

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б. Н. Ельцина»

На правах рукописи



ЗАМАРАЕВА Юлия Валентиновна

**АНАЛИЗ ПРИЕМОВ ОБРАБОТКИ, ПОВЫШАЮЩИХ УРОВЕНЬ
СЖИМАЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОЦЕССАХ ХОЛОДНОЙ
ОСАДКИ И ПРЕССОВАНИЯ МАГНИЯ**

2.6.4. Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2022

Работа выполнена на кафедре обработки металлов давлением Института новых материалов и технологий ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
ЛОГИНОВ Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: **СИДЕЛЬНИКОВ Сергей Борисович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск, профессор кафедры «Обработка металлов давлением» Института цветных металлов и материаловедения;
ШВЕЙКИН Владимир Павлович, доктор технических наук, доцент, ФГБУН Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, директор института;
РАДИОНОВА Людмила Владимировна, кандидат технических наук, доцент, ООО Научно-производственное предприятие «Учебная техника-Профи», г. Челябинск, руководитель отдела «Материаловедение»

Защита состоится «18» мая 2022 г. в 16.30 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 2.6.01.04, по адресу 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=3448>

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Селиванова Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 больший 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 программных комплексах DEFORM и 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 программных комплексах 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.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в 19 научных статьях, из них 9 опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендуемых ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, 4 из которых вошли в международные базы Scopus и Web of Science, а также в описании одного патента РФ на изобретение.

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

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 159 страницах машинописного текста, включает 77 рисунков, 9 таблиц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 173 наименований и одного приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована актуальность темы диссертации, цель и задачи работы, дана характеристика ее научной новизны, теоретической и практической значимости.

Первая глава посвящена обзору исследований о свойствах, сферах применения, способах деформации и особенностях обработки магния и его сплавов, а также описанию применяемого программного средства для выполнения расчетов напряженно-деформированного состояния. На основании выполненного обзора сформулированы задачи исследования.

Во второй главе изложено исследование влияния бокового подпора на величину сжимающих напряжений при холодной осадке магния. В первом параграфе на основе экспериментов ИФМ УрО РАН в

программном комплексе DEFORM-2D осуществлено моделирование осадки заготовки из сплава Mg90 ГОСТ 804-93 при относительном обжатии 6 %. При данных условиях в реальном эксперименте наблюдали появление трещин на торцах и боковой поверхности заготовки. По результатам моделирования рассчитан показатель напряженного состояния (σ/T) в наиболее выпуклой части боковой поверхности заготовки, для чего назначена контрольная точка P1 и в ней определена интенсивность напряжений (рисунок 1, а) и среднее напряжение (рисунок 1, б).

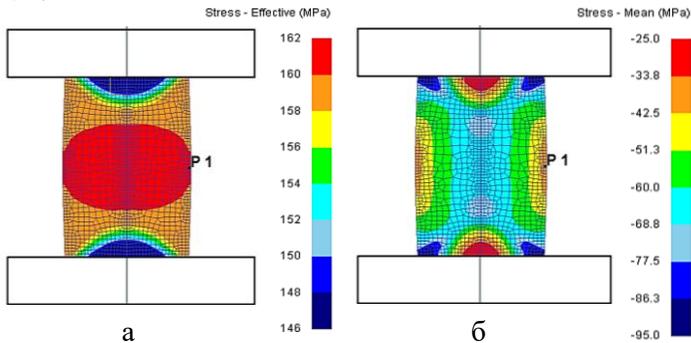


Рисунок 1 –
Распределение
интенсивности
напряжений
(а) и среднего
напряжения
(б) при осадке
магниевого
заготовки

Осуществлено моделирование осадки магниевой заготовки в медной оболочке, внутренний диаметр которой равен диаметру заготовки, при относительном обжатии 49 %. Отношение толщины стенки оболочки s_0 к диаметру заготовки D_0 равно $s_0/D_0 = 0,53$. По результатам реального эксперимента при данных условиях не наблюдали признаков разрушения заготовки. В этом случае также назначена контрольная точка P1 и в ней рассчитан показатель σ/T .

По результатам моделирования также найдены значения σ/T при $s_0/D_0 = 0,13$, $s_0/D_0 = 0,26$, $s_0/D_0 = 0,36$, $s_0/D_0 = 0,66$.

При $s_0/D_0 = 0,13$ зафиксировано образование полости между заготовкой и оболочкой (рисунок 2, а). Оболочка на части контактной поверхности не создает сжимающих напряжений. В самой заготовке в области образования полости создаются напряжения растяжения. 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, б). Таким образом, результаты моделирования подтверждены.

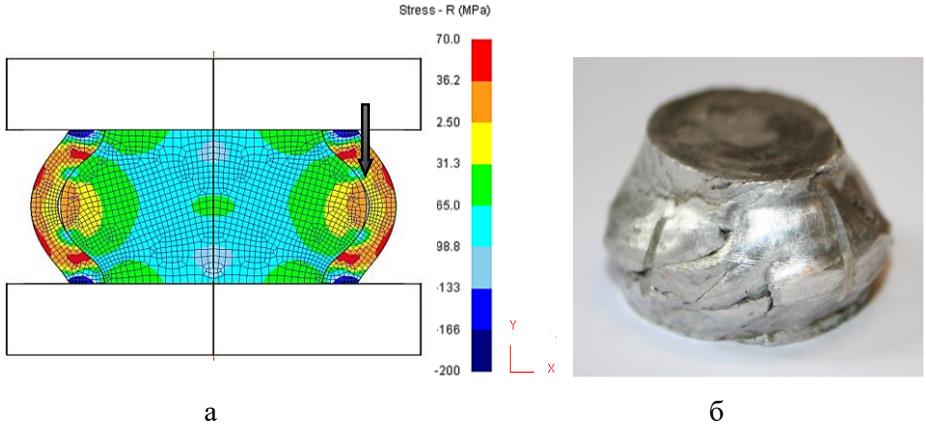


Рисунок 2 – Результаты осадки магниевой заготовки в медной оболочке при соотношениях $s_0/D_0 = 0,13$: а – распределение радиальных напряжений (темная стрелка указывает на образование полости), б – фото магниевой заготовки после осадки

По результатам расчетов выявлено влияние параметра s_0/D_0 на величину показателя напряженного состояния в процессе осадки магниевой цилиндрической заготовки в медной оболочке. Посредством увеличения параметра s_0/D_0 показатель σ/T может быть увеличен до величин, обеспечивающих осадку без разрушения заготовки. Кроме того, установлено влияние параметра s_0/D_0 на образование полости между заготовкой и оболочкой. Полость может быть ликвидирована увеличением параметра s_0/D_0 .

Во втором параграфе рассмотрена возможность ликвидации образования зазора между заготовкой и оболочкой наложением гидростатического давления на наиболее выпуклую часть заготовки, для чего разработана композиционная заготовка, состоящая из магниевого цилиндра и охватывающей его по боковой поверхности медной кольцевой оболочки, имеющей внутренний диаметр, равный диаметру цилиндра. Толщина стенки кольцевой оболочки имеет свой максимум посередине высоты цилиндра, что обосновано наибольшим подпором при осадке именно в этой области. В результате после осадки возможно получить ровную цилиндрическую поверхность заготовки, и оболочку удастся отделить от цилиндра операцией выпрессовывания.

Формой стенки оболочки в первом варианте композиционной заготовки является равнобедренный треугольник. Во втором варианте – сегмент круга.

Для доказательства достижения технического результата при переменных значениях геометрических параметров (начальной высоты оболочки h_0 , начальной высоты равнобедренного треугольника (сегмента круга) s_0 , начальной высоте и диаметре цилиндра H_0 и D_0) выполнены расчеты по осадке композиционной заготовки в программном модуле DEFORM.

Из размерных величин создан безразмерный параметр s_0/D_0 . В функции этого параметра в результате решения задачи получили безразмерный параметр D_6/D_k , где D_6 – наибольший диаметр цилиндра, D_k – наименьший диаметр цилиндра. При $D_6/D_k < 1,00$ – вогнутая боковая поверхность цилиндра, при $D_6/D_k > 1,00$ – выпуклая боковая поверхность, при $D_6/D_k = 1,00$ – форма поверхности с образующей в виде прямой линии.

В результате при применении предложенных поясков найдены такие значения s_0/D_0 при которых $D_6/D_k = 1,00$.

По результатам расчетов показателей напряженного состояния в районе выпуклости боковой поверхности магниевой заготовки выявлено, что они имеют достаточно низкие значения по модулю, поэтому следующая часть расчетов направлена на повышение показателя σ/T по модулю при сохранении прямолинейной образующей боковой поверхности.

Для осадки цилиндрической магниевой заготовки применен поясok пятиугольного поперечного сечения.

Для расчета параметра σ/T пришлось наметить контрольные точки P_i ($i = 1, 2, \dots, 9$), установив относительные координаты $z/h = 0; 0,5; 1$; $r/R = 0; 0,5; 1$. В этих точках выполнена оценка значений интенсивности напряжений (рисунок 3, а) и среднего напряжения.

При сравнении значений показателя напряженного состояния, полученных при использовании поясков треугольного сечения и сечения в виде кругового сегмента при $H_0/D_0 = 1$ и $D_6/D_k = 1,00$, установлено, что σ/T в опасной зоне (точка P3, координаты $z/h = 0$ и $r/R = 1$) при применении пояска пятиугольного поперечного сечения повышен примерно в 3 раза.

Выявлено влияние параметра s_0/D_0 на величину показателя напряженного состояния на примере применения пояска пятиугольного сечения (рисунок 3, б). Посредством увеличения параметра s_0/D_0 показатель σ/T может быть увеличен до величин, обеспечивающих достаточного высокий уровень пластичности.

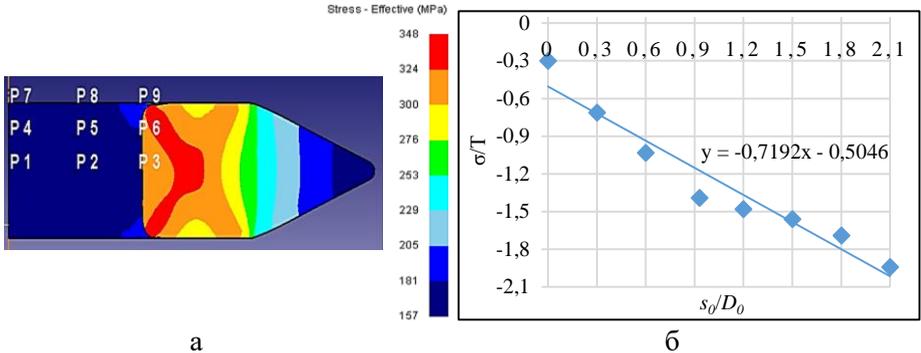


Рисунок 3 – Правая половина очага деформации с полем интенсивности напряжений (а), график функции $\sigma/T = f(s_0/D_0)$ для пояска пятиугольного поперечного сечения в точке P3 (б)

В третьем параграфе проведено исследование процесса осадки цилиндрической магниевой заготовки в оболочке без ее обжатия посредством метода конечных элементов.

Для постановки задачи применен программный комплекс DEFORM-2D.

На рисунке 4, а приведено фото сборки магниевго образца и медной обоймы, а на рисунке 4, б изображена расчетная схема с распределением поля степени деформации.

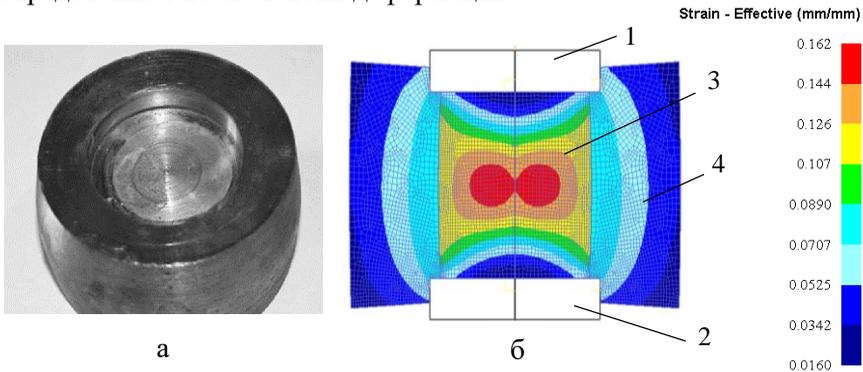


Рисунок 4 – Фото сборки (а) и схема процесса с распределением поля степени деформации в оболочке и цилиндрической заготовке с сеткой конечных элементов (б): 1 и 2 – пуансоны; 3 – заготовка; 4 – обойма

На основе результатов моделирования сделана оценка показателя напряженного состояния (таблица 1) в контрольные точки P1, ..., P9 (относительные координаты $z/h = 0; 0,5; 1$; $r/R = 0; 0,5; 1$).

Таблица 1 – 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

При сравнении значения σ/T при осадке цилиндрической заготовки на гладких бойках без трения (по всему объему заготовки он одинаков и равен величине -0,58) с результатами, отраженными в таблице 1, видно, что произошло увеличение показателя по модулю в 2...5 раз, поэтому пластичность металла возросла и ее оказалось достаточно для осуществления операции осадки без разрушения, что подтверждено экспериментально.

На основе результатов моделирования сделана оценка показателя μ_σ . Системой DEFORM предусмотрена возможность расчета максимального (первого) и минимального (третьего) главных нормальных напряжений. Второе главное напряжение определили специально расчетом по формуле:

$$\sigma_2 = 3\sigma - (\sigma_1 + \sigma_3). \quad (1)$$

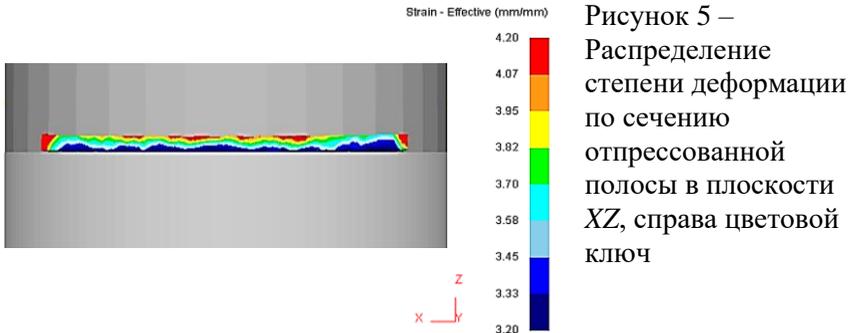
где σ_i ($i = 1, 2, 3$) – главные нормальные напряжения, при этом напряжения ранжированы по правилу $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

Выявлено, что опасность с позиции возможности разрушения представляет точка с координатами $z/h = 0$, $r/R = 1$ с наименьшими по модулю главными напряжениями, здесь $\sigma_1 = -23$ МПа. В этой же точке достигнуто значение коэффициента Лоде, близкое к нулю. Известно, что при нулевом значении коэффициента Лоде пластичность оказывается самой низкой. Поэтому указанную область можно считать опасным сечением с позиции трещинообразования.

В третьей главе исследован процесс углового прессования магния при комнатной температуре, в частности в первом параграфе посредством компьютерного моделирования исследовано напряженно-деформированное состояние, а также изучены свойства полосы, полученной методом неравноканального углового прессования (НРКУП) в условиях реального эксперимента.

Для решения задачи НРКУП применен программный комплекс DEFORM-3D. Материал заготовки – магний марки Mg90 ГОСТ 804-93.

3D решение позволило оценить неравномерность деформации в поперечном сечении отпрессованной полосы (рисунок 5).



Здесь видно, что верхняя часть полосы нагартована больше, чем нижняя, по степени деформации, это различие достигает 24%. Такое же различие наблюдается для кромки полосы относительно нижней поверхности.

С целью подтверждения результатов моделирования произведено измерение твердости по толщине полосы, полученной методом НРКУП в условиях реального эксперимента. Для этого из полосы был вырезан образец в плане прямоугольной формы с размерами 10x15x1 мм на расстоянии 633 мм от переднего торца полосы. Микротвердость определяли по методу Виккерса. На рисунке 6, а приведена схема измерения твердости по толщине полосы с указанием размеров образца и направления. Значение микротвердости выражены в кг/мм².

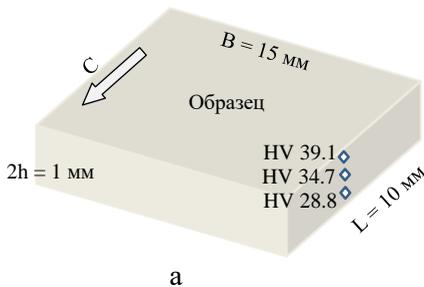


Рисунок 6 –
Образец для
определения
твёрдости (а)
и отпечаток
от индентора
(б)

По результатам измерений твёрдости по толщине образца средние размеры отпечатков индентора составили 30,8 и 35,9 мкм в приповерхностных слоях и 32,7 мкм в срединном слое. Пример отпечатка после вдавливания индентора представлен на рисунке 6, б. Эти отпечатки соответствуют значениям твердости HV 39,1, HV 28,8 и HV 34,7. Как следует из результатов, верхняя часть полосы нагартована больше, чем нижняя, разница по значениям твердости составляет 27%, что подтверждает результаты моделирования.

Во втором параграфе описано разработанное устройство для углового многоканального прессования с повышенными коэффициентами вытяжек. Используя данное устройство становится возможным получение не только плоских заготовок, а заготовок равноосного сечения, в том числе круглого, квадратного и иных сечений. Для доказательства достижения технического результата методом конечных элементов в программном модуле DEFORM-3D выполнены расчеты углового прессования магниевых прутков.

В первом параграфе **четвертой главы** посредством моделирования в программном комплексе DEFORM исследовано напряженно-деформированное состояние магниевого шара, расположенного на кольцевой опоре и нагруженного гидростатическим давлением. В качестве объекта исследования выбрали схему нагружения для испытания шаров, соответствующую схеме воздействия жидкости в производственных условиях работы скважины (рисунок 7).

Магниевый образец (Mg90 ГОСТ 804-93) представлен в виде сферы диаметром $d = 70$ мм. Внутренний диаметр седла $d_c = 67$ мм. Давление жидкости 70 МПа.

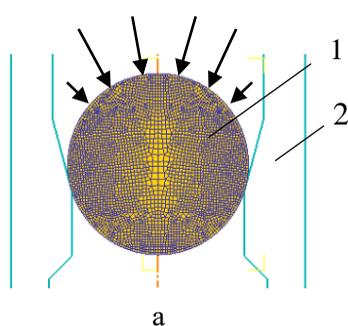


Рисунок 7 – Схема испытания шара на выдавливание гидростатическим давлением (а) и фото магниевого шара, прошедшего испытание (б)

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.

Осуществлена оценка характера уплотнения магниевого пористого шара при воздействии жидкости высокого давления.

В данной работе анализируется условие пластичности Гарсона, разработанное применительно к материалам, обладающим невысоким уровнем пористости (до 10%).

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:

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

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 (2) в данной работе преобразовано к виду:

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

Уравнение (3) превращается в условие пластичности Мизеса при равенстве нулю объема пор: при $\Pi = 0$, получим:

$$\sigma_{и}^2 + 0 - q_3 * 0 = \sigma_s^2 \quad \text{или} \quad \sigma_{и} = \sigma_s. \quad (4)$$

Принято, что $q_1 = q_2 = q_3 = 1$. Тогда из уравнения (2) получим:

$$\sigma_{и}^2 + 2 * \sigma_s^2 * \Pi * \cosh(-\frac{3}{2} \frac{p}{\sigma_s}) - \sigma_s^2\Pi^2 = \sigma_s^2. \quad (5)$$

Отсюда:

$$\frac{\sigma_{и}^2}{\sigma_s^2} = 1 - 2 * \Pi * \cosh(-\frac{3}{2} \frac{p}{\sigma_s}) + \Pi^2. \quad (6)$$

В соответствии с этой формулой для пористости 0; 0,01 и 0,05, выполнены расчеты. Выявлено, что при $\Pi = 0$ отношение $\frac{\sigma_{и}^2}{\sigma_s^2} = 1$, 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.

Установлено, что перемещения наружного контура шара в сферической системе координат $r\theta$ вдоль координаты r 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. Начальная пористость материала задана на уровне 0,1.

Граничные условия в напряжениях заданы действием давления 150 МПа на боковую поверхность сегмента.

Как видно из рисунка 8, 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: $60 - 2 * 0,365 = 59,27$ мм.

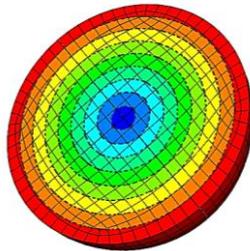
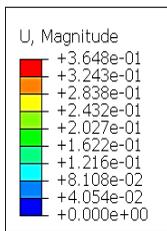


Рисунок 8 – Распределение модуля вектора перемещений U в диаметральной разрезе

Во втором параграфе разработан способ изготовления шарового элемента клапана для буровых скважин, включающий в себя изготовление оболочки из деградируемого материала, например, магния или магниевый сплав 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.

Для доказательства успешного формоизменения композиционной заготовки выполнены расчеты методом конечных элементов в программном модуле DEFORM.

Начальный, промежуточный и окончательный этап формоизменения показаны на рисунке 9, где видно продольное сечение композиционной сборки.

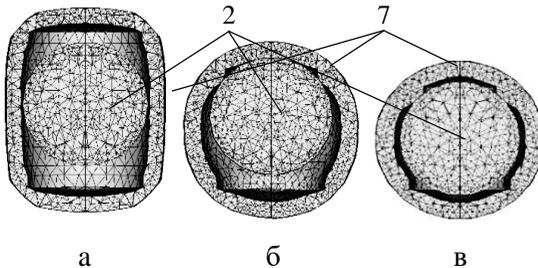


Рисунок 9 – Сечение шара и оболочки в начальный (а), промежуточный (б) и окончательный (в) момент формоизменения: 2 – стальной шар, 7 – магниевый полый шар

В третьем параграфе посредством метода конечных элементов исследован метод обратного выдавливания для получения тонкостенных стаканов.

Для решения задачи обратного выдавливания стакана применен программный комплекс DEFORM-2D. Материал заготовки – магний марки Mg90 ГОСТ 804-93. Магниевый образец представлен в виде цилиндра диаметром $D = 6$ мм и высотой $H_0 = 4$ мм. Диаметр пуансона 5,6 мм. Перемещение пуансона по оси z равно 1 мм.

Первый вариант постановки задачи создан для условия гладкой боковой поверхности пуансона, то есть отсутствия калибрующего пояска. Во втором варианте пуансон дополнили калибрующим пояском ($l_{к.п.} = 0,3$ мм).

Распределение осевого напряжения в конце процесса деформации для обратного выдавливания пуансоном без калибрующего пояска и при его наличии представлено на рисунке 10, а, в, соответственно. На рисунке 10, б, г представлено изменение осевого напряжения в контрольных точках по времени деформации для обратного выдавливания пуансоном без калибрующего пояска и с калибрующим пояском, соответственно. 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 (до 1270 МПа). Поэтому более предпочтительным оказывается применение пуансона с калибрующим пояском.

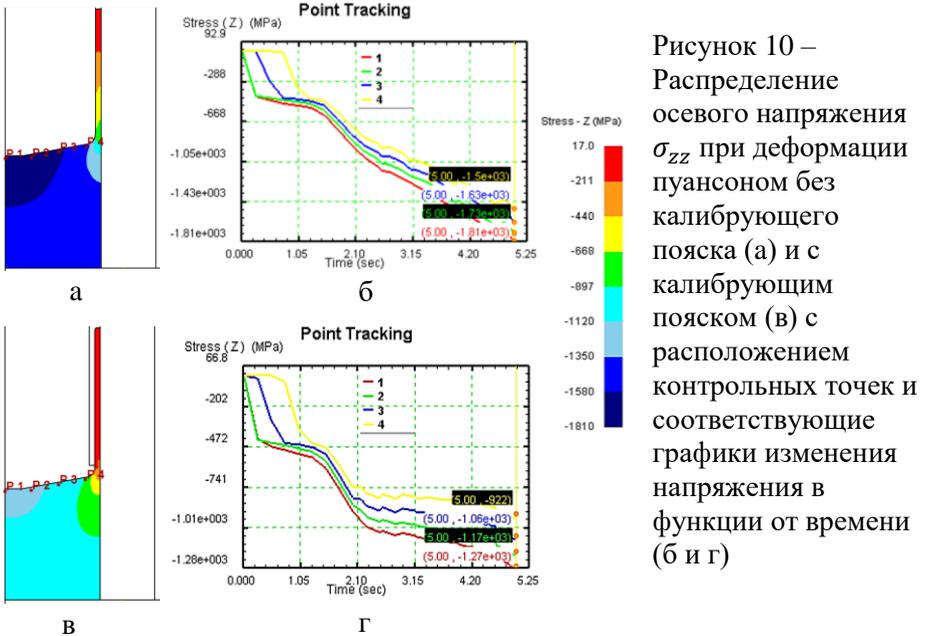


Рисунок 10 – Распределение осевого напряжения σ_{zz} при деформации пуансоном без калибрующего пояска (а) и с калибрующим пояском (в) с расположением контрольных точек и соответствующие графики изменения напряжения в функции от времени (б и г)

На рисунке 11 представлено распределение степени деформации в процессе обратного выдавливания пуансоном без калибрующего пояска (рисунок 11, а) и при его наличии (рисунок 11, б) при перемещении пуансона по оси z, 2 мм. На рисунке 11, б зафиксировано явление прогиба стенки стакана при данных условиях деформации, что можно объяснить потерей устойчивости при назначенной (малой) длине калибрующего пояска. С целью устранения прогиба стенки стакана длина калибрующего пояска увеличена в 2 раза, то есть $l_{к.п.}=0,6$ мм. При данном условии устойчивость стенки сохранена, прогиб не образовался.

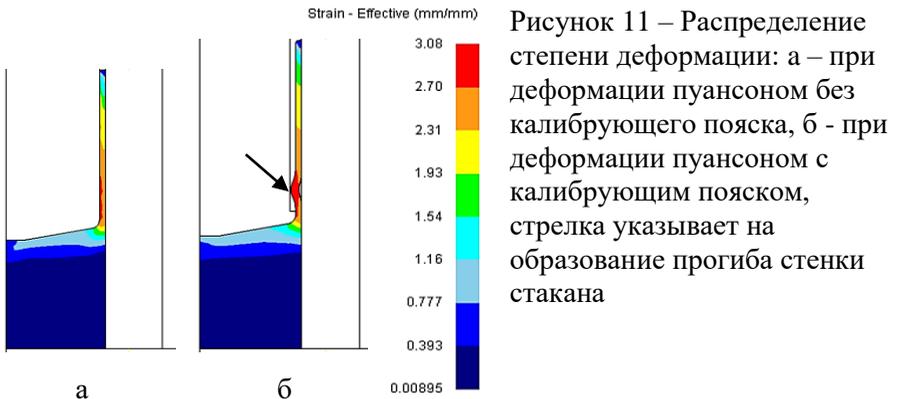


Рисунок 11 – Распределение степени деформации: а – при деформации пуансоном без калибрующего пояска, б - при деформации пуансоном с калибрующим пояском, стрелка указывает на образование прогиба стенки стакана

Расчеты показали, что снижения рабочих напряжений в процессе обратного выдавливания можно достичь, применяя пуансоны со сферическим торцом, а также применяя калибрующие пояски, выполненные на торце пуансона.

Далее приведены результаты исследования обратного выдавливания с противодавлением, созданным посредством втулки, заполняющей зазор между боковой поверхностью пуансона и стенкой контейнера. Установлено, что величина противодавления зависит от относительной толщины втулки, прочностных свойств материала втулки и показателя трения.

Для процесса обратного выдавливания с противодавлением получено решение в программном комплексе DEFORM-2D. Материал заготовки – магний марки Mg90 по ГОСТ 804-93.

Установлено, что при отсутствии втулки максимальные по модулю напряжения сжатия достигаются непосредственно под пуансоном и они достигают величины -700 МПа (рисунок 12, а). В тех же условиях при применении втулки (рисунок 12, б) максимальные в очаге деформации по модулю напряжения сжатия повышены с 700 МПа до 1300 МПа, т. е. на 86%.

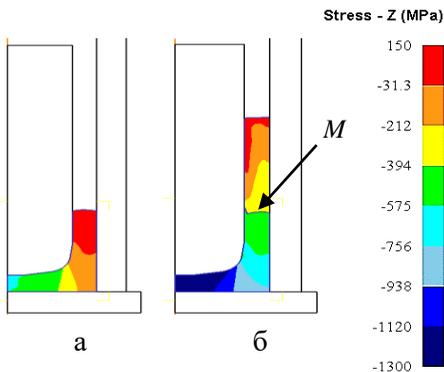


Рисунок 12 – Распределение осевого напряжения σ_{zz} (половина очага деформации) при деформации без втулки (а) и со втулкой (б); M – место стыка заготовки и втулки

Применение схемы обратного выдавливания с противодавлением позволяет повысить величину напряжений сжатия, что должно способствовать повышению пластических свойств металла. Описанные выше приемы направлены на создание технологии производства стентов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

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 НРКУП 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 магниевого сплава) и заполнение оболочки недеградируемым материалом (сталью).

8. Посредством моделирования процесса обратного выдавливания магниевого стакана из сплошной заготовки установлено, что снижения рабочих напряжений можно достичь, применяя пуансоны со сферическим торцом, а также применяя калибрующие пояски, выполненные на торце пуансона. 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.

9. При анализе схемы обратного выдавливания с противодавлением, создаваемым втулкой, установлено, что величина противодействия 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. Логинов Ю.Н. Гидростатическое нагружение сферы из магниевого сплава, расположенной на кольцевой опоре / Ю.Н. Логинов, **Ю.В. Замараева** // Технология легких сплавов. – 2019. – № 4. – С. 77–82. (0,375 п.л./0,18 п.л.)

2. 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. (0,32 п.л./0,11 п.л.)

3. Логинов Ю.Н. Межслойное взаимодействие при осадке биметаллической заготовки / Ю.Н. Логинов, Б.И. Каменецкий, **Ю.В. Замараева** // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2019. – № 7. – С. 41–45. (0,32 п.л./0,11 п.л.)

4. 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. (0,375 п.л./0,18 п.л.)

5. Логинов Ю.Н. Обратное выдавливание цилиндра с применением противодавления / Ю.Н. Логинов, **Ю.В. Замараева** // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2020. – № 12. – С. 30–35. (0,32 п.л./0,15 п.л.)

6. Loginov Yu.N. Upsetting of cylinder magnesium blanks in copper casing without compression / Yu.N. Loginov, **Yu.V. Zamaraeva**, B.I. Kamenetskiy // Tsvetnye Metally. – 2020. – Vol. 4. – P. 77–82. (0,375 п.л./0,12 п.л.) (Scopus)

7. Komkova D.A. Theoretical estimation, simulation and experimental evaluation of deformation-induced heating of magnesium during lateral extrusion / D.A. Komkova, **J.V. Zamaraeva**, Yu. N. Loginov, P.S. Koshevoy, A.L. Sokolov, A.Yu. Volkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 1008. – P. 12028–12032. (0,32 п.л./0,05 п.л.) (Scopus)

8. 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. (0,32 п.л./0,11 п.л.) (Scopus)

9. 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. (0,625 п.л./0,32 п.л.) (WoS)

Патенты:

10. Пат. № 2738630 Рос. Федерация, МПК B21J 1/04. Композиционная заготовка для кузнечной осадки / Ю.Н. Логинов, **Ю.В. Замараева**; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО "Уральский

федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина". – № 2019135099; заявл. 01.11.2019; опубл. 15.12.2020, Бюл. № 35.

Другие публикации:

11. Замаева Ю.В. Влияние толщины оболочки на результаты осесимметричной осадки магния в холодном состоянии / **Ю.В. Замаева**, Ю.Н. Логинов // IV международная молодежная научно-практическая конференция «MAGNITOGORSK ROLLING PRACTICE» (Магнитогорск, 04–07 июня 2019 г.) / Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2019. – С. 62–64. (0,19 п.л./0,095 п.л.)

12. Логинов Ю.Н. Численное моделирование влияния оболочки на процесс осадки цилиндрической заготовки / Ю.Н. Логинов, **Ю.В. Замаева** // 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. (0,5 п.л./0,25 п.л.)

13. Замаева Ю.В. Численное моделирование осесимметричной осадки в оболочке магния в холодном состоянии / **Ю.В. Замаева** // IV международная школа для молодежи «Материаловедение и металлофизика легких сплавов» (Екатеринбург, 18–20 июня 2019 г.) / Издательство Уральского университета. – Екатеринбург, 2019. – С. 123–126. (0,25 п.л./0,25 п.л.)

14. Комкова Д.А. Теоретическая оценка и экспериментальное определение температуры деформационного разогрева магния в процессе поперечного выдавливания / Д.А. Комкова, **Ю.В. Замаева**, Ю.Н. Логинов, П.С. Кошевой, А.Л. Соколов, А.Ю. Волков // Открытая школа-конференция стран СНГ «Ультрамелкозернистые и наноструктурные материалы» (Уфа, 05–09 сентября 2020 г.) / Башкирский государственный университет. – Уфа, 2020. – С. 238–240. (0,19 п.л./0,03 п.л.)

15. Замаева Ю.В. Обжатие магниевого шара гидростатическим давлением / **Ю.В. Замаева** // XX международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов-молодых ученых (Екатеринбург, 03–07 февраля 2020 г.) / Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2020. – С. 17–20. (0,25 п.л./0,25 п.л.)

16. Zamaraeva Y. Ways to expand the use of magnesium / **Y. Zamaraeva**, Yu. Loginov // V международная молодежная научно-техническая конференция «Magnitogorsk rolling practice» (Магнитогорск,

24–27 ноября 2020 г.) / Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. – Магнитогорск, 2020. – С. 121–122. (0,125 п.л./0,062 п.л.)

17. Замараева Ю.В. Численное моделирование процесса формирования стакана из магния с противодавлением / **Ю.В. Замараева**, Ю.Н. Логинов // международная молодежная научная конференция «XLVII Гагаринские чтения» (Москва, 20–23 апреля 2021 г.) / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук. – Москва, 2021. – С. 64–66. (0,19 п.л./0,095 п.л.)

18. 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. (0,25 п.л./0,09 п.л.)

19. Замараева Ю.В. Холодное выдавливание тонкостенного стакана из малопластичного материала / **Ю.В. Замараева**, 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. (0,19 п.л./0,095 п.л.)

20. 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» (Уфа, 05–08 октября 2021 г.) / Башкирский государственный университет. – Уфа, 2021. – С. 126. (0,0625 п.л./0,021 п.л.)