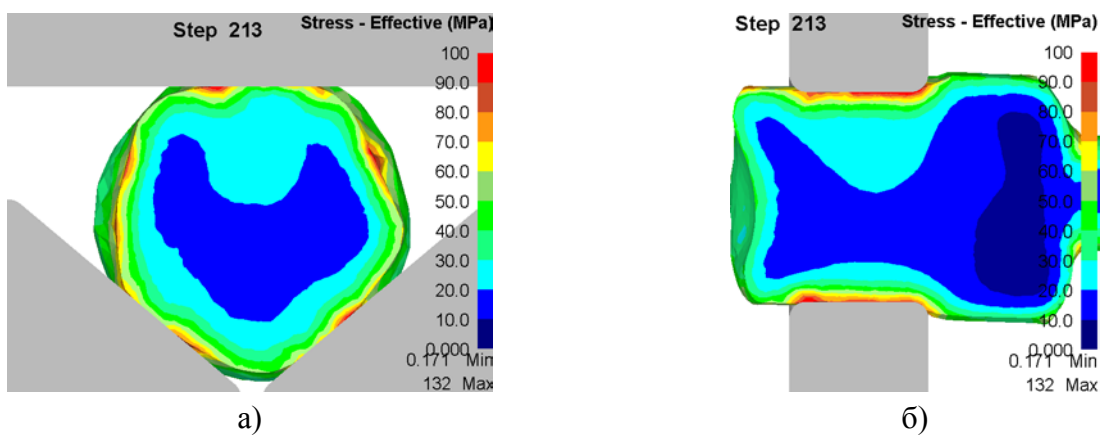


Рисунок 3.44 – Распределение интенсивности напряжений при протяжке

Распределение максимальных главных напряжений показано на рисунке 3.45. Здесь также можно наблюдать появление трёх областей с напряжениями сжатия, расположенными в местах контакта поковки с бойками. При этом, несмотря на увеличившийся по сравнению с применением плоских бойков объём данных областей, в очаге деформации в центре поковки всё ещё возникают небольшие растягивающие напряжения.

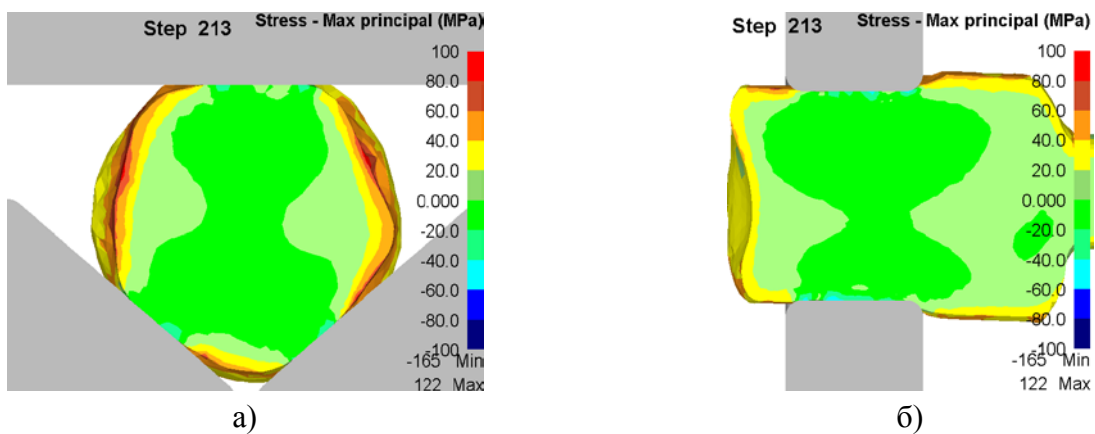


Рисунок 3.45 – Распределение максимальных главных напряжений при протяжке

Максимальных значений растягивающие напряжения достигают в боковых областях, не контактирующих с бойками. По сравнению с плоскими бойками их размер заметно меньше. Возникающую область с напряжениями сжатия, расположенную перед цапфой можно объяснить следующим образом: при протяжке происходит истечение металла из очага деформации, направленное в обе стороны вдоль продольной оси поковки. При этом в передней части происходит свободное течение металла, что и вызывает некоторые растягивающие напряжения, в то время как в противоположной области течение металла тормозится ограниченной в передвижении манипулятором цапфой, что и вызывает напряжения сжатия.

Распределение интенсивности напряжений при последующей протяжке в целом соответствует вышеописанному. Различия есть только в значениях напряжений, что вызвано изменёнными величинами абсолютных обжатий, т.к. произошло уменьшение диаметра поковки. В частности происходит увеличение сжимающих напряжений, что вызвано как уменьшением диаметра поковки в данной области, так и остыванием поверхности, которое привело к увеличению значений напряжений: как сжимающих, так и растягивающих, а также увеличило зону распространения последних.

При разметке максимальные значения интенсивности напряжений возникают в месте контакта поковки с пережимкой, что объясняется малой контактной поверхностью и большим проникновением пережимки в металл поковки. Также вследствие развитой пластической рубашки в ней возникают повышенные значения напряжений, образующие кольцевую зону в приповерхностном слое. Непосредственно под пережимкой возникает обширная область с сжимающими напряжениями, распространяющаяся практически до осевой зоны поковки. Растягивающие напряжения концентрируются, как и ранее, в боковых приповерхностных областях.

В целом можно сделать вывод, что применение комбинированных бойков улучшило напряжённое состояние поковки: возросли зоны, испытывающие напряжения сжатия, произошло уменьшение зон с растягивающими напряжениями, а также их величина. Так в центральной области растягивающие напряжения уменьшились, появились зоны со сжимающими напряжениями.

Протяжка заготовки до итоговых размеров

Согласно рассматриваемому технологическому процессу дальнейшей операцией является протяжка до итоговых размеров. Она начинается без промежуточного подогрева. При этом температуры поковки недостаточно для проведения всей операции, поэтому первоначально производилась полная протяжка бочки вала, и оттяжка шеек до диаметра,

применимого дляковки в комбинированных бойках меньших размеров. Внешний вид поковки показан на рисунке 4.46.

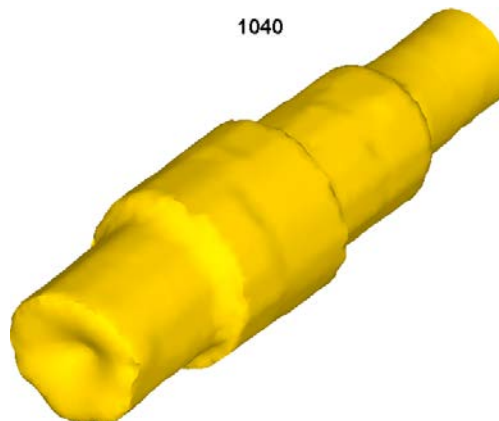


Рисунок 3.46 – Внешний вид поковки после промежуточной протяжки

Продолжилось развитие торцевой полости, которая к концу данной операции уже представляет собой утяжину, вид в разрезе и размеры которой показаны на рисунке 3.47.

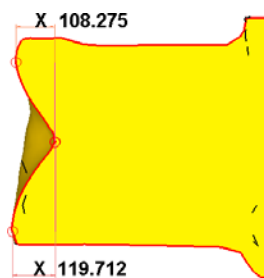


Рисунок 3.47 – Размер полости

Одной из причин столь сильного развития утяжины стал выбор небольших подач в начале протяжки. Увеличение подачи в последнем проходе несколько затормозило увеличение впадины, но на при полученных размерах устранить её уже крайне трудно и с большой вероятностью данная утяжина при дальнейшем развитии образует свищ или продольную трещину. Размеры полученной промежуточной поковки показаны на рисунке 3.48. Протяжка шеек осуществлялась до диаметра ≈ 550 мм.

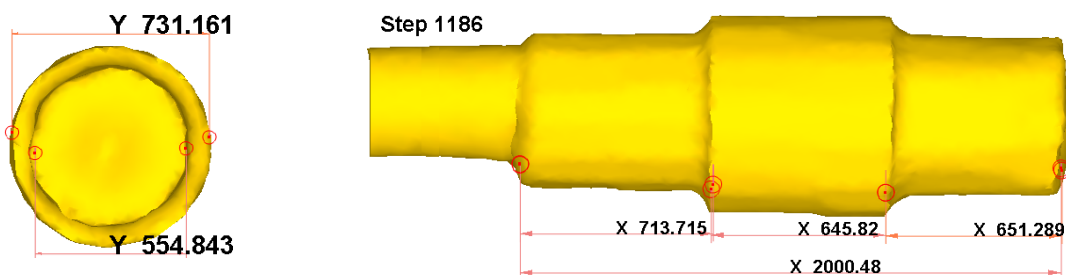


Рисунок 3.48 – Размеры поковки после промежуточной протяжки

Температура на поверхности поковки после протяжки показана на рисунке 3.49.

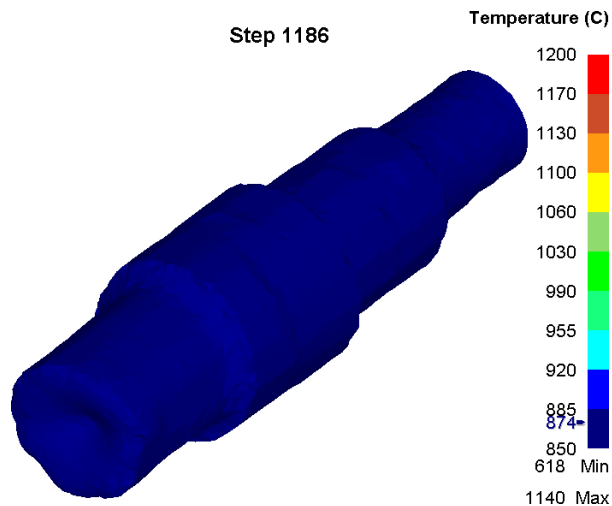


Рисунок 3.49 – Температура на поверхности поковки после промежуточной протяжки

Как видно, температура либо уже опустилась ниже 850 °С, либо находится вблизи данного значения на большей части поверхности. Распределение температуры по сечению, изображённое на рисунке 3.50, даёт более подробное представление: несмотря на охлаждение поверхностных слоёв, центральная часть заготовки всё ещё находится в достаточно нагретом состоянии. Причиной этого во многом является деформационный разогрев, возникший при протяжке. При финальных стадиях протяжки область распространения разогрева уменьшалась, но разогретые при предыдущей деформации области остывали дольше. Определение величины самого деформационного разогрева в данном моменте протяжки представляется затруднительной задачей, т.к. температура даже центральных областей находится ниже исходных 1200 °С. Однако можно сделать вывод, что его границы проходят по центральной области поковки с температурой в 1170 – 1180 °С.

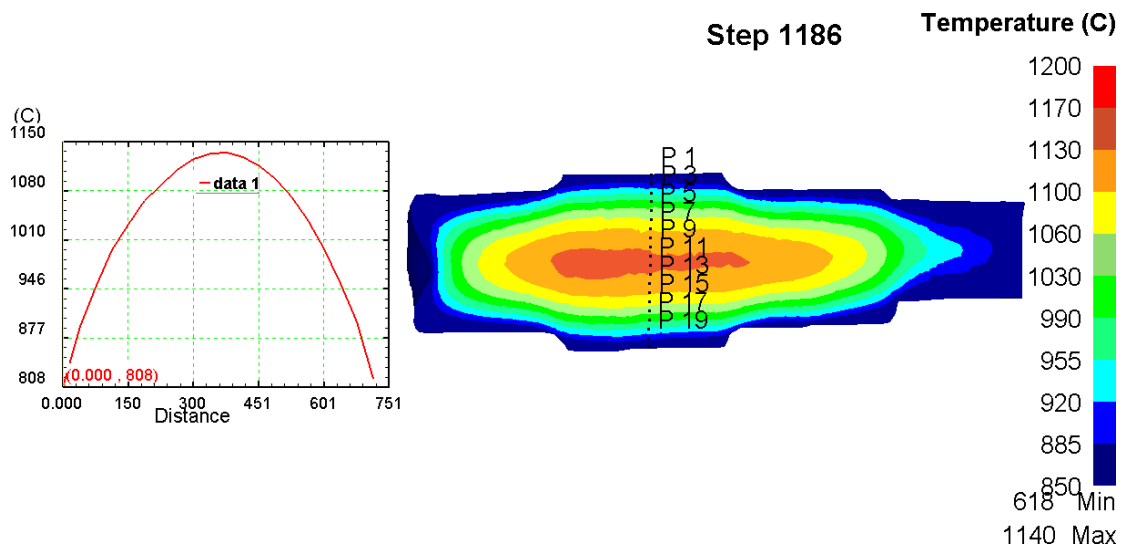


Рисунок 3.50 – Температура в продольном сечении поковки после промежуточной протяжки

Дальнейшее продолжение протяжки требует замену рабочего инструмента, что повлечёт за собой дополнительное время на охлаждение поковки, при котором вся поверхность и приповерхностные слои охладятся гораздо ниже нижней температурыковки в 850 °С (на 50 – 100 °С), что может повлечь за собой появление в упомянутых слоях такие дефекты как трещины и разрывы. Для их предотвращения перед продолжением операции требуется дополнительный подогрев.

Распределение интенсивности напряжений повторяет полученные при предыдущих протяжках: максимальные значения концентрируются в местах контакта с бойками. Однако интенсивное охлаждение, по сути, размывает границы пластической рубашки: теперь видны несколько кольцевых зон, проникающих практически до центра поковки. Также произошло возрастание значений напряжений, что также вызвано падением пластичности вследствие охлаждения.

Распределение накопленных деформаций показано на рисунке 3.51. Из представленных рисунков видно, что распределение деформаций в осевой зоне под бочкой вала относительно равномерно: разница в продольном направлении не превышает значений в 0,3, исходя из чего, можно сделать вывод о проработке литой структуры. Однако в приповерхностных слоях наблюдаются меньшие значения деформаций. В шейках, напротив, наблюдаются более высокие значения, которые при дальнейшей протяжке увеличатся.

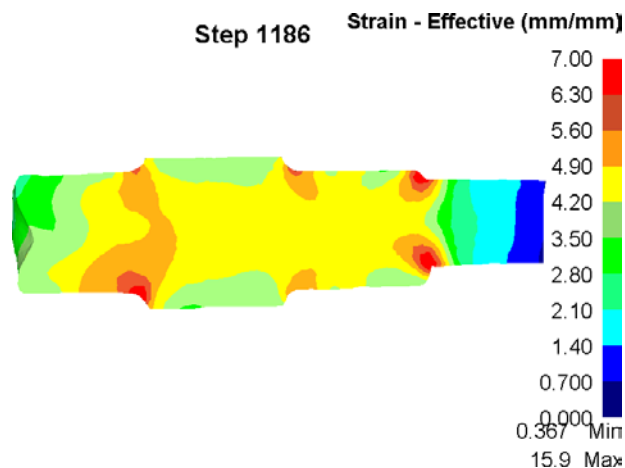


Рисунок 3.51 – Распределение накопленных деформаций в продольном сечении поковки после промежуточной протяжки

Формоизменение сфер показано на рисунке 3.52, а изменения размеров основных осей – в таблице 3.4.



Рисунок 3.52 – Форма сфер после протяжки

Таблица 3.4 – Изменение размеров сфер по основным осям при промежуточной протяжке

Сфера	Абсолютные значения, мм			Относительные значения, %			Суммарные изменения, %		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
а)	14	25,2	24,8	12,0	0,0	-4,6	-30	26	24
б)	122,4	8,7	8,5	172,6	-36,5	-37,5	512	-56,5	-57,5

После данной протяжки различия в продольной вытяжке пробных объёмов продолжают значительно возрастать. Длина искажённой сферы, расположенной в центре заготовки (рисунок 3.52а) практически на порядок меньше расположенной в передней части (рисунок 3.52б). При этом различия по двум остальным осям (Y и Z) сравнительно невелики. Что свидетельствует о, в целом, равномерном распределении деформаций в радиальном направлении поковки. Также наблюдается неравномерное искажение образующих кривых вдоль оси X. то объясняется неравномерностью течения металла, вследствие применения комбинированных бойков.

Распределение максимальных главных напряжений в середине процесса несколько изменяется, в частности происходит общее повышение значений. Теперь напряжения сжатия проникают от мест контакта с бойками до осевой зоны, более того в центре поковки образуется довольно обширная область с напряжениями сжатия, распространяющаяся далеко за пределы очага деформации. Вместе с этим возрастают и растягивающие напряжения в боковых приповерхностных областях.

Распределение интенсивности напряжений в финальной стадии протяжки, после перехвата поковки показано на рисунке 3.53. Картина распределения совпадает с предыдущей протяжкой, но отличается ещё более повышенными значениями. Также произошло распространение напряжений на прилегающие приповерхностные области, т.к. они охладились больше всего. Практически исчезла пластическая рубашка, наблюдается практически линейный рост значений напряжений по сечению поковки, что вызвано охлаждением металла.

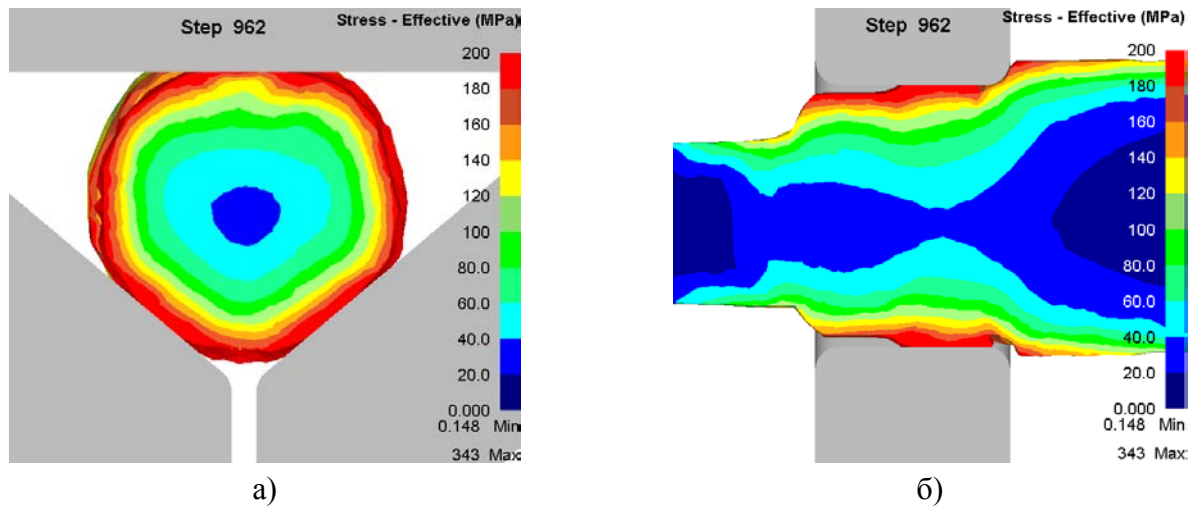


Рисунок 3.53 – Распределение интенсивности напряжений в конце протяжки

Распределение максимальных главных напряжений показано на рисунке 3.54. Представленная картина также схожа с предыдущей протяжкой. Теперь наблюдается резкий перепад между значениями напряжений сжатия, занимающих практически всю центральную область, и растягивающих, охватывающих приповерхностные слои. Столь большой градиент значений напряжений может отрицательно сказаться на состоянии металла: в граничных областях возможно появление разрывов и трещин, так же как и в приповерхностных слоях. Также напряжения сжатия проникают и в прилежащие приповерхностные области, вплоть до всей поверхности бочки вала. После анализа данных можно сделать вывод, что напряжённое состояние соответствует состоянию при предыдущей протяжке. Основные отличия вызваны уменьшением диаметра поковки и её охлаждения, в остальном всё также. Также следует отметить, что продолжается развитие утяжины, устранить которую на данном этапе уже практически невозможно. Однако при применении максимально возможных подач (от $2/3$ ширины бойка) может несколько сдержать её рост и замедлить смыкание полости.

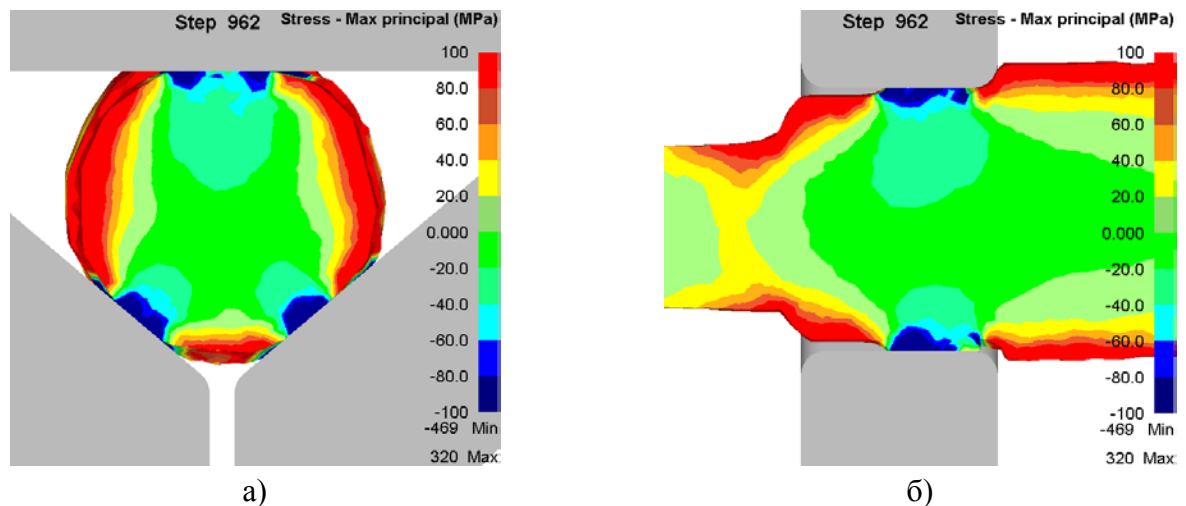


Рисунок 3.54 – Распределение максимальных главных напряжений в конце протяжки

После промежуточного подогрева происходит итоговая протяжка до итоговых размеров. Обжатие начиналось с передней части поковки до получения итоговых размеров, далее производился перехват и протягивалась задняя часть. Общий вид и размеры полученной поковки показаны на рисунке 3.55.

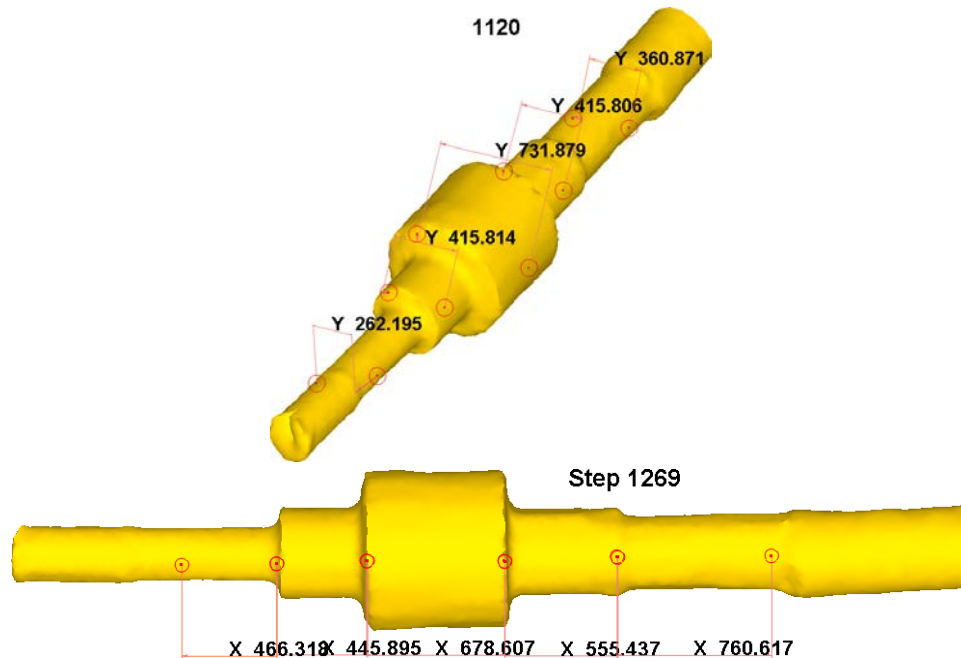


Рисунок 3.55 – Внешний вид и размеры итоговой поковки

Передняя часть имеет столь большую длину вследствие особенностей разметки: она производилась по дну впадины, а не по внешнему торцу. Это вызвало наличие дополнительного объема металла, который в итоге и перешёл в переднюю часть поковки. Проведённая подобным образом разметка позволила значительно уменьшить вероятность попадания торцевой утяжины в шейку валка. Итоговые размеры поковки находятся в пределах допусков, установленных при проектировании технологического процесса.

Внешний вид переднего конца поковки с торцевой утяжиной показан на рисунке 3.57. Как видно из рисунка 3.56а, помимо самой полости наблюдается трещина на внешней поверхности. В реальном процессе она может не заканчиваться в месте, показанном на рисунке, а продолжаться далее. В виду особенностей работы DEFORM, при переразбиении сетки происходит некоторое уменьшение продольной длины полости: близкорасположенные элементы КЭ сетки противоположных стенок заменяются одним общим. При этом DEFORM сигнализирует о создании зажима и продолжает использовать новую сетку. Некоторым решением данной проблемы может стать значительное увеличение числа элементов, но это значительно замедлит расчёт, поэтому данная возможность не применялась. Размеры полости перед перестроением сетки показаны на рисунке 3.56б.



Рисунок 3.56 – Размеры полости перед перестроением сетки

Дальнейшее прогнозирование развития утяжины основывалось на напряжённом состоянии и тепловом поле. Исходя из них, можно сделать вывод, что залечивания трещины не произойдёт: протяжка столь глубокой полости, по сути, представляет собой деформацию трубы или кольца без оправки. При этом в месте смыкания стенок на «дне» впадины возникают растягивающие напряжения, которые при деформировании постоянно воздействуют на прилегающую область, вызывая распространение трещины вглубь поковки. Новообразованная трещина сама начинает выполнять роль вышеописанной трубы и вызывает свой дальнейший рост, что и приводит к образованию протяжённого свища.

Распределение температуры по поверхности поковки в конце процесса протяжки показано на рисунке 3.57. Как видно вся поверхность имеет температуру ниже 850°C. Распределение температуры по сечению поковки показано на рисунке 3.58.

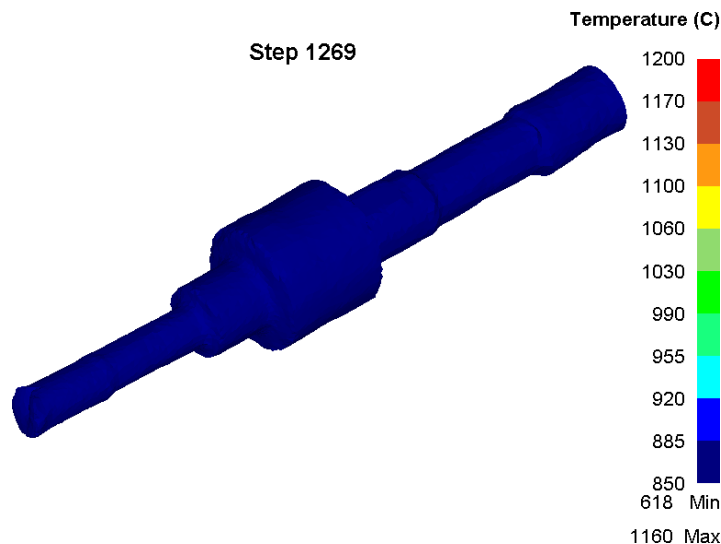


Рисунок 3.57 – Итоговое распределение температуры на поверхности итоговой поковки

Из рисунков видно, что температура поверхности в наиболее широком сечении составляет порядка 830°C, а в центральной области: 1100 – 1160°C. Температура шеек значительно ниже. Следует учитывать, что в данном моделировании протяжка велась начиная с переднего конца поковки полностью, в реальном процессе возможно начало протяжки со

стороны цапфы, с несколькими разворотами. При этом передняя часть поковки имеет меньший диаметр и у неё отсутствует своеобразный «аккумулятор» тепла – прибыльная часть, что в итоге может привести к охлаждению не только поверхности, но и внутренних слоёв до температуры, ниже ковочной. Выходом из данной ситуации является применение дополнительного подогрева.

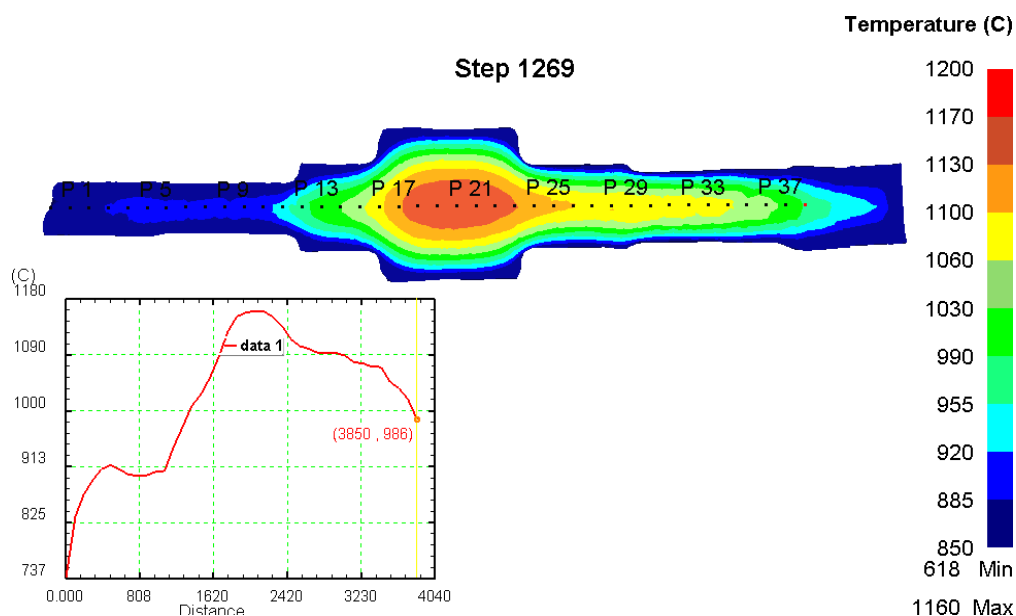


Рисунок 3.58 – Итоговое распределение температуры в продольном сечении итоговой поковки

Распределение деформаций по сечению итоговой поковки показано на рисунке 3.59

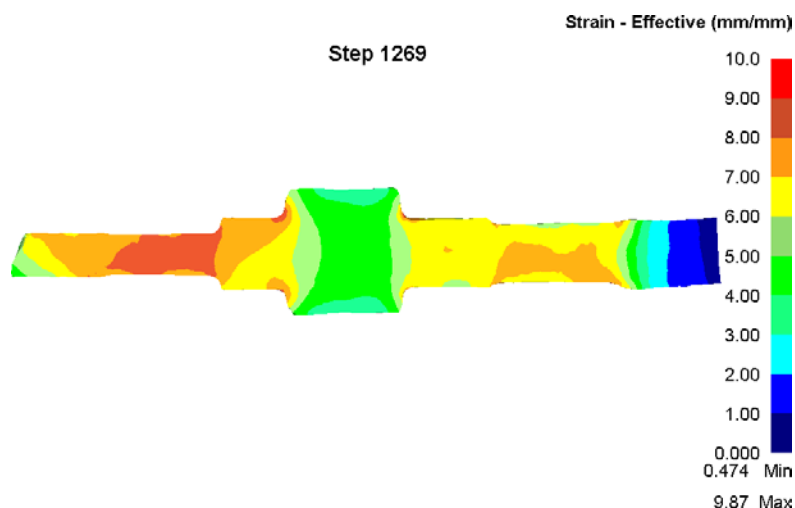


Рисунок 3.59 – Итоговое распределение накопленных деформаций в продольном сечении

. Из которого можно сделать вывод о равномерном распределении по поверхности бочки вала. Повышенные значения возникают в шейках и приводном конце. Также происходит

изменение значений по мере продвижения от одной части валка, к другой в соответствии с различным уковом. Области валка, испытывающие повышенное напряжение, в связи с условиями работы и размерами поперечного сечения: шейки и приводной конец имеют более значительную проработку, что повышает их механические свойства.

Местоположение сфер пробного объёма в итоговой поковке показано на рисунке 3.60, их формоизменение – на рисунке 3.61, а изменения размеров по основным осям – в таблице 3.5.

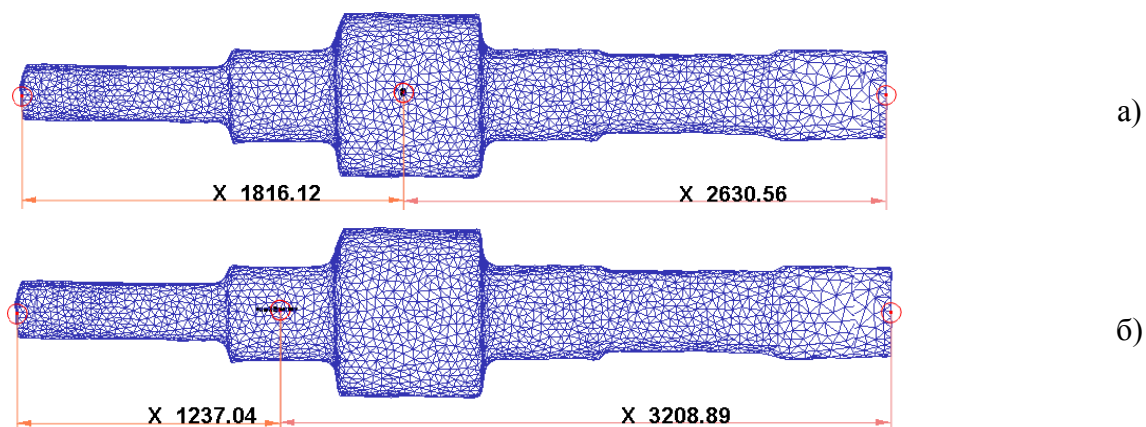


Рисунок 3.60 – Местоположение сфер пробного объёма после итоговой протяжке

Как видно из рисунка, первая сфера так и осталась расположена в центре бочки валка, а вторая, несмотря на исходное расположение на небольшом отдалении от переднего края биллета, оказалась в шейке.



Рисунок 3.61 – Форма сфер после итоговой протяжке

Таблица 3.5 – Изменение размеров сфер по основным осям после итоговой протяжке

Сфера	Абсолютные значения, мм			Относительные значения, %			Суммарные изменения, %		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
а)	13,5	26,6	26,4	-3,6	5,6	6,5	-32,5	33	32
б)	181,4	7,7	7,3	48,2	-11,5	-14,1	807	-61,5	-63,5

Также происходит небольшое (менее 4%) уменьшение длины центральной сферы по оси X. Это вызвано особенностями данной операции: при протяжке шеек валка течение металла

вдоль оси X происходит, в том числе и по направлению к бочке, вызывая сжатие сферы. При этом сама бочка валка не деформируется в радиальном направлении (т.к. её протяжка завершилась в предыдущую операцию) и сжатие сферы не компенсируется. В реальном процессе поковка удерживается подпружиненным манипулятором, который компенсирует часть перемещения металла в продольном направлении, но в моделировании для упрощения манипулятор не моделировался. Сжатие обоих пробных объёмов по осям Y и Z сравнительно равномерны. Продольные искажения образующих кривых увеличились, что особенно заметно для пробного объёма в передней части заготовки. Причина этого та же что и в предыдущей операции: неравномерное течение металла при использовании комбинированных бойков.

При сравнении формы и размеров полученных пробных объёмов с исходными, можно сделать вывод о различиях в течение металла в разных частях поковки. Так, сфера, размещённая в центре, получила наибольшее сжатие по оси X и растяжение по осям Y и Z при осадке. И при дальнейшей протяжке так и не произошло её растяжение по продольной оси и сжатие по двум остальным до исходных размеров. Таким образом, структура металла будет вытянута в радиальном направлении. Для сферы, расположенной в передней части заготовки картина совершенно иная. При осадке она получила небольшие искажения (аналогичные первой сфере: растяжение по оси X и сжатие по Y и Z). Однако при дальнейшей протяжке происходит её значительные растяжения (более чем на 800%) вдоль оси X и сжатия вдоль осей Y и Z (более 60%). Таким образом, структура металла в шейках валка будет вытянута вдоль продольной оси. Подобное распределение благоприятно влияет на механические свойства готового валка: бочка испытывает радиальные усилия от проката, а шейки – изгибающие.

В начальной стадии операции распределение интенсивности напряжений следующее: максимальные значения появляются в местах контакта заготовки с бойками, также образуется круговая зона из повышенных значений в приповерхностном слое. Ввиду малых размеров поперечного сечения пониженные значения напряжений занимают малую область в центральной зоне, смещённую вниз относительно верхнего бойка.

Распределение главных напряжений соответствует распределению, возникающему при протяжке в комбинированных бойках круглой заготовки: напряжения сжатия распространяются от мест контакта с бойками вглубь поковки. До центра они не проникают и в нём возникают растягивающие напряжения небольшой величины. Максимальных значений растягивающие напряжения достигают в боковых областях, не контактирующих с бойками.

При деформации области, соседней с утяжиной, вследствие малого поперечного сечения и частого контакта с бойками, происходит интенсивное охлаждение поверхностных слоёв, что понижает их пластичность. В итоге это приводит к росту значений напряжений. Малое поперечное сечение также приводит к образованию большой, по сравнению с размерами

области с пониженной пластичностью вследствие охлаждения металла: при глубине проникновения в 80 – 90 мм, она уже занимает практически половину диаметра поковки в данном месте. Что влияет на общую картину распределения напряжений: в итоге внешние слои испытывают напряжения практически в два раза большие, чем описывались ранее, в центральной части поковки тоже возникают высокие, относительно предыдущих замеров, напряжения.

Понижение температуры поверхностных слоёв повлияло и на распределение максимальных главных напряжений: также произошло повышение значений, как напряжений сжатия, так и растяжения. При этом небольшие области с растягивающими напряжениями появились непосредственно под верхним бойком. При этом они не проникают глубоко вовнутрь поковки, а значения растягивающих напряжений там значительно ниже, чем в приповерхностных боковых областях. В центральной зоне поковки образуется область с напряжениями сжатия, причина её появления всё та же пластическая рубашка, которая позволяет оказывать на центр поковки давление за пределами контакта с бойками.

В финале процесса протяжки передней части поковки понижение температуры всех слоёв металла продолжает стирать границы в пластической рубашке и повышать значения интенсивности напряжений. Также увеличились значения максимальных главных напряжений, но более важно, что вследствие небольших обжатий и пониженной пластичности, в центральной и прилегающих к ней областях поковки преобладают растягивающие напряжения. Что с большой долей вероятности может привести к появлению продольной трещины, началом которой служит глубокая впадина-свищ в переднем торце поковки. Особенно высока вероятность появления трещины, если протяжка данной области поковки ведётся в последнюю очередь, когда она уже довольно сильно охладилась и даже центральные слои имеют температуру ниже допустимой ковочной.

Предотвращать появление трещины путём увеличения обжатий нежелательно, т.к. поперечное сечение поковки и пластичность металла уже малы. И в итоге это может только увеличить распространение дефекта вглубь поковки. Выходом может стать контроль за температурным полем и при сильном снижении температуры ниже ковочной применение дополнительного подогрева для повышения пластичности металла.

Распределение интенсивности напряжений в финале процесса, после поворота поковки и протяжке хвостовой части показано на рисунке 3.62. Вследствие большего поперечного сечения и наличия с обеих сторон подогревающихся областей в виде бочки вала и цапфы, остывание участка с данной шейкой вала происходило медленнее. Поэтому здесь ещё наблюдается довольно заметная пластическая рубашка и распределение значений напряжений, связанное с ней.

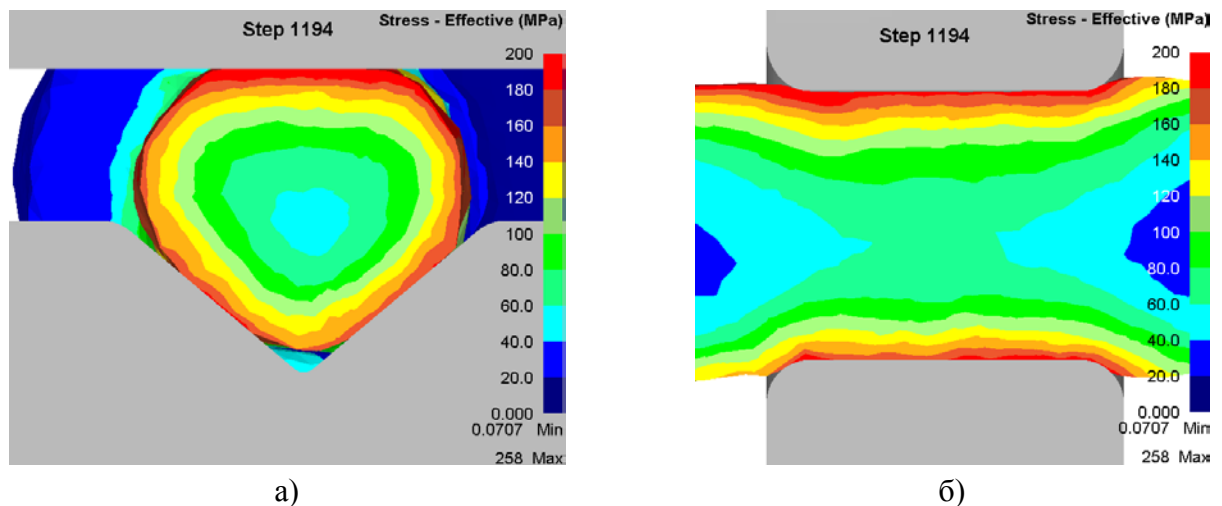


Рисунок 3.62 – Распределение интенсивности напряжений в поперечном сечении в конце процесса протяжки

Распределение максимальных главных напряжений показано на рисунке 3.63.

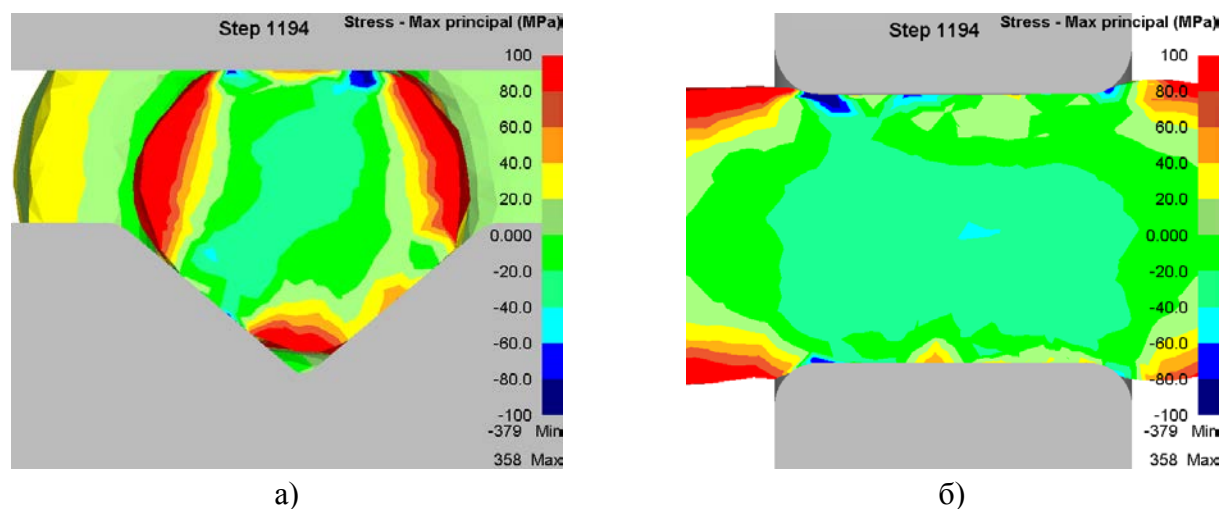


Рисунок 3.63 – Распределение максимальных главных напряжений в поперечном сечении в конце процесса протяжки

Существующая пластическая рубашка определяет и данное распределение напряжений: области с напряжениями сжатия, имеющими высокие значения, возникают в центральной зоне и местах контакта с бойками. Растягивающие напряжения возникают в боковых приповерхностных слоях и непосредственно под верхним бойком. Подобная картина напряжённого состояния в конечной стадии процесса может вызвать появление таких дефектов как свищи и продольные трещины в передней части поковки.

Исходной причиной появления подобных дефектов является появление вогнутой полости в передней части поковки, которая перерастает сначала в значительную утяжину, а затем – в свищ. В свою очередь, появление полости вызвано особенностями процесса: осадка

производится верхней плоской плитой, а протяжка начинается с передней части заготовки. Совместно эти факторы и приводят к появлению вогнутой полости.

Решением данной проблемы может стать применение верхней сферической осадочной плиты и изменение последовательности протяжки и подач заготовки. А именно начало протяжки с прибыльной, либо с центральной части заготовки и применение максимальных величин подач при протяжке переднего конца заготовки: от $\frac{2}{3}$ от ширины бойка.

Глава 4 Влияние технологических параметров на проработку осевой зоны заготовки при ковке на РОМ

Ковка на радиально – обжимных машинах имеет ряд преимуществ: высокая точность получаемых изделий, возможность достижения высоких суммарных обжатий без разрушений, более высокая производительность по сравнению с традиционными способамиковки на прессах и молотах и др. Наряду с этими достоинствами данный процесс обладает рядом особенностей. Так течение металла характеризуется ярко выраженным движением в продольном направлении и слабо – в радиальном, а за единичное обжатие происходит относительно малая деформация металла. Совместно эти особенности создают схему напряженного и деформированного состояния, при которой прекрасно прорабатываются поверхностные слои металла, но в центральной области может практически отсутствовать пластическая деформация [12, 75 – 77]. При этом возникает недостаточная проработка осевой части поковки, без разрушения литой структуры металла. Наглядное отображение этого может дать использование метода линий скольжения, рисунке 4.1 [15].



Рисунок 4.1 – Поля линий скольжения при ковке на РОМ

Как видно из рисунка, пластические деформации практически не проникают в осевую зону. Обойти подобную особенность можно различными способами, например, увеличив обжатие за проход. Однако подобный подход ограничивается как конструкцией РОМ, так и свойствами обрабатываемого металла: если малолегированные углеродистые стали и сплавы могут выдержать подобную обработку без образования дефектов, то у поковок из высоколегированных марок, ввиду их малой пластичности, велик шанс возникновения трещин, разрывов и т.д.

Другим решением данной проблемы является применение сочетания определённых деформационно–скоростных параметров процессаковки, таких как величина подачи между

единичными обжатиями совместно с формой рабочего инструмента, в частности угла заходного участка. При этом происходит увеличенное течение металла к центру поковки и в осевой зоне возникают напряжения, превышающие предел текучести, но не превышающие предел прочности данного металла, что обеспечивает пластическую деформацию и, как следствие, проработку литой структуры без образования дефектов.

Для проверки данного предположения было произведено конечно–элементное моделирование влияния различных технологических процессов на проработку осевой структуры цилиндрической поковки. Моделирование выполнялось в модуле Multiple Operations программного комплекса DEFORM.

4.1 Моделирование процесса

Моделирование начиналось с построения в САПР SolidWorks были моделей заготовки (в виде цилиндра длиной 500 мм и диаметром 250 мм) и плоского бойка, показанные на рисунках 4.2а и 4.2б соответственно. Модели бойка были построены на основе чертежей конструкции рабочего инструмента POM SX-55 австрийской фирмы GFM [15]. Далее создавался массив из четырёх моделей бойка, которые размещались вокруг заготовки под углами 90° относительно друг друга, как показано на рисунке 4.2в. После размещения полученная сборка переводилась в формат STL и импортировалась в DEFORM–3D.

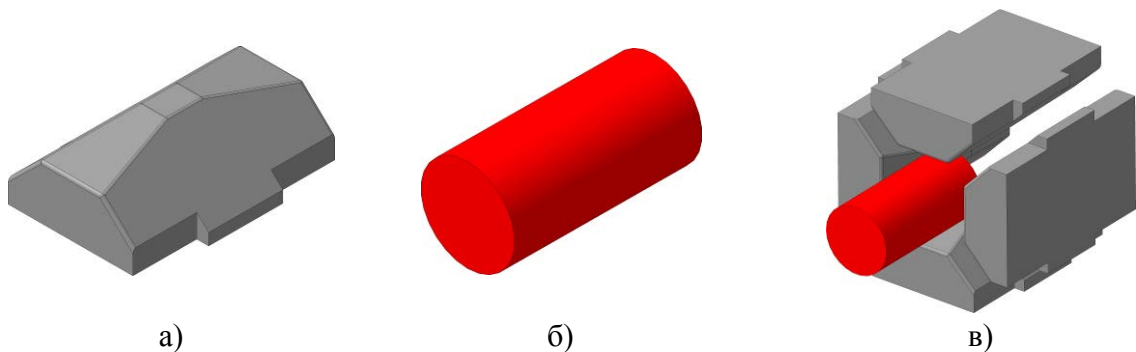


Рисунок 4.2 – Трёхмерные модели бойка (а), заготовки (б) и применяемая сборка моделей (в)

Для оценки влияния формы инструмента было построено три модели бойка, которые различались углом заходного участка: 7° , 12° и 17° . Профили бойков показаны на рисунке 4.3.

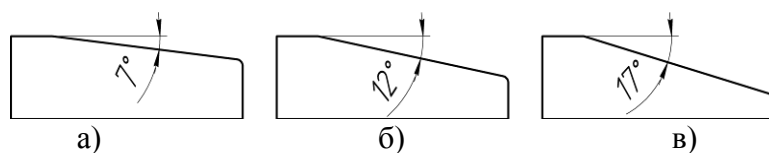


Рисунок 4.3 – Профили бойков

При анализе полученных данных в Постпроцессоре для более точной оценки напряжённо–деформированного состояния осевой зоны поковки в её модели были размещены девять контрольных точек, расположение которых показано на рисунке 4.4.

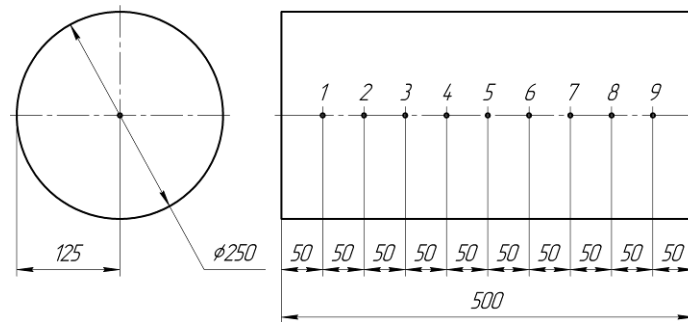


Рисунок 4.4 – Расположение контрольных точек

Как видно из приведённой схемы все точки располагались непосредственно в центре заготовки, на расстоянии 50 мм друг от друга по продольной осевой линии. Подобное размещение позволило получить точные данные о напряжённо–деформационном состоянии в центре заготовки по всей её длине. Направление движения заготовки с заданными точками показано на рисунке 4.5.

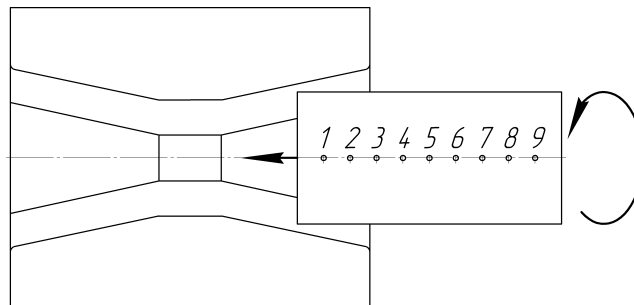


Рисунок 4.5 – Направление движения заготовки

Величина абсолютного обжатия составляла 30 мм для всех моделируемых вариантов, таким образом, диаметр итоговых поковок был равен 220мм, а относительная степень деформации – 22,6 %. Кантовка поковки производилась после каждого единичного обжатия и составляла 15° для всех моделируемых вариантов. Величина продольной подачи заготовки между единичными обжатиями была различной и составляла 7, 15 и 23 мм. Скорость движения бойков была выбрана постоянной для всех вариантов моделирования и составляла 170 мм/сек.

Само моделирование осуществлялось в модуле DEFORM–3D Multiple Operations. Здесь также использовалась возможность задавать последовательно серию операций, с последующим автоматическим расчётом, что заметно облегчило моделирование процесса. Заготовке

присваивались реологические данные жаропрочного сплава ХН56ВМТЮ (ЭП199), полученные из [41]. Нагрев в печи не моделировался: заготовке по всему объёму изначально присваивалась температура в 1150 °С. Первоначальной операцией был перенос заготовки от печи к РОМ, её продолжительность составляла 15 сек., после чего происходило обжатие заготовки на заданную величину. Сам процесс моделирования был стандартным для DEFORM: модель заготовки разбивалась на конечно–элементную сетку, состоящую из 32000 элементов. Модели бойков на КЭ сетку не разбивались. Для описания силы трения использовался закон Амонтона–Кулона, коэффициент составлял 0,3. Коэффициент теплообмена бойков с заготовкой принимался равным 5 Н/сек/мм/С ($5000 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). Температура бойков была постоянной и составляла 150 °С.

Целью моделирования также было построение математической модели влияния технологических параметров процессаковки на проработку структуры в осевой зоне готовой поковки. Для построения уравнений регрессии был проведён дробный факторный эксперимент, исходные условия которого представлены в таблице 4.1. В качестве факторов варьирования были выбраны угол заходного участка и величина продольной подачи. Функциями отклика были выбраны значения интенсивности напряжений и накопленных деформаций в контрольных точках.

Таблица 4.1 – Исходные условия эксперимента

Факторы варьирования	Угол заходного участка, °	Продольная подача, мм
Основной уровень	12	15
Интервал варьирования	± 5	± 8
Нижний уровень	7	7
Верхний уровень	17	23

Итоговое сочетание факторов представлено в таблице 4.2. Всего было произведено девять операций моделирования.

Таблица 4.2 – Сочетания факторов при моделировании

№ моделирования	Угол заходного участка, град.	Продольная подача, мм
1	7	7
2	7	15
3	7	23
4	12	7
5	12	15
6	12	23
7	17	7
8	17	15
9	17	23

После проведения всех моделирований производилась обработка полученных данных по напряжённно-деформационному состоянию поковок. В качестве примера приведены данные, полученные после моделирования №1. На рисунке 4.6 показано распределение накопленных деформаций в продольном сечении поковки. Итоговое распределение полностью соответствует теоретическим предположениям: максимальной деформации достигают приповерхностные слои. В то время как центральные слои подвергаются гораздо меньшей проработке.

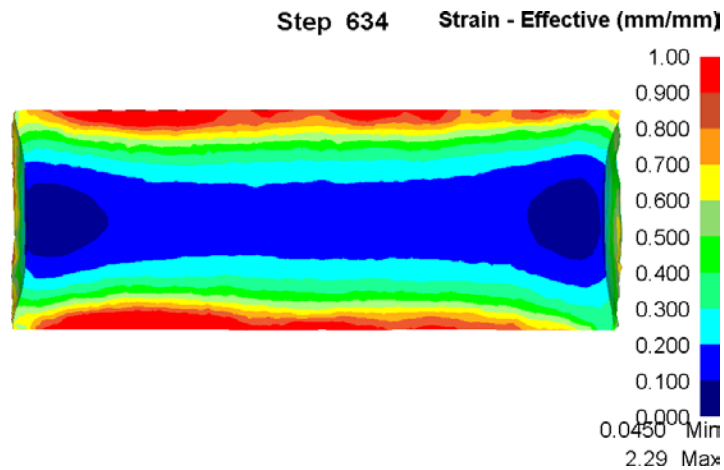


Рисунок 4.6 – Распределение накопленных деформаций в моделировании №1

Далее были получены данные с контрольных точек. Для удобства восприятия данные со всех 9 точек представлены на рисунке 4.7.

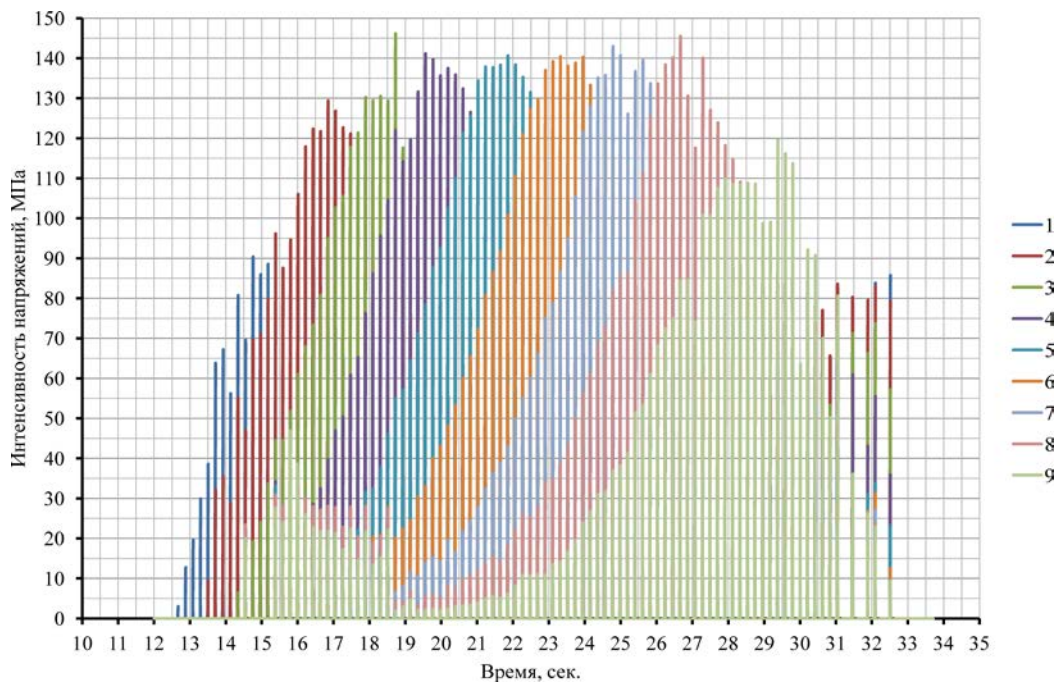


Рисунок 4.7 – Значения интенсивности напряжений в моделировании №1

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что среднее значение интенсивности напряжений равно 130 МПа. Аналогичным образом производился сбор данных для накопленных деформаций, показанных на рисунке 4.8.

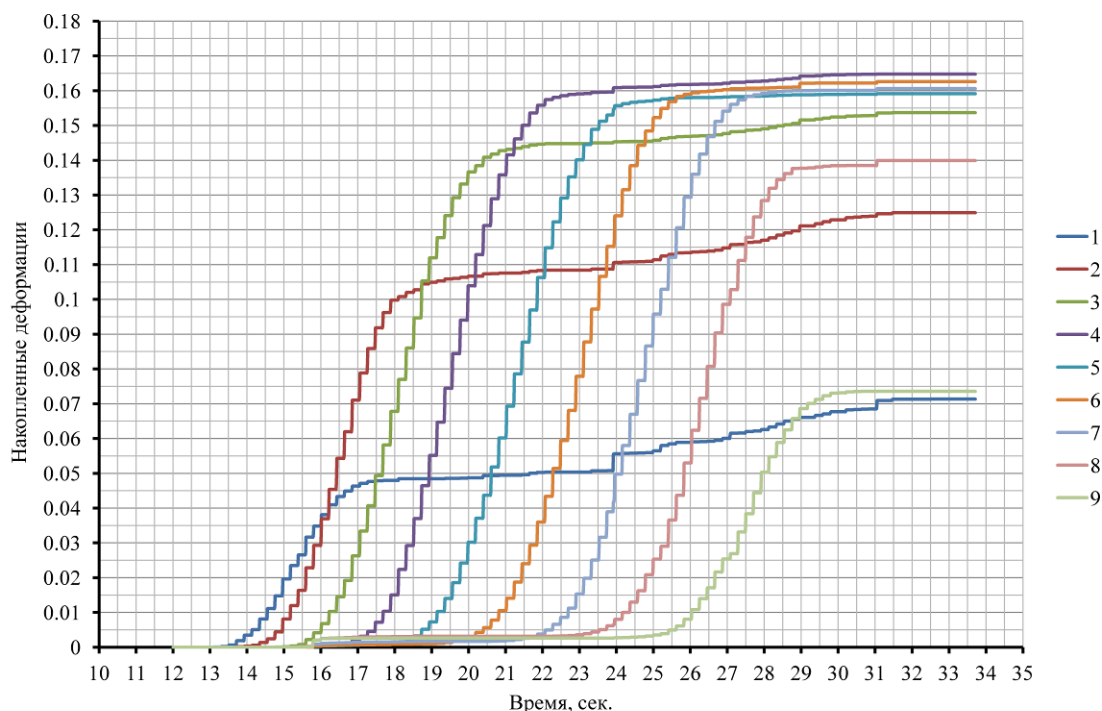


Рисунок 4.8 – Значения накопленных деформаций в моделировании №1

Итоговое значение было принято равным 0,14. Данные для всех остальных случаев моделирования представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Полученные при моделированиях значения функций отклика

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

Значения распределения интенсивности напряжений и накопленных деформаций от угла заходного участка бойка показано на рисунке 4.9, от величины продольной подачи – на рисунке 4.10.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что хотя увеличение величины угла заходного участка понижает величину интенсивности напряжений в осевой зоне поковки, оно также повышает значение накопленных деформаций, т.е. приводит к лучшей проработке осевой зоны. Увеличение продольной подачи приводит как к повышению значений напряжений, так и деформаций.

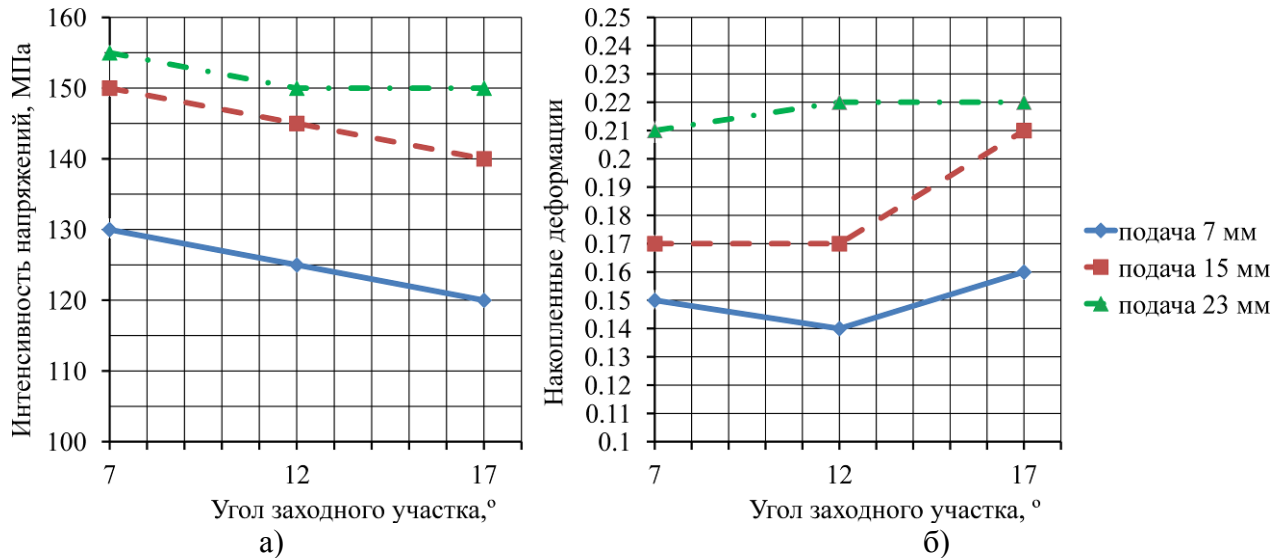


Рисунок 4.9 – Зависимость интенсивности напряжений (а) и накопленных деформаций (б) от величины угла заходного участка бойка

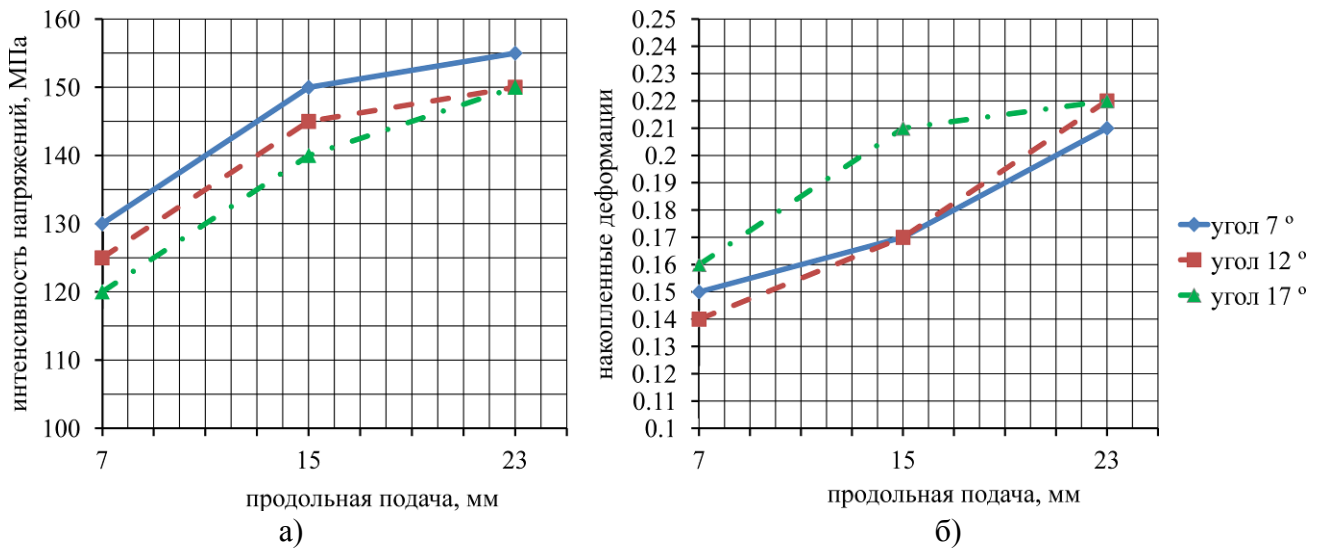


Рисунок 4.10 – Зависимость интенсивности напряжений (а) и накопленных деформаций (б) от величины продольной подачи

В качестве примера положительного влияния изменения параметров на рисунке 4.11 показано распределение накопленных деформаций после моделирования №9 (использовались максимальные значения величины угла заходного участка и продольной подачи). По сравнению

с первым моделированием видны более высокие значения деформаций в осевой области зоне (значения достигают 0,25).

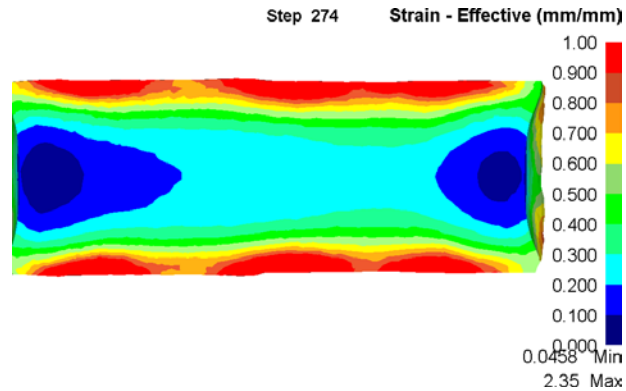


Рисунок 4.11 – Распределение накопленных деформаций в моделировании №9

4.3 Построение уравнений регрессии влияния технологических факторов процесса

По методикам, описанным в литературных источниках [78 – 81] на основе полученных данных были разработаны уравнения множественной линейной регрессии. Расчёт коэффициентов регрессии осуществлялся матричным способом.

Данные наблюдений и коэффициенты модели представлялись в матричной форме:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad (4.1)$$

где: Y – n -мерный вектор-столбец наблюдений зависимой переменной;

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

где: X – матрица размерности $n \times (m + 1)$, в которой i -я строка $i = 1, 2, \dots, n$ представляет i -е наблюдение вектора значений независимых переменных X_1, X_2, \dots, X_m , единица соответствует переменной при свободном члене b_0 ;

$$B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

где: B – вектор-столбец размерности $(m+1)$ параметров уравнения множественной регрессии;

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_n \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

где: e – вектор-столбец размерности n отклонений выборочных значений y_i зависимой переменной от значений y_i , получаемых по уравнению регрессии:

$$y_i = b_0 + b_1 \cdot x_{i1} + b_2 \cdot x_{i2} + \dots + b_m \cdot x_{im} + e_i, \quad (4.5)$$

В матричном виде соотношение принимает вид:

$$e = Y - X \cdot B, \quad 4.6$$

Согласно методу наименьших квадратов:

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = e^T \cdot e = (Y - X \cdot B)^T \cdot (Y - X \cdot B) \rightarrow \min \quad (4.7)$$

Условие выполняется, если вектор-столбец коэффициентов B найти по формуле:

$$B = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (4.8)$$

Итоговое уравнение регрессии для значений интенсивности напряжений имеет вид:

$$y = 125,5 - 0,83 \cdot x_1 + 1,67 \cdot x_2 \quad (4.9)$$

где: x_1 – угол заходного участка, град.;

x_2 – продольная подача между обжатыми, мм

Далее производился статистический анализ полученного уравнения регрессии: проверка значимости уравнения и его коэффициентов, исследование абсолютных и относительных ошибок аппроксимации. Данные для статистического анализа полученного уравнения регрессии приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Данные для статистического анализа полученного уравнения регрессии

Y	Y(x)	$\varepsilon = Y - Y(x)$	ε^2	$(Y - Y_{\text{ср}})^2$	$ \varepsilon : Y $
130	131,389	-1,389	1,929	111,42	0,0107
150	144,722	5,278	27,855	89,198	0,0352
155	158,056	-3,056	9,336	208,642	0,0197
125	127,222	-2,222	4,938	241,975	0,0178
145	140,556	4,444	19,753	19,753	0,0307
150	153,889	-3,889	15,123	89,198	0,0259
120	123,056	-3,056	9,336	422,531	0,0255
140	136,389	3,611	13,04	0,309	0,0258
150	149,722	0,278	0,0772	89,198	0,00185
Суммарное:		0	101,389	1272,222	0,193

Для несмещенной оценки дисперсии сделаем следующие вычисления:

Несмещённая ошибка:

$$\varepsilon = Y - Y(x) = Y - X \cdot s; \quad (4.10)$$

где: s – абсолютная ошибка аппроксимации.

Средняя ошибка аппроксимации:

$$A = \frac{\sum |\varepsilon : Y|}{n} \cdot 100\%; \quad (4.11)$$

$$A = \frac{0,193}{9} \cdot 100\% = 2,14\%$$

Оценка дисперсии равна:

$$\sum \varepsilon^2 = (Y - X \cdot Y(x))^T \cdot (Y - X \cdot Y(x)); \quad (4.12)$$

$$\sum \varepsilon^2 = 1,929 + 27,855 + 9,336 + 4,938 + 19,753 + 15,123 + 9,336 + 13,04 + 0,08 = 101,389$$

Несмещенная оценка дисперсии равна:

$$s^2 = \frac{1}{n - m - 1} \cdot \sum \varepsilon^2; \quad (4.13)$$

$$s^2 = \frac{1}{n - m - 1} \cdot \sum \varepsilon^2 = \frac{1}{9 - 2 - 1} \cdot 101,389 = 16,9$$

Оценка среднеквадратичного отклонения:

$$S = \sqrt{s^2}; \quad (4.13)$$

$$S = \sqrt{16,9} = 4,11$$

Оценка ковариационной матрицы вектора:

$$k = S^2 \cdot (X^T \cdot X)^{-1}; \quad (4.14)$$

$$k(x) = 4,11 \cdot \begin{vmatrix} 1,657 & -0,08 & -0,0391 \\ -0,08 & 0,00667 & 0 \\ -0,0391 & 0 & 0,0026 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 28 & -1,352 & -0,66 \\ -1,352 & 0,113 & 0 \\ -0,66 & 0 & 0,044 \end{vmatrix}$$

Дисперсии параметров модели определяются соотношением $S^2_i = K_{ij}$, т.е. это элементы, лежащие на главной диагонали:

$$S_{b0} = \sqrt{28} = 5,29$$

$$S_{b1} = \sqrt{0,113} = 0,336$$

$$S_{b2} = \sqrt{0,044} = 0,21$$

Проверка гипотез относительно коэффициентов уравнения регрессии (проверка значимости параметров множественного уравнения регрессии).

Число $\nu = n - m - 1$ называется числом степеней свободы. Считается, что при оценивании множественной линейной регрессии для обеспечения статистической надежности требуется, чтобы число наблюдений, по крайней мере, в 3 раза превосходило число оцениваемых параметров.

1) t-статистика

$$T_{табл}(n - m; \frac{\alpha}{2}) = (6; 0,025) = 2,447$$

$$t_i = \frac{b_i}{S_{b_i}}; \quad (4.15)$$

Находим стандартную ошибку коэффициента регрессии b_0 :

$$S_{b0} = \sqrt{28} = 5,29$$

$$t_0 = \frac{125,56}{5,29} = 23,73 > 2,447$$

Статистическая значимость коэффициента регрессии b_0 подтверждается.

Находим стандартную ошибку коэффициента регрессии b_1 :

$$S_{b1} = \sqrt{0,11} = 0,34$$

$$t_1 = \frac{-0,83}{0,34} = 2,48 > 2,447$$

Статистическая значимость коэффициента регрессии b_1 подтверждается.

Находим стандартную ошибку коэффициента регрессии b_2 :

$$S_{b_2} = \sqrt{0,044} = 0,21$$

$$t_2 = \frac{1,67}{0,21} = 7,95 > 2,447$$

Статистическая значимость коэффициента регрессии b_2 подтверждается.

Доверительные интервалы коэффициентов регрессии, которые с надежностью 95% будут следующими:

$$(b_i - t_i \cdot S_{b_i}; b_i + t_i \cdot S_{b_i}); \quad (4.16)$$

$$b_0 : (125,56 - 2,447 \cdot 5,29; 125,56 + 2,447 \cdot 5,29) = (112,61; 138,5)$$

$$b_1 : (-0,83 - 2,447 \cdot 0,34; -0,83 + 2,447 \cdot 0,34) = (-1,65; -0,012)$$

$$b_2 : (1,67 - 2,447 \cdot 0,21; 1,67 + 2,447 \cdot 0,21) = (1,15; -2,18)$$

Оценка значимости уравнения множественной регрессии осуществляется путем проверки гипотезы о равенстве нулю коэффициент детерминации рассчитанного по данным генеральной совокупности: R^2 или $b_1 = b_2 = \dots = b_m = 0$ (гипотеза о незначимости уравнения регрессии, рассчитанного по данным генеральной совокупности).

Для ее проверки используют F-критерий Фишера.

При этом вычисляют фактическое (наблюдаемое) значение F-критерия, через коэффициент детерминации R^2 , рассчитанный по данным конкретного наблюдения.

По таблицам распределения Фишера-Снедекора [78] находят критическое значение F-критерия ($F_{кр}$). Для этого задаются уровнем значимости α (обычно его берут равным 0,05) и двумя числами степеней свободы $k_1 = m$ и $k_2 = n - m - 1$.

F-статистика. Критерий Фишера.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum \varepsilon^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})}; \quad (4.17)$$

$$R^2 = 1 - \frac{101,39}{1272,22} = 0,92$$

Чем ближе этот коэффициент к единице, тем больше уравнение регрессии объясняет поведение Y .

Более объективной оценкой является скорректированный коэффициент детерминации:

$$\bar{R}^2 = 1 - \left(1 - R^2\right) \cdot \frac{n-1}{n-m-1}; \quad (4.17)$$

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - 0,92) \cdot \frac{9-1}{9-2-1} = 0,894$$

Добавление в модель новых объясняющих переменных осуществляется до тех пор, пока растёт скорректированный коэффициент детерминации.

Проверка гипотезы об общей значимости – об одновременном равенстве нулю всех коэффициентов регрессии при объясняющих переменных:

$$H_0 : R^2 = 0; \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = 0; \quad (4.18)$$

$$H_1 : R^2 \neq 0; \quad (4.19)$$

Проверка этой гипотезы осуществляется с помощью F-статистики распределения Фишера (правосторонняя проверка).

Если $F < F_{кр} = F_{\alpha; n-m-1}$, то нет оснований для отклонения гипотезы H_0 .

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{(n-m-1)}{m}; \quad (4.20)$$

$$F = \frac{0,92}{1-0,92} \cdot \frac{(9-2-1)}{2} = 34,69$$

Табличное значение при степенях свободы $k_1 = 2$ и $k_2 = n - m - 1 = 9 - 2 - 1 = 6$, $F_{кр}(2;6) = 5,14$.

Поскольку фактическое значение $F > F_{кр}$, то коэффициент детерминации статистически значим и уравнение регрессии статистически надежно.

Построение уравнения регрессии для значений накопленных деформаций

Построение уравнения регрессии для накопленных деформаций также выполнялось по вышеописанной методике.

Итоговое уравнение регрессии имеет вид:

$$y = 0,097 + 0,002 \cdot x_1 + 0,004 \cdot x_2 \quad (4.11)$$

где: x_1 – угол заходного участка, град.;

x_2 – продольная подача между обжатыми, мм

Статистический анализ полученного уравнения регрессии: проверка значимости уравнения и его коэффициентов, исследование абсолютных и относительных ошибок аппроксимации. Данные для статистического анализа полученного уравнения регрессии приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Данные для статистического анализа полученного уравнения регрессии

Y	Y(x)	$\varepsilon = Y - Y(x)$	ε^2	$(Y - Y_{\text{ср}})^2$	$ \varepsilon : Y $
0,15	0,14	0,01	0,0001	0,00111	0.0667
0,17	0,173	-0,00333	0,00001	0,000178	0.0196
0,21	0,207	0,00333	0,00001	0,000711	0.0159
0,14	0,15	-0,01	0,0001	0,00188	0.0714
0,17	0,183	-0,0133	0,000178	0,000178	0.0784
0,22	0,217	0,00333	0,00001	0,00134	0.0152
0,16	0,16	0	0	0,000544	0
0,21	0,193	0,0167	0,000278	0,000711	0.0794
0,22	0,227	-0,00667	0,00004	0,00134	0.0303
Суммарное:		0	0,000733	0,008	0,377

Средняя ошибка аппроксимации:

$$A = \frac{0,377}{9} \cdot 100\% = 4,19\%$$

Оценка дисперсии равна:

$$\sum \varepsilon^2 = 0,0011 + 0,000178 + 0,000711 + 0,00188 + 0,000178 + 0,00134 + 0,000544 + \\ + 0,000711 + 0,00134 = 0,000733$$

Несмещенная оценка дисперсии равна:

$$s^2 = \frac{1}{9 - 2 - 1} \cdot 0,000733 = 0,000122$$

Оценка среднеквадратичного отклонения:

$$S = \sqrt{0,000122} = 0,0111$$

Оценка ковариационной матрицы вектора:

$$k(x) = 0,0111 \cdot \begin{vmatrix} 1,657 & -0,08 & -0,0391 \\ -0,08 & 0,00667 & 0 \\ -0,0391 & 0 & 0,0026 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,000203 & -0,00001 & -0,000005 \\ -0,00001 & 0,000001 & 0 \\ -0,000006 & 0 & 0,0000003 \end{vmatrix}$$

Дисперсии параметров модели:

$$S_{b0} = \sqrt{0,000203} = 0,0142$$

$$S_{b1} = \sqrt{0,000001} = 0,000903$$

$$S_{b2} = \sqrt{0,0000003} = 0,000564$$

Проверка гипотез относительно коэффициентов уравнения регрессии.

1) t-статистика

$$T_{\text{табл}}(n - m; \frac{\alpha}{2}) = (6; 0,025) = 2,447$$

Находим стандартную ошибку коэффициента регрессии b_0 :

$$S_{b_0} = \sqrt{0,000203} = 0,0142$$

$$t_0 = \frac{0,0968}{0,0142} = 6,8 > 2,447$$

Статистическая значимость коэффициента регрессии b_0 подтверждается.

Находим стандартную ошибку коэффициента регрессии b_1 :

$$S_{b_1} = \sqrt{0,000001} = 0,000903$$

$$t_1 = \frac{0,002}{0,000903} = 2,22 < 2,447$$

Статистическая значимость коэффициента регрессии b_1 не подтверждается.

Находим стандартную ошибку коэффициента регрессии b_2 :

$$S_{b_2} = \sqrt{0,0000003} = 0,000564$$

$$t_2 = \frac{0,00417}{0,000564} = 7,39 > 2,447$$

Статистическая значимость коэффициента регрессии b_2 подтверждается.

Доверительные интервалы коэффициентов регрессии, которые с надежностью 95% будут следующими:

$$b_0 : (0,0968 - 2,447 \cdot 0,0142; 0,0968 + 2,447 \cdot 0,0142) = (0,062; 0,13)$$

$$b_1 : (0,002 - 2,447 \cdot 0,000903; 0,002 + 2,447 \cdot 0,000903) = (-0,000209; 0,00421)$$

$$b_2 : (0,00417 - 2,447 \cdot 0,000564; 0,00417 + 2,447 \cdot 0,000564) = (0,00279; 0,00555)$$

F-статистика. Критерий Фишера.

$$R^2 = 1 - \frac{0,000733}{0,008} = 0,908$$

Скорректированный коэффициент детерминации:

$$\bar{R}^2 = 1 - (1 - 0,908) \cdot \frac{9-1}{9-2-1} = 0,878$$

$$F = \frac{0,908}{1-0,908} \cdot \frac{(9-2-1)}{2} = 29,75$$

Табличное значение при степенях свободы $k_1 = 2$ и $k_2 = n - m - 1 = 9 - 2 - 1 = 6$, $F_{кр}(2;6) = 5,14$.

Поскольку фактическое значение $F > F_{кр}$, то коэффициент детерминации статистически значим и уравнение регрессии статистически надежно.

Глава 5 Результаты анализа и совершенствования технологических процессов

Разработанные методики моделирования технологических процессов свободнойковки были применены для анализа и совершенствования различных процессов, применяемых на АО «Металлургический завод «Электросталь» и ОАО «ЭЗТМ», а именно:

- анализ технологического процессаковки слитка из стали 12Х18Н10Т
- анализковки полыйпоковки на РОМ.
- совершенствованиековки валка сортопрокатного стана;

5.1 Анализ технологического процессаковки круглой штанги

Для оценки напряженно–деформированного состояния получаемыхпоковок при применяемом на АО «Металлургический завод «Электросталь» технологическом процессе было произведено моделирование операции протяжки слитка электрошлакового переплава (ЭШП) на быстроходном прессе усилием 16 МН, установленном в кузнечно-прессовом цехе №2. Согласно рассматриваемому технологическому процессу, исходный слиток ЭШП, массой 1600 кг из стали 12Х18Н10Т [82], изображённый на рисунке 5.1, сначала протягивается в плоских бойках до поковки квадратного сечения, затем происходит сбивка углов для получения восьмигранного профиля. Далее ковка ведётся в вырезных бойках для получения готового круглого профиля диаметром 170 мм. Основные стадии формоизменения заготовки показаны на рисунке 5.2, а полностью режимы обжатий представлены в таблице 5.1.

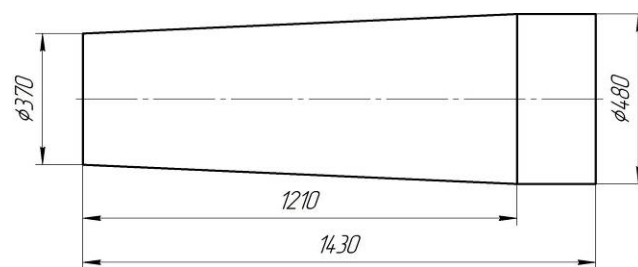


Рисунок 5.1 – Эскиз применяемого слитка ЭШП

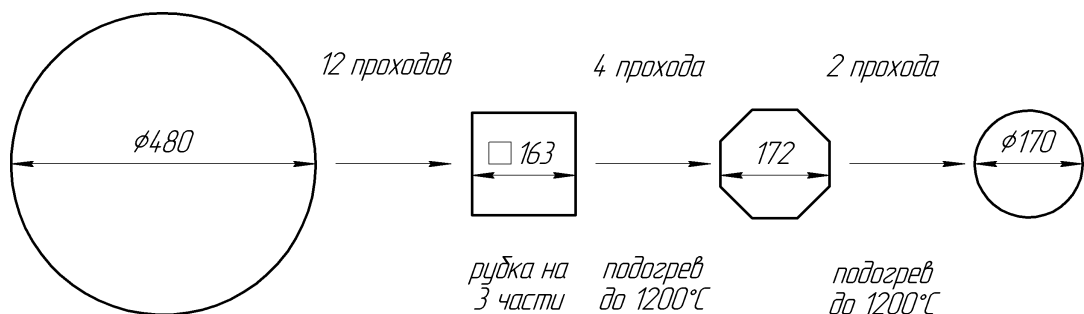


Рисунок 5.2 – Основные стадии формоизменения заготовки

Таблица 5.1 – Режимы обжатий слитка

№ прохода	Отн. обжатие	Абсол. Обжатие, мм	h1, мм	b1, мм	h2, мм	b2, мм	Подача, мм	Угол кантовки
0	0	0	480	480	370	370	0	0
1	30%	111	369	497	369	370	212	90
2	29%	112	386	386	370	369	212	90
3	3%	89	297	409	297	385	189	90
4	26%	86	323	323	323	309	189	90
5	30%	75	249	352	249	341	162	90
6	29%	79	273	273	273	270	162	90
7	30%	63	210	298	210	298	137	90
8	29%	67	231	231	231	231	137	90
9	30%	53	178	252	178	252	122	90
10	30%	58	194	194	194	194	94	90
11	30%	45	149	212	149	212	103	90
12	30%	49	163	163	163	163	79	90
Резка на мерные длины, подогрев								
13	20%	38	192	233	192	233	173	45
14	20%	38	194	194	194	194	173	90
15	16%	26	168	199	168	199	146	90
16	15%	26	172	172	172	172	146	90
Подогрев								
17	10%	17	170	170	170	170	31	22
18	8%	14	170	170	170	170	31	22

Моделирование процесса осуществлялось по методике, описанной в Главе 3, в модуле DEFORM–3D Multiple Operations Исходная модель слитка разбивалась на конечно–элементную сетку, состоящую из 40000 элементов. В процессе моделирования количество элементов было увеличено до 65000. Для задания реологических свойств был использован американский аналог отечественной коррозионностойкой стали 12X18H10T – сталь AISI–321. Для описания силы трения использовался закон Амонтона-Кулона, коэффициент составлял 0,5. Коэффициент теплообмена принимался равным 5 Н/сек/мм/С (5000 Вт/м² · °С).

Последовательность обжатий, подач и кантовок заготовки, применяемая в моделировании соответствовала реальному маршруту протяжки слитка. После моделирования серии проходов и увеличения длины поковки в 5 раз, она, в соответствии с реальным технологическим процессом, была разделена на несколько частей. Протяжка целиковой заготовки по существующему технологическому процессу может привести к продольным изгибам итоговой поковки, вследствие её малого поперечного сечения и значительной длины (порядка 8 м). После разделения и подогрева заготовки моделирование продолжалось до получения готового профиля. Модели бойков, слитка и заготовки во время основных операций моделирования показаны на рисунке 5.3.

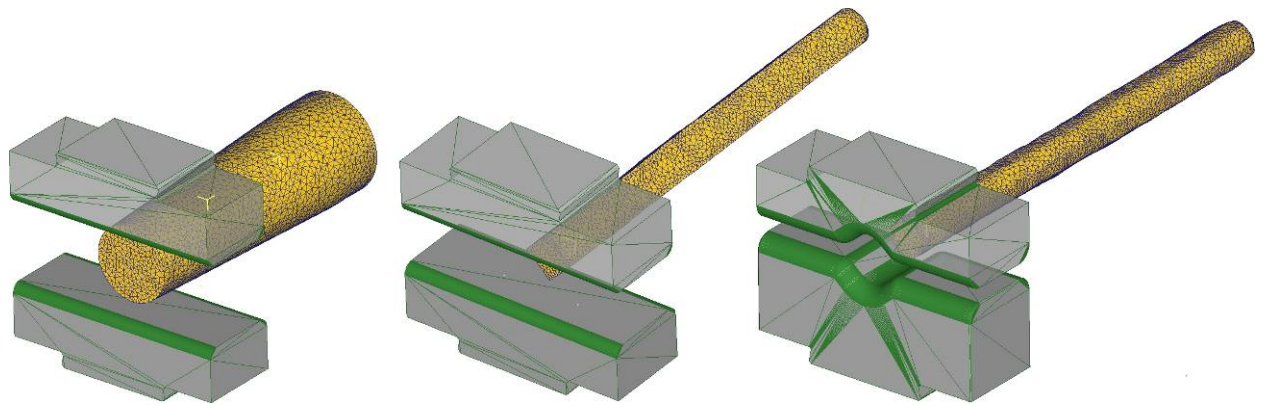


Рисунок 5.3 – Этапы моделирования основных стадий процесса

Далее производился анализ полученных данных. Были рассмотрены напряжённо-деформированное состояние, тепловое поле заготовки, оценена проработка структуры и повреждаемость. На заготовку наносились сечения: продольное и поперечное, это позволило детально оценить НДС в очаге деформации.

На основании анализа можно сделать вывод, что большая часть формоизменения металла производится во время ковки в плоских бойках, а вырезные служат по большей части только для придания восьмигранной заготовке необходимого круглого сечения. Это заметно по распределению накопленных деформаций в поковке: после основной протяжки слитка, показанной на рисунке 5.4а, максимальное значение накопленных деформаций составляет 7. После сбивки углов, рисунок 5.4б – 10,7, а после ковки в вырезных бойках, рисунок 6в – 10,8. Сравнение рисунков 5.4б и 6в показывает, что применение вырезных бойков мало меняет общую картину распределения накопленных деформаций.

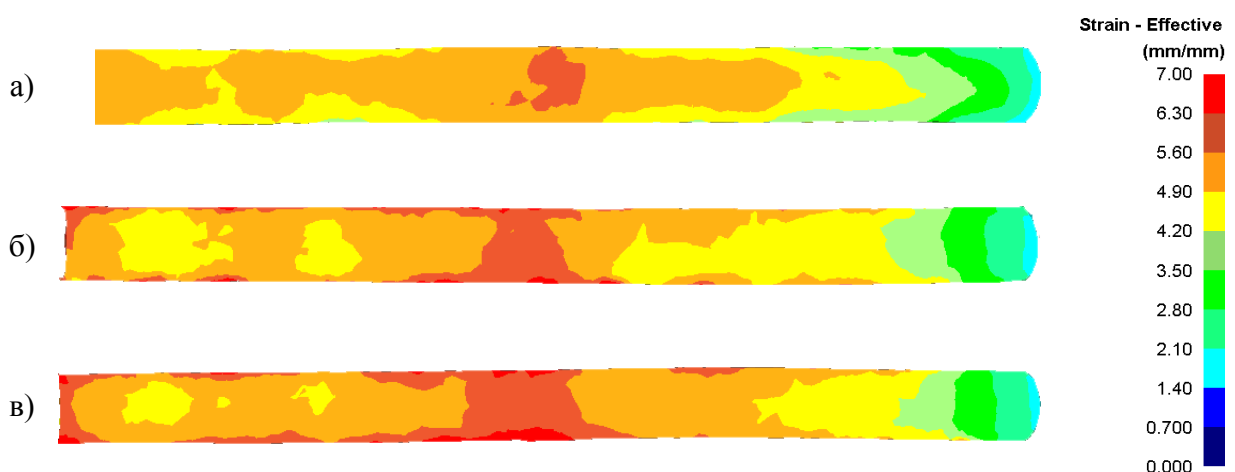


Рисунок 5.4 – Распределение накопленных деформаций

Ковка в плоских бойках может привести к появлению растягивающих напряжений как по бокам заготовки, так и в осевой зоне. Данная картина показана на рисунке 5.5: в начальной

стадии процесса слиток имеет исходное круглое поперечное сечение и бойки соприкасаются с относительно небольшой частью заготовки. При подобной деформационной схеме сжимающие напряжения возникают только в зоне непосредственно под бойками и практически не проникают до центра поковки. Также относительно высокие растягивающие напряжения наблюдаются в боковых областях заготовки, это вызвано тем, что здесь течение металла свободное и не ограничено рабочим инструментом.

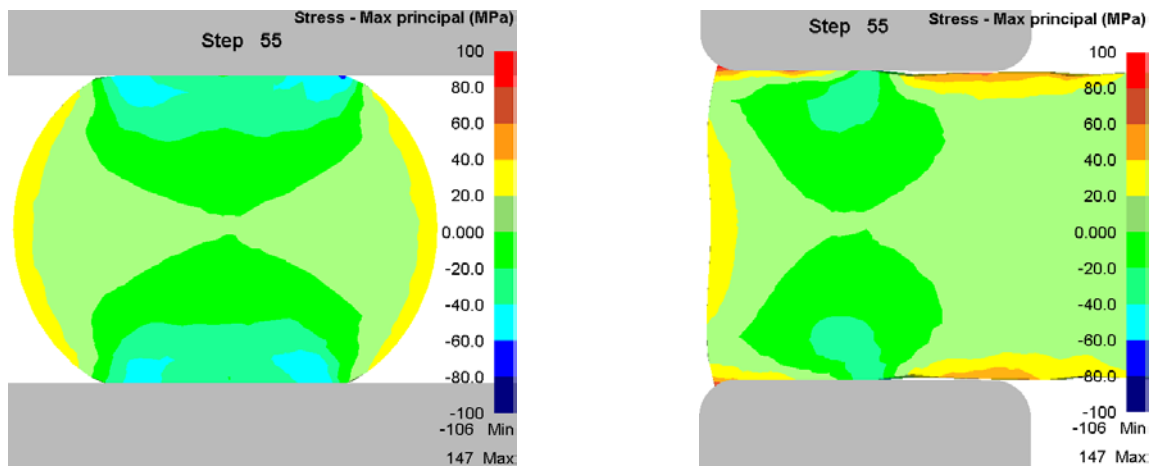


Рисунок 5.5 – Максимальные главные напряжения в начальной стадии процесса

Наибольших значений интенсивность напряжений достигает непосредственно под бойками и в центральной части заготовки, а минимальных – в боковых областях, как показано на рисунке 5.6

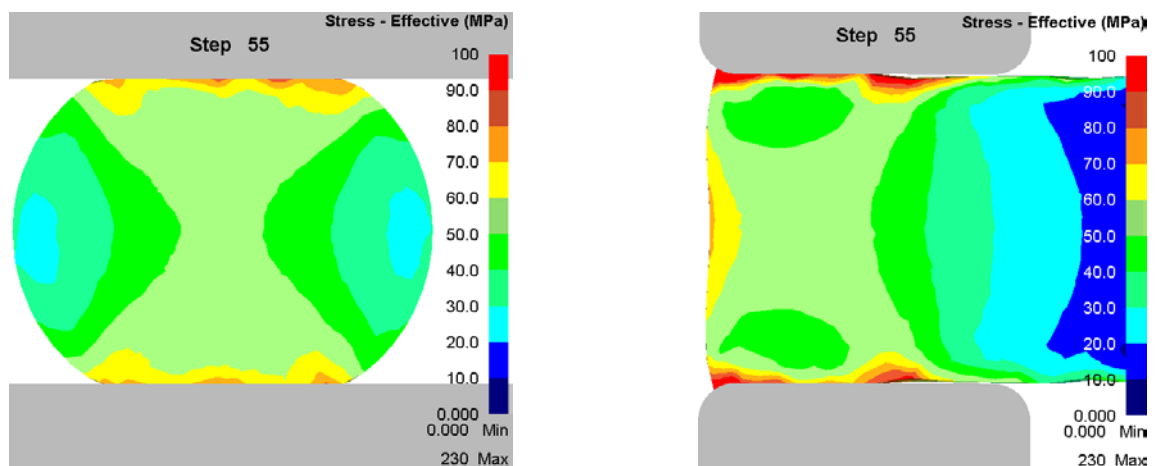


Рисунок 5.6 – Интенсивность напряжений в начальной стадии процесса

Когда заготовка приобретает прямоугольное поперечное сечение, происходит изменение напряжённого состояния. Как видно из рисунка 5.7 сжимающие напряжения распространяются до осевой зоны поковки, однако, в боковых областях всё также сохраняются высокие растягивающие напряжения. Кроме того, небольшие области растягивающих напряжений

появляются непосредственно под бойками. Если обратиться к распределению интенсивности напряжений, изображённому на рисунке 5.8, то отчетливо видно, что максимальные значения располагаются в приповерхностных слоях металла.

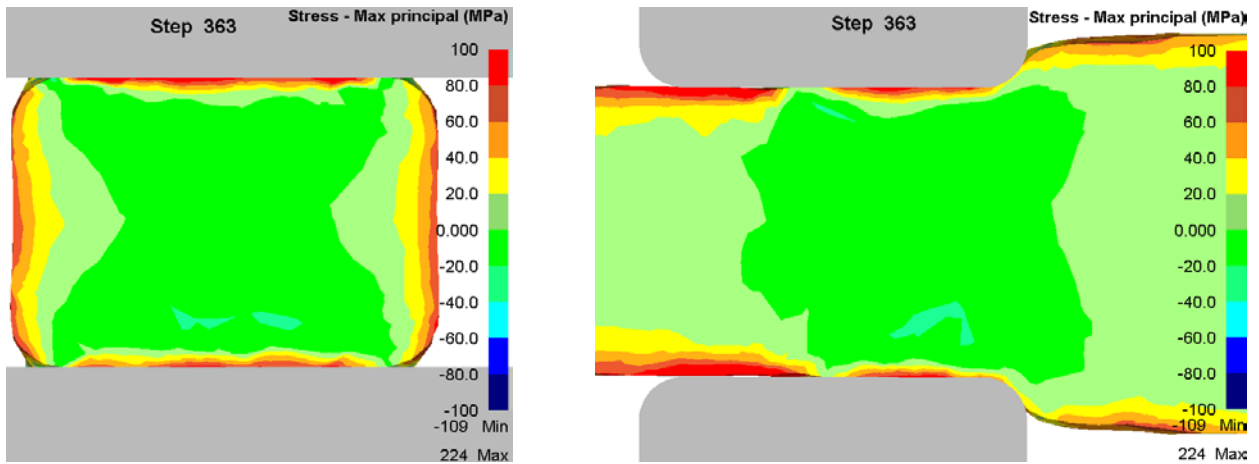


Рисунок 5.7 – Максимальные главные напряжения в середине процесса

Подобная картина во многом вызвана интенсивным охлаждением наружных слоёв заготовки вследствие теплообмена с окружающей средой и бойками, что в свою очередь вызывает пониженную пластичность данных слоёв (относительно центральной области), в которой наблюдается довольно равномерное распределение накопленных деформаций. Иными словами, наружные слои металла играют роль своеобразной «рубашки», оказывающей заметное влияние на НДС заготовки. Высокое значение интенсивности напряжений совместно с высоким значением растягивающих напряжений может приводить к появлению трещин.

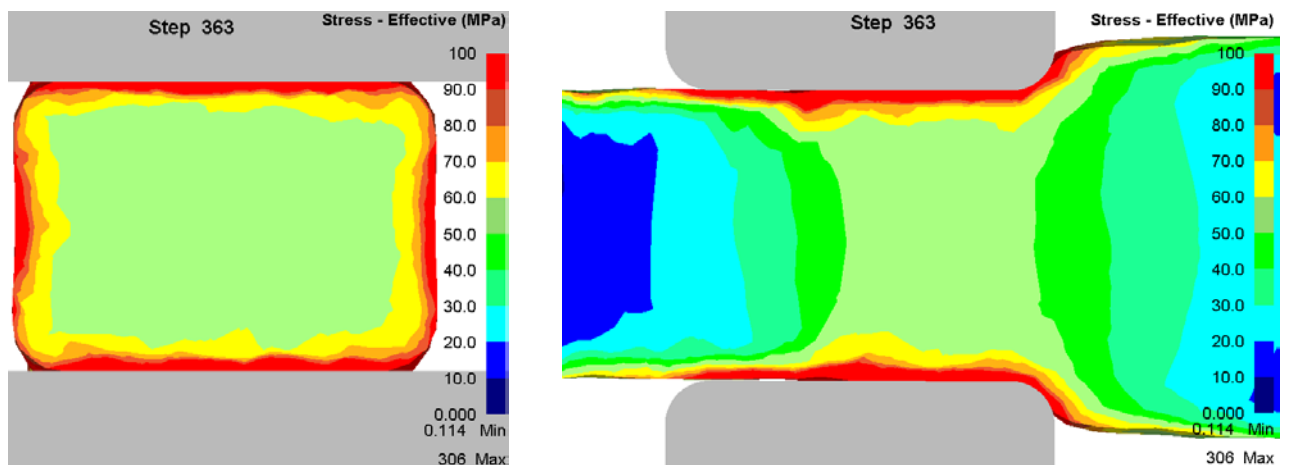


Рисунок 5.8 – Интенсивность напряжений в середине процесса

При операции по сбивке углов, показанной на рисунке 5.9, НДС становится аналогично начальной стадии процесса: контакт между поковкой и бойками происходит только в двух точках – ребрах квадрата поперечного сечения. Совместно с небольшими единичными

обжатиями это вызывает появление растягивающих напряжений в осевой и боковых зонах заготовки. Сжимающие напряжения снова появляются только в областях, расположенных непосредственно под бойками.

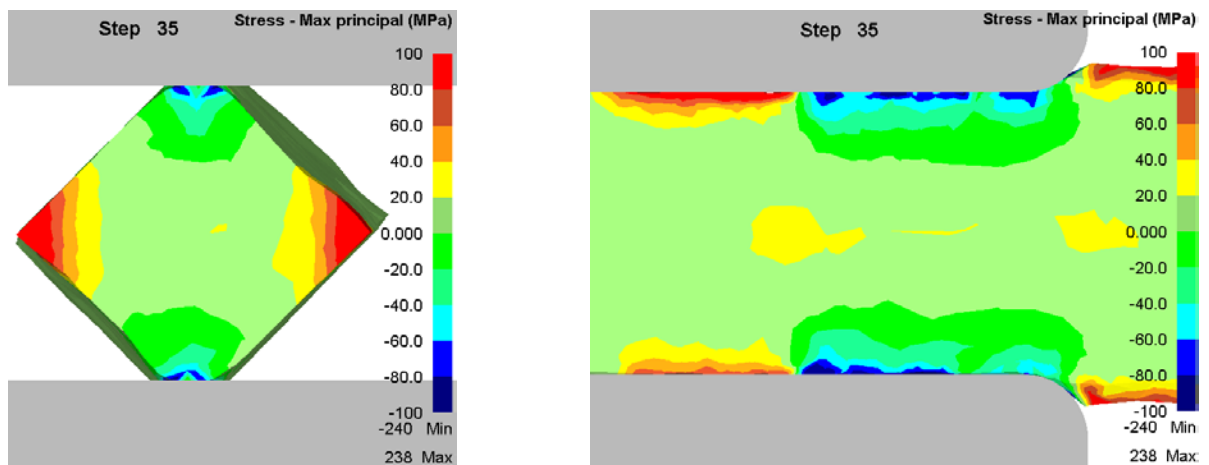


Рисунок 5.9 – Максимальные главные напряжения в конце процесса

Распределение интенсивности напряжений, показанное на рисунке 5.10, несколько изменяется: максимальные значения концентрируются в углах поперечного сечения заготовки. В случае с верхним и нижним углами это связано с действием бойков, а у боковых – вызвано поперечным течением металла и более быстрым его остыванием (как следствие понижающейся пластичностью). Значения интенсивности напряжений в осевой зоне по-прежнему довольно равномерны и значительно ниже, чем в углах.

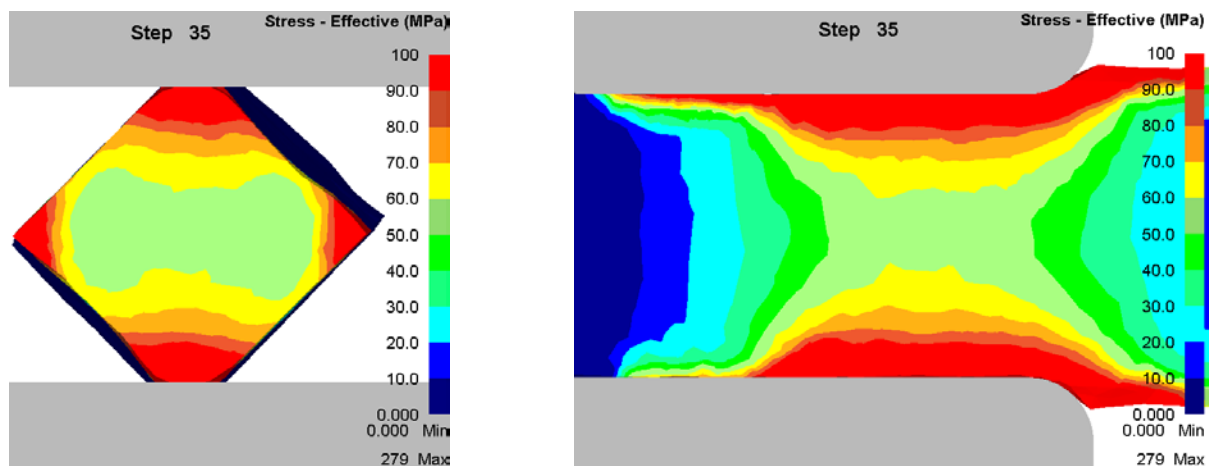


Рисунок 5.10 – Интенсивность напряжений в конце процесса

Дальнейшая ковка в вырезных бойках, как видно из рисунка 5.11, также периодически вызывает появление растягивающих напряжений в осевой и боковых зонах заготовки.

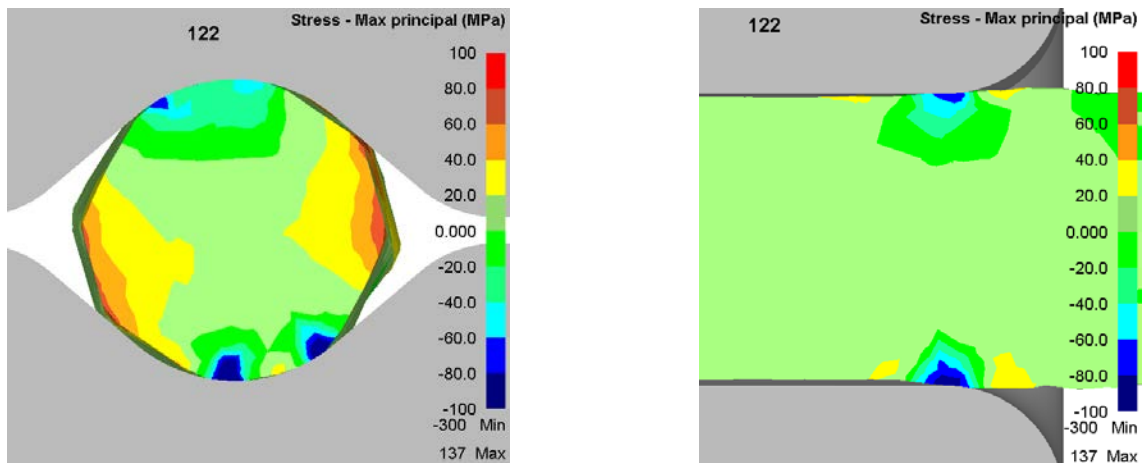


Рисунок 5.11 – Максимальные главные напряжения при ковке в вырезных бойках

Распределение интенсивности напряжений, отображённое на рисунке 5.12 показывает наличие вышеописанной «рубашки»: наибольшие значения концентрируются в местах контакта заготовки с бойками, однако, также наблюдаются локальные максимумы в боковых областях. Осовая зона содержит меньшие и равномерные значения (хотя они и выше чем в предыдущих проходах).

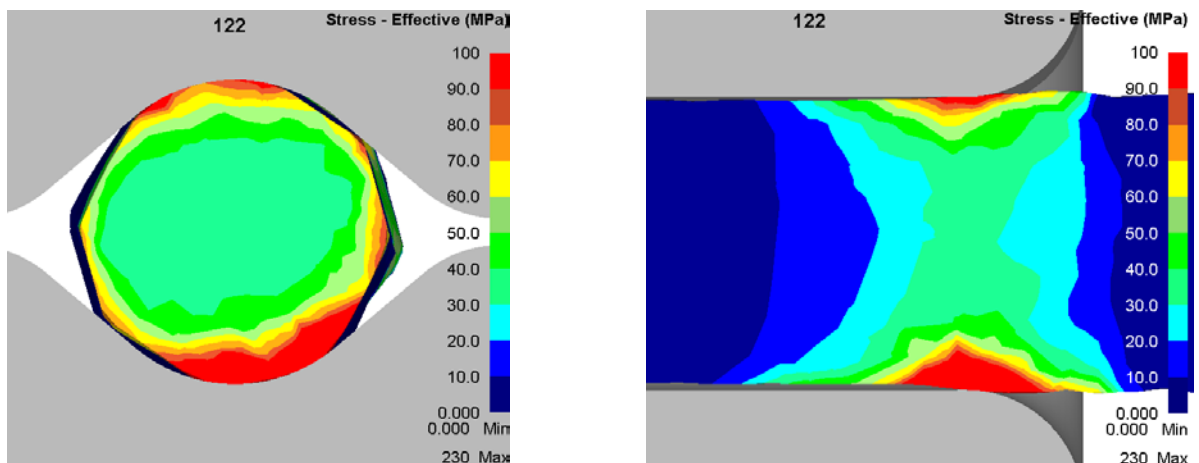


Рисунок 5.12 – Интенсивность напряжений при ковке в вырезных бойках

Подобная картина вызвана особенностями протяжки восьмигранной поковки и вырезных бойков: на рисунке 5.13а показана схема контакта заготовки в первоначальный момент и после кантовки (кантовка производится после каждого единичного обжатия). Контакт происходит по выступающим углам поковки, при этом непосредственно под бойками возникают напряжения сжатия (хорошо видны на поперечном разрезе на рисунке 5.12). Но из-за небольших единичных обжатий (на рисунке 5.13б показано итоговое положение бойков), данные напряжения не проникают в осевую зону поковки. Таким образом, на всём протяжении протяжки образуется несколько небольших контактных поверхностей, которые и вызывают неблагоприятную картину НДС.

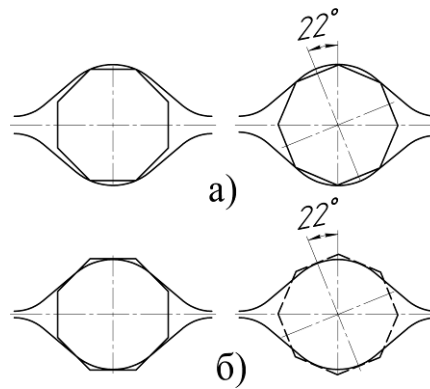


Рисунок 5.13 – Схема обжатий в вырезных бойках

Также было рассмотрено изменение теплового поля заготовки во время ковки. На рисунке 5.14а показано тепловое поле заготовки на поверхности поковки после протяжки до квадрата 163 мм. Как видно, на большей части поверхности поковки наблюдается температура ниже 850 °С. Это может привести к появлению на поверхности поковки трещин, вызванных снижением пластичности металла. Рисунок 5.14б отображает тепловое поле в продольном сечении, для удобства отображения заготовка разделена на четыре части. Центральная часть заготовки имеет температуру порядка 1000 – 1050 °С. Также наблюдается более интенсивное охлаждение концов заготовки: до 800 – 950 °С.

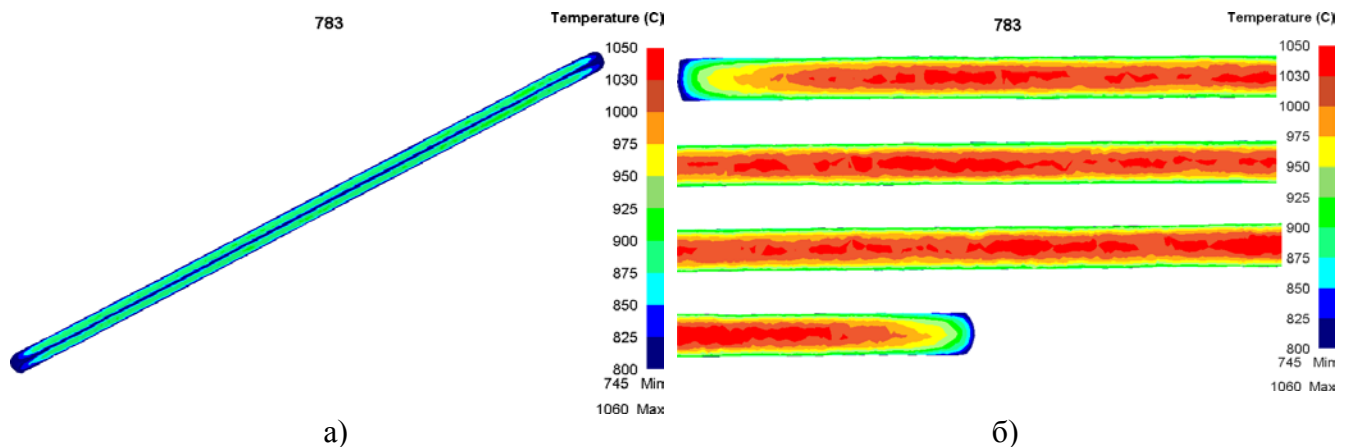
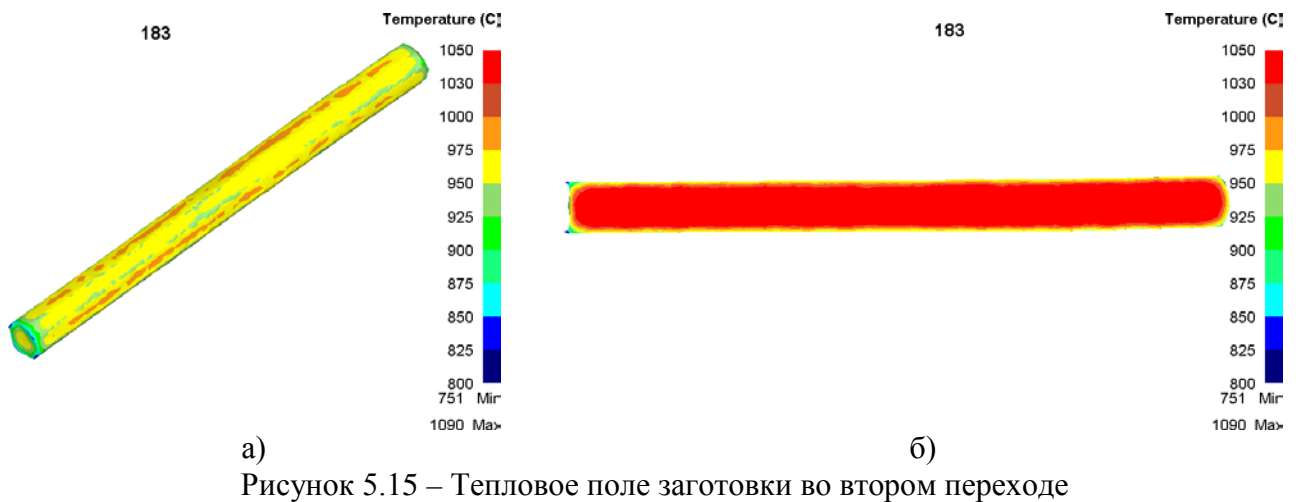


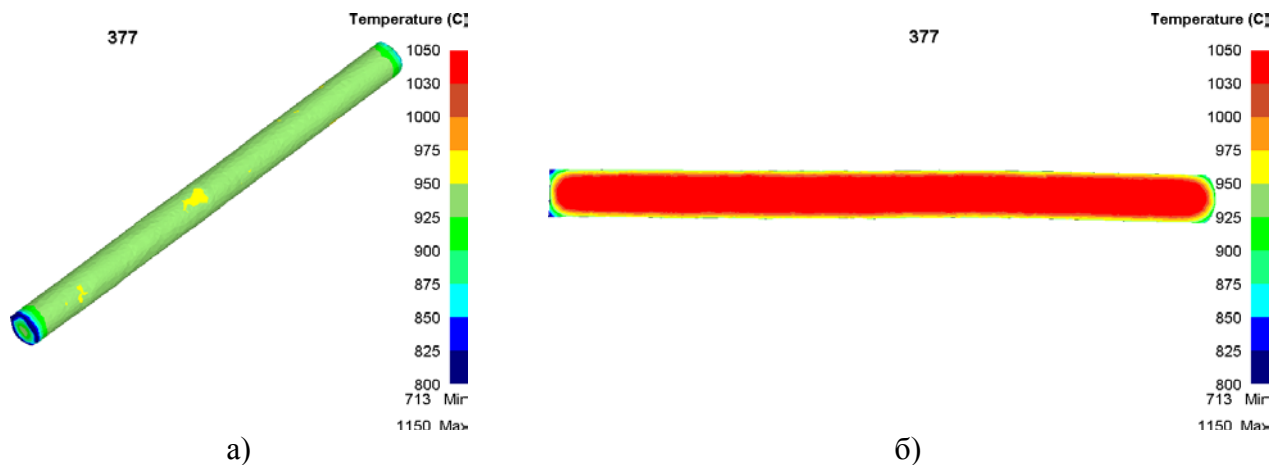
Рисунок 5.14 – Тепловое поле заготовки при первом переходе

Далее по технологическому процессу заготовка разрезается на части, которые вновь подвергаются нагреву и протягиваются до восьмигранного профиля.

Рисунок 5.15а показывает тепловое поле заготовки на поверхности, а рисунок 5.15б — после протяжки. Полученная картина теплового поля по общему распределению соответствует предыдущей, однако температура поверхности гораздо выше (порядка 950 – 980 °С), а центральной области заготовки: порядка 1050 – 1090 °С, что объясняется меньшим временем ковки.



Финальной операцией является придание восьмигранному профилю круглого сечения. Перед данной операцией заготовка была вновь подогрета, её температурное поле на поверхности показано на рисунке 5.16а, а после протяжки – на рисунке 5.16б. Как видно поверхность заготовки после протяжки охлаждена более интенсивно (до 870 – 900 °С), чем в предыдущем проходе, а температура центральной области наоборот, осталась выше: порядка 1150 °С. Данная картина объясняется более чем двукратным увеличением (по сравнению с предыдущей) продолжительности данной операции.



Подобная картина вызвана особенностями протяжки: заготовка деформируется с небольшой продольной подачей и кантовкой после каждого единичного обжатия. При этом происходит частый контакт с бойками с интенсивным теплообменом, что и вызывает повышенное охлаждение поверхностного слоя. С другой стороны частые единичные обжатия приводят к деформационному разогреву, что совместно с относительно небольшим временем протяжки, не даёт центральной части поковки сильно остыть.

Исходя из этого, можно сделать вывод о возможности протяжки в вырезных бойках непосредственно после достижения заготовкой восьмигранного профиля, минуя промежуточный подогрев. Этому способствует и конструкция бойков, обеспечивающая их быструю замену.

Итоговый анализ результатов моделирования позволяет сделать выводы о неблагоприятном НДС металла во времяковки по существующему технологическому процессу. В большинстве технологических проходов в заготовке наблюдается большое количество зон с преобладанием растягивающих напряжений. Положение улучшается в середине процесса протяжки, когда в поверхностных слоях из-за охлаждения металла полностью формируется пластичная «рубашка», которая приводит к увеличению доли сжимающих напряжений в осевой зоне. Основной причиной возникновения неблагоприятного напряжённого состояния поковки служит применение только плоских бойков для большинства формоизменяющих операций. Использование вырезных бойков в финальных стадиях не способствует улучшению напряжённого состояния, т.к. они применяются по большей части для проглаживания поковки.

Как неоднократно описано в литературных источниках [83 – 86] подобная схема может привести к появлению таких дефектов как осевые и поверхностные трещины, возникающие в местах наибольших значений растягивающих напряжений. Вероятность их возникновения значительно повышается, если не соблюдается термический режимковки и поковка охлаждается ниже предусмотренных температур, что вызывает уменьшение пластичности металла [87].

Это подтверждается реальными результатамиковки круглых штанг из стали 12Х18Н10Т. Так, на рисунке 5.17 показаны искажения формы реальных поковок, полученных без рубки исходной заготовки на три части. Причиной появления данных искажений является отсутствие на прессе инструмента для поддержки заготовок в процессе протяжки. На рисунке 5.18 показаны поперечные поверхностные трещины, вызванные недостаточной пластичностью металла, вследствие охлаждения поверхности поковки ниже ковочной температуры. Что согласуется с результатами моделирования, приведёнными на рисунке 5.14. На рисунке 5.19 показаны продольные поверхностные трещины, возникающие по всей поверхности поковки. Их появление вызвано значительными растягивающими напряжениями, возникающими в поверхностном слое металла на протяжении и процесса протяжки в плоских бойках. Также на их появление влияет и охлаждение поверхности поковки ниже ковочной температуры, понижающее пластичность металла. На рисунке 5.20 показаны осевые трещины, также вызванные неблагоприятной схемой напряжённого состояния металла: растягивающими напряжениями в данной области поковки вследствие деформирования металла преимущественно в плоских бойках.



а)



б)

Рисунок 5.17 – Искривление формы поковок



в)

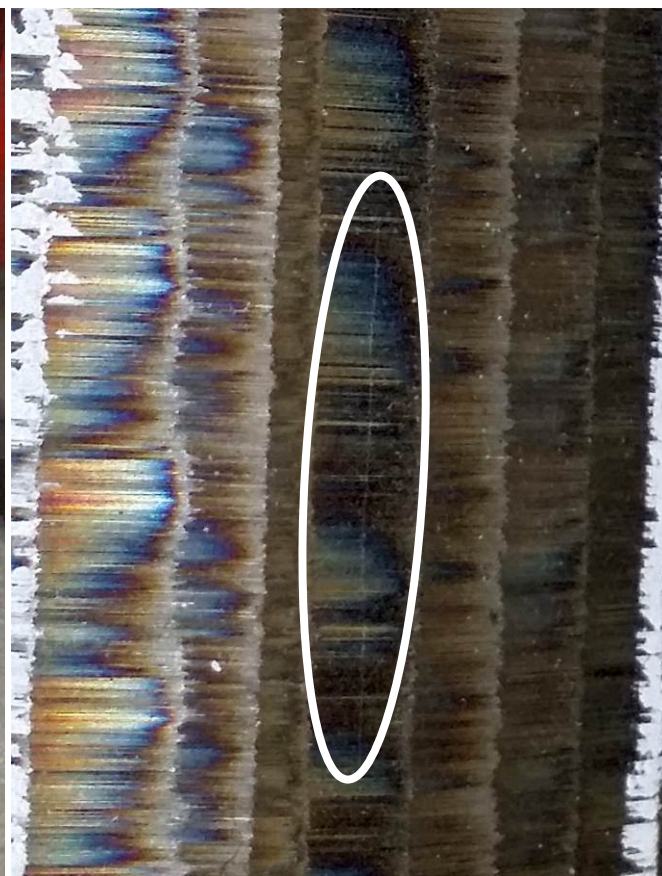


г)

Рисунок 5.18 – Поперечные поверхностные трещины



а)



б)

Рисунок 5.19 – Поверхностные продольные трещины



а)



б)

Рисунок 5.20 – Продольные осевые трещины

5.1.1 Предлагаемый способ устранения дефектов

Для улучшения напряжённого состояния поковок, особенно из малопластичных видов сталей и сплавов целесообразно применение вырезных круглых бойков. Варианты бойков для начальной стадии процесса показаны на рисунке 5.21а, а для финальной – на рисунке 5.21б.

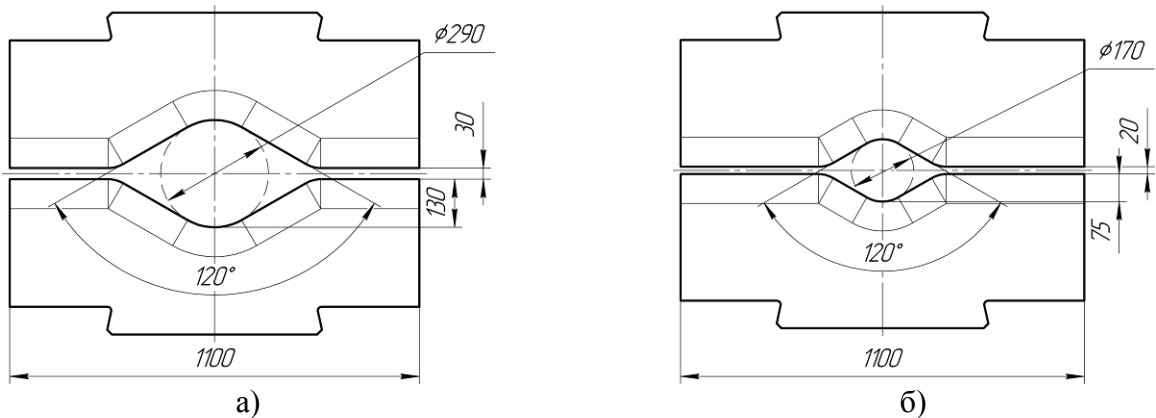


Рисунок 5.21 – Варианты вырезных бойков

Распределение максимальных главных напряжений в поперечном сечении в начале процесса при использовании вырезных бойков показано на рисунке 5.22а. Значительная область в центре заготовки испытывает напряжения сжатия, что отличается от напряжённого состояния при использовании плоских бойков.

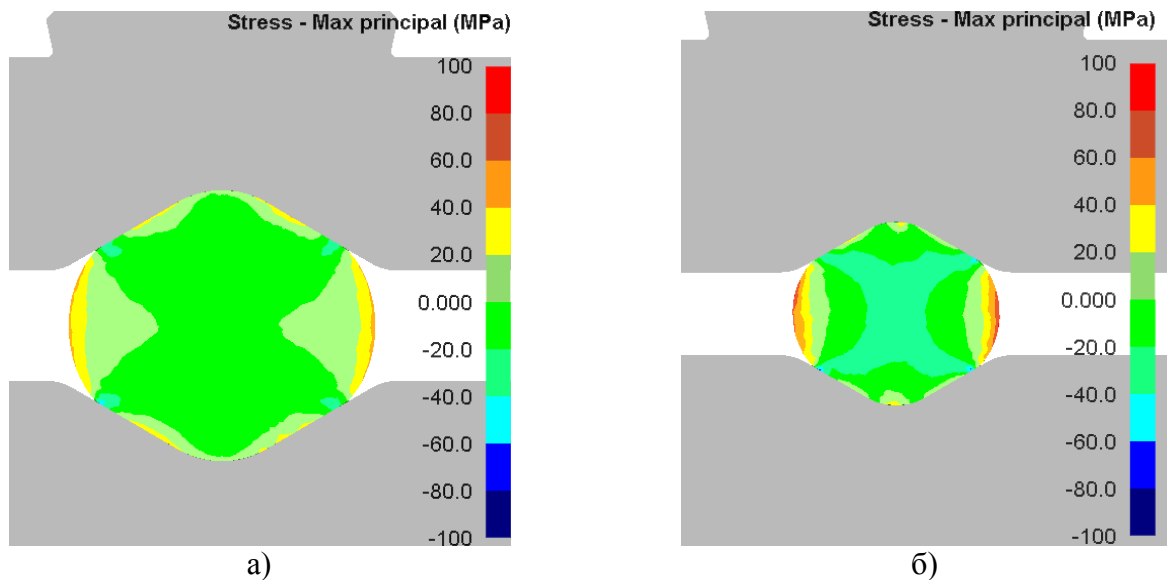


Рисунок 5.22 – Распределение главных напряжений при использовании вырезных бойков

В финальных стадиях процесса, показанных на рисунке 5.22б, напряжённое состояние заготовки также меняется. Центральная область также испытывает сжимающие напряжения.

Растягивающие напряжения возникают в ограниченных боковых областях у поверхности заготовки. Подобное напряжённое состояние способствует уменьшению вероятности появления дефектов.

Результаты моделирования подтверждаются данными, полученными в процессе реальнойковки. В условиях кузнечно-прессового цеха №2 на быстроходном прессе 16 МН была произведена ковка 5 слитков диаметром 380 мм вакуумно-дугового переплава из малопластичного жаропрочного сплава ХН62ВМЮТ (ЭП708) в круглые штанги диаметром 170 мм с использованием вышеописанных вырезных бойков. Нагрев металла произведен в камерной печи №20. Слитки №1, 3, 5 нагревались до температуры 1160 °С, № 2, 4 – до температуры 1180 °С. Посадка слитков в печь была произведена на температуру 800^{±10} °С. Откованный чистый сорт слитков №2 (1 кусок) и №4 (2 куска) представлены на рисунке 3. В ходе визуального контроля наличие поверхностных дефектов не выявлено.



Рисунок 5.23 – Внешний вид откованных штанг

Послековки производился ультразвуковой контроль, контроль макроструктуры металла и испытания механических свойств. При проведении УЗК краевые дефекты протяженностью 60 – 180 мм были обнаружены на торцах 4-х заготовок (№3Г, №3Х, №1Г, №1Х) соответствующие головной и хвостовой обрезки слитков. После удаления технологической обрезки, отобрали два образца (головная и хвостовая обрезка от одного из слитков) для контроля макроструктуры.

Фотография макроструктуры для образца диаметром 170 мм (слиток №1, хвостовая обрезь) показана на рисунке 5.24. Согласно методам оценки, описанным в [88], полученная после деформации макроструктура признана удовлетворительной.

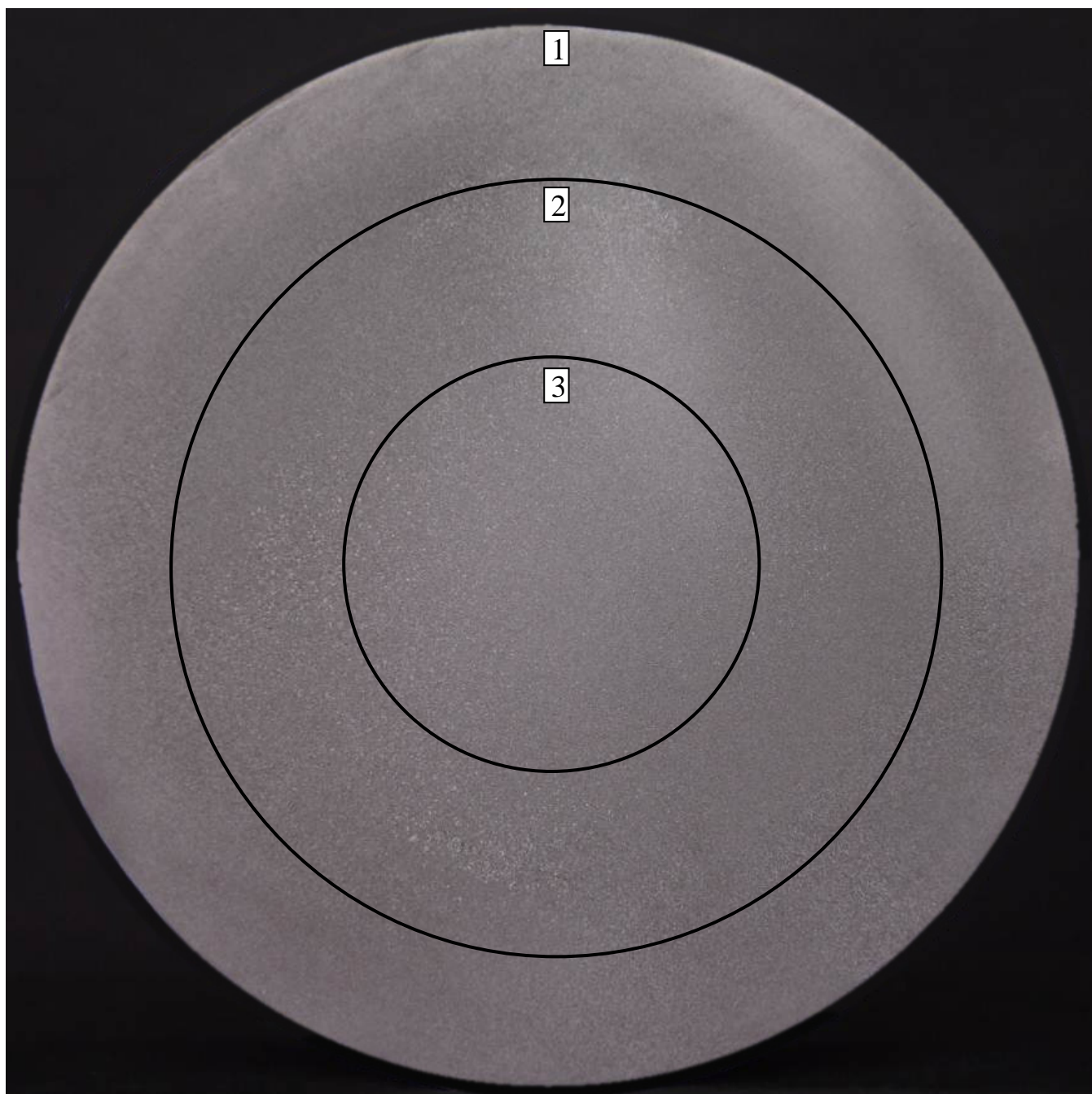


Рисунок 5.24 – Макроструктура образца из сплава ЭП708

Как описано в пункте 1.2, металлографический метод исследования макроструктуры позволяет определить в поковке наличие зон с различной деформацией металла. На рисунке 5.24 видны зоны с различным размером зёрен металла. Зёрна наименьшего размера сосредоточены в приповерхностной области (1), далее, ближе к центру заготовки наблюдается

их увеличение (2), достигающее максимума в центральной части (3). Данное распределение свидетельствует о наличии наибольших деформаций в области 1 и наименьших – в 3. Подобное распределение согласуется с результатами моделирования протяжки заготовки в вырезных круглых бойках, описанное в пункте 2.3 (стр. 66). При этом следует отметить, что несмотря на данную неоднородность, по всему сечению поковки произошло измельчение исходной литой структуры металла.

Испытания для определения механических свойств металла производились при комнатной температуре и при 800 °С, а также на длительную прочность. Полученные результаты, приведённые в таблице 5.2, позволяют сделать вывод о соответствии требованиям ТУ 14-1-1018-98, применяемым на АО «Металлургический завод «Электросталь» и достаточном запасе по всем характеристикам, а также нахождении на уровне средних значений серийного металла.

Таблица 5.2 – Результаты испытаний механических свойств образцов из сплава ЭП708

	Температура испытаний								Длит.пр. 800°/284 Н/мм ² τ(ч)
	20 °С				800 °С				
	σ _в , Н/мм ²	σ ₀₂ , Н/мм ²	δ, %	ψ, %	σ _в , Н/мм ²	σ ₀₂ , Н/мм ²	δ, %	ψ, %	
Результаты испытаний	1185,0	796,6	28,0	31,4	758,0	634,1	24,8	42,7	157
	1186,3	797,4	26,8	32,8	792,7	658,9	26,8	48,6	141
Среднее значение	1185,7	797	27,4	32,1	775,4	646,5	25,8	45,7	149
Нормы по ТУ	1080	690	18	20	686	588	14	25	50
	Относительные значения от норм ТУ, %								
	109	113	134	138	112	109	146	145	166

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о целесообразности применения разработанной технологии с применением вырезных круглых бойков при ковке малопластичных жаропрочных сплавов

5.2 Анализ технологического процессаковки полой поковки на РОМ

Целью моделирования было исследование состояния поковки (внешний вид, напряжённое и деформационное состояние) при ковке на радиально–обжимной машине SMX 600, усилием 12 МН, применяемой на АО «Металлургический завод «Электросталь», с использованием различных типов бойков.

Согласно рассматриваемому технологическому процессу исходная цилиндрическая полая заготовка имеет размеры: диаметр 365 мм, диаметр отверстия 140 мм, длина 1400 мм,

чертёж представлен на рисунке 5.25а. При данном моделировании итоговая поковка также представляла собой полый цилиндр с размерами: диаметр 240 мм, диаметр отверстия 120 мм, длина 2600 мм, чертёж приведён на рисунке 5.25б. В реальном процессе у готового изделия на одном конце имеется фланец, но при моделировании было принято решение получить поковки без него.

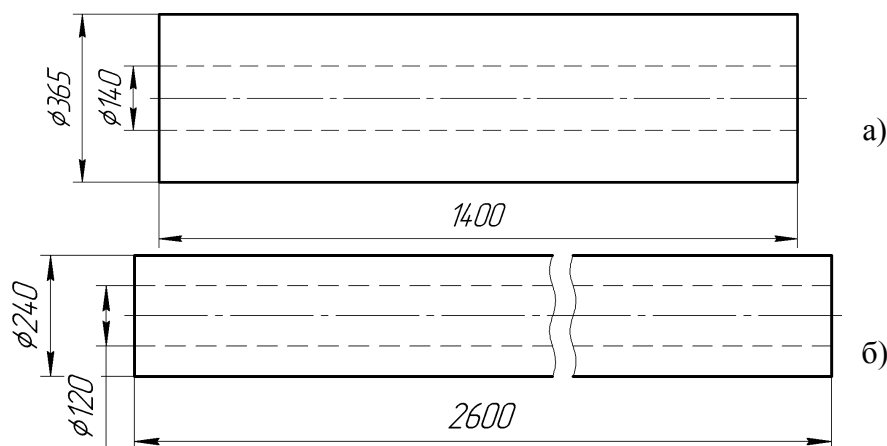


Рисунок 5.25 – Применяемая заготовка и готовое изделие

Сам процессковки состоит из трёх переходов, параметры которых представлены в таблице 5.3. Продольная подача и кантовка заготовки осуществлялись между единичными обжатиями, во время развода бойков. Величина подачи составляла 15 мм, кантовка – 15°. Данные условия применялись при всех проходах и при использовании обоих типов бойков и являются рекомендованными фирмой–изготовителем SMS Meer.

Таблица 5.3 – Изменение размеров заготовки

№ прохода	Диаметр заготовки, мм	Диаметр отверстия, мм	Абсолютное обжатие, мм	Относительное обжатие, %
заготовка	365	140	0	0
1	305	120	60	31
2	270	120	35	26
3	240	120	30	26

Изначально для описания реологических свойств заготовки планировалось применить данные сплава ХН62ВМЮТ (ЭП708) [89, 90], полученные у АО «Металлургический завод «Электросталь», и использованные в Главе 2 при моделировании формоизменения элементарного объёма, однако это вызвало ряд трудностей: при заданных условиях процесса скорость деформации достигала значений вплоть до 14 с⁻¹. Средние значения составляли порядка 5 – 7 с⁻¹. Данные же для сплава ЭП708 ограничены для значений до 1 с⁻¹. При превышении данного значения DEFORM начинает экстраполировать значения предела

текучести, однако в данном случае (ввиду необходимости экстраполяции в пиковых значениях более чем на порядок) это приводило к появлению многочисленных ошибок и некорректному расчету.

Одним из способов решить данную проблему было ограничение скорости перемещения бойков до 50–70 мм/с. При этом скорость деформации была несколько выше 1 с^{-1} (но не превышала $\sim 2\text{--}5 \text{ с}^{-1}$) и DEFORM производил экстраполяцию значений без существенных ошибок расчёта. Однако подобные скорости перемещения бойков не соответствуют таким высокопроизводительным агрегатам как РОМ. Поэтому было принято решение использовать данные сплава ХН56ВМТКЮ (ЭП199), взятые из [61]. Скорость деформации при этом ограничена значением 100 с^{-1} . Подобная замена материала несколько исказила итоговые значения напряжённо–деформированного состояния, по сравнению с реальным процессом, однако, данный сплав использовался при моделированииковки с применением обоих типов бойков, что позволило оценить влияние формы рабочего инструмента на состояние металла поковки.

Моделирование осуществлялось по методике, описанной в Главах 3 и 4. Построенные на основе чертежей в редакторе SolidWorks трёхмерные модели рабочего инструмента и заготовки представлены на рисунке 5.26.

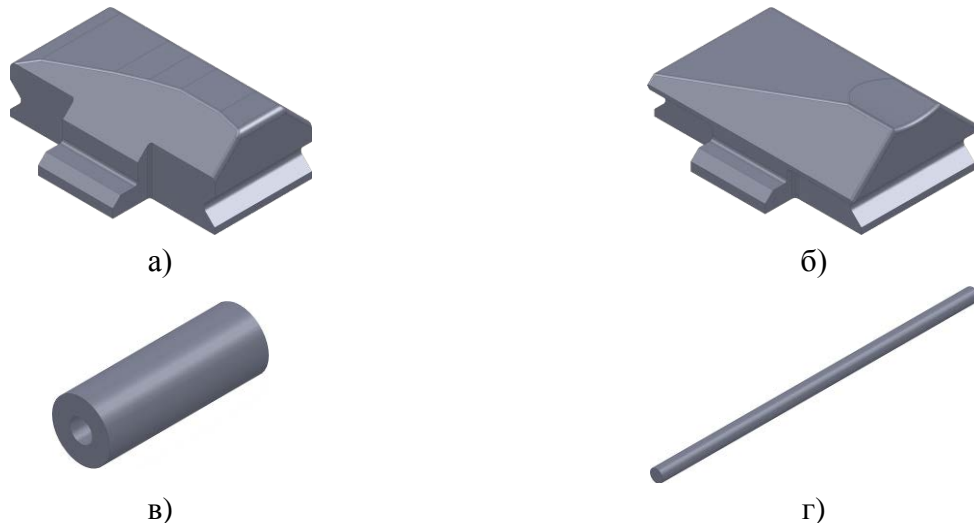


Рисунок 5.26 – Трёхмерные модели рабочего инструмента и заготовки

Модель плоского бойка изображена на рисунке 5.26а, вырезного – на рисунке 5.26б, заготовки – на рисунке 5.26в, оправка, выполненная в виде цилиндра диаметром 120 мм и длиной 3000 мм – на рисунке 5.26г. В реальности оправка имеет несколько иные размеры, однако, на момент моделирования ещё не было точных сведений о её финальной конструкции, поэтому для экономии времени было принято решение использовать наиболее простую формы.

Далее построенные модели совмещались в две сборки: с плоскими бойками (рисунок 5.27а) и с вырезными (рисунок 5.27б). Все четыре бойка РОМ идентичны друг другу, поэтому изначально в сборку добавлялся только один, а оставшиеся три создавались при помощи кругового массива элементов. Оправка помещалась в центр отверстия заготовки и не соприкасалась с внутренними стенками. Бойки же наоборот, выставлялись таким образом чтобы происходило касание между их рабочими поверхностями и внешней поверхностью заготовки. Это облегчало последующее определение их хода: он составлял половину от абсолютного обжатия. Затем сборка преобразовывалась в STL файлы, связанные общей системой координат и импортировалась в DEFORM.

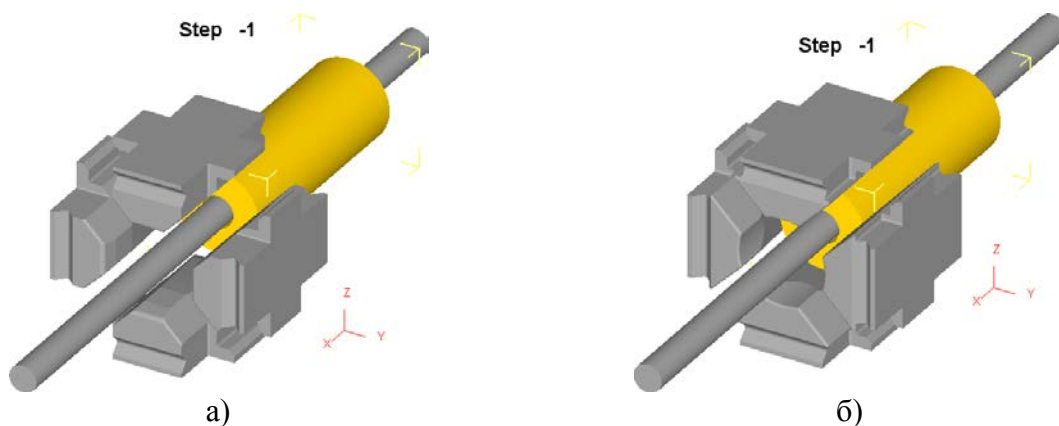


Рисунок 5.27 – Трёхмерные сборки моделей

Моделирование осуществлялось в модуле DEFORM-3D Multiple Operations, по методике, описанной в Главе 4. Нагрев в печи не моделировался: заготовке изначально присваивалась температура в 1200 °С. Первоначальной операцией был перенос заготовки от печи к РОМ, и составляла 120 сек., после чего начиналось деформирование заготовки. Модель заготовки разбивалась на конечно – элементную сетку, состоящую из 45000 элементов. В процессе моделирования число элементов было увеличено до 48000. Модели бойков и оправки на КЭ сетку не разбивались. Бойкам присваивалась постоянная скорость перемещения, равная 100 мм/сек. Для описания силы трения использовался закон Амонтона – Кулона, коэффициент составлял 0,3. Коэффициент теплообмена бойков с заготовкой принимался равным 5 Н/сек/мм/°С (5000 Вт/м² · °С), для оправки с заготовкой – 3. Температура бойков составляла 150 °С. Для имитации нагрева оправки её температура во время моделирования постепенно повышалась со 150 °С до 450 °С. Всего производилось моделирование трёх проходов для двух типов бойков.

В ходе анализа полученных данных были рассмотрены внешний вид поковок, деформационное и напряжённое состояние. Анализ производился для обоих типов бойков:

плоского и вырезного. Рисунки *а* соответствуют результатам, полученным с применением плоских бойков, *б* – с вырезным.

Общий вид заготовок после первого прохода показан на рисунке 5.28. Как видно, различие между результатами, полученными при использовании обоих типов бойков в целом небольшие. Однако при использовании вырезных бойков на поверхности заготовки наблюдается появление небольших винтовых выступов, в то время как заготовка, откованная в плоских бойках, имеет более ровную поверхность.



Рисунок 5.28 – Общий вид заготовок после первого прохода

Рисунок 5.29 показывает общий вид поковки после второго прохода. Винтовые выступы наблюдаются при использовании обоих типов бойков. Но при использовании плоских бойков они больше и практически равномерно распределены вдоль всей длины поковки. В тоже время при применении вырезных бойков наблюдается уменьшение размера выступов ближе к хвостовой части поковки.



Рисунок 5.29 – Общий вид заготовок после второго прохода

Образование выступов во многом вызвано вытеснением металла в пространство между бойками. Вырезные бойки позволяют получить больший охват заготовки, при котором происходит заглаживание данных выступов. Уменьшение величины выступов начиная с трети поковки от передней части поковки объясняется тем, что в данном месте производилась переназначение зафиксированных узлов, что освобождало зафиксированный в продольном направлении задний конец заготовки. Это уменьшало подпор металла и позволяло ему свободно двигаться не в зазор между бойками, а в продольном направлении, что вместе с вышеописанным более широким охватом заготовки и привело к заглаживанию выступов.

Итоговый вид поковки показан на рисунке 5.30. При использовании плоских бойков отчётливо видны винтообразные выступы на большей части поковки, в то время как применение вырезных бойков позволило получить более ровную поверхность. Причины подобного те же, что и при описании второго прохода: вследствие уменьшения внешнего диаметра заготовки калибровочные участки вырезных бойков получают возможность охватывать всё большую поверхность, что позволило эффективно загладить образованные ранее винтовые выступы.



Рисунок 5.30 – Общий вид заготовок после третьего прохода

В целом можно сделать вывод, что при заданных условиях подачи и кантовки заготовки применение вырезных бойков позволяет получить поверхность более высокого качества, в то время как плоские бойки могут потребовать дополнительного прохода для проглаживания. Другим выходом может стать изменение условий деформации: уменьшение величины подачи и угла кантовки между единичными обжатиями (т.е. повысить дробность деформации), что позволит загладить выступы, образующиеся при течении металла в зазор между бойками.

Размеры полученных поволоков представлены на рисунке 5.31.



Рисунок 5.31 – Размеры полученных поволоков

Как видно, наблюдается расхождение в размерах: поковка, полученная с использованием плоских бойков, оказалась на 19% короче полученной в вырезных. Подобные расхождения вызваны более интенсивным течением металла в зазор между бойками при использовании плоских бойков. В то время как вырезные бойки уменьшают данное перемещение металла и

направить его течение в продольном направлении, что в итоге и увеличивает общую длину поковки. Также следует отметить, что диаметр поковки, полученной в плоских бойках непостоянен по длине вследствие винтовых выступов, в то время как полученная в вырезных бойках имеет небольшие отличия по диаметру на протяжении всей длины. Данные винтовые гребни объясняют различиям в представленных на рисунке размерах: их определение производилось автоматически по наиболее выступающим поверхностям моделей.

После анализа данных можно сделать вывод, что при заданных условиях процесса, вырезные бойки позволяют получить большую продольную вытяжку, чем плоские. Однако при использовании как плоских, так и вырезных бойков длина поковки оказывалась меньше расчётной.

Исследование напряжённо-деформированного состояния включало анализ распределения накопленных деформаций, интенсивности напряжений и главных напряжений по сечениям поковок. В работе приводятся графические иллюстрации к третьему проходу, т.к. именно в нём наиболее ярко проявляются различия между различными типами применяемых бойков.

Распределение деформаций в продольном сечении поковки показано на рисунке 5.32.

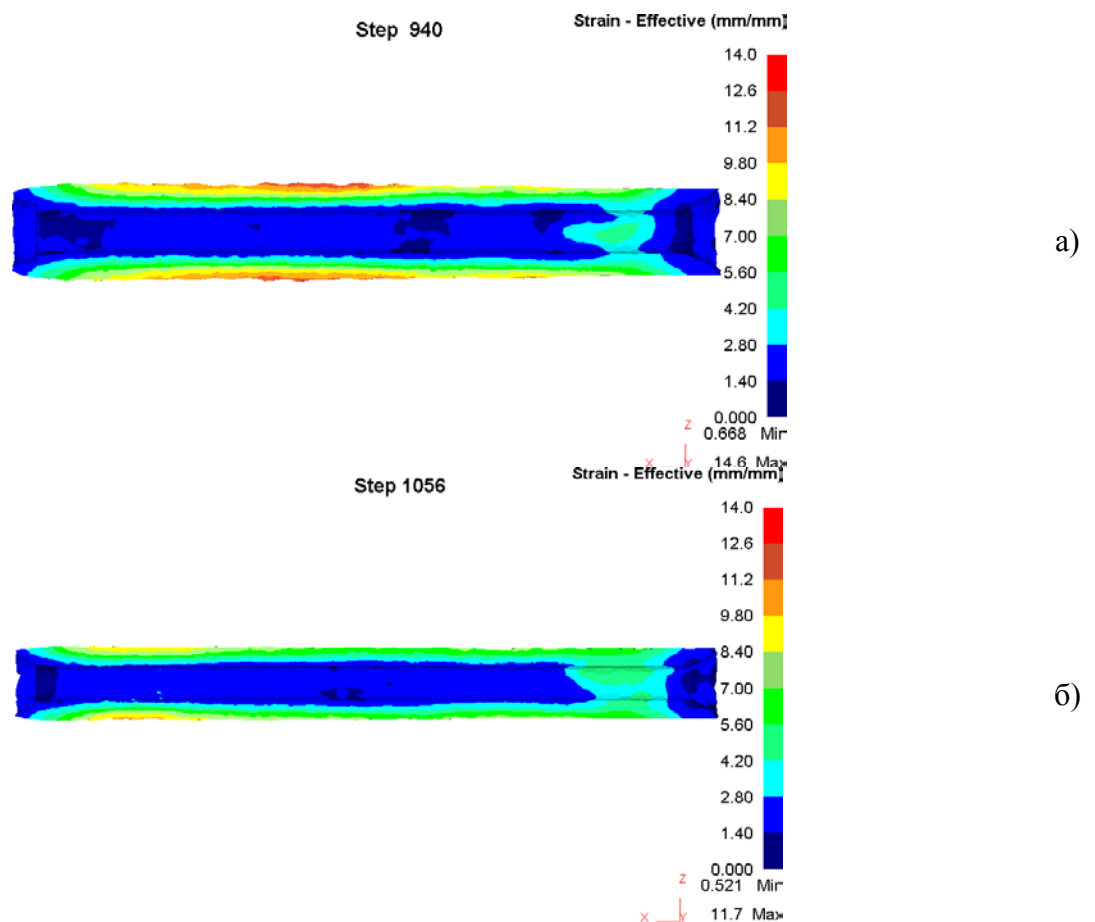


Рисунок 5.32 – Распределение накопленных деформаций в продольном сечении поковок

При использовании бойков обоих типов накопленные деформации в поверхностном слое металла достигает наиболее высоких значений практически по всей длине поковки. При использовании плоских бойков наблюдается увеличение значений от переднего торца поковки к её середине. Относительно высокие значения наблюдаются также в средней части приповерхностного слоя поковки, которые, однако, не проникают глубже $\frac{1}{4}$ от толщины стенки.

Применение вырезных бойков приводит к более равномерному распределению деформаций, при котором относительно небольшое повышение наблюдается только в передней части поковки. Также в задней части у обеих поковок наблюдаются повышенные (сравнительно с окружающими) значения накопленных деформаций. При использовании вырезных бойков подобная зона несколько больше и охватывает всю внутреннюю поверхность задней части. Образование таких локальных максимумов значений можно объяснить особенностью течения металла при данном моделировании. На большем протяжении процессаковки заготовка оказывалась жестко зафиксирована с переднего торца, в то время как задний торец фиксировался только в радиальном направлении (по осям Z и Y). Однако при ковке течение металла происходило не только в продольном направлении (по оси X), но и в меньшей степени в радиальном, при котором поток упирался в зафиксированные узлы, что вызывало локальное утолщение заготовки. Далее в ходе процессаковки задняя часть поковки освобождалась и вследствие несколько увеличившегося диаметра испытывала более высокие деформации.

Отличия в размерах этих зон при использовании различных бойков объясняются тем, что плоские бойки допускали большее истечение металла в межбойковый зазор, т.е. уменьшали его перемещение к центру поковки. При реальном процессековки подобные локальные максимумы на концах поковки также возможны: манипуляторы РОМ ограничивают радиальное перемещение металла, однако, в несколько меньшем масштабе, т.к. они не охватывают заготовку полностью и имеют подпружиненные опоры, которые позволяют определённые перемещения в продольном направлении. После анализа полученных данных можно сделать вывод, что вырезные бойки обеспечивают более равномерное распределение деформаций по сечению поковок. Однако, отличия в использовании различных бойков не столь существенны и касаются в основном периферийного слоя металла.

Далее оценивалось напряженное состояние поковок. Для отображения были выбраны шаги из середины процессаковки в третьем проходе, наиболее подчеркивающие отличия при использовании различных типов бойков. Для более подробного рассмотрения выполнялись два поперечных разреза: в середине контакта заготовки с бойком на заходном и калибрующем участках. Распределение интенсивности напряжений в продольном сечении при третьем проходе показано на рисунке 5.33.

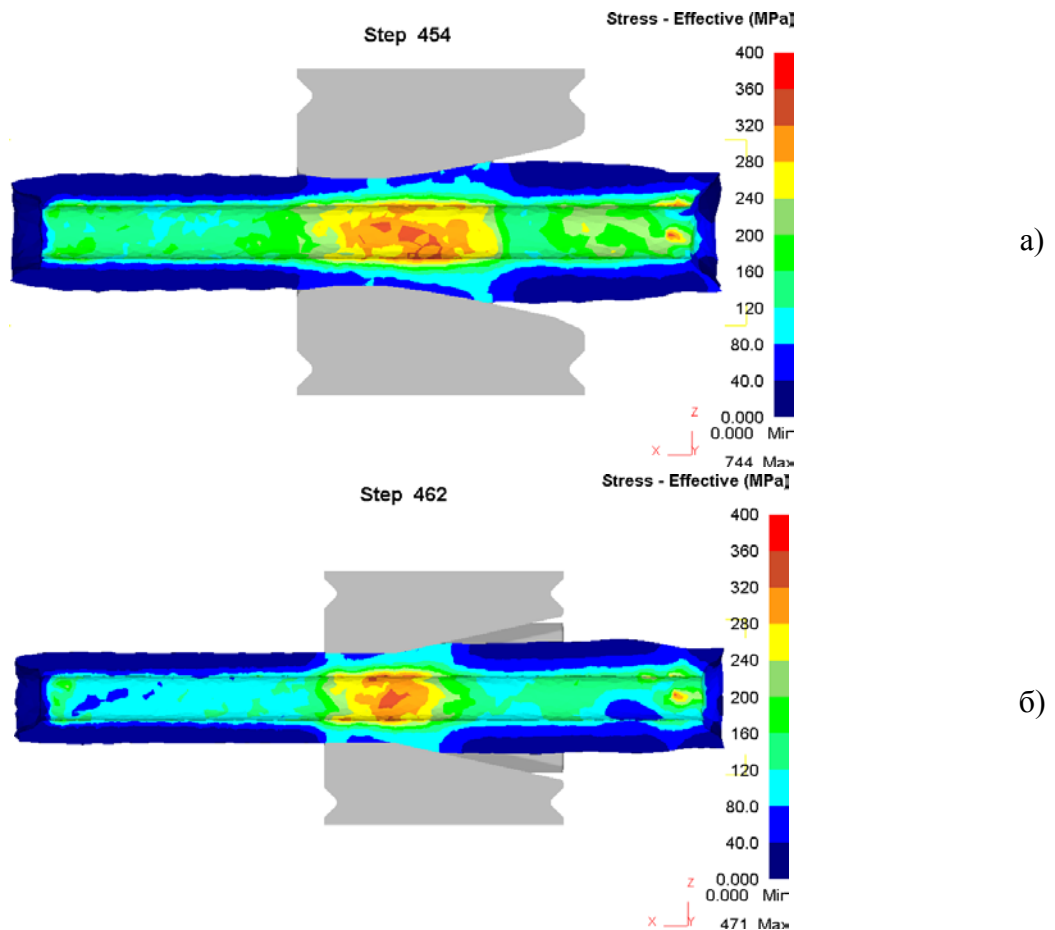


Рисунок 5.33 – Распределение интенсивности напряжений

Максимальные значения концентрируются в осевой зоне поковки, расположенной под проекцией бойков. Очаг деформации распространяется не только под заходными, но и под калибрующими участками. При этом относительно высокие значения наблюдаются под заходным участком на всём сечении стенки, а под калибрующим – в осевой зоне. Подобное распределение локальных максимумов вдоль внутренней стенки вызвано более интенсивным остыванием данной области вследствие контакта с оправкой, что вызывает понижение пластичности и рост напряжений. Очаг деформации при использовании плоских бойков содержит более высокие значения, чем при вырезных бойках. Также наблюдаются более масштабное распространение повышенных значений в осевой области поковки, расположенной под бойками. Что также может быть вызвано размерами очага деформации в продольном направлении заготовки. Очаг напряжения в задней части поковки вызван зафиксированными в радиальном направлении узлами конечно-элементной сетки. Очаг деформации распространяется на области поковки, расположенные под заходным и калибровочным участкам бойков. Однако более высокие значения интенсивности напряжений охватывают объём, расположенный под вырезными бойками. При этом повышенные значения в осевой

области заготовки распространяются на более значительную площадь, чем при использовании плоских бойков.

Распределение интенсивности напряжений в поперечном сечении по заходным участкам показано на рисунке 5.34.

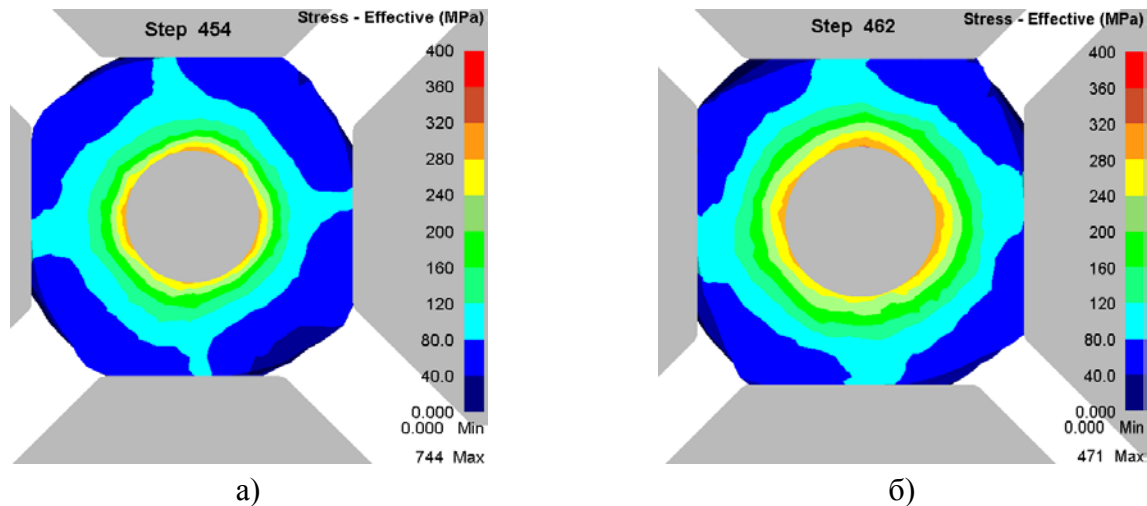


Рисунок 5.34 – Распределение интенсивности напряжений (разрез по заходному участку)

В целом оно схоже для обоих типов бойков: непосредственно от бойков к осевой области отходят «лучи» повышенных значений, которые переходят в ряд кольцевых областей, достигающих максимальных значений непосредственно около оправки.

Подобная картина вызвана контактом выступов на поверхности поковки с бойками и более интенсивным остыванием слоёв металла, прилегающих к оправке. Применение вырезных бойков обеспечивает более широкое распределение повышенных значений напряжений, что вызвано более широким охватом поковки бойками.

Распределение интенсивности напряжений по калибрующему участку показано на рисунке 5.35. Напряжения распределяются кольцевыми зонами, наименьшие значения сосредотачиваются у бойков, наибольшие – у оправки. Значения напряжений у оправки при использовании плоских бойков ниже, чем у вырезных. Вырезные бойки также обеспечивают более равномерное распределение напряжений в кольцевой зоне под бойками. Это достигается вследствие более широкого охвата калибрующими участками бойков металла поковки. При использовании плоских бойков подобная зона имеет вид сглаженного ромба, что объясняется более узкой контактной поверхностью.

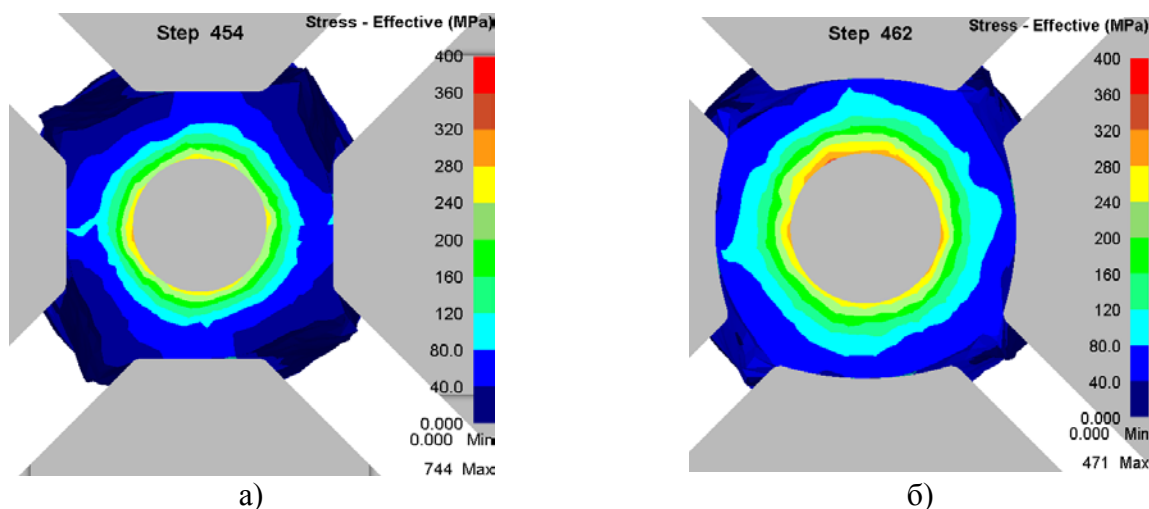


Рисунок 5.35 – Распределение интенсивности напряжений (разрез по калибрующему участку)

Распределение главных напряжений показано на рисунке 5.36. Более высокие значения как сжимающих, так и растягивающих напряжений наблюдаются при использовании плоских бойков. Применение вырезных бойков увеличивает область с напряжениями сжатия, расположенными под бойками. Область с высокими растягивающими напряжениями на внутренней поверхности заготовки вызвана продольной вытяжкой металла и его пониженной пластичностью.

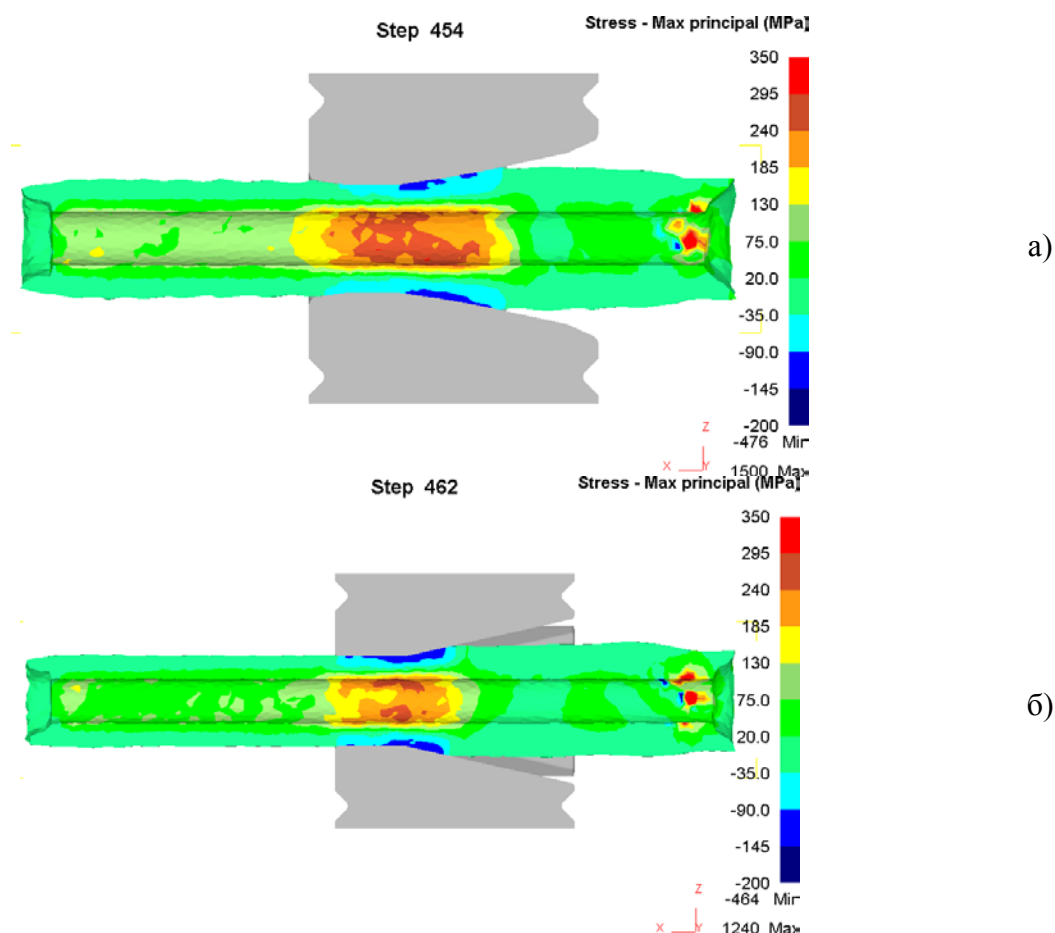


Рисунок 5.36 – Распределение главных напряжений

Распределение главных напряжений в поперечном сечении заходного участка, изображённое на рисунке 5.37, также показывает, что сжимающие напряжения достигают больших значений и площади распространения при применении вырезных бойков. Значения растягивающих напряжений в осевой области при применении плоских бойков оказываются выше.

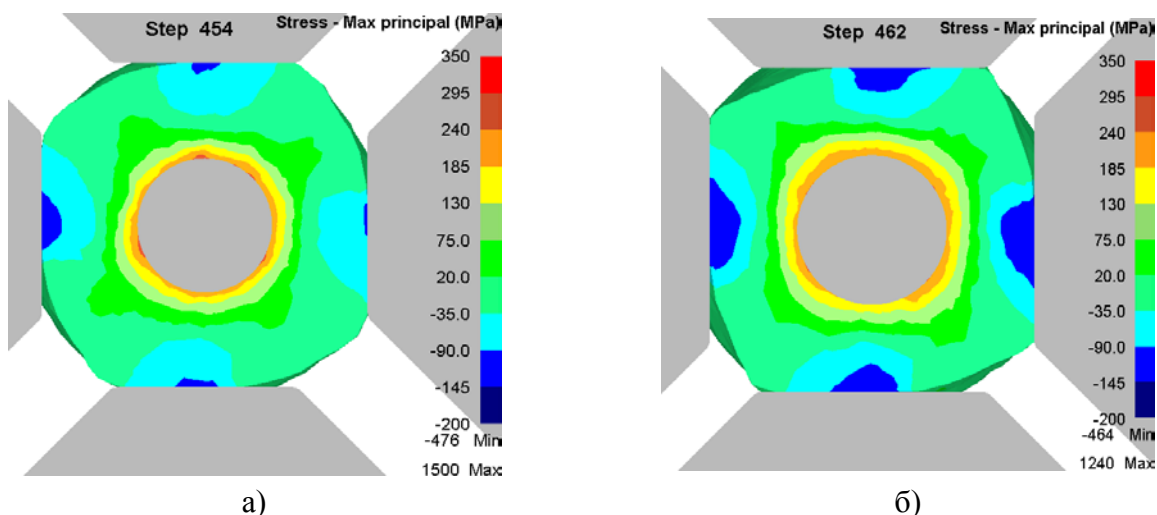


Рисунок 5.37 – Распределение главных напряжений (разрез по заходному участку)

Разрез по калибрующим участкам, изображённый на рисунке 5.38, наглядно показывает образование выступов на поверхности поковки, возникающие при использовании плоских бойков. При кантовке заготовка соприкасается с бойками по этим выступам, что создаёт узкую протяжённую контактную поверхность. При этом область распространения напряжений сжатия будет также узкой, что и наблюдается на рисунках. В то время как при использовании вырезных бойков происходит широкий охват поковки, что вызывает появление широкой области сжимающих напряжений с более высокими значениями.

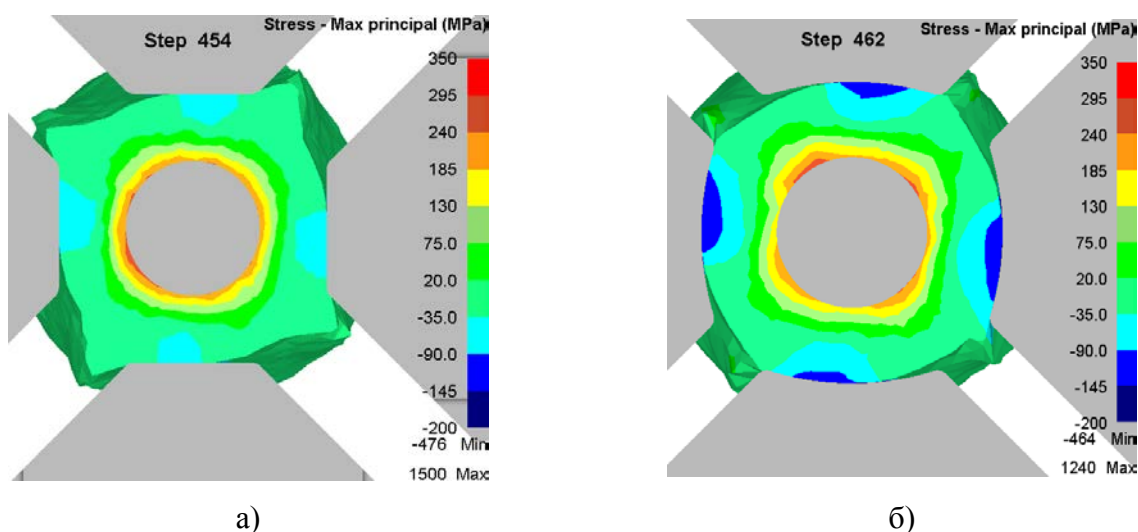


Рисунок 5.38 – Распределение главных напряжений (разрез по калибрующему участку)

Различия в применении плоских и вырезных бойков возрастают с каждым проходом: если в первом сильно разницы не наблюдается, то к третьему она уже существенна. Во многом это связано с уменьшающимся при каждом проходе диаметром поковки. При этом вырезные бойки больше охватывают заготовку своими калибровочными участками, что приводит к увеличению ширины контактной поверхности, что в конечном итоге улучшает напряжённо-деформационное состояние металла, увеличивая долю и площадь распространения сжимающих напряжений.

После анализа полученных при моделировании данных можно сделать вывод, что при заданных условияхковки вырезные бойки позволяют за три перехода получить поковку с более хорошей поверхностью, требующей меньшей последующей обработки, и более равномерным распределением механических свойствам, чем при использовании плоских бойков. Однако, разница в проработке металла и, как следствие механических свойств поковок, полученных при использовании плоских бойков, относительно невелика и может быть устранена изменением технологических режимов процессаковки: изменением режимов обжатий, подачи и кантовки, в целях повышения дробности деформации [91].

Внешний вид поковок в плоских бойках показан на рисунке 5.39а, в вырезных – 5.39б.

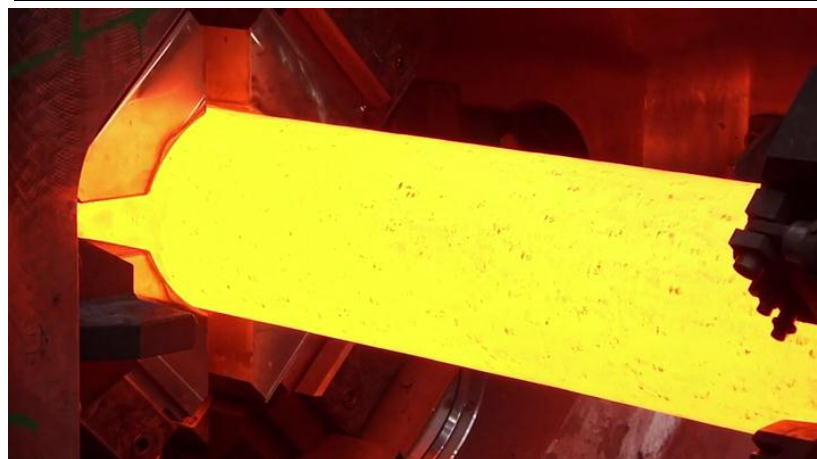


Рисунок 5.39 – Общий вид заготовок в бойках РОМ

Из них видно, что качество поверхности различается. При использовании плоских бойков возникает небольшая гранёность поверхности, в то время как применение вырезных бойков позволяет получить более гладкую поверхность. Также при использовании плоских бойков на поверхности поковки наблюдается возникновение поперечных трещин. Их появление вызвано охлаждением поверхности металла ниже ковочной температуры, а также значительной деформацией поверхностных слоёв поковки.

5.3 Совершенствование процессаковки валка для сортопрокатного стана

При осуществленииковки валка по технологическому процессу, описанному в Главе 3, в кузнечно–прессовом цехе ОАО «ЭЗТМ» наблюдается образование осевых трещин и свищей в передней части поковки. Величина свищей может достигать значительных размеров, превышающих по своей длине отрубаемую донную часть, что делает из них неустранимый дефект. Также отмечены трещины в периферийном слое металла в месте перехода шейки валка в бочку с прибыльной стороны поковки. Места расположения дефектов на чертеже готовой поковки показаны на рисунке 5.40 (выделены пунктирными линиями).

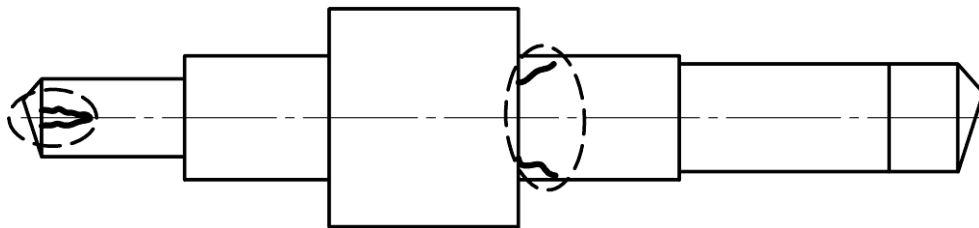


Рисунок 5.40 – Расположение дефектов

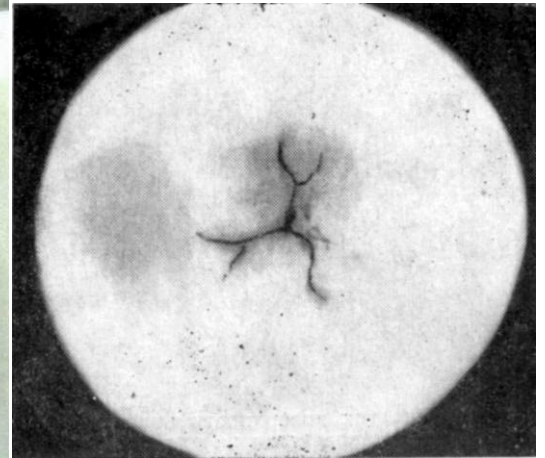
От передней части шейки бракованной поковки валка был отобран темплет. После холодного травления в осевой зоне четко виден разрыв, изображённый на рисунке 5.41а. Внешний вид разрыва совпадает с фотографиями и описаниями, приведёнными в [92, 93] и изображённым на рисунке 5.41б.

Для получения качественных поковок необходимо соблюдение температурных режимов в процессековки. При охлаждении поковки ниже интервала ковочных температур последнюю операцию необходимо разбивать на два выноса: вводить дополнительный подогрев.

Однако данные меры не устраняют ещё одну причину появления трещин и свищей: торцевую утяжину. Для её устранения необходимо скорректировать технологический процесс, для чего было произведено моделирование различных изменённых вариантов



а)



б)

Рисунок 5.41 – Внешний вид дефекта

Совершенствование процесса биллетировки

Для улучшения состояния поверхности заготовки было произведено моделирование совершенствования процесса биллетировки, заключающееся в получении биллета с более сглаженной поверхностью. Результаты приведены на рисунке 5.42, из которого видно, что на поверхности отсутствуют значительные ступенчатые выступы. Получение биллета данной формы потребовало на 30% больше времени.

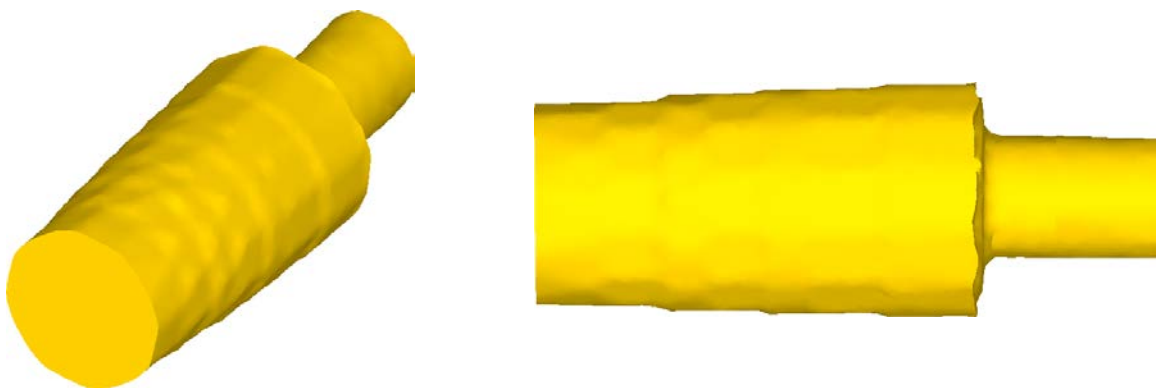


Рисунок 5.42 – Внешний вид полученного биллета

Результат осадки полученного биллета показан на рисунке 5.43. Как видно, полученная заготовка имеет более гладкую поверхность, которая при дальнейшей протяжке будет равномернее охлаждаться, без появления отдельных более холодных участков. Что в свою

очередь уменьшить возможность появления поверхностных трещин, вызванных понижением пластичности металла вследствие более низкой температуры.

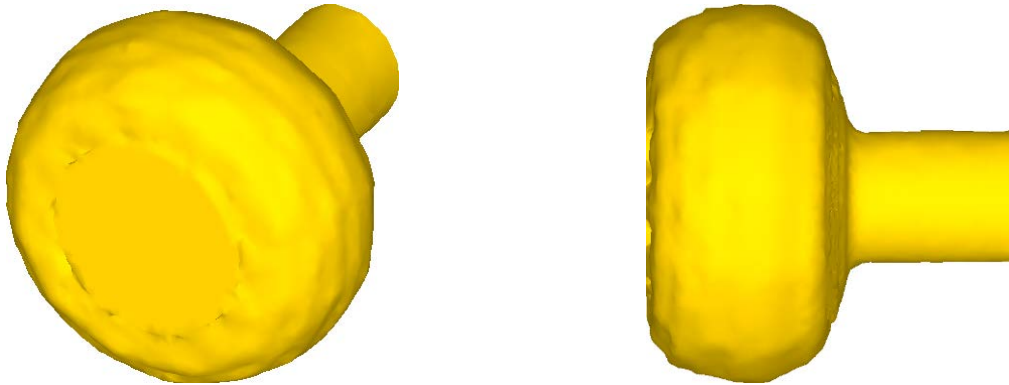
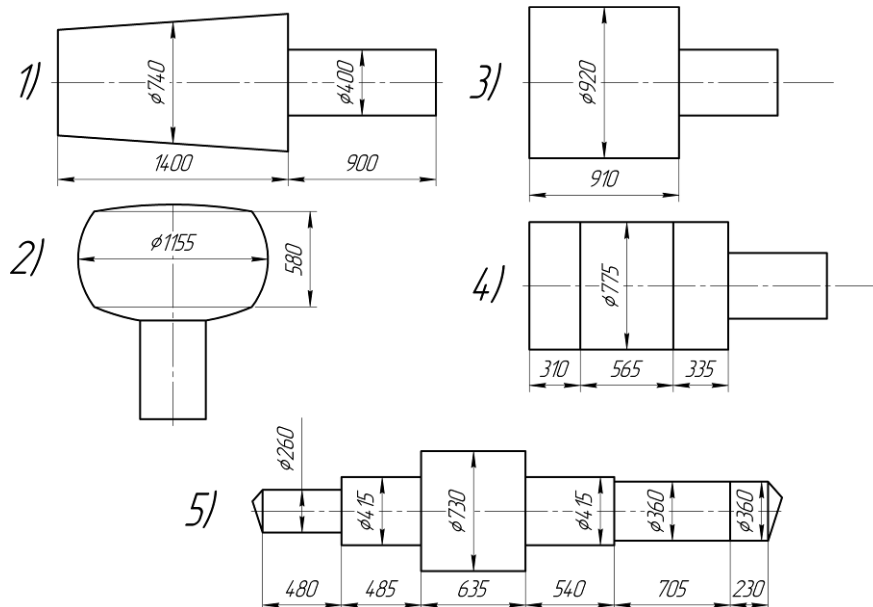


Рисунок 5.43 – Внешний вид заготовки после осадки

Применение верхней сферической осадочной плиты

Одним из решений может стать применение верхней сферической осадочной плиты, которое создаст на переднем торце поковки выпуклую сферическую поверхность, которая компенсирует продольное течение поверхностных слоёв металла, что, в свою очередь, уменьшит, либо вообще устранил появление утяжины [1, 93]. Операции технологического процесса при этом не изменяются и представлены на рисунке 5.44.



1 – билетировка, 2 – осадка сферической плитой, 3 – протяжка до диаметра 920 мм,

4 – протяжка до диаметра 5 – протяжка до итоговых размеров

Рисунок 5.44 – Основные операции скорректированного технологического процесса

Верхняя сферическая осадочная плита, чертёж которой показан на рисунке 5.45а, трёхмерная модель – на рисунке 5.44б, была выбрана из инструментального парка КППЦ.

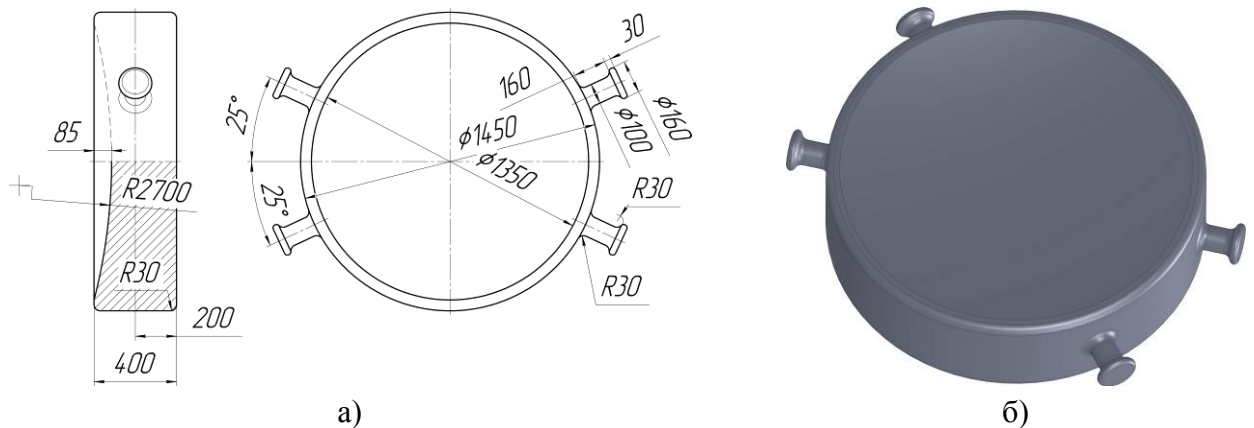


Рисунок 5.45 – Верхняя сферическая осадочная плита

Расположение билета в сферических осадочных плитах показано на рисунке 5.46а, а итоговая форма осаженной заготовки – на рисунке 5.46б.

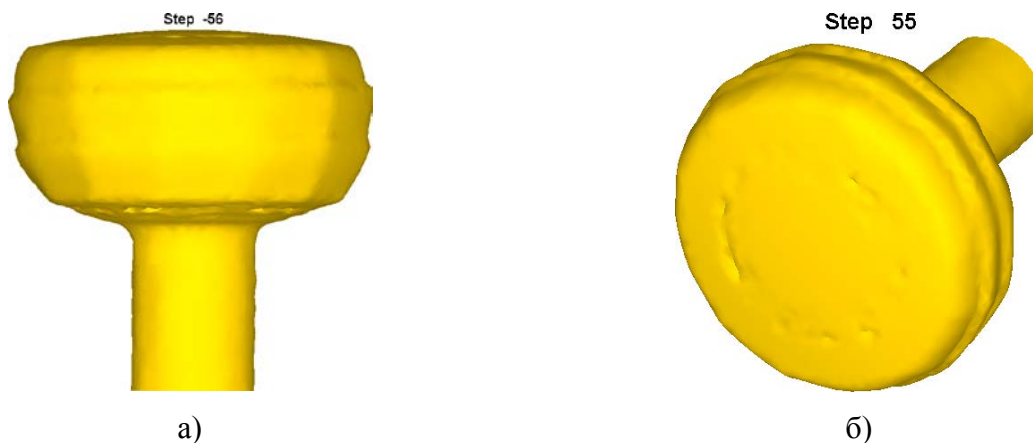


Рисунок 5.46 – Внешний вид билета после осадки сферической плитой

Кроме использования сферической плиты технологический процесс не претерпел других изменений. Размеры полученного билета показаны на рисунке 5.47а, как видно, они практически не отличаются от размеров, полученных при использовании верхней плоской плиты. Некоторое увеличение диаметра после осадки связано с тем, что при использовании сферической плиты боковые области билета испытывают несколько большую деформацию (а, следовательно, и вытяжку), чем центральная область. Величина этой разницы показана на рисунке 5.47б и составляет порядка 50 мм.

Из рисунков видно, что наплывы в передней части билета, которые появлялись при осадке плоской плитой и последующей протяжки, и в итоге вызывали появление утяжины, не

наблюдаются. Выгнутая поверхность передней части заготовки не позволила металлу с боковых областей выйти за границы профиля и начать образование вогнутой полости.

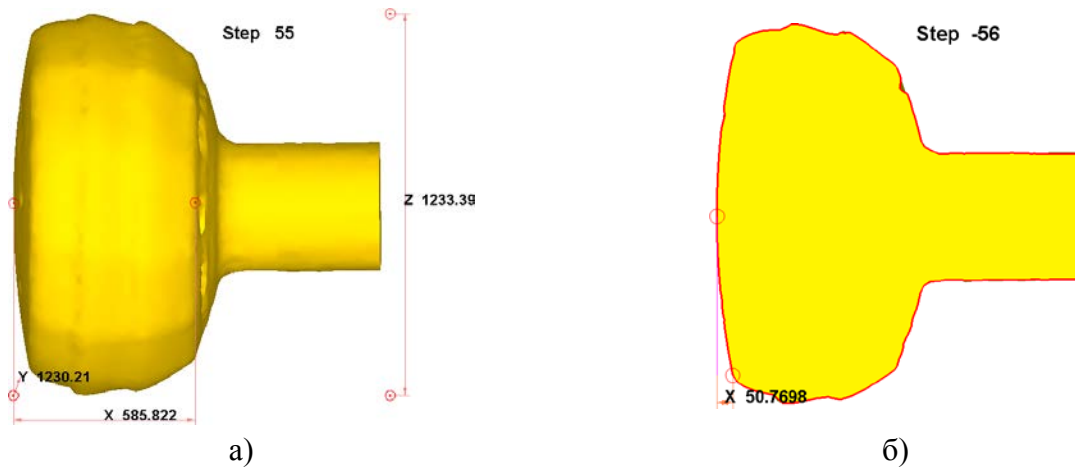


Рисунок 5.47 – Размеры билета после осадки сферической плитой

Внешний вид билета после протяжки до промежуточного квадрата изображён на рисунке 5.48а, продольное сечение – на рисунке 5.48б.

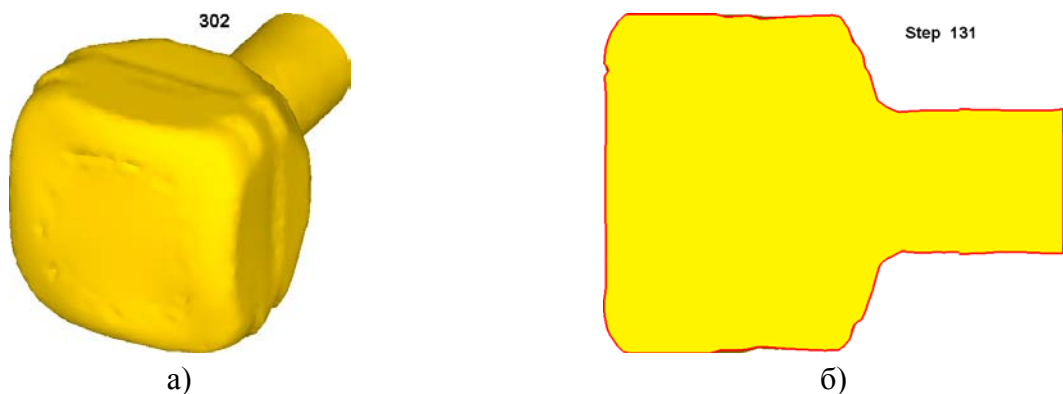


Рисунок 5.48 – Внешний вид и продольное сечение поковки после протяжки до промежуточного квадрата

Далее следовала протяжка до круглого сечения, внешний вид поковки показан на рисунке 5.49а, а продольный разрез – на рисунке 5.49а. Из них видно, что развитие утяжины также не происходит. Причиной этого помимо исходной формы после предыдущей операции, была и последовательность протяжки. Она начиналась не с передней, а с донной части поковки, при этом величина последней подачи (когда обжималась передняя часть) составляла как минимум $1/2$ от ширины бойка, а часто – $2/3$ и более. При этом происходило увеличение площади контактной поверхности и силы контактного трения на позволяли поверхностному

слою металла сильно продвигаться в продольном направлении (увеличивалось течение в радиально, направленном к центру поковки, направлении).

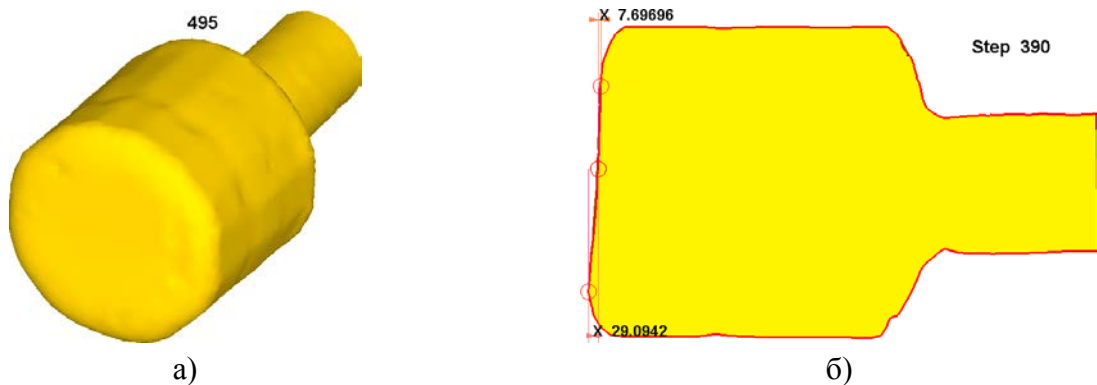


Рисунок 5.49 – Внешний вид и продольное сечение поковки после протяжки до круглого сечения

Однако некоторое искажение передней части поковки всё же произошло, что наглядно видно на рисунке 5.48б. Причиной образовавшегося скоса в некоторой неравномерности вытяжки между верхним бойком (где она больше) и нижним, а также небольшим искривлением осажённой заготовки.

Итоги промежуточной протяжки поковки показаны на рисунке 5.50. Из них видно, что образование утяжины не произошло, а наоборот, передняя часть поковки имеет выгнутую форму, с величиной выступа практически в 100 мм.

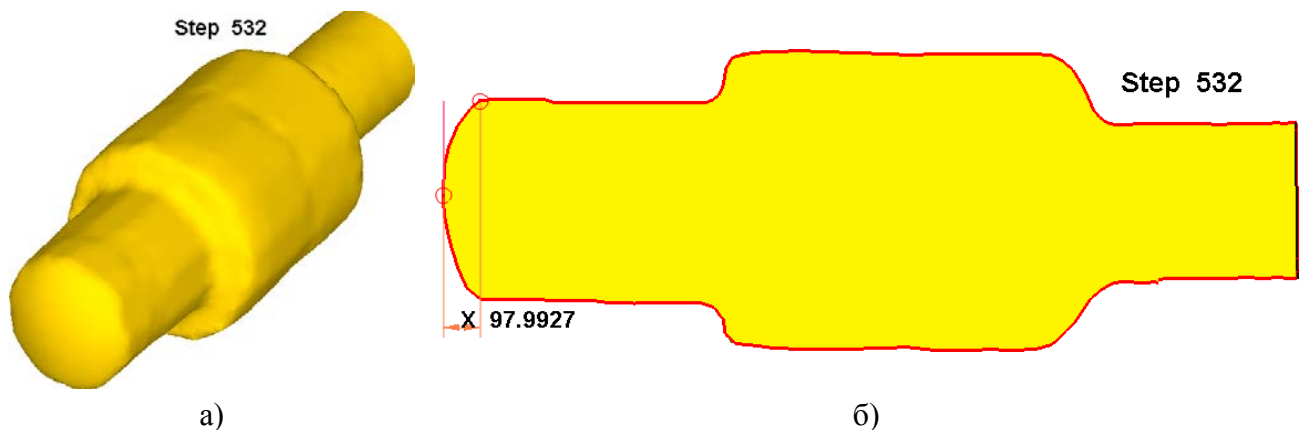


Рисунок 5.50 – Внешний вид и продольное сечение поковки после разметки и протяжки

Дальнейшая протяжка начиналась с середины поковки, как показано на рисунке 5.51. Это было сделано для создания в передней части поковки подобия фланца, длина которого составляла порядка $\frac{2}{3}$ и более от ширины бойка в начале процесса протяжки. Что должно было облегчить выбор значений дальнейших подач: при применении протяжки от цапфы (как в

предыдущем проходе) вследствие возросшей длины поковки возникла бы необходимость просчёта величины подачи, т.к. стандартные значения в $2/3$ от ширины бойка могли привести к образованию фланца длиной менее необходимой.

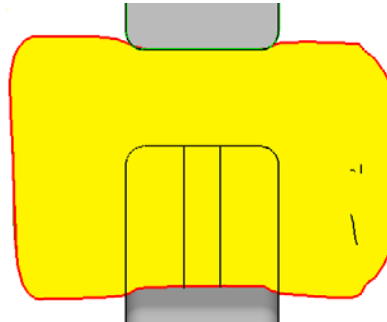


Рисунок 5.51 – Промежуточное обжатие

Напряжённое состояние поковки при дальнейшей протяжке в целом мало отличается от состояния при существующей технологии, т.к. применяется такой же рабочий инструмент и те же режимы обжатий, изменения касаются последовательности подач. Исключение составляла операция разметки поковки: было сделано предположение, что трещины в периферийном слое в месте перехода шейки валька в бочку вызваны несоблюдением технологии: разметка осуществлялась не перижимкой, а верхним бойком. Учитывая, что прибыльная часть поковки к этому моменту уже успевала охладиться (особенно поверхность и прилегающие к ней слои), это могло вызвать появление значительных растягивающих напряжений, которые и вызывали появление трещин. Распределение максимальных главных напряжений на поверхности и в продольном сечении показано на рисунке 5.52.

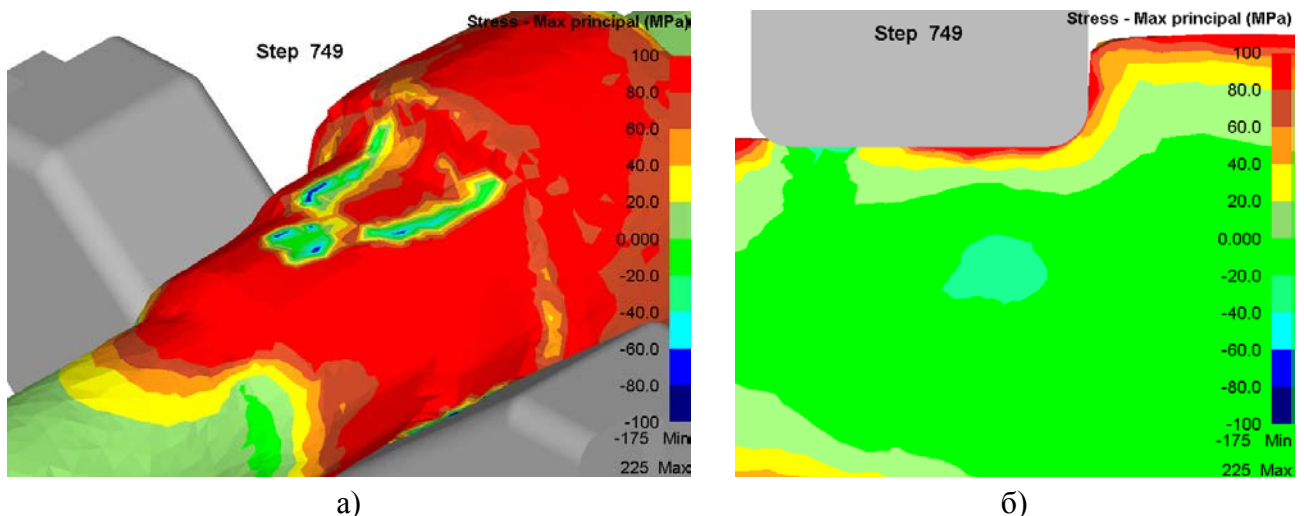


Рисунок 5.52 – Распределение максимальных главных напряжений при разметке

Картина напряжённого состояния подтверждает высказанное предположение: высокие значения растягивающих напряжений в приповерхностном слое под верхним бойком. Можно сделать вывод, что исключение операции разметки (в частности отказ от инструмента пережимки) негативно сказывается на напряжённом состоянии металла поковки: приводит к появлению высоких растягивающих напряжений, которые, в свою очередь, могут вызвать трещин и разрывов в приповерхностном слое в области будущих шеек вала

Внешний вид полученной поковки показан на рисунке 5.53. Как видно, торцевая утяжина отсутствует, в остальном поковка идентична полученной без использования сферической плиты.

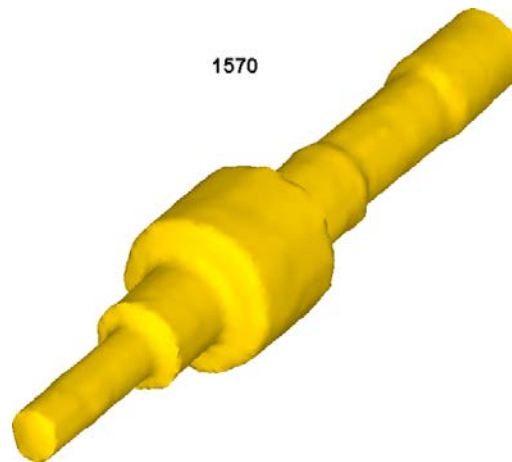


Рисунок 5.53 – Внешний вид полученной поковки

Моделирование показало, что применение верхней сферической осадочной плиты и изменение последовательности подач при протяжке, позволяет устранить появление утяжины в передней части поковки.

Изменение последовательности подач

Кроме использования сферической осадочной плиты также был рассмотрен вариант изменения последовательности подач заготовки при протяжке [95]. Данный способ позволяет не применять дополнительный рабочий инструмент. При этом моделирование осуществлялось не до конца всего процесса, а вплоть до разметки передней части поковки. Причиной прекращения моделирования был тот факт, что к указанному моменту происходит наибольшее формоизменение передней части поковки, вследствие чего становится ясно, возникнет ли торцевая утяжина, или нет.

В исходном варианте протяжка начиналась с передней части поковки как показано на рисунке 5.54а. Даже при первоначальной подаче на $2/3$ ширины бойка и последующей относительной подаче равной $0,6$ возникало значительное продольное течение внешних слоёв металла поковки, что приводило к появлению торцевой утяжины. Для устранения появления данного дефекта протяжка начиналась с задней части заготовки, как изображено на рисунке 5.54б. При этом величина относительных подач изменялась в диапазоне $0,4 - 0,7$ чтобы перед последним в проходе обжатием в передней части поковки образовывался фланец длиной порядка $1/3 - 1/4$ от ширины бойка (рисунок 5.54в). С начала операции и до получения промежуточного квадрата кантовка осуществлялась в конце каждого прохода на 90° , затем поковка поворачивалась на 45° , для сбивки рёбер, после чего вновь следовала протяжка с кантовкой на 90° в конце прохода. Далее снова производилась кантовка на 45° и протяжка до получения восьмигранника. В конце операции кантовка производилась после каждого обжатия: у восьмигранника сглаживались углы до получения круглого профиля.

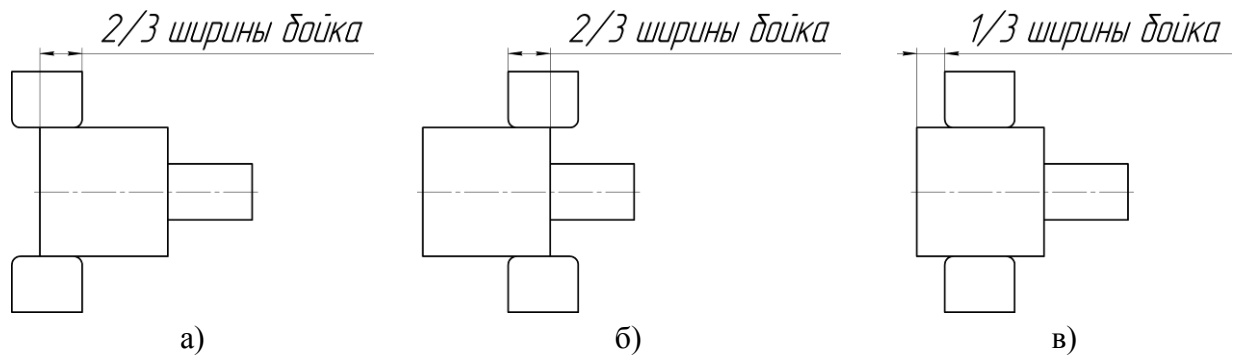


Рисунок 5.54 – Различные варианты положения заготовки в начале протяжки

Внешний вид полученной после протяжки поковки показан на рисунке 5.55а, продольный разрез – на рисунке 5.55б.



Рисунок 5.55 – Внешний вид и продольное сечение поковки после промежуточной протяжки

Как видно из рисунков, при протяжке не удалось полностью предотвратить появление вогнутой полости в передней части поковки, но произошло изменение её формы: теперь она не симметричная, одна из сторон значительно выдаётся в продольном направлении, в то время как с противоположной стороны направлена в обратную сторону.

Дальнейшая протяжка осуществлялась с задней части заготовки с кантовкой после каждого единичного обжатия. После достижения обжимаемым участком круглого сечения меньшего диаметра производилась подача. Всего было выполнено два прохода, при этом второй начинался с передней части заготовки. В первом проходе перед финальной подачей произошло образование фланца на передней части заготовки. Внешний вид полученной поковки показан на рисунке 5.56а, продольный разрез с размерами полости в передней части – на рисунке 5.56б.

Получившаяся вогнутость также сохраняет несимметричную форму, при этом она занимает меньшую область, чем возникшая при предыдущей протяжке, что с меньшей вероятностью приведёт к дальнейшему образованию свища.

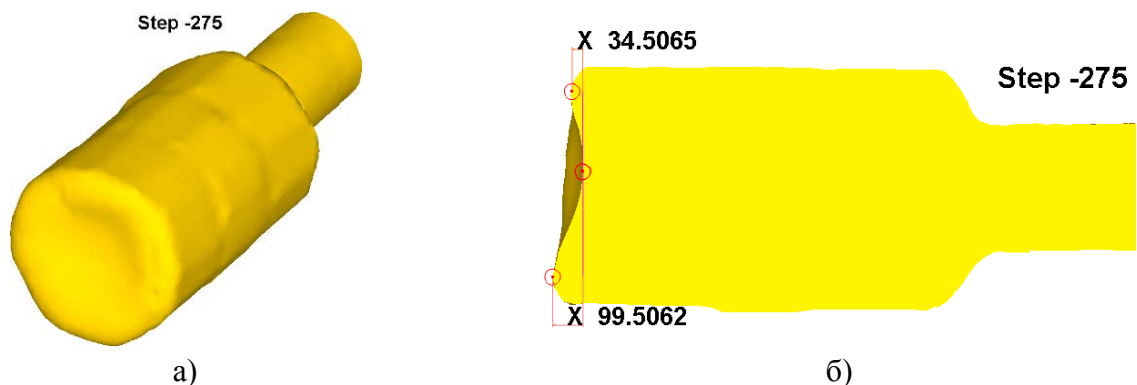


Рисунок 5.56 – Внешний вид и продольное сечение поковки после протяжки

При дальнейшей ковке подача осуществлялась на всю длину размечаемой передней части. Обжатия продолжались до появления хорошо заметного фланца. При этом происходило продольное течение металла осевой зоны поковки в продольном направлении, которое практически полностью заполнило вогнутость. Далее происходило обжатие самого фланца, которое ввиду небольших его размеров, не привело к значительному увеличению размеров полости. Дальнейшие подачи осуществлялись со стандартными значениями (порядка $1/2 - 2/3$ от ширины бойка) и также не привели к образованию полости. Внешний вид поковки показан на рисунке 5.57а, продольный разрез – на рисунке 5.57б.

Как и предполагалось, произошло закрытие полости и предотвращение появления свища. При этом передняя часть поковки имеет неправильную скошенную форму, однако это не должно сильно влиять на дальнейшую протяжку. Вследствие неправильной формы может

возникнуть неравномерный уков, однако это произойдёт в самой передней области, которая после получения готовой поковки обрубается и, таким образом, не влияет на качество валка.

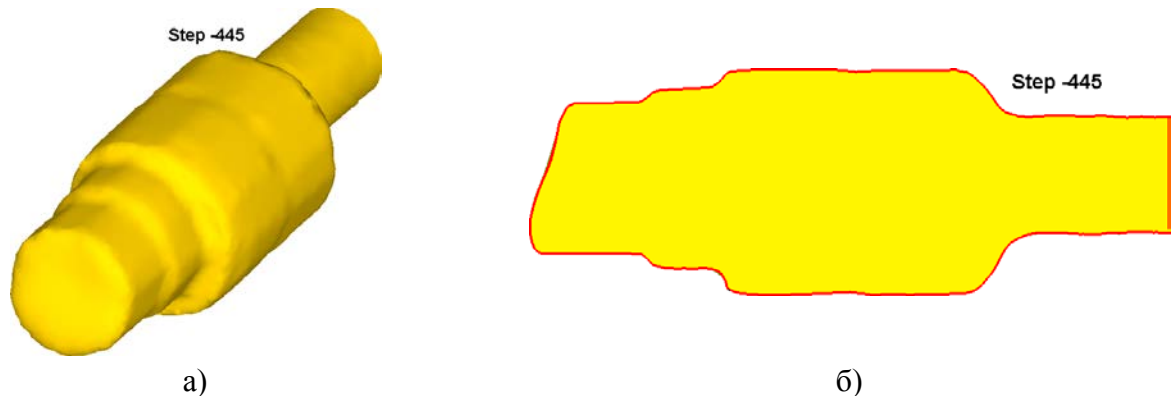


Рисунок 5.57 – Внешний вид и продольное сечение поковки после оттяжки шейки

Моделирование показало, что даже с существующей технологией возможно избавиться от появления утяжины в передней части поковки. Для этого необходимо изменить последовательность подач заготовки при протяжке после осадки: если протяжка начинается с передней части необходимо использовать максимальные значения подач и единичных обжатий, это позволит увеличить течение металла в радиальном направлении к центру поковки и уменьшить течение поверхностных слоёв в продольном направлении, что, в свою очередь, уменьшит размеры возникающей утяжины. После уменьшения диаметра поковки (в частности при протяжке до размеров под разметку) имеет смысл начинать протяжку с задней части поковки, выбирая величины подач таким образом, чтобы перед финальной подачей в передней части поковки сформировался своеобразный фланец длиной в $1/4 - 1/3$ от ширины бойка. Также необходимо на всех стадиях протяжки контролировать размеры утяжины на передней части поковки: чем меньше её глубина, тем выше вероятность предотвращения её перехода в свищ.

Применение сферической осадочной плиты позволяет значительно уменьшить вероятность появления утяжины, т.к. после осадки передняя часть поковки уже будет иметь выгнутую поверхность, которая будет компенсировать продольное течение поверхностных слоёв металла при протяжке. При этом возможно применение стандартных величин подач и единичных обжатий.

Также моделирование позволяет сделать предположение о необходимости введения дополнительного подогрева в финальной операции протяжки, т.к. температура поковки приближается к нижней ковочной, а иногда и опускается ниже неё.

Заключение

1. Проведён анализ путей совершенствования технологических процессовковки валов с применением компьютерного моделирования.
2. На примере осадки цилиндрических образцов проведено сравнение программных пакетов конечно-элементного моделирования Simufact Forming и DEFORM. На основе наилучшего соответствия модели реологических свойств задачам работы выбран комплекс DEFORM.
3. Разработана методика обработки справочных данных для построения математической модели реологических свойств материалов для применения в программном комплексе DEFORM. Используя данную методику, созданы модели для жаропрочных сплавов ХН56ВМТЮ (ЭП199) и ХН62ВМЮТ (ЭП708).
4. Разработана методика оценки деформации металла при помощи формоизменения пробного объёма, позволяющая совместно с картинами распределения деформаций, получаемых при моделировании, наглядно показать потоки металла в теле заготовки, в зависимости от способа деформирования.
5. Оценено влияние различных типов бойков на распределение деформаций и течение металла при протяжке цилиндрических заготовок. При одинаковой степени деформации применение бойков, обеспечивающих дополнительные макросдвиги, позволяет увеличить области с более высокими значениями накопленных деформаций по всему объёму поковки.
6. Установлено влияние технологических факторов процессаковки вала на радиально-обжимной машине на напряжённо-деформированное состояние металла в осевой зоне поковки: увеличение величины угла заходного участка и продольной подачи обеспечивает повышение значений интенсивности напряжений и накопленных деформаций. На основе факторного вычислительного эксперимента получены уравнения множественной линейной регрессии, позволяющие получить значения интенсивности напряжений и накопленных деформаций в осевой зоне поковки без проведения компьютерного моделирования.
7. Разработаны варианты вырезных бойков для протяжки круглых штанг диаметром 170 мм в условиях АО «Металлургический завод «Электросталь», позволяющие увеличить области сжимающими напряжениями в поковках, тем самым уменьшить возможность появления трещин в осевой зоне.
8. Предложены изменения режимов обжатий для радиально-обжимной машины, применяемой АО «Металлургический завод «Электросталь», позволяющие использовать для получения полых валов плоские бойки, взамен вырезных. При использовании обоих типов бойков распределение конечных деформаций при обработке отличается незначительно, но при вводе дополнительного проглаживающего прохода плоские бойки являются более

технологичными: позволяют охватывать более широкий сортамент продукции и проще в изготовлении.

9. Разработаны изменения технологического процесса ковки валка для сортопрокатного стана в условиях ОАО «ЭЗТМ»: изменение последовательности подач заготовки, увеличение числа подогревов и применение сферической осадочной плиты, позволяющие устранить появление таких дефектов как торцевые утяжины и подприбыльные кольцевые трещины.

Список литературы

1. Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства, издание второе переработанное. М. Машиностроение, 1976. – 560с.
2. Полухин П.И., Тюрин В.А., Давидков П.И., Витанов Д.Н. Обработка металлов давлением в машиностроении. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1983. – 279 с.
3. Банкетов А.Н., Бочаров Ю.А., Добринский Н.С. и др. Кузнечно-штамповочное оборудование. – М.: Машиностроение, 1982. – 576 с.
4. Бочаров Ю.А. Кузнечно-штамповочное оборудование. – М.: Академия, 2008. – 480 с.
5. Рудаков Б.П., Силичев Е.В., Степанов А.П., Атрошенко А.П., Гоффеншефер В.С. Ковка и штамповка на специализированном оборудовании. – 3-е изд. Перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 96 с.
6. Тарновский И.Я. Свободная ковка на прессах / И.Я. Тарновский, В. П. Трубин, М. Г. Златкин.- М.: «Машиностроение» 1967. – 328с.
7. Ю. А. Титов, А. Ю. Титов. Свободная ковка. Основные операции и технологии – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 73 с.
8. Охрименко Я.М. и Тюрин В.А. Теория процессов ковки. Учеб. пособие для вузов. М., «Высшая школа», 1977. – 295 с.
9. Антощенко Ю.М., Тюрин В.А., Барсуков В.П. Ковка поковок из слитков. – Электросталь: ЭПИ МИСиС, 2006. – 380 с.
10. Semiatin S.L.. ASM Metals HandBook Vol. 14 - Forming and Forging. Volume editor S.L. Semiatin. ASM International. Materials Park, Ohio, 2002. – 2110 p.
11. Семенов Е.И. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т.– Т.1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. М.: Машиностроение. 1985.– 568 с.
12. Тюрин В.А. Разновидности процессов кузнечной протяжки // Кузнечно-штамповочное производство. – 2009. – № 9. – С. 5 – 8.
13. Алиев И.С., Жбанков Я.Г., Периг А.В. Факторы, влияющие на параметры ковки крупных поковок // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т.15. – №1. – с. 27–45.
14. Тюрин В.А. Инновационные технологии ковки с применением макросдвигов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2007. – № 11. – С. 15–20.
15. Тюрин В.А., Лазоркин В.А., Поспелов И.А и др. Ковка на радиально-обжимных машинах. М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.

16. Дмитриева А.Я. Совершенствование технологии радиальнойковки цилиндрических заготовок из спеченного сплава на основе вольфрама: Автореф. дис. канд. техн. наук. - Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 18 с.
17. Володин А.М., Лазоркин В.А., Сорокин В.А., Петров Н.П., Богдановский А.С. Новые технологии и оборудование для радиальнойковки слитков // Кузнечно–штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2006. – № 10.– с.22 –27.
18. Патент РФ №2003131236/02, 23.10.2003. Ахтонов С.Г., Лазоркин В.А., Лазоркина С.А., Лосицкий А.Ф., Ноздрин И.В., Рождественский В.В., Филиппов В.Б., Черемных Г.С. Четырехбойковое ковочное устройство // Патент России № 2257278, 2005 Бюл. №21.
19. Лазоркин В.А. Технология четырёхстороннейковки слитков // Техномир.–2007.– №6.-с.8 – 10.
20. Тюрин В.А., Мохов А.И. Теория обработки металлов давлением. Под ред. проф. В.А. Тюрин. Учебник для вузов. – Волгоград: РПК «Политехник», 2000. – 416 с.
21. Чиченев Н.А., Кудрин А.Б., Полухин П.И. Методы исследования процессов обработки металлов давлением (экспериментальная механика) М.: Металлургия, 1977. – 312 с.
22. Смирнов-Аляев Г.А., Чичкидовский В.П. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. Л., «Машиностроение», 1972. – 360 с.
23. Воронцов В.К., Полухин П.И., Белевитин В.А., Бринза В.В. Экспериментальные методы механики деформируемых твердых тел (технологические задачи обработки давлением). М.: Металлургия, 1990. – 480 с.
24. Ивлев Д. Д. Механика пластических сред. Т. 2. Общие вопросы. — М.: Физматлит, 2002. – 448 с.
25. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. – 420 с.
26. Колмогоров В.Г. Механика обработки металлов давлением. Учебник для ВУЗов. 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург: Издательство Уральского государственного технического университета – УПИ, 2001. – 836 с.
27. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Изд. 4-е, перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
28. Панфилов Г.В. Аналитическое описание поля линий скольжения при осадке цилиндра с вырезом // Известия ТулГУ. 2014. С. 107-117.
29. Кудрин А.Б., Полухин П.И., Чиченев Н.А. Голография и деформация металлов. М., Металлургия, 1982. 152 с.
30. Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. СПб.: Изд-во СПбГПУ. – 2004 с.

31. Амосов А. А., Дубинский Ю. А., Копченкова Н. В. Вычислительные методы для инженеров: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 1994. – 544с.
32. Furrer D.U. and Semiatin S.L. ASM Handbook, Volume 22A: Fundamentals of Modeling for Metals Processing. ASM International. Materials Park, Ohio, 2009. – 803p.
33. Furrer D.U. and Semiatin S.L. ASM Handbook, Volume 22B: Metals Process Simulation. ASM International. Materials Park, Ohio, 2010. – 695p.
34. Самарский А.А. Введение в численные методы. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 272 с.
35. Амосов А.А. и др. Вычислительные методы для инженеров – М: Высшая школа, 1994г. – 544 с.
36. Kobayashi S., Oh Soo-Ik, Altan T. Metal Forming and the Finite-Element Method. New York, Oxford University press, 1989. – 378p.
37. Розин Л.А. Метод конечных элементов. // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – №4, Т.6. с. 120 – 127.
38. Боровков А.И., Бурдаков С.Ф., Клявин О.И., Мельникова М.П., Михайлов А.А., Немов А.С., Пальмов В.А., Силина Е.Н. Компьютерный инжиниринг: учеб. пособие. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 93 с.
39. Скрипаленко М.М., Скрипаленко М.Н.. К вопросу выбора программных продуктов для моделирования процессов обработки металлов давлением // Металлург. – № 1. – 2013г. – с.20-23.
40. Скрипаленко М.М., А.А. Сидоров, В.Е. Баженов, М.Н. Скрипаленко, И.А. Иванов. О возможности применения DEFORM для моделирования сквозных технологических процессов производства металлопродукции. // Труды международного форума «Инженерные системы», Москва, 10-11 апреля 2012 г. , М.: Макс пресс, с. 214-218.
41. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов – М.: Мир, 1979. – 392 с.
42. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твёрдого тела. Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 328 с.
43. Кацикаделис Дж. Т. Граничные элементы: теория и приложения: пер. с англ.– М: Издательство АСВ, 2007. – 336 с.
44. Мареев В.В., Станкова Е.Н. Основы метода конечных разностей. СПб.: Изд-во С.-Петерб. Ун-та, 2012. – 64с.
45. Buijk A.J. Finite Volume (FV) and Finite Element (FE) integration in Simufact.forming. [Электронный ресурс]. URL: http://www.simufact.de/en/ressource/data_article/Simufact_A_Finite_Volume_and_Finite_Element_Integration.pdf (дата обращения: 15.2.2015).

46. Demirdzic I., Muzaferija S. Finite-Volume Method for Stress Analysis in Complex Domains// Int. J. for Numerical Methods in Engineering, vol 37. 1994. p. 3751-3766.
47. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975 – 543 стр.
48. Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1983. – 351с.
49. Биба Н.В., Лишний А.И. Стебунов С.А. QForm – программа моделирования процессов формоизменения в промышленных условиях // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – №8-9. – с. 49 – 54.
50. Ромашкин А.Н. Разработка сквозного технологического процесса производства заготовок для машиностроения на основе компьютерного моделирования // Metallurg. – 2014. – №9. – с. 109 – 117.
51. Мордвинцев П.С. Моделирование технологических процессов свободной ковки крупных слитков с помощью QForm3D [Электронный ресурс]. URL: http://qform3d.ru/files_ru/2008_0003.pdf (дата обращения: 15.02.2015)
52. Марков О.Е. Совершенствование технологического процесса ковки крупных валов на базе DEFORM–3D. Труды международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2011» Москва, 2011. с.142–147.
53. Gonzalez J.R., David P.F., Cordon J., Llanos J.M. FEM simulation of the new radial forging device process at Sidenor. Proc. 17th IFM 2008, Nov. 3–7 Santander, Spain, p. 237–243.
54. Жбанков Я.Г., Шимко В.И., Таган Л.В., Шкира А.В. Исследование процесса протяжки заготовок бойками со скосом. Кузнечно – штамповочное производство. Обработка металлов давлением. №1, 2013г. с. 38–40.
55. Kukuryk M. Analysis of deformation and damage evolution in hot elongation forging. Archives of Metallurgy and Materials. Vol. 57 (Iss.2), 2012, p.417–424.
56. Смайлова Н. Т., Машеков С.А., Нуртузаев А. Е. Моделирование методом конечных элементов напряженно деформированного состояния заготовки при протяжке в трапецевидных бойках. Тяжелое машиностроение, № 10, 2013, стр. 13 – 18.
57. Стяжин А.Н., Сидоров А.А., Стяжин В.Н., Волчков В.М. Моделирование процесса горячей деформации биллета с учетом геометрии внутренних дефектов [Электронный ресурс]. URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es11_vgtu.pdf (дата обращения: 10.05.2014)
58. Deform 3D V10.1 System Documentation. Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC). Columbus, Ohio. 2010, – 617 с.
59. Simufact.forming. Keference Manual. Simufact engineering gmbh. Hamburg. 2012, – 300 с.

60. Леванов А.Н. и др. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1975. – 352 с.
61. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов., М. «Металлургия», 1976. 488 с.
62. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973. – 224 с.
63. Кроха В.А. Кривые упрочнения металлов при холодной деформации. М.: Машиностроение, 1968. – 131 с.
64. Масленков С.Б. Жаропрочные стали и сплавы. Справочное издание. М.: Металлургия, 1983. – 192 с.
65. Таупек И.М., Лисовский А.В. Моделирование процессов горячей обработки металлов давлением с целью управления структурами и свойствами получаемых заготовок для машиностроительного производства. Сборник трудов III Всероссийской молодёжной школы – конференции «Современные проблемы металловедения». 2013г., с. 245–254.
66. Лисовский А.В., Таупек И.М. Моделирование процессов горячей обработки давлением сплавов со структурно-свободным углеродом с целью изучения микрореологии течения металла. Сборник статей Международной научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы развития технических наук». - Уфа: РИЦ БашГУ, 2014. с. 76–80.
67. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 2003. – 784 с.
68. ГОСТ 7062-90. Поковки из углеродистой и легированной стали, изготавливаемые ковкой на прессах. Припуски и допуски.- М.: Издательство стандартов, 1989. – 58с.
69. Кобелев А.Г., Тюрин В.А., Шаронов М.А., Антощенков Ю.М. Теория и технология процессовковки и прессования: Составление чертежа поковки и разработка технологииковки: Учеб. – метод. Пособие. – М.: МИСиС, 2002. – 64с.
70. Колмогоров Г.Л, Мельникова Т.Е. Технологияковки и объемной штамповки: учеб. пособие – Пермь: Изд-во Перм.нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 34 с.
71. Евсюков С. А., Лутковский С. И., Стратьев В. К., Хациев Ю. Х. Основы технологии получения поволоков : учеб. пособие. МГТУ им. Н. Э. Баумана. - М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. - 42 с.
72. Золотухин Н.М. Нагрев и охлаждение металла. – М: Машиностроение, 1973. 192 с.
73. Быков В.В., Франценюк И.В., Хилков Б.М., Щапов Г.А. Выбор режимов нагрева металла. М.: Металлургия, 1980. – 168 с.

74. Технологическая инструкция по нагреву и подогреву слитков и заготовок под ковку И13 – 5.02 – 41 – 2011. ОАО «ЭЗТМ», 2011г. – 42 с.
75. Радюченко Ю.С. Ротационное обжатие. М.: Машиностроение, 1972. – 176 с.
76. Погорильчук А.Я. Моделирование технологического процесса радиальнойковки в программном комплексе DEFORM 3D. [Электронный ресурс]. URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es09_mgtu2.pdf (дата обращения: 10.02.2015)
77. Дмитриева А.Я. Определение влияния угла охвата заготовки при радиальнойковке на механические свойства изделия при помощи программного комплекса DEFORM-3D. [Электронный ресурс]. URL: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_es09_mgtu2.pdf (дата обращения: 10.02.2015)
78. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. Пер. с нем. М.: Мир, 1977. – 552 с.
79. Тюрин В.А. Методы планирования эксперимента. Раздел: Математическое планирование и обработка эксперимента первого порядка. Курс лекций. – Москва: МИСиС., 1979. – 78 с.
80. Гопенгауз Б.Е. Организация эксперимента. Электросталь, ЭПИ МИСиС ТУ, 2005. – 160 с.
81. Адлер Ю.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1971. – 239 с.
82. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали М.: Металлгиздат, 1963, – 600с.
83. Дзугутов Я.М. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., Металлургия, 1977. – 480с.
84. Дзугутов М.Я. Напряжения и разрывы при обработке металлов давлением . М.: Металлургия, 1974. – 280 с.
85. Маевский И.Л. Обработка давлением жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1964, 124 с.
86. Унксов Е.П., Овчинников А.Г. «Теорияковки и штамповки». – М.: Машиностроение, 1992. – 720 с.
87. Таупек И.М., Алексеев П.Л. Анализ технологического процессаковки–протяжки с помощью моделирования в DEFORM–3D.Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. Серия 2. Технология машиностроения и материалы. – М., МГТУ «МАМИ», №2(16), 2013, т.2, 423с. ISSN 2074-0530. с. 220–224.
88. ГОСТ 22838-77 Сплавы жаропрочные. Методы контроля и оценки макроструктуры [Текст].; Введ. с 01.01.1979. – Москва: Изд-во стандартов, 1978. – 27 с.

89. Ульянов Е.А. Коррозионностойкие стали и сплавы. Справочник. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1991. — 256 с.
90. Кнорозов Б. В., Усова Л. Ф., Третьяков А. В., Китаев Я.А., Филькин В.М., Шевченко А.А., Усов Г.А. Технология металлов и материаловедение. М.: Металлургия, 1987. — 800 с.
91. Таупек И.М., Алексеев П.Л. Анализ влияния технологических факторов ковки на РКМ на проработку осевой зоны поковки. Сборник научных и научно-практических докладов XII всероссийской научно-практической конференции аспирантов и студентов. Старый Оскол: СТИ НИТУ «МИСиС», 27 – 30 апреля 2015 г. с. 396 – 398.
92. Калинина З.М. Дефекты легированных сталей. М.: Металлургиздат, 1960, — 256с.
93. Бернштейн М.Л. Атлас дефектов стали. Пер. с нем. — М.: Металлургия, 1979. — 188 с.
94. Таупек И.М., Алексеев П.Л., Лисовский А.В. Применение сферической осадочной плиты для предотвращения образования осевых трещин и свищей при производстве поволоков валков. Сборник научных и научно-практических докладов XI Всероссийской научно-практической конференции аспирантов и студентов, посвящённой 35-летию СТИ НИТУ «МИСиС» и 60-летию образования Белгородской области. Старый Оскол 24–25 апреля 2014 г. с. 98 –101.
95. Таупек И.М., Алексеев П.Л., Лисовский А.В. Моделирование и анализ причин появления осевых трещин и свищей при производстве поволоков валков. Сборник научных и научно-практических докладов XI Всероссийской научно-практической конференции аспирантов и студентов, посвящённой 35-летию СТИ НИТУ «МИСиС» и 60-летию образования Белгородской области. Старый Оскол 24–25 апреля 2014 г. с. 101 – 104.

«Утверждаю»
технический директор
АО «Металлургический завод
«Электросталь»
И.В. Кабанов
« 22.08.16 »



АКТ

внедрения в производство результатов диссертационной работы Таупека Ивана Михайловича «Совершенствование технологических процессовковки валов на основе компьютерного моделирования».

Настоящий акт составлен в том, что на АО «Металлургическом заводе «Электросталь» внедрены и опробированы результаты диссертационной работы в кузнечно–прессовом цехе №2 на гидравлической прессе усилием 16 МН и радиально–ковочной машине SMX 600 усилием 12 МН.

Инженером кафедры ММТ Электростальского политехнического института – филиала Университета машиностроения методами компьютерного моделирования был проведён анализ напряженно–деформационного состояния поковок из сталей 12Х18Н10Т и Р6М5К5, получаемых на быстроходном прессе усилием 16 МН.

На основании полученных результатов были предложены и внедрены изменения технологического процесса и применяемого рабочего инструмента, позволившие повысить качество получаемой продукции.

Также методами компьютерного моделирования была оценена возможность применения на радиально-ковочной машине SMX 600 различных типов бойков: плоских однозаходных и вырезных с радиусной калибрующей поверхностью, при производстве однотипных полых поковок.

На основании полученных результатов были предложены и внедрены изменения режимов обжатий, позволяющие свести к минимуму отличия в форме и качестве получаемых поковок при использовании различных типов бойков.

Начальник кузнечно-прессового цеха №2

В.В. Куприн

Начальник КПЛ ЦИЛ

А.И. Дмитриев

Начальник ковочно-штамповочной группы
КПЛ ЦИЛ

С.Г. Глушенкова

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Электростальского
политехнического института – филиала
Университета Машиностроения
И.З. Вольшонов

2015 год.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы Таупека Ивана Михайловича в учебный процесс на кафедре ММТ Электростальского политехнического института – филиала Университета Машиностроения.

Настоящий акт подтверждает использование в учебном процессе результатов работы аспиранта Таупека И.М. на тему «Совершенствование технологических процессовковки валов на основе компьютерного моделирования».

Методики моделирования процессов обработки металлов давлением и исследования напряжённо–деформированного состояния заготовок применены в учебном процессе на кафедре Машиностроительных и металлургических технологий в рамках курсов «Моделирование процессов и объектов в металлургии», «САПР комплексов ОМД», «Физические основы упрочнения материалов», а также при подготовке курсовых и дипломных проектов, выпускных квалификационных работ студентами, обучающимися по специальностям «Машины и технология обработки металлов давлением», студентами бакалавриата по направлению «Металлургия», профилю «Обработка металлов давлением», по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», профилю «Технология машиностроения».

Результаты работ рассмотрены и рекомендованы к внедрению на заседании кафедры ММТ от 28 января 2015 года (протокол №1).

Зав.кафедрой ММТ

к.т.н., доц.

Аспирант

Лисовский А.В.

Таупек И.М.