

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Институт новых материалов и технологий
Кафедра «Обработка металлов давлением»

На правах рукописи

Замараева Юлия Валентиновна

Анализ приемов обработки, повышающих уровень сжимающих напряжений в процессах холодной осадки и прессования магния

Специальность 2.6.4. Обработка металлов давлением

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., профессор
Ю.Н. Логинов

Екатеринбург – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ПАТЕНТНО-ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....	9
1.1 Свойства, сферы применения и особенности деформации магния и его сплавов	9
1.2 Обзор способов пластической деформации магния и его сплавов.....	16
1.3 Компьютерное моделирование как средство выполнения расчетов задач обработки металлов давлением	36
1.4. Выводы и постановка задачи исследования.....	38
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БОКОВОГО ПОДПОРА НА ПЛАСТИЧНОСТЬ МАГНИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ ОСАДКЕ	40
2.1 Оценка напряженно-деформированного состояния при осадке магниевой цилиндрической заготовки в медной оболочке	40
2.2 Разработка приемов сборки композиционной заготовки для осадки цилиндрической магниевой заготовки в медном пояске	46
2.3 Исследование процесса осадки цилиндрической магниевой заготовки в медной оболочке без ее обжата	56
2.4 Выводы по главе.....	63
3 ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ МАГНИЯ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ.....	65
3.1 Анализ напряженно-деформированного состояния и свойств полосы, полученной методом неравноканального углового прессования при комнатной температуре.....	65
3.2 Разработка схемы многоканального углового прессования с повышенными коэффициентами вытяжек.....	70
3.3 Выводы по главе.....	75

4 РАЗРАБОТКА ПРИЕМОВ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ МАГНИЯ С ГАРАНТИРУЕМЫМИ СРОКАМИ БИОЛОГИЧЕСКОГО И ХИМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ.....	77
4.1 Исследование напряженно-деформированного состояния при испытании магниевых шаров, расположенных на кольцевой опоре и нагруженных гидростатическим давлением	77
4.2 Разработка способа изготовления шарового элемента клапана для буровых скважин	92
4.3 Использование метода обратного выдавливания для получения тонкостенных стаканов для биоразлагаемых стентов.....	96
4.4 Выводы по главе.....	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ	159

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Магний и его сплавы являются перспективными материалами для применения в области авиации, ракетно-космической техники, автомобилестроения, медицине и нефтяной промышленности.

Большое внимание направлено на рассматриваемую в данной работе холодную деформацию магния, которая имеет ряд преимуществ перед горячей.

В ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого президента Б.Н. Ельцина» (далее УрФУ) совместно с Институтом физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН (далее ИФМ УрО РАН) в настоящее время осуществляется разработка способов холодной деформации магния в условиях наложения высокого уровня напряжений сжатия и исследование свойств полученных изделий. В связи этим появилась необходимость в новых решениях краевых задач механики деформируемого тела, по результатам которых возможна оценка напряженно-деформированного состояния, температурного поля изделия в технологическом процессе, с возможностью сопоставления полученных результатов со свойствами реального продукта. Также появилась необходимость в разработке новых способов холодной деформации магния, с постановкой краевых задач посредством компьютерного моделирования, что позволило бы получить большой объем информации, рассмотреть и сопоставить большее количество альтернативных схем деформации, предотвратить появление дефектов и спрогнозировать качество изделия до того, как будет изготовлен инструмент. В связи с этим тема исследования, направленного на получение сведений из области деформации магния и разработку новых способов его деформации, является актуальной.

Степень разработанности темы. В ранее выполненных работах содержатся результаты экспериментальных и теоретических исследований в основном горячей деформации магния и его сплавов, исследована структура и текстура изделий, полученных различными способами горячей деформации.

Однако в перечисленных работах не рассматривается напряженно-деформированное состояние металла в процессах холодной деформации. В малой степени изучены процессы холодной деформации. Это обусловлено тем, что сам магний обладает низкой пластичностью. Сделана ставка на повышение пластичности за счет нагрева, при этом упуская из виду, что при нагреве в отличие от алюминия магний склонен к газонасыщению и потере механических свойств.

Целью работы является определение рациональных параметров формоизменения магния в условиях холодной деформации.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. Создать компьютерные модели процессов холодной деформации магния с использованием метода конечных элементов и провести моделирование в программном комплексе DEFORM-2D/DEFORM-3D/ABAQUS.

2. Провести анализ напряженно-деформированного состояния металла посредством компьютерного моделирования.

3. Получить закономерности формоизменения металла в различных условиях деформации, сравнить с экспериментальными данными.

4. Разработать новые способы холодной обработки магния, с предварительным их компьютерным моделированием.

Научная новизна работы заключается в определении рациональных параметров холодной деформации магния с применением приемов, повышающих уровень сжимающих напряжений. В том числе исследовано влияние оболочек различных форм и размеров на напряженно-деформированное состояние при холодной кузнечной осадке. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния при неравноканальном угловом многониточном прессовании магния. В результате расчетов сделано заключение о распределении деформаций при нагружении в тестовых испытаниях магниевых шаров как саморастворяющегося элемента запорной арматуры скважины для нефтегазодобычи.

Теоретическая значимость работы заключается в установлении связей между видами и параметрами холодной деформации магния, приводящими к созданию условий получения заданных продуктов.

Практическая значимость работы состоит в создании приемов сборки композиционных заготовок для холодной осадки магния, в разработке новых устройств и способов холодной деформации магния, что подтверждается актом внедрения ИФМ УрО РАН.

Методология и методы исследования

В работе использован современный метод решения прикладных задач обработки металлов давлением – метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе DEFORM и ABAQUS, ряд решений подвергнут экспериментальной проверке.

Положения, выносимые на защиту.

1. Влияние бокового подпора на пластичность магния при холодной кузнечной осадке.
2. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния полосы посредством трехмерной компьютерной модели процесса холодного неравноканального углового прессования и свойств полосы, полученной аналогичным методом в условиях реального эксперимента.
3. Разработанная схема многоканального углового прессования с повышенными коэффициентами вытяжек, позволяющая получать не только плоские заготовки, но и заготовки равноосного сечения, в том числе круглого, квадратного и иных сечений.
4. Анализ напряженно-деформированного состояния при испытании магниевых шаров, расположенного на кольцевой опоре и нагруженного гидростатическим давлением.
5. Разработанный способ изготовления шарового элемента клапана для буровых скважин, включающий изготовление оболочки из деградируемого материала (магния или магниевых сплавов) и заполнение оболочки недеградируемым материалом (сталью).

6. Анализ результатов решения задачи холодного обратного выдавливания в программном комплексе DEFORM тонкостенных магниевых стаканов.

Степень достоверности результатов работы в экспериментальной части подтверждена применением современных средств измерений и методов статистической обработки полученных данных, сравнением с известными аналогами из технической литературы.

В теоретической части – экспериментальной проверкой результатов вычислительного эксперимента.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: XLV международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения», г. Москва, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 2019; IV Международная молодежная научно-практическая конференция «Magnitogorsk rolling practice», г. Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2019; Юбилейная международная научно-практическая конференция "Современные инновации в области науки, технологий и интеграции знаний", г. Рудный, Рудненский индустриальный институт, 2019; IV Международная школа для молодежи "Материаловедение и металлофизика легких сплавов", г. Екатеринбург, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2019; Открытая школа-конференция стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы», г. Уфа, Башкирский государственный университет, 2020; V международная молодежная научно-техническая конференция «Magnitogorsk rolling practice», г. Магнитогорск, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2020; XLVII международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения», г. Москва, Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 2021; VII всероссийская научно-техническая конференция «Пром-инжиниринг», г. Москва, г. Челябинск, г. Новочеркасск, г. Волгоград, г. Сочи, Южно-Уральский Государственный Университет, 2021; Международная конференция «Физика и

технологии перспективных материалов-2021», Уфа, Башкирский государственный университет, 2021.

Основное содержание диссертационной работы изложено в 19 научных статьях, из них 5 опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК, 4 вошли в международные базы Scopus и Web of Science, а также в описании одного патента на изобретение.

Частично работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90051.

1 ПАТЕНТНО-ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1.1 Свойства, сферы применения и особенности деформации магния и его сплавов

Интерес к созданию и совершенствованию технологий обработки магния в мире увеличивается по мере освоения новых методов его извлечения из земной коры [1, 2, 3, 4]. В качестве примеров реализации таких методов можно упомянуть промышленную добычу магния из морской воды (Израиль, Мертвое море) и переработку техногенных отходов асбестового производства (Россия, Урал).

Магний и его сплавы имеют низкую плотность (данный материал легче стали и алюминиевых сплавов соответственно в 4,4 и 1,5 раза), высокую удельную прочность [5], а детали из магниевых сплавов отлично поглощают вибрацию. Коэффициент вибрационной прочности у них в 100 раз выше, чем у аналогичных элементов из алюминия, и в 20 раз больше, чем у стальных изделий. Кроме того, алюминиевые и стальные сплавы уступают магниевым по показателям удельной жесткости. Все это делает выгодным применение магния в области авиации, ракетно-космической техники и автомобилестроении при изготовлении деталей, подвергающихся поперечным и продольным изгибающим нагрузкам. Следует отметить, что в этих перспективных отраслях для магния в настоящее время исследования сосредоточены на снижении массы [6]. Например, по данным работы [7] уменьшение массы автомобиля на каждые 100 кг снижает расход топлива на 0,38 литра на 100 км и выбросы CO₂ на 8,7 г/км. Примеры применения магния включают компоненты кузова, шасси и интерьера, в том числе приборные панели, рулевые колеса, опоры двигателя, сиденья, раздаточные коробки и множество различных корпусов [8].

Магний и его сплавы привлекают большое внимание как перспективные материалы в области медицины из-за их хорошей биосовместимости и биоразлагаемости [9,10] для создания ортопедических имплантатов и элементов крепёжных конструкций, сердечно-сосудистых стентов и элементов скрепления тканей. Отметим, что биоразлагаемые металлы имеют преимущества перед

существующими биоразлагаемыми материалами, такими как полимеры, керамика или биоактивные стекла – в несущих конструкциях обладают более высокой прочностью на растяжение и значением модуля Юнга ближе к человеческой кости [11].

Сосудистые стенты из магния обычно служат временной опорой для суженных артериальных сосудов и постепенно разлагаются после полного ремоделирования сосудов [12]. Биоразлагаемые стенты обладают потенциалом преодоления таких побочных эффектов, как рестеноз и тромбоз внутри стента, которые часто возникают при использовании постоянных металлических стентов, например, из нержавеющей стали или сплава Ni-Ti [13]. Кроме того, некоторые тесты на животных [14-15] и предварительные клинические испытания на людях [16-17] демонстрируют, что стенты из магния безопасны для человеческого организма. Винты из магния и его сплавов обеспечивают временную фиксацию при переломах [18-19]. Авторами работы [20] оценена возможность использования винта из чистого магния в качестве биоразлагаемого материала при клиническом лечении некроза головки бедренной кости.

Количество вариантов применения магния в качестве самоуничтожающегося материала в различных технологиях постоянно увеличивается. Это обусловлено высокой скоростью растворения магния в жидких средах, содержащих ионы хлора и других галогенов. В нефтедобыче магниевые шары выполняют роль клапанов, временно запирающих скважины и саморастворяющихся под воздействием бурильных растворов [21-22]. Активация процесса производится созданием перепада давления после посадки шара в седло муфты. Под необходимую скорость растворения идет подбор химических составов самих магниевых сплавов [23]. Растворимые шары применяются в технологии гидравлического разрыва пласта [24]. Гидравлический разрыв пласта (ГРП) – технология, основанная на формировании трещин в массивах газо-, нефте-, водонасыщенных и других горных породах, а также полезных ископаемых под действием подаваемой в них под давлением жидкости.

Магний как материал, имеющий гексагональную плотноупакованную (ГПУ) кристаллическую решетку, обладает ограниченным количеством плоскостей скольжения, в частности, режимы деформации в Mg включают внутризеренное дислокационное скольжение по базисной, призматической и пирамидальной плоскостям, а также двойникование [25]. Базисное скольжение и $\{102\} \langle 101 \rangle$ двойникование при растяжении – режимы деформации, которые могут быть легко активированы при комнатной температуре, однако их недостаточно для однородной пластической деформации. Призматическое и пирамидальное дислокационное скольжение, а также другие способы двойникования, по сравнению со скольжением базисных дислокаций, активировать труднее, что в совокупности приводит к пониженной пластичности магния при комнатной температуре [26,27,28,29].

Другой причиной низкой пластичности магния является сильная базисная текстура, такая как $[0001]$ // нормальное направление (ND) в прокатанном листе или $\langle 100 \rangle$ // текстура направления выдавливания (ED), которая обычно создается во время термомеханической обработки. Сильная базисная текстура делает доступную базисную дислокацию скольжением еще более трудной для активации и работы, что приводит к низкой формовкости [25].

Для малопластичных металлов приходится разрабатывать специальные приемы повышения пластичности. В основном, усилия направлены на повышение уровня пластических свойств за счет повышения температуры, которая помогает активировать больше режимов деформации, включая скольжение по пирамидальным плоскостям кристаллической решетки [30,31]. Однако горячая пластическая деформация приводит к окислению поверхности полуфабрикатов из-за невысокой коррозионной стойкости магния, процессу газонасыщения металла и в его объеме [32], а также теряется эффект нагартовки металла, позволяющий увеличить прочностные свойства конечного продукта и увеличиваются затраты энергии на нагрев заготовок. Поэтому может иметь место такой подход, в котором обработка осуществляется в холодном состоянии, а пластичность увеличивается за счет повышения уровня сжимающих напряжений [33,34]. Как правило [34,36],

деформация в условиях высоких сжимающих напряжений предотвращает появление и развитие трещин в образце.

Как простейший вариант пластической обработки обычно применяется осадка, здесь пластичность магния иногда повышают за счет подпора со стороны обойм различного вида, охватывающих цилиндрическую заготовку из основного металла. Сама обойма является препятствием для пластического течения металла заготовки, что повышает уровень напряжений сжатия, в результате металл становится более пластичным [37,38].

Эффективной мерой для повышения пластичности магния и его сплавов является получение мелкозернистой (ультрамелкозернистой) структуры путем интенсивной пластической деформации (ИПД) при низких температурах [39,40,41]. Авторы исследований [42,43] предположили, что высокая пластичность магния при комнатной температуре достигается за счет возникновения зернограничного скольжения (ЗГС). В работе [44] был успешно обработан магниевый сплав ZK60 методом кручения под высоким давлением при комнатной температуре. За 5 витков кручение привело к равноосному зерну со средним размером менее 1 мкм, однородной микроструктуре с твердостью $HV \approx 124$ и сверхпластическому удлинению. Явление сверхпластичности также было выявлено в работе [45]. В частности, авторы выявили, что доминирующий режим деформации чистого магния сильно зависит от размера зерна: когда он уменьшается до порядка 1 мкм, основной режим деформации изменяется от скольжения дислокаций до скольжения между сгруппированными зёрнами, которое компенсируется вращением зерна и скольжением дислокаций. Эти согласованные процессы деформации и аккомодации откладывают возникновение локальной концентрации напряжений и значительно повышают пластичность чистого магния при комнатной температуре. Исследование авторов работы [46] направлено на выявление механизмов деформации сверхпластичности при сжатии при комнатной температуре в нанокристаллическом магнии, где в результате магний продемонстрировал деформацию сжатия $> 120\%$. Испытания на сжатие при скоростях деформации от 10^{-4} до 10^{-1} с^{-1} показали чувствительность к скорости

деформации. В работе [47] проведено исследование возможности достижения сверхпластических свойств в листах магниевого сплава ZK60 с помощью ИПД путем сочетания традиционной экструзии, сжатия и последующей изотермической прокатки. В результате установлено, что данный технологический маршрут пригоден для достижения размера зерна 3,7 мкм, а листы с такой структурой демонстрируют превосходные сверхпластические свойства. При 250°C общее удлинение составляло 1330% при $1,4 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и 1150% при $2,8 \times 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Относительное удлинение 417% было достигнуто при 275°C и $1,4 \times 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, что соответствовало достижению сверхпластичности с высокой скоростью деформации.

Стремясь достичь высокого уровня деформации в холодном состоянии можно создать ее многопроходным накоплением деформации с небольшим обжатием за проход [48]. В исследовании [49] в качестве исходного материала выбраны горячекатаные проволоки из чистого магния (чистота: $\text{Mg} \geq 99,98\%$) диаметром 2,0 мм. Проволока обрабатывалась последовательными проходами холодного волочения с относительным обжатием $\sim 8\%$ за проход. В результате была получена холоднотянутая проволока диаметром 0,625 мм. Авторы отметили, что переход от малоугловой границы зерен к большеугловой, а не прямое формирование большеугловой границы зерен, отражал непрерывный процесс динамической рекристаллизации при продолжающемся холодном волочении. Средний размер зерна составлял примерно до 3,1 мкм при 90% обжатии. Механические свойства проволоки значительно повышены, достигнут предел текучести 214,5 МПа и предел прочности 256,9 МПа, удлинение при этом составило около 9,5%.

Относительно недавно получил развитие в технологии обработки металлов давлением такой способ как равноканальное угловое прессование (РКУП) [50,51,52]. Суть процесса РКУП заключается в накапливании деформации посредством изменения направления пластического течения металла без изменения при этом исходной формы заготовки. В результате полученную

заготовку можно снова подвергать деформации в той же самой инструментальной оснастке.

Метод неравноканального углового прессования (НРКУП), где круглая заготовка помещается в полость контейнера, который снабжен щелевой матрицей, направляющей металл под углом 90° к оси прессования [53], по отношению к РКУП имеет тот недостаток, что полученную заготовку нельзя использовать для повторного прессования. Однако в данном случае появляется возможность изменить форму полученной заготовки в сторону приближения к форме готового продукта.

Часто для деформации магния применяется метод обратного выдавливания [54], который имеет схему напряженного состояния, благоприятную для создания условий повышенной пластичности.

Так же стоит подробнее рассмотреть такое явление в обработке магния как динамическая рекристаллизация (ДР) – особый вид рекристаллизации, происходящий при пластической деформации металлов при повышенных температурах, механизм разупрочнения, который восстанавливает пластичность материала, упрочненного деформацией. Большой объем экспериментальных исследований посвящен ДР поликристаллического магния, поскольку она оказывает решающее влияние на деформационное поведение этого материала при повышенных температурах [55]. Большинство промышленных деформируемых сплавов магния превращаются в полуфабрикаты путем горячей обработки, где ДР можно эффективно использовать как инструмент для управления текстурой и регулирования микроструктурой материала [56].

В работе [57] было исследовано рекристаллизационное поведение монокристаллов магния, подвергнутых плоско деформированному сжатию (ПДС) вдоль оси “с” при 200°C и 370°C , постоянной скорости деформации 10^{-3} c^{-1} и логарифмической деформации $\varepsilon = -1$. Микроструктура образца, деформированного при 200°C , характеризовалась высокой плотностью двойников экстенсивного и компрессионного типа, а также двойников, образованных внутри первичных двойников в результате вторичного двойникования, при этом некоторые двойники

сжатия в образце были преобразованы в рекристаллизованные полосы, содержащие новые зерна. Во время деформации при 370°C механическое двойникование было менее интенсивным, чем при 200°C, и практически все двойники были преобразованы в рекристаллизованные макроскопические полосы. Механизм динамической рекристаллизации в полосах был идентифицирован как “непрерывный”, основанный на интенсивном динамическом восстановлении с образованием новых зерен. Авторы отметили, что в случае деформации при 370°C рекристаллизованные полосы впервые были обнаружены при $\varepsilon = -0,09$, а с увеличением деформации до $\varepsilon = -1$ объем динамически рекристаллизованного материала в полосах увеличивался, при этом полосы становились шире. Также авторы отметили увеличение объемной доли новых зерен в двойниковом материале после ПДС при 370°C, чем при 200°C, поскольку рекристаллизация является термически активируемым процессом.

В работе [58] изучена корреляция пластической деформации и ДР в магниевом сплаве ZK60. Образцы деформировали одноосным сжатием при температуре 150÷450°C и скорости деформации $10^{-5} \div 10^{-1} \text{ с}^{-1}$. Авторами, исходя из эволюции дислокационной структуры, поведения напряжения течения и действия различных механизмов пластичности кристаллов, предложено в исследуемом диапазоне температур различать три режима, а именно низкотемпературный (ниже 200°C), промежуточный (200÷250°C) и высокотемпературный (выше 250°C). В исследовании акцент сделан на холодную обработку магния, поэтому подробнее рассмотрен низкотемпературный режим. Установлено, что при температурах ниже 200°C действуют двойникование, базисное скольжение и дислокационное скольжение (a + c). Скольжение (a + c) способствовало образованию большеугловых границ и низкотемпературной динамической рекристаллизации. В результате авторы работы [58] пришли к заключительному выводу, что изменения в механизмах деформации вызывают изменения механизмов зарождения ДР.

Авторы работы [59] исследовали влияние температуры РКУП на поведение ДР чистого магния, а также возможность ее снижения для данного процесса, при сохранении накопленной деформации и пути деформации постоянными. Процесс

РКУП проведен по маршруту А до 8 проходов. Температуру РКУП понижали после определенных проходов стратегически, чтобы достичь трех различных температур: 200°C, 150°C и 27°C в 8-м проходе. В результате авторами были сделаны следующие выводы: уменьшение размера зерна больше для большего снижения температуры деформации. Зерна со средневзвешенным размером 0,75 мкм получены после 8-го прохода РКУП при 27°C. Независимо от температуры 8-го прохода, обнаружено, что ~0,30 часть микроструктуры динамически рекристаллизовалась. Преобладающим механизмом рекристаллизации был непрерывный динамический возврат и рекристаллизация, приводящие к образованию мелких зерен с морфологией типа ожерелья. Прерывистая динамическая рекристаллизация (ПДР) редко происходила при РКУП на 8-м проходе при 200°C и 150°C. Несколько более мелких зерен ПДР можно было наблюдать после 8-го прохода РКУП при 27°C. Повышение ПДР для случая 8-го прохода РКУП при 27°C может быть связано со снижением призматической/пирамидальной активности и увеличением базисной активности при температуре окружающей среды.

1.2 Обзор способов пластической деформации магния и его сплавов

1.2.1 Способы деформации магния методом осадки

Как простейший вариант пластической обработки магния и его сплавов обычно применяется осадка. Здесь пластичность магния как малопластичного материала, с учетом того, что деформация материала вызывает в нем значительно меньшие повреждения, если она выполняется в условиях наложения высоких сжимающих напряжений, которые могут быть созданы внешним воздействием [60-63], в условиях пониженных температур деформации иногда повышают за счет подпора со стороны обойм различного вида, охватывающих цилиндрическую заготовку из основного металла. Сама обойма является препятствием для пластического течения металла заготовки, что повышает уровень напряжений сжатия, препятствующих его разрушению, в результате металл становится более

пластичным, а также обеспечивается более однородная проработка структуры [64,65].

В работе [66] исследован процесс традиционной холодной осадки (без применения оболочки) магния марки Mg90 по ГОСТ 804-93, в результате которого при относительном обжатии 6% наблюдали появление трещин на торцах и боковой поверхности образцов. Совместная холодная осадка магниевой заготовки в медной обойме позволила достигнуть относительного обжатия 49% без признаков разрушения. Авторами было установлено, что в конце процесса осадки сборки между заготовкой и обоймой может образоваться зазор, причиной которого является неравномерная деформация сборки в высотном и тангенциальном направлениях. Также в работе [66] были проведены эксперименты по холодной осадке магниевых образцов с использованием двух пуансонов, которые устанавливали в расточенные поверхности обоймы с обеих ее торцов. Такая схема осадки образца обеспечила расширение отверстия обоймы при более высоких значениях радиальных напряжений, возникающих в обойме. Соответственно, на боковой поверхности магниевого образца действовали большие значения давления бокового подпора. Способ деформации, предложенный авторами, может осуществляться за две операции. Конструктивная схема устройств для осадки образцов в обойме с использованием двух пуансонов приведена на рисунке 1.1.

Конфигурация инструмента для осадки имеет значение, в том числе и для устранения указанного выше недостатка в виде образования зазора между заготовкой и обоймой. Это также подтверждено в работе [67], где исследована осадка заготовки без обжатия оболочки, когда пуансон воздействует только на заготовку, которая увеличиваясь в диаметре, растягивает оболочку. При обычной свободной осадке инструмент имеет рабочую поверхность, площадь которой заведомо больше площади контактной поверхности заготовки, чтобы могло происходить уширение металла. Здесь процессу деформации препятствуют только напряжения трения, и они создают дополнительные радиальные и тангенциальные напряжения, повышающие гидростатическое давление. Однако рабочую поверхность можно конфигурировать иначе, что создаст дополнительные

напряжения сжатия и будет повышена пластичность металла. Сочетание заготовки и оболочки создает конфигурацию биметалла, из-за этого приходится применять сложные варианты решения краевых задач, в последнее время, такие задачи решаются все чаще методом конечных элементов [68].

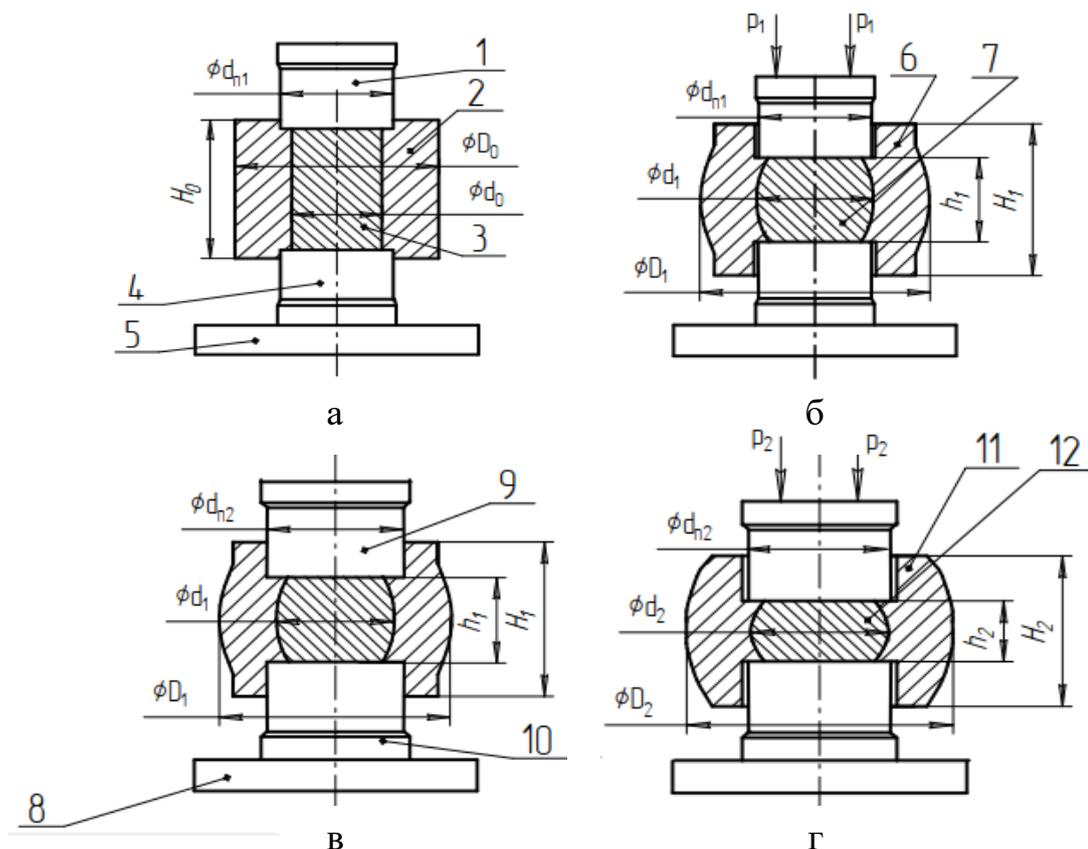


Рисунок 1.1 – Схема осадки магниевого образца в медной обойме двумя пуансонами: а, б, в, г – взаимное расположение пуансонов первой операции и образца до осадки, в обойме после первой операции осадки, второй операции и образца до осадки, в обойме после второй операции осадки соответственно; 1 – верхний пуансон первой операции; 2 – обойма; 3 – магниевого образец; 4 – нижний пуансон первой операции; 5 – опора; 6 – опора после первой операции осадки; 7 – образец после первой осадки; 8 – первый пуансон второй операции; 9 – нижний пуансон второй операции; 10 – обойма после второй операции осадки; 11 – образец после второй осадки [66]

Исследования авторов [69] показали возможность успешной холодной осадки двумя пуансонами магния в медной обойме без обжатия последней с применением пластичных прокладок. Применение пластичных алюминиевых шайб, установленных под пуансонами, позволило выполнить равномерную деформацию магниевого образца по высоте за счет существенного снижения

прилипания торцовых поверхностей образца к пуансонам. Данный метод холодной осадки позволил осуществить формоизменение магниевых образцов при значительно меньших усилиях, чем при традиционной осадке. Максимальное усилие составило 150 кН, вместо 1000 кН при совместной осадке образцов с обоймой, т.е. было снижено примерно в 7 раз. Величина давления бокового подпора при использовании этого метода существенно выше, чем при совместной осадке образца и обоймы, поэтому отсутствовали зазоры и пустоты между обоймой и деформированным образцом. Метод позволил осуществить холодную осадку с относительным обжатием 70% без появления трещин.

Однако реализация данного метода с применением известных устройств сопровождалась возможностью нарушения совпадения осей верхнего и нижнего пуансонов, а также положения обоймы относительно оси образца, и повышенной трудоемкостью экспериментов. В результате авторами работы [69] выполнена разработка более совершенных устройств для осуществления холодной осадки с использованием двух пуансонов. Усовершенствованная конструкция устройства для выполнения первой операции осадки показана на рисунке 1.2.

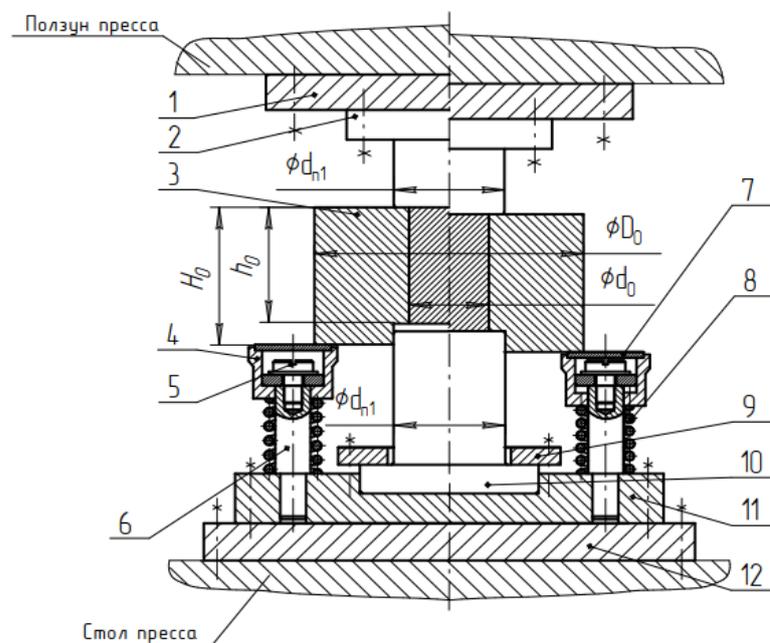


Рисунок 1.2 – Устройство для исследования пластичности образцов из хрупких материалов при холодной осадке двумя пуансонами: слева – взаимное положение деталей устройства в момент установки обоймы с образцом; справа – взаимное положение деталей устройства в момент касания пуансоном обоих торцов образца [69]

Применение усовершенствованного устройства позволило осуществить холодную осадку с большой степенью деформации за одну операцию, так как возможно применение обоймы больших диаметров без опасений нарушения совпадения осей образца и пуансонов в процессе деформирования, при этом образец будет деформироваться равномерно по объёму.

При осадке заготовок из малопластичных материалов разрушение начинается в наиболее выпуклой части боковой поверхности, поэтому авторы некоторых работ предлагают накладывать сжимающее гидростатическое давление именно на эту область. По данным работы [70], это можно сделать путем применения пояска (короткой оболочки) прямоугольного поперечного сечения. Недостатком такой схемы осадки является возможность разрушения на участках заготовки, не защищенных пояском, а также сложность удаления оболочки с поверхности заготовки вследствие бочкообразования (искривления поверхностей).

Автором патента [71] предложен способ помещения цилиндрической заготовки в кольцевую оболочку. Сборка пластически деформируемых материалов в этом случае представляет собой цилиндрическую заготовку и кольцевую оболочку, охватывающую среднюю часть ее боковой поверхности. Осадку осуществляют приложением к торцам заготовки усилия сжатия с одновременным растяжением оболочки. Порядок действий включает три этапа. На первом этапе проводят осадку цилиндрической заготовки без оболочки до достижения предельной степени деформации, которую выдерживает металл заготовки без разрушения. На втором этапе заготовку помещают в оболочку и продолжают нагружать сборку в области пластических деформаций. Наличие оболочки позволяет делать это без разрушения металла. На третьем этапе достигают такой степени деформации, при которой наступает разрыв оболочки. После деформации оболочку в виде незамкнутого кольца разгибают, например, с помощью рычага, и удаляют с поверхности заготовки. В данном способе выявлены недостатки, а именно необходимость определения для каждого используемого материала заготовки, а также ее геометрических размеров, степени деформации, которую выдерживает материал не разрушаясь, при осадке заготовки без оболочки путем

расчета или опытным. При неточном определении степени деформации сдвига возможно разрушение заготовки еще на первом этапе деформации. Кроме того, недостатком данного способа является определение для каждого используемого материала оболочки и ее геометрических размеров степени деформации, при которой происходит нарушение сплошности оболочки путем ее разрыва. Здесь, при неточном расчете, возможен либо преждевременный разрыв оболочки и разрушение металла заготовки, либо при достижении заданной степени деформации сплошность оболочки не нарушится.

Из вышеуказанного способа видно, что существует стремление создать такие приемы обработки, при которых облегчен процесс удаления оболочки. В промышленности существует несколько вариантов ее удаления. Самый распространенный – удаление боковой поверхности в стружку на токарном оборудовании. Недостатком является необходимость частичного удаления самого материала цилиндрической заготовки из-за возникающей при кузнечной осадке неровности боковой поверхности, которую называют бочкообразованием. В другом варианте оболочку стравливают в растворах щелочей и кислот, подбирая их составы таким образом, чтобы они воздействовали на металл оболочки, но не воздействовали на металл цилиндрической заготовки.

В изобретении [72] создание бокового подпора в процессе осадки предложено осуществлять путем намотки гибкого элемента на боковую поверхность заготовки, а после деформирования гибкий элемент удалять размоткой. В качестве гибкого элемента предложено применять металлическую ленту или проволоку. Недостатком способа является сложность намотки гибкого элемента на боковую поверхность заготовки, кроме того, возможно разрушение участков заготовки не обвитых гибким элементом.

Метод повышения пластичности магния при холодной осадке, предложенный в работе [73], позволил осуществить осадку литых образцов из магния с относительным обжатием 60...70 % за одну операцию формоизменения, благодаря повышению величины сжимающих напряжений, действующих на заготовку. Схема метода отображена на рисунке 1.3.

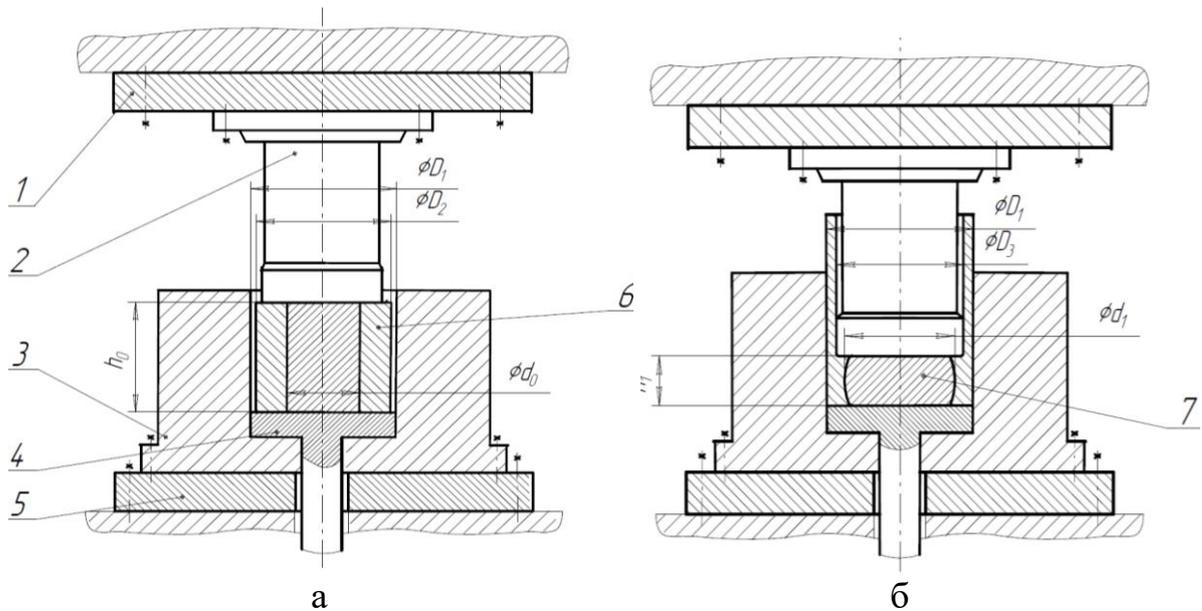


Рисунок 1.3 – Схема устройства для холодной деформации магния и его сплавов до осадки (а) и после осадки (б): 1 - верхняя плита, 2 - пуансон, 3 - контейнер, 4 - выталкиватель, 5 - нижняя плита, 6 - обойма с образцом, размещенным в ее отверстии, 7 - деформированный образец, размещенный в деформированной обойме [73]

Следует отметить, что процесс осадки и удаления деформированного образца и обоймы из контейнера осуществляется за короткое время не более минуты, также облегчается операция извлечения деформированного образца из разъемной обоймы.

1.2.2 Способы деформации магния методом волочения

Как уже отмечалось, магний и его сплавы привлекают большое внимание как перспективные материалы для имплантатов сосудистых стентов из-за их хорошей биосовместимости и биоразлагаемости. Изготовление магниевых микротрубок (заготовок для стентов) затруднительно, в основном из-за низкой пластичности, вызванной ГПУ решеткой. Для изготовления таких микротрубок известно применение горячего [74] и холодного волочения [75] на оправке и без нее [76].

Следует отметить недостатки горячего волочения на оправке: сложность в производственном оборудовании, возможность образования неудовлетворительной микроструктуры и качества поверхности волоченых трубок.

Горячее безправочное волочение ведет к отсутствию контроля равномерности толщины стенки трубки, а также, в этом случае, внутренняя поверхность изделия не будет идеальной. Для достижения более точных допусков размеров трубок, лучшей отделки поверхности, удовлетворительной микроструктуры и высоких механических свойств, холодное волочение превосходит горячее, однако, в случае обработки магния, из-за низкой пластичности металла при комнатной температуре, оно технологически сложно, а также ограничено уменьшение площади поперечного сечения трубки за один проход холодного волочения, что требует применение многопроходного волочения [77]. Низкая пластичность и упрочнение в процессе холодной деформации влекут за собой дополнительную операцию – отжиг трубок во время серии проходов холодного волочения, что снижает производительность и повышает затраты на производство.

В работе [78] заготовка для холодного волочения получена методом горячей экструзии с повышенным коэффициентом вытяжки с последующим немедленным охлаждением экструдированных трубок холодной водой. Водяное охлаждение способствовало измельчению зерна, что привело к улучшению пластичности и обрабатываемости экструдированных трубок. Следует отметить, что внедрение процедуры охлаждения не исключило операцию промежуточного отжига в серии проходов холодного волочения.

В работе [79] методом холодного волочения горячэкструдированных трубных заготовок были получены трубки с наружным диаметром 2,9 мм и толщиной стенки 0,217 мм посредством пяти проходов холодного волочения с процедурой отжига после четвертого прохода. Следует отметить также, что авторами осуществлена попытка нахождения оптимальных режимов отжига, но исключение этой операции признано невозможным.

Свойства стентов, изготовленных из микротрубок, напрямую связаны со свойствами микротрубок. В исследовании [80] три сплава магния, JDBM, AZ31 и WE43, были использованы для изготовления высококачественных микротрубок внешним диаметром 3,00 мм и толщиной 180 мкм путем сочетания горячей

экструзии, холодной прокатки и волочения. Авторами были исследованы точность размеров и микроструктура микротрубок, кроме того, обсуждались механические свойства при растяжении и анализ текстуры. Также проведены испытания на обжим и расширение стентов, вырезанных из трубок из сплава JDBM. Установлено, что они успешно обжимаются до 1,3 мм, а затем расширяются до 4,0 мм, сохраняя при этом свою структурную целостность.

Однако холодное волочение по-прежнему не идеально подходит для производства микротрубок из магния и его сплавов, поэтому, для эффективного их изготовления, некоторые исследователи предложили метод волочения без волоки [81,82] – процесс, осуществляемый путем обеспечения локального нагрева без волоки для волочения. Во время процесса трубки из магниевого сплава нагреваются, чтобы сделать их локально мягкими. При высокой скорости волочения V_1 и низкой скорости подачи V_2 может быть достигнуто волочение без волоки. Обжатие ε определяется скоростью волочения V_1 и скоростью подачи V_2 :

$$\varepsilon = 1 - \frac{A_2}{A_1} = 1 - \frac{V_2}{V_1}, \quad (1.1)$$

где A_1 и A_2 - площади поперечного сечения до и после волочения соответственно.

Поскольку за один проход можно добиться значительного уменьшения площади, волочение без волоки имеет большие преимущества по сравнению с холодным волочением.

Однако некоторые проблемы в применении такого волочения все еще существуют, основная – неравномерный диаметр по длине труб, что снижает их качество. В настоящее время были предприняты некоторые попытки решить эту проблему, и результаты показали, что неравномерный диаметр вдоль трубок был связан с настройкой температуры, скорости и обжатия (ε) [83].

Поскольку при производстве микротрубок необходимо многопроходное волочение без волоки и качество труб, полученных таким способом, тесно связано с выбором обжатия (ε), в работе [84] исследовали влияние обжатия на распределение наружного диаметра труб, полученных волочением без волоки, с

целью достижения их стабильного качества, а также влияние температуры и скорости на микроструктуру труб. Авторами проведена серия экспериментов по волочению без волоки, схематическая иллюстрация которого представлена на рисунке 1.4, с использованием холодноотянутых труб из магниевого сплава ZM21 в качестве исходных заготовок, при различных скоростях (0,1, 1,0 и 10 мм/с) и различных температурах (300–475°C).

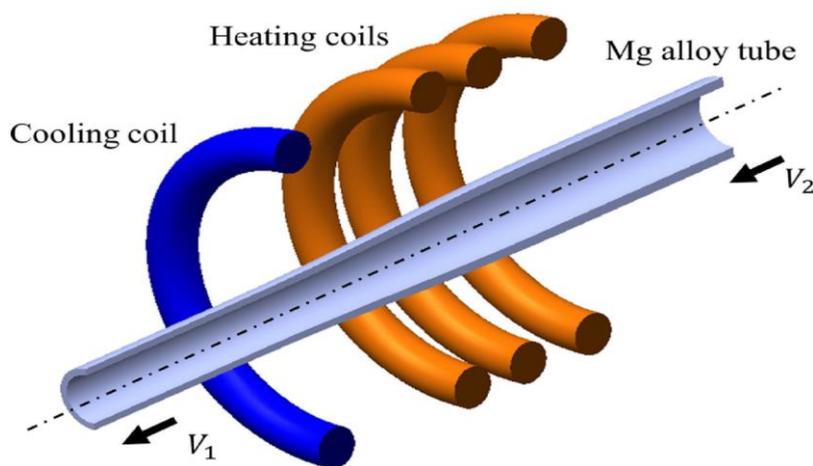


Рисунок 1.4 – Схематическое изображение волочения без волоки [84]

В результате авторы работы [84] пришли к выводу, что температура и скорость являются двумя важными факторами, которые определяют размер зерен труб, полученных посредством волочения без волоки. Увеличивая скорость или понижая температуру, можно получить мелкие зерна. Двойники внутри зерен также являются характерной чертой таких труб. На основании формы и распределения двойников были идентифицированы три типа микроструктуры: первая – большинство зерен двойниковые, что связано с процессом динамической рекристаллизации, вторая – зерна полностью лишены двойников, что связано с непрерывным процессом динамической рекристаллизации, третья – внутри зерен можно найти лишь небольшое количество двойников, обычно при температуре $> 400^\circ\text{C}$. Изготовленные трубы демонстрируют следующие механические свойства: предел текучести 135–180 МПа, удлинение 8-12%. Для производства труб методом волочения без волоки с повышенными механическими свойствами и высокой коррозионной стойкостью авторы предлагают применять низкую температуру ($< 350^\circ\text{C}$) с получением мелкозернистой микроструктуры.

1.2.3 Способы деформации магния методом прессования

Традиционно экструдированные магниевые листы обладают низкими механическими свойствами из-за сильной базисной текстуры. Следует отметить, что улучшение механических свойств изделий из магниевых сплавов может быть достигнуто за счет измельчения зерен и ослабления базисной текстуры [85,86], что возможно с введением сдвиговой деформации [87]. В качестве примера также можно рассмотреть исследования [88,89], авторы которых разработали штамповые конструкции и успешно ввели деформацию сдвига в процесс экструзии, что привело к ослаблению базисной текстуры, и, следовательно, улучшению механических свойств листа из магниевого сплава.

РКУП от обычного прессования отличается направлением пластического течения металла. Здесь деформация накапливается без изменения исходной формы заготовки, а также за счет введения в процесс большой деформации сдвига. В результате полученную заготовку можно было подвергать деформации снова в той же самой инструментальной оснастке [90]. Тем самым достигались структурные [91] и текстурные [92] изменения в металле, наблюдаемые вплоть до наноуровня [93]. Высокий уровень сжимающих напряжений, реализуемый в методе, позволял наравне с пластичными средами [94] деформировать сплавы магния [95,96] и другие малопластичные материалы. Метод РКУП не лишен недостатков, в частности, оказалось, что в одноразовом исполнении деформации по длине и сечению заготовки распределялись неравномерно [97]. Получение конечных заготовок того же сечения, что и исходная заготовка также является недостатком процесса РКУП. Кроме того, поскольку длина первичной заготовки невелика, так как ограничена влиянием сил трения на стенке контейнера, то и конечная заготовка оказывается малой длины.

В работах [98,99] изложен способ неравноканального углового прессования (НРКУП) – холодной деформации магния с повышенным уровнем сжимающих напряжений и с формоизменением, направленным на получение плоской заготовки из слитка круглого поперечного сечения. Отличительной особенностью схемы

обработки является угол направления движения отпрессованного металла – 90° к оси прессования.

Суть схемы НРКУП: круглая заготовка 1 диаметром D помещается в круглую полость контейнера 2. Усилием P , создаваемым прессом на пуансон 3, выдавливают металл через канал прямоугольного сечения ортогонально оси контейнера с получением плоской заготовки 4 толщиной h (рисунок 1.5, а).

В данной схеме обработки к деформации сдвига, достигаемой на границе пересечения каналов, добавляется деформация, обеспечиваемая двумя дополнительными механизмами: за счет коэффициента вытяжки при уменьшении площади поперечного сечения и за счет перевода круглого сечения в прямоугольное. Таким образом вместо одного фактора, воздействующего на структуру металла в РКУП, в схеме НРКУП появляется целых три.

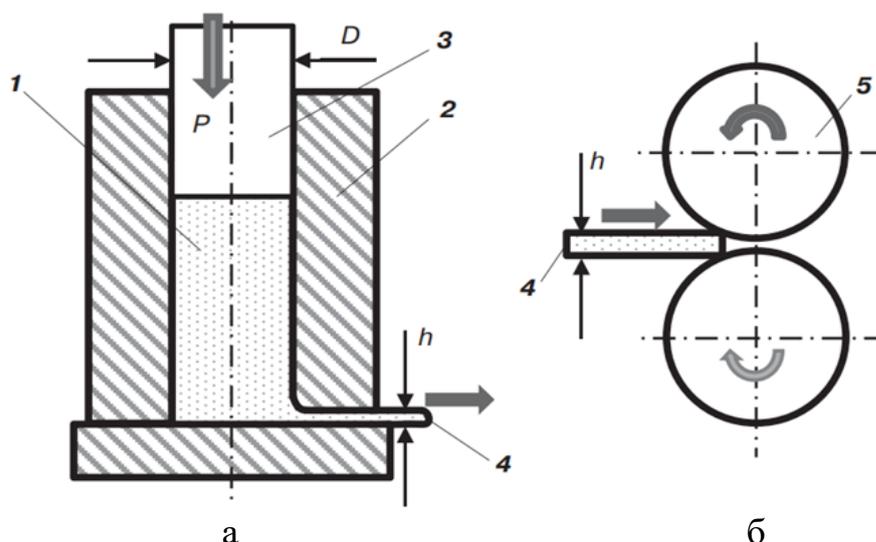


Рисунок 1.5 – Схема получения тонкой полосы сочетанием углового прессования (а) и последующей листовой прокатки (б): 1 – круглая заготовка; 2 – контейнер; 3 – пуансон; 4 – плоская заготовка; 5 – валки [98]

Авторы [98,99] методом НРКУП при комнатной температуре в условиях реального эксперимента получили полосы шириной 40 мм и толщиной 1 мм. Однако применяя данный метод нет возможности получения профиля иного, чем тонкая полоса прямоугольного поперечного сечения. Вместе с тем, востребованы пресс-изделия круглого, квадратного и другого сечения.

Также в работе [98] показано, что на втором этапе (рисунок 1.4, б) полученная прессованием заготовка 4 может быть прокатана валками 5 до нужной толщины, так как металл дополнительно пластифицирован обработкой прессованием. В данном случае листовая заготовка была прокатана при комнатной температуре в фольгу толщиной 50 и 10 мкм с низкотемпературными отжигами. Для изготовления фольги толщиной 50 мкм было выполнено 20 проходов с суммарным относительным обжатием 95%. Подробно свойства такого материала изложены в работе [100].

Следует отметить, что тонкие листы и фольги из магния и его сплавов представляют интерес для авиакосмической техники, автомобилестроения, биологии и медицины [101], в частности в работе [102] описывается способ изготовления стентов из магниевой фольги путем выполнения литографического метода, который используется для переноса характеристик стента на обе стороны магниевой фольги, при этом литографический метод выбирается из оптической фотолитографии, электронно-лучевой литографии, рентгеновской литографии и наноимпринтной литографии или комбинация этих методов. Затем фольга подвергается травлению через маску, созданную с использованием любого литографического подхода, и прокатке с образованием цилиндра, сформированного “незапертым” (не запечатанным по двум продольным краям), что позволяет стенту легко расширяться, или соединенного по боковым краям с помощью ультразвуковой точечной (лазерной точечной сварки, выполняемой магниевым электродом в инертной среде) сварки (рисунок 1.6, а). Также существует другие подходы для “фиксации” вытравленного магниевое цилиндра – сшивание обоих боковых краев хирургическим швом или тонкой магниевой проволокой по длине цилиндра (рисунок 1.6, б) или защелкивание обеих боковых кромок, посредством соединения типа “мозаичная головоломка”, а боковые кромки для этого могут быть сформированы с помощью простой операции штамповки (рисунок 1.6, в).

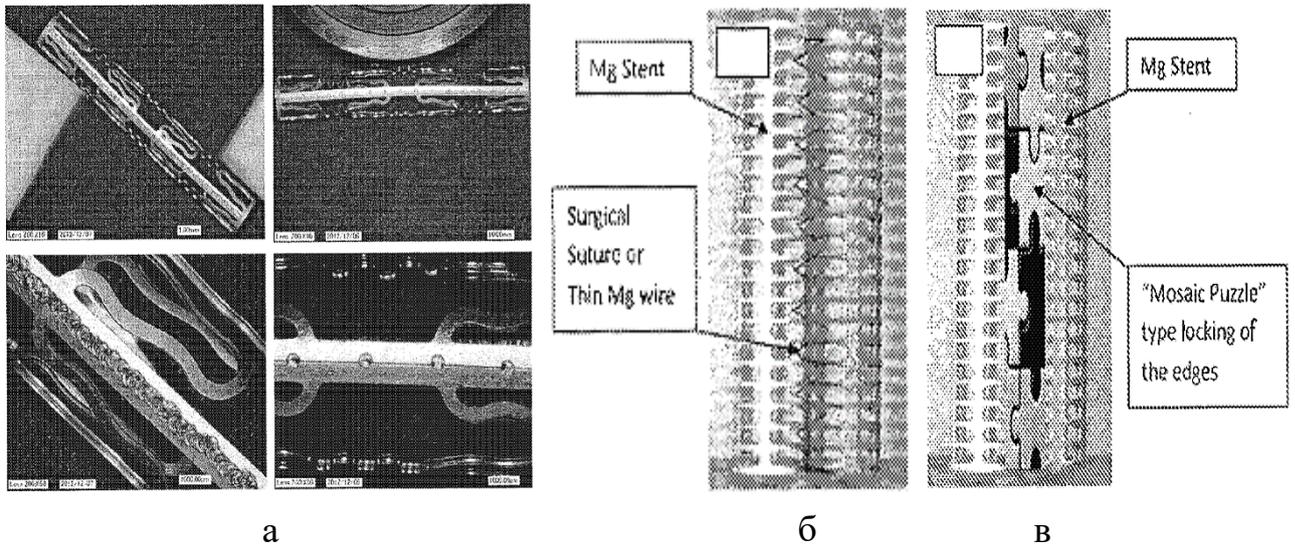


Рисунок 1.6 – Способы соединения магниевого цилиндра: а – лазерная сварка; б – хирургический шов; в – “мозаичная головоломка” [102]

Следует отметить, что основные усилия, связанные с изготовлением стентов, сосредоточены на гравировке его конфигурации, для чего в настоящее время используется лазерная резка трубки стента с последующей полировкой. Поскольку лазерный луч испаряет материал, который частично оседает на поверхности стента, такой подход является дорогостоящим, а производительность низкой. Последнее связано со скоростью сканирования лазера, который обрабатывает стенты один за другим. Другой подход – плетение проволоки из материала стента, что требует подачи большого количества тонкой магниевой проволоки диаметром в пару сотен микрон в плетельную машину. Низкая прочность магниевой проволоки на растяжение требует перепроектирования имеющихся микрооплеток и изменения их механики таким образом, чтобы они не разрывали проволоку во время плетения. Варианты осуществления конфигурации стентов, описанные в работе [102], могут сделать производство биоразлагаемых стентов на основе магния недорогим и масштабным для массового производства.

Также известно применение схемы многоканального прессования, в которой металл разделяется на несколько потоков, суммарный коэффициент вытяжки понижается и усилие становится меньше. Известны устройства для многоканального прессования не углового типа [103,104]. Недостатком устройств таких устройств является возможность их реализации только на прессах

горизонтального типа – здесь есть возможность приема длинномерных изделий на площадях цеха. На прессах вертикального исполнения полученные изделия большой длины принимать становится нелегко. Таким образом у устройств многоканального прессования не углового типа выявлен недостаток – ограниченность технологических возможностей.

В последние годы появился ряд работ, посвященных деформации магния методом интенсивной пластической деформации – обратным выдавливанием (ОВ) [105], схема которого основана на воздействии на торец цилиндрической заготовки, помещенной в контейнер, пуансоном диаметром меньшим, чем диаметр заготовки. Замыкание очага деформации обеспечивает шайба. Металл вытекает навстречу перемещению пуансона, образуя цилиндрическую оболочку. Схема обратного выдавливания цилиндрических заготовок часто используется для получения изделий типа стаканов [106-108]. При удалении дна у стакана полученный продукт приобретает форму оболочки [109], что расширяет сферу применения метода. Полученная заготовка может быть подвергнута последующей деформации для изменения первоначальной формы [110].

Известно, что напряжения выдавливания увеличиваются при уменьшении толщины стенки получаемого изделия. Таким образом, можно достичь высоких напряжений сжатия, что позволяет повысить пластичность металла, что особенно важно, если деформируют малопластичные материалы в холодном состоянии. Однако стоит отметить и недостаток ОВ – с увеличением поверхности трения в процессе деформации увеличивается давление на пуансоне и усилие выдавливания, что ограничивает возможную степень деформации и высоту изготавливаемого стакана.

В некоторых случаях напряжений выдавливания недостаточно, чтобы создать достаточно мягкую схему напряженного состояния, поэтому необходимо повысить уровень напряжений сжатия. Достигается это различными средствами, например в качестве способа деформации металла с ГПУ-решеткой на примере бериллия описан метод обратного выдавливания с реализацией противодействия

[111]. Эта технология позволила деформировать бериллий при комнатной температуре.

В работе [112] предложен метод холодного обратного выдавливания с использованием противодействия, который позволяет осуществить деформацию магниевой заготовки при комнатной температуре. Для осуществления противодействия применена втулка, заполняющая зазор между боковой поверхностью пуансона и стенкой контейнера. Для максимально плотного прилегания втулки к контактными поверхностям заполнение зазора осуществляется в режиме дорнования, то есть расширения втулки инструментом.

Толщина стакана, полученного авторами работы [113], может варьироваться от 200 мкм до 4 мм. Стенка, вырезанная из магниевого стаканчика толщиной 200 мкм, имеет достаточно высокую пластичность за счёт формирования мелкозернистой структуры (величина зерна около 4-5 мкм), что позволяет прокатать её до 150-мкм фольги при комнатной температуре. Данный метод применим не только для чистого магния, но и для его сплавов, заметно увеличивая прочностные свойства сплава (предел прочности одного из образцов составил 303 МПа).

Метод ОВ наряду с НРКУП позволяет получать тонкие ленты и фольги магния различной толщины, которые могут применяться в качестве элементов крепёжных конструкций имплантатов. Однако наиболее интересным применением может стать использование данной технологии для создания заготовок для коронарных стентов тубулярного типа, то есть полученных из полых цилиндрических трубок. Технология ОВ позволит заметно упростить процесс производства подобных медицинских изделий.

1.2.4 Способы деформации магния методом штамповки

Как уже было отмечено ранее, магний и его сплавы применяются для изготовления шаров, выполняющих роль клапанов, временно запирающих скважины и саморастворяющиеся под воздействием бурильных растворов.

Для производства самих шаров применяются различные методы литья, обработки давлением и обработки резанием [114]. Шары на основе магниевых сплавов чаще всего получают отливкой цилиндрической заготовки и вытачиванием шара. Однако может применяться и более сложная схема отливки и последующего горячего прессования [115] с последующей токарной обработкой.

Технология производства зависит, в том числе и от вида материала, из которого изготовлены шары. Высокопроизводительные технологии изготовления стальных шаров преимущественно основаны на применении способа поперечно-винтовой прокатки предварительно горячедеформированной прутковой заготовки [116]. Однако при прокатке металлов и сплавов, обладающих достаточно высокой адгезионной способностью (цветные металлы, коррозионностойкие стали и др.), наблюдается налипание частиц металла на поверхность валков, что может вызвать полное прекращение процесса прокатки.

При прокатке шаров из магния возникают и другие трудности. Известно, что даже в горячем состоянии характеристики пластичности магния невелики, и его деформирование при схеме напряженного состояния с высоким уровнем растягивающих напряжений, характерных для винтовой прокатки, сопровождается трещинообразованием. Таким образом можно сделать вывод о проблематичности применения поперечно-винтовой прокатки для изготовления шаровых заготовок из магния.

Более благоприятная схема напряженного состояния достигается в процессах горячей и холодной объемной штамповки шаров [117].

Исследования авторов [118] говорят о перспективности процесса закрытой штамповки, которая позволяет исключить трудноутилизируемые отходы магния и сократить количество транспортных и манипуляционных операций. Здесь следует назвать главную проблему, возникающую при закрытой штамповке изделий типа шаров – заполнение купола сферического штампа – из-за плоского торца заготовки и отсутствия бокового подпора при закрытой штамповке не обеспечивается полное заполнение штампа. В работе [118] предложена технология формирования магниевой заготовки из прессованного и литого прутка под штамповку шара –

двухэтапный процесс разрезки прутка. На первом этапе внедрение ножей осуществляется с сохранением перемычек высотой $(0,1...0,15) d$. Затем надрезанная заготовка поворачивается относительно продольной оси на 90° без осевого смещения и дорезается до конца за счет полного сведения бойков. Таким образом формируется заготовка с выпуклыми торцами, используемая для последующей закрытой штамповки и обеспечивающая заполнение купола сферического штампа, и отсутствие заусенца. Следует отметить, что при разработке технологического процесса штамповки магниевых шаров в первую очередь возникает проблема формирования исходной заготовки, т.к. от нее зависит качество штамповки.

Удовлетворительные результаты были получены при закрытой штамповке шаров за счет использования заготовок, полученных многоножевой разрезкой катаных, прессованных или кованных прутков [119]. Однако производительность этого способа разрезки невысока.

Авторами патента [120] предложен способ производства шаров, включающий в себя резку круглой прутковой длинномерной заготовки на мерные длины, передачу разрезанных заготовок в штамповый блок и штамповку шаров, перед резкой круглую прутковую заготовку обжимают в направлении, перпендикулярном продольной оси, с получением двух плоскостей, затем полученную плоскую заготовку подвергают периодическим пережимам в направлении, параллельном полученным плоскостям и перпендикулярном продольной оси, с образованием в этом направлении выпуклых участков поверхности, разрезают полученную полосу на заготовки по поверхностям в местах пережимов в направлении, перпендикулярном плоскостям и продольной оси, причем заготовкам придают форму, удлиненную в направлении, параллельном полученным плоскостям и перпендикулярном продольной оси, и последующую штамповку осуществляют с уменьшением размера заготовки в указанном направлении. Параллельные плоскости на прутковой заготовке получают продольной прокаткой, осадкой или кузнечной протяжкой. По предлагаемому методу форма торцов предназначенной для штамповки заготовки приближена к

радиальной, что способствует более полному заполнению гравюры штампа и обеспечивает большую точность оформления изделия.

На рис. 1.7 изображена исходная круглая заготовка (рисунок 1.7, а) и заготовка с полученными на ней продольными плоскостями (рисунок 1.7, б).

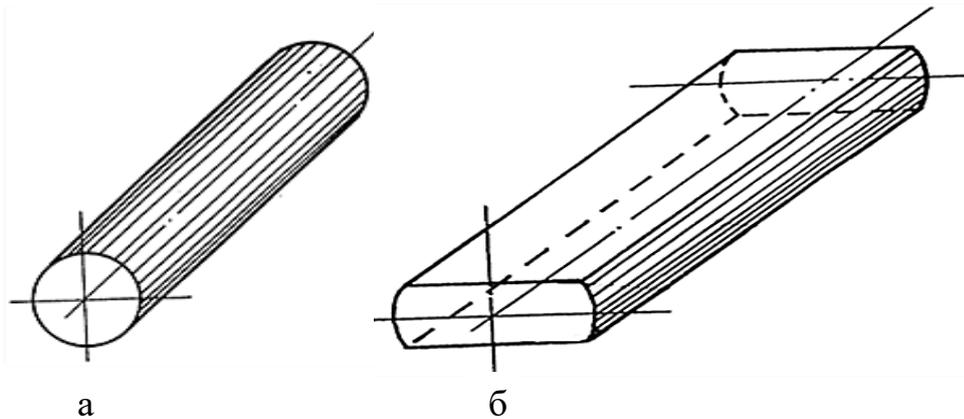


Рисунок 1.7 – Исходная круглая заготовка (а), заготовка с полученными продольными плоскостями (б) [120]

На рисунке 1.8 изображены этапы деформации заготовки: получение пережимов (рисунок 1.8, а), разрезка (рисунок 1.8, б) и уменьшение размера заготовки до образования шара (рисунок 1.8, в).

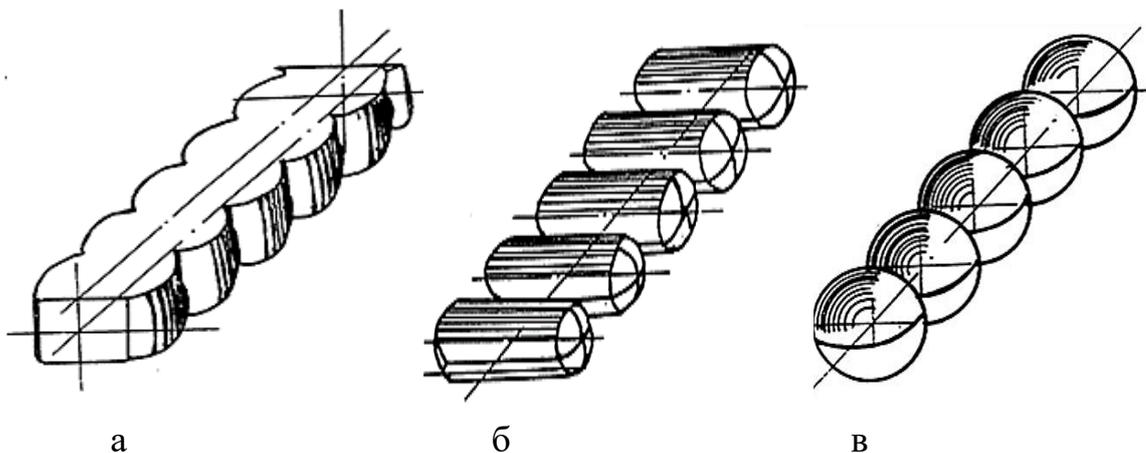


Рисунок 1.8 – Этапы деформации заготовки: а – получение пережимов; б – разрезка; в – уменьшение размера заготовки до образования шара [120]

Следует отметить, что для выполнения операций прокатки и обжатия требуется дополнительное оборудование и технологическое время, что увеличивает себестоимость изделия.

Известны также способы изготовления шаров в виде двухслойных тел [121]. Сам шар имеет двухслойную структуру, внешний слой представляет собой слой органического материала, а внутренний слой представляет собой металлический слой или слой металлокерамического композитного материала. Такой шар может быть получен за счет покрытия металлического шара полимером.

Способ изготовления шарового элемента клапана для скважин, изложенный в патенте [122], включает изготовление оболочки из деградируемого материала, например, магния или магниевое сплава и заполнение оболочки недеградируемым материалом, например, сталью. В этом техническом объекте указана цель такого решения – увеличение массы шара, что приходится делать, поскольку плотность магния невелика и в солевых растворах, обладающих повышенной плотностью, силы гравитации может не хватить для прижатия шара к седлу клапана. Недостатком способа является трудность решения задачи заполнения полый оболочки материалом – утяжелителем. Действительно, если оболочка уже изготовлена, и она герметична, то поместить внутрь другой материал становится довольно трудно. Авторы [122] предлагают выполнять в стенке шаровой оболочки сверление и в образовавшееся отверстие засыпать материал – утяжелитель из недеградируемого материала, а затем закрывать отверстие пробкой из деградируемого материала. Недостатком способа также является необходимость изготовления материала – утяжелителя как сыпучей среды. Естественно, что плотность сыпучего материала оказывается ниже плотности материала, из которого сыпучий материал изготовлен. Поэтому гравитационное усилие оказывается заведомо снижено. Другим недостатком является сложность изготовления самой полый оболочки. В описании к патенту не указано, каким способом можно создать внутреннюю сферическую поверхность внутри сферы. Еще одним недостатком является нерешенность вопроса сохранения правильной наружной сферической поверхности: наличие пробки мешает поддерживать эту поверхность в виде правильной сферы. Любое отклонение от правильной сферы влечет за собой возникновение зазора между шаром и седлом клапана, что приводит к утечкам рабочей жидкости.

1.3 Компьютерное моделирование как средство выполнения расчетов задач обработки металлов давлением

Необходимость повышения качества изделий ответственного назначения, экономии металла и энергии, расходуемой на формоизменение, вызвала необходимость развития методов моделирования технологических процессов обработки металлов давлением.

Моделирование является эффективным методом для оценки напряженно-деформированного состояния и определения температурных полей изделия в технологическом процессе [123], а также позволяет выявить основные закономерности течения металла, обнаружить наиболее опасные с точки зрения разрушения зоны деформации, определить усилие формоизменения [124].

Компьютерное моделирование позволяет получить большой объем информации, провести всестороннее исследование, рассмотреть и сопоставить большее количество альтернативных вариантов. Натурный эксперимент, в свою очередь, позволяет компенсировать недостаточное знание природы явления, условий выполнения технологического процесса, недостоверность тех или иных технологических свойств материала. Сопоставление альтернативных вариантов в натурном эксперименте является менее надежным, поскольку не всегда возможно зафиксировать те параметры, которые предполагаются одинаковыми в рассматриваемых вариантах [125]. Совершенствование и развитие методов математического моделирования приводит к расширению области их успешного использования. Если на начальной стадии развития компьютерное моделирование было средством решения отдельных инженерных задач обработки давлением, то в настоящее время это средство конструкторско-технологического проектирования [126-128].

В данной работе применяли программное обеспечение DEFORM-2D и DEFORM-3D, разрабатываемое компанией Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC) с восьмидесятых годов XX века [129], как универсальный продукт, способный рассчитывать любые процессы ОМД: листовую и сортовую прокатку, волочение, прессование, ковку, штамповку, операции трубного

производства, используя для расчета метод конечных элементов. Метод конечных элементов по существу сводится к аппроксимации сплошной среды с бесконечным числом степеней свободы совокупностью подобластей (или элементов), имеющих конечное число степеней свободы [130]. Затем между этими элементами каким-то образом устанавливается взаимосвязь. Чаще всего элементами являются треугольники в плоском случае и тетраэдры в пространственном. Внутри каждого элемента задаются некоторые функции формы, позволяющие определить перемещения внутри элемента по перемещениям в узлах, то есть в местах стыков конечных элементов. Также можно отметить, что метод конечных элементов непосредственно применим к неоднородным конструкциям, состоящих из большого числа отдельных конструктивных элементов, поведение каждого из которых описывается своим дифференциальным уравнением, по сравнению с другими расчетными методами [131].

Программа DEFORM-3D имеет модульную структуру, в которую входят три основных модуля: подготовки исходных данных (Preprocessing), решения (Solver), и обработки, и вывода результатов моделирования (Postprocessing).

Свойства деформируемого металла в DEFORM описываются следующим уравнением:

$$\sigma_s = f(\varepsilon, \xi, \theta), \quad (1.2)$$

где σ_s – сопротивление деформации, ε – степень деформации, ξ – скорость деформации, θ – температура.

Функция $\sigma_s = f(\varepsilon, \xi, \theta)$ задается в препроцессоре DEFORM путем выбора материала из имеющегося каталога, а в случае отсутствия необходимого материала, пользователь задает кривую упрочнения самостоятельно в табличной форме.

Также в качестве программного обеспечения в данной работе использовали ABAQUS – многоцелевой конечно-элементный программный комплекс, который может быть использован для решения различных классов задач инженерного анализа. ABAQUS изначально был ориентирован на решение самых сложных и ответственных задач, с учетом всех видов нелинейностей, а также на проведение

многодисциплинарного статического и динамического анализа в рамках единого алгоритма. Такая концепция выгодно отличает ABAQUS от других программ подобного уровня (например программный комплекс ANSYS для анализа сильно нелинейных и быстротекущих процессов использует стороннюю программу LS-DYNA), что позволяет с его помощью в рамках единого подхода решать многоцелевые задачи, сочетая преимущества явной и неявной схем конечно-элементного анализа и их комбинацию [132].

В настоящее время системы для компьютерного моделирования технологических процессов обработки металлов давлением являются надежным помощником конструктора и технолога при проектировании конструкции штампов, разработке технологических процессов, позволяя предотвратить вероятные дефекты, спрогнозировать качество изделия до того, как будет изготовлен инструмент.

1.4. Выводы и постановка задачи исследования

Результаты выполненного анализа технической литературы показали, что опубликованные исследования по способам деформации магния и его сплавов содержат недостатки, кроме того, большее количество работ посвящено горячей деформации магния, а значит разработка новых и усовершенствование ранее разработанных способов холодной деформации магния является актуальным.

Анализ научно-технической литературы выявил необходимость проведения исследований с целью определения напряженно-деформированного состояния деформируемого металла посредством метода конечных элементов, в том числе вычисления показателя напряженного состояния и коэффициента Лоде, что является важным при оценке сжимающих напряжений в схеме деформации. Также важным является сравнение результатов моделирования способов холодной деформации магния с экспериментальными данными.

Целью работы является определение рациональных параметров формоизменения магния в условиях холодной деформации.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1. 1. Создать компьютерные модели процессов холодной деформации магния с использованием метода конечных элементов и провести моделирование в программном комплексе DEFORM-2D/DEFORM-3D/ABAQUS.

2. Провести анализ напряженно-деформированного состояния металла посредством компьютерного моделирования.

3. Получить закономерности формоизменения металла в различных условиях деформации, сравнить с экспериментальными данными.

4. Разработать новые способы холодной обработки магния, с предварительным их компьютерным моделированием.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БОКОВОГО ПОДПОРА НА ПЛАСТИЧНОСТЬ МАГНИЯ ПРИ ХОЛОДНОЙ ОСАДКЕ

2.1 Оценка напряженно-деформированного состояния при осадке магниевой цилиндрической заготовки в медной оболочке

При разработке технологических процессов обработки металлов давлением постоянно приходится учитывать пластические свойства металла [133].

По результатам эксперимента ИФМ УрО РАН при холодной осадке цилиндрической заготовки из литого магния марки Mg90 ГОСТ 804-93 (далее в экспериментах и компьютерном моделировании используется эта марка магния) диаметром $D_0 = 20$ мм и высотой $H_0 = 30$ мм при относительном обжатии 6 % наблюдали появление трещин на торцах и боковой поверхности образцов.

По данным описанного эксперимента проведено моделирование с целью определения показателя напряженного состояния (σ/T) в наиболее выпуклой части боковой поверхности магниевой заготовки, где вследствие трения образуется бочка. Моделирование холодной осадки магниевой цилиндрической заготовки осуществили методом конечных элементов в программном модуле DEFORM-2D. Постановка задачи включала в себя описание геометрии очага деформации в исходном состоянии, задание граничных условий в перемещениях (далее все постановки задач имеют аналогичное описание). В имеющемся в DEFORM каталоге материалов Mg90 не представлен, поэтому свойства магния заданы самостоятельно на основе справочных данных, в том числе кривая упрочнения задана вручную на основе работы [134] (далее во всех краевых задачах используется эта кривая упрочнения). На контакте с инструментом задан закон трения по Кулону с коэффициентом трения 0,1.

Сам параметр σ/T (σ – среднее нормальное напряжение, T – интенсивность касательных напряжений) не входит в число определяемых программным модулем DEFORM, так же, как и параметр T , поэтому для его расчета назначена контрольная точка P1 и в ней выполнена оценка значений параметра среднего напряжения и

интенсивности напряжений, связанной с интенсивностью касательных напряжений соотношением:

$$T = \frac{\sigma_{и}}{\sqrt{3}}. \quad (2.1)$$

На рисунке 2.1 представлено решение краевой задачи осадки цилиндрической магниевой заготовки при относительном обжатии 6% с сеткой конечных элементов.

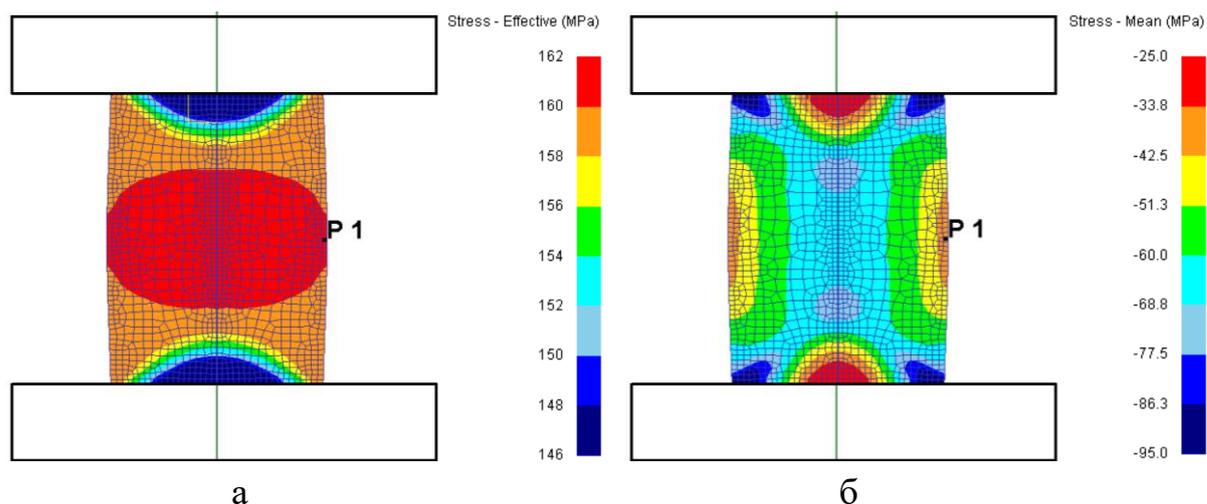


Рисунок 2.1 – Распределение интенсивности напряжений (а) и среднего напряжения (б) при осадке магниевой заготовки

По результатам расчета значение показателя напряженного состояния в точке P1 равно -0,36. Таким образом, при данных размерах заготовки, коэффициенте трения и других заданных условиях σ/T в наиболее выпуклой части боковой поверхности имеет достаточно низкое значение по модулю, вследствие чего и происходит выявленное в условиях реального эксперимента разрушение.

Из технической литературы известно, что повышения уровня сжимающих напряжений в процессе осадки можно достичь, применяя оболочки различных видов. В связи с чем ИФМ УрО РАН проведены эксперименты по холодной осадке магниевых заготовок в медных оболочках.

По условиям реального эксперимента диаметр и высота магниевых образцов равны $D_0 = 19,5$ мм и $H_0 = 30$ мм, медная оболочка имеет толщину стенки $s_0 = 10,25$ мм, высоту $h_0 = 30$ мм, внутренний диаметр равен диаметру магниевых образцов, соотношение $h_0/H_0 = 1$. Отношение толщины оболочки к диаметру заготовки равно

$s_0/D_0 = 10,25/19,5 = 0,53$. В этом случае достигли относительного обжатия 49 % без признаков разрушения.

По данным описанного эксперимента в программном комплексе DEFORM-2D также проведено моделирование с целью определения показателя напряженного состояния (σ/T) в наиболее выпуклой части боковой поверхности магниевой заготовки. На контакте с инструментом задан закон трения по Кулону с коэффициентом трения 0,1. На границе между заготовкой и оболочкой смазка отсутствует, и поскольку оба материала – медь и магний – обладают повышенными адгезионными свойствами, то коэффициент трения на этой поверхности приняли равным 0,5.

На рисунке 2.2 представлено решение краевой задачи осадки цилиндрической магниевой заготовки в медной оболочке при относительном обжатии 49% с сеткой конечных элементов.

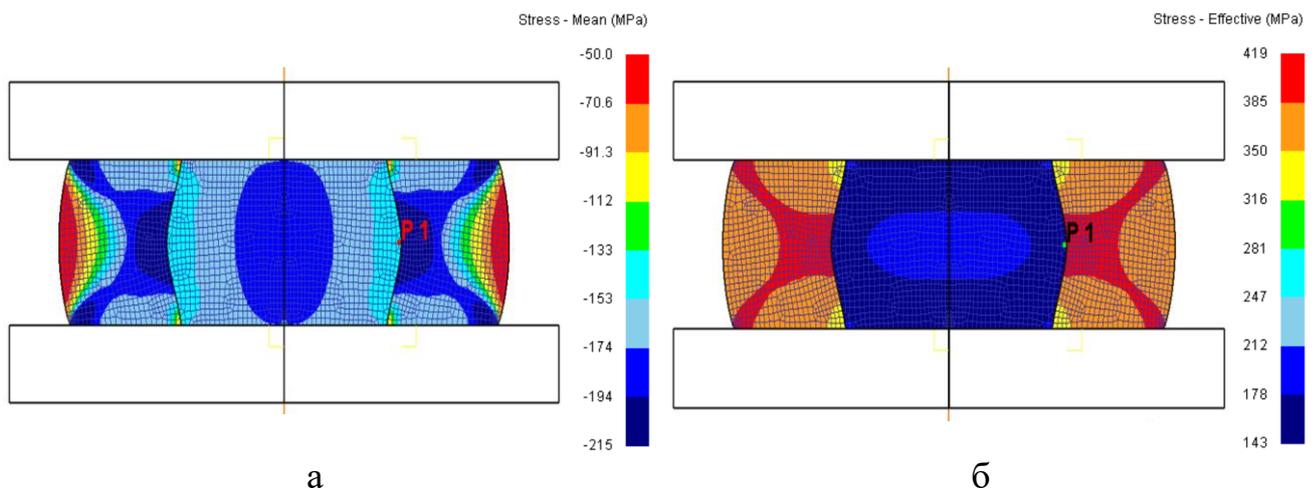


Рисунок 2.2 – Распределение среднего напряжения (а) и интенсивности напряжений (б) при осадке магниевой заготовки в медной оболочке при соотношениях $h_0/H_0 = 1$, $s_0/D_0 = 0,53$

По результатам расчета значение показателя напряженного состояния в точке P1 в данном случае равно -1,49, то есть, по сравнению с вариантом осадки цилиндрической заготовки без применения оболочки, повышено по модулю в четыре раза, что привело к увеличению уровня сжимающих напряжений и, как следствие, к увеличению возможного относительного обжатия без признаков разрушения заготовки.

С целью рассмотрения возможности применения более тонкой оболочки для проведения успешной операции осадки толщина стенки оболочки уменьшена в четыре раза, то есть $s_0 = 2,55$ мм, отношение толщины оболочки к диаметру заготовки равно $s_0/D_0 = 2,55/19,5 = 0,13$, и осуществлено моделирование такого варианта осадки магниевой заготовки.

На рисунке 2.3 представлено решение краевой задачи осадки цилиндрической магниевой заготовки в медной оболочке при относительном обжатии 49% с сеткой конечных элементов.

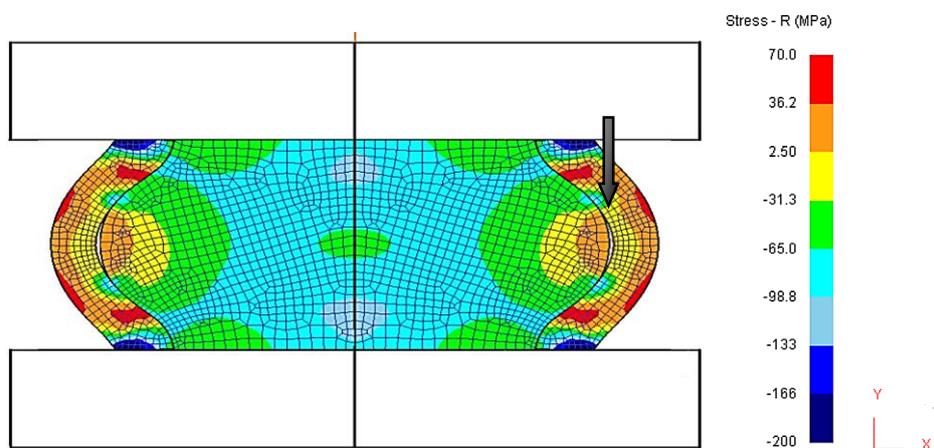


Рисунок 2.3 – Распределение радиальных напряжений при осадке магниевой заготовки в медной оболочке при соотношениях $h_0/H_0 = 1$, $s_0/D_0 = 0,13$

Здесь видно, что формоизменение такой сборки сопровождается образованием полости между заготовкой и оболочкой (обозначено темной стрелкой). Оболочка на части контактной поверхности не выполняет своей функции – не создает сжимающих напряжений. В самой заготовке в области образования полости создаются напряжения растяжения, которые появляются вследствие образования бочки.

На рисунке 2.4 показано распределение среднего напряжения (рисунок 2.4, а) и интенсивности напряжений (рисунок 2.4, б). По результатам расчета значение показателя напряженного состояния в точке P1 равно 1,85. Таким образом, в данном случае оценка σ/T показала превалирование растягивающих напряжений в зоне образования полости между заготовкой и оболочкой, вследствие чего велика вероятность разрушения боковой поверхности заготовки.

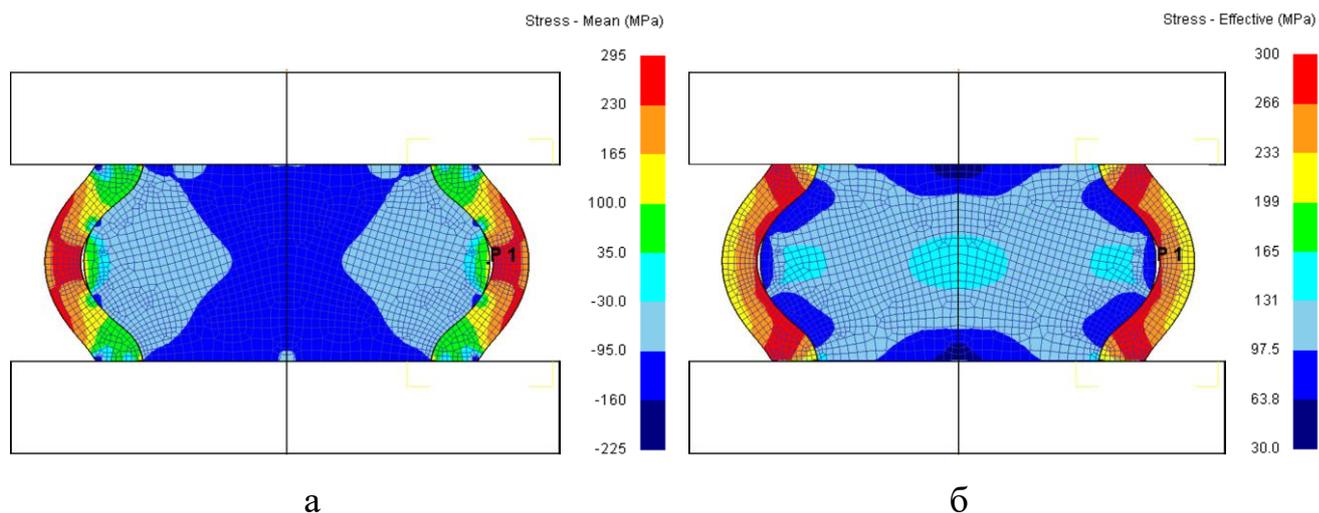


Рисунок 2.4 – Распределение среднего напряжения (а) и интенсивности напряжений (б) при осадке магниевой заготовки в медной оболочке при соотношениях $h_0/H_0 = 1$, $s_0/D_0 = 0,13$

Данный вариант осадки опробован в условиях реального эксперимента, по результатам которого между заготовкой и оболочкой также образовалась полость. После удаления оболочки с поверхности заготовки зафиксировано разрушение боковой поверхности заготовки (рисунок 2.5). Таким образом, результаты моделирования подтверждены.



Рисунок 2.5 – Фото магниевой заготовки после осадки в медной оболочке при соотношениях $h_0/H_0 = 1$, $s_0/D_0 = 0,13$

В качестве эксперимента толщина стенки оболочки увеличена до значения $s_0 = 5,0$ мм, отношение толщины оболочки к диаметру заготовки равно $s_0/D_0 = 5,0/19,5 = 0,26$, и осуществлено моделирование такого варианта осадки магниевой заготовки.

На рисунке 2.6 представлено решение краевой задачи осадки цилиндрической магниевой заготовки в медной оболочке при относительном обжатии 49% с сеткой конечных элементов.

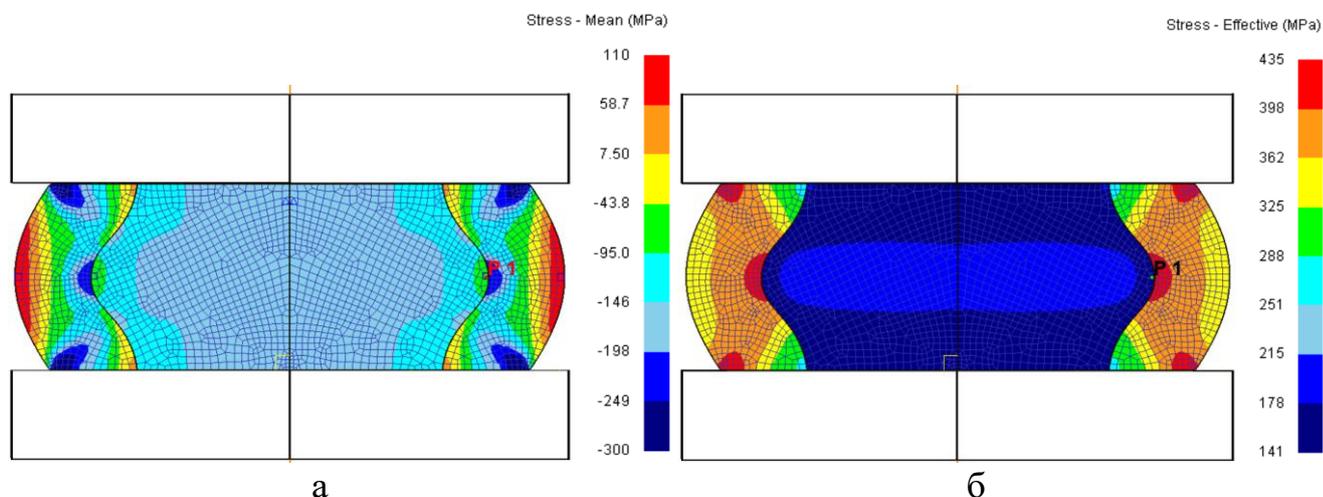


Рисунок 2.6 – Распределение среднего напряжения (а) и интенсивности напряжений (б) при осадке магниевой заготовки в медной оболочке при соотношениях $h_0/H_0 = 1$, $s_0/D_0 = 0,26$

Здесь видно, что полость между заготовкой и оболочкой не образовалась. В назначенной контрольной точке P1 оценили значение показателя напряженного состояния. По результатам расчета σ/T в этом случае имеет величину -0,48. Таким образом видно, что произошло незначительное увеличение показателя напряженного состояния по модулю по сравнению с его значением при осадке без оболочки.

Также получены решения задач при $s_0 = 7,0$ мм ($s_0/D_0 = 7,0/19,5 = 0,36$) и $s_0 = 13,0$ мм ($s_0/D_0 = 13,0/19,5 = 0,66$).

Результаты расчетов показателя напряженного состояния в точке P1 в зависимости от s_0/D_0 сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Показатель напряженного состояния в зависимости от s_0/D_0

s_0/D_0	0	0,26	0,36	0,53	0,66
σ/T	-0,36	-0,48	-0,82	-1,49	-1,74

По данным таблицы 2.1 построен график функции $\sigma/T = f(s_0/D_0)$, представленный на рисунке 2.7.

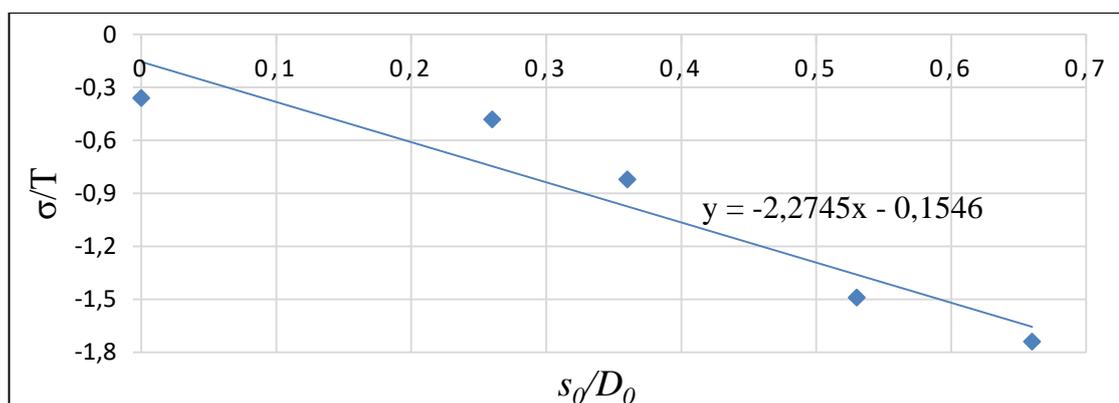


Рисунок 2.7 – График функции $\sigma/T = f(s_0/D_0)$ в точке P1

Таким образом, установлено влияние параметра s_0/D_0 на величину показателя напряженного состояния в процессе осадки магниевой цилиндрической заготовки в медной оболочке – с увеличением s_0/D_0 показатель напряженного состояния увеличивается, что приводит к увеличению уровня сжимающих напряжений в данной схеме деформации.

Результаты этой части исследования опубликованы в источниках [135-137].

2.2 Разработка приемов сборки композиционной заготовки для осадки цилиндрической магниевой заготовки в медном пояске

По результатам литературного обзора выявлена проблема – невозможность применения простых приемов разделения заготовки на цилиндр и оболочку в процессе кузнечной осадки, в том числе при осадке в поясках (коротких оболочках), из-за искривления боковой поверхности и отсутствия стабилизации диаметра цилиндра.

Для устранения выявленной проблемы были разработаны изобретения, на которые получен патент на изобретение [138] и подана заявка на полезную модель, в виде композиционной заготовки для кузнечной осадки, состоящей из цилиндра и охватывающей его по боковой поверхности кольцевой оболочки, имеющей внутренний диаметр, равный диаметру цилиндра. Толщина стенки кольцевой оболочки имеет различные по высоте размеры – максимальная толщина стенки расположена посередине высоты цилиндра. Увеличение толщины стенки в направлении середины высоты цилиндра обосновано наибольшим подпором при

осадке именно в этой области, что мешает процессу бочкообразования. В результате вместо выпуклой наружной поверхности цилиндра после осадки возможно получить достаточно ровную цилиндрическую поверхность, и оболочку удастся отделить от цилиндра простой операцией выпрессовывания.

Формой стенки оболочки в изобретении [138] является равнобедренный треугольник, который описывает профиль стенки кольцевой оболочки, при этом основание треугольника примыкает к боковой поверхности цилиндра, а максимальная толщина стенки может быть достигнута в его вершине. Треугольная форма стенки оболочки в отличие от криволинейной предпочтительна тем, что выточить такую оболочку можно на простейшем токарном оборудовании. Вместе с тем, наличие треугольной формы стенки предполагает появление ребер, в том числе с достаточно острыми углами, особенно при основании равнобедренного треугольника. Для снижения уровня концентрации напряжений предлагается снабдить ребра кольцевой оболочки радиусами скруглений. Наличие радиусов скруглений позволяет избежать концентрации напряжений не только в самих ребрах оболочки, но и в зонах заготовки, контактирующих с этими ребрами. Кроме того, наличие острых кромок не позволяет создать надежную опору оболочки на опорное кольцо при реализации приема выпрессовывания. Радиус закруглений позволяет вместо точечного контакта создать опорную площадку.

Композиционная заготовка для кузнечной осадки, предложенная в изобретении [138], представляющая собой цилиндр 1 и охватывающую его по боковой поверхности кольцевую оболочку 5, приведена на рисунке 2.8. Высота оболочки обозначена как h_o , а высота цилиндра как H_o .

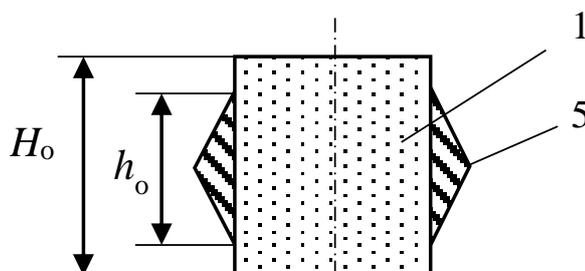


Рисунок 2.8 – Профиль композиционной заготовки, где оболочка имеет профиль равнобедренного треугольника

В полезной модели оболочка имеет форму кругового сегмента с максимальной толщиной стенки посередине высоты цилиндра. Наличие формы стенки оболочки в виде сегмента круга не предполагает появление ребер с острыми углами в поперечном сечении. Это препятствует локализации напряжений при острых кромках.

Композиционная заготовка для кузнечной осадки, предложенная в полезной модели, представляющая собой цилиндр 1 и охватывающую его по боковой поверхности кольцевую оболочку 6, приведена на рисунке 2.9. Высота оболочки обозначена как h_o , а высота цилиндра как H_o .

Геометрические параметры стенки кольцевой оболочки в обоих вариантах подбираются из условия сохранения прямолинейности образующей цилиндра. Эти параметры будут зависеть от условий трения, режима обжатий, свойств материала.

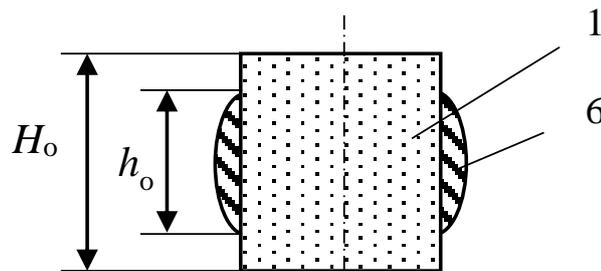


Рисунок 2.9 – Профиль композиционной заготовки, где оболочка имеет форму кругового сегмента

Отметим, что при деформации малопластичных материалов в качестве материала оболочек часто применяется медь, как материал, обладающий повышенным уровнем пластичности, выдерживающий высокий уровень растягивающих напряжений без образования шейки. Поэтому в данном случае цилиндр выполнен из магния, а оболочка – из меди.

Для доказательства достижения технического результата в программном модуле DEFORM-2D выполнены расчеты осадки композиционной заготовки в нескольких вариантах.

Магниевый образец представлен в виде цилиндра диаметром $D_0 = 15$ мм и высотой $H_0 = 15$ мм ($H_0/D_0 = 1$), диаметром $D_0 = 7,5$ мм и высотой $H_0 = 15$ мм (H_0/D_0

= 2) и диаметром $D_0 = 30$ мм и высотой $H_0 = 15$ мм ($H_0/D_0 = 0,5$). Показатель трения по Зибелю равен 0,1. Относительное обжатие – 50%.

На рисунке 2.10 (параметр $H_0/D_0 = 1$) показано продольное сечение правой половины цилиндра 1, подвергнутого кузнечной осадке без оболочки, при использовании одного из вариантов оболочки 2 треугольной формы в поперечном сечении, при использовании одного из вариантов оболочки 2 поперечного сечения в форме кругового сегмента, соответственно.

Обычно потеря пластичности сопровождается появлением на боковой поверхности трещин вертикальной направленности, что говорит о действии растягивающих тангенциальных напряжений, поэтому на рисунках отображены уровни именно тангенциальных напряжений. Видно, что боковая поверхность цилиндра при осадке без оболочки (рисунок 2.10, а) подверглась бочкообразованию. Значения тангенциальных напряжений на боковой поверхности цилиндра в случае осадки без оболочки равны 54,1 МПа.

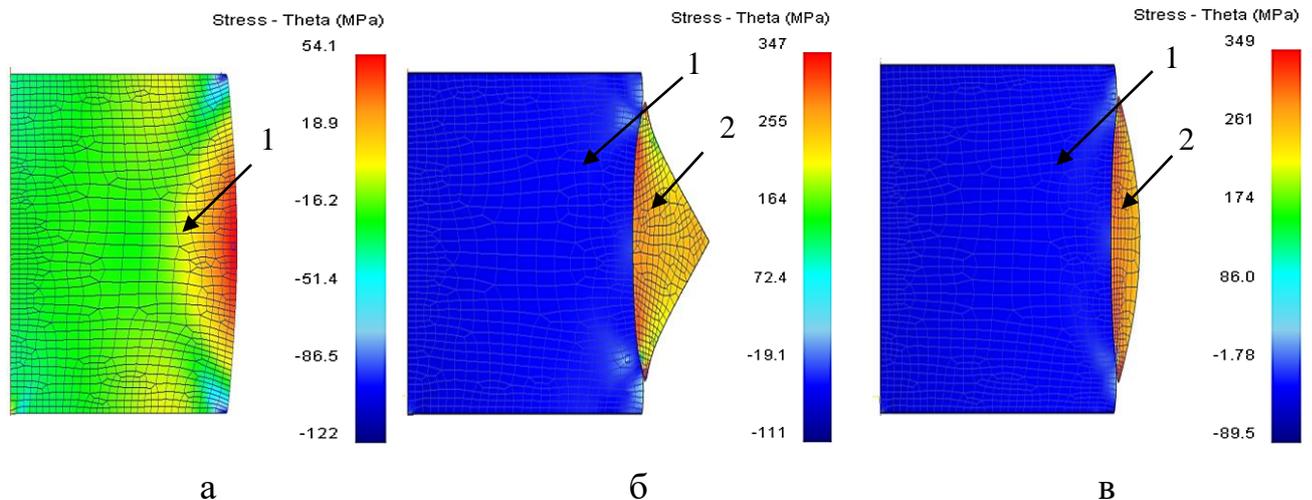


Рисунок 2.10 – Правая половина очага деформации при осадке цилиндрической заготовки 1 без оболочки (а), при использовании одного из вариантов оболочки треугольной формы в поперечном сечении (б), при использовании одного из вариантов оболочки поперечного сечения в форме кругового сегмента (в), изображена сетка конечных элементов и поле тангенциальных напряжений

Тангенциальные напряжения в варианте решения задачи при наличии оболочки в виде пояска треугольной формы равны -111 МПа (рисунок 2.10, б), а в случае применения оболочки поперечного сечения в форме кругового сегмента –

-89,5 МПа (рисунок 2.10, в). Показатель напряженного состояния в этих случаях улучшился, но при этом произошло искажение боковой поверхности цилиндра – она приобрела вогнутую форму. Теперь для удаления оболочки с поверхности не удастся применить прием выпрессовывания. Поэтому целесообразно подобрать такие параметры оболочки, которые приведут к получению ровной поверхности раздела оболочки и заготовки [139].

Далее расчеты выполнили при переменных значениях геометрических параметров: начальной высоты оболочки h_0 , начальной высоты равнобедренного треугольника (начальной высоты сегмента круга) s_0 , начальной высоте и диаметре цилиндра H_0 и D_0 . Из этих размерных величин создан безразмерный параметр s_0/D_0 . В функции этого параметра в результате решения задачи получали безразмерный параметр D_6/D_k , где D_6 – наибольший диаметр цилиндра (по бочке), D_k – наименьший диаметр цилиндра (по контактной поверхности). При $D_6/D_k < 1,00$ получали вогнутую боковую поверхность цилиндра, при $D_6/D_k > 1,00$ получали выпуклую боковую поверхность. Получение значения $D_6/D_k = 1,00$ – получение формы поверхности с образующей в виде прямой линии.

Для прогноза опасности разрушения в опасной зоне магниевого образца (район выпуклости боковой поверхности) назначена контрольная точка P1 с относительными координатами $z/h = 0$; $r/R = 1$, здесь z и r – текущие координаты по радиусу и вертикальной оси; h и R – половина высоты и радиус заготовки, и в ней определен параметр σ/T , для чего в этой точке выполнена оценка значений параметра среднего напряжения и интенсивности напряжений.

Результаты расчетов при применении пояска треугольной формы отражены в таблице 2.2, где видно, что для $H_0/D_0 = 0,5$ значение $D_6/D_k = 1,00$ достигается при выполнении неравенства $0,050 < s_0/D_0 < 0,083$, то есть такой диапазон начальных геометрических параметров позволяет решить техническую проблему стабилизации диаметра цилиндра после процесса осадки. Соответственно, для $H_0/D_0 = 1$ значение $D_6/D_k = 1,00$ достигается в диапазоне $0,046 < s_0/D_0 < 0,066$, а для $H_0/D_0 = 2,0$ при $0,020 < s_0/D_0 < 0,027$.

Таким образом, здесь показано, что для диапазона $0,5 < H_0/D_0 < 2,00$, при котором обычно осуществляют кузнечную осадку, удастся найти такое соотношение s_0/D_0 , при котором боковая стенка цилиндра описывается прямолинейной образующей.

Таблица 2.2 – Формоизменение цилиндра при наличии пояса треугольной формы

№	Размеры оболочки, мм		H_0/D_0	s_0/D_0	D_6/D_k	σ/Γ
	h_0	s_0				
1	7	0,3	0,5	0,010	1,03	-0,33
2		0,5		0,016	1,01	-0,34
3		0,7		0,023	1,01	-0,34
4		1,0		0,033	1,01	-0,41
5		1,5		0,050	1,00	-0,55
6		2,0		0,066	1,00	-0,63
7		2,5		0,083	1,00	-0,66
8		3,0		0,100	0,99	-0,79
12	Без оболочки			-	1,02	-0,33
13	7	0,3	1	0,020	1,03	-0,27
14		0,5		0,033	1,01	-0,34
15		0,7		0,046	1,00	-0,41
16		1,0		0,066	1,00	-0,47
17		1,5		0,100	0,98	-0,52
18		2,0		0,133	0,98	-0,56
19		2,5		0,166	0,97	-0,61
20		3,0		0,200	0,97	-0,72
22	Без оболочки			-	1,04	-0,27
23	7	0,1	2,0	0,013	1,01	-0,34
24		0,15		0,020	1,00	-0,41
25		0,2		0,027	1,00	-0,49
26		0,3		0,040	0,99	-0,54
27		0,5		0,067	0,96	-0,62
28		0,7		0,093	0,94	-0,72
29	Без оболочки			-	1,08	-0,31

Результаты расчетов при применении пояска поперечного сечения в форме кругового сегмента отражены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Формоизменение цилиндра при наличии пояска поперечного сечения в форме кругового сегмента

№	Размеры оболочки, мм		H_0/D_0	s_0/D_0	D_6/D_k	σ/T
	h_0	s_0				
1	7	0,3	0,5	0,01	1,02	-0,33
2		0,5		0,016	1,01	-0,34
3		0,7		0,023	1,01	-0,34
4		1,0		0,033	1,00	-0,41
5		1,5		0,05	1,00	-0,54
6		2,0		0,066	1,00	-0,62
7		2,5		0,083	1,00	-0,65
8		3,0		0,1	0,99	-0,78
9		3,5		0,116	0,99	-0,82
10		4,0		0,133	0,99	-0,85
11	Без оболочки			-	1,02	-0,33
12	7	0,4	1	0,026	1,03	-0,27
13		0,5		0,033	1,02	-0,34
14		0,6		0,04	1,00	-0,40
15		0,7		0,046	1,00	-0,45
16		0,8		0,053	1,00	-0,51
17		0,9		0,06	0,99	-0,55
18		1,0		0,066	0,99	-0,59
19		1,5		0,1	0,98	-0,71
20	Без оболочки			-	1,04	-0,27
21	7	0,08	2,0	0,01	1,01	-0,33
22		0,1		0,013	1,00	-0,40
23		0,15		0,02	1,00	-0,47
24		0,2		0,027	0,99	-0,52
25		0,3		0,04	0,98	-0,60
26		0,4		0,053	0,97	-0,69
27	Без оболочки			-	1,08	-0,31

Здесь также показан эффект от применения оболочки в виде значения показателя напряженного состояния в опасной зоне. Видно, что без применения оболочки показатель σ/T равен $-0,27 \dots 0,33$. При применении оболочки его удается увеличить по модулю до $-1,01$, что показывает больший уровень напряжений сжатия и соответственно, приводит к повышению пластичности металла. Из таблицы 2.2 видно, что для $H_0/D_0 = 0,5$ значение $D_6/D_k = 1,00$ достигается при выполнении неравенства $0,033 < s_0/D_0 < 0,083$, то есть такой диапазон начальных геометрических параметров позволяет решить техническую проблему стабилизации диаметра цилиндра после процесса осадки. Соответственно, для $H_0/D_0 = 1$ значение $D_6/D_k = 1,00$ достигается в диапазоне $0,04 < s_0/D_0 < 0,053$, а для $H_0/D_0 = 2,0$ при $0,013 < s_0/D_0 < 0,02$.

Таким образом, здесь показано, что для диапазона $0,5 < H_0/D_0 < 2,00$, при котором обычно осуществляют кузнечную осадку, удается найти такое соотношение s_0/D_0 , при котором боковая стенка цилиндра описывается прямолинейной образующей.

Можно отметить, что полученные зависимости описывают деформированное состояние в не очень широкой области параметров, так как они получены при одинаковых значениях относительного обжатия и показателя трения, при одинаковом сочетании свойств материалов заготовки и оболочки. Поскольку возможных сочетаний параметров в реальной практике обработки оказывается слишком много, то речь может идти о том, чтобы обращаться к расчетам при условии предварительного выбора хотя бы части параметров.

Из таблицы 2.2 и 2.3 видно, что показатели напряженного состояния в опасной зоне при применении предложенных поясков имеют достаточно низкие значения по модулю, поэтому следующая часть расчетов направлена на повышение показателя σ/T по модулю при сохранении прямолинейной образующей боковой поверхности.

В качестве эксперимента для осадки цилиндрической магниевой заготовки диаметром $D_0 = 15$ мм и высотой $H_0 = 15$ мм ($H_0/D_0 = 1$) предлагается использовать поясok пятиугольного поперечного сечения высотой $h_0 = 10$ мм, высотой

пятиугольника $s_0 = 18$ мм. Здесь, вследствие формы пояска, наибольший подпор будет накладываться именно на центральную область образования бочки.

Для расчета параметра σ/T пришлось наметить контрольные точки P_i ($i = 1, 2, \dots, 9$), установив относительные координаты $z/h = 0; 0,5; 1$; $r/R = 0; 0,5; 1$. Здесь z и r – текущие координаты по радиусу и вертикальной оси; h и R – половина высоты и радиус заготовки. В этих точках выполнена оценка значений параметра stress mean, которые соответствуют понятию среднего напряжения (рисунок 2.10, а) и параметра stress effective, которые соответствуют понятию интенсивности напряжений $\sigma_{\text{и}}$ (рисунок 2.10, б).

Из рисунка 2.11 видно, что осадка с применением такого пояска осуществляется с сохранением прямолинейной образующей боковой поверхности, и, как следствие, приводит к возможности применения простого способа разделения пояска и заготовки – выпрессовывания.

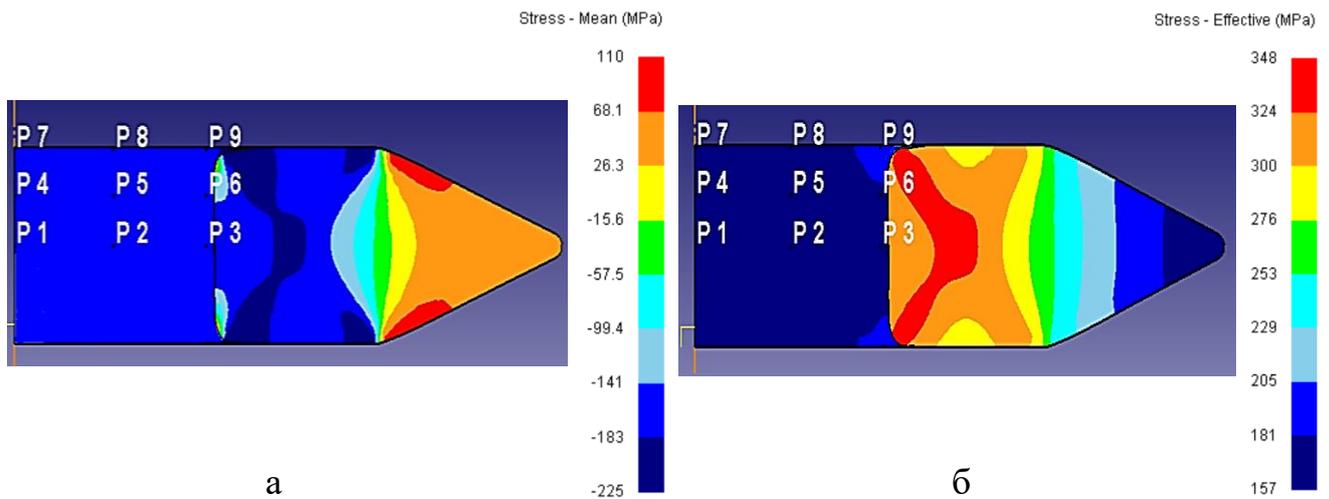


Рисунок 2.11 – Правая половина очага деформации с полем средних напряжений (а), правая половина очага деформации с полем интенсивности напряжений (б)

Расчетные данные по показателю напряженного состояния в контрольных точках P1-P9 представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Показатель σ/T в контрольных точках P1 - P9

z/h	r/R		
	0	0,5	1
1	-1,76	-1,58	-1,39
0,5	-1,74	-1,62	-1,44
0	-1,68	-1,71	-1,48

Из таблицы 2.4 видно, что показатель σ/T может варьироваться на этой стадии обработки в пределах $-1,39\dots-1,76$. Наибольшие по модулю значения на уровне $-1,76$ характерны для центральных точек, прилегающих к контактной поверхности. При сравнении значений показателя напряженного состояния, представленных в таблице 2.1, 2.2 при $H_0/D_0 = 1$ и $D_6/D_k = 1,00$, видно, что σ/T в опасной зоне (координаты $z/h = 0$ и $r/R = 1$), то есть в районе выпуклости боковой поверхности, повышен примерно в 3 раза. Таким образом можно предположить, что использование такого пояса позволит осуществить успешную осадку магниевой заготовки вследствие обеспечения достаточного уровня сжимающих напряжений.

Создан безразмерный параметр s_0/D_0 – отношение высоты пятиугольника s_0 к диаметру заготовки D_0 и рассчитаны значения показателей напряженного состояния в опасной точке P3 (координаты $z/h = 0$ и $r/R = 1$) при различных значениях параметра s_0/D_0 . Расчеты позволили построить график функции $\sigma/T = f(s_0/D_0)$, представленный на рисунке 2.11, посредством которого определено влияние параметра s_0/D_0 на величину показателя напряженного состояния.

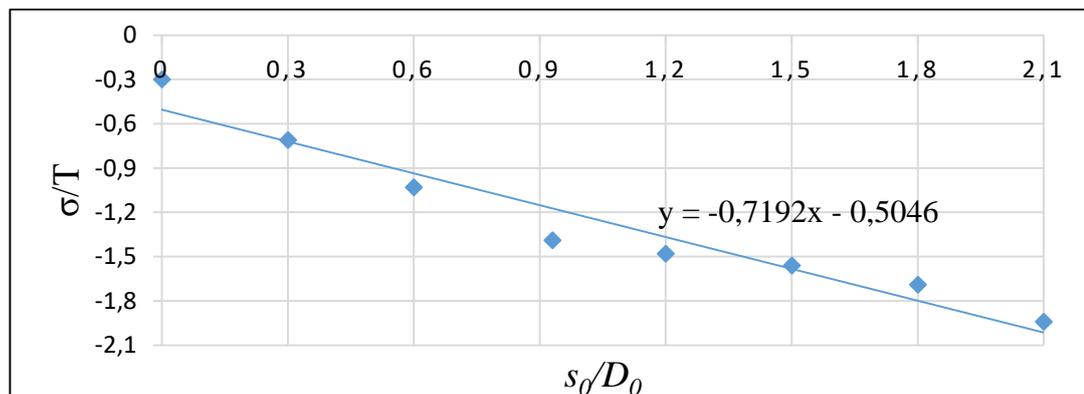


Рисунок 2.12 – График функции $\sigma/T = f(s_0/D_0)$

Таким образом, выявлено влияние на форму боковой поверхности таких параметров как отношение толщины стенки оболочки к диаметру заготовки и отношение высоты заготовки к ее диаметру. Увеличение толщины оболочки может приводить к получению вогнутой боковой поверхности, особенно если отношение высоты заготовки к ее диаметру больше единицы. Также определено влияние

параметра s_0/D_0 на величину показателя напряженного состояния на примере применения пояска пятиугольного сечения. Посредством увеличения параметра s_0/D_0 показатель σ/T может быть увеличен до величин, обеспечивающих достаточного высокий уровень сжимающих напряжений.

2.3 Исследование процесса осадки цилиндрической магниевой заготовки в медной оболочке без ее обжатия

Как уже отмечалось, в процессах кузнечной осадки одним из способов повышения пластичности является применение оболочек различного вида. ИФМ УрО РАН предложена схема, в которой при двустороннем деформировании магниевых образцов в медных обоймах использовали два пуансона, установленные в расточенные отверстия обоймы с обеих ее торцов [66], при этом в физическом эксперименте приняты следующие размеры: заготовка в форме цилиндра из магния диаметром 21,8 мм и высотой 25 мм, медная обойма наружным диаметром 48 мм и высотой 29,5 мм. Внутренний диаметр обоймы равен диаметру магниевой заготовки. Осадку осуществляли пуансонами диаметром 25 мм. Абсолютное обжатие составило величину 5,9 мм. В экспериментах по этой схеме не выявлено разрушение металла заготовки. В то же время при обычной осадке заготовка разрушалась.

Следует отметить, что напряженное состояние оказывает большое влияние на пластичность обрабатываемого материала. Это состояние описывается методами тензорного представления, но для оценки ситуации принято применять инварианты тензоров в том или ином виде, что устраняет влияние координат на результаты анализа. В разделах механики деформируемого тела, касающихся влияния напряженного состояния на пластичность, используют первый, но иногда и другие инварианты тензора напряжений [140], сами инварианты трансформированы в показатель напряженного состояния [141,142] и коэффициент Лоде [143,144].

В данной диссертационной работе произведена математическая оценка инвариантных показателей напряженного состояния процесса осадки магния в оболочке по схеме, предложенной ИФМ УрО РАН [66].

Далее будут использованы основы теории разрушения, изложенные, например, в книге [145]. Разрушение наступает при превышении предельной степени деформации сдвига Λ_p , которая в свою очередь зависит от показателя напряженного состояния σ/T и коэффициента Лоде μ_σ .

Показатель μ_σ определяется соотношением:

$$\mu_\sigma = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1, \quad (2.2)$$

где σ_i ($i = 1, 2, 3$) – главные нормальные напряжения, при этом напряжения ранжированы по правилу $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, то есть нумерация начинается максимальным напряжением и заканчивается минимальным.

Оценка напряженно-деформированного состояния процесса деформации методом осадки выполнена методом конечных элементов с помощью программного модуля DEFORM-2D, системой которого предусмотрена возможность расчета максимального (первого) и минимального (третьего) главных нормальных напряжений, однако второе главное напряжение не рассчитывается. Поэтому его определили специально расчетом по формуле:

$$\sigma_2 = 3\sigma - (\sigma_1 + \sigma_3). \quad (2.3)$$

Одна из других проблем – отсутствие в перечне переменных, рассчитываемых в системе DEFORM: показателя напряженного состояния σ/T и коэффициента Лоде μ_σ , их рассчитывали специально и приводили к табличному виду.

На рисунке 2.13, а приведено фото сборки магниевого образца и медной обоймы, а на рисунке 2.13, б изображена расчетная схема. Размеры пуансонов 1 и 2, магниевого заготовки 3 и обоймы 4 приняты равными параметрам физического эксперимента. Элементы сборки 3 и 4 являются пластически деформируемыми телами, поэтому в их сечении выполнена сетка конечных элементов.

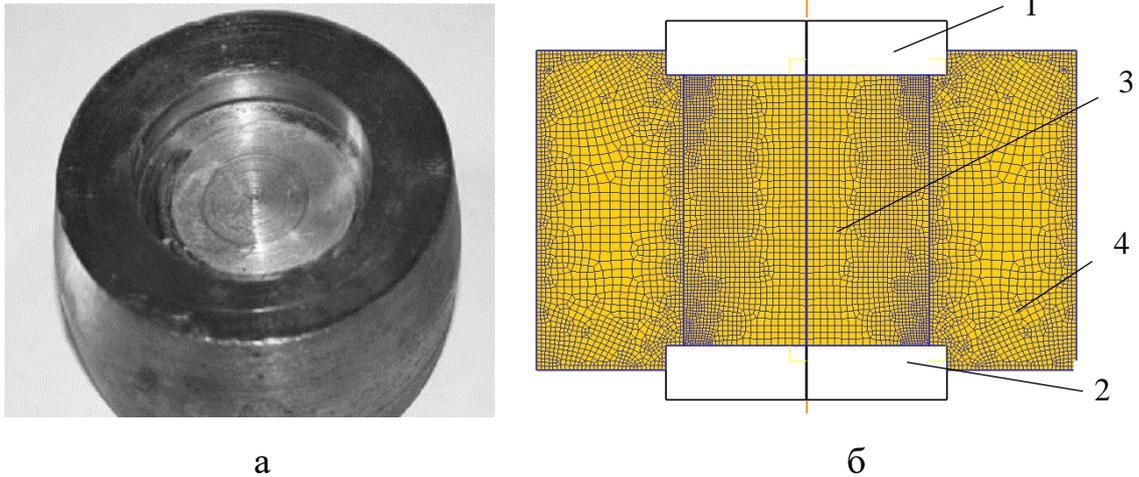


Рисунок 2.13 – Фото сборки (а) и схема процесса с сеткой конечных элементов (б): 1 и 2 – пуансоны; 3 – заготовка; 4 - обойма

Установлены взаимодействия на контактных поверхностях: заготовка – бойки, заготовка – оболочка. На контакте с инструментом задан закон трения по Кулону с коэффициентом трения 0,1. На границе между заготовкой и обоймой коэффициент трения равен 0,5.

На рисунке 2.14 представлено распределение радиальных напряжений в оболочке и цилиндрической заготовке.

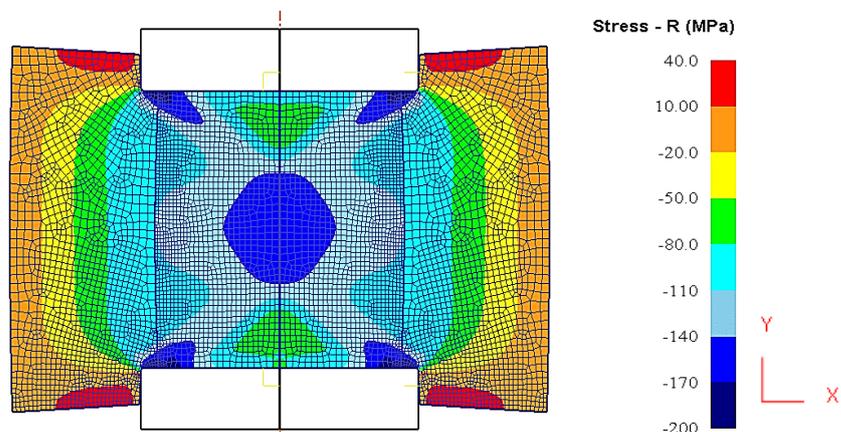


Рисунок 2.14 – Распределение радиальных напряжений

Здесь видно, что наружный контур сборки претерпевает действие напряжений растяжения. Это обусловлено тем, что цилиндрическая заготовка при осадке стремится увеличить свой диаметр, растягивая материал оболочки. Однако внутренний контур оболочки находится под действием напряжений сжатия. При

переходе к материалу цилиндрической заготовки наблюдается увеличение по модулю значений радиальных напряжений вплоть до уровня -200 МПа.

На рисунке 2.15 показано распределение степени деформации в оболочке и цилиндрической заготовке. Здесь видно, что наиболее высокий уровень деформации достигается в центральной зоне цилиндрической заготовки. Слабodeформируемые зоны находятся ближе к центру рабочей поверхности пуансонов и формируют области затрудненной деформации. Периферийные слои оболочки слабо подвержены деформациям.

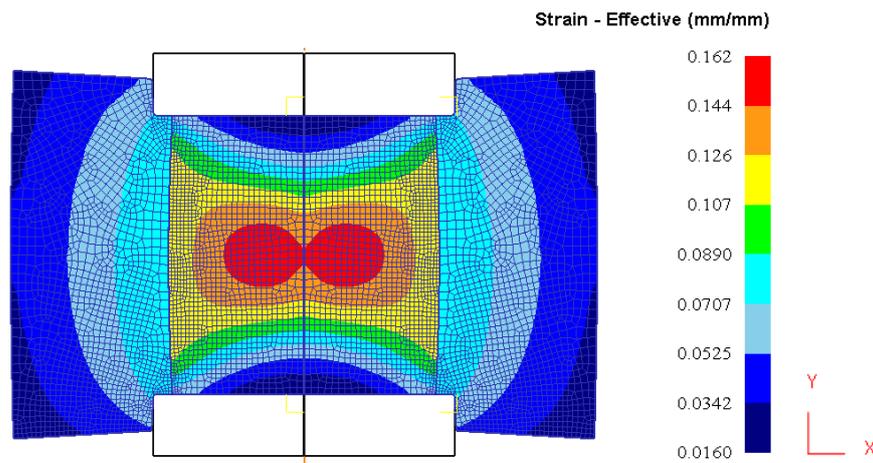


Рисунок 2.15 – Распределение степени деформации

На основе результатов моделирования сделана оценка показателя напряженного состояния, для определения которого назначены контрольные точки P1, ..., P9 с относительными координатами $z/h = 0; 0,5; 1$; $r/R = 0; 0,5; 1$. Здесь z и r – текущие координаты по радиусу и вертикальной оси; h и R – половина высоты и радиус заготовки. В этих точках выполнена оценка значений параметра stress effective, которые соответствуют понятию интенсивности напряжений $\sigma_{\text{и}}$ (рисунок 2.16, а) и параметра stress mean, которые соответствуют понятию среднего напряжения (рисунок 2.16, б).

В оболочке действуют предпочтительно растягивающие средние напряжения до +102 МПа (рисунок 2.16, б), их наличие создает опасность разрушения, именно поэтому здесь использован такой пластичный материал, как медь. Распределение средних напряжений в магниевой заготовке напоминает картину «ковочного креста», известного из теорииковки. Здесь зона повышенных (по модулю)

значений вытянута вдоль диагоналей по продольному сечению заготовки с достижением напряжения -280 МПа. При обычной ковке как раз вдоль линий «ковочного креста» возможен раскол заготовки. В данном случае наличие высоких (по модулю) значений среднего нормального напряжения, позволяет надеяться на увеличение уровня пластичности, что должно предотвратить разрушение.

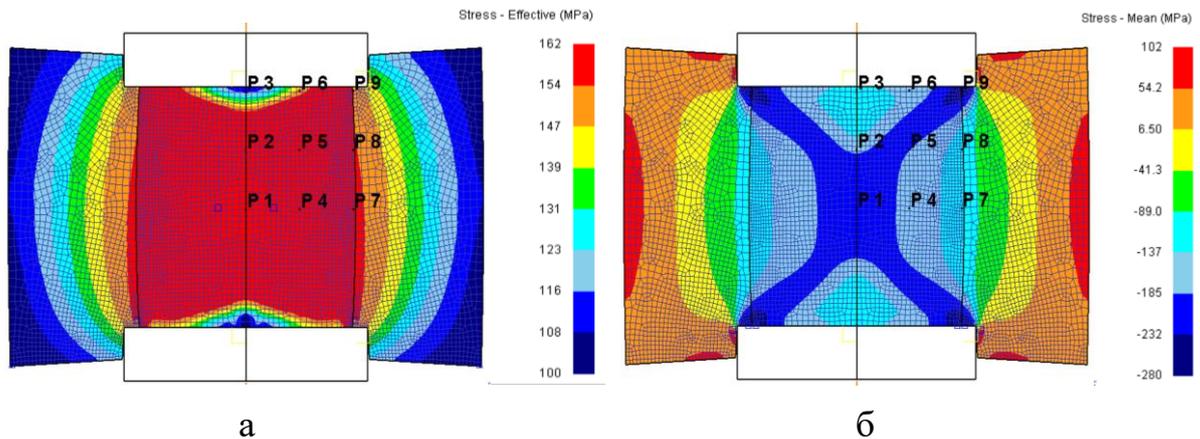


Рисунок 2.16 – Распределение: а – интенсивности напряжений, б – среднего напряжения

Иная картина наблюдается для распределения интенсивности напряжений (рисунок 2.16, а): они уменьшаются от центра к периферии, то есть по направлению к свободной поверхности. Градиент напряжений особенно велик на границе раздела заготовки и оболочки, что объясняется различием в механических свойствах материалов. В зонах затрудненной деформации, примыкающих к центрам торцов пуансонов, интенсивность напряжений падает, что обусловлено отсутствием упрочнения металла в этой области.

Расчетные данные по показателю напряженного состояния в контрольных точках P1-P9 представлены в таблице 2.5, где видно, что опасные зоны прилегают к точкам с координатами $z/h = 0$ и $r/R = 1$, поскольку пластичность металлов уменьшается с увеличением показателя σ/T .

Таблица 2.5 – Показатель σ/T в контрольных точках P1 - P9

z/h	r/R		
	0	0,5	1
1	-1,99	-1,75	-3,02
0,5	-1,86	-2,01	-1,24
0	-2,15	-1,83	-1,21

Вместе с тем значения σ/T , везде имеют отрицательные значения, то есть преобладают напряжения сжатия. Из таблицы видно, что показатель σ/T может варьироваться на этой стадии обработки в пределах $-1,21 \dots -3,02$. Наибольшие по модулю значения на уровне $-3,02$ характерны для периферийных точек, прилегающих к контактной поверхности. При этом неблагоприятные (наименьшие по модулю) значения находятся в районе выпуклости боковой поверхности. Возможно сравнение полученных результатов с результатами осадки цилиндрической заготовки на гладких бойках без трения. Как известно, в этом случае показатель напряженного состояния по всему объему заготовки одинаков и равен величине $-0,58$. При сравнении этого значения с результатами, отраженными в таблице, видно, что произошло увеличение показателя по модулю в $2 \dots 5$ раз. Именно поэтому пластичность металла в опытах возросла и ее оказалось достаточно для осуществления операции осадки без разрушения.

Возможно также сравнение полученных результатов с вариантом осадки с трением цилиндрической заготовки в обойме с расположением всей сборки на контактной поверхности бойков. Такой вариант приводит к большей величине перемещения металла в зоне возникновения выпуклости боковой поверхности [146] и отходу оболочки от заготовки. При отсутствии подпора и образовании выпуклой поверхности средние нормальные напряжения в этой зоне могут перейти из области сжимающих в область растягивающих. Боковая поверхность заготовки при недостаточно высокой пластичности может разрушаться. Поэтому желательно, чтобы обойма не подвергалась действию осевых напряжений.

Распределение максимальных и минимальных главных напряжений отображено на рисунке 2.17. Видно, что схема ковочного креста повторяется и для главных напряжений.

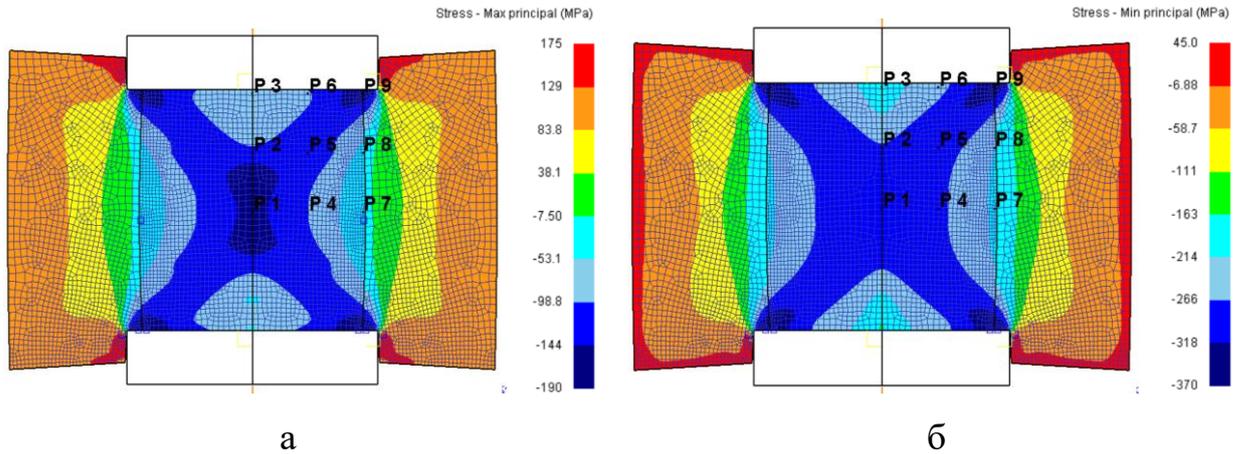


Рисунок 2.17 – Распределение максимального (а) и минимального (б) главного напряжения

После расчета второго главного напряжения удалось рассчитать коэффициент μ_σ . Результаты расчетов главных нормальных напряжений приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Главные нормальные напряжения (МПа) и коэффициент Лоде $\sigma_1 / \sigma_2 / \sigma_3 / \mu_\sigma$ при относительных координатах

z/h	r/R		
	0	0,5	1
1	- 92/-92/-205/0,98	-95/-106/-248/0,86	-190/-262/-370/0,2
0,5	-119/-118/-279/0,98	-118/-153/-293/0,60	-39/-90/-219/0,43
0	-148/-148/-310/1,00	-104/-138/-280/0,61	-23/-111/-208/0,05

Видно, что все главные напряжения являются отрицательными величинами, то есть они являются напряжениями сжатия. Опасность с позиции возможности разрушения представляют контрольные точки с наименьшими по модулю главными напряжениями. В их число входит точка P7 с координатами $z/h = 0$; $r/R = 1$, здесь $\sigma_1 = -23$ МПа. В этой же точке достигнуто значение коэффициента Лоде, близкое к нулю в отличие от точек, расположенных на оси заготовки, где этот коэффициент близок к единице. При нулевом значении коэффициента Лоде пластичность оказывается самой низкой, на что указывает ряд работ [147,148]. Поэтому указанную область можно считать опасным сечением с позиции трещинообразования.

Как видно из результатов компьютерного моделирования, в исследуемом способе осадки не происходит отхода оболочки от заготовки. На протяжении всего

процесса осадки на боковую поверхность заготовки действуют радиальные напряжения сжатия, повышающие пластичность металла, и позволяющие провести деформацию без разрушения.

Расчетами напряженно-деформированного состояния показано, что осадка магния в оболочке при воздействии прессового инструмента только на торец заготовки должна приводить к повышению пластичности металла [149-151], что ранее было показано экспериментально.

2.4 Выводы по главе

В данной главе выполнено исследование влияния бокового подпора на пластичность магния при холодной осадке посредством компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM.

Полученные в результате моделирования данные свидетельствуют о том, что:

1. выявлено влияние параметра s_0/D_0 на величину показателя напряженного состояния в процессе осадки магниевой цилиндрической заготовки в оболочках различного вида из пластичного материала, в качестве которого часто применяется медь, как материал, обладающий повышенным уровнем пластичности, выдерживающий высокий уровень растягивающих напряжений без образования шейки. Посредством увеличения параметра s_0/D_0 показатель σ/T может быть увеличен до величин, обеспечивающих осадку без разрушения заготовки.

2. определено значение показателя напряженного состояния, при котором в процессе холодной осадки в условиях реального эксперимента происходит разрушение боковой поверхности магниевой заготовки, также определено значение показателя напряженного состояния, при котором в процессе холодной осадки магниевой цилиндрической заготовки в медной оболочке в условиях реального эксперимента обеспечивается относительное обжатие на уровне 49 % без разрушения заготовки.

3. установлено влияние параметра s_0/D_0 в процессе совместной осадки магниевой заготовкой в медной оболочке на образование полости между заготовкой и оболочкой. Полость может быть ликвидирована увеличением параметра s_0/D_0 .

4. разработаны композиционные заготовки, включающие в себя короткие медные оболочки треугольного сечения и сечения в виде кругового сегмента, которые в процессе холодной осадки магниевых заготовок позволяют создать подпор пластическому течению основного металла, что влечет за собой повышение уровня напряжений сжатия и увеличение пластичности металла заготовки. А также применение таких оболочек ведет к получению образующей цилиндрической заготовки близкой к прямой линии, и как следствие, к применению простого метода разделения осаженной сборки на цилиндр и оболочку в виде выпрессовывания. Если в конце технологического цикла требуется получить правильный цилиндр, то получение такой формы уже на стадии кузнечной осадки, снижает отходы металла в виде стружки при операции обточки боковой поверхности.

5. в процессе осадки цилиндрической магниевой заготовки в медной оболочке без ее обжатия выявлено повышение показателя напряженного состояния по модулю в 2...5 раз при сравнении его с показателем напряженного состояния при обычной осадке. При этом выявлена зона с коэффициентом Лоде, близким к нулю. Она прилегает к середине высоты заготовки в месте контакта с облойкой и может являться опасным сечением с позиции возникновения трещинообразования.

3 ИССЛЕДОВАНИЕ УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ МАГНИЯ ПРИ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

3.1 Анализ напряженно-деформированного состояния и свойств полосы, полученной методом неравноканального углового прессования при комнатной температуре

ИФМ УрО РАН проведены эксперименты по неравноканальному угловому прессованию (НРКУП) цилиндрической заготовки диаметром 42 мм и высотой 20 мм, в результате деформации получена полоса прямоугольного сечения шириной 40 мм и толщиной 1 мм.

На рисунке 3.1 представлена схема НРКУП, в которой круглая заготовка 1 помещается в полость контейнера 2 и выдавливается пуансоном 3 в пересекающийся канал прямоугольного сечения 4.

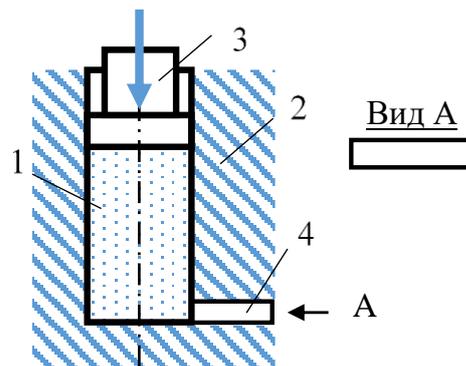


Рисунок 3.1 – Схема деформации НРКУП: 1 – круглая заготовка; 2 – контейнер; 3 – пуансон; 4 – канал прямоугольного сечения

С целью оценки напряженно-деформированного состояния осуществлено компьютерное моделирование данного процесса деформации. Размеры выбраны такими, которые соответствуют проведенному ИФМ УрО РАН физическому эксперименту. На контактной границе заготовки и инструментов сборки задан закон трения по Зибелю с показателем трения равным 0,2.

Из-за наличия объемной постановки в 3D пространстве возможно рассмотрение результатов решения с различных точек. На рисунке 3.2 изображен продольный разрез очага деформации в плоскости YZ с линиями равного уровня скорости деформации (рисунок 3.2, а) и степени деформации (рисунок 3.2, б). В отличие от степени деформации, которая является накопленной величиной,

скорость деформации описывает состояние мгновенного очага деформации. Видно, что скорости деформации нарастают по мере приближения металла к отверстию матрицы. Причем оставшийся в контейнере металл заготовки представляет собой жесткую зону.

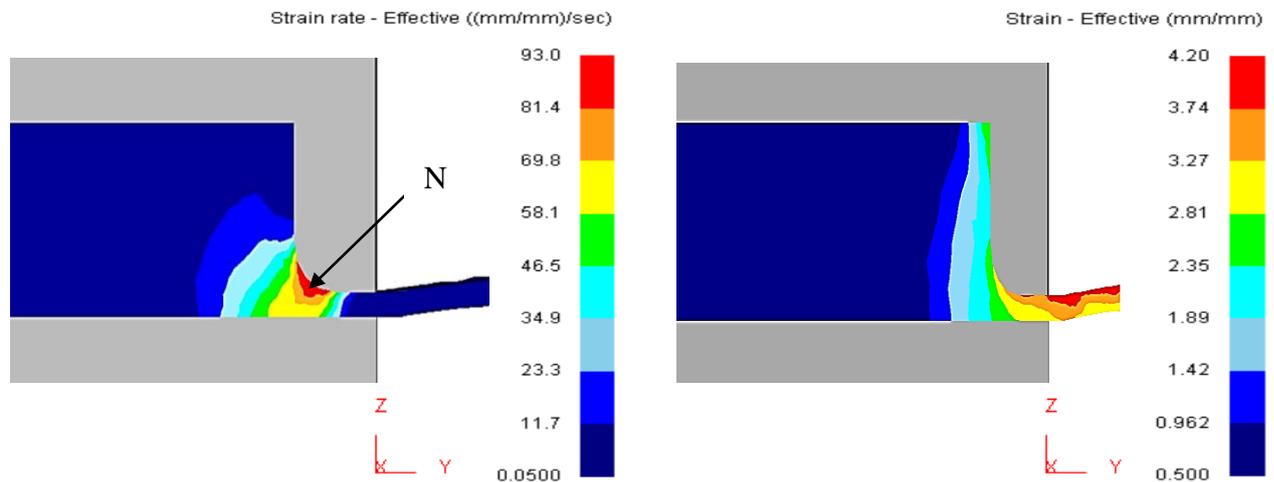


Рисунок 3.2 – Продольный разрез очага деформации в плоскости YZ с линиями равного уровня: а – скорости деформации с размерностью s^{-1} , N – максимум скорости деформации, б – степень деформации

Максимум скорости деформации (N) возник в зоне действия наибольших сдвигов. Близость максимума к радиусу закругления контейнера предполагает большее упрочнение металла верхней части получаемой полосы.

3D решение позволило оценить неравномерность деформации в поперечном сечении отпрессованной полосы, что показано на рисунке 3.3 распределением степени деформации. Видно, что деформация по сечению распределилась неравномерно. Кромка полосы нагартовывается существенно сильнее середины, что является дополнительным фактором для разрушения металла при дальнейшей прокатке отпрессованной полосы с целью утонения. Также верхняя часть полосы нагартована больше, чем нижняя, по степени деформации, это различие достигает 24%. Такое же различие наблюдается для кромки полосы относительно нижней поверхности.

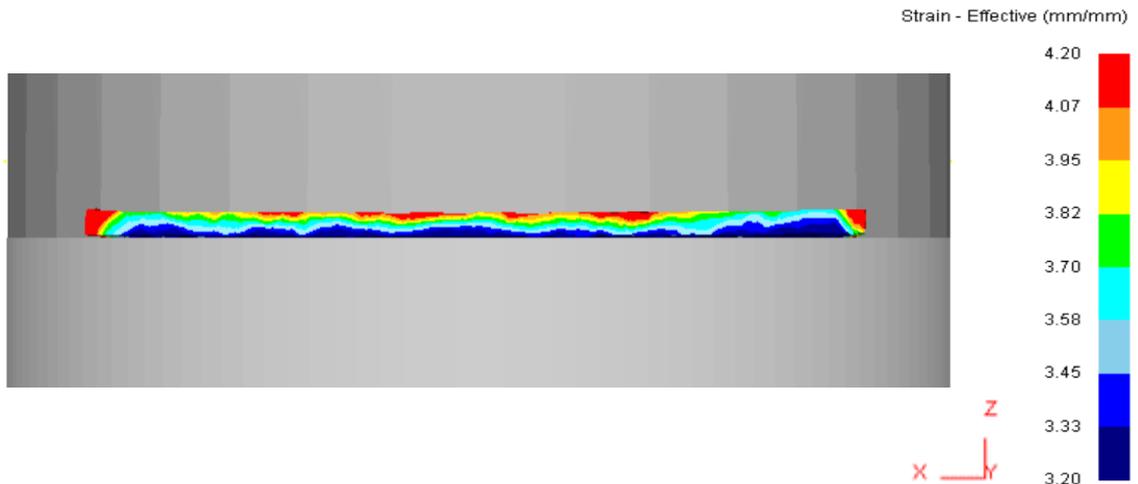


Рисунок 3.3 – Распределение степени деформации по сечению отпрессованной полосы в плоскости XZ , справа цветовой ключ

Пониженную степень деформации на нижней поверхности полосы можно объяснить тем, что материал здесь подвергается в основном деформации удлинения, а верхняя поверхность формируется при большем участии сдвиговых деформаций.

С целью подтверждения результатов моделирования было принято решение произвести измерения твердости по толщине полосы, полученной методом НРКУП в условиях реального эксперимента.

Сборочный узел прессового инструмента с отпрессованной полосой и пресс, на котором осуществлен процесс НРКУП показан на рисунке 3.4, а, б.



а



б

Рисунок 3.4 – Сборочный узел прессового инструмента (а): 1 – контейнер; 2 – отпрессованная полоса, пресс усилием 10 МН (б)

Для этого из полосы (рисунок 3.5, а) был вырезан образец в плане прямоугольной формы с размерами 10x15x1 мм на расстоянии 633 мм от переднего торца полосы (рисунок 3.5, б). При этом в контейнере еще оставалась часть заготовки высотой 21 мм. Таким образом, образец был вырезан на участке полосы, соответствующему стационарной стадии прессования.

Образец заливали в эпоксидную смолу холодного отвердевания. При пробоподготовке торцевые поверхности сначала были отшлифованы на абразивной бумаге разной зернистости, а затем отполированы до зеркального блеска с помощью фетра и алмазной пасты. Известно [152], что недостатком механической обработки шлифов является наклёп обработанной поверхности, и в результате шлифовки и полировки поверхностный слой упрочняется. Для удаления упрочнённого слоя использовали раствор 97% этилового спирта и 3% азотной кислоты. Образцы после травления промывали в этиловом спирте.

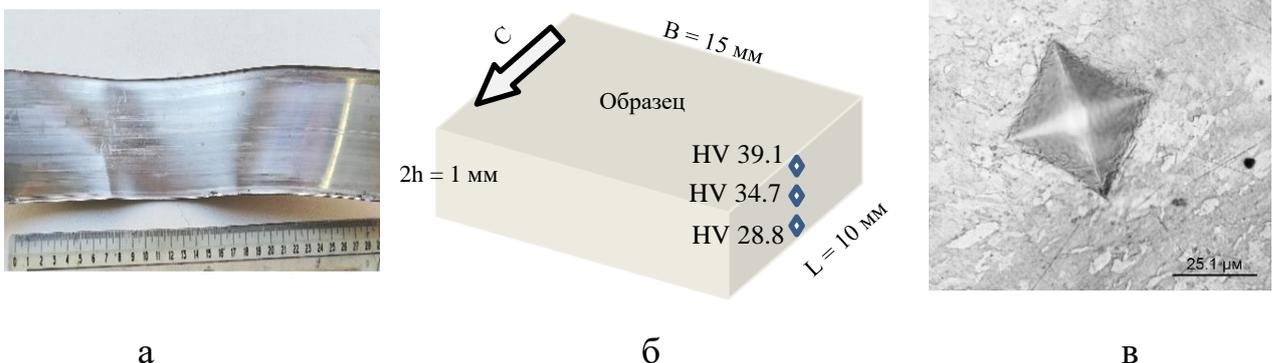


Рисунок 3.5 – Полоса, полученная методом НРКУП (а), образец для определения твёрдости (б) и отпечаток от индентора (в)

Микротвёрдость определяли по методу Виккерса. Для этого использовали прибор ПМТ-3 с алмазной пирамидой с квадратным основанием с углом при вершине между противоположными гранями пирамиды равным 136° . Для всех измеряемых точек нагрузка составила 0,196 Н (20 Г), время нагружения 10 с. На рисунке 3.5, б приведена схема измерения твёрдости по толщине полосы с указанием размеров образца и направления. Микротвёрдость измеряли в трёх точках: в верхнем приповерхностном, срединном и нижнем приповерхностном слое. Для измерения в приповерхностных слоях полосы от ребра пластины отступали 60 мкм, для определения твердости в срединном слое от ребра отступали

450 мкм. Для определения среднего значения твердостей в разных слоях было выполнено не менее 10 измерений на каждую из трех точек. Чтобы предотвратить влияние зоны наклепа вокруг ранее нанесенного отпечатка, наименьшее расстояние между соседними измерениями составляло не менее удвоенной длины диагонали отпечатка. Значение микротвердости выражены в кг/мм². Ошибка при измерениях составляет 4% [152].

По результатам измерений твердости по толщине образца средние размеры отпечатков индентора составили 30,8 и 35,9 мкм в приповерхностных слоях и 32,7 мкм в срединном слое. Эти отпечатки соответствуют значениям твердости HV 39,1, HV 28,8 и HV 34,7 [152]. Пример отпечатка после вдавливания индентора представлен на рисунке 3.5, в. Как следует из результатов, верхняя часть полосы нагартована больше, чем нижняя, разница по значениям твердости составляет 27%.

Расчет эффективных напряжений показывает, что на начальной стадии процесса в контейнере уровень напряжений составляет около 150 МПа (рисунок 3.6, а), при наличии зоны повышенных напряжений, прилегающей к отверстию матрицы. В целом этого уровня напряжений недостаточно для истечения материала через матрицу. При повышении эффективных напряжений свыше 180 МПа возможно достижение стационарной стадии (рисунок 3.6, б). Этот уровень напряжений характерен для сопротивления деформации магния.

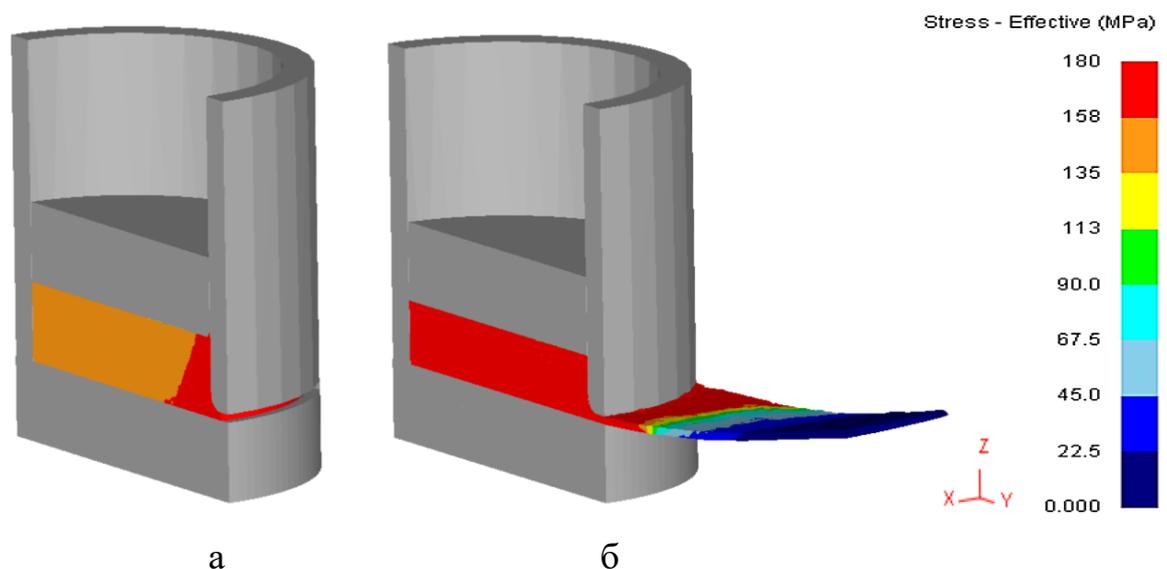


Рисунок 3.6 – Половина очага деформации с изменением поля эффективных напряжений: а – в начале процесса, б – на установившейся стадии

Давление на пуансоне в процессе НРКУП представлено на рисунке 3.7. Как отмечено в работе [98], удельные давления на пуансоне при выдавливании в условиях реального эксперимента составляли 1200–1300 МПа, что подтверждает результаты моделирования.

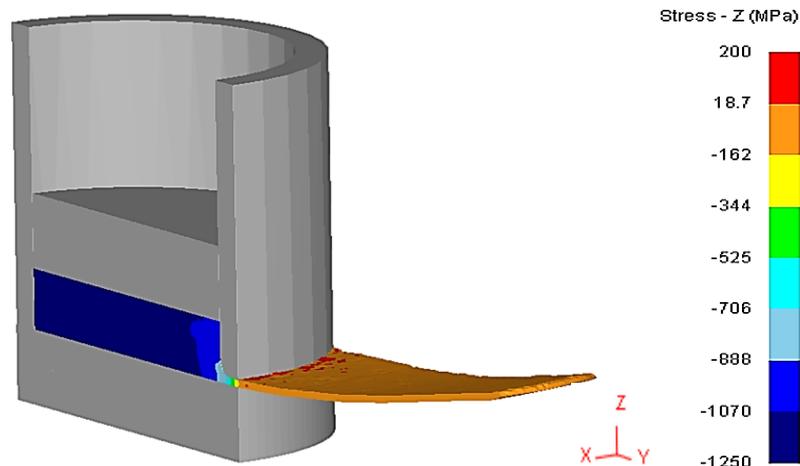


Рисунок 3.7 – Поле осевых напряжений на установившейся стадии процесса, половина очага деформации

Результаты этой части исследования опубликованы в источниках [153-157].

3.2 Разработка схемы многоканального углового прессования с повышенными коэффициентами вытяжек

Известно, что в настоящее время для прессования часто используются устройства равноканального углового прессования (РКУП), неравноканального углового прессования (НРКУП) и многоканального прессования. В литературном обзоре выявлены недостатки данных устройств, для устранения которых в настоящем исследовании разработано устройство для углового многоканального прессования (рисунок 3.8), состоящее из следующих деталей: пуансона 1, контейнера 2, фланца 3, болтов 4 и нижней плиты 6. На выступающую поверхность контейнера 2 установлен фланец 3 и с помощью болтов 4 контейнер 2 скреплен с плитой 6. На нижнем торце контейнера 2 (рисунок 3.8, а) выполнен прямоугольный паз, пересекающийся с каналом контейнера 2 диаметром D под прямым углом. В паз вставлена матрица 5, имеющая три канала равноосной формы. Форма каналов матрицы 5 показана на рисунке 3.8, б. Расположение осей каналов в матрице – в

плоскости, ортогональной оси контейнера, вдоль оси прямоугольного паза и радиуса контейнера. Каналы равноосной формы имеют поперечное сечение круга. Следует отметить, что каналы могут иметь и другое поперечное сечение, например, квадрата. Наличие не менее двух каналов позволяет снизить усилие прессования до приемлемых величин. Расположение осей матриц в плоскости, ортогональной оси контейнера, а не по окружности, как это принято в традиционном прессовании, позволяет уменьшить объем пресс-остатка и тем самым повысить выход годного. Расположение осей матриц вдоль оси прямоугольного паза позволяет обеспечить параллельность вытекания прутков из матриц. В другом варианте расположение осей матриц вдоль радиуса контейнера позволяет обеспечить симметрию течения относительно центра окружности полости контейнера. Поддержание равноосности формы позволяет равномерно распределить напряжения в каждом макроочаге деформации.

Взаимное положение деталей устройства в промежуточный момент процесса деформации заготовки 7 и прутки 8 показаны на рисунке 3.8, а, б справа.

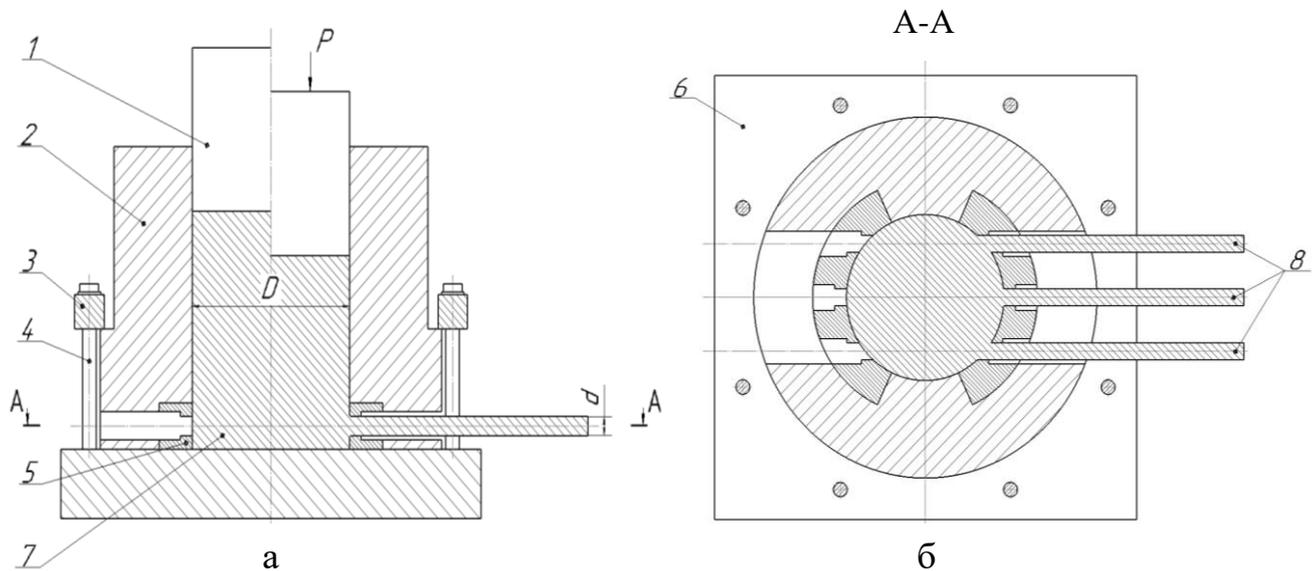


Рисунок 3.8 – Схема устройства для углового прессования трех прутков круглого поперечного сечения, левая половина – для начала процесса, правая половина – для стационарной стадии (а), поперечный разрез, где слева показана форма каналов матрицы в варианте исполнения с расположением осей в плоскости ортогональной оси контейнера и вдоль оси прямоугольного паза, а справа – с расположением прутков в промежуточный момент процесса деформации

Устройство устанавливается и закрепляется на столе пресса, а пуансон 1 (рисунок 3.8, а) взаимодействует с ползуном пресса. На рисунке 3.8 конструктивные элементы соединения плиты 6 со столом и пуансона 1 с ползуном не показаны.

Разработанное устройство работает следующим образом. Цилиндрическую заготовку 7 диаметром D , покрывают смазкой по торцам и боковой поверхности и устанавливают с небольшим зазором ($\sim 0,2$ мм) в канал контейнера 2. Затем пуансон 1 опускают от привода пресса до касания верхнего торца заготовки 7. Взаимное положение деталей устройства в этот момент показано на рисунке 3.7, а слева. В дальнейшем пуансон 1 перемещается под действием усилия пресса P , и нижняя торцовая поверхность заготовки 7 при этом деформируется, а материал заготовки 7 вытекает тремя траекториями в каналы матрицы 5. В результате такого течения материала формируются три прутка диаметром d , длина прутков зависит от объема исходной заготовки и степени деформации материала.

Экспериментально установлено [99], что в холодном состоянии из заготовки магния диаметром $D = 40$ мм можно методом углового прессования получить полосу шириной $b = 40$ мм и толщиной $h = 1$ мм. При использовании пресса номинальным усилием 10 МН механические напряжения при этом не превысили допускаемых. Коэффициент вытяжки при этом составил величину $\lambda = \frac{\pi D^2}{4} / (b * h) = 31$. Таким образом коэффициент вытяжки менее 31 в такой схеме является допустимым.

При использовании устройства для углового многоканального прессования вместо полосы возможно получение прутков диаметром d количеством n в зависимости от количества каналов. Суммарная площадь сечения таких каналов составит величину $F = n * \frac{\pi d^2}{4}$, а коэффициент вытяжки рассчитывается по формуле:

$$\lambda = \frac{\frac{\pi D^2}{4}}{n \frac{\pi d^2}{4}} = D^2 / (n d^2). \quad (3.1)$$

Отсюда диаметр получаемых изделий определяется формулой:

$$d = D/\sqrt{\lambda * n}. \quad (3.2)$$

При $\lambda = 31$ и $n = 2$ получим $d = 5,1$ мм, при $n = 3$ $d = 4,1$ мм, при $n = 4$ $d = 3,6$ мм. Здесь указаны наименьшие значения диаметров, при дальнейшем их уменьшении возможно превышение допускаемых напряжений, действующих в инструменте.

Таким образом, используя устройство для углового многоканального прессования становится возможным получение не только плоских заготовок, а заготовок равноосного сечения, в том числе круглого, квадратного и иных сечений.

На рисунке 3.9 представлены варианты исполнения матрицы с количеством каналов $n = 3$ с указанием размеров для углового прессования прутков диаметром $d = 4,1$ мм.

В отличие от размещения матриц на матрицедержателях при обычном прессовании матричные каналы при угловом прессовании приходится размещать в стенке контейнера вдоль тангенциальной координаты, как это показано на рисунке 3.9, б, в. При этом существует возможность размещения этих каналов с параллельными между собой осями (рисунок 3.9, б). Это обеспечивает прием отпрессованных прутков на стеллаж параллельными рядами. Однако при этом, если рассматривать в частном случае наличие трех каналов, то по рисунку видно, что ось второго канала расположена вдоль радиуса контейнера, а оси первого и третьего каналов вынужденно смещены от направления радиуса. Это создает неравномерное воздействие на каждый из прутков.

При размещении каналов с осями, направленными вдоль радиуса контейнера (рисунок 3.9, в) эта неравномерность исчезает. Но может возникнуть производственная проблема, связанная с приемом продукции с параллельным расположением прутков. В зависимости от конкретной ситуации возможен выбор между двумя этими вариантами.

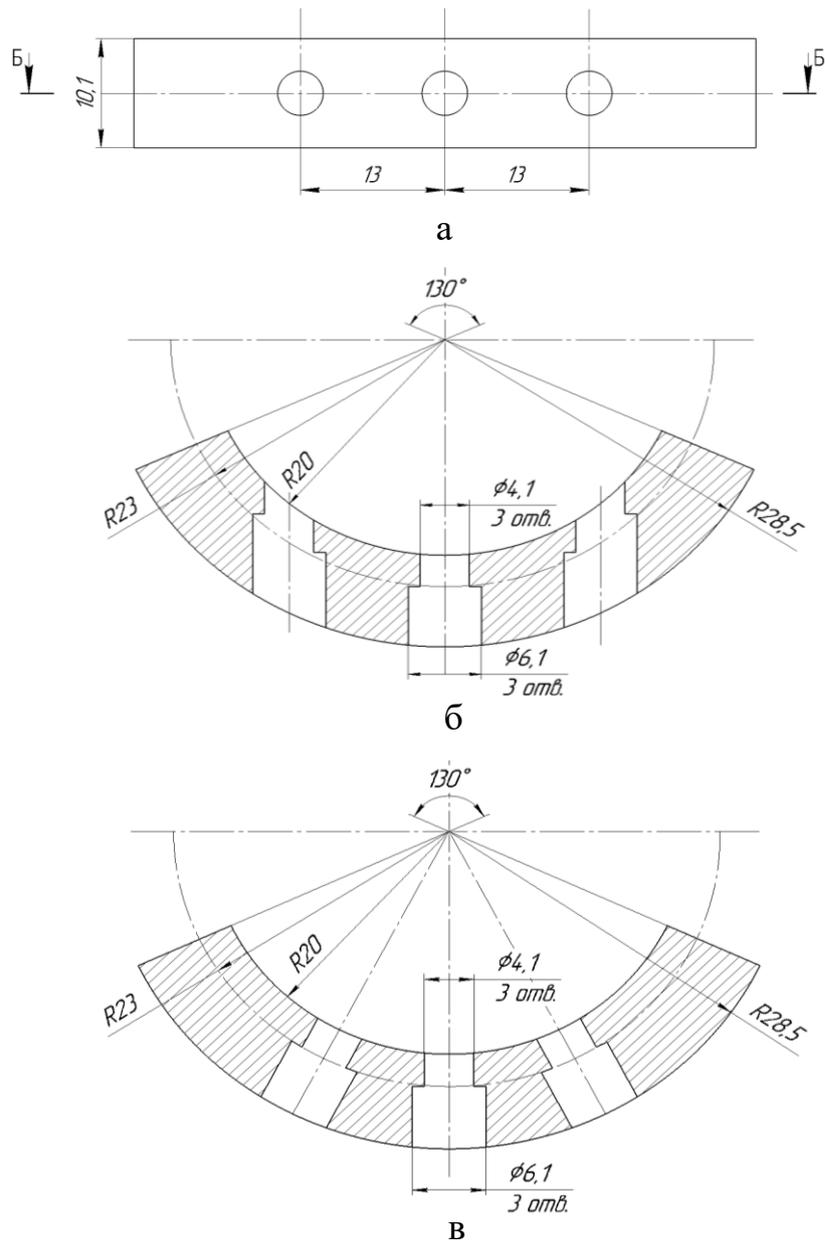


Рисунок 3.9 – Конфигурация матрицы с количеством каналов $n = 3$ для углового прессования прутков диаметром $d = 4,1$ мм (а), разрез матрицы в первом варианте с расположением осей в плоскости ортогональной оси контейнера и вдоль оси прямоугольного паза (б), разрез матрицы во втором варианте с расположением осей в плоскости ортогональной оси контейнера и вдоль радиуса контейнера (в)

Для доказательства достижения технического результата выполнены расчеты методом конечных элементов в программном модуле DEFORM-3D углового прессования магниевых прутков диаметром $d = 4,1$ мм при количестве каналов матрицы $n = 3$.

Магниевая заготовка представлена в виде цилиндра диаметром $D = 40$ мм и высотой $H = 42$ мм. Показатель трения по Зибелю равен 0,2.

На рисунке 3.10, а показан начальный момент процесса деформации заготовки угловым прессованием с применением первого варианта матрицы с отпрессованными прутками диаметром $d = 4,1$ мм. Здесь и далее на рисунках показана сетка конечных элементов, необходимая для решения задачи.

На рисунке 3.10, б представлена стационарная стадия процесса углового прессования с применением первого варианта матрицы с отпрессованными прутками диаметром $d = 4,1$ мм.

Если каналы равноосной формы имеют расположение осей в плоскости, ортогональной оси контейнера и вдоль оси прямоугольного паза вдоль радиуса контейнера, то картина пластического течения металла становится более симметричной по тангенциальной координате, что будет способствовать получению отпрессованных прутков равной длины.

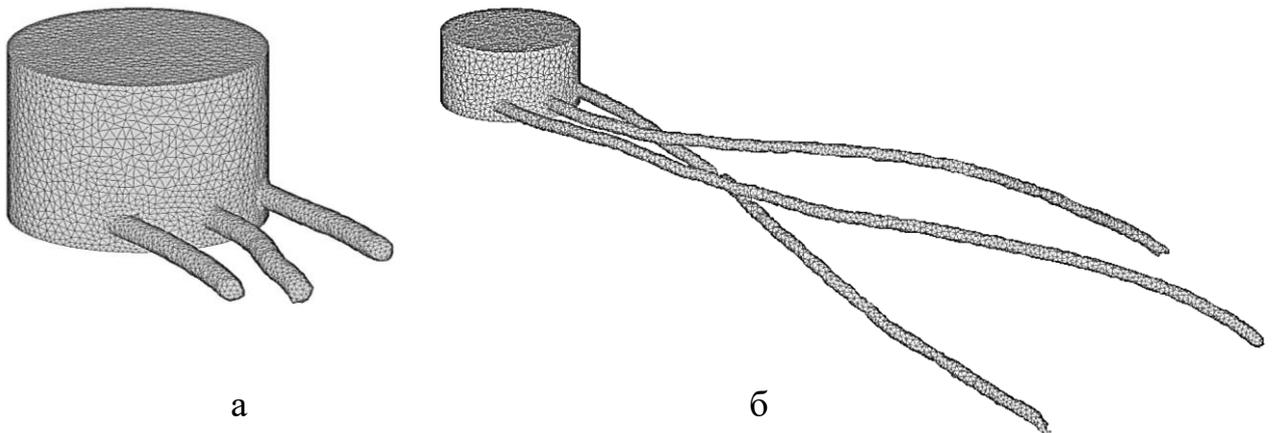


Рисунок 3.10 – Характер пластического течения металла с применением первого варианта матрицы: а – в начальный момент процесса деформации заготовки, б – стационарная стадия процесса углового прессования

3.3 Выводы по главе

В данной главе выполнено исследование углового прессования магния при комнатной температуре посредством компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM. Параллельно выполнены опыты по измерению твердости полосы, полученной в условиях реального эксперимента, вследствие чего:

1. результаты моделирования процесса НРКУП в 3D постановке позволили оценить неравномерность деформации, возникающую в поперечном сечении прямоугольной полосы. Выявлено, что наибольшую степень деформации получает металл в кромках полосы, а также в области, примыкающей в верхней поверхности. Относительно металла, примыкающего к нижней поверхности увеличение степени деформации может достигать 24%. Этот вывод подтвержден результатами измерения твердости полосы, полученной в условиях реального эксперимента.

2. разработано устройство для углового многоканального прессования, имеющее широкие технологические возможности за счет возможности получения не только плоских заготовок, а также заготовок равноосного сечения, в том числе круглого, квадратного и иных сечений, при этом за счет применения нескольких каналов увеличивается количество получаемого продукта, кроме того возможно снижение напряжений и усилий прессования по отношению к одноканальному варианту прессования.

4 РАЗРАБОТКА ПРИЕМОВ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ИЗ МАГНИЯ С ГАРАНТИРУЕМЫМИ СРОКАМИ БИОЛОГИЧЕСКОГО И ХИМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

4.1 Исследование напряженно-деформированного состояния при испытании магниевого шара, расположенного на кольцевой опоре и нагруженного гидростатическим давлением

Растет интерес применения магния в качестве биodeградируемого материала в нефтяной промышленности. Растворимые магниевые шары унаследуют свойства гексагональной кристаллической решетки самого магния, что делает их склонными к анизотропии. При этом скорость растворения шара может оказаться различной по направлениям, что приведет к оваллизации места посадки и ненадежному запираению клапана в скважине. Поэтому важно знать напряженно-деформированное состояние места контакта шара с его опорой в буровой скважине.

В качестве объекта исследования выбрали схему нагружения для испытания шаров, соответствующую схеме воздействия жидкости в производственных условиях работы скважины (рисунок 4.1). Шар 1 опирается на седло 2, размещенное в закрытой камере. В камеру подается жидкость под давлением, в результате чего шар пластически деформируется и продавливается через отверстие в седле. Положительным результатом считается отсутствие разрушения шара.

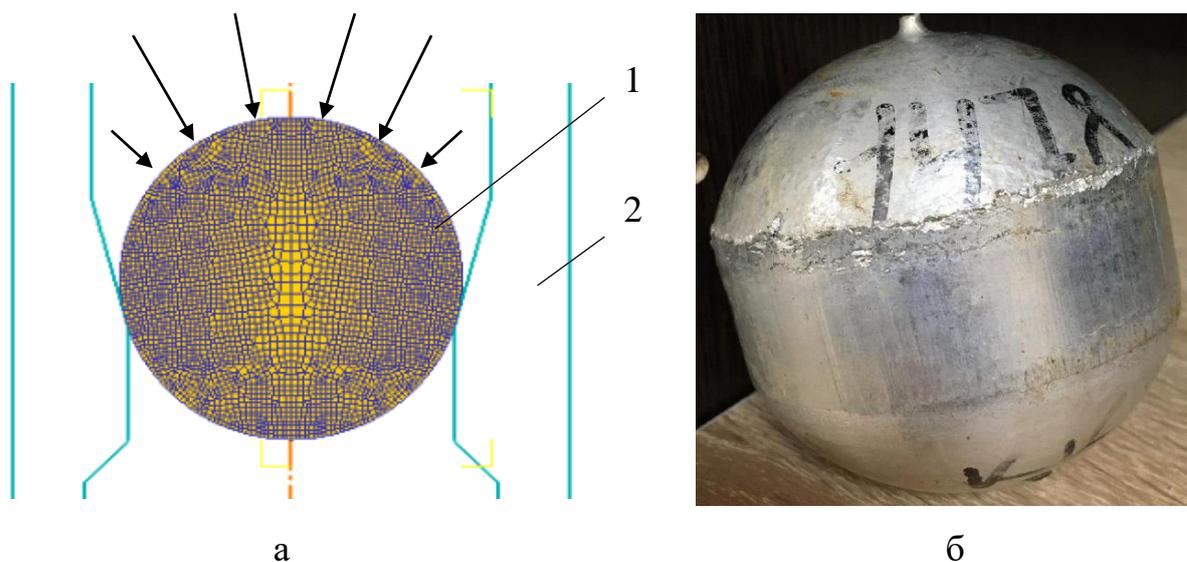


Рисунок 4.1 – Схема испытания шара на выдавливание гидростатическим давлением (а) и фото магниевого шара, прошедшего испытание (б)

Испытание такого рода необходимо, поскольку для изготовления шаров часто применяются литейные марки магниевых сплавов, обладающих малой пластичностью. Уровень пластической деформации, которую должен выдержать шар, можно оценить по следующему примеру. При продавливании шара диаметром 70 мм используется оснастка с диаметром отверстия 67 мм. Коэффициент вытяжки при таком соотношении диаметров составляет $\lambda = (70/67)^2 = 1,09$, соответственно логарифмическая деформация равна $\epsilon = \ln(1,09) = 0,086$, а относительное обжатие 8%. Однако, можно отметить, что такой уровень деформации усреднен по объему шара. Малые обжатия приводят к неравномерному распределению деформаций, что придется оценить путем моделирования методом конечных элементов.

Постановку задачи осуществляли в программном модуле DEFORM-2D. Постановка осесимметричной задачи включала в себя описание геометрии очага деформации в исходном состоянии и задание граничных условий – давление жидкости 70 МПа. Магниевый образец представлен в виде сферы диаметром $d = 70$ мм. Внутренний диаметр седла $d_c = 67$ мм.

Установлены взаимодействия на контактной поверхности: образец – седло. Показатель трения по Зибелю в процессе равен 0,2.

Для анализа ситуации важна оценка мгновенного состояния металла, что лучше всего видно на схеме распределения скорости деформации (рисунок 4.2) не при окончании процесса, а по этапам прохождения заготовки через очаг деформации. Как видно из рисунка 4.2, а, уже в начальный момент деформации на периферии возникает два максимума скорости деформации. Эти максимумы остаются и при прохождении через седло наибольшего сечения шара (рисунок 4.2, б). При этом уровень максимальных скоростей повышается с 320 до 800 1/с.

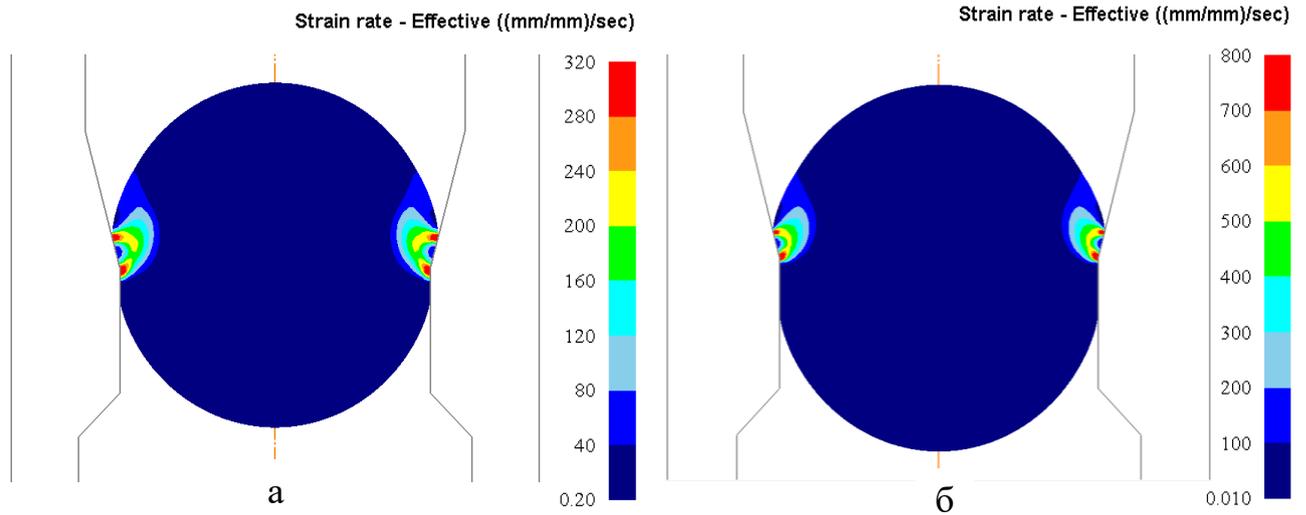


Рисунок 4.2 – Конфигурация очага деформации в виде областей равного уровня скорости деформации при прохождении шара: а – начальный момент времени; б – прохождение максимального сечения

В конечный момент времени распределение степени деформации отражено на рисунке 4.3.

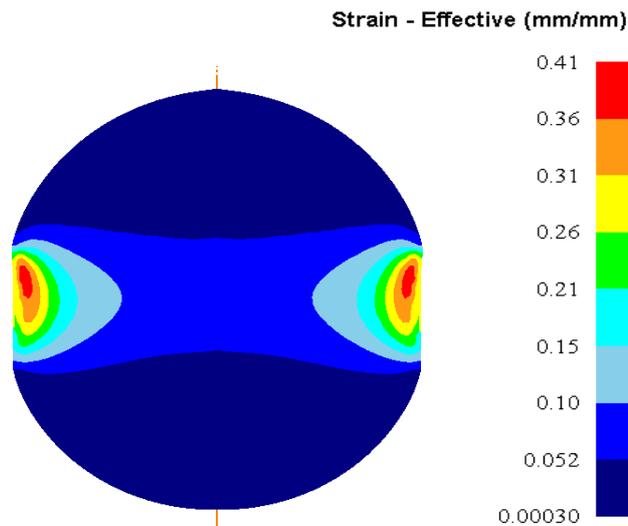


Рисунок 4.3 – Распределение степени деформации в диаметральном сечении шара после окончания процесса

Здесь видно, что деформация локализована на периферии, где она достигает значения $\epsilon = 0,41$, что соответствует относительному обжатию $\varepsilon = 100 \cdot (1 - \exp(-\epsilon)) = 34\%$. Эта величина намного больше, чем 8% обжатия, определенного ранее как среднее значение по сечению. Из-за малости обжатий и специфики формы детали деформация распределяется неравномерно и не проникает на всю глубину объекта. Поэтому возникает опасность возникновения трещин на поверхности шара.

Вместе с тем, вероятность разрушения зависит также от показателей напряженного состояния, что можно оценить распределением среднего нормального напряжения в те же моменты времени (рисунок 4.4).

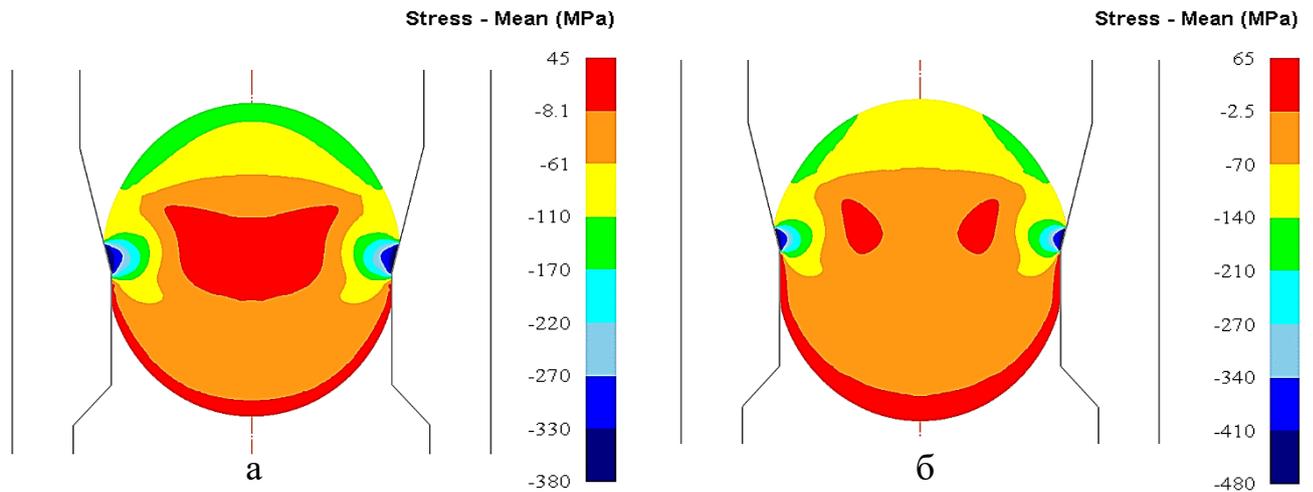


Рисунок 4.4 – Конфигурация очага деформации в виде областей равного уровня среднего нормального напряжения при прохождении шара: а – начальный момент времени; б – прохождение максимального сечения

Здесь видно, что в начальный момент времени образуется один максимум растягивающих напряжений на уровне 45 МПа (рисунок 4.4, а), а в конце процесса их оказывается два (рисунок 4.4, б). При этом гораздо больший уровень напряжений сжатия по модулю локализован на периферии объекта: до -380 МПа в начале и до -480 МПа в конце деформирования.

Для прогноза опасности разрушения магниевого шара было принято решение оценить параметр σ/T , применив дополнительные расчеты, для чего назначены контрольные точки P_i ($i = 1, 2, \dots, 16$), а в них значения интенсивности напряжений σ_{ii} (рисунок 4.5), для момента прохождения шаром максимального его диаметра. Каждая из контрольных точек имеет относительные координаты $r/R = 0 \dots 0,9$, $z/h = 0 \dots 0,45$ в цилиндрической системе координат (r – текущая координата радиуса шара).

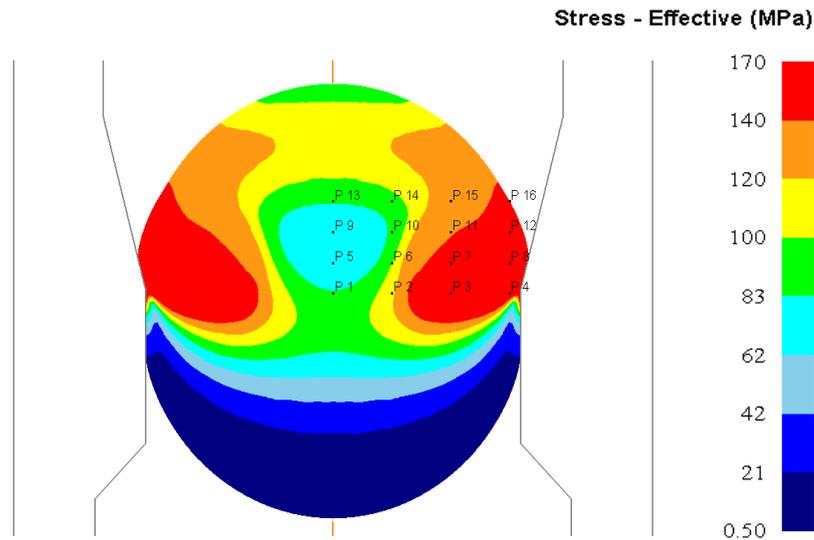


Рисунок 4.5 – Распределение в диаметральном сечении шара интенсивности напряжений в момент прохождения шаром максимального его диаметра с контрольными точками

Расчетные данные по показателю напряженного состояния для момента прохождения шаром максимального его диаметра представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Показатель напряженного состояния для момента прохождения шаром максимального его диаметра

z/h	r/R			
	0	0,3	0,6	0,9
0,45	-0,25	-0,1	-0,43	-1,71
0,3	-0,34	0,041	-0,44	-2,97
0,15	-0,18	-0,22	-0,32	-0,92
0	-0,89	-0,88	-0,65	-1,18

Из таблицы 4.1 видно, что показатель σ/T может варьироваться в пределах 0,041...-2,97. Наибольшие по модулю значения на уровне 2,97 характерны для периферийных точек, прилегающих к контактной поверхности. При этом наименьшее по модулю значение 0,041 находится в районе центральной области шара.

Таким образом, здесь установлено, что наибольшая деформация при нагружении шара возникает в периферийных областях. Но именно здесь напряженное состояние оказывается более благоприятным, чем в центре шара. В результате разрушение может наступить либо в виде появления поверхностных

трещин, что может не являться браковочным признаком, либо в виде раскола шара на отдельные фрагменты, что иногда наблюдается при испытаниях.

Следует отметить, что жидкость под высоким давлением воздействует на шар, создавая неравномерное поле напряжений. В начальном состоянии размеры шара таковы, что он статически неподвижен, механических напряжений не хватает для его пластической деформации. Однако, шар изготовлен из магния – материала, постепенно растворяющегося в бурильном растворе, поэтому его размеры уменьшаются со временем.

При достижении критического размера шар продавливается в отверстие клапана и скважина открывается. Этим критическим размером, на первый взгляд, является уменьшенный диаметр шара, который стал меньше диаметра седла клапана. На самом деле из-за наличия давления жидкости шар может пройти отверстие даже если его диаметр больше диаметра отверстия и произойдет это вследствие пластической деформации металла. Поэтому выполнили дополнительные расчеты при переменных значениях диаметра сферы d . Давление жидкости в этом случае – 40 МПа.

Распределение степени деформации в этом случае представлено на рисунке 4.6

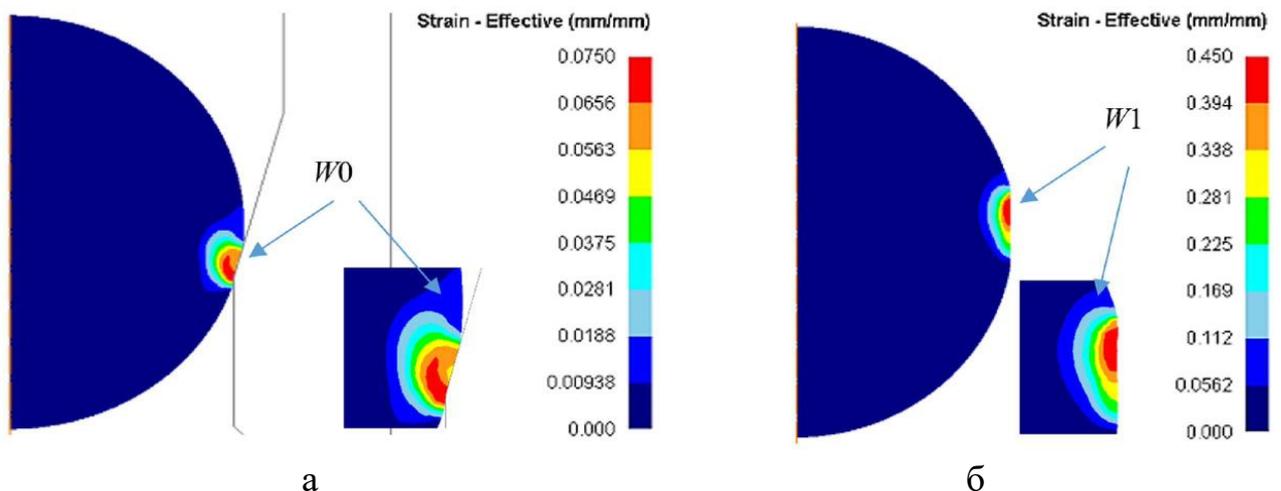


Рисунок 4.6 – Предельные состояния шара при нагружении и показателе $d/d = 0,957$ (а) и $0,988$ (б); $W0$ – область пластической деформации с линиями равного уровня степени деформации; $W1$ – то же для случая прохождения шара седловины при большем значении d/d

Из размерных величин d и d_c создан безразмерный параметр d/d_c , значения которого в расчетах назначили на уровнях 0,957; 0,967; 0,978; 0,983; 0,988. Выявлено, что при $d/d_c = 0,957$ на периферии шара возникают пластические деформации до величины 0,075 (рисунок 4.6, а), но при заданном давлении шар остается статически неподвижен, то есть он сохраняет работоспособность как запирающий элемент.

В течение заданного времени шар растворяется в бурильном растворе, его диаметр уменьшается. Расчеты показали, что при уменьшении диаметра до величин 69,250; 68,500; 68,125 мм ситуация остается той же – шар в целом статически неподвижен, но в локальных зонах растет уровень механических напряжений и увеличиваются пластические деформации. При достижении диаметра 67,750 мм, соответствующего параметру $d/d_c = 0,988$ шар проваливается в отверстие седла (рисунок 4.6, б).

При уменьшении диаметра шара и сохранении давления возрастает уровень пластической деформации на периферии (в локальной области) в соответствии с графиком, представленном на рисунке 4.7. Следует отметить, что эти данные могут пригодиться при более тщательном изучении влияния степени деформации на скорость растворения магния. Из графика видно, что наибольшая степень деформации наблюдается после прохождения шаром отверстия седловины, что не противоречит физике процесса.

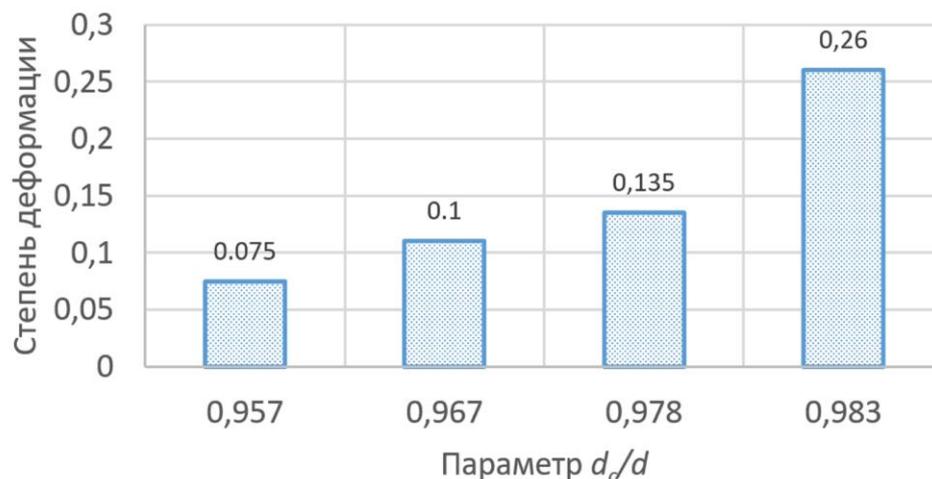


Рисунок 4.7 – График зависимости степени деформации шара в локальной области от параметра d/d_c

Можно отметить, что при решении задачи применено условие текучести Мизеса, хорошо себя зарекомендовавшее при постановке задач упруго-пластического состояния для изотропных тел. Как отмечалось выше из-за особой кристаллической решетки магния было бы более целесообразно применить более сложное реологическое описание материала с позиций анизотропной среды. Но тогда пришлось бы вначале описать технологию получения самого шара и набор механических свойств, привязанных к системе координат. Вместе с тем, предпочтительно, чтобы технология получения шаров для скважин была направлена на получение материала с высокой степенью изотропии. Эта техническая задача не решена в настоящее время в полной мере.

Известно, что одним из наиболее дешевых способов производства шаров при малом сортаменте является отливка цилиндрической заготовки и последующее вытачивание из нее шара на токарном оборудовании. В этой достаточно простой технологии пропущен этап горячей пластической деформации, который обычно применяется для уплотнения пористой структуры литого металла, вследствие чего возникает проблема наличия остаточной пористости как наследия литейного передела. Для улучшения структуры целесообразно применить объемное сжатие объекта до достижения пластических деформаций, позволяющих ликвидировать или хотя бы уменьшить пористость. Такое обжатие возможно осуществить жидкостью высокого давления в контейнере прессы или гидростате. Схема обжатия приведена на рисунке 4.8.

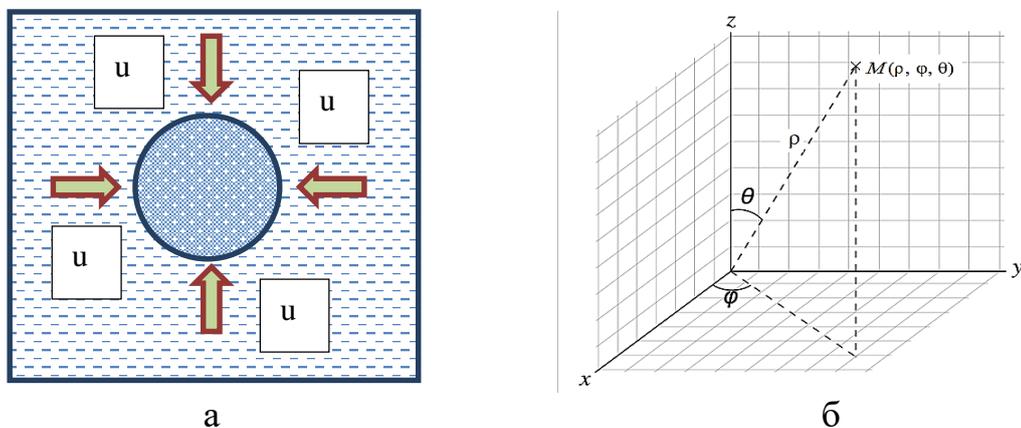


Рисунок 4.8 – Схема обжатия шара жидкостью высокого давления (а) и сферическая система координат $\rho\theta\varphi$ (б), размещенная в декартовой системе xuz

При отсутствии сдвигов в сферической системе координат тензор деформаций описывается компонентами $\varepsilon_{\rho\rho}$, $\varepsilon_{\varphi\varphi}$, $\varepsilon_{\theta\theta}$:

$$\varepsilon_{\rho\rho} = \frac{\partial u_\rho}{\partial \rho}; \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_\rho}{\rho}; \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{\rho \sin \theta} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{u_\theta}{\rho} \operatorname{ctg} \theta + \frac{u_\rho}{\rho}. \quad (4.3)$$

Если центр координат совместить с центром шара, то при упругом или пластическом сжатии шара возникнет перемещение частиц u_ρ , направленное к центру шара. Допустим, что поверхность шара смещается внутрь с величиной перемещения u .

Тогда возникает два граничных условия:

$$u_\rho|_{\rho=0} = 0; \quad (4.4)$$

$$u_\rho|_{\rho=R} = -u. \quad (4.5)$$

Здесь знак минус означает, что перемещение осуществляется против направления оси ρ . Учтем, что если перемещение осуществляется строго в направлении центра, то $u_\theta = u_\varphi = 0$, т.е. угловые перемещения отсутствуют. Далее необходимо создать кинематически возможное поле перемещений, то есть такое поле, которое удовлетворяет граничным условиям кинематики. Для компактного материала здесь понадобилось бы также применить условие несжимаемости, но можно считать, что среда как раз пластически сжимаемая, что позволяет осуществить уплотнение.

Походящая функция для описания перемещения $u_\rho = -u * \rho/R$. Здесь выполняются граничные условия (4.4) и (4.5).

Осуществляя дифференцирование и упрощения по формулам (4.1)-(4.3) получаем:

$$\varepsilon_{\rho\rho} = \frac{\partial(-u*\frac{\rho}{R})}{\partial \rho} = -\frac{u}{R}; \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = 0 + \frac{-u*\frac{\rho}{R}}{\rho} = -\frac{u}{R}; \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = 0 + 0 + \frac{-u^*\rho}{\rho} = -\frac{u}{R}. \quad (4.8)$$

Здесь видно, что при обжатии шара компоненты тензора деформации оказались равными, что следовало ожидать из условия симметрии. Если целью обжатия является ликвидация пористости, то придется рассчитать степень деформации объема:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\rho\rho} + \varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\theta\theta} = 3\varepsilon_{\rho\rho} = -3u/R \quad (4.9)$$

и воспользоваться кривыми упрочнения для сжимаемого материала. После этого удастся рассчитать необходимое давление гидростата.

Также осуществлена оценка характера уплотнения магниевой пористой заготовки в виде шара при воздействии жидкости высокого давления.

При всестороннем равномерном сжатии жидкостью высокого давления нормальные напряжения σ_i ($i = 1, 2, 3$) в любой точке равны между собой. Если записать теперь формулу для определения интенсивности напряжений:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}, \quad (4.10)$$

то выяснится, что она равна нулю.

При использовании условия пластичности Мизеса:

$$\sigma_{\text{и}} = \sigma_s, \quad (4.11)$$

видно, что оно становится недостижимым. Поскольку $\sigma_s \neq 0$, то, как бы не повышали внешнее давление, $\sigma_{\text{и}} = 0$, в результате пластическая деформация не наступает. Это справедливо для несжимаемой среды, но не дает ответа на вопрос, какие напряжения нужны для перевода в пластическое состояние пористых материалов. Основные уравнения теории напряженного состояния пластически деформируемого тела не зависят от степени сжимаемости среды. Но, как было только что показано, этим свойством не обладает выбранное условие пластичности.

В данной работе анализируется условие пластичности Гарсона [158], разработанное применительно к материалам, обладающим невысоким уровнем

пористости (до 10%). Выбор обоснован наличием такого закона в программных продуктах.

Относительная плотность материала ρ определяется как отношение объема твердого материала к общему объему материала. Отношения, определяющие модель, выражаются через объемную долю пустот Π , которая определяется как отношение объема пустот к общему объему материала. Отсюда следует, что $\Pi = 1 - \rho$. Для металла, содержащего малую концентрацию пустот, Гарсон предложил условие текучести как функцию от объемной доли пустот:

$$\frac{\sigma_{и}^2}{\sigma_s^2} + 2q_1\Pi \cosh\left(-q_2 * \frac{3}{2} \frac{p}{\sigma_s}\right) - (1 + q_3 * \Pi^2) = 0, \quad (4.12)$$

где p - гидростатическое давление (обратное по знаку среднему нормальному напряжению); q_i ($i = 1,2,3$) - параметры уравнения; $\sigma_{и}$ - эффективное напряжение по Мизесу; σ_s – сопротивление деформации компактного материала.

Для дальнейшей оценки ситуации уравнение (4.12) в данной работе преобразовано к виду:

$$\sigma_{и}^2 + 2q_1\sigma_s^2\Pi \cosh\left(-q_2 * \frac{3}{2} \frac{p}{\sigma_s}\right) - q_3\sigma_s^2\Pi^2 = \sigma_s^2. \quad (4.13)$$

Уравнение (4.13) превращается в условие пластичности Мизеса при равенстве нулю объема пор: при $\Pi = 0$, получим:

$$\sigma_{и}^2 + 0 - q_3 * 0 = \sigma_s^2 \quad \text{или} \quad \sigma_{и} = \sigma_s. \quad (4.14)$$

Существуют рекомендованные диапазоны для назначения параметров: $q_1 = 1 \dots 1,5$; $q_2 = 1$; $q_3 = 1 \dots 2,25$.

Допустим, что $q_1 = q_2 = q_3 = 1$. Тогда из уравнения (4.12) получим:

$$\sigma_{и}^2 + 2 * \sigma_s^2 * \Pi * \cosh\left(-\frac{3}{2} \frac{p}{\sigma_s}\right) - \sigma_s^2\Pi^2 = \sigma_s^2. \quad (4.15)$$

Отсюда:

$$\frac{\sigma_{и}^2}{\sigma_s^2} = 1 - 2 * \Pi * \cosh\left(-\frac{3}{2} \frac{p}{\sigma_s}\right) + \Pi^2. \quad (4.16)$$

В соответствии с этой формулой выполнены расчеты, их результаты отражены на графиках рисунка 4.9 для пористости 0; 0,01 и 0,05.

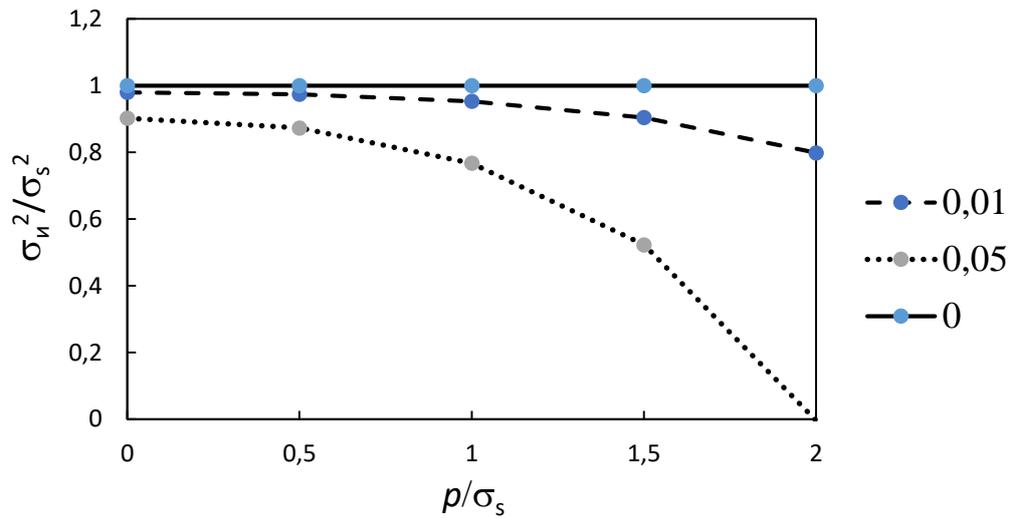


Рисунок 4.9 – Соотношения $\frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2}$, $\frac{p}{\sigma_s}$ и Π

Здесь видно, что при $\Pi = 0$ отношение $\frac{\sigma_n^2}{\sigma_s^2} = 1$, что соответствует условию пластичности Мизеса. По мере увеличения начальной пористости графики располагаются ниже, что говорит о том, что пластическое состояние достигается при меньших интенсивностях напряжений, что не противоречит здравому смыслу. Из графика также видно, что если используется схема деформации жидкостью высокого давления, то при $\frac{p}{\sigma_s}$ в диапазоне $0 \dots 2$ не удастся достигнуть пластической деформации для металла пористостью $\Pi = 0,01$, но удастся для металла с большей пористостью $\Pi = 0,05$.

Кинематика процесса может быть задана кинематически возможным полем скоростей в сферической системе координат $\rho\varphi\theta$ (ρ – радиус-вектор, φ и θ углы его наклона), для чего придется задать перемещение наружного контура вдоль координаты ρ , то есть $u_\rho|_{\rho=R} = -u$. Граничное условие в центре шара: при $\rho = 0$ $u_\rho = 0$.

Походящая функция для описания поля перемещений:

$$u_\rho = -u^* \rho/R, \quad (4.17)$$

а после дифференцирования можно получить компоненту тензора деформации:

$$\varepsilon_\rho = \frac{\partial u_\rho}{\partial \rho} = -\frac{u}{R}. \quad (4.18)$$

Здесь видно, что перемещения зависят от координаты, а деформации – нет, в связи с этим уплотнение материала должно оказаться одинаковым по объему.

Для моделирования задачи применили программный комплекс ABAQUS. Деформируемый материал – пористый магний в литом состоянии. Точные данные по кривым упрочнения для магния в литом состоянии получить затруднительно из-за большого рассева результатов испытаний образцов, ориентированных в различных направлениях, что показано в статье [159]. Здесь сказывается крупнокристаллическая структура металла и характерная для магния гексагональная решетка. Поэтому данные по нескольким кривым упрочнения усредняли. Осуществили переход от относительного обжатия e (в процентах) к степени деформации ε по формуле $\varepsilon = \ln[1/(1-e/100)]$ и задали итоговую кривую в виде формулы $\sigma_s = 25 + 735\varepsilon^{0,90}$. Здесь первое слагаемое равно условному пределу текучести металла в ненагартованном состоянии. Действительно, судя по справочнику [160] условный предел текучести литого магния близок к определенному значению и равен 21 МПа. Результаты расчета по приведенной выше формуле представили в табличном виде и разместили в интерфейсе программы.

Для повышения точности расчетов за счет уменьшения анализируемого объема применили принцип симметрии: шар отобразили в 3D пространстве сегментом радиусом 30 мм с центральным углом 90° при повороте его на 90° в ортогональном направлении (тип объекта Solid revolve). Объем такого элемента (рисунок 4.10, а) является одной восьмой от объема всего шара (рисунок 4.10, б), что позволяет примерно на порядок сократить количество вычислений, соответственно уменьшить и величину накопленной ошибки. Начальная пористость материала задана на уровне 0,1.

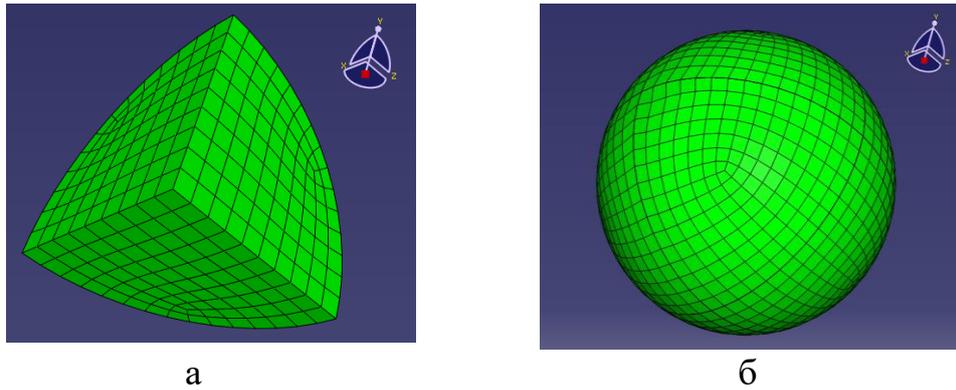


Рисунок 4.10 – Конечно-элементная модель с сеткой конечных элементов (а) и ее отображение после отражения по трем плоскостям (б)

Граничные условия в напряжениях заданы действием давления 150 МПа на боковую поверхность сегмента. Кинематические граничные условия заданы равенством нулю перемещений трех плоскостей шарового сегмента в ортогональных для них направлениях.

В результате решения задачи получены характеристики напряженно-деформированного состояния, в том числе распределение интенсивности напряжений (рисунок 4.11).

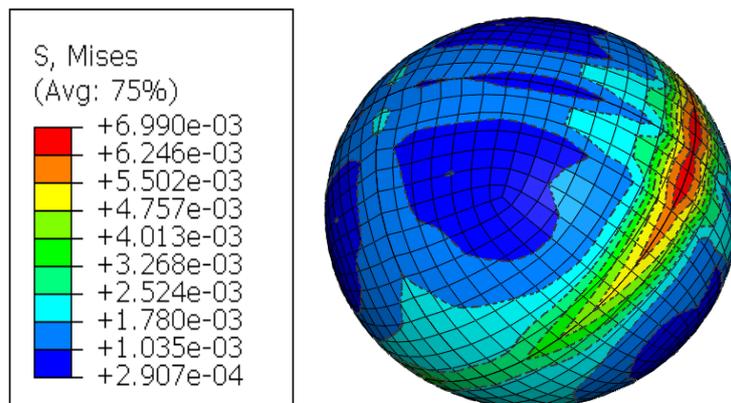


Рисунок 4.11 – Эквивалентные напряжения S по внешнему контуру шара

Здесь видно, что существуют неоднородности в распределении напряжений, но их можно объяснить накоплением ошибок. Действительно, ранее было установлено, что интенсивность напряжений в анализируемом методе деформации равна нулю. Для сравнения, если бы речь шла о методе кузнечной осадки, то деформация началась бы при интенсивности напряжений, равной сопротивлению деформации металла, т.е. в данном случае при 25 МПа. Однако получены значения

в диапазоне 0,0003...0,0070 МПа, что составляет лишь 0,03 % от сопротивления деформации.

Как видно из рисунка 4.12, модуль вектора перемещений U в диаметральной разрезе уменьшается от значения 0,365 мм на периферии до нулевого значения в центре. Максимальное значение является важным расчетным параметром, если требуется определить эффект воздействия внешнего давления. Действительно, при определенном радиальном перемещении и при заданном давлении диаметр шара изменится от величины 60 мм до величины: $60 - 2 \cdot 0,365 = 59,27$ мм.

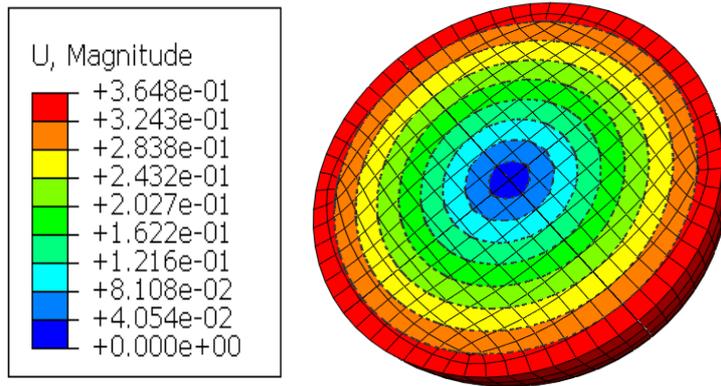


Рисунок 4.12 – Распределение модуля вектора перемещений U в диаметральной разрезе

Дополнительно рассчитан показатель относительной плотности RD (рисунок 4.13).

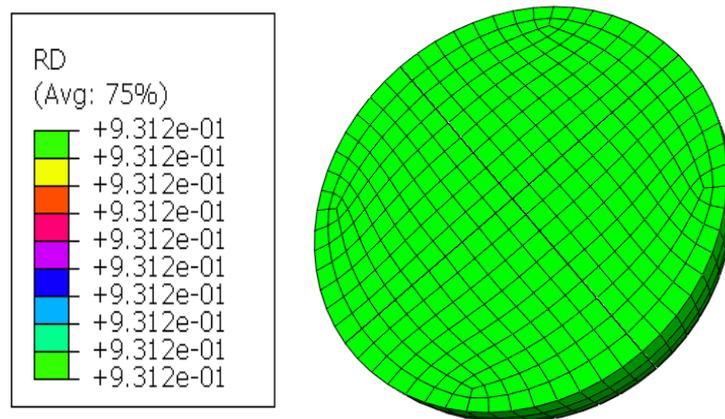


Рисунок 4.13 – Оценка однородности распределения относительной плотности RD в диаметральной разрезе

Как и следовало ожидать, относительная плотность имеет постоянное по объему значение, оно равно 0,9312 (начальное значение равно 0,9). Тем самым

показано, что при давлении 150 МПа удается несколько уплотнить материал, но не удается достичь плотности компактного материала.

Можно отметить, что полученное решение могло иметь более сложную постановку, которая не привела бы к равномерному распределению плотности. Если приблизиться к более точному описанию свойств магния, то выяснилось бы, что материал пришлось бы наделить свойством анизотропии [161]. Если более точно описывать структурное состояние исходной заготовки, то пришлось бы учесть, что усадочная пористость размещена ближе к центральным зонам заготовки.

Таким образом, рассмотрено напряженное состояние шара из пористого материала, подвергнутого гидростатическому сжатию. Выявлено, что в такой схеме напряженного состояния эквивалентные напряжения равны нулю. Деформированное состояние описывается линейной зависимостью перемещений от радиальной координаты. С помощью программного комплекса ABAQUS выполнено моделирование процесса уплотнения шара из магния, обладающего относительной начальной пористостью 10%. Показано распределение перемещений и относительной плотности.

Результаты этой части исследования опубликованы в источниках [162-165].

4.2 Разработка способа изготовления шарового элемента клапана для буровых скважин

При изучении способов изготовления шарового элемента клапана для скважин в литературном обзоре выявлены проблемы, для решения которых в настоящем исследовании разработан способ, включающий изготовление оболочки из деградируемого материала, например, магния или магниевое сплава и заполнение оболочки недеградируемым материалом, например, сталью. Оболочку из деградируемого материала выполняют в виде цилиндрического стакана с дном, в стакан помещают шар из недеградируемого материала, закрывают крышкой и получают композиционную сборку, композиционную сборку помещают в контейнер прессы и изменяют форму оболочки до сферической, применяя схему

сжатия двумя пуансонами с торцами в виде полусфер до плотного смыкания торцов цилиндрического стакана.

Оболочку из деградируемого материала, выполненную в виде цилиндрического стакана с дном, можно получать методом листовой штамповки из листовой заготовки с применением глубокой вытяжки, что является известным процессом [166]. Крышку можно получать методом листовой штамповки из листовой заготовки с применением операции вырубki, что также является известным процессом.

Применение листовой заготовки позволяет удешевить цикл изготовления, поскольку листовая штамповка является широко распространенным процессом, а заготовки в виде листа наиболее дешевым видом сырья.

Оболочку из деградируемого материала, выполненную в виде цилиндрического стакана с дном, можно получать обратным выдавливанием из сплошной цилиндрической заготовки. Применение обратного выдавливания для изготовления оболочки из деградируемого материала является более дорогим процессом, чем листовая штамповка, но вследствие лучшей схемы напряженного состояния позволяет получить оболочку из малопластичных сплавов.

Шар из недеградируемого материала можно получать методом поперечной винтовой прокатки [167]. Обоснованность выбора метода поперечной винтовой прокатки обусловлена его высокой производительностью, поэтому он чаще всего применяется для изготовления мелющих тел. Недостатком метода является возможное отклонение изделия от правильной сферической формы. Но этот недостаток в данном техническом решении становится малозначимым, поскольку шар из недеградируемого материала помещен в оболочку, которая и должна обеспечить эту правильную сферическую форму. Также шар из недеградируемого материала можно получать методом объемной штамповки [168], что позволяет сделать его форму более правильной.

Способ реализуется следующим образом. Предварительно оболочку из деградируемого материала выполняют в виде цилиндрического стакана 1 (рисунок 4.14, а) с дном, в стакан помещают шар 2 из недеградируемого материала,

например, из стали, закрывают стакан крышкой 3 и получают композиционную сборку. Композиционную сборку помещают в контейнер пресса 4 и изменяют форму оболочки до сферической, применяя схему сжатия двумя пуансонами 5 и 6 с торцами в виде полусфер до плотного смыкания торцов цилиндрического стакана. В результате воздействия пуансонов 5 и 6 происходит изменение формы композиционной сборки: форма меняется от состояния полого цилиндра до состояния полого шара 7 (рисунок 4.14, б), при этом внутри полого шара оказывается размещенным шар 2 из недеградируемого материала, который в этом случае играет роль оправки, формирующей внутреннюю поверхность оболочки из деградируемого материала.

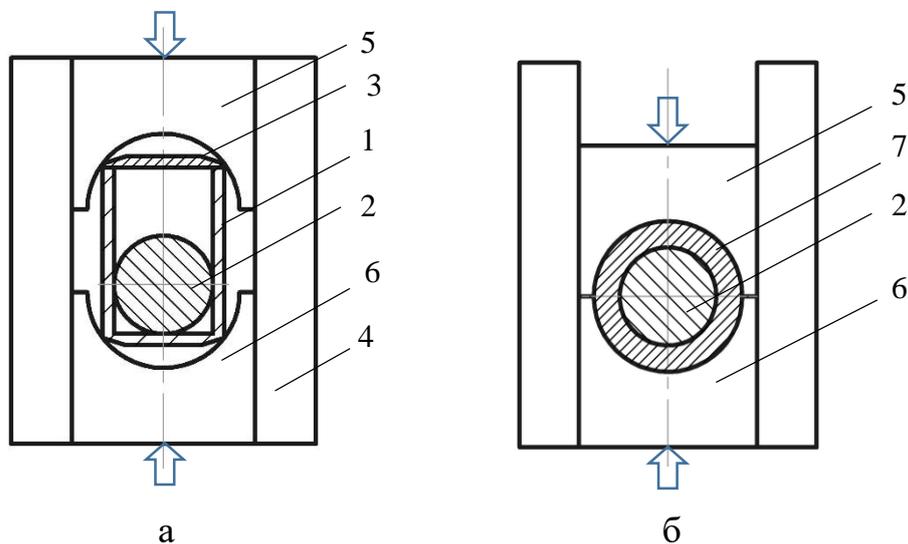


Рисунок 4.14 – Общая схема процесса осадки заготовки с оболочкой перед деформацией (а) то же после деформации при идеализированной картине в отсутствие трения (б): 1 – оболочка из деградируемого материала, 2 – шар из недеградируемого материала, 3 – крышка, 4 – контейнер пресса, 5 – верхний пуансон, 6 – нижний пуансон, 7 – полый шар

Ход формоизменения и достижение результата является не очевидным. Например, возможна потеря устойчивости на стадиях деформации стенки стакана. Поэтому для доказательства успешного формоизменения композиционной заготовки выполнены расчеты методом конечных элементов в программном модуле DEFORM.

Заготовка из деградируемого материала – магния, представлена в виде цилиндра с полостью (наружный диаметр цилиндра $d_1 = 16$ мм, внутренний

диаметр цилиндра $d_2 = 13$ мм, высота цилиндра $h_1 = 17,8$ мм, высота полости цилиндра $h_2 = 16,3$ мм, $3 \times 25^\circ$ 1 фаска) и крышки (диаметр крышки d_3 равен наружному диаметру цилиндра d_1 , толщина крышки s_3 равна толщине стенки цилиндра, $3 \times 25^\circ$ 1 фаска). Диаметр стального шара D_1 равен внутреннему диаметру цилиндра d_2 . В решении коэффициент трения по Кулону равен 0,2.

Начальный, промежуточный и окончательный этап формоизменения показаны на рисунке 4.15, где видно продольное сечение композиционной сборки, состоящей из магниевого полого шара 7 и стального шара 2. На рисунках показана сетка конечных элементов, используемая при решении задачи. Как видно из рисунка 4.15, в, удалось получить внешний контур сборки в форме сферической поверхности. При этом не произошло искажения формы стального шара вследствие более высокого уровня прочности стали по отношению к магнию.

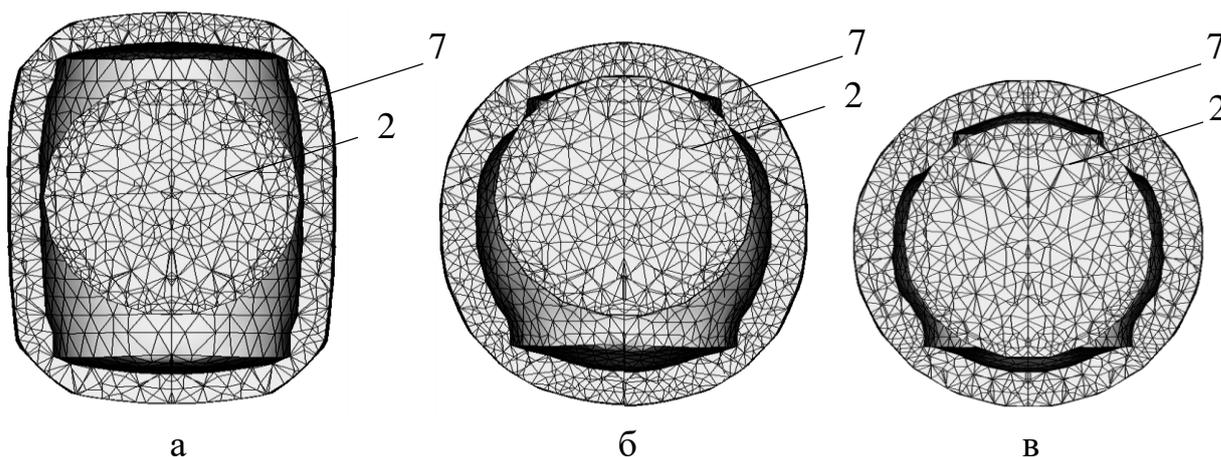


Рисунок 4.15 – Сечение шара и оболочки в начальный (а), промежуточный (б) и окончательный момент формоизменения: 2 – стальной шар, 7 – магниевый полый шар

Соединение крышки и стакана герметично, что достигается за счет диффузионной сварки давлением, описанной, например, в статье [169].

Таким образом применение разработанного способа позволяет изготавливать шары из магния и его сплавов, устранив выявленные недостатки. Здесь становится возможным максимальное утяжеление шарового элемента клапана, так как полость сферы заполнена компактной средой. Дополнительным преимуществом предлагаемого способа является наличие напряжений подпора со стороны шара из недеградируемого материала при пластическом формоизменении и создании

оболочки из деградируемого материала. Наличие дополнительных напряжений сжатия положительно сказывается на повышении пластичности материала оболочки. По отношению к шарам, целиком изготовленным из деградируемого материала, достигается снижение стоимости, поскольку цветной металл в середине шара заменяется на черный металл, стоящий намного дешевле.

4.3 Использование метода обратного выдавливания для получения тонкостенных стаканов для биоразлагаемых стентов

Схема обратного выдавливания основана на воздействии на торец цилиндрической заготовки 1 (рисунок 4.16), помещенной в контейнер 2, пуансоном 3 диаметром меньшим, чем диаметр заготовки. Замыкание очага деформации обеспечивает шайба 4.

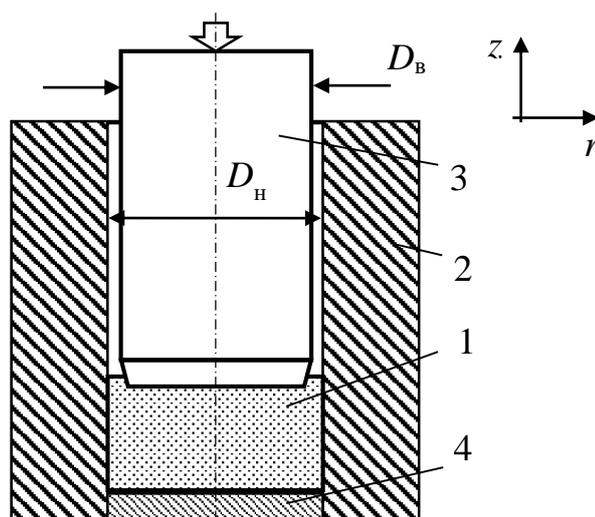


Рисунок 4.16 – Схема обратного выдавливания: 1 - цилиндрическая заготовка; 2 – контейнер; 3 – пуансон; 4 – шайба

Металл вытекает навстречу перемещению пуансона, образуя цилиндрическую оболочку. Известно, что напряжения выдавливания увеличиваются при уменьшении толщины стенки получаемого изделия. Таким образом, можно достичь высоких напряжений сжатия именно при деформации тонкостенных конструкций, что позволяет повысить пластичность металла, что особенно важно, если деформируют малопластичные материалы в холодном состоянии.

Фотография магниевого стакана, полученного ИФМ УрО РАН в условиях реального эксперимента, представлена на рисунке 4.17.

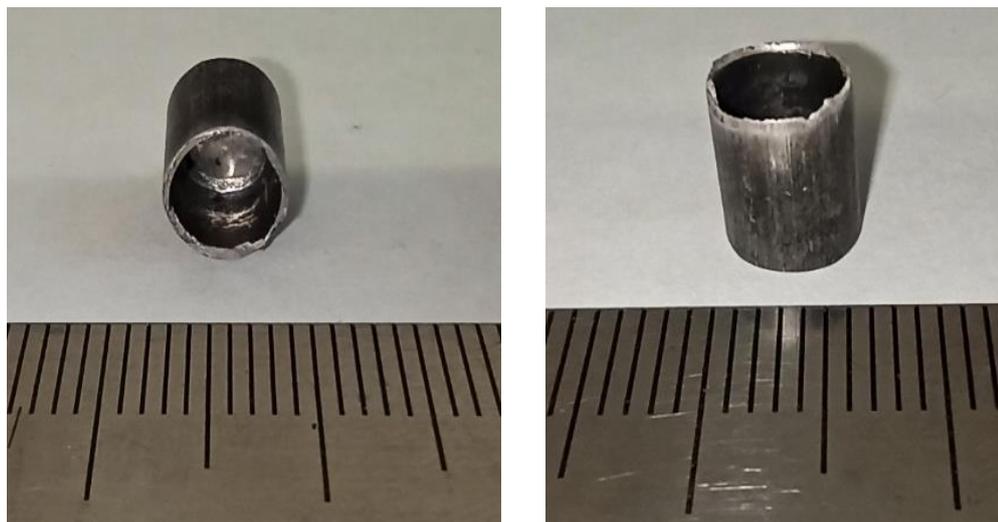


Рисунок 4.17 – Фото магниевого стакана с толщиной стенки 200 мкм

Для решения задачи обратного выдавливания стакана применен программный комплекс DEFORM-2D.

Магниевый образец представлен в виде цилиндра диаметром $D = 6$ мм и высотой $H_0 = 4$ мм. Диаметр пуансона 5,6 мм. Скорость перемещения пуансона 0,5 мм/с. Перемещение пуансона по оси z равно 1 мм. Радиус скругления кромки пуансона 0,35 мм при угле конусности 2° . Размеры выбраны согласно условиям эксперимента ИФМ УрО РАН. Показатель трения в соответствии с законом трения Зибеля в процессе равен 0,2.

При моделировании процесса обратного выдавливания в неизотермической постановке использовали граничное условие третьего рода, при котором теплообмен на границе заготовка-инструмент характеризуется постоянным значением коэффициента теплоотдачи. Дополнительно заданы следующие характеристики материала:

- теплопроводность g – задана функцией от температуры в табличном виде: при 20°C $g = 156$ Вт/(м·К), при 100°C $g = 154$ Вт/(м·К), при 100°C $g = 154$ Вт/(м·К).
- теплоемкость 1,025 кДж/(кг·К);

- коэффициент теплоотдачи (между заготовкой и воздухом) $0,02 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- коэффициент теплоотдачи (между заготовкой и инструментом) $5 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
- температура воздуха 20°C ;
- температура инструмента 20°C .

Первый вариант постановки задачи создан для условия гладкой боковой поверхности пуансона. В этом случае металл выходит из очага деформации и попадает в щель постоянного сечения. Наличие поверхности трения в щели должно было создать дополнительный подпор и увеличение сжимающих напряжений. Такой вариант пуансона применен в экспериментах ИФМ УрО РАН.

Во втором варианте пуансон дополнили калибрующим пояском ($l_{\text{к.п.}} = 0,3 \text{ мм}$).

Для обоснования применения пуансона с калибрующим пояском на рисунке 4.18 показано распределение силы штамповки для варианта обратного выдавливания пуансоном без калибрующего пояса (рисунок 4.18, а) и при его наличии (рисунок 4.18, б).

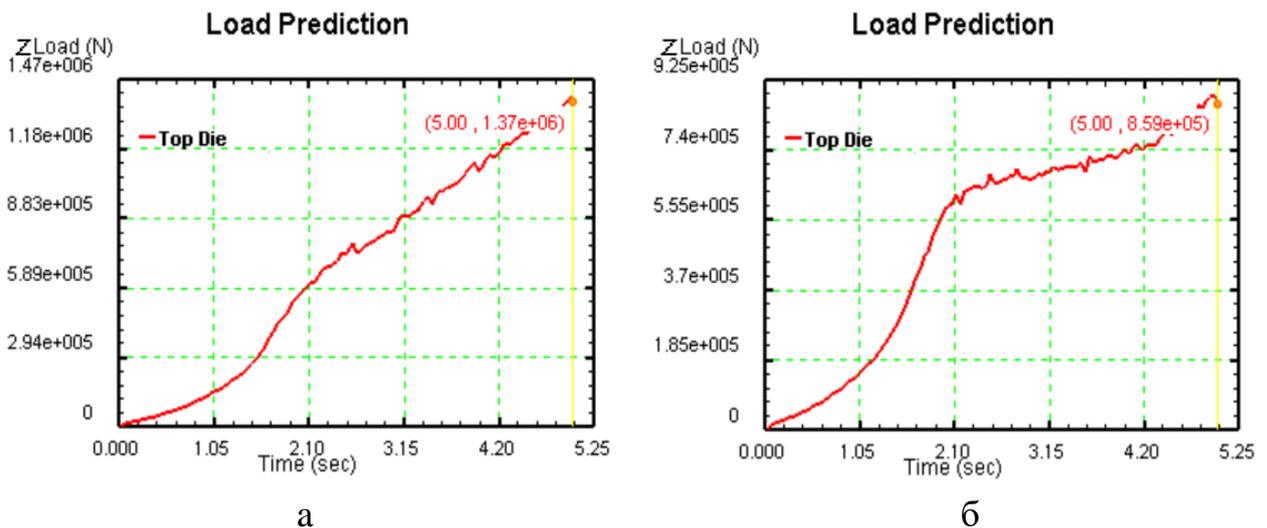


Рисунок 4.18 – Распределение силы штамповки: а – при деформации пуансоном без калибрующего пояса, б – при деформации пуансоном с калибрующим пояском

Здесь видно, что сила штамповки в первом варианте (рисунок 4.18, а) непрерывно растет, что можно объяснить увеличением поверхности трения, и

достигает значения 1370 кН. При деформации пуансоном с калибрующим пояском она достигла значения 859 кН (рисунок 4.32, б), что на 37% меньше силы первого варианта обратного выдавливания. Таким образом, калибрующий поясик позволил оптимизировать силовой режим процесса обратного выдавливания, а именно повысить стойкость деформирующего инструмента и надежность работы пуансона.

При выдавливании стенки может возникать дополнительное сопротивление перемещению металла при его контакте с инструментом наружной и внутренней поверхностью, обусловленное трением. Соответственно, наружная поверхность образована стенкой контейнера диаметром D_n , а внутренняя поверхность образована боковой поверхностью пуансона диаметром D_b .

Сила дополнительного сопротивления определяется интегрированием напряжения трения вдоль упомянутых поверхностей:

$$F = \pi D_n \int_{L_{ст}} \tau_n dy + \pi D_b \int_{L_{ст}} \tau_b dy. \quad (4.19)$$

Анализ формулы (4.19) показывает, что уменьшить дополнительное сопротивление можно, снижая затраты на трение. Это достигается уменьшением поверхности трения. Для этого надо выполнить условие: зазор между поверхностями трения должен быть больше, чем толщина стенки стакана. Это достигается применением калибрующего пояса.

Решение, показанное на рисунке 4.19, говорит о том, что трение в первом варианте выявляется, а во втором варианте наблюдается свободная поверхность у металла, вышедшего за пределы калибрующего пояса. Поэтому энергетические затраты во втором варианте окажутся меньше.

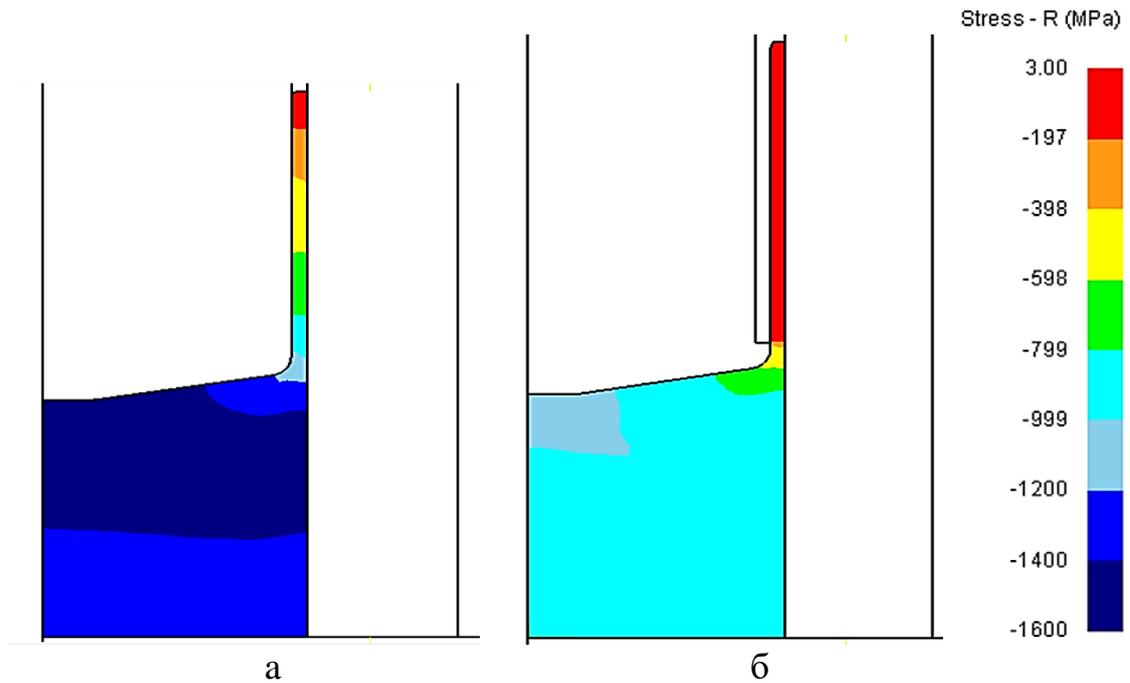


Рисунок 4.19 – Распределение напряжений σ_r при деформации пуансоном: а – без калибрующего пояса, б – с калибрующим пояском

Отметим, что при данных постановках задачи получен стакан внешним диаметром $d = 6$ мм, толщиной стенки $s = 200$ мкм и высотой $h = 8$ мм.

4.3.1 Результаты решения. Напряженное состояние

Распределение осевого напряжения в конце процесса деформации для обратного выдавливания пуансоном без калибрующего пояса и при его наличии представлено на рисунке 4.20, а и рисунке 4.20, в соответственно. На рисунках представлена правая половина очага деформации.

Для отслеживания изменения осевого напряжения по времени деформации под пуансоном были назначены контрольные точки P1...P4. Место назначения контрольных точек – область, примыкающая к торцу пуансона, было выбрано специально, так как по значению осевого напряжения здесь можно оценить давление на пуансоне. На рисунке 4.20, б, г представлено изменение осевого напряжения в контрольных точках по времени деформации для обратного выдавливания пуансоном без калибрующего пояса (рисунок 4.20, б) и с калибрующим пояском (рисунок 4.20, г).

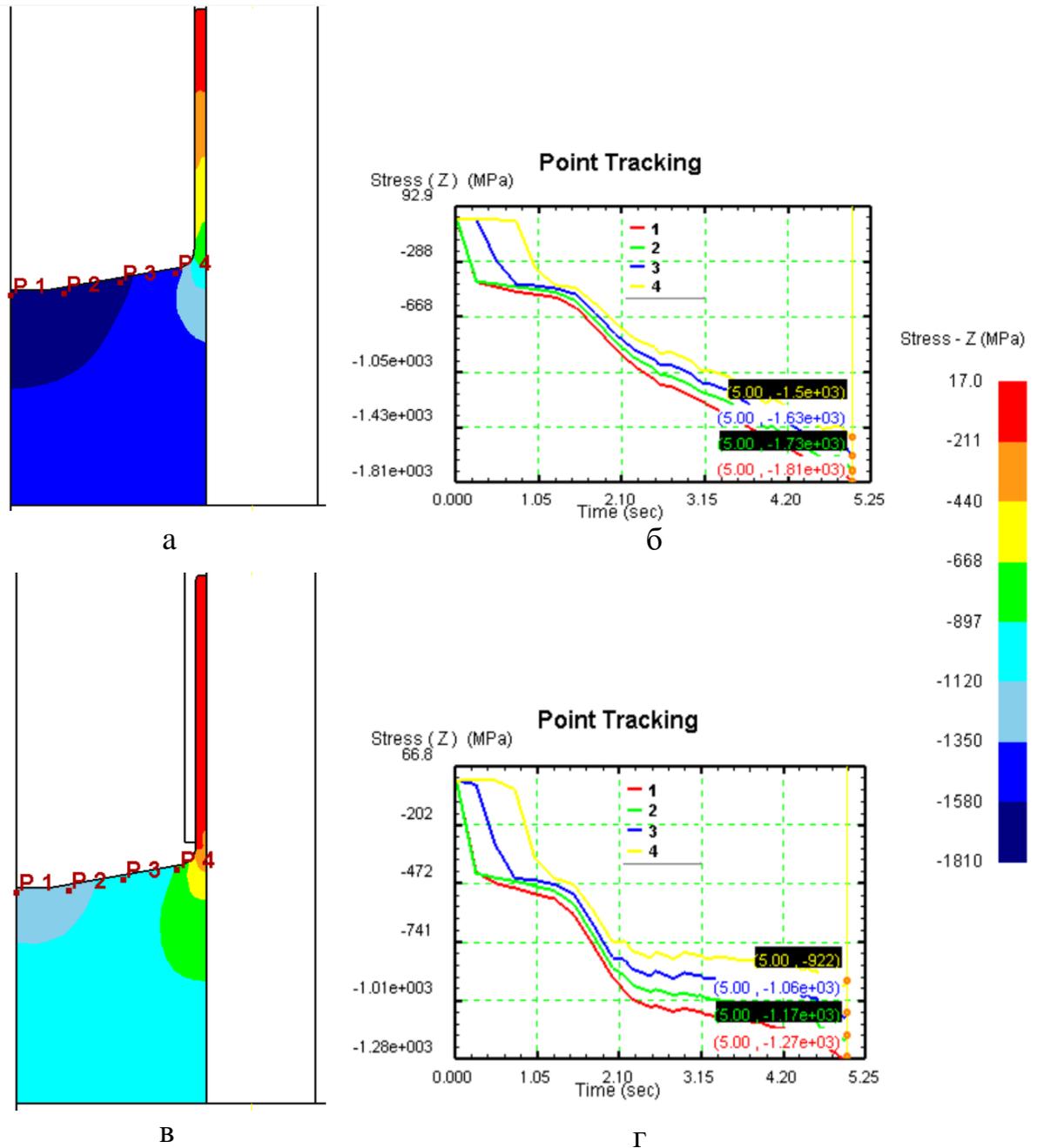


Рисунок 4.20 – Распределение осевого напряжения σ_{zz} при деформации пуансоном без калибрующего пояска (а) и с калибрующим пояском (в) с контрольными точками и соответствующие графики изменения напряжения в функции от времени (б и г)

Здесь видно, что максимальные по модулю напряжения сжатия достигаются непосредственно под пуансоном. При деформации пуансоном без калибрующего пояска максимальные по модулю напряжения сжатия достигают величины 1810 МПа (рисунок 4.20, а). В тех же условиях при деформации пуансоном с калибрующим пояском (рисунок 4.20, в) максимальные по модулю напряжения

сжатия понижены с 1810 МПа до 1270 МПа, т. е. на 30%. Таким образом, применение калибрующего пояска на пуансоне позволяет снизить на нем давление, и, как следствие, это может привести к повышению возможной степени деформации без разрушения.

Если назначить допускаемое напряжение на уровне 1500 МПа, то при использовании первого варианта пуансона напряжения могут оказаться выше допускаемых (до 1810 МПа), а при использовании второго варианта – ниже допускаемых (до 1270 МПа). Поэтому более предпочтительным оказывается применение пуансона с калибрующим пояском.

4.3.2 Результаты решения. Деформированное состояние

Распределение степени деформации в процессе обратного выдавливания пуансоном без калибрующего пояска приведено на рисунке 4.21, а и при его наличии на рисунке 4.21, б.

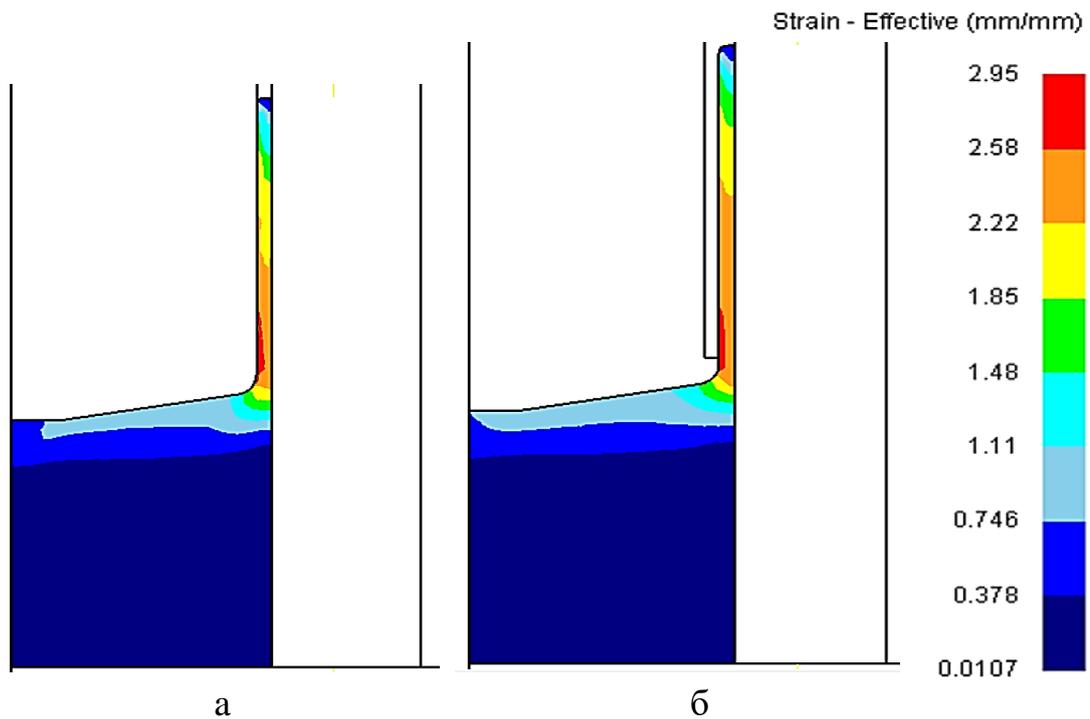


Рисунок 4.21 – Распределение степени деформации при деформации пуансоном: а – без калибрующего пояска, б – с калибрующим пояском

Здесь видно, что металл заготовки получает степень деформации, равную 2,58...2,95 на внутренней поверхности и на уровне 2,22...2,58 на внешней поверхности оболочки.

В качестве эксперимента получены решения, в которых перемещение пуансона по оси z составило 1,2 мм, при прочих равных условиях задачи для двух вариантов обратного выдавливания (без калибрующего пояска и при его наличии), с целью определения степени деформации и построения графиков ее колебания по длине трубки.

На рисунке 4.22 представлено распределение степени деформации в процессе обратного выдавливания пуансоном без калибрующего пояска (рисунок 4.22, а) и при его наличии (рисунок 4.22, б) при перемещении пуансона по оси z 1,2 мм.

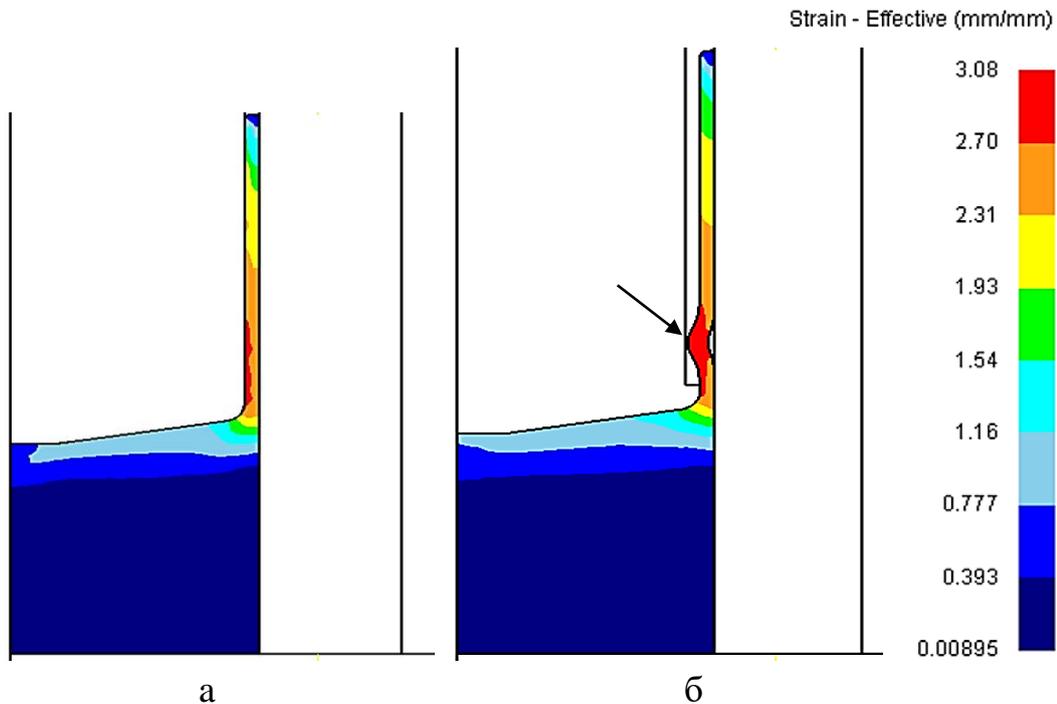


Рисунок 4.22 – Распределение степени деформации при перемещении пуансона по оси z 1,2 мм: а – при деформации пуансоном без калибрующего пояска, б – при деформации пуансоном с калибрующим пояском, стрелка указывает на образование прогиба стенки стакана

На рис. 4.22, б зафиксировано явление прогиба стенки стакана при данных условиях деформации, что можно объяснить потерей устойчивости при назначенной (малой) длине калибрующего пояска.

Было принято решение рассмотреть это явление подробнее. На рисунке 4.23 представлено распределение степени деформации на разных этапах образования прогиба стенки стакана. Здесь на каждом этапе видны места локализации деформации, приводящие к появлению прогиба. В данном случае речь идет об описании именно накопленной деформации и здесь видно, что наибольшей величины она достигает на «островках», примыкающих к прогибу.

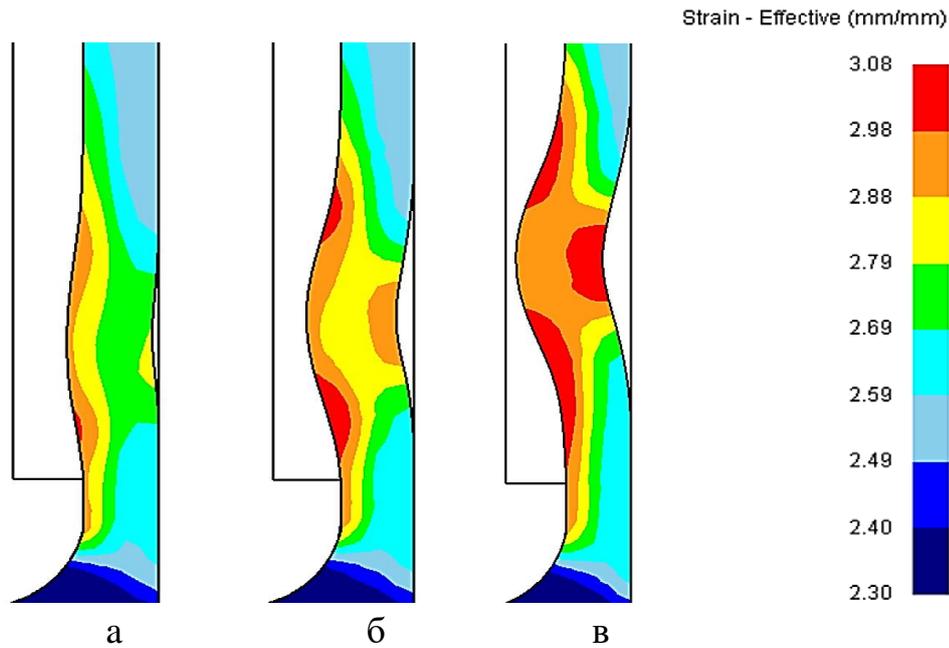


Рисунок 4.23 – Распределение степени деформации: а – в начальный этап образования прогиба, б – в промежуточный этап образования прогиба, в – заключительный этап образования прогиба

Перемещение очага деформации в области образования прогиба показано на рисунке 4.24. Для этого применен показатель скорости деформации. Здесь видно, что в процессе образование прогиба стенки стакана на разных этапах очаг деформации расположен в месте радиуса скругления пуансона, а также на каждом этапе видны три локальных «островка» с увеличенной скоростью деформации (в месте, где металл вышел за пределы калибрующего пояска) с наличием разрывов между ними. Эта локализация обусловлена появлением прогиба.

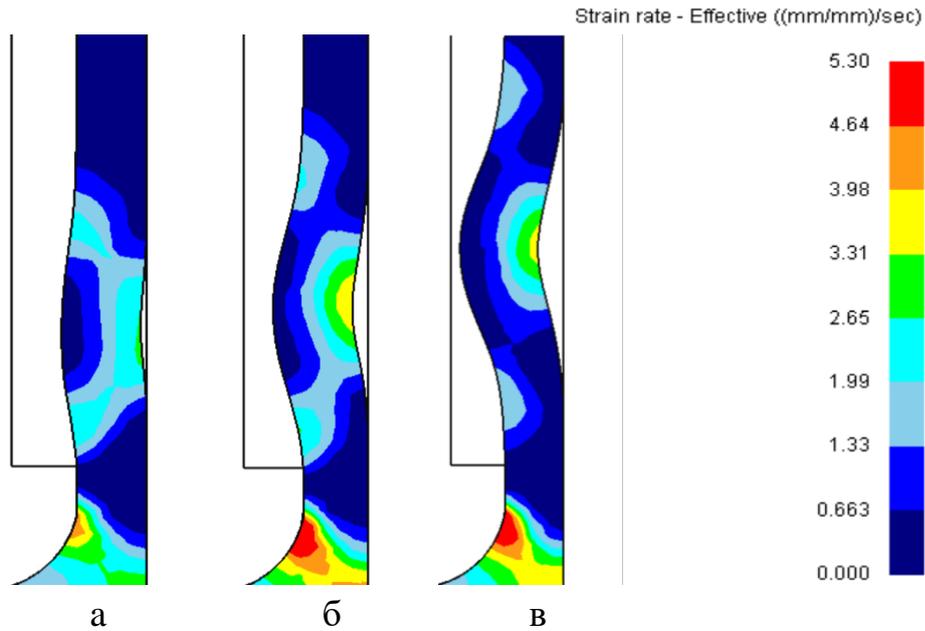


Рисунок 4.24 – Распределение скорости деформации: а – в начальный этап образования прогиба, б – в промежуточный этап образования прогиба, в – заключительный этап образования прогиба

На рисунке 4.25 представлено распределение интенсивности напряжений в зоне образования прогиба. Красные области соответствуют большему уровню напряжений. Здесь видно, что в прижатых и отогнутой зонах стенки интенсивность напряжений оказывается различной. Она больше в отогнутой зоне и может достигать 246 МПа, что выше предела текучести материала заготовки. Тем самым создаются условия для образования прогиба.

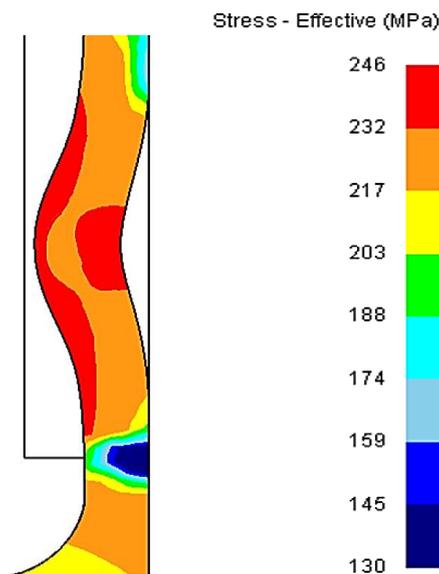


Рисунок 4.25 – Распределение интенсивности напряжений на заключительном этапе образования прогиба

С целью устранения прогиба стенки стакана принято решение увеличить длину калибрующего пояска в 2 раза, то есть $l_{к.п.} = 0,6$ мм. На рисунке 4.26 представлено распределение степени деформации в процессе обратного выдавливания пуансоном с калибрующим пояском при перемещении пуансона по оси z 1,2 мм.

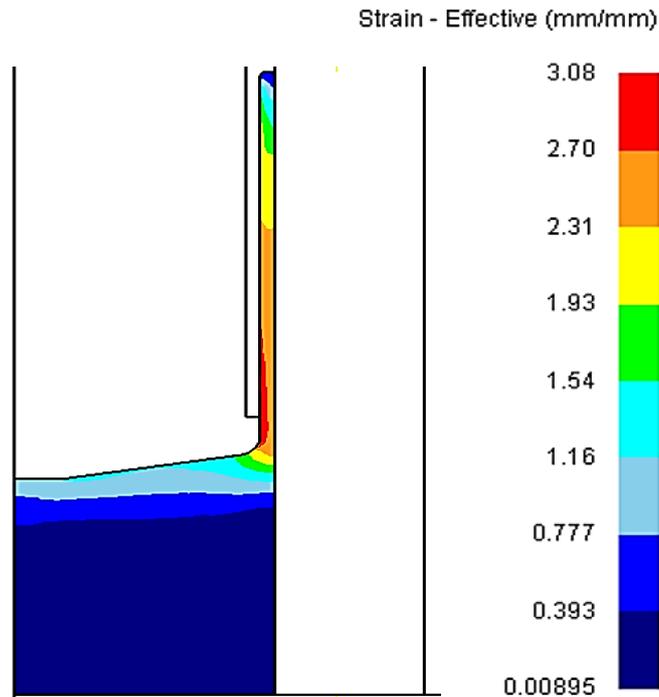


Рисунок 4.26 – Распределение степени деформации при деформации пуансоном с калибрующим пояском $l_{к.п.} = 0,6$ мм (путь пуансона по оси z 1,2 мм)

Здесь видно, что устойчивость стенки сохранена, прогиб не образовался.

Для построения графиков колебания степени деформации по длине трубки использованы решения, представленные на рисунке 4.22, а и 4.26.

На рисунке 4.27 представлен график степени деформации на внутренней (кривая 1) и внешней (кривая 2) стороне стенки стакана для варианта обратного выдавливания пуансоном без калибрующего пояска и степени деформации на внутренней (кривая 3) и внешней (кривая 4) стороне стенки стакана для варианта обратного выдавливания пуансоном с калибрующим пояском в функции от высотной координаты (где координата $z = 0$ – район радиуса скругления пуансона, $z = 5,2$ – кромка стакана). Степень деформации рассмотрена для момента времени, когда пуансон прошел путь по оси z 1,2 мм.

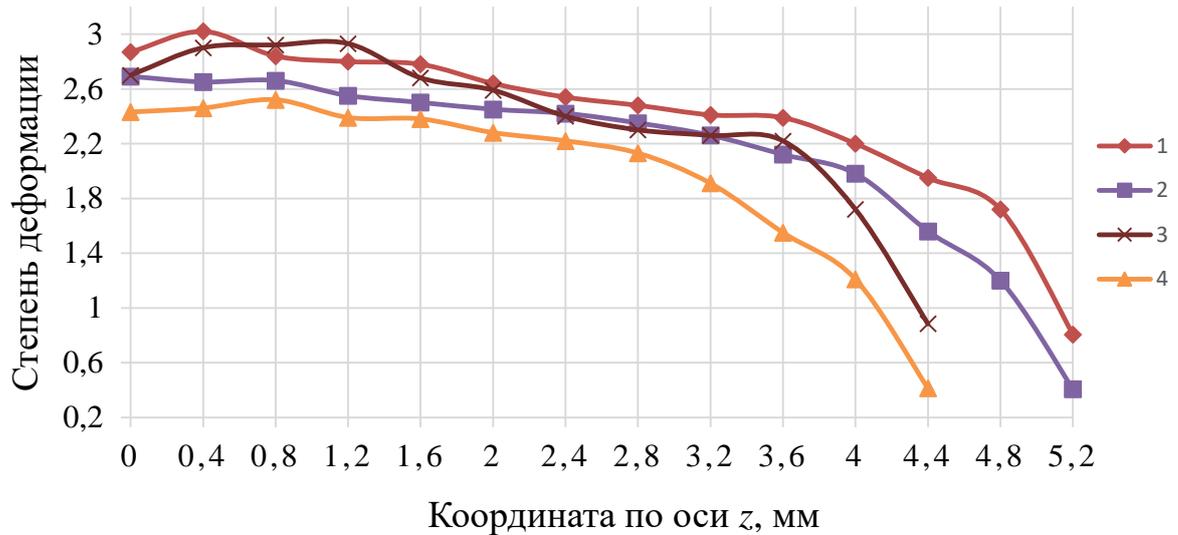


Рисунок 4.27 – Степень деформации на внутренней (кривая 1) и внешней (кривая 2) стороне стенки стакана для варианта обратного выдавливания пунсоном без калибрующего пояска и степени деформации на внутренней (кривая 3) и внешней (кривая 4) стороне стенки стакана для варианта обратного выдавливания пунсоном с калибрующим пояском в функции от высотной координаты

Максимальное и минимальное значение степени деформации кривой 1 составляет 3,02 и 0,807, соответственно, разница 73%, также, кривая 1 имеет участок с координатами от $z = 1,2$ до $z = 3,6$, где разница значений степени деформации не превышает 14,7%, то есть этот участок можно назвать стационарным по распределению степени деформации.

При сравнении кривой 1 и 2 (аналогично для кривой 3 и 4) видно, что внутренняя сторона трубки имеет более высокую степень деформации в отличие от внешней, что можно объяснить созданием уровня деформации на внутренней стороне стакана в схеме обратного выдавливания при большем участии сдвиговой деформации, а внешней – посредством деформации удлинения.

Максимальное значение степени деформации кривой 2 составляет 2,7, а минимальное – 0,406, то есть разница 84,9%. Кривая 2 также имеет стационарный участок с координатами от $z = 0$ до $z = 3,2$, где колебания значений степени деформации не превышают 16,3%. Для зависимости 3 стационарный участок располагается от координаты $z = 2$ до $z = 3,6$, значения степени деформации здесь имеют колебание 14,3%. Отметим, что кривая 3 имеет максимальное значение

степени деформации 2,93, а минимальное – 0,884, то есть разница составляет 69,8%. Кривая 4 имеет стационарный участок от координаты $z = 0$ до $z = 2,8$, разница составляет 12,4%. Максимальное значение степени деформации составляет 2,43, а минимальное 0,413, то есть разница 83%.

Сравнивая кривую 3 и 4 видно, что и при применении пуансона без калибрующего пояска внешняя сторона стакана имеет меньшие значения степени деформации чем внутренняя.

Можно сделать вывод о длине стационарных участков: у кривой 1 и 2 эти участки имеют большую протяженность по длине стенки в отличие от кривой 3 и 4, таким образом можно сказать, что свойства стенки стакана, полученного обратным выдавливанием пуансоном с калибрующим пояском, будут более однородны.

Здесь также можно отметить, что наибольшие, в том числе и максимальное, значения степени деформации во всех случаях расположены с внутренней стороны стенки и привязаны к координатам: для кривой 1 от $z = 0$ до $z = 0,8$, для кривой 2 от $z = 0$ до $z = 1,2$. Минимальные же значения степени деформации находятся в районе кромки стенки ($z = 5,2$). Таким образом, учитывая разницу максимальных и минимальных значений степени деформации, можно спрогнозировать, что свойства трубки (после удаления дна стакана) с разных ее концов будут отличаться.

4.3.3 Результаты решения. Изменение температуры

На рисунке 4.28 представлено распределение температуры в двух вариантах обратного выдавливания: без калибрующего пояска (рисунок 4.28, а) на пуансоне и с калибрующим пояском на пуансоне (рисунок 4.28, б). Здесь видно, что максимальное значение температуры в обоих вариантах процесса находится в зоне очага деформации, т.е. в зоне действия наибольших сдвигов. Также можно отметить, что в первом варианте (рисунок 4.28, а) по мере увеличения высоты стенки стакана температура металла достаточно резко понижается за счет контакта с поверхностью холодного инструмента (боковой поверхностью пуансона и стенкой контейнера), во втором же варианте температура по высоте стенки стакана

понижается более медленно за счет отсутствия контакта с боковой поверхностью пуансона (рисунок 4.28, б). Если оценивать температуру по всему объему заготовки, то можно увидеть, что в первом варианте процесса ее уровень ниже, чем во втором.

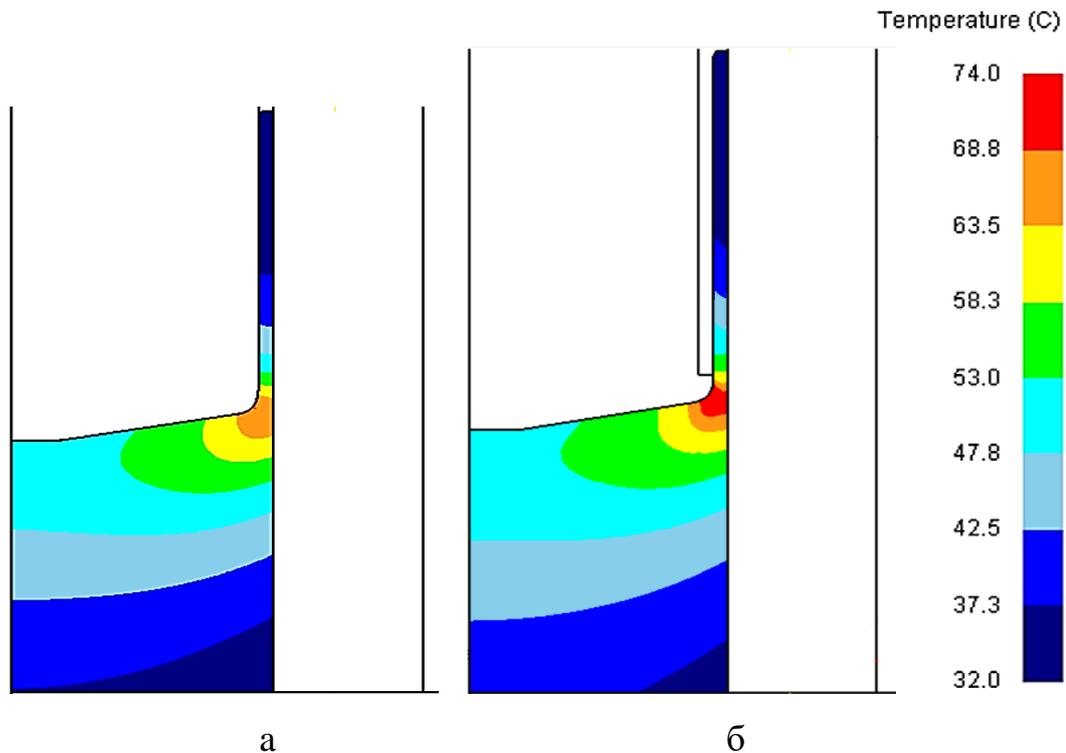


Рисунок 4.28 – Распределение температуры: а – при деформации пуансоном без калибрующего пояска, б – при деформации пуансоном с калибрующим пояском

4.3.4 Результаты решения. Прогноз возможности разрушения

Также в данной работе произведена оценка напряженно-деформированного состояния процесса деформации методом обратного выдавливания, реализация которого позволила сообщить определенный уровень деформации магниевой заготовке в холодном состоянии. Задачей являлось выявление в очаге деформации зон, опасных по появлению трещин, для чего принято решение оценить в нем параметр σ/T .

Далее использованы основы теории разрушения, изложенные, например, в книге [145]. Разрушение наступает при превышении предельной степени деформации сдвига Λ_p , которая в свою очередь зависит от показателя напряженного состояния σ/T .

Показатель напряженного состояния σ/T рассчитывали специально и приводили к табличному виду. Для дополнительных расчетов в очаге деформации пришлось назначить контрольные точки P1,..., P9. Строение очага деформации в процессе обратного выдавливания пуансоном без калибрующего пояска помогает понять распределение скоростей деформации по объему заготовки (рисунок 4.29).

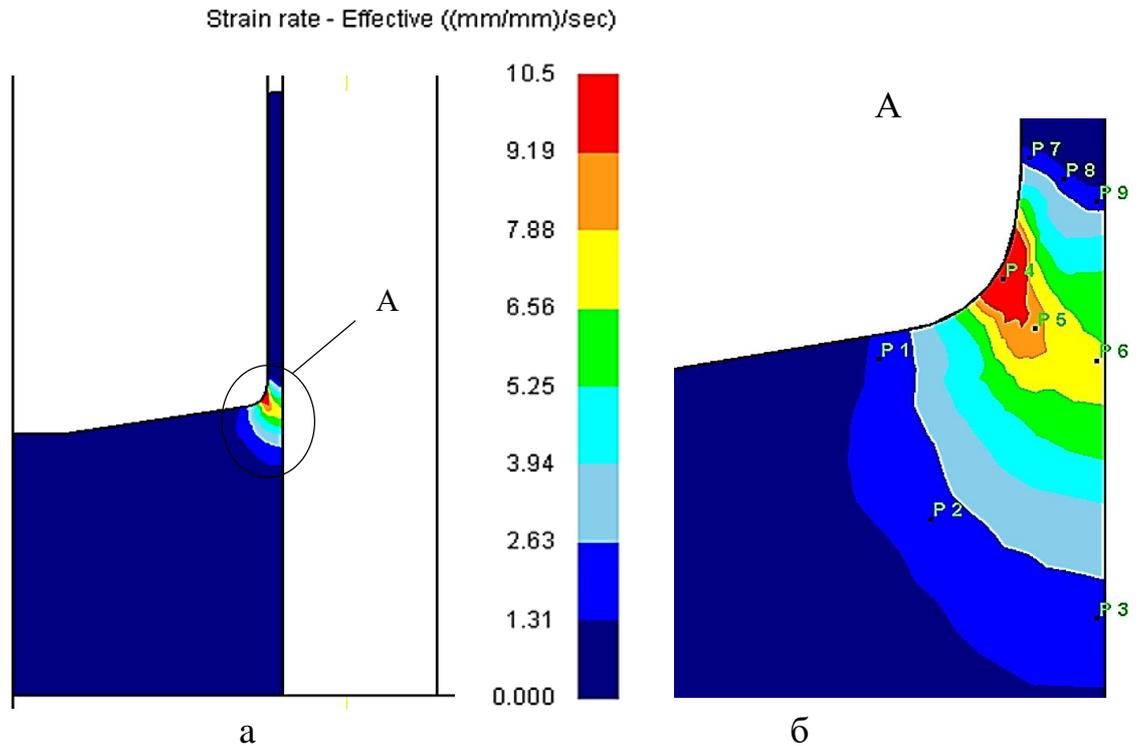


Рисунок 4.29 – Распределение скорости деформации (а) и зона повышенных скоростей деформации А (б)

Здесь стоит отметить, что максимум скорости деформации возник в зоне действия наибольших сдвигов. Близость максимума именно к поверхности пуансона предполагает большее упрочнение металла именно с внутренней стороны получаемой оболочки.

В контрольных точках выполнена оценка значений параметра stress mean, которые соответствуют понятию среднего напряжения (рисунок 4.30, б) и параметра stress effective, которые соответствуют понятию интенсивности напряжений $\sigma_{\text{и}}$ (рисунок 4.30, а).

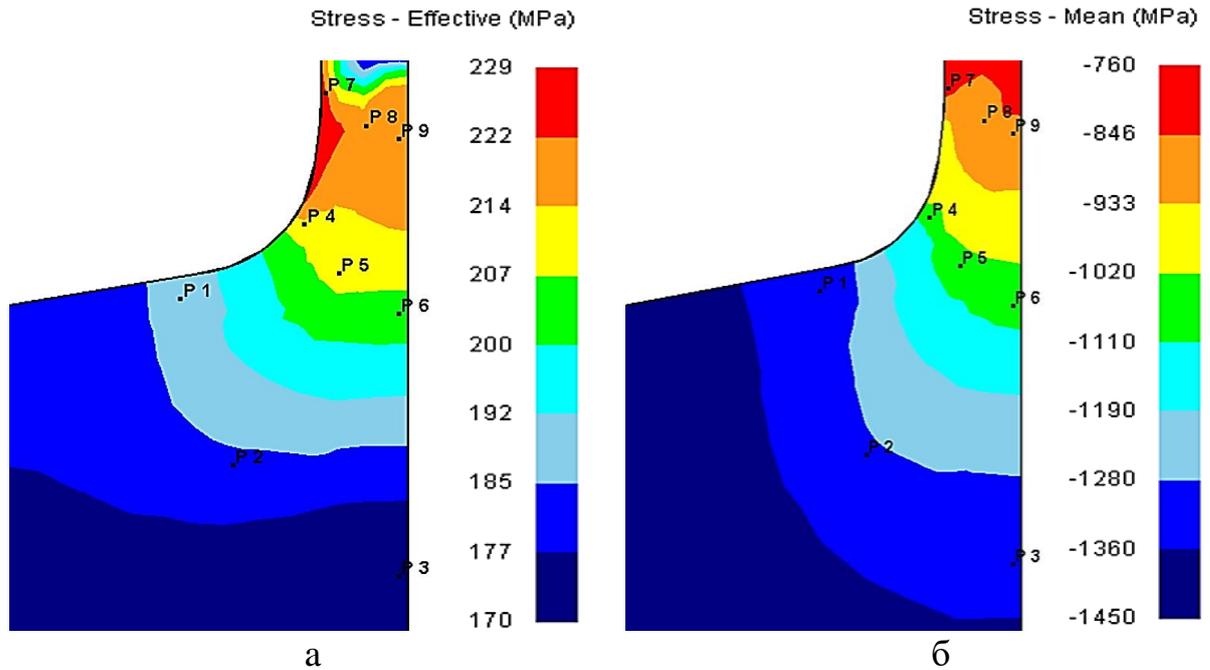


Рисунок 4.30 – Распределение: а – интенсивности напряжений в очаге деформации, б – среднего напряжения в очаге деформации

Отметим, что величина интенсивности напряжений в очаге деформации (рисунок 4.30, а) по мере приближения к стенке стакана повышается. Зона очага деформации, приближенная к дну стакана – зона повышенных по модулю значений среднего напряжения (рисунок 4.30, б).

Расчетные данные по показателю напряженного состояния в контрольных точках P1-P9 представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Показатель напряженного состояния в контрольных точках P1 – P9

Параметр	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ/Γ	-12,3	-12,3	-13,2	-8,6	-8,7	-8,9	-6,5	-6,9	-6,7

Из таблицы 4.2 видно, что показатель σ/Γ в очаге деформации может варьироваться в пределах $-6,5...-13,2$. Поскольку пластичность металлов уменьшается с увеличением показателя σ/Γ , то из таблицы следует, что опасная зона прилегает к точкам P7...P9. Вместе с тем значения σ/Γ , везде имеют отрицательные значения, то есть преобладают напряжения сжатия. При этом неблагоприятные (наименьшие по модулю) значения находятся в области стенки стакана. Таким образом эта зона является опасной с позиции трещинообразования.

Строение очага деформации в процессе обратного выдавливания пуансоном с калибрующим пояском представлено на рисунке 4.31 через распределение скоростей деформации по объему заготовки.

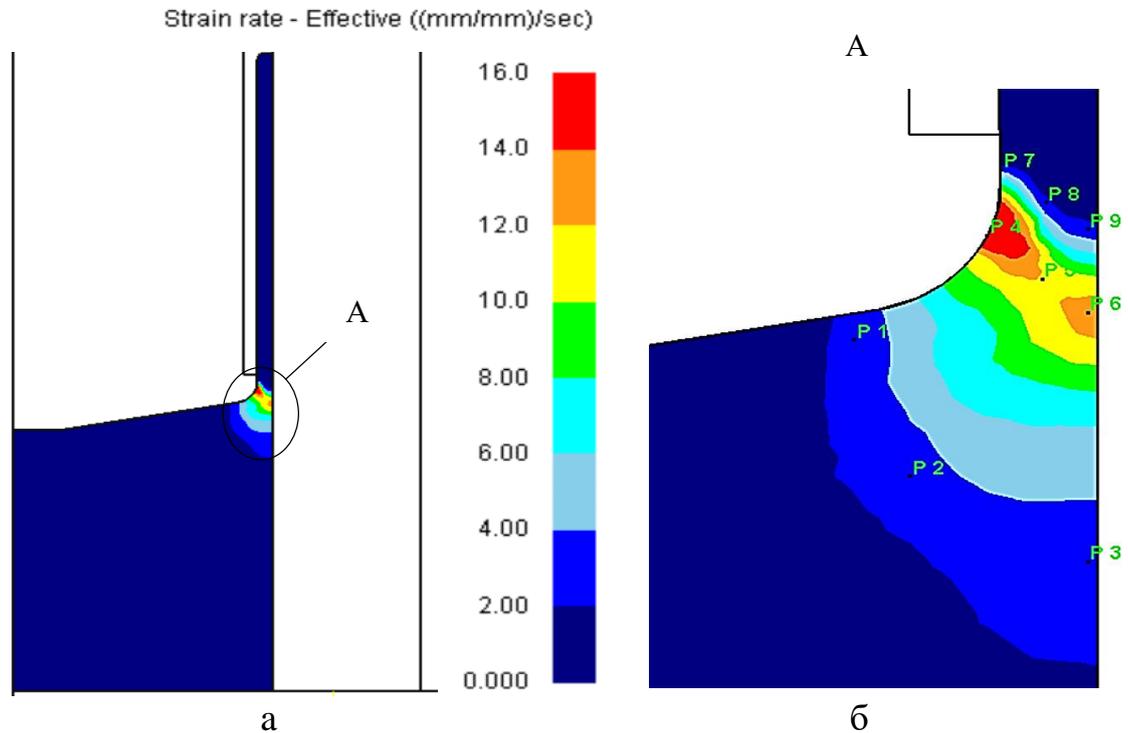


Рисунок 4.31 – Распределение: а – скорости деформации, б – зона А

В контрольных точках выполнена оценка значений параметра stress mean (рисунок 4.32, б) и параметра stress effective (рисунок 4.32, а).

Здесь также можно отметить увеличение интенсивности напряжений в очаге деформации (рисунок 4.32, а) по мере приближения к стенке стакана. Зона очага деформации, приближенная к дну стакана – зона повышенных по модулю значений среднего напряжения (рисунок 4.32, б).

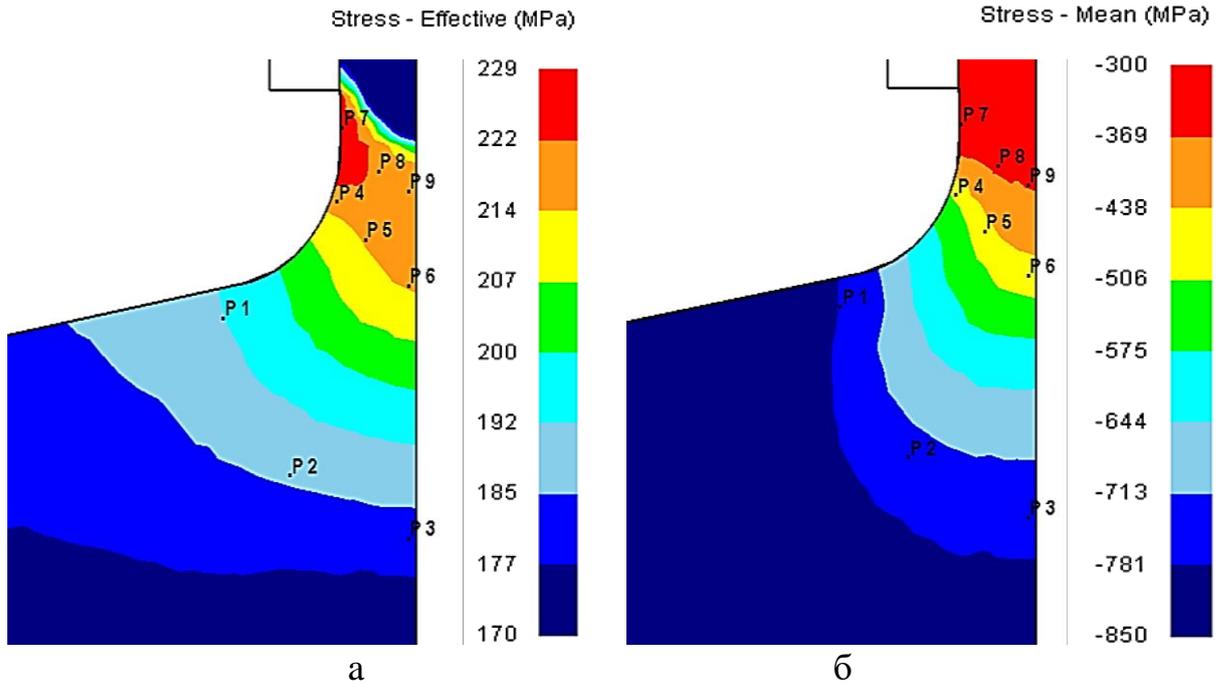


Рисунок 4.32 – Распределение: а – интенсивности напряжений в очаге деформации, б – среднего напряжения в очаге деформации

Расчетные данные по показателю напряженного состояния в контрольных точках P1-P9 представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Показатель напряженного состояния в контрольных точках P1 – P9

Параметр	Номер точки								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ/T	-6,9	-6,9	-7,3	-4,1	-3,8	-3,8	-2,5	-2,7	-2,8

Из таблицы 4.3 видно, что показатель σ/T в очаге деформации может варьироваться в пределах -2,5...-7,3.

Здесь можно отметить, что опасная зона также прилегает к точкам P7...P9, имеющим наименьшие по модулю значения σ/T . При этом сравнивая значения показателя напряженного состояния в первом и втором варианте обратного выдавливания можно увидеть его уменьшение во втором варианте в среднем в 2 раза, но вместе с тем в этом варианте σ/T имеют достаточно высокие значения по модулю (превалируют напряжения сжатия), которых должно хватить для осуществления процесса обратного выдавливания без разрушения.

4.3.5 Результаты решения. Энергосиловые параметры

В процессе холодного обратного выдавливания важным является отслеживание силовых режимов, а именно силы деформирования и давления на пуансоне. Для повышения стойкости деформирующего инструмента и увеличения надежности работы штампов есть стремление к понижению этих величин.

Для оптимизации силового режима процесса обратного выдавливания тонкостенного магниевого стакана изучены факторы, влияющие на величину усилия и давления, а именно форма рабочей поверхности пуансона, угол конусности при применении конического пуансона, радиус закругления при применении пуансона с плоской рабочей поверхностью, длина калибрующего пояса и показатель трения.

В качестве первого фактора рассмотрена форма рабочей поверхности пуансона. Как эксперимент назначена коническая, сферическая и плоская форма рабочей поверхности пуансона. На рисунке 4.33 представлено распределение силы штамповки и осевого напряжения для вариантов обратного выдавливания с вышеуказанными формами поверхности пуансона.

Здесь видно, что сила штамповки при деформации пуансоном с плоским торцом достигает значения 1690 кН (рисунок 4.33, е), с коническим торцом (рисунок 4.34, г) – 1370 кН, что на 19% меньше силы при деформации пуансоном с плоским торцом, со сферическим торцом (рисунок 4.33, д) – 946 кН, то есть на 44% меньше силы при деформации пуансоном с плоским торцом.

При деформации пуансоном с плоским торцом максимальные по модулю напряжения сжатия достигают величины 2150 МПа (рисунок 4.33, в). В тех же условиях при деформации пуансоном с коническим торцом (рисунок 4.33, а) максимальные по модулю напряжения сжатия – 1700 МПа, т. е. понижены на 21%. При применении пуансона со сферическим торцом (рисунок 4.33, б) максимальные по модулю напряжения сжатия достигают 1370 МПа, то есть, по сравнению с их величиной в случае использования пуансона с плоским торцом, произошло уменьшение на 36,3%.

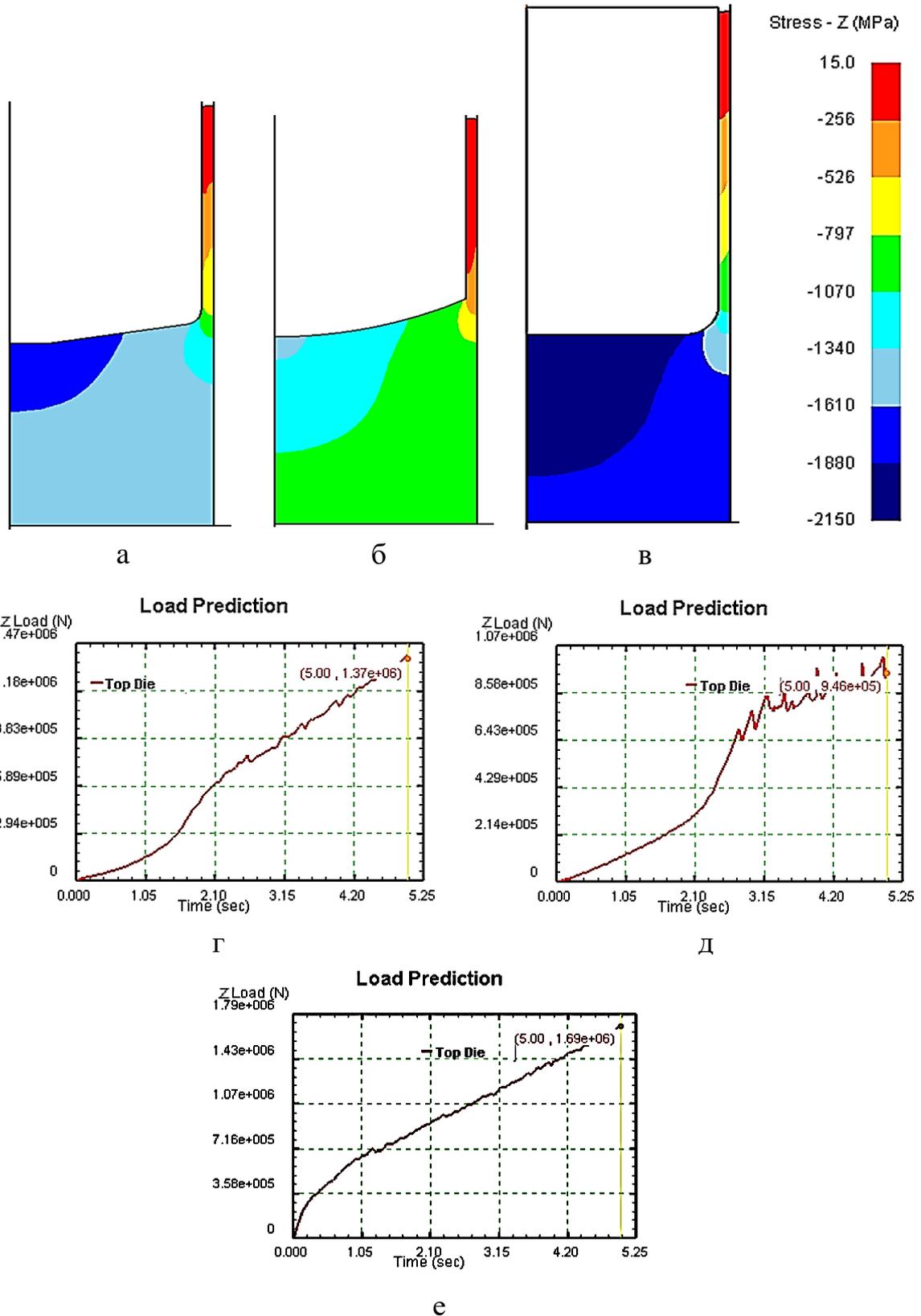


Рисунок 4.33 – Графики изменения усилия деформации в функции времени при использовании пуансона с коническим торцом (г), сферическим торцом (д), плоским торцом (е) и распределение осевых напряжений в той же последовательности вариантов (а, б, в)

Таким образом, при деформации пуансоном со сферическим торцом выявлена наименьшая сила деформирования и давление на пуансоне. Если сравнить полученные значения осевых напряжений с допусковым (на уровне 1500 МПа), то при использовании пуансона с плоским и коническим торцом напряжения оказались выше допусковых, при использовании пуансона со сферическим торцом – ниже. Поэтому, оценивая значения силы штамповки и осевого напряжения, более предпочтительным оказывается вариант пуансона со сферическим торцом.

Второй рассмотренный фактор – угол конусности пуансона. В качестве эксперимента он назначен 1° , 2° , 3° и 4° . На рисунке 4.34 представлено распределение силы штамповки и осевого напряжения для вариантов обратного выдавливания с вышеуказанными углами конусности пуансона.

Видно, что сила штамповки при деформации пуансоном с углом конусности 1° достигает значения 1600 кН (рисунок 4.34, д), с углом конусности 2° (рисунок 4.34, е) – 1370 кН, что на 14,4% меньше силы при деформации пуансоном с углом конусности 1° , с углом конусности 3° (рисунок 4.34, ж) – 1140 кН, что на 28,8% меньше силы при деформации пуансоном с углом конусности 1° , с углом конусности 4° (рисунок 4.34, з) – 923 кН, то есть на 42,4% меньше силы при деформации пуансоном с углом конусности 1° . Таким образом можно отметить, что с увеличением угла конусности пуансона на 1° , сила штамповки уменьшается \approx на 14%.

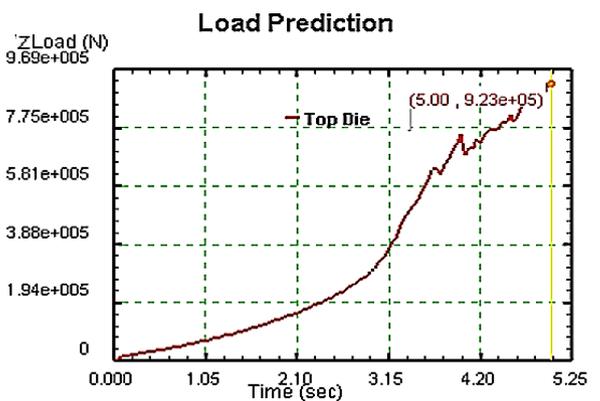
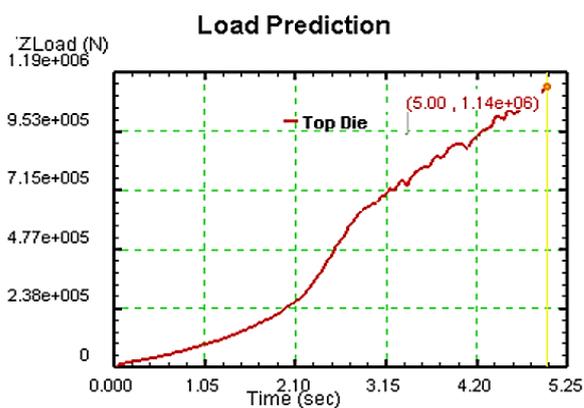
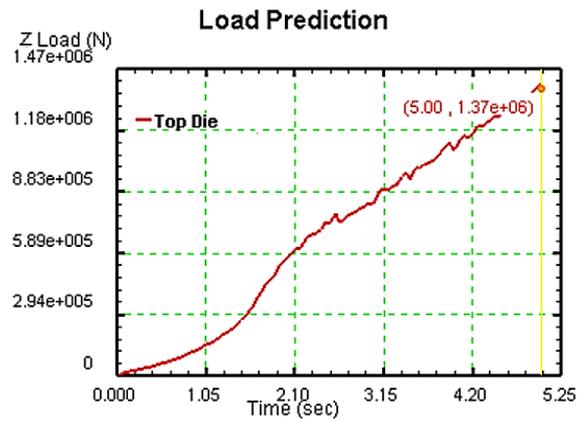
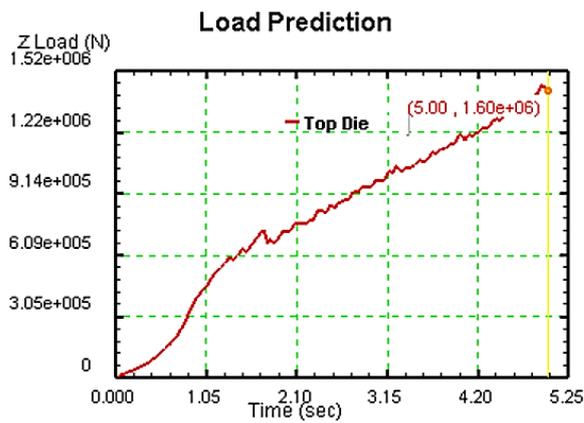
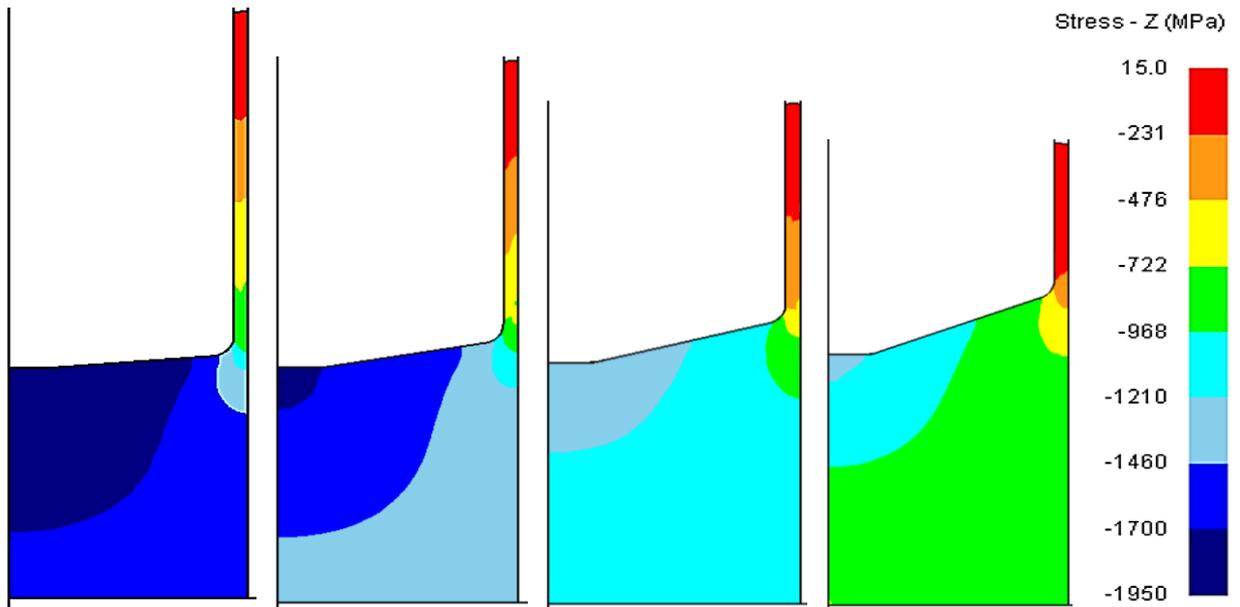


Рисунок 4.34 – Графики изменения усилия деформации в функции времени при использовании конического пуансона с углом конусности 1° (д), 2° (е), 3° (ж), 4° (з) и распределение осевых напряжений в той же последовательности вариантов (а, б, в, г)

При деформации пуансоном с углом конусности 1° максимальные по модулю напряжения сжатия достигают величины 1950 МПа (рисунок 4.34, а). В тех же условиях при деформации пуансоном с углом конусности 2° (рисунок 4.34, б) максимальные по модулю напряжения сжатия – 1700 МПа, т. е. понижены на 12,9%. При применении пуансона с углом конусности 3° (рисунок 4.34, в) максимальные по модулю напряжения сжатия достигают 1450 МПа, то есть, по сравнению с их величиной в случае использования пуансона с углом конусности 1° , произошло уменьшение на 25,7%. При применении пуансона с углом конусности 4° (рисунок 4.34, г) максимальные по модулю напряжения сжатия достигают 1210 МПа, то есть, по сравнению с их величиной в случае использования пуансона с углом конусности 1° , произошло уменьшение на 38%. Здесь также можно отметить, что с увеличением угла конусности пуансона на 1° , максимальное осевое напряжение уменьшается \approx на 13%.

Таким образом, увеличение угла конусности пуансона позволяет снизить силу деформирования и давление на пуансоне. Если сравнить полученные значения напряжений с допусковым (на уровне 1500 МПа), то при использовании пуансона с углом конусности 1° и 2° напряжения могут оказаться выше допусковых, а при использовании пуансона с углом конусности 3° и 4° – ниже. Поэтому, оценивая значения силы и осевого напряжения, более предпочтительным оказывается вариант пуансона с углом конусности 3° и 4° . Однако, здесь стоит отметить, что при равном пути перемещения пуансона с увеличением угла конусности уменьшается высота стенки стакана и больший объем металла находится в его дне, то есть подлежит удалению, а это потери металла.

Третий фактор – радиус закругления пуансона с плоской рабочей поверхностью. В качестве эксперимента он назначен 0,6 мм, 0,8 мм и 1,0 мм. На рисунке 4.35 представлено распределение силы штамповки и осевого напряжения для вариантов обратного выдавливания с вышеуказанными радиусами закругления пуансона с плоской рабочей поверхностью.

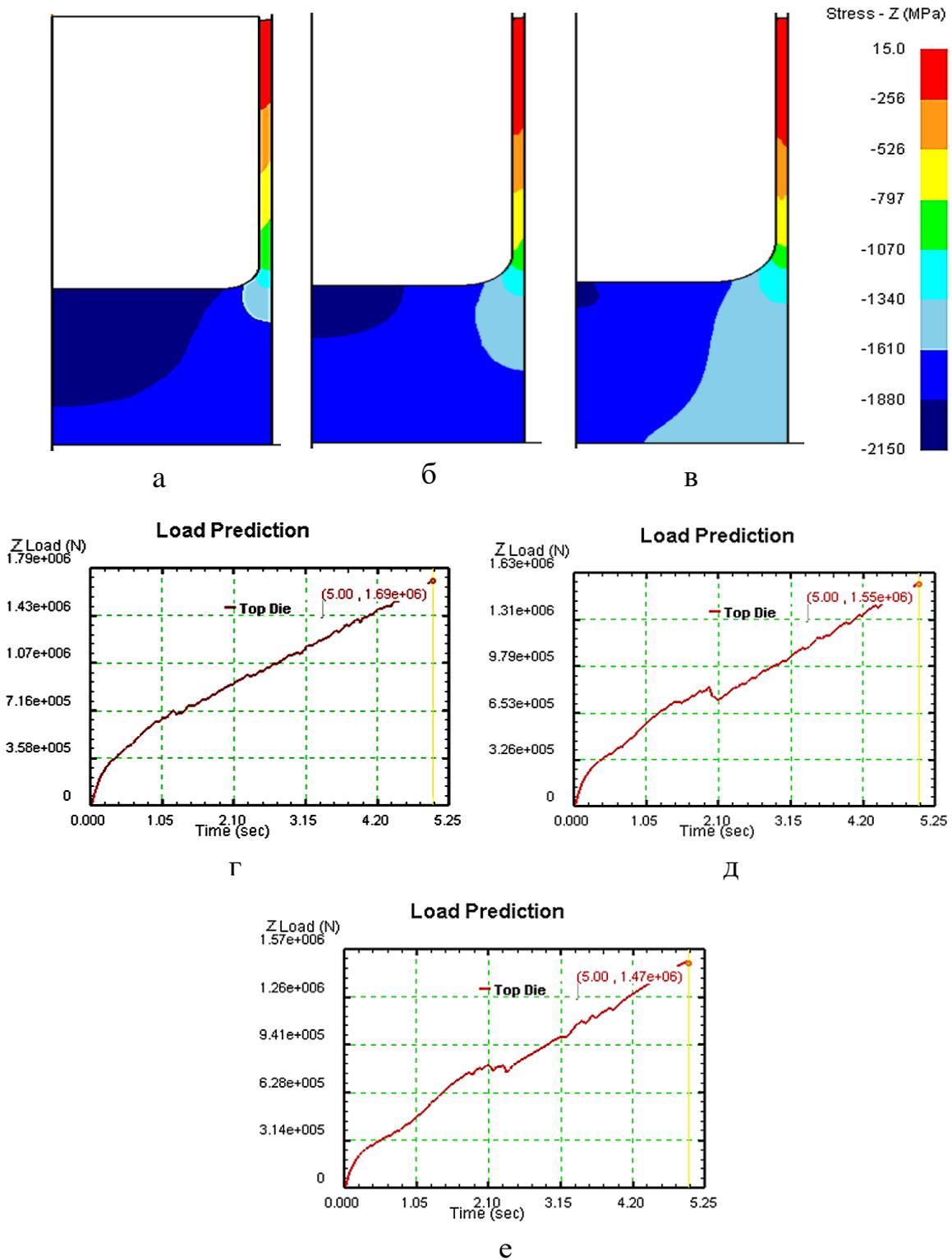


Рисунок 4.35 – Графики изменения усилия деформации в функции времени при использовании пуансона с плоской рабочей поверхностью с радиусом скругления 0,6 мм (а), 0,8 мм (в), 1,0 мм (д) и распределение осевых напряжений в той же последовательности вариантов (б, г, е)

Видно, что сила штамповки при деформации пуансоном с плоской рабочей поверхностью с радиусом скругления 0,6 мм достигает значения 1690 кН (рисунок

4.35, г), с радиусом скругления 0,8 мм (рисунок 4.35, д) – 1550 кН, что на 8,3% меньше силы при деформации пуансоном с радиусом скругления 0,6 мм, с радиусом закругления 1,0 мм (рисунок 4.35, е) – 1470 кН, то есть на 13% меньше силы при деформации пуансоном с радиусом скругления 0,6 мм.

При деформации пуансоном с радиусом скругления 0,6 мм максимальные по модулю напряжения сжатия достигают величины 2150 МПа (рисунок 4.35, а). В тех же условиях при деформации пуансоном с радиусом скругления 0,8 мм (рисунок 4.35, б) максимальные по модулю напряжения сжатия – 1980 МПа, т. е. понижены на 8%. При применении пуансона с радиусом закругления 1,0 мм (рисунок 4.35, в) максимальные по модулю напряжения сжатия достигают 1910 МПа, то есть, по сравнению с их величиной в случае использования пуансона с радиусом закругления 0,6 мм, произошло уменьшение на 11%. Если сравнить полученные значения напряжений с допусковым (на уровне 1500 МПа), то, при использовании пуансонов данных конструкций, осевые напряжения оказались выше допускового.

Таким образом, здесь можно сделать вывод, что увеличение радиуса скругления на пуансоне с плоской рабочей поверхностью не дает достаточного снижения силы деформирования и давления на пуансоне.

В качестве четвертого фактора рассмотрен калибрующий пояс пуансона. Как эксперимент выбран пуансон с коническим торцом (угол конусности 2°), а калибрующий пояс назначен длиной $l_{к.п.}=0,3$ мм, $l_{к.п.}=0,6$ мм и $l_{к.п.}=0,9$ мм. На рис. 4.36 представлено распределение силы штамповки и осевого напряжения для вариантов обратного выдавливания с вышеуказанными длинами калибрующего пояса.

Здесь видно, что сила штамповки при деформации пуансоном с $l_{к.п.}=0,3$ мм достигает значения 859 кН (рисунок 4.36, г), с $l_{к.п.}=0,6$ мм (рисунок 4.36, д) – 920 кН, что на 7,3% больше силы при деформации пуансоном с $l_{к.п.}=0,3$ мм, с $l_{к.п.}=0,9$ мм (рисунок 4.36, е) – 967 кН, то есть на 12,5% больше силы при деформации пуансоном с $l_{к.п.}=0,3$ мм.

При деформации пуансоном с $l_{к.п.}=0,3$ мм максимальные по модулю напряжения сжатия достигают величины 1270 МПа (рисунок 4.36, а). В тех же условиях при деформации пуансоном с $l_{к.п.}=0,6$ мм (рисунок 4.36, б) максимальные по модулю напряжения сжатия – 1350 МПа, т. е. повышены на 6,3%. При применении пуансона с $l_{к.п.}=0,9$ мм (рисунок 4.36, в) максимальные по модулю напряжения сжатия достигают 1410 МПа, то есть, по сравнению с их величиной в случае использования пуансона с $l_{к.п.}=0,3$ мм, произошло увеличение на 11%.

Таким образом видно, что увеличение длины калибрующего пояска пуансона приводит к увеличению силы деформирования и давления на пуансоне. Если сравнить полученные значения напряжений с допусковым (на уровне 1500 МПа), то при использовании данных пуансонов напряжения оказались ниже допусковых, дальнейшее увеличение длины калибрующего пояска может привести к величине напряжений, выходящих за пределы допусковых. Оценивая значения силы штамповки и осевого напряжения, более предпочтительным оказывается вариант пуансона с $l_{к.п.}=0,3$ мм.

Также принято решение провести сравнительный анализ усилия в процессе обратного выдавливания пуансоном без калибрующего пояска и при его наличии. В качестве эксперимента выбран пуансон с коническим торцом (угол конусности 2°) без калибрующего пояска и пуансон с аналогичным коническим торцом с калибрующим пояском длиной $l_{к.п.}=0,6$ мм. Получены решения при перемещении пуансона по оси z 1 мм и 1,2 мм. На рисунке 4.37 показано распределение силы и давления на пуансоне штамповки для вышеуказанных вариантов деформации методом обратного выдавливания.

Здесь видно, что сила штамповки при деформации пуансоном без калибрующего пояска при перемещении пуансона по оси z 1 мм (рисунок 4.37, д) непрерывно растет, что можно объяснить постоянным увеличением поверхности трения, и достигает значения 1370 кН. При деформации пуансоном с калибрующим пояском при его перемещении по оси z 1 мм сила достигла значения 920 кН (рисунок 4.37, е), что на 33% меньше силы в варианте обратного выдавливания пуансоном без калибрующего пояска.

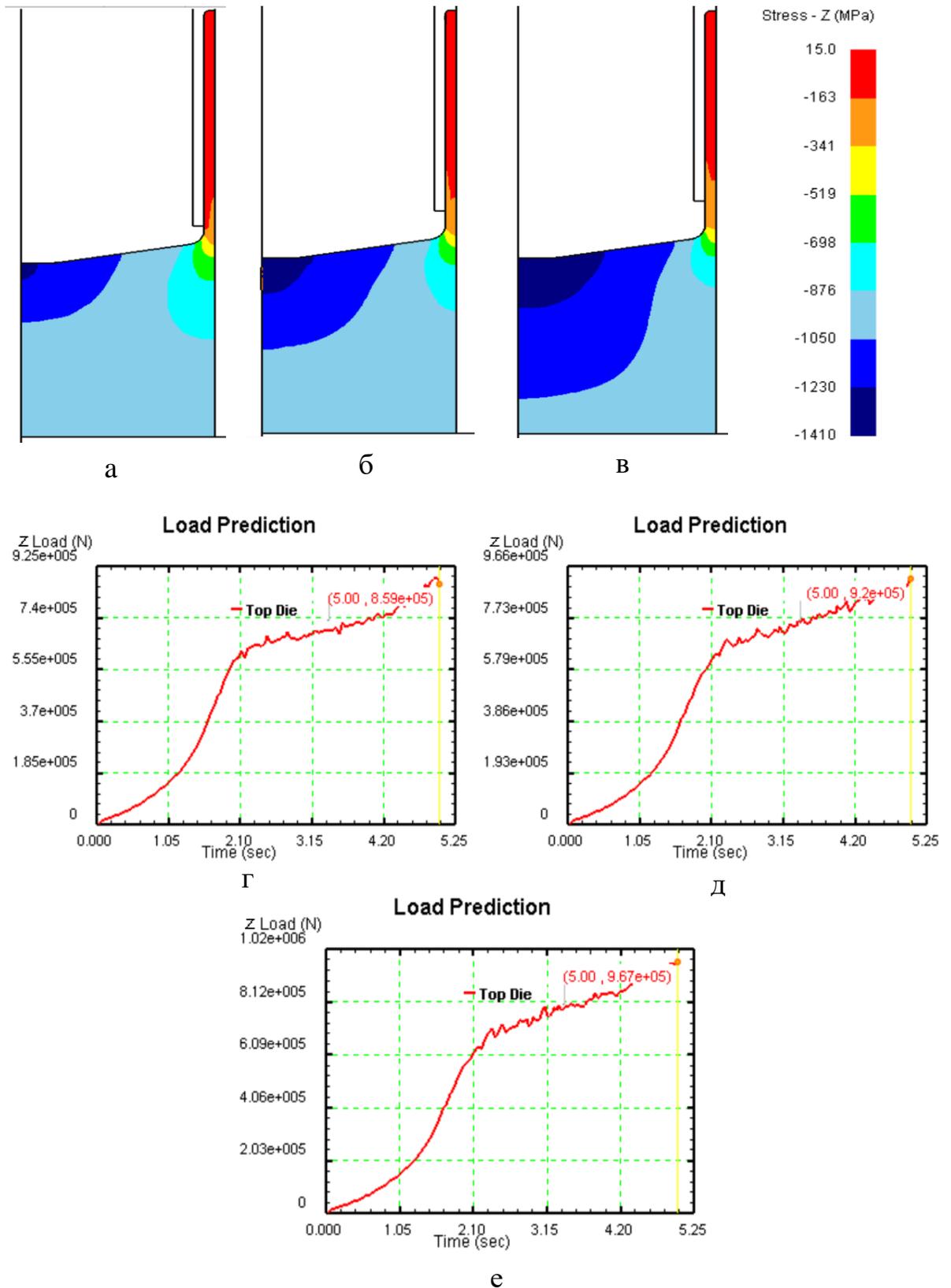


Рисунок 4.36 – Графики изменения усилия деформации в функции времени при использовании пуансона с калибрующим пояском длиной $l_{к.п.} = 0,3$ мм (г), $l_{к.п.} = 0,6$ мм (д), $l_{к.п.} = 0,9$ мм (е) и распределение осевых напряжений в той же последовательности вариантов (а, б, в)

Сила штамповки при деформации пуансоном без калибрующего пояска при перемещении пуансона по оси z 1,2 мм (рисунок 4.37, ж) также непрерывно растет, как и при деформации пуансоном без калибрующего пояска при перемещении его по оси z 1 мм, и достигает значения 1650 кН. Таким образом, можно сказать, что при увеличении пути перемещения пуансона без калибрующего пояска на 20% сила деформации увеличивается на 20%. При деформации пуансоном с калибрующим пояском мм при перемещении пуансона по оси z 1,2 мм сила достигла значения 1000 кН (рисунок 4.37, з), что на 40% меньше силы в варианте обратного выдавливания пуансоном без калибрующего пояска при перемещении пуансона по оси z 1,2 мм. Здесь можно сказать, что при увеличении пути перемещения пуансона с калибрующим пояском на 20% сила деформации увеличивается на 8%.

Из графиков видно, что при деформации пуансоном с калибрующим пояском усилие, после выхода металла из очага деформации, возрастает менее резко в сравнении с вариантом применения пуансона без калибрующего пояска, а значит величина давления на пуансоне при деформации пуансоном с калибрующим пояском дольше не превысит значение допустимого напряжения, что обеспечит работу такого инструмента без разрушения, и, таким образом, появится возможность получить стакан с большей высотой стенки. Стоит отметить, что в рассматриваемом экспериментальном случае при применении пуансона без калибрующего пояска давление на пуансоне превышает назначенное допустимое напряжение на уровне 1500 МПа и составляет по модулю 1700 МПа (рисунок 4.37, а) и 2000 МПа (рисунок 4.37, в) в зависимости от пройденного пуансоном пути. Давление на пуансоне в случае применения пуансона с калибрующим пояском имеет значение по модулю 1350 МПа (рисунок 4.37, б) и 1450 МПа (рисунок 4.37, г) в зависимости от пройденного пуансоном пути.

Таким образом, калибрующий поясок позволил оптимизировать силовой режим процесса обратного выдавливания, а именно повысить стойкость деформирующего инструмента и надёжность работы пуансона.

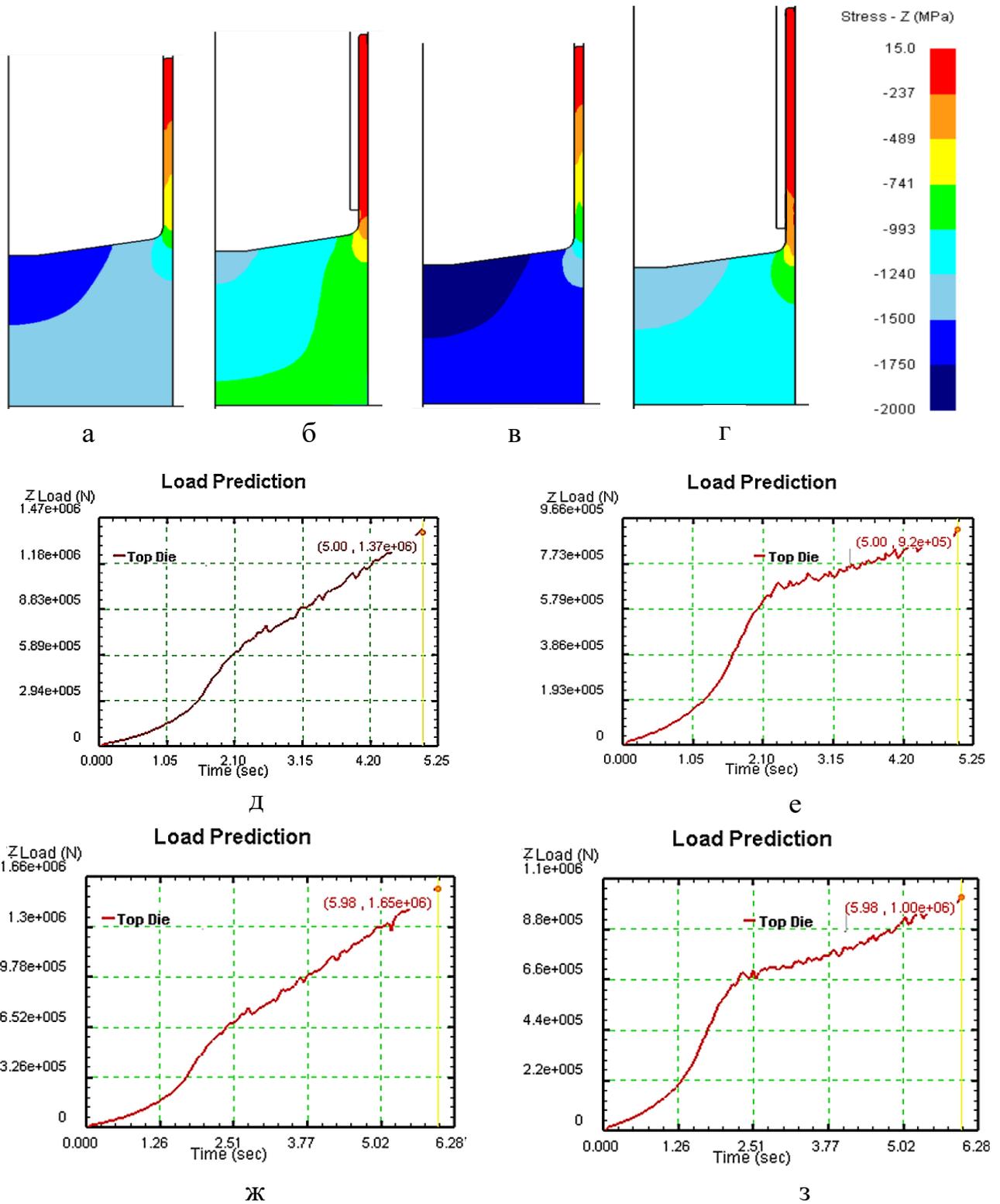


Рисунок 4.37 – Графики изменения усилия деформации в функции времени при использовании пуансона без калибрующего пояска при его перемещении по оси z 1 мм (д), пуансона с калибрующим пояском при его перемещении по оси z 1 мм (е), пуансона без калибрующего пояска при его перемещении по оси z 1,2 мм (ж), пуансона с калибрующим пояском при его перемещении по оси z 1,2 мм (з) и распределение осевых напряжений в той же последовательности вариантов (а, б, в, г)

Пятый фактор – показатель трения (ψ). Как эксперимент, в процессе деформации пуансоном с коническим торцом (угол конусности пуансона 2°) назначен показатель трения 0,1, 0,2 и 0,3. На рисунке 4.38 представлено распределение силы штамповки и осевого напряжения для вариантов обратного выдавливания с вышеуказанными показателями трения.

Здесь видно, что сила штамповки при $\psi = 0,1$ достигает значения 930 кН (рисунок 4.38, г), при $\psi = 0,2$ (рисунок 4.38, д) – 1370 кН, что на 47,3% больше силы при $\psi = 0,1$, при $\psi = 0,3$ (рисунок 4.38, е) – 1730 кН, то есть на 86% больше силы при $\psi = 0,1$.

При $\psi = 0,1$ максимальные по модулю напряжения сжатия достигают величины 1180 МПа (рисунок 4.38, а), при $\psi = 0,2$ (рисунок 4.38, б) максимальные по модулю напряжения сжатия – 1700 МПа, т. е. повышены на 44%. При $\psi = 0,3$ (рисунок 4.38, в) максимальные по модулю напряжения сжатия достигают 2200 МПа, то есть, по сравнению с их величиной при $\psi = 0,1$, произошло увеличение на 86,4%.

Таким образом видно, что увеличение показателя трения приводит к значительному увеличению силы штамповки и давления на пуансоне. Если сравнить полученные значения напряжений с допуском (на уровне 1500 МПа), то при показателе трения 0,2 и 0,3 напряжения оказались ниже допусковых, а при $\psi = 0,1$ – выше. Поэтому, оценивая значения силы деформирования и осевого напряжения, более предпочтительным оказывается вариант деформации при $\psi = 0,1$. Следует отметить, что уменьшение показателя трения достигается улучшением шероховатости поверхности инструмента и присутствием разделительных слоев смазки.

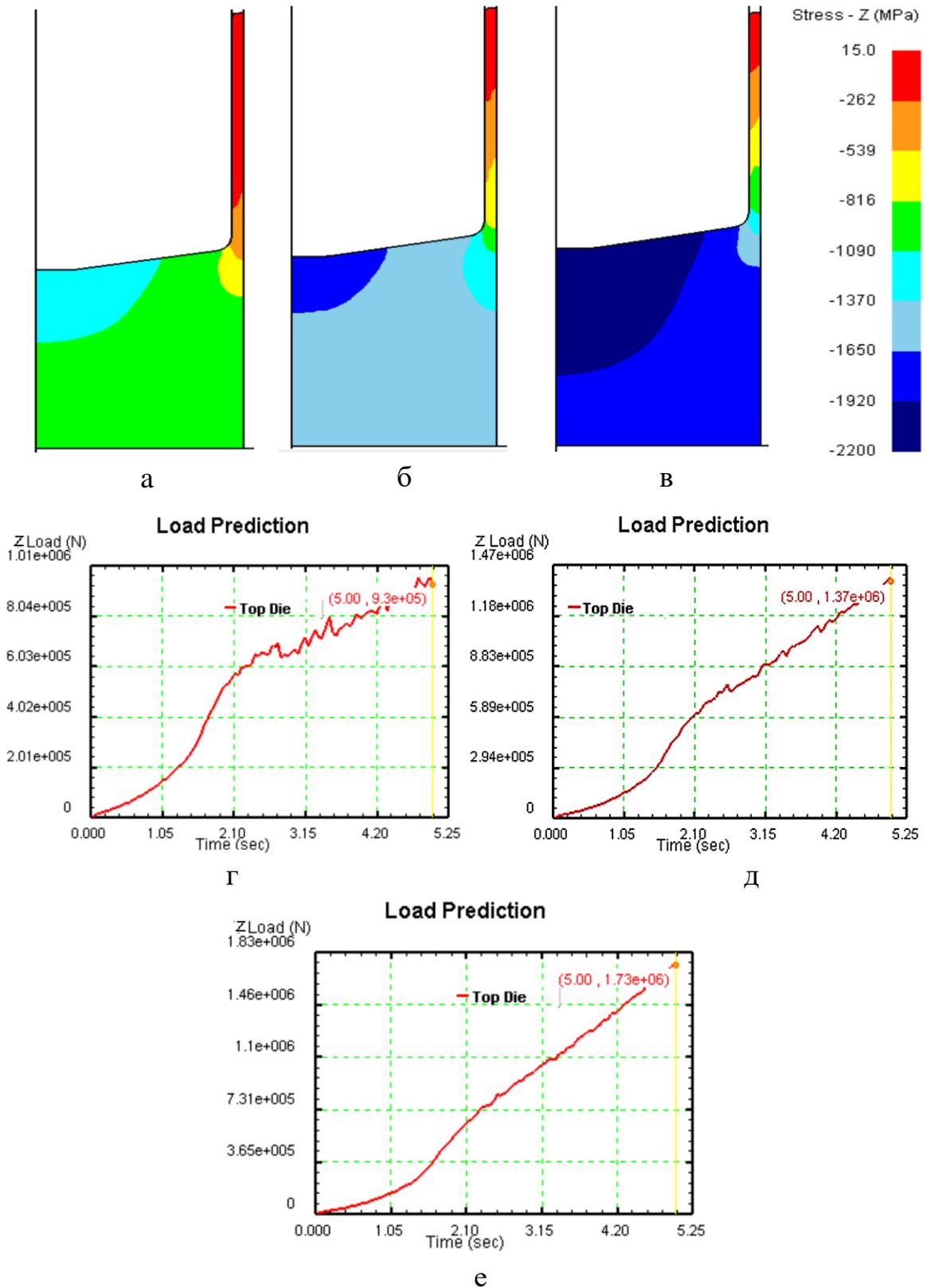


Рисунок 4.38 – Графики изменения усилия деформации в функции времени при показателе трения 0,1 (г), 0,2 (д), 0,3 (е) и распределение осевых напряжений в той же последовательности вариантов (а, б, в)

4.3.6 Обратное выдавливание с применением противодействия

С увеличением толщины стенки стакана напряжения выдавливания уменьшаются и в некоторых случаях напряжений сжатия недостаточно, чтобы создать достаточно мягкую схему напряженного состояния, поэтому необходимо приложить напряжения противодействия, которые дополнительно повысят уровень напряжений сжатия. Достигается это различными средствами. Один из вариантов – применение втулки 5 (рисунок 4.39), заполняющей зазор между боковой поверхностью пуансона и стенкой контейнера.

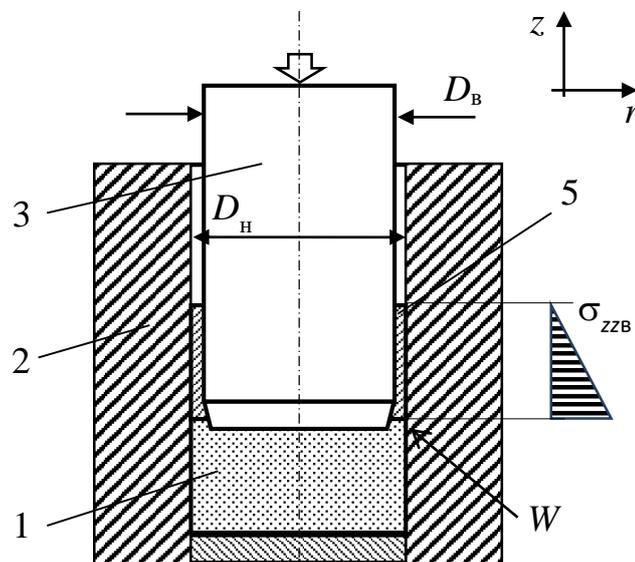


Рисунок 4.39 – Схема обратного выдавливания с противодействием: 1 – цилиндрическая заготовка; 2 – контейнер; 3 – пуансон; 4 – шайба; 5 – деформируемая втулка; W – зона дорнования; σ_{zzB} – эпюра осевых напряжений

Для максимально плотного прилегания втулки к контактными поверхностям заполнение зазора осуществляется в режиме дорнования, то есть расширения втулки инструментом, эта зона обозначена символом W . Поэтому трение на контактных поверхностях может быть трактовано, не с позиции описания машинного трения, а с позиции описания трения в процессах пластической деформации, включая применение закона Зибеля.

Эпюра осевых напряжений, действующих в материале втулки (рисунок 4.39), подчиняется граничным условиям: на верхнем торце напряжение $\sigma_{zzB} = 0$, поскольку это свободная поверхность. На нижней поверхности осуществляется

контакт с заготовкой, в этом месте создается противодействие $\sigma_{zz\Pi} = \sigma_{zzB}$. В простейшем случае эпюра σ_{zzB} представляет собой прямую линию.

Касательные напряжения τ , действующие на поверхностях скольжения втулки, можно описать с применением закона Зибеля:

$$\tau = \psi \tau_s = \psi \sigma_s / \sqrt{3}, \quad (4.20)$$

где ψ – показатель трения; σ_s и τ_s – сопротивление деформации при одноосном нагружении и на сдвиг, соответственно.

Втулка имеет внутренний D_B и наружный D_H диаметры. Суммарная площадь контактной поверхности для втулки равна:

$$S = \pi L_B (D_H + D_B). \quad (4.21)$$

Сила трения, создаваемая на этой поверхности, равна:

$$F = \tau S = \pi L_B (D_H + D_B) \tau. \quad (4.22)$$

Эта сила создает напряжение противодействия в поперечном сечении кольцевого канала, образованного стенкой контейнера и боковой поверхностью пуансона, с учетом (4.21) и (4.23), получим:

$$\sigma_{zz\Pi} = \frac{4F}{\pi D_H^2 - \pi D_B^2} = \frac{4\pi L_B F (D_H + D_B) \tau}{\pi D_H^2 - \pi D_B^2} = \frac{4\pi L_B (D_H + D_B) \tau}{\pi (D_H + D_B) (D_H - D_B)} = \frac{4L_B}{(D_H - D_B)} \psi \sigma_s / \sqrt{3}. \quad (4.23)$$

Удобнее ввести понятие среднего диаметра $D = (D_H + D_B)/2$ и оперировать безразмерными параметрами: понятием относительной толщины стенки как отношению абсолютной толщины δ к длине L_B :

$$\sigma_{zz\Pi} = 2 \frac{L_B}{\delta} \psi \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}. \quad (4.24)$$

Расчет по последней формуле позволил построить график на рисунке 4.40 функции $\sigma_{zz\Pi} = f\left(\frac{L_B}{\delta}, \psi\right)$ при $\sigma_s = 200$ МПа. Из последнего уравнения и графика видно, что противодействие может быть увеличено с помощью следующих приемов:

- уменьшение относительной толщины стенки $\frac{\delta}{L_B}$, причем это может быть достигнуто двумя путями – увеличением длины втулки и уменьшением толщины стенки;

- повышение показателя трения ψ , что достигается регулированием шероховатости поверхности и присутствием или отсутствием разделительных слоев смазки;
- увеличение сопротивления деформации материала втулки σ_s , что регулируется применением материалов с более высокими прочностными свойствами, либо применением предварительной нагартовки этих материалов.

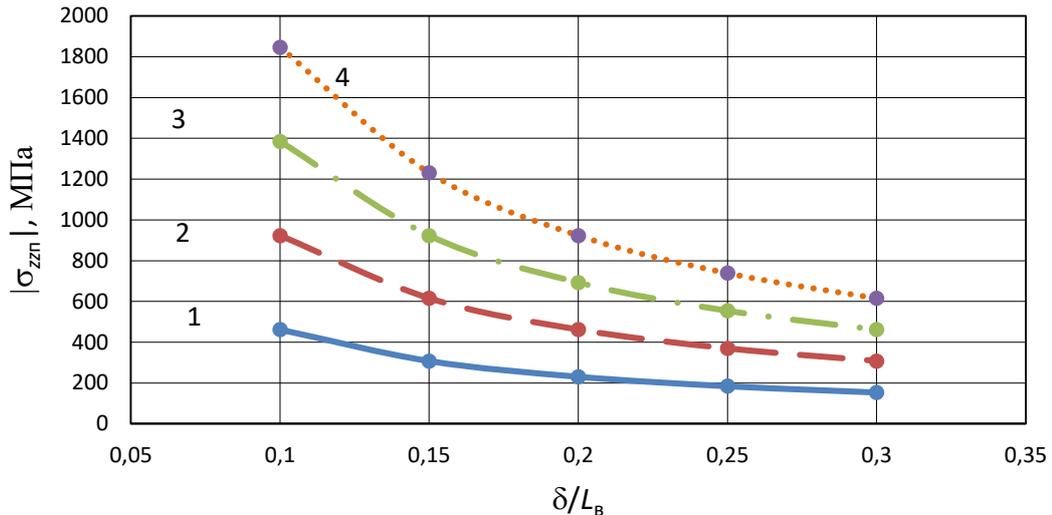


Рисунок 4.40 – График функции $|\sigma_{zzп}| = f\left(\frac{L_B}{\delta}, \psi\right)$ при $\sigma_s = 200$ МПа и $\psi = 0,2$ (1); 0,4 (2); 0,6 (3); 0,8 (4)

В связи с непрерывным расширением областей применения магния как конструкционного материала, стоит задача разработки процессов его холодной деформации, позволяющих реализовать схемы напряженного состояния сжатия для повышения пластичности, особенно при использовании литого металла. Поэтому последующие расчеты были сделаны применительно к деформации цилиндра из магния с использованием втулки из меди.

Для решения задачи применен программный комплекс DEFORM-2D.

Магниевый образец представлен в виде цилиндра диаметром $d_0 = 30$ мм и высотой $h_0 = 12$ мм. Диаметр пуансона 22 мм. Скорость перемещения пуансона 1 мм/с. Радиус закругления кромки пуансона 8 мм при угле конусности 10° .

Первый вариант постановки задачи создан для условия отсутствия противодействия (без применения втулки). Во втором варианте сборку дополнили

деформируемой втулкой из меди наружным диаметром 30 мм, толщиной стенки 4,3 мм и длиной 15,0 мм. Показатель трения по Зибелю в процессе равен 0,4. При дорновании стенка втулки утоняется до толщины 4,0 мм (относительное обжатие 7%, логарифмическая деформация составляет 0,07). Полученное от дорнования упрочнение меди учтено в расчетах. При этом втулка удлиняется до 16 мм. Относительная толщина втулки после дорнования составляет $\frac{\delta}{L_B} = 0,27$.

Для оценки разницы в распределении осевых напряжений получены рисунки с цветными уровнями (рисунок 4.41). Здесь видно, что при отсутствии втулки максимальные по модулю напряжения сжатия достигаются непосредственно под пуансоном и они достигают величины -700 МПа (рисунок 4.41, а). На верхней кромке выдавливаемой оболочки напряжения равны нулю. В тех же условиях при применении втулки (рисунок 4.41, б) в месте ее стыка *M* с магниевой заготовкой осевые напряжения сжатия присутствуют и равны -394 МПа. Максимальные в очаге деформации по модулю напряжения сжатия (они действуют под пуансоном) повышены с 700 МПа до 1300 МПа, т. е. на 86%.

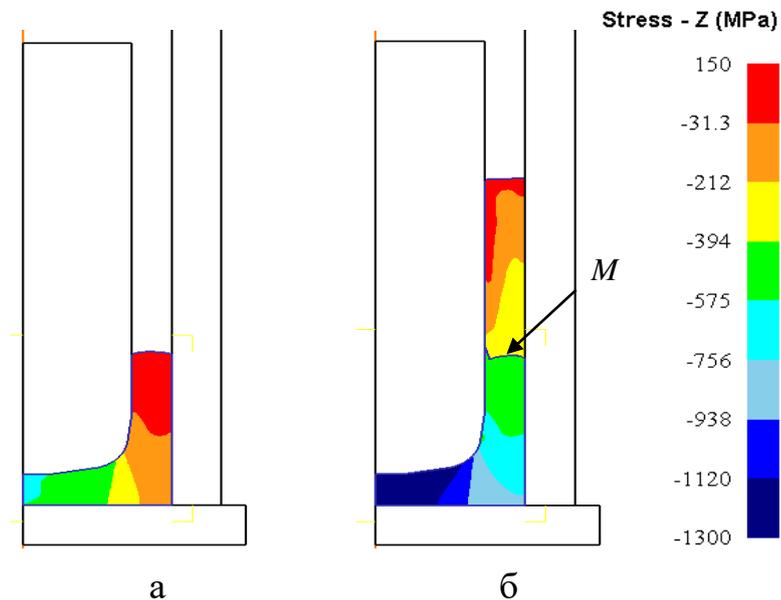


Рисунок 4.41 – Распределение осевого напряжения σ_{zz} (половина очага деформации) при деформации без втулки (а) и со втулкой (б); *M* – место стыка заготовки и втулки

Полученный результат можно сравнить с величиной противодействия, рассчитанной по формуле (4.24), здесь 342 МПа, относительное отклонение составляет 13 %, что допустимо.

На рисунке 4.42 приведено распределение степени деформации в приведенной выше постановке при двух вариантах назначения показателя трения: 0,2 и 0,4.

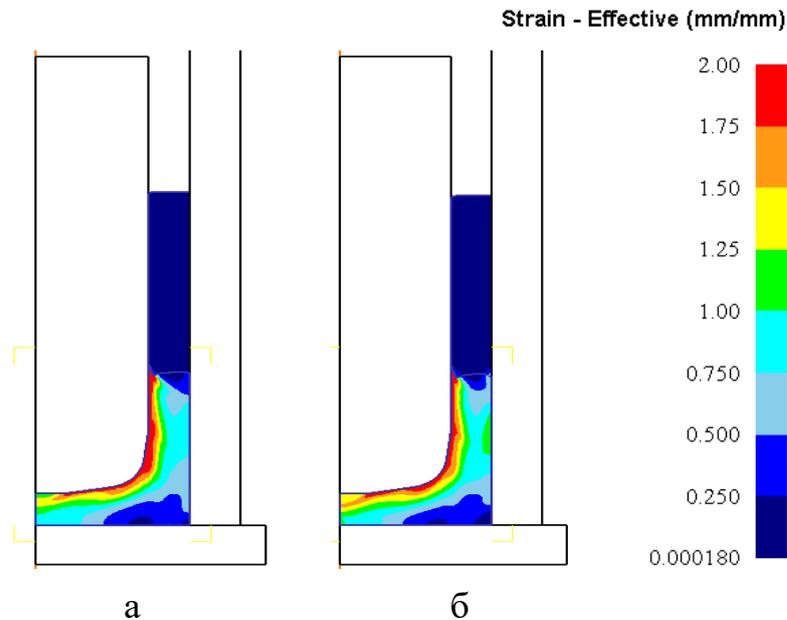


Рисунок 4.42 – Распределение степени деформации при двух вариантах назначения показателя трения: 0,2 (а) и 0,4 (б)

При показателе трения 0,2 (рисунок 4.42, а) металл заготовки получает степень деформации, равную 1,75...2,00 на внутренней поверхности и на уровне 0,75...1,00 на внешней поверхности оболочки. Среднее значение степени деформации здесь равно 1,5; что соответствует относительному обжатию 95%. Выявлена застойная зона металла в месте смыкания стенки контейнера с шайбой.

При переходе к показателю трения 0,4 (рисунок 4.42, б) изменяется профиль границы между деформируемой втулкой и стенками инструмента. Здесь степень деформации не превышает величину 0,25.

Предварительные эксперименты с определением качества получаемого после деформации металла показали, что стенка магниевой оболочки не подвергается растрескиванию. Кроме того, металл оказывается настолько пластифицирован, что

если оболочку разрезать, разогнуть и подвергнуть листовой прокатке, то удастся продолжить процесс пластической деформации [170] с накоплением относительного обжатия и выше достигнутых в этой схеме 95 %.

Результаты этой части исследования опубликованы в источниках [171-173].

4.4 Выводы по главе

В данной главе выполнено исследование приемов производства деталей из магния с гарантируемыми сроками биологического и химического разложения посредством компьютерного моделирования:

1. по результатам моделирования в DEFORM выполнены расчеты деформированного состояния шара, как элемента запорной самоуничтожающейся арматуры в нефтяных и газовых скважинах. Они показали, что в начальном состоянии эксплуатации при рабочем давлении шар может оказаться пластически деформирован в седле клапана, но при этом сохранять работоспособность. При уменьшении диаметра шара за счет его растворения повышается уровень пластической деформации в области его контакта с седлом клапана. При достижении критического размера происходит продавливание шара и открытие скважины.

2. по результатам моделирования выявлены опасные зоны шара с позиции разрушения – периферийные зоны, где возможно появление трещин из-за повышенных и локализованных пластических деформаций и центральная зона, где возможно появление растягивающих средних нормальных напряжений.

3. для оценки объемных деформаций, возникающих при пластическом сжатии шара гидростатическим давлением, применено поле кинематически возможных скоростей в сферической системе координат. После операций частного дифференцирования и упрощения формул получено выражение для расчета степени деформации объема.

4. рассмотрено напряженное состояние шара из пористого материала, подвергнутого гидростатическому сжатию. Выявлено, что в такой схеме напряженного состояния эквивалентные напряжения равны нулю.

Деформированное состояние описывается линейной зависимостью перемещений от радиальной координаты. С помощью программного комплекса ABAQUS выполнено моделирование процесса уплотнения шара из магния, обладающего относительной начальной пористостью 10%. Поле объемных деформаций и относительной плотности однородно и не зависит от координат.

5. разработан способ изготовления шарового элемента клапана для буровых скважин, включающий изготовление оболочки из деградируемого материала, например, магния или магниевое сплава, и заполнение оболочки недеградируемым материалом, например, сталью. При применении этого способа становится возможным максимальное утяжеление шарового элемента клапана, так как полость сферы заполнена компактной средой. Дополнительным преимуществом предлагаемого способа является наличие напряжений подпора со стороны шара из недеградируемого материала при пластическом формоизменении и создании оболочки из деградируемого материала. Наличие дополнительных напряжений сжатия положительно сказывается на повышении пластичности материала оболочки. По отношению к шарам, целиком изготовленным из деградируемого материала, достигается снижение стоимости, поскольку цветной металл в середине шара заменяется на черный металл, стоящий намного дешевле.

6. математическое описание формоизменения магния в процессе обратного выдавливания стакана из сплошной заготовки показало, что определяющими параметрами для успешного осуществления процесса являются: уровень напряжений, возникающих в инструменте, уровень пластических деформаций в обрабатываемом металле, разогрев металла за счет энергии деформации, форма переднего торца пуансона. Оценка опасности разрушения показала, что непосредственно в очаге деформации под пуансоном поддерживается высокий уровень сжимающих напряжений, и опасность разрушения здесь не велика. Опасная зона лежит в области перехода зоны деформации к зоне свободной поверхности. Расчеты показали, что снижения рабочих напряжений можно достичь, применяя пуансоны со сферическим торцом, а также применяя калибрующие пояски, выполненные на торце пуансона. Однако при этом выявлена

опасность потери устойчивости стенки на выходе из очага деформации в виде гофрообразования. Установлено, что для предотвращения этого явления нельзя использовать калибрующие пояски слишком малой длины.

7. применение схемы обратного выдавливания с противодавлением позволяет повысить величину напряжений сжатия, что должно способствовать повышению пластических свойств металла. Противодавление можно создать применением втулки, перекрывающей зазор между боковой поверхностью пуансона и стенкой контейнера. Величина противодействия зависит от относительной толщины вспомогательной втулки, прочностных свойств материала втулки и показателя трения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги исследования заключаются в следующем.

1. Выявлено влияние параметра s_0/D_0 на величину показателя напряженного состояния в процессе осадки магниевой цилиндрической заготовки в оболочках различного вида из пластичного материала. Посредством увеличения параметра s_0/D_0 показатель σ/T может быть увеличен до величин, обеспечивающих осадку без разрушения заготовки.

2. Разработаны композиционные заготовки, с помощью которых в процессе осадки возможно получение образующей магниевого цилиндра, близкой к прямой линии, и как следствие, применение простого метода разделения заготовки на цилиндр и оболочку в виде приема выпрессовывания.

3. Расчетами напряженно-деформированного состояния показано, что осадка магния в оболочке при воздействии прессового инструмента только на торец заготовки приводит к повышению пластичности металла, вследствие повышения показателя напряженного состояния по модулю в 2...5 раз при сравнении его с показателем напряженного состояния при обычной осадке.

4. Моделированием процесса неравноканального углового прессования выявлена разница степени деформации в поперечном сечении полосы, она может достигать 24% в зависимости от места. Этот вывод подтвержден результатами измерения твердости полосы.

5. Разработано устройство для углового многоканального прессования, имеющее возможность получения заготовок равноосного сечения, в том числе круглого, квадратного и иных сечений.

6. По результатам моделирования выявлены опасные зоны шара, применяемого в качестве элемента запорной самоуничтожающейся арматуры в нефтяных и газовых скважинах, с позиции разрушения – периферийные зоны, где возможно появление трещин из-за повышенных и локализованных пластических деформаций и центральная зона, где возможно появление растягивающих средних нормальных напряжений.

7. Разработан способ изготовления шарового элемента клапана для буровых скважин, включающий изготовление оболочки из деградируемого материала (магния или магниевое сплава) и заполнение оболочки недеградируемым материалом (сталью).

8. Посредством моделирования процесса обратного выдавливания магниевое стакана установлено, что снижения рабочих напряжений можно достичь, применяя пуансоны со сферическим торцом, а также применяя калибрующие пояски, выполненные на торце пуансона. При применении пуансона с калибрующим пояском выявлена опасность потери устойчивости стенки на выходе из очага деформации в виде гофрообразования. Для предотвращения этого явления нельзя использовать калибрующие пояски слишком малой длины. Оценка опасности разрушения показала, что опасная зона лежит в области перехода зоны деформации к зоне свободной поверхности.

9. При анализе схемы обратного выдавливания с противодавлением, создаваемым втулкой, установлено, что величина противодавления зависит от относительной толщины втулки, прочностных свойств материала втулки и показателя трения.

10. Практическая ценность исследования подтверждается применением полученных результатов при выполнении научно-исследовательских работ в ИФМ УрО РАН.

По итогам исследования выработаны следующие рекомендации.

1. При необходимости получить схему формоизменения магния и его сплавов при пониженных температурах следует создать по возможности максимально высокий уровень напряжений сжатия, что приведет к повышению пластичности.

2. При прокатке с целью утонения полосы, полученной методом НРКУП, необходимо учитывать повышенную нагартовку верхней поверхности и кромок полосы.

3. В процессе обратного выдавливания стакана следует обратить внимание на параметры, снижающие напряжение на пуансоне и силу выдавливания, тем самым получая возможность изготовить стаканы большей высоты.

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в расширении области моделирования процессов формоизменения магния с наделением деформируемой среды свойствами анизотропии, перейти от условия текучести Мизеса и к более сложному решению задач с применением условия текучести Хилла. Это тем более важно, что кристаллическая решетка магния – гексагональная, с малым количеством плоскостей скольжения, что формирует предпочтительные направления развития деформации.

В работе упор сделан на описание уровня сжимающих напряжений в различных схемах деформации, в будущем предполагается проведение опытов, построение диаграммы пластичности, учитывая этот уровень, а также анизотропию самого магния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Локшин М.З. Актуальные проблемы производства и переработки магния / М.З. Локшин, Г.С. Макаров // Цветные металлы. – 2006. – №5. – С. 45–54.
2. Стегнова И.С. Магний: перспективы производства и применения / И.С. Стегнова // Технология легких сплавов. – 2008. – №2. – С. 55–68.
3. Рохлин Л.Л. Актуальные проблемы металловедения и применения магниевых сплавов / Л.Л. Рохлин // Цветные металлы. – 2006. – №5. – С. 62–66.
4. Musfirah A.H. Magnesium and aluminum alloys in automotive industry / A.H. Musfirah, A.G. Jaharah // Journal of Applied Sciences Research. – 2012. – Vol. 8, Iss. 10. – P. 4865–4875.
5. Alaneme K.K. Enhancing plastic deformability of Mg and its alloys — A review of traditional and nascent developments / K.K. Alaneme, E.A. Okotete // Journal of Magnesium and Alloys. – 2017. – Vol. 5(4). – P. 460–475.
6. Pollock T.M. Weight Loss with Magnesium Alloys / T.M. Pollock // Science. – 2010. – Vol. 328, Iss. 5981. – P. 986–987.
7. Abbott T.B. Magnesium: industrial and research developments over the last 15 years / T.B. Abbott // Corrosion. – 2015. – Vol. 71, Iss. 2. – P. 120–127.
8. Joost W.J. Towards magnesium alloys for high-volume automotive applications / W.J. Joost, P.E. Krajewski // Scripta Materialia. – 2017. – Vol. 128. – P. 107–112.
9. Witte F. The history of biodegradable magnesium implants: A review / F. Witte // Acta Biomaterialia. – 2010. – Vol. 6, Iss. 5. – P. 1680–1692.
10. Zhao D. Current status on clinical applications of magnesium-based orthopaedic implants: A review from clinical translational perspective / D. Zhao [et al.] // Biomaterials. – 2017. – Vol. 112. – P. 287–302.

11. Witte F. Degradable biomaterials based on magnesium corrosion / F. Witte [et al.] // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. – 2008. – Vol. 12, Iss. 5–6. – P. 63–72.
12. Hermawan H. Developments in metallic biodegradable stents / H. Hermawan, D. Dubé, D. Mantovani // *Acta Biomaterialia*. – 2010. – Vol. 6, Iss. 5. – P. 1693–1697.
13. Mani G. Coronary stents: A materials perspective / G. Mani [et al.] // *Biomaterials*. – 2007. – Vol. 28, Iss. 9. – P. 1689–1710.
14. Heublein B. Biocorrosion of magnesium alloys: A new principle in cardiovascular implant technology? / B. Heublein [et al.] // *Heart*. – 2003. – Vol. 89, Iss. 6. – P. 651–656.
15. Waksman R. Safety and efficacy of bioabsorbable magnesium alloy stents in porcine coronary arteries (Review) / R. Waksman [et al.] // *Catheterization and Cardiovascular Interventions*. – 2006. – Vol. 68, Issue 4. – P.607–617.
16. Zartner P. First successful implantation of a biodegradable metal stent into the left pulmonary artery of a preterm baby / P. Zartner [et al.] // *Catheterization and Cardiovascular Interventions*. – 2005. – Vol. 66, Iss. 4. – P. 590–594.
17. Haude M. Safety and performance of the drug-eluting absorbable metal scaffold (DREAMS) in patients with de-novo coronary lesions: 12 month results of the prospective, multicentre, first-in-man BIOSOLVE-I trial / M. Haude [et al.] // *The Lancet*. – 2013. – Vol. 381, Iss. 9869. – P. 836–844.
18. Wang J. Magnesium alloy based interference screw developed for ACL reconstruction attenuates peri-tunnel bone loss in rabbits / J. Wang [et al.] // *Biomaterials*. – 2018. – Vol. 157. – P. 86–97.
19. Song B. Biomechanical comparison of pure magnesium interference screw and polylactic acid polymer interference screw in anterior cruciate ligament reconstruction – A cadaveric experimental study / B. Song [et al.] // *Journal of Orthopaedic Translation*. – 2017. – Vol. 8. – P. 32–39.

20. Chen L. Treatment of trauma-induced femoral head necrosis with biodegradable pure Mg screw-fixed pedicle iliac bone flap / L. Chen [et al.] // *Journal of Orthopaedic Translation*. – 2019. – Vol. 17. – P. 133–137.
21. Zhang Y. A new type of degradable setting ball for fracturing packers / Y. Zhang [et al.] // *Well Testing*. – 2018. – Vol. 27, Iss. 2. – P. 53–58.
22. Zhang C. Effects of Fe concentration on microstructure and corrosion of Mg-6Al-1Zn-xFe alloys for fracturing balls applications / C. Zhang [et al.] // *Journal of Materials Science and Technology*. – 2019. – Vol. 35, Iss. 9. – P. 2086–2098.
23. Xiao D.H. Effects of alloying elements on microstructure and properties of magnesium alloys for tripling ball / D.H. Xiao [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. – 2015. – Vol. 46, Iss. 10. – P. 4793–4803.
24. Пат. 2542095 Великобритания, МПК E21B33/12; E21B33/128; E21B34/06; C22C23/02; C22C23/04. Subterranean formation operations using degradable wellbore isolation devices / M.L. Fripp; Z.W. Walton; заявитель и патентообладатель Halliburton Energy Services Inc. – № 20170000605; заявл. 13.08.2015 ; опубл. 08.03.2017.
25. Polmear I. Light alloys: metallurgy of the light metals / I. Polmear, D. StJohn, J.-F. Nie, M. Qian. – Butterworth-Heinemann, 2017. – 526 с.
26. Song B. Twinning characteristic and variant selection in compression of a pre-side-rolled Mg alloy sheet / B. Song [et al.] // *Materials Science and Engineering A*. – 2014. – Vol. 614. – P. 106–115.
27. Barnett M.R. Influence of grain size on the compressive deformation of wrought Mg–3Al–1Zn / M.R. Barnett [et al.] // *Acta Materialia*. – 2004. – Vol. 52. – P. 5093–5103.
28. Nugmanov D.R. Structure of magnesium alloy MA14 after multistep isothermal forging and subsequent isothermal rolling / D.R. Nugmanov, O.Sh. Sitdikov, M.V. Markushev // *The Physics of Metals and Metallography*. – 2015. – Vol. 116. – P. 993–1001.

29. Chen W.Z. Yield strength behavior for rolled magnesium alloy sheets with texture variation / W.Z.Chen [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2013. – Vol. 580. – P. 77–82.
30. Chapuis A. Temperature dependency of slip and twinning in plane strain compressed magnesium single crystals / A. Chapuis, J.H. Driver // *Acta Materialia*. – 2011. – Vol. 59, Iss. 5. – P. 1986–1994.
31. Cepeda-Jiménez C.M. Origin of the twinning to slip transition with grain size refinement, with decreasing strain rate and with increasing temperature in magnesium / C.M. Cepeda-Jiménez, J.M. Molina-Aldareguia, M.T. Pérez-Prado // *Acta Materialia*. – 2015. – Vol. 88. – P. 232–244.
32. Esmaily M. Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion / M. Esmaily [et al.] // *Progress in Materials Science*. – 2017. – Vol. 89. – P. 92–193.
33. Каменецкий Б.И. Влияние условий бокового подпора на пластичность магния при холодной осадке / Б.И. Каменецкий, Ю.Н. Логинов, Н.А. Кругликов // *Технология легких сплавов*. – 2012. – № 1. – С. 86–92.
34. Каменецкий Б.И. Методы и устройства для повышения пластичности хрупких материалов при холодной осадке с боковым подпором / Б.И. Каменецкий, Ю.Н. Логинов, А.Ю. Волков // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2013. – № 9. – С. 15–22.
35. Qiao X.G. Hardening mechanism of commercially pure Mg processed by high pressure torsion at room temperature / X.G. Qiao [et al.] // *Materials Science and Engineering A*. – 2014. – Vol. 619. – P. 95–106.
36. Volkov A.Yu. Improving the mechanical properties of pure magnesium through cold hydrostatic extrusion and low-temperature annealing / A.Yu. Volkov, I.V. Kliukin // *Materials Science and Engineering A*. – 2015. – Vol. 624. – P. 56–60.
37. Chang L.L. Microstructure and mechanical properties in an AZ31 magnesium alloy sheet fabricated by asymmetric hot extrusion / L.L. Chang, Y.N.

Wang, X. Zhao, J.C. Huang // *Materials Science and Engineering: A.* – 2008. – Vol. 496, Iss. 1–2. – P. 512–516.

38. Pan F. An effective approach called the composite extrusion to improve the mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets / F. Pan, Q. Wang, B. Jiang, J. He, Y. Chai, J. Xu // *Materials Science and Engineering: A.* – 2016. – Vol. 655. – P. 339–345.

39. Kim W.Y. Fabrication of ultrafine-grained Mg–3Al–1Zn magnesium alloy sheets using a continuous high-ratio differential speed rolling technique / W.Y.Kim, W.J.Kim // *Materials Science and Engineering: A.* – 2014. – Vol. 594. – P. 189–192.

40. Biswas S. Evolution of sub-micron grain size and weak texture in magnesium alloy Mg–3Al–0.4Mn by a modified multi-axial forging process / S. Biswas, S. Suwas // *Scripta Materialia.* – 2012. – Vol. 66, Iss. 2. – P. 89–92.

41. Somekawa H. Great room temperature stretch formability of fine-grained Mg-Mn alloy / H. Somekawa, A. Kinoshita, A. Kato // *Materials Science and Engineering: A.* – 2017. – Vol. 697. – P. 217–223.

42. Somekawa H. Room temperature grain boundary sliding behavior of fine-grained Mg-Mn alloys / H. Somekawa, D.A. Basha, A. Singh // *Materials Science and Engineering: A.* – 2018. – Vol. 730. – P. 355–362.

43. Figueiredo R.B. Evidence for exceptional low temperature ductility in polycrystalline magnesium processed by severe plastic deformation / R.B. Figueiredo [et al.] // *Acta Materialia.* – 2017. – Vol. 122. – P. 322–331.

44. Torbati-Sarraf S.A. Properties of a ZK60 magnesium alloy processed by high-pressure torsion / S.A. Torbati-Sarraf, T.G. Langdon // *Journal of Alloys and Compounds.* – 2014. – Vol. 613. – P. 357–363.

45. Zeng Z. Deformation modes during room temperature tension of fine-grained pure magnesium / Z. Zeng [et al.] // *Acta Materialia.* – 2021. – Vol. 206. – P. 116648.

46. Wang X. Revealing the deformation mechanisms for room-temperature compressive superplasticity in nanocrystalline magnesium / X. Wang // *Materialia*. – 2020. – Vol. 11. – P. 100731.

47. Galiyev A. Superplasticity in a magnesium alloy subjected to isothermal rolling / A. Galiyev, R. Kaibyshev // *Scripta Materialia*. – 2004. – Vol. 51, Iss. 2. – P. 89–93.

48. Chen W.Z. Influence of large cold strain on the microstructural evolution for a magnesium alloy subjected to multi-pass cold drawing / W.Z. Chen [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – Vol. 623. – P. 92–96.

49. Chen X.M. Fine-grained structure and recrystallization at ambient temperature for pure magnesium subjected to large cold plastic deformation / X.M. Chen [et al.] // *Materials Science and Engineering: A*. – 2017. – Vol. 708. – P. 351–359.

50. Raab G. The innovation potential of ECAP techniques of severe plastic deformation / G. Raab // 6th International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation (NanoSPD6) (Metz, 30 June – 4 July 2014) / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Metz, 2014. – P. 012009.

51. Пат. 2475320 Российская Федерация, МПК В21С 25/02, В21J 13/02. Устройство для одновременного равноканального углового прессования четырех заготовок / А.М. Иванов; заявитель и патентообладатель Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН. – № 2011106083/02; заявл. 17.02.2011 ; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5.

52. Пат. 2003019532 Япония, МПК В21С23/00; В21J1/02; С22F1/00; В21С23/00; В21J1/02; С22F1/00. Method and device for manufacturing metallic material of micro-structure / О. Akira, М. Masakazu; заявитель и патентообладатель Mitsubishi Heavy Ind Ltd. – № 20010201154; 02.07.2001 ; опубл. 21.01.2003.

53. Пат. 2563077, МПК С22F 1/06 В21В 1/40. Способ изготовления фольги из магния / Б.И. Каменецкий, А.Л. Соколов, А.Ю. Волков, О.В. Антонова, И.В. Клюкин; заявитель и патентообладатель Институт физики

металлов им. М.Н.Михеева УрО РАН. – № 2014131410/02; 29.07.2014 ; опубл. 2015.09.20, Бюл. № 26.

54. Fatemi-Varzaneh S.M. Accumulative back extrusion (ABE) processing as a novel bulk deformation method / S.M. Fatemi-Varzaneh, A. Zarei-Hanzaki // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009. – Vol. 504. – 104–106.

55. Tan J.C. Dynamic continuous recrystallization characteristics in two stage deformation of Mg–3Al–1Zn alloy sheet / J.C.Tan, M.J.Tan // *Materials Science and Engineering: A*. – 2003. – Vol. 339, Iss. 1–2. – P. 124–132.

56. Al-Samman T. Dynamic recrystallization during high temperature deformation of magnesium / T. Al-Samman, G. Gottstein // *Materials Science and Engineering: A*. – 2008. – Vol. 490, Iss. 1–2. – P. 411–420.

57. Al-Samman T. Softening and dynamic recrystallization in magnesium single crystals during c-axis compression / T. Al-Samman [et al.] // *Acta Materialia*. – 2012. – Vol. 60, Iss. 2. – P. 537–545.

58. Galiyev A. Correlation of plastic deformation and dynamic recrystallization in magnesium alloy ZK60 / A. Galiyev, R. Kaibyshev, G. Gottstein // *Acta Materialia*. – 2001. – Vol. 49, Iss. 7. – P. 1199–1207.

59. Gautam P.S. On the possibility to reduce ECAP deformation temperature in magnesium: Deformation behaviour, dynamic recrystallization and mechanical properties / P.C. Gautam, S. Biswas // *Materials Science and Engineering: A*. – 2021. – Vol. 812. – P. 141103.

60. Пью, Х.Л. Механические свойства материалов под высоким давлением. Выпуск 2: Применение высоких давлений в технологических процессах / Х.Л. Пью. – Москва : Мир, 1973. – 374 с.

61. Береснев, Б.И. Пластичность и прочность твёрдых тел при высоких давлениях / Б.И. Береснев [и др.]. – Москва : Наука, 1970. – 160 с.

62. Береснев, Б.И. Процесс гидроэкструзии / Б.И. Береснев. – Москва : Наука, 1976. – 200 с.

63. Береснев, Б.И. Высокие давления в современных технологиях обработки материалов / Б.И. Береснев [и др.]. – Москва : Наука, 1988. – 245 с.

64. Могучий, Л.Н. Обработка давлением труднодеформируемых материалов / Л.Н. Могучий. Москва : Машиностроение, 1976. – 272 с.
65. Воронцов А.Л. Осадка малопластичных материалов в оболочках / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 7. – С. 1–11.
66. Каменецкий Б.И. Влияние условий бокового подпора на пластичность магния при холодной осадке / Б.И. Каменецкий, Ю.Н. Логинов, Н.А. Кругликов // Технология легких сплавов. – 2012. – № 1. – С. 86–92.
67. Воронцов А.Л. Осадка малопластичных материалов без обжатия оболочек / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 9. – С. 3–7.
68. Khanawapee U. A study of barreling and DEFORM 3D simulation in cold upsetting of bi-material / U. Khanawapee, S. Butdee // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 26, Part 2. – P. 1262–1270.
69. Каменецкий Б.И. Методы и устройства для повышения пластичности хрупких материалов при холодной осадке с боковым подпором / Б.И. Каменецкий, Ю.Н. Логинов, А.Ю. Волков // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – №9. – С. 15–22.
70. Воронцов А.Л. Осадка малопластичных материалов в поясах / А.Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2007. – № 8. – С. 3–8.
71. А.с. 1759512 СССР. МПК В21J/04. Способ осадки цилиндрических заготовок из малопластичных материалов / Ю.Н. Логинов (СССР). – № 4896490/27; заявл. 26.12.90 ; опубл. 07.09.92, Бюл. № 33.
72. А.с. 1007803 СССР. МПК В21J5/00. Способ осадки заготовок / Ю.Н. Логинов, Б.Е. Хайкин (СССР). – № 3242034/25-27; заявл. 02.02.81; опубл. 30.03.83, Бюл. № 12.
73. Каменецкий Б.И. Возможности нового метода повышения пластичности магния при холодной осадке / Б.И. Каменецкий, Ю.Н. Логинов,

Н.А. Кругликов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2017. – № 1. – С. 56–60.

74. Пат. 20090032151 США, МПК В21С1/00; В21С1/24; В21С29/04; В21С37/06; В21С5/00; В21С9/00; В21К21/02; С22С23/02; С22С23/04; С22F1/00; С22F1/06. Magnesium base alloy pipes and method of manufacturing the same / Y. Oishi, N. Kawabe, H. Takahashi, K. Wakamatsu; заявитель и патентообладатель SUMITOMO (SEI) STEEL WIRE CORP. № 24168508А; заявл. 30.09.2008; опубл. 05.02.2009.

75. Пат. 108262368 Япония, МПК В21С37/06; С22F1/02; С22F1/06. Preparation method of high-performance medical magnesium alloy thin-wall pipes / G. Chunlei, L. Yilin, L. Xiaohui, W. Shuncheng, Z. Kaihong, Z. Nan; заявитель и патентообладатель GUANGDONG INSTITUTE OF MATERIALS AND PROCESSING. № 201810089605А; заявл. 30.01.2018; опубл. 10.07.2018.

76. Furushima T. Deformation and Heat Transfer Analysis for High Speed Dieless Drawing of AZ31 Magnesium Alloy Tubes / T. Furushima, T. Ikeda, K. Manabe // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 418–420. – P. 1036–1039.

77. Wang L. Forming of magnesium alloy microtubes in the fabrication of biodegradable stents / L. Wang [et al.] // Progress in Natural Science: Materials International. – 2014. – Vol. 24, Iss. 5. – P. 500–506.

78. Li W. Microstructure and properties of biodegradable Mg–Zn–Y–Nd alloy micro-tubes prepared by an improved method / W. Li [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – Vol. 835. – P. 155369.

79. Fang G. Multipass cold drawing of magnesium alloy minitubes for biodegradable vascular stents / G. Fang [et al.] // Materials Science and Engineering C. – 2013. – Vol. 33, Iss. 6. – P. 3481–3488.

80. The processing of Mg alloy micro-tubes for biodegradable vascular stents / F. Liu [et al.] // Materials Science and Engineering: C. – 2015. – Vol. 48. – P. 400–407.

81. Physical and Numerical Modelling of Laser Dieless Drawing Process of Tubes from Magnesium Alloy / A. Milenin [et al.] // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 207. – P. 2352–2357.
82. Milenin A. Rheology-based approach of design the dieless drawing processes / A. Milenin // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. – 2018. – Vol. 18, Iss. 4. – P. 1309–1317.
83. Furushima T. Experimental and numerical study on deformation behavior in dieless drawing process of superplastic microtubes / T. Furushima, K. Manabe // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – Vol. 191, Iss. 1–3. – P. 59–63.
84. Du P. Microstructure and performance of biodegradable magnesium alloy tubes fabricated by local-heating-assisted dieless drawing / P. Du, S. Furusawa, T. Furushima // *Journal of Magnesium and Alloys*. – 2020. – Vol. 8, Iss. 3. – P. 614–623.
85. Chang L.L. Microstructure and mechanical properties in an AZ31 magnesium alloy sheet fabricated by asymmetric hot extrusion / L.L. Chang [et al.] // *Materials Science and Engineering A*. – 2008. – Vol. 496. – P. 512–516.
86. Pan F. An effective approach called the composite extrusion to improve the mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets / F. Pan [et al.] // *Materials Science and Engineering A*. – 2016. – Vol. 655. – 339–345.
87. Mukai T. Ductility enhancement in AZ31 magnesium alloy by controlling its grain structure / T. Mukai [et al.] // *Scripta Materialia*. – 2001. – Vol. 45. – P. 89–94.
88. Yang Q. Tailoring texture and refining grain of magnesium alloy by differential speed extrusion process / Q. Yang [et al.] // *Materials Science and Engineering A*. – 2014. – Vol. 612. – P. 187–191.
89. Yang Q. A tilted weak texture processed by an asymmetric extrusion for magnesium alloy sheets / Q. Yang [et al.] // *Materials Letters*. – 2013. – Vol. 100. – P. 29–31.

90. Biswas S. Room-temperature equal channel angular extrusion of pure magnesium / S. Biswas, S.S. Dhinwal, S. Suwas // *Acta Materialia*. – 2010. – Vol. 58, Iss. 9. – P. 3247–3261.
91. Naik G.M. Microstructural and Hardness evolution of AZ80 alloy after ECAP and post-ECAP processes / G.M. Naik, G.D. Gote, S. Narendranath // *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5, Iss. 9, Part 3. – P. 17763–17768.
92. Логинов Ю.Н. Угловое прессование текстурируемого магнитотвердого материала / Ю.Н. Логинов, С.П. Буркин, М.А. Уймин // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 2001. – № 3. – С. 40–42.
93. Raab G.I. New schemes of ECAP processes for producing nanostructured bulk metallic materials / G.I. Raab [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2007. – Vol. 907. – P. 641–646.
94. Zhilyaev A.P. Influence of ECAP processing parameters on texture and microstructure of commercially pure aluminum / A.P. Zhilyaev [et al.] // *Materials Science and Engineering A*. – 2006. – Vol. 441(1-2). – P. 245–252.
95. Martynenko N. Effect of equal channel angular pressing on structure, texture, mechanical and in-service properties of a biodegradable magnesium alloy / N. Martynenko [et al.] // *Materials Letters*. – 2019. – Vol. 238. – P. 218–221.
96. Jahadi R. ECAP effect on the micro-structure and mechanical properties of AM30 magnesium alloy / R. Jahadi, M. Sedighi, H. Jahed // *Materials Science and Engineering: A*. – 2014. – Vol. 593. – P. 178–184.
97. Логинов Ю.Н. Оценка неравномерности деформаций и давлений при угловом прессовании / Ю.Н. Логинов, С.П. Буркин // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2001. – № 3. – С. 29–34.
98. Каменецкий Б.И. Угловое прессование листовой заготовки магния из круглого слитка / Б.И. Каменецкий, Ю.Н. Логинов // *Цветные металлы*. – 2018. – № 9. – С. 77–81.

99. Логинов Ю.Н. Анализ схемы неравноканального углового выдавливания применительно к получению листового магния в холодном состоянии / Ю.Н. Логинов, А.Ю. Волков, Б.И. Каменецкий // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2019. – № 1. – С. 59–66.

100. Комкова Д.А. Температурная аномалия прочностных свойств в деформированной магниевой фольге / Д.А. Комкова, А.Ю. Волков // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2017. – №12 (750). – С. 11–17.

101. Suh B.C. Current issues in magnesium sheet alloys: Where do we go from here? / B.C. Suh [et al.] // Scripta Materialia. – 2014. – Vol. 84–85. – P. 1–6.

102. Пат. 20170281377 США, МПК А61F2/915; А61F2/88; А61F2/92; А61F2/958; А61L31/02; А61L31/14; А61L31/16. Methods for making magnesium biodegradable stents for medical implant applications. V.N. Shanov, P. Roychaudhury, M.J. Schulz, Z. Yin, B. Campos-naciff, Y. Wang; заявитель и патентообладатель University of Cincinnati. – № 15/496710; заявл. 25.04.2017; опубл. 05.10.2017.

103. Пат. 2440203 Российская Федерация, МПК В21С 25/00. Устройство для многоканального прессования / Ю.Н. Логинов; заявитель и патентообладатель Уральский государственный технический университет – УПИ. – № 2010112339/02; заявл. 30.03.2010; опубл. 20.01.2012, Бюл. № 2.

104. Пат. 2050208 Российская Федерация, МПК В21С 25/02. Матричный узел для многоканального прессования / В.Н. Данилин, С.Ф. Ворошилов, А.Г. Шиврин, В.Н. Щерба, И.Н. Потапов, В.П. Алешин, К.В. Рязанов; заявитель и патентообладатель Красноярское металлургическое производственное объединение, Московский институт стали и сплавов. – 4949783/08; заявл. 25.06.1991; опубл. 20.12.1995.

105. Fatemi-Varzaneha S.M. Characterization of ultrafine and nanograined magnesium alloy processed by severe plastic deformation / S.M. Fatemi-Varzaneha, A. Zarei-Hanzaki, H. Paul // Materials Characterization. – 2014. – Vol. 87. – P. 27–35.

106. Чудин В.Н. Осесимметричное обратное выдавливание при вязкопластичности / В.Н. Чудин, С.С. Яковлев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2014. – № 11. – С. 14–17.

107. Лавриненко В.Ю. Исследование процесса обратного выдавливания поковок типа "стакан" с уменьшенной разностенностью / В.Ю. Лавриненко, В.А. Говоров // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – № 9 (204). – С. 26–28.

108. Поксеваткин М.И. Моделирование процесса обратного выдавливания тонкостенных полых изделий с активизацией контактных скольжений металла / М.И. Поксеваткин [и др.] // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2017. – № 12. – С. 3–7.

109. Сосёнушкин Е.Н. Аналитические и физические модели технологии обратного выдавливания / Е.Н. Сосёнушкин, Е.А. Яновская, А.Е. Сосёнушкин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2019. – № 9. – С. 23–32.

110. Звонов С.Ю. Исследование особенностей изготовления осесимметричных конических деталей с заданной толщиной стенки / С.Ю. Звонов, И.П. Попов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15. – № 6-3. – С. 685–691.

111. Гурьева, И.И. Магниевые сплавы. Ч.2.: Технология производства и свойства отливок и деформированных полуфабрикатов / И.И. Гурьева, М.В. Чухрова. – Моства : Metallurgia, 1978. – 296 с.

112. Каменецкий Б.И. Метод создания и расчет противодействия в экспериментах по холодному обратному выдавливанию магния / Б.И. Каменецкий, Д.А. Комкова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2019. – Т.17. – №3. – С. 31–37.

113. Комкова Д.А. Перспективные технологии получения тонких магниевых изделий для биомедицинских применений / Д.А. Комкова [и др.] // VII Информационная школа молодого ученого (Екатеринбург, 23–27 сентября 2019 г.) / ООО "Издательство УМЦ УПИ". – Екатеринбург, 2019. – С. 469–476.

114. Bourkine, S.P. New industrial technology for producing mill balls in a continuous-casting deformation complex / S.P. Bourkine [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1999. – Vol. 92–93. – P. 316–322.

115. Пат. 105908037 Япония, МПК C22C1/02; C22C23/00; C22C23/04; C22F1/06. Magnesium alloy used for manufacturing soluble fracturing ball and preparing method of magnesium alloy / Y. Jun, G. Yan, Y. Junlu, F. Qiguo, J. Zhiming, H. Zhenhua; заявитель и патентообладатель Downhole Technology Operation Company Of Сnpc Chuanqing Drilling Engineering Company Ltd. – № 201610467486; заявл. 24.06.2016; опубл. 31.08.2016.

116. Капитонов И.М. Применение методов прокатки при производстве машиностроительных деталей / И.М. Капитонов // *Тяжелое машиностроение*. – 1977. – № 5. – С.28–31.

117. Буркин С.П. Энергосберегающая схема производства шаров совмещенным процессом литья-деформации / С.П. Буркин [и др.] // *Сталь*. – 2000. – № 9. – С. 35–39.

118. Буркин С.П. Высокопроизводительная технология изготовления магниевых заготовок под закрытую штамповку / С.П. Буркин [и др.] // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2001. – № 1. – С. 11–15.

119. Логинов Ю.Н. Исследование штамповки шаров из цилиндрических заготовок / Ю.Н. Логинов, С.П. Буркин, Н.Ю. Луканихин // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – 1998. – № 10. – С. 34–37.

120. Пат. 2167020 Российская Федерация, МПК B21K 1/02; B21H 1/14. Способ производства шаров / С.П. Буркин, Ю.Н. Логинов; заявитель и патентообладатель Уральский государственный технический университет. – № 99119246/02; заявл. 01.09.1999; опубл. 20.05.2001, Бюл. № 14.

121. Пат. 204371293 Япония, МПК E21B43/267. Self-dissolution fracturing ball for oil and gas well fracturing technology / X. Junjie, Z. Weigang, X.

Tianyu, X. Tianyue, Y. Shouquan, H. Chuanbing, L. Rongli. Заявитель X. Junjie. – № 201420813510U; заявл. 18.12.2014; опубл. 03.06.2015.

122. Пат. 208934677 Япония, МПК E21B43/26. Soluble pressure building ball / L. Duorong, L. Lin, P. Baofeng, Y. Bing, Y. Dongmei, W. Wenyao, T. Jia, L. Zhixin; заявитель и патентообладатель CHINA PETROLEUM & CHEM CORP; SINOPEC SOUTHWEST OIL & GAS CO. – № 201821641602U; заявл. 10.10.2018; опубл. 04.06.2019.

123. Ершов А.А. Изучение с помощью программы PAM-STAMP влияния состояния поставки материала на формуемость при штамповке / А.А. Ершов, Ю.Н. Логинов // *Металлург*. – 2014. – № 3. – С. 38–41.

124. Белов, М.И. Эффективность использования математического моделирования при исследовании, оптимизации и проектировании технологических процессов ОМД. Пластическая деформация сталей и сплавов / М.И. Белов. – Москва : Московский государственный институт стали и сплавов, 1996. – 245 с.

125. Рыбин, Ю.И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением / Ю.И. Рыбин, А.И. Рудской, А.М. Золотов. – Санкт-Петербург : Наука, 2004. – 642 с.

126. Фомичев А.Ф. Компьютерное исследование технологических параметров при штамповке / А.Ф. Фомичев, Э.Е. Юргенсон, С.Ю. Панин // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2010. – № 8. – С. 38–42.

127. Галкин В.В. Математическое моделирование процесса изготовления изделия типа «Стакан» методом глубокой горячей вытяжки на основе применения программного комплекса Deform / В.В. Галкин [и др.] // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – №1. – С. 371–374.

128. Kothari K. D. Investigation and parametric analysis of steel perforated sheet metal (PSM) for optimum forming process / K. D. Kothari, R.L. Jhala //

International Journal of Engineering Research in Africa. – 2016. – Vol. 21. – P. 118–123.

129. Design Environment for forming [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.DEFORM.com/>.

130. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер с англ. / Р. Галлагер. – Москва : Мир, 1984. – 428 с.

131. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике. Пер с англ. / О. Зенкевич. – Москва : Мир, 1975. – 318 с.

132. SIMULIA Abaqus. Решение прикладных задач [Электронный ресурс] / А.Д. Лавриненков, И.Д. Якимов, Е.В. Левадный, А.Б. Бойко, А.В. Остапов, Н.В. Зигинов // Москва: ТЕСИС, 2015. – 121 с. – Режим доступа: https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/abaqus/abaqus_apltask.pdf.

133. Замараева Ю.В. Определение пластических свойств магниевого сплава МА2-1 на основе закручивания цилиндрического образца / Ю.В. Замараева, Ю.Н. Логинов, М.В. Ерпалов // Международная конференция «Физика и технологии перспективных материалов-2021» (Уфа, 5-8 окт. 2021 г.) / Башкирский государственный университет. – Уфа, 2021. – С. 126.

134. Комкова Д.А. Структура и текстура магния после низкотемпературной мегапластической деформации / Д.А. Комкова, А.Ю. Волков // Вектор науки ТГУ. – 2017. – № 3(41). – С. 70–75.

135. Логинов Ю.Н. Численное моделирование влияния оболочки на процесс осадки цилиндрической заготовки / Ю.Н. Логинов, Ю.В. Замараева // Международная научно-практическая конференция "Современные инновации в области науки, технологий и интеграции знаний" (Рудный, 17–18 октября 2019 г.) / Рудненский индустриальный институт. – Рудный, 2019. – С. 374–381.

136. Замараева Ю.В. Влияние толщины оболочки на результаты осесимметричной осадки магния в холодном состоянии / Ю.В. Замараева, Ю.Н. Логинов // IV Международная молодежная научно-практическая конференция «Magnitogorsk rolling practice 2019» (Магнитогорск, 4–7 июня

2019 г.) / Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2019. – С. 62–64.

137. Замараева Ю.В. Численное моделирование осесимметричной осадки в оболочке магния в холодном состоянии / Ю.В. Замараева // IV международная школа для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов» (Екатеринбург, 18–20 июня 2019 г.) / Издательство Уральского университета. – Екатеринбург, 2019. – С. 123–126.

138. Композиционная заготовка для кузнечной осадки: пат. 2738630 Рос. Федерация : МПК В21J 1/04 / Логинов Ю.Н., Замараева Ю.В. ; патентообладатель ФГАОУ ВО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина". – № 2019135099; заявл. 01.11.2019 ; опубл. 15.12.2020, Бюл. № 35.

139. Логинов Ю.Н. Сохранение формы границы раздела при кузнечной осадке биметаллической заготовки / Ю.Н. Логинов, Ю.В. Замараева // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. – 2020. – Т. 20. – № 1. – С. 54–59.

140. Malcher L. An improved damage evolution law based on continuum damage mechanics and its dependence on both stress triaxiality and the third invariant / L. Malcher, E.N. Mamiya // International Journal of Plasticity. – 2014. – Vol. 56. – P. 232–261.

141. Yoon J.W. Asymmetric yield function based on the stress invariants for pressure sensitive metals / J.W. Yoon [et al.] // International Journal of Plasticity. – 2014. – Vol. 56. – P. 184–202.

142. Driemeier L. Experiments on stress-triaxiality dependence of material behavior of aluminum alloys / L. Driemeier [et al.] // Mechanics of Materials. – 2010. – Vol. 42, Iss. 2. – P. 207–217.

143. Xiao X. Effect of the lode parameter in predicting shear cracking of 2024-t351 aluminum alloy Taylor rods / X. Xiao [et al.] // International Journal of Impact Engineering. – 2018. – Vol. 120. – P. 185–201.

144. Mirone G. A local viewpoint for evaluating the influence of stress triaxiality and lode angle on ductile failure and hardening / G. Mirone, D. Corallo // *International Journal of Plasticity*. – 2010. – Vol. 26, Iss. 3. – P. 348–371.

145. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – Екатеринбург : Изд-во Урал. гос. техн. ун-та, 2001. – 834 с.

146. Narayanasamy R. Phenomenon of barrelling in aluminium solid cylinders during cold upset-forming / R. Narayanasamy, K.S. Pandey // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1997. – Vol. 70, Iss. 1–3. – P. 17–21.

147. Ganjiani M. A damage model for predicting ductile fracture with considering the dependency on stress triaxiality and Lode angle / M. Ganjiani // *European Journal of Mechanics - A/Solids*. – 2020. – Vol. 84. – P. 104048.

148. Smirnov S.V. A set of tests for studying the effect of the stress state on ultimate metal plasticity at high temperature / S.V. Smirnov, D.I. Vichuzhanin, A.V. Nesterenko // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2015. – Vol. 3. – P. 146–164.

149. Loginov Yu.N. Invariant stress state parameters for forging upsetting of magnesium in the shell / Yu.N. Loginov, Yu.V. Zamaraeva // *Metal Working and Material Science*. – 2021. – Vol. 23. – no. 1. – P. 79–88.

150. Логинов Ю.Н. Межслойное взаимодействие при осадке биметаллической заготовки / Ю.Н. Логинов, Б.И. Каменецкий, Ю.В. Замаева // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2019. – № 7. – С. 41–45.

151. Loginov Y.N. Upsetting of cylinder magnesium blanks in copper casing without compression / Y.N. Loginov, Y.V. Zamaraeva, B.I. Kamenetskiy // *Tsvetnye Metally*. – 2020. – Vol. 4. – P. 77–82.

152. Харитонов, Л.Г. Определение микротвёрдости. / Л.Г. Харитонов. – Москва : Металлургия, 1967. – 47 с.

153. Комкова Д.А. Теоретическая оценка и экспериментальное определение температуры деформационного разогрева магния в процессе поперечного выдавливания / Д.А. Комкова [и др.] // *Ультрамелкозернистые и*

наноструктурные материалы (Уфа, 5-9 сент. 2020 г.) / Башкирский государственный университет. – Уфа, 2020. – С. 238–240.

154. Komkova D.A. Theoretical estimation, simulation and experimental evaluation of deformation-induced heating of magnesium during lateral extrusion / D.A. Komkova [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 1008. – P. 12028–12032.

155. Логинов Ю.Н. Моделирование углового прессования полосы в 3D постановке / Ю.Н. Логинов, Ю.В. Замараева, Б.И. Каменецкий // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2019. – № 9. – С. 33–37.

156. Loginov Y.N. Strains under angular pressing of a strip from a cylindrical billet / Y.N. Loginov, Y.V. Zamaraeva, D.A. Komkova // Defect and Diffusion Forum. – 2021. – Vol. 410. – P. 80–84.

157. Логинов Ю.Н. Деформации при угловом прессовании полосы из цилиндрической заготовки / Ю.Н. Логинов, Ю.В. Замараева, Д.А. Комкова // VII всероссийская научно-техническая конференция «Пром-инжиниринг» (Сочи, 17–21 мая 2021 г.) / Издательский центр ЮУрГУ. – Челябинск, 2021. – С. 141–144.

158. Gurson A. L. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I — Yield criteria and flow rules for porous ductile materials / A.L. Gurson // Journal of engineering materials and technology. – 1977. – Vol. 99. – P. 2–15.

159. Кругликов Н.А. Микроструктура и механические свойства литого магния / Н.А. Кругликов [и др.] // Литейщик России. – 2013. – № 8. – С. 17–21.

160. Смирягин, В.П. Промышленные цветные металлы и сплавы / В.П. Смирягин. – Москва : Metallurgizdat, 1956. – 560 с.

161. Логинов Ю.Н. Изучение упрочнения и разупрочнения магния с учетом анизотропии свойств / Ю.Н. Логинов, С.П. Буркин, В.В. Сапунжи // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 1999. – № 6. – С. 42–46.

162. Zamaraeva Y. Ways to expand the use of magnesium / Y Zamaraeva, Yu. Loginov // V Международная молодежная научно-техническая конференция «Magnitogorsk rolling practice 2020» (Магнитогорск, 24–27 нояб. 2020 г.) / Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2020. – С. 121–122.

163. Замаараева Ю.В. Обжатие магниевое шара гидростатическим давлением / Ю.В. Замаараева // XX международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлосведов-молосдых ученых (Екатеринбург, 3–7 февр. 2020 г.) / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2020. – С. 17–20.

164. Логинов Ю.Н. Гидростатическое нагружение сферы из магниевое сплава, расположенной на кольцевой опоре / Ю.Н. Логинов, Ю.В. Замаараева // Технология легких сплавов. – 2019. – № 4. – С. 77–82.

165. Логинов Ю.Н. Напряженно-деформированное состояние сферического клапана в буровой скважине / Ю.Н. Логинов, Ю.В. Замаараева // Оборудование и технологии для нефтегазовое комплекса. – 2021. – № 2(122). – С. 43–47.

166. Пат. 2580257 Российская Федерация, МПК В21D22/00. Способ получения изделий типа стакан из немерных концов труб / Ю.Н. Логинов, Л.А. Мальцева, Е.А. Батуева; заявитель и патентосбладатель ФГАОУ ВПО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина". – № 2014117460/02; заявл. 29.04.2014; опубл. 10.04.2016, Бюл. № 10.

167. Пат. 2162025 Российская Федерация, МПК В21Н1/14. Главная линия стана для прокатки шаров / А.А. Ковтушенко, А.Ф. Копылов, С.А. Лагутин, И.К. Тартаковский; заявитель и патентосбладатель ОАО "Электростальский завод тяжелое машиностроения". – 98109699/02; заявл. 19.05.1998; опубл. 20.01.2001.

168. Пат. 2465978 Российская Федерация, МПК В21К1/02. Способ производства стальных мелющих шаров и штамп для безоблойной штамповки стальных мелющих шаров / В.Н. Черкайкин, Р.Г. Саттаров, А.Л. Вяткин, Р.Н.

Алеев; заявитель и патентообладатель ОАО "ПРОМКО". – 2011130452/02; заявл. 22.07.2011; опубл. 10.11.2012, Бюл. № 31.

169. Логинов Ю.Н. Деформации и структура металла при холодной стыковой сварке медных заготовок / Ю.Н. Логинов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2012. – № 1. – С. 37–44.

170. Кругликов Н.А. Получение тонкой ленты из магния при комбинации процессов холодной деформации / Н.А. Кругликов [и др.] // В сборнике: XI международный конгресс прокатчиков. Материалы конгресса. – 2017. – С. 338–342.

171. Логинов Ю.Н. Обратное выдавливание цилиндра с применением противодействия / Ю.Н. Логинов, Ю.В. Замаева // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2020. – № 12. – С. 30–35.

172. Замаева Ю.В. Численное моделирование процесса формования стакана из магния с противодействием / Ю.В. Замаева, Ю.Н. Логинов // XLVII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» (Москва, 20-23 апр. 2021 г.) / Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН. – Москва, 2021. – С. 64–66.

173. Замаева Ю.В. Холодное выдавливание тонкостенного стакана из малопластичного материала / Ю.В. Замаева, Ю.Н. Логинов // V международная школа для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов» (Екатеринбург, 14–16 июня 2021 г.) / Издательство Уральского университета. – Екатеринбург, 2021. – С. 49–51.

ПРИЛОЖЕНИЕ**Акт о внедрении результатов диссертационной работ**

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
 Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ
 имени М.Н. Михеева
 Уральского отделения Российской академии наук
 (ИФМ УрО РАН)

Юр. адрес: ул. С. Ковалевской, д. 18, Екатеринбург, 620137
 Почт. адрес: ул. С. Ковалевской, д. 18, Екатеринбург, 620108
 тел. (343) 374 02 30, факс (343) 374 52 44
 E-mail: physics@imp.uran.ru http://www.imp.uran.ru
 ОКПО 02699915 ОГРН 1026604945245
 ИНН/КПП 6660008381/667001001

09.02.2022 № 16341-01-2171/112

На № _____

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы ЗАМАРАЕВОЙ Юлии Валентиновны
 «Анализ приемов обработки, повышающих уровень сжимающих напряжений
 в процессах холодной осадки и прессования магния»

Аспирантка УрФУ Замаараева Ю.В. принимала участие в совместных научно-исследовательских работах, проводимых лабораторией прочности ИФМ УрО РАН, а также лабораторией конструкционных и функциональных материалов (Научно-исследовательский комплекс совместных лабораторий УрФУ – ИФМ УрО РАН) по созданию компьютерных моделей процессов холодной деформации магния с использованием метода конечных элементов и проведению моделирования в соответствующих программных комплексах. В задачу исследования Замаараевой Ю.В. входило проведение анализа напряженно-деформированного состояния заготовок и получение закономерностей их формоизменения в различных условиях деформации, сравнение полученных модельных результатов с данными реальных экспериментов. Проведенные исследования позволили разработать новые способы холодной обработки магния, на которые оформлены заявки на патенты Российской Федерации.

Результаты, полученные Замаараевой Ю.В., были использованы в лаборатории прочности ИФМ УрО РАН для оптимизации параметров интенсивной деформации магниевых заготовок методом поперечного выдавливания: ею определены оптимальные параметры формы матрицы; теоретически выявлена зона наибольшего нагрева заготовки в ходе деформационного течения; вычислена скорость течения материала и проведен модельный анализ распределения температуры по ширине полосы.

Директор института
 академик РАН

Н.В. Мушников