

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
Институт автоматки и информационных технологий
Диссертационный совет Д.05.11.030

На правах рукописи

Сулайманова Света Мукашовна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЪЕМНОГО
ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ В РЕЖИМАХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ**

**05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Бишкек 2013

Работа выполнена в Кыргызско – Российском Славянском университете

- Научный консультант:** Доктор физико-математических наук,
профессор **Рудаев Яков Исаакович**
- Официальные оппоненты:**
1. Доктор технических наук,
профессор **Данилов Владимир Львович**
 2. Доктор физико-математических наук,
профессор **Дженалиев Муваширхан
Танабаевич**
 3. Доктор физико-математических наук,
профессор **Байзаков Асан Байзакович**
- Ведущая организация:** ФГУП «Центральный институт
авиационного моторостроения им. П.И.
Баранова», Россия, 111116, Москва,
авиамоторная ул., д. 2, ЦИАМ

Защита состоится февраля 2013 г. в 14.00 часов на заседании
Диссертационного совета Д.05.11.030 при Институте автоматике и
информационных технологий НАН КР, г. Бишкек, пр. Чуй, 265.

С диссертацией можно ознакомиться в Институте автоматике и
информационных технологий НАН КР, г. Бишкек, пр. Чуй, 265.

Автореферат разослан января 2013г.

Ученый секретарь

Специализированного Совета, к.т.н.

И.В. Брякин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Основной задачей прикладной теории пластичности при сложном нагружении и больших пластических деформациях следует считать разработку исходных положений для замены технологических процессов, основанных на резании металла, экономичными методами формообразования деталей. Понятно, что научно-технический прогресс в машиностроении и металлообработке обеспечивается не только новыми методами производства, машинами и технологическими процессами, но и управлением качеством продукции. К одной из наиболее перспективных и принципиально новых технологических операций, направленных на совершенствование современного производства, относятся процессы изотермического объемного формоизменения материала в режимах сверхпластичности, которые позволяют значительно повысить пластические свойства материала и снизить усилие деформирования при достижении больших степеней деформации.

Современный уровень теоретических и экспериментальных исследований позволяет рассматривать сверхпластичность как особое состояние поликристаллического материала, пластически деформируемого при пониженном напряжении с сохранением в продеформированном металле ультрамелкой исходной структуры или с её формированием в процессе нагрева и деформации.

Внешняя сторона эффекта сверхпластичности просматривается в форме аномального квазиоднородного удлинения (до нескольких сотен и даже тысяч процентов) при малых напряжениях пластического течения. Изучение физической природы такой аномалии показало, что в материалах, наряду с известными формами массопереноса, превалирующим становится механизм зернограничного проскальзывания со сменой соседей зерен. Реализации указанного механизма способствует формирование ультрамелкозернистой структуры на предварительном этапе (структурная или микрозернистая сверхпластичность) или в процессе нагрева и деформации (динамическая сверхпластичность).

Одной из первоочередных проблем широкого промышленного освоения процессов изготовления сверхпластичных полуфабрикатов является получение в промышленных масштабах катаной, кованой или прессованной заготовки в виде прутков, профилей или полосы из сплава с регламентированной структурой.

Известны два принципиальных метода регламентации структуры для обеспечения условий реализации эффекта сверхпластичности. Первый из них состоит в совмещении процессов деформации и различной природы фазовых превращений с согласованием их скоростей. При этом исходная структура обрабатываемого материала не имеет существенного значения (литая или деформированная). Такому подходу отвечает эффект, названный выше динамической сверхпластичностью. Другой метод состоит в предварительной подготовке ультрамелкозернистой структуры в сплавах, предназначенных для

сверхпластической деформации. Такая структура должна удовлетворять особым требованиям. Первое направление развито в работах А.А. Преснякова, А.П. Гуляева, А.С. Базыка, А.С. Тихонова, А.Е. Гвоздева, О.В.Соснина, Б.В. Горева, Я.И. Рудаева, Д.И. Чашникова, Ш.Т. Пазылова, К. Танака, Р. Ивасаки, Н. Нозаки и др. Второму направлению посвящены исследования А.С. Бочвара, О.А. Кайбышева, И.И. Новикова, В.К.Портного, О.М. Смирнова, Е.Н. Чумаченко, Р.А. Васина, С.М. Пакера, О.Д. Шерби, К.С. Джифкинса и др.

Динамическая сверхпластичность алюминиевых сплавов (в работе речь идет об этих сплавах) развивается в температурно-скоростных условиях фазовой трансформации – динамической рекристаллизации. В этих режимах происходит формирование ультрамелкозернистой структуры, и создаются условия для осуществления механизма зернограничного проскальзывания характерного для сверхпластичности.

Использование эффекта динамической сверхпластичности является одним из наиболее перспективных технологических процессов обработки металлических материалов. Целью таких процессов, как и вообще операции горячего формоизменения можно считать получение полуфабрикатов с требуемыми формой, размерами и свойствами. Проектированию подобных операций обязательно предшествует глубокая научная проработка, которая, в свою очередь, способствует развитию математических теорий горячего формообразования сплавов.

Технологические задачи, безусловно, относятся к физически и геометрически нелинейным. Можно утверждать, что в теоретическом отношении приходится иметь дело с нестационарными задачами механики, исследуемыми в двух и трехмерной постановке со сложными меняющимися граничными условиями. Естественным здесь оказывается необходимость привлечения уравнений состояния неупругих сплошных сред, отражающих реальные свойства материалов.

Математическое моделирование со строгим решением задач объемного формоизменения встречается с серьезными затруднениями. Задача нахождения при этом аналитическим путем технологических параметров процессов связана с установлением в первую очередь, полей температур, напряжений и скоростей деформаций. В режимах сверхпластичности можно оптимальным сочетанием силовых, кинематических и термических параметров прогнозировать изготовление полуфабрикатов с качественными структурными показателями при сравнительно невысоких деформирующих усилиях.

В конкретных технологических процессах наличие сверхпластичности можно установить лишь косвенным путем. Очаг деформации, как правило, не удается перевести полностью в сверхпластическое состояние из-за сильной неоднородности полей температур и скоростей деформаций. Изотермические условия в оптимальном, с точки зрения сверхпластичности, температурном режиме вносят определенные упрощения, поскольку ответственность за осуществление эффекта сверхпластичности перекладывается на поле скоростей деформаций. В соответствие установленным скоростным ограничениям в очаге

деформации появляются, помимо сверхпластической, области высокотемпературной ползучести и термопластичности. Сказанным подчеркивается сложность физических процессов в очаге деформации, разнообразие структурных состояний и, как следствие, параметров, характеризующих механические свойства материала деформируемой заготовки. Следовательно, что привлекаемое уравнение состояния должно удовлетворять условиям перехода материала в сверхпластичность, имеющих аналитическую формулировку. Это уравнение должно быть пригодным для описания не только закономерностей сверхпластического течения, но и пограничных состояний термопластичности и высокотемпературной ползучести.

Осуществление процессов обработки металлов давлением при соблюдении термомеханических параметров сверхпластичности обеспечивает заметное снижение энергосиловых характеристик при высоком ресурсе технологической пластичности. В металловедческом аспекте сохранение и формирование при сверхпластичности равноосной микроструктуры дает возможность достигать в конечном изделии оптимального сочетания физико-механических характеристик, повышения эксплуатационных параметров (усталостные и коррозионно-усталостные показатели) при резком снижении анизотропии механических свойств металлов.

Обобщая сказанное, можно утверждать, что использование сверхпластичности – уникального свойства многих конструкционных металлов и сплавов – создает предпосылки для применения технологических режимов обработки с пониженным сопротивлением деформированию, с высоким качеством конечного продукта и, естественно, с меньшими энергозатратами.

Развитие теории деформирования в режимах сверхпластичности с учетом неоднородности механических свойств и созданием на её основе научно обоснованных управляемых технологических процессов изотермического объемного формообразования является крупной научно-технической проблемой хозяйственного значения.

Цель работы – разработка стратегических основ математического моделирования процессов управления технологиями объемного формоизменения промышленных алюминиевых сплавов с использованием сверхпластичности.

Методы исследования обусловлены сформулированной целью и заключаются в построении оптимальных функций управления технологическими процессами, выполненными на основании постановки и решения соответствующих краевых задач. Для этого привлечены динамическая модель, пригодная для описания закономерностей высокотемпературной деформации промышленных алюминиевых сплавов, включая сверхпластичность, обобщенная с использованием соотношений теории упругопластических процессов малой кривизны. Анализ поля напряжений и скоростей перемещений в исследуемых процессах формоизменения осуществлен аналитически и численно путем совместного решения

дифференциальных уравнений равновесия, кинематических соотношений, условия несжимаемости, определяющих соотношений с учетом изменчивости граничных условий.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математические основы моделирования процессов течения металлов и сплавов.
2. Экспериментальные результаты по изучению закономерностей высокотемпературной деформации алюминиевых сплавов с условиями реализации эффекта сверхпластичности.
3. Анализ уравнения состояния и его обобщение на случай сложного напряженного состояния с привлечением тензорно-линейных соотношений теории упругопластических процессов малой кривизны; доказательности пригодности указанных соотношений для описания закономерностей деформации промышленных алюминиевых сплавов в широких температурно-скоростных диапазонах, включая интервалы проявления сверхпластических свойств.
4. Методология математического моделирования процессов объемного формоизменения, представляемая в виде постановки и решения двух связанных задач:
 - краевой изотермической задачи, в рамках которой устанавливаются энергосиловые и кинематические параметры процесса формоизменения в температурном режиме, не выходящем за пределы термического диапазона сверхпластичности;
 - задачи оптимизации с построением функции управления процессом формообразования.
5. Привлечение критерия оптимизации, заключающегося в выборе в качестве целевой функции объема зоны сверхпластичности, который при оптимальном сочетании силовых, термических и кинематических условий достигает максимума, причем в качестве внешней характеристики принята средняя скорость перемещения формообразующего инструмента, а расположение области сверхпластичности обусловлено конечной целью процесса – изготовлением полуфабриката с ультрамелкозернистой структурой.
6. Постановка и решение задач управления конкретными технологическими процессами:
 - изготовления тонкостенного цилиндрического изделия с днищем по схеме обратного выдавливания;
 - прямого прессования прямоугольной полосы в клиновидной матрице;
 - прямого прессования прутка кругового поперечного сечения в конической матрице;
 - изготовления прямоугольной полосы методом прессопрокатки.
7. Качественная адекватность разработанных теоретических положений конкретным технологическим приложениям.

Научная новизна работы состоит в развитии теории управления процессами объемного формоизменения алюминиевых сплавов, главной целью

которого является прогнозирование изготовления в установленных температурно-скоростных условиях изделий с качественными структурными показателями. Для этого:

- обоснована приемлемость определяющих соотношений в форме уравнений упругопластических процессов малой кривизны для описания закономерностей пластического течения в широком диапазоне температур и скоростей деформаций;

- представлено уравнение состояния зависимостью интенсивности напряжений от интенсивности скоростей деформаций, температуры, управляющих параметров и внутренних параметров состояния, полученное в рамках синергетического подхода и удовлетворяющее условиям перехода алюминиевых сплавов в сверхпластическое состояние;

- разработана методология математического моделирования управления изотермическими процессами объемного формообразования алюминиевых сплавов путем выделения и анализа очага пластической деформации с установлением зон сверхпластичности, высокотемпературной ползучести и термопластичности;

- исследована задача оптимизации процесса объемного формоизменения, заключающаяся в постановке и решении вариационной задачи максимизации объема зоны сверхпластичности в очаге деформации и управления расположением указанной зоны, преследуя конечную цель – изготовление полуфабриката с ультрамелкозернистой структурой;

- разработаны математические модели конкретных технологических операций с использованием сверхпластичности: изготовления тонкостенного цилиндрического изделия по схеме обратного выдавливания; прямого прессования прямоугольной полосы и прутка кругового сечения; прессопрокатки прямоугольной полосы.

Достоверность результатов обеспечена обоснованным использованием модельных представлений, допущений и ограничений, корректностью постановки задач, применением известных математических методов и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, полученными как лично автором, так и другими исследователями, а также практическим использованием результатов работы в промышленности.

Научная значимость и практическая ценность. Научная значимость работы состоит в развитии теории пластического объемного формоизменения при различных температурно-скоростных режимах, включая сверхпластичность. Выполненные теоретические исследования расширяют возможности и подходы к анализу и оптимизации процессов формоизменения горячей изотермической обработки давлением.

Реализация работы:

- разработаны методы решения задач управления рядом операций изотермического объемного формообразования полуфабрикатов из

промышленных алюминиевых сплавов с качественной ультрамелкозернистой структурой с подтверждением в виде технологических приложений;

– отдельные материалы научных исследований привлечены для применения в учебном процессе на кафедрах «Механика» КРСУ, КГУСТА;

– результаты использованы при подготовке кандидатских диссертаций, исследовательских курсовых и дипломных работ, а также в научно-исследовательской работе студентов.

Апробация работы. Результаты исследований доложены на Международной юбилейной научной конференции посвященной 15-летию образования Кыргызско-Российского Славянского Университета «Актуальные проблемы теории управления, топологии и операторных уравнений» (Бишкек, Кыргызстан 2008г.); на V Международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций» (Россия, г. Оренбург, 2008г.); на Международной конференции по распространению упругих и упругопластических волн посвященной 100летию со дня рождения академика, Героя Социалистического Труда Х.А. Рахматуллина (Кыргызстан, Бишкек, 2009г.); на научно-техническом семинаре «Теория, численные методы и математический эксперимент в газовой динамике» приуроченном к 75-летию юбилею проф. А.Н. Крайко (Россия, Москва, ЦИАМ, 2009г.); на VI Международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций» (Россия, г. Оренбург, 2010г.); на международной научной конференции «Рахматуллинские чтения» (Кыргызстан, г. Бишкек, 2011); на Международной научно-технической конференции «Современные металлические материалы и технологии (СММТ2011)» (Россия, г. Санкт-Петербург, 2011г.); на Международной конференции «Информационные технологии и математическое моделирование в науке, технике и образовании», посвященной 70-летию акад. А. Жайнакова (Кыргызстан, г. Бишкек, 2011г.); на Всероссийской конференции «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций» (Россия, г. Новосибирск, 2011г.); на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы механики сплошных сред», посвященной памяти члена-корреспондента НАН КР, д.ф.-м.н., профессора И.Б. Бийбосунова (Кыргызстан, г. Бишкек, 2012г.); на VII Международной конференции «Технология и моделирование материалов» (Израиль, г. Ариэль, 2012г.); на Международной научной конференции, посвященной памяти академика М.Я. Леонова «Современные проблемы механики сплошной среды» (Кыргызстан, г. Бишкек, 2012г.); на Международной научно-практической конференции «Информационные и инновационные технологии в образовании: состояние, проблемы и перспективы» (Кыргызстан, г. Бишкек, 2012г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 29 работ, среди них: монографий - 1; статей в центральной печати и зарубежных рецензируемых изданиях и сборниках, входящих в «Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Кыргызской Республике, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертаций на

соискание ученой степени доктора наук» - 14; статей в различных сборниках научно-технических трудов – 14. Общий объем – 21 печ. л., авторский вклад – 15 печ. л.

Работа выполнена при финансовой поддержке МО и Н КР (грант 05 - «Оценка динамики инженерных сооружений (плотин) в горных условиях и разработка методов моделирования механики конструкционных материалов»).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения и семи глав, выводов, списка использованных источников из 196 наименований, 1 приложения и включает 245 страниц основного текста, содержит 41 рисунок и 5 таблиц. Общий объем - 247 страниц.

Автор выражает глубокую благодарность научному консультанту доктору физико-математических наук, профессору Рудаеву Якову Исааковичу за оказанную помощь при выполнении работы, критические замечания, рекомендации и предложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается важность и целесообразность исследования задач оптимального управления процессами изотермического объемного формоизменения в термомеханических режимах сверхпластичности материалов, структура которых специально не готовится. Сформулирована актуальность темы, указана цель работы, охарактеризованы основные результаты, их научная и практическая ценность, раскрыта структура диссертации.

В первой главе рассмотрено современное состояние теории и задачи объемного формоизменения металлов в режимах сверхпластичности.

Вторая глава посвящена математической постановке задачи о развитии пластическом формоизменении, к которым относятся практически все процессы обработки металлов давлением.

В разделе 2.1 обсуждаются особенности технологий объемного типа с использованием сверхпластичности, их достоинства и недостатки. Основными преимуществами указанных технологий следует считать невысокие деформирующие усилия и связанную с формированием мелкого равноосного зерна изотропию свойств полученных изделий. Главным недостатком можно считать низкую скорость формоизменения, необходимую для проявления эффекта сверхпластичности.

В разделе 2.2 приводится система уравнений, привлекаемая для исследования изотермических объемных процессов обработки металлов давлением. Для этого предполагается, что в эйлеровом пространстве $\{x, y, z\}$ деформируемая заготовка с кусочно-гладкой границей Γ подвергается одному из видов формообразования под действием упругих тел инструмента.

Система включает дифференциальные уравнения равновесия

$$\sigma_{ij,j} + F_{ij} = 0; \quad (1)$$

– кинематические соотношения, устанавливающие связь между составляющими тензора скоростей деформаций $\dot{\epsilon}_{ij}$ и вектора скоростей перемещений v_i ,

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right); (i, j = x, y, z) \quad (2)$$

– условие несжимаемости в скоростях

$$\dot{\varepsilon}_{ii} = 0; \quad (3)$$

– определяющие соотношения в форме уравнений упругопластических процессов малой кривизны

$$\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0 = \frac{2\sigma_u}{3\dot{\varepsilon}_u} \dot{\varepsilon}_{ij}, \quad 3\sigma_0 = \sigma_{ii}; \quad (4)$$

причем $\sigma_u, \dot{\varepsilon}_u$ - соответственно интенсивности напряжений и скоростей деформаций, определяемые так

$$\sigma_u = \left(\frac{3}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ij} \right)^{1/2}; \quad \dot{\varepsilon}_u = \frac{2}{3} \left(\dot{\varepsilon}_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где $\sigma_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}$ - компоненты тензоров напряжений и скоростей деформаций;

– статические граничные условия

$$X_{vj} = \sigma_{ij} l_j, \quad (6)$$

где X_{vj} - составляющие внешних воздействий, l_j - направляющие косинусы нормали ν к поверхности контакта.

Условия трения на контактной поверхности представляются зависимостью

$$\tau_k = -\chi \tau_{\max}, \quad (7)$$

где τ_k - интенсивность сил трения на контакте матрицы и деформируемого материала, τ_{\max} - максимальное касательное напряжение, χ - коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально.

В разделе 2.3 приводятся ранее проведенные экспериментальные результаты по изучению при растяжении и сжатии закономерностей высокотемпературной деформации алюминиевых сплавов, представляемые детерминированными зависимостями напряжения пластического течения от температуры, степени и скорости деформации. Качественная картина, отражающая опытные данные по изучению сплавов АМг5, 1561, Д18Т, В48, АК4, АК6, АК8, приведена на рисунке 1, причем по осям координат отложены скорость деформации $\dot{\varepsilon}$, температура θ , напряжение σ . Установлено, что для исследованных сплавов существуют скоростные диапазоны, в которых изотермы «напряжение – скорость деформации» ($\sigma - \dot{\varepsilon}$ на рисунке 1а) отклоняются от монотонного характера с появлением точек бифуркации. Ниспадающие ветви этих диаграмм принимаются соответствующими проявлению сверхпластических свойств. Характерные признаки сверхпластичности – низкий уровень напряжений, высокая деформационная способность при растяжении отмечаются в упомянутых диапазонах. Сверхпластичность алюминиевых сплавов объясняется происходящей при нагреве и деформации динамической рекристаллизацией. Структурные изменения при этом заключаются в формировании в условиях неоднозначности

напряжения по отношению к скорости деформации (рисунок 1а) равноосной микроструктуры с очень мелким зерном, по размерам совпадающим с субзернами. Так создается структурная ситуация, которая с учетом аморфизации границ зерен позволяет прогнозировать реализацию механизма проскальзывания по границам зерен, характерного для сверхпластичности.

Термомеханические параметры, отвечающие диапазонам сверхпластичности изученных сплавов, представлены в таблице 1.

В разделе 2.4 сформулированы аналитические условия перехода материала в сверхпластическое состояние. Графическое представление на рисунке 1а отражает термический диапазон сверхпластичности $\theta \in [\theta_c^*, \theta_c^b]$, где θ_c^h, θ_c^b - соответственно нижняя и верхняя критические температуры. Скоростные режимы сверхпластичности ограничены значениями $\dot{\epsilon} \in [\dot{\epsilon}^n, \dot{\epsilon}^r]$ (рисунок 1б). Участки 1-2 и 4-5 диаграммы $\sigma - \dot{\epsilon}$ (рисунок 1б) отвечают метастабильным состояниям. Условиям перехода отвечают уравнение состояния (раздел 2.5), которое в интенсивностях напряжений и скоростей деформаций имеет вид

$$\sigma_u = \sigma^* \left[1 + m_0 \left(\frac{\dot{\epsilon}_u}{\dot{\epsilon}^*} - 1 \right)^3 + \beta \left(\frac{\dot{\epsilon}_u}{\dot{\epsilon}^*} - 1 \right) \right]. \quad (8)$$

Здесь $\beta = \beta(\xi)$ - управляющий параметр; $\xi = \frac{\theta - \theta_c^h}{\theta_c^b - \theta_c^h}$ - нормированная температура; $\sigma^* = \sigma^*(\xi), \dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}^*(\xi)$ - альтернативные внутренние параметры состояния, а $\beta = \beta(\xi), \sigma^* = \sigma^*(\xi), \dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}^*(\xi)$ удовлетворяют соответствующим кинетическим уравнениям ($\beta < 0$ при сверхпластичности).

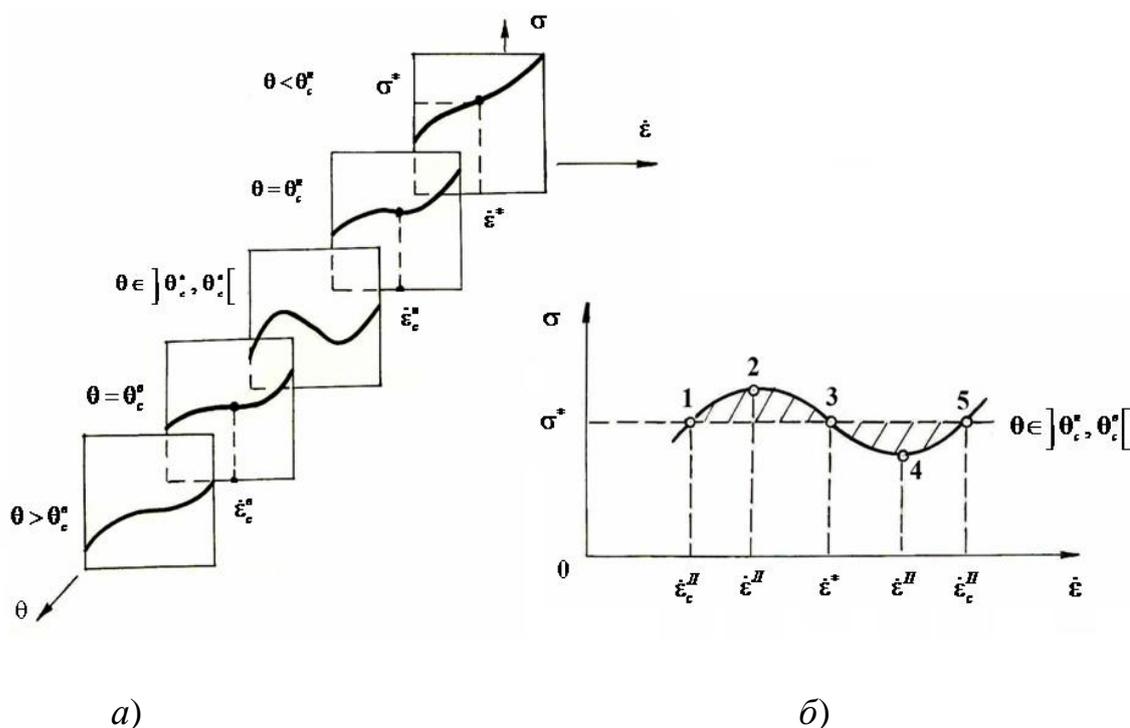


Рисунок 1 – Качественное представление экспериментальных зависимостей «напряжение – скорость деформации» в различных температурных диапазонах (а); к условиям перехода материала в сверхпластическое состояние (б)

Отметим, что уравнение (8) получено в рамках синергетического подхода. Поскольку в изотермических условиях параметры $\beta, \sigma^*, \dot{\epsilon}^*$ являются константами, то уравнение (8) можно записать в безразмерной форме

$$\sigma_u = 1 - m_0 - \beta + (3m_0 + \beta)\dot{\epsilon}_u - 3m_0\dot{\epsilon}_u^2 + m_0\dot{\epsilon}_u^3, \quad (9)$$

причем на скоростной диапазон сверхпластичности наложено следующее ограничение

$$1 - \left(-\frac{\beta}{3m_0}\right)^{1/2} \leq \dot{\epsilon}_u \leq 1 + \left(-\frac{\beta}{3m_0}\right)^{1/2}. \quad (10)$$

В третьей главе изложены сведения об основных операциях и специализированных видах обработки металлов давлением в температурных режимах сверхпластичности, а также проблемы оптимизации температурно-скоростных параметров технологических процессов формоизменения. Приведены и описаны типовые технологические схемы таких видов обработки металлов давлением, как изотермическая штамповка, прокатка и прессование алюминиевых сплавов. Представлены основные принципы разработки технологии процессов объемного формоизменения с использованием сверхпластичности.

В разделе 3.1 указан ряд особенностей, характеризующих алюминиевые сплавы в состоянии сверхпластичности, – повышенная деформационная способность, малое значение напряжения течения, практическое отсутствие деформационного упрочнения, слабое влияние сверхпластической деформации на микроструктуру, высокая релаксационная способность. Сопоставление указанных особенностей и известных ограничений, а также обобщение имеющегося опыта использования сверхпластичности позволяет выделить ряд технологических операций, реализация которых дает наибольший эффект. К таким процессам относятся штамповка малопластичных и труднодеформируемых металлов и сплавов на основе никеля, титана, магния, алюминия.

Основным достоинством изотермической штамповки является улучшение свойств сплавов за счет формирования требуемой структуры после пластической обработки, возможность сочетания пластической и термической обработки, достижение высокого качества поверхности и точных размеров изделий. Так, в термомеханических режимах сверхпластичности получен ряд осесимметричных полуфабрикатов из различных алюминиевых сплавов, причем на примере детали типа «стакан» (сплав АМг5) показаны преимущества точной изотермической объемной штамповки деталей сложной формы. При этом происходит снижение до минимума отходов металла, уменьшение усилия штамповки, затрат энергии на процесс деформации с достижением качественных структурных показателей.

Таблица 1. Термомеханические параметры сверхпластических
промышленных алюминиевых сплавов

Марка сплава	Исходное состояние	Вид деформации					
		растяжение			сжатие		
		θ, K	$\dot{\epsilon}, c^{-1}$	Примечание	θ, K	$\dot{\epsilon}, c^{-1}$	Примечание
AMg5	Деформированный	743...783	10^{-3}	СП	743...783	$10^{-2} \dots 10^{-1}$	СП
1561 (AMg61)	Деформированный	743...783	10^{-3}	СП	–	–	нет
1561 (AMg61)	Литой	–	–	нет	753...793	10^{-2}	СП
D18T	Деформированный	783...833	10^{-3}	СП	783...833	10^{-2}	СП
B48	Деформированный	–	–	нет	813...853	10^{-2}	СП
B95	Деформированный	–	–	нет	733...793	10^{-2}	СП
AK4	Деформированный	753...793	10^{-3}	СП	753...793	10^{-2}	СП
AK6	Деформированный	–	–	нет	723...763	10^{-2}	СП
AK8	Деформированный	723...763	10^{-3}	СП	723...763	10^{-2}	СП

В колонке $\dot{\epsilon}, c^{-1}$ приведены порядки скоростей деформаций по модулю; символ «СП» означает наличие сверхпластического состояния материала.

Выбору оптимальных параметров технологического режима прокатки в температурных режимах сверхпластичности посвящен *раздел 3.2*. В качестве примера оценки склонности литого алюминиевого сплава к сверхпластичности рассмотрена экспериментальная задача низкоскоростной продольной прокатки сплава 1561 в изотермических условиях. Оптимальным сочетанием энергосиловых и кинематических параметров сформирована в прокатанном металле наиболее благоприятная структура, приближающаяся к структуре ультрамелкого зерна, и, как следствие, наиболее рациональному сочетанию прочностных и деформационных характеристик, а также минимальной анизотропии механических свойств.

Проблемы оптимизации технологических параметров процесса прессования в режимах сверхпластичности и влияние температурно-скоростных условий прессования на структуру и свойства пресс-изделий обсуждены в *разделе 3.3*.

Основные закономерности теории прессования основываются на взаимосвязи между характером течения и напряженно-деформированным состоянием прессуемого металла по всему его объему. Данные закономерности позволяют обоснованно проектировать технологический процесс прессования, способствуют определению рациональной формы технологического инструмента, повышению качества продукции.

Общая формулировка задачи оптимизации при разработке технологии процесса формоизменения в режимах сверхпластичности и принципиальная структурная схема (рисунок 2) типового технологического процесса объемного формоизменения в состоянии сверхпластичности предложена в *разделе 3.4*.

В четвертой главе представлено решение задачи управления процессом прямого изотермического прессования полосы прямоугольного сечения в клиновидной матрице при температуре, не выходящей за пределы термического диапазона сверхпластичности. Предполагается, что очаг деформации занимает область, отнесенную к цилиндрической системе координат $\rho\alpha z$ (рисунок 3) и ограниченную поверхностями $\rho_0 = \rho_0(\alpha)$, $\rho_k = \rho_k(\alpha)$. В основу постановки задачи (*раздел 4.1*) положено исследование течения металла в коническом сходящемся канале, сведенном к радиальному (В.В. Соколовский, Н.Н. Малинин) и позволяющему упростить систему уравнений (1) – (7). В координатной форме вместо (1) – (7) будем иметь:

дифференциальные уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\rho\alpha}}{\partial \alpha} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\alpha}{\rho} = 0; \quad \frac{\partial \tau_{\rho z}}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_\alpha}{\partial \alpha} + \frac{2\tau_{\rho\alpha}}{\rho} = 0; \quad (11)$$

кинематические соотношения и условие несжимаемости

$$\dot{\epsilon}_\rho = \frac{\partial v_\rho}{\partial \rho}; \quad \dot{\epsilon}_\alpha = \frac{v_\rho}{\rho}; \quad \dot{\gamma}_{\rho\alpha} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial v_\rho}{\partial \alpha}; \quad \dot{\epsilon}_\rho + \dot{\epsilon}_\alpha = 0; \quad (12)$$

определяющие соотношения

$$\sigma_p - \sigma_0 = \frac{2\sigma_u}{3\dot{\epsilon}_u} \dot{\epsilon}_p; \quad \sigma_\alpha - \sigma_0 = \frac{2\sigma_u}{3\dot{\epsilon}_u} \dot{\epsilon}_\alpha; \quad \tau_{\rho\alpha} = \frac{\sigma_u}{3\dot{\epsilon}_u} \dot{\gamma}_{\rho\alpha}; \quad (13)$$

с уравнением состояния в виде (9).

Совместным рассмотрением системы уравнений (11) – (13) задача сведена (раздел 4.2) к определению разрешающей функции $K = K(\alpha)$ из линейного дифференциального уравнения эйлерового типа

$$K''' + 4K' = 0. \quad (14)$$

Удовлетворив два граничных условия

$$\tau_{\rho\alpha}|_{\alpha=0} = 0; \quad \tau_{\rho\alpha}|_{\alpha=\alpha^*} = -\chi \tau_{\max}|_{\alpha=\alpha^*}, \quad (15)$$

для функции $K = K(\alpha)$ получаем

$$K(\alpha) = \frac{C_2}{2} (\psi - \cos 2\alpha), \quad (16)$$

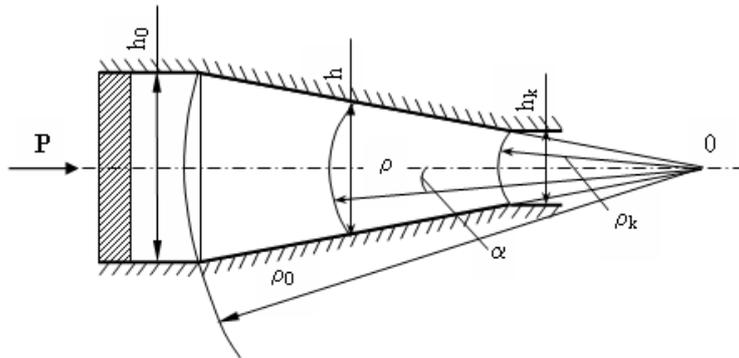


Рисунок 3 – Схема процесса прессования

причем

$$\psi(\alpha^*, \chi) = \cos 2\alpha^* + \frac{\sqrt{1-\chi^2}}{\chi} \sin 2\alpha^*, \quad (17)$$

а $\alpha = \alpha^*$ - угол наклона матрицы.

Если учесть, что $\rho_0 = \rho_0(\alpha)$, $\rho_k = \rho_k(\alpha)$ являются уравнениями поверхностей разрыва скоростей (раздел 4.3), то, используя представления о секундном объеме материала на входе в матрицу, можно определить недостающую постоянную интегрирования C_2 и в окончательной форме установить:

скорость радиального перемещения

$$v_\rho = \frac{v_0}{2\bar{\psi}\rho} (\sin 2\alpha - \psi); \quad (18)$$

функции $\rho_0 = \rho_0(\alpha)$, $\rho_k = \rho_k(\alpha)$

$$\rho_0(\alpha) = \frac{\sin^2 \alpha - \psi\alpha}{2\bar{\psi} \sin \alpha}; \quad \rho_k = \frac{\sin^2 \alpha - \psi\alpha}{2\Lambda\bar{\psi} \sin \alpha}; \quad (19)$$

скорости деформаций

$$\dot{\varepsilon}_p = \frac{v_0}{2\bar{\psi}\rho^2} \left(\psi - \sin 2\alpha \right); \dot{\varepsilon}_\alpha = -\frac{v_0}{2\bar{\psi}\rho^2} \left(\psi - \sin 2\alpha \right); \dot{\gamma}_{p\alpha} = -\frac{v_0}{\bar{\psi}\rho^2} \cos 2\alpha; \quad (20)$$

где v_0 - скорость перемещения пресс-шайбы в контейнере (рисунок 3), Λ - вытяжка (отношение площадей сечения на входе и выходе из матрицы), причем функция $\bar{\psi}(\alpha^*, \chi)$ определяется формулой

$$\bar{\Psi}(\alpha^*, \chi) = \frac{\alpha^*}{\psi\alpha^* - 1 + \cos\alpha^*}, \quad (21)$$

а для $\psi(\alpha^*, \chi)$ получено (17).

Интегрированием уравнений (11) устанавливается (раздел 4.4) поле напряжений. Полагая далее, что усилие деформирования на выходе из матрицы обращается в ноль, приходим к кубическому уравнению вида

$$a_0(\alpha^*) + a_1(\alpha^*)\mu + a_2(\alpha^*)\mu^2 + a_3(\alpha^*)\mu^3 = 0, \quad (22)$$

причем коэффициенты равны $a_i(\alpha^*)$ представляются интегралами, взятыми с привлечением численных методов, а параметр μ представляется выражением

$$\mu = v_0\Lambda^2\bar{\psi}/\sqrt{3}. \quad (23)$$

Таким образом, параметр μ зависит от средней скорости перемещения металла в контейнере v_0 , вытяжки, условий на контакте деформируемого металла и стенки матрицы $\bar{\psi}$ (21).

Раздел 4.5 посвящен вычислению усилия прессования, для которого получаем

$$F = \frac{2\sqrt{3}}{3\bar{\psi}} \left[-m_0 - \beta \bar{b}_0(\alpha^*) - \left(m_0 + \beta \bar{b}_1(\alpha^*)\bar{\mu} + 3m_0b_2(\alpha^*)\bar{\mu}^2 + m_0b_3(\alpha^*)\bar{\mu}^3 \right) \right], \quad (24)$$

где $\bar{\mu} = \mu/\Lambda^2$, а для определения коэффициентов $b_i(\alpha^*)$ разработаны численные процедуры.

В разделе 4.6 предлагается подход к решению задачи оптимизации процесса, конечной целью которого является изготовление полосы с ультрамелкозернистой структурой.

Трудности, встречаемые при математической формулировке и решении технологических задач объемного формоизменения с применением сверхпластичности, обсуждены в первых трех главах. Поэтому представляется целесообразной выработка технологической стратегии с обеспечением оптимальности некоторых критериев. Такими критериями, например, могут быть себестоимость продукции, расход материала, производительность, доход от реализации продукции и т.п. Другой подход состоит в том, что оптимизируемые параметры обусловлены непосредственно технологическим процессом и условно разделены на три группы. В первой группе рассматриваются задачи выбора оптимальной температуры предварительного нагрева заготовок, оптимальной формы инструмента, т.е. совокупность задач, параметры оптимизации которых могут быть целенаправленно изменены до начала процесса. Вторая группа оптимизирует параметры деформирования, соответствующие оптимизации по управляемым переменным.

В третью группу входят задачи, сочетающие требования первой и второй групп.

Следует отметить, что оба подхода могут считаться системными, поскольку, в частности, позволяют сформулировать и решить задачу оптимизации и управления на стадии проектирования с использованием модели процесса.

Отметим, что из множества общепризнанных критериев оптимальности выбирается лишь один или априорно задается путь приведения их к единственному критерию.

Использование сверхпластичности способствует выдвиганию нетрадиционных критериев оптимизации. Так, на изменение силовых, термических и кинематических параметров процесса очаг деформации откликается изменением объема и расположения области сверхпластичности, которая, как отмечено выше, составляет часть очага деформации. Иными словами, при таком подходе оптимизационная задача разбивается на две части. В первой из них определению подлежат условия, при которых объем зоны сверхпластичности будет максимальным. Вторая сторона задачи состоит в обеспечении оптимального расположения указанной зоны в очаге деформации в зависимости результата процесса.

В рассматриваемой задаче в качестве целевой функции выбираем объем зоны сверхпластичности в очаге деформации. Пусть указанный объем (W^{cn}) при оптимальном сочетании силовых, термических и кинематических условий достигает максимума

$$W^{cn} = \iiint_{(W)} dW \rightarrow \max. \quad (25)$$

В цилиндрических координатах вместо (25) можем записать

$$2 \int_0^{\alpha^*} \rho^2 d\alpha \rightarrow \max. \quad (26)$$

К условию (25) добавим ограничения на сверхпластическую область по скоростям деформаций (10).

Неравенство (10), можно записать в виде

$$\rho_n \leq \rho \leq \rho_n, \quad (27)$$

где положено

$$\rho_n = \left\{ \left[- \frac{\beta}{3m_0} \sqrt{4K^2 + K'^2} - \left(\frac{4K^2 + K'^2}{3} \right)^{1/2} \right]^{1/2} \right. ; \\ \left. \left[+ \frac{\beta}{3m_0} \sqrt{4K^2 + K'^2} - \left(\frac{4K^2 + K'^2}{3} \right)^{1/2} \right]^{1/2} \right\}. \quad (28)$$

Здесь через ρ_n, ρ_n обозначены соответственно нижнее и верхнее значения нормированного радиуса ρ , ограничивающие область сверхпластичности, $K = K(\alpha)$ - разрешающая функция.

Для произвольного значения $\rho \in [\rho_n, \rho_n]$ задача сводится к исследованию функционала

$$\Phi = \int_0^{\alpha^*} (K^2 + K'^2)^{1/2} d\alpha. \quad (29)$$

Интегрированием соответствующего (29) уравнения Эйлера получаем

$$K(\alpha) = \frac{C}{2} \cos^{-1} 2\alpha. \quad (30)$$

Из формулы (30) следует ограничение на угол $\alpha = \alpha^* = \pi/4$, образующего в радиальном направлении границу области сверхпластичности.

Перейдем теперь ко второй части оптимизационной проблемы, связанной с отысканием рационального расположения сверхпластической области. При этом будем предполагать, что конечной целью процесса прессования является получение высококачественной полосы с ультрамелкозернистой структурой. Поэтому сверхпластическую зону будем стремиться поместить так, чтобы исключить на выходе из матрицы скоростные условия, выходящие за рамки диапазона сверхпластичности. Используя при этом соотношения (16), (19), (28), определяем условие пересечения поверхностей $\rho_k(\alpha)$, $\rho_n(\alpha)$, которое позволяет установить оптимальное значение параметра $\mu = \mu_{\text{опт}}$ (а, следовательно, оптимальной скорости перемещения металла в контейнере) в виде

$$\mu_{\text{опт}} = \frac{(\sin^2 \alpha^* - \psi \alpha^*)^{1/2} + (\beta/3m_0)^{1/2}}{4(1 + \psi^2 - 2\psi \sin \alpha^*)^{1/2}}. \quad (31)$$

На рисунке 4 представлены графики зависимостей усилия прессования от угла наклона матрицы α^* при оптимальной скорости перемещения инструмента v_0 . Анализ графических зависимостей, приведенных на рисунке 4, показывает, что усилия прессования с введением оптимально расположенной области сверхпластичности снижаются по сравнению с полученными значениями из

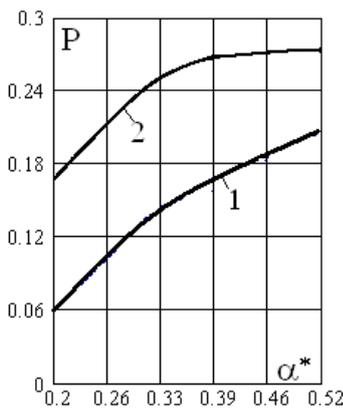


Рисунок 4 —
Зависимость усилия
прессования от угла α^*
при $\Lambda = 1,5$; $\chi = 0,3$; $\beta = -$
 $\beta = -0,1561$; кривая 2
соответствует усилиям
прессования без
оптимизации

решения краевой задачи. Увеличение Λ , при прочих равных условиях означающее удлинение конической части матрицы, приводит к значительному возрастанию усилия прессования. Так, усилия при $\Lambda = 1,5$ возрастают примерно на порядок для более длинных матриц. Введение же сверхпластичности снижает усилия в 3–4 раза.

Укажем, что конкретные расчеты проводились для параметров, соответствующих сплаву АМг5. Качественно решение не изменится и для других сплавов, проявивших сверхпластические свойства при сжатии. Кроме того, показано, что удовлетворение только температурных условий реализации сверхпластичности без учета скоростного фактора не может отвечать принятой цели изготовления продукта с качественной ультрамелкозернистой структурой.

В пятой главе приводится аналитическое

решение задачи по определению силовых и кинематических параметров технологической операции изготовления тонкостенного цилиндрического изделия с днищем по схеме обратного выдавливания. Предполагается, что процесс формообразования алюминиевого полуфабриката осуществляется в температурных режимах сверхпластичности.

В разделе 5.1 рассмотрена постановка задачи. Считается, что в процессе операции происходит истечение металла из замкнутой полости (матрицы) диаметром $2R$ (рисунок 5) в направлении, встречном движению пуансона диаметром $2R_0$, в зазор между пуансоном и матрицей. При обратном выдавливании, как правило, не весь объем заготовки находится в пластическом состоянии. Недеформируемая часть заготовки, расположенная под торцом пуансона, принимается неподвижной относительно стенок матрицы. Решение задачи осуществляется в предположении, что в заготовку, находящуюся в цилиндрической матрице, внедряется цилиндрический пуансон с плоским торцом (рисунок 5). Связку «матрица–пуансон» отнесем к цилиндрической системе координат ρ, z , где $\rho = r/R$; $z = \bar{z}/R$; $\rho_0 = R_0/R$; $h^* = \bar{h}^*/R$,

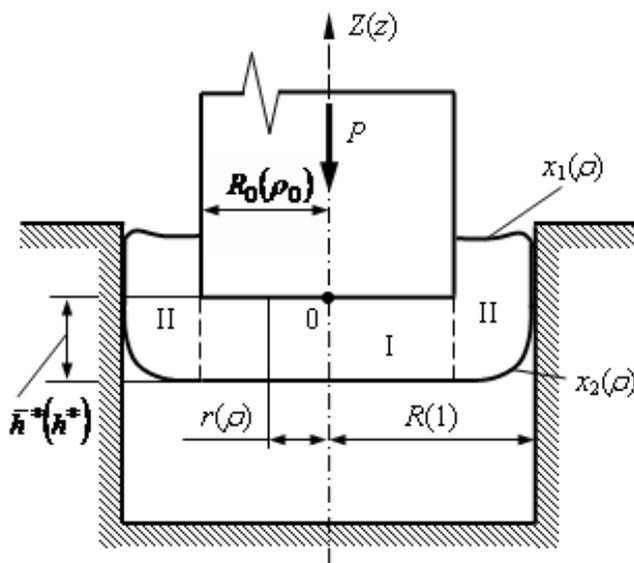


Рисунок 5 —Схема обратного выдавливания

причем r – радиальная координата; \bar{h}^* – глубина очага пластической деформации, а ось $0\bar{z}$ совмещена с продольной осью пуансона. Глубина очага пластической деформации \bar{h}^* считается меньше дна выдавливаемого стакана. Очаг пластической деформации, представлен в виде двух областей (рисунок 5). Первая (I) из этих областей находится под торцом пуансона и геометрически в радиальном направлении удовлетворяет условиям $0 \leq \rho \leq \rho_0$, в вертикальном – $h^* \leq z \leq 0$. Для второй (II) области (кольцевой) имеем в радиальном направ-

лении ограничение в форме $\rho_0 \leq \rho \leq 1$, в вертикальном – $x_2(\rho) \leq z \leq x_1(\rho)$, причем $x_1(\rho)$, $x_2(\rho)$ являются уравнениями поверхностей, ограничивающих область II.

Для решения задачи вводятся следующие правдоподобные предположения (С.Г. Овчинников), согласно которым аналитически скорости вертикальных перемещений металла v_z^I и v_z^{II} представляются функциями вида

$$v_z^I = -v_0 \varphi(z); \quad v_z^{II} = b \left[1 - \psi(\rho) \right] \quad (32)$$

где v_0 – скорость перемещения инструмента; b – постоянная; $\varphi(z)$, $\psi(\rho)$ – функции, подлежащие определению.

В рамках предположений (32) исследована система уравнений (1) – (7), (9). Установлено (раздел 5.2), что в области I составляющие напряжений, скоростей перемещений и деформаций будут найдены, если известна функция $\varphi = \varphi(z)$, удовлетворяющая следующему нелинейному дифференциальному уравнению

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1 - m_0 - \beta}{v_0} + m_0 + \beta \varphi' - 3m_0 v_0 \varphi'^2 + m_0 v_0^2 \varphi'^3 \right] + \\ & + 4 \left[m_0 v_0^2 \varphi'^3 - 3m_0 v_0 \varphi'^2 - \frac{1 - m_0 - \beta}{v_0} \right] \varphi' + \varphi'' + \varphi''' + \\ & + \left[\frac{10}{3} \cdot \frac{1 - m_0 - \beta}{v_0} + m_0 v_0 \varphi'^2 + \frac{7}{3} m_0 v_0^2 \varphi'^3 \right] \varphi''^3 = 0. \end{aligned} \quad (33)$$

Интеграл уравнения (33) отыскивается при выполнении граничных условий

$$\varphi(0) = -1; \quad \varphi(-h^*) = 0; \quad \varphi'(h^*) = 0, \quad (34)$$

причем последнее условие (34) имеет место, если положить

$$\varphi''(-h^*) = 0. \quad (35)$$

Полагая, что уравнение (33) совместно с уравнением (34), (35) составляют двухточечную задачу Коши, ищем частное решение (33) в форме

$$\varphi(z) = -\left(1 + \frac{z}{h^*}\right)^4. \quad (36)$$

Решение (35) находится в соответствии с (33), если отношение скорости перемещения пуансона к глубине очага пластической деформации является положительным корнем кубического уравнения

$$568 \left(\frac{v_0}{h^*}\right)^3 + 138 \left(\frac{v_0}{h^*}\right)^2 + m_0 + \beta \left(\frac{v_0}{h^*}\right) - (-m_0 - \beta) = 0, \quad (37)$$

где, как и выше, m_0 - постоянная материала, а β - управляющий параметр ($\beta < 0$ при сверхпластичности).

В разделе 5.3 приведена сводка формул для определения компонент скоростей деформаций и напряжений. В напряжения входит неизвестная пока функция $f(z)$, которая устанавливается из равенства друг другу составляющих радиальных напряжений на границе областей I и II.

В разделе 5.4 показано, что с использованием второго условия (32) и системы уравнений (1) – (7), (9) для нахождения функции $\psi(\rho)$ получено дифференциальное уравнение вида

$$\psi''' + \frac{\psi''}{\rho} - \frac{\psi'}{\rho^2} = 0. \quad (38)$$

Интеграл уравнения (38) с удовлетворением граничных условий на нижнем и верхнем контурах области II, а также на контакте деформируемого материала и стенки матрицы с учетом неразрывности скоростей радиальных перемещений на границе зон будет равен

$$\psi(\rho_0) = \frac{2\chi}{\sqrt{1-\chi^2}} \left\{ \left[1 - C(\rho_0) \frac{\rho_0^2}{2} + C(\rho_0) \ln \rho_0 - \left\{ \frac{\rho_0^2}{2} [1 - C(\rho_0)] + C(\rho_0) \right\} - \frac{h^*}{2\chi} \sqrt{1-\chi^2} \right] \right\}, \quad (39)$$

где для $C(\rho_0)$ имеем

$$C(\rho_0) = \frac{1 + 2\rho_0^3 - 3\rho_0^2}{7 + 2\rho_0^3 - 3\rho_0^2 - 6\rho_0 + 6 \ln \rho_0}. \quad (40)$$

Далее записаны (раздел 5.5) формулы для определения компонент напряжений и скоростей деформаций в областях I и II.

В разделе 5.6 получено выражение для деформирующего усилия, минимизируя которое по глубине очага деформации, приходим к трансцендентному уравнению относительно h^* вида

$$\begin{aligned} & 2 \left(-m_0 - \beta \left(\frac{\rho_0}{h^*} \right)^4 \lambda^{-\frac{3}{2}}(\rho_0) \right) - \frac{10}{3} \times \left(-m_0 - \beta \left(\frac{\rho_0}{h^*} \right)^2 \lambda^{-\frac{1}{2}}(\rho_0) \right) - 24m_0 \times \\ & \times \left(\frac{v_0}{h^*} \right)^2 \left(\frac{\rho_0}{h^*} \right)^4 \lambda^{-\frac{1}{2}}(\rho_0) + \frac{20}{9} \left(-m_0 - \beta \lambda^{\frac{1}{2}}(\rho_0) \right) + 24m_0 \left(\frac{v_0}{h^*} \right)^2 \left(\frac{\rho_0}{h^*} \right)^2 \lambda^{\frac{1}{2}}(\rho_0) - \\ & - 24m_0 \left(\frac{v_0}{h^*} \right)^2 \left(\frac{\rho_0}{h^*} \right)^4 \lambda^{\frac{1}{2}}(\rho_0) - 96m_0 \left(\frac{v_0}{h^*} \right)^3 \left(\frac{\rho_0}{h^*} \right)^2 + \frac{3}{2} \left(m_0 + \beta \left(\frac{v_0}{h^*} \right) \times \right. \\ & \times \left. \left(\frac{\rho_0}{h^*} \right)^4 - \frac{40}{9} \left(-m_0 - \beta \right) + \left(1 + \frac{1}{3\rho_0^2} \right) \left[\sqrt{3}m_0 \left(\frac{v_0}{h^*} \right)^2 \left(\frac{\rho_0}{h^*} \right)^2 K^{-\frac{1}{2}}(\rho_0) - \frac{\rho_0^4}{(-\rho_0^2)^{\frac{3}{2}}} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{m_0}{2} \left(\frac{v_0}{h^*} \right)^3 \left(\frac{\rho_0}{h^*} \right)^2 \frac{\rho_0^6}{(-\rho_0^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \right) = 0. \quad (41) \end{aligned}$$

Здесь v_0/h^* есть решение уравнения (37), а для $K(\rho_0)$ и $\lambda(0, \rho_0)$ имеем зависимости

$$K(\rho_0) = 3 + \frac{1}{\rho_0^4} + \frac{2\chi}{\sqrt{1-\chi^2}} \times \left\{ [1 - C(\rho_0) \frac{\rho_0^2}{2} + \frac{C(\rho_0)}{\rho_0}] \right\}; \quad \lambda(0, \rho_0) = 4 + 3 \left(\frac{\rho_0}{h^*} \right)^2. \quad (42)$$

Результаты конкретных вычислений, осуществленные для сплава АМг5, представлены на рисунке 6 в виде эпюр распределения удельного давления под торцом пуансона при различных радиусах инструмента, температурах и контактных условиях.

В этом же разделе получено уравнение, описывающее нижнюю границу области II очага пластической деформации (рисунок 5), в форме:

$$\begin{aligned} x_2(\rho_0) &= \frac{2\chi}{\sqrt{1-\chi^2}} \cdot \frac{1}{1-\rho^2} \left\{ \left[\frac{3}{2} C(\rho_0) + \frac{\rho_0^2}{2} [1 - C(\rho_0)] \right] \rho^2 - \rho_0^2 - C(\rho_0) \right\} \times \\ & \times \left[\rho^2 \ln \rho - \rho_0^2 \ln \rho_0 - \frac{1 - C(\rho_0) \rho^4 - \rho_0^4}{4} \right] \frac{\sqrt{1-\chi^2}}{2\chi} h^*, \quad (43) \end{aligned}$$

где $C(\rho_0)$ определяется формулой (40), а глубина очага пластической деформации h^* удовлетворяют уравнению (41) при $\rho \in \bar{\rho}_0, 1$

В рассматриваемой задаче максимизация объема зоны сверхпластичности в очаге деформации (раздел 5.7) сводится к исследованию функционала

$$J = \int_{z_1}^z [2\varphi'^2(z) + \rho^2 \varphi''^2(z)]^{1/2} dz, \quad (44)$$

для которого уравнение Эйлера трансформируется к следующему нелинейному дифференциальному уравнению

$$\varphi'^2(z)\varphi^{IV}(z) + \varphi''^3(z) - 2\varphi'(z)\varphi''(z)\varphi'''(z) = 0, \quad (45)$$

причем z_1 – абсцисса верхней скоростной границы зоны сверхпластичности.

Частное решение уравнения (45) представлено в виде:

$$\varphi(z) = -a_0 \exp \frac{K_0 z}{h^*}, \quad (46)$$

где a_0, K_0 – параметры, определяемые из граничных условий.

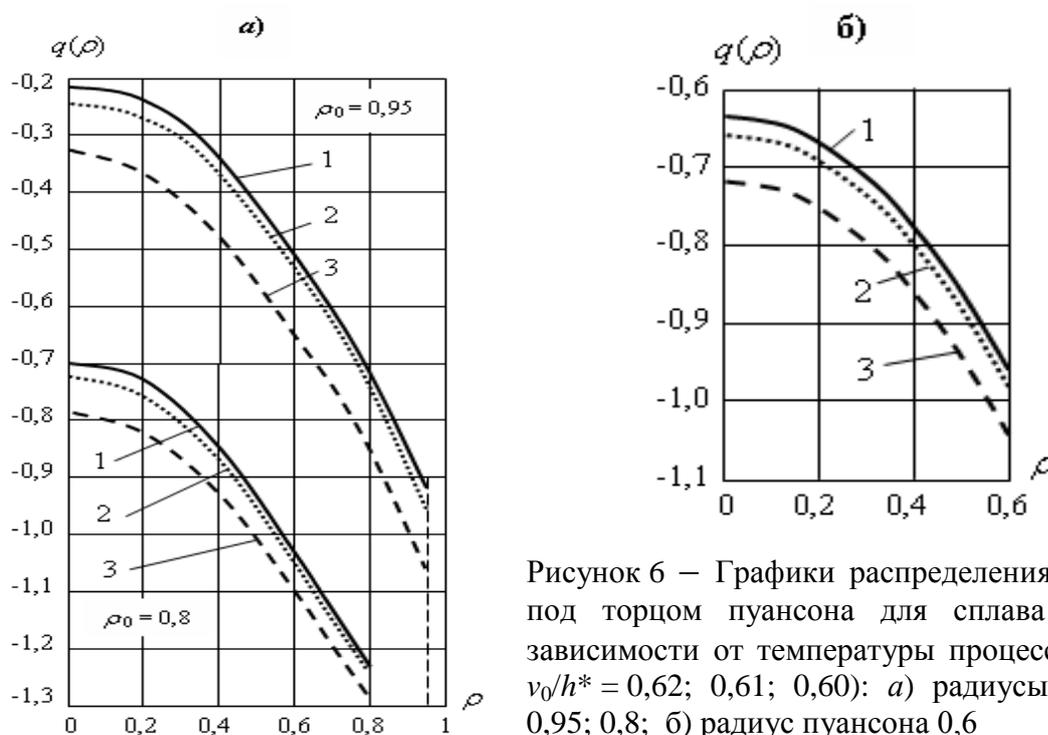


Рисунок 6 – Графики распределения давления под торцом пуансона для сплава АМг5 в зависимости от температуры процесса (1,2,3 ~ $v_0/h^* = 0,62; 0,61; 0,60$): а) радиусы пуансона 0,95; 0,8; б) радиус пуансона 0,6

Совместное рассмотрение решений (36) и (46) с привлечением (10) позволило установить границы области сверхпластичности в зависимости от температуры процесса. При этом показано, что объем зоны сверхпластичности возрастает по мере приближения к середине термического диапазона сверхпластичности и находится в прямой зависимости от диаметра инструмента, с увеличением которого указанный объем увеличивается.

Опытные данные (раздел 3.1) по изготовлению тонкостенного цилиндра с дном из сплава АМг5 в предлагаемых режимах подтверждают формирование в изделии структуры, близкой к ультрамелкозернистой.

В шестой главе исследуется перспективная с точки зрения управления и оптимизации операция прессопрокатки алюминиевого листа в режимах сверхпластичности.

Прессопрокатка объединяет преимущества прессования и продольной прокатки, практически устраняя недостатки обеих составляющих. За счет уменьшения величины пассивных сил трения и сохранения схемы объемного напряженного состояния заметно снижается по сравнению с обычным прессованием усилие, требуемое для выдавливания металла из контейнера. Схематично процесс прессопрокатки листа представлен на рисунке 7.

Преимущества прессопрокатки предусматривают отсутствие зон отставания и опережения (*раздел 6.1*). Заталкивание металла в валки осуществляется прессовой составляющей F , а весь очаг деформации чаще всего превращается в зону опережения. Поскольку вращение валков и движение пуансона осуществляется от одного привода, то необходимый угол поворота валков за рабочий ход будет минимальным, соответствующим ходу пуансона на длину заготовки или даже меньше.

Исследование осуществлено с привлечением системы уравнений (9), (11) – (13). Установлен вид разрешающей функции (*раздел 6.2*). Проанализированы

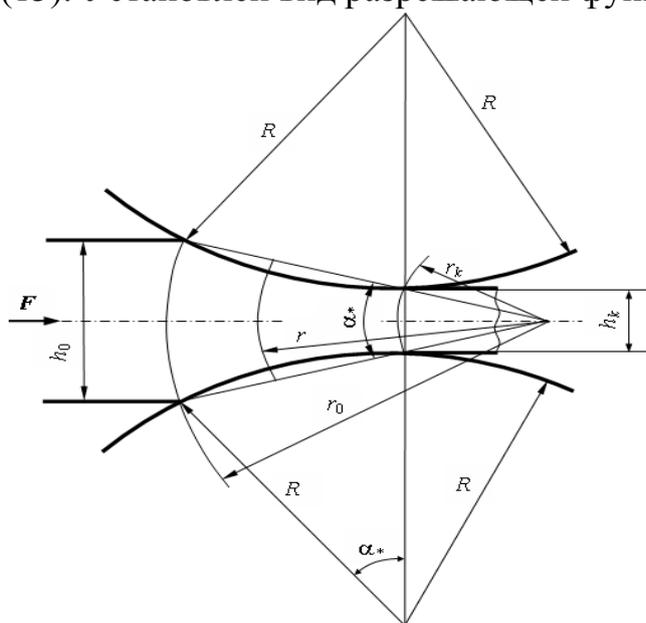


Рисунок 7 – Схема прессопрокатки листа

поля скоростей перемещений и деформаций (*раздел 6.3*) и напряжений (*раздел 6.4*).

В *разделе 6.5* устанавливаются кинематические и силовые параметры процесса прессопрокатки. Показано, что величина степени обжатия $\Lambda = h_0/h_k$ (рисунок 7) обусловлена углом захвата α^* и диаметром валков R . Записаны формулы для определения скорости подачи материала в валки v_0 , усилия прессования F и давление на валки q .

Первая часть оптимизационной задачи сводится к максимизации функционала (29) и, как следствие, к вычислению ограничения на угол захвата $\alpha^* = \alpha^{**} = \pi/4$. Преследуя ту же цель, как и в выше рассмотренных задачах (главы 4, 5) – получение изделия с ультрамелкозернистой структурой, определяем среднюю скорость перемещения материала на входе в валки. Имеем:

$$v_0 = v_{\text{опт}} = \frac{\left(\psi \alpha^* - \sin \alpha^* \right)^2 \left[1 + \left(\beta / 3m_0 \right)^{1/2} \right]}{\left(\psi^2 - 2\psi \sin \alpha^* \right)^{1/2} \sin^2 \frac{\alpha^*}{2}}, \quad (47)$$

где

$$\psi(\alpha^*, \chi) = \frac{1}{\chi} \left(-\chi^2 \right)^{\frac{1}{2}} \sin \alpha^* + \cos \alpha^*; \quad \bar{\psi} = \frac{\alpha^*}{\alpha^* \psi - \sin \alpha^*}. \quad (48)$$

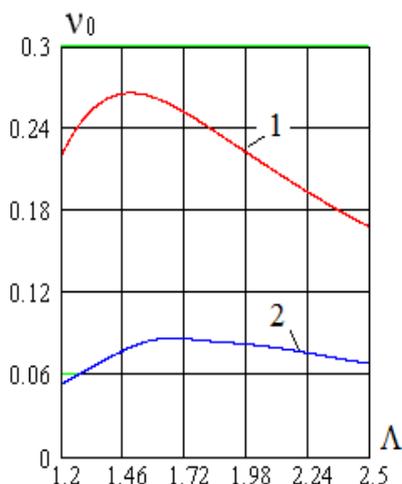


Рисунок 8 – Зависимость оптимальной скорости прессопрокатки от степени обжатия полосы

оптимальному ($\rho = r/R$, рисунок 7).

Проведенные для сплава АМг5 расчеты показывают, что для обеспечения на выходе из валков высококачественного алюминиевого листа скорость подачи металла требуется снизить в 2–2,5 раза (рисунок 7). При этом усилие подачи на валки снижается при средних степенях обжатия в 5–6 раз; а давление на валки – в 2,5–3 раза.

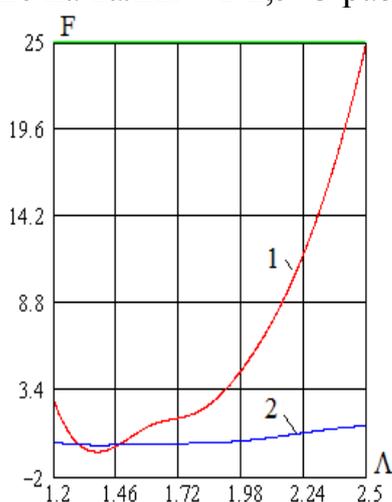


Рисунок 9 – Зависимость усилия прессопрокатки от степени обжатия полосы: 1- вне скоростного режима сверхпластичности; 2- в скоростных условиях сверхпластичности

На рисунке 8 приведен график зависимости скорости v_0 от степени обжатия Λ , на которой кривые 1 и 2 построены при одинаковой температуре, не входящей за интервал сверхпластичности. При этом кривая 1 получена без учета оптимизации, а кривая 2 – на основании формулы (47).

На рисунке 9 представлены графики зависимости $F=F(\Lambda)$, имеет место соответствие скоростям v_0 на рисунке 8.

Аналогичная ситуация характерна и для давления, передаваемого на валки (рисунок 10). Здесь также кривая 1 соответствует решению без оптимизации, а кривая 2 -

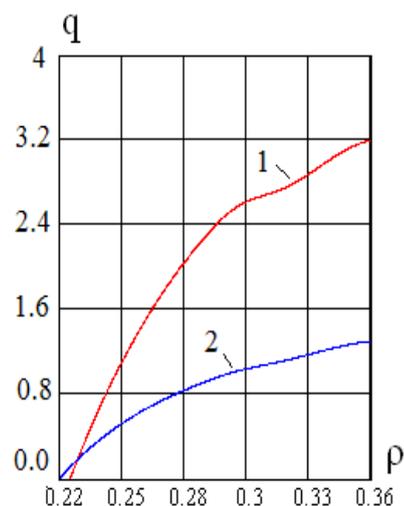


Рисунок 10 – Зависимость давления на валки от текущего радиуса: 1- вне скоростного режима сверхпластичности; 2- в скоростных условиях сверхпластичности

В главе 7 рассматривается задача управления технологическим процессом прямого прессования прутка круглого поперечного сечения в

конической матрице. Как и выше, соблюдаются изотермические условия из температурного диапазона сверхпластичности.

В основу постановки задачи (*раздел 7.1*) положено исследование течения металла в коническом сходящемся канале (В.В. Соколовский, Н.Н. Малинин). Схематично процесс прессования показан на рисунке 11, причем для решения

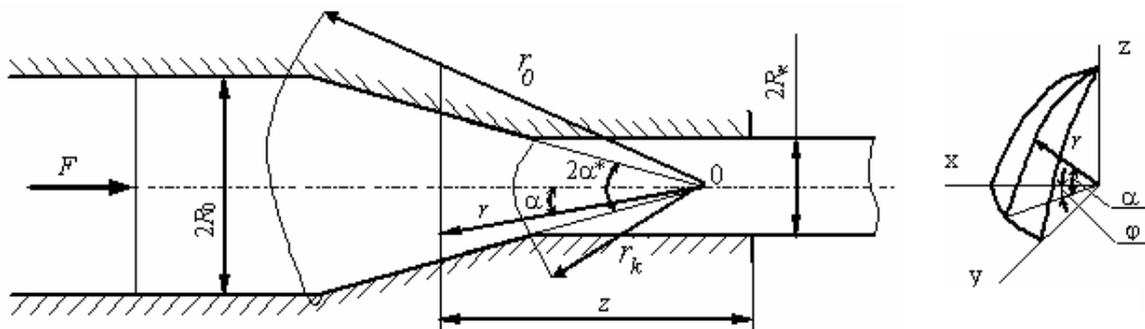


Рисунок 11 – Схема прессования кругового прутка

задачи принята сферическая система координат $r\alpha\varphi$. Записана система исходных уравнений. Показано (*раздел 7.2*), что составляющие напряжений, скоростей перемещений и деформаций будут определены, если установлен вид разрешающей функции $K = K(\alpha)$. Указанная функция является интегралом следующего нелинейного дифференциального уравнения

$$K'''(\alpha) + K''(\alpha)\text{ctg}(\alpha) + K'(\alpha)\left(6 - \frac{1}{\sin^2 \alpha}\right) = 0. \quad (49)$$

Уравнение (49) двойной подстановкой сводится к гипергеометрическому уравнению, имеющему решение в квадратурах. После вычисления интегралов с учетом граничных условий получено

$$K(\alpha) = \frac{3v_0}{2\bar{\psi}} \left(\sin^2 \alpha + \bar{\psi} \right) \quad (50)$$

где

$$\bar{\psi} = \frac{1}{3\chi} \left(-\chi^2 \sin^2 2\alpha^* - \sin^2 \alpha^* \right); \quad \bar{\psi} = \frac{\sin \alpha^*}{1 - \cos \alpha^*} (3\bar{\psi} + \sin^2 \alpha^*), \quad (51)$$

α^* - угол наклона матрицы (рисунок 10).

В этом же разделе приведены формулы для определения скорости радиального перемещения, компонент тензора скоростей деформаций, а также (*раздел 7.3*) составляющих тензора напряжений. Условие равенства нулю деформирующего усилия на выходе из матрицы приводит к уравнению типа (22), причем через μ обозначено

$$\mu = \frac{v_0 \Lambda^3}{\bar{\psi}}, \quad (52)$$

где Λ - вытяжка, а для $\bar{\psi}$ получена вторая формула (51).

В *разделе 7.3* вычисляется величина усилия прессования, необходимая для осуществления процесса.

Первая часть задачи оптимизации (раздел 7.4) приводится к исследованию функционала:

$$\tilde{\Phi} = \int_0^{\alpha^*} (12K^2 + K'^2)^2 \cos \alpha d\alpha, \quad (53)$$

из условия максимума которого получаем ограничение на угол наклона матрицы:

$$\alpha \leq \alpha^{**} = \arcsin \frac{\pi}{2\sqrt{12}}. \quad (54)$$

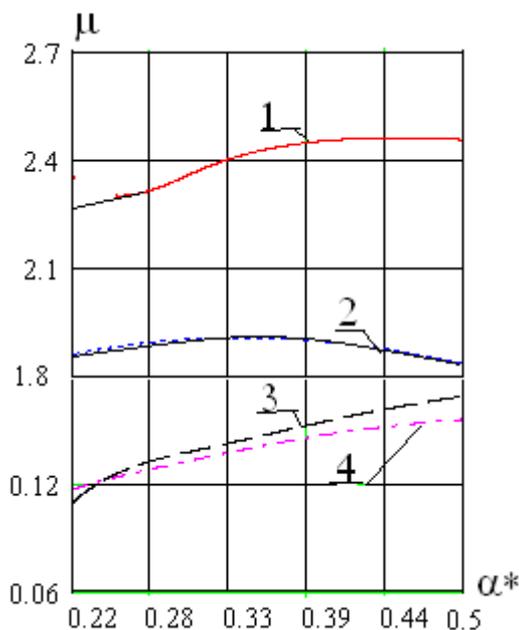


Рисунок 12— Зависимость скорости прессования от угла α^* при $\beta = -0,1561$; $\chi = 0,3$ (кривая 1); $\chi = 0,5$ (кривая 2); пунктирные линии соответствуют скоростям прессования с оптимизацией (кривая 3- $\chi = 0,3$; кривая 4- $\chi = 0,5$)

Следуя из принятого выше порядка реализации технологической операции, получаем для оптимального значения параметра μ (52) следующее выражение

$$\mu_{\text{опт}} = \frac{3}{2\sqrt{2}} \left(\frac{\psi}{\bar{\psi}} \right)^{1/2} \frac{1 + \sqrt{\beta/3m_0}}{\bar{\psi}}. \quad (55)$$

На рисунке 12 пунктирными линиями (3, 4) показаны графики зависимости параметра $\mu_{\text{опт}}$ от угла наклона матрицы α^* . На представленных графиках видно, что скорость прессования при удовлетворении, кроме температурных, еще и скоростных условий сверхпластичности, необходимых для изготовления прутка с ультрамелким зерном, значительно снижается (примерно в 2,5–3 раза).

На рисунке 13 показаны графики зависимостей усилия прессования от угла α^* при $\beta = -0,1564$. При этом рисунок 12 а соответствует $\Lambda = 1,5$, а рисунок 12 б - $\Lambda = 2,5$.

Анализ графических зависимостей показывает, что усилия прессования с введением оптимально расположенной области сверхпластичности снижаются по сравнению с полученными значениями из решения краевой задачи. Увеличение Λ , при прочих равных условиях означающее удлинение конической части матрицы, приводит к значительному возрастанию усилия прессования. Так, усилия при $\Lambda = 1,5$ возрастают примерно на порядок для более длинных матриц. Введение же сверхпластичности снижает усилие в 3–4 раза.

Укажем, что конкретные расчеты проводились для параметров, соответствующих сплаву АМг5.

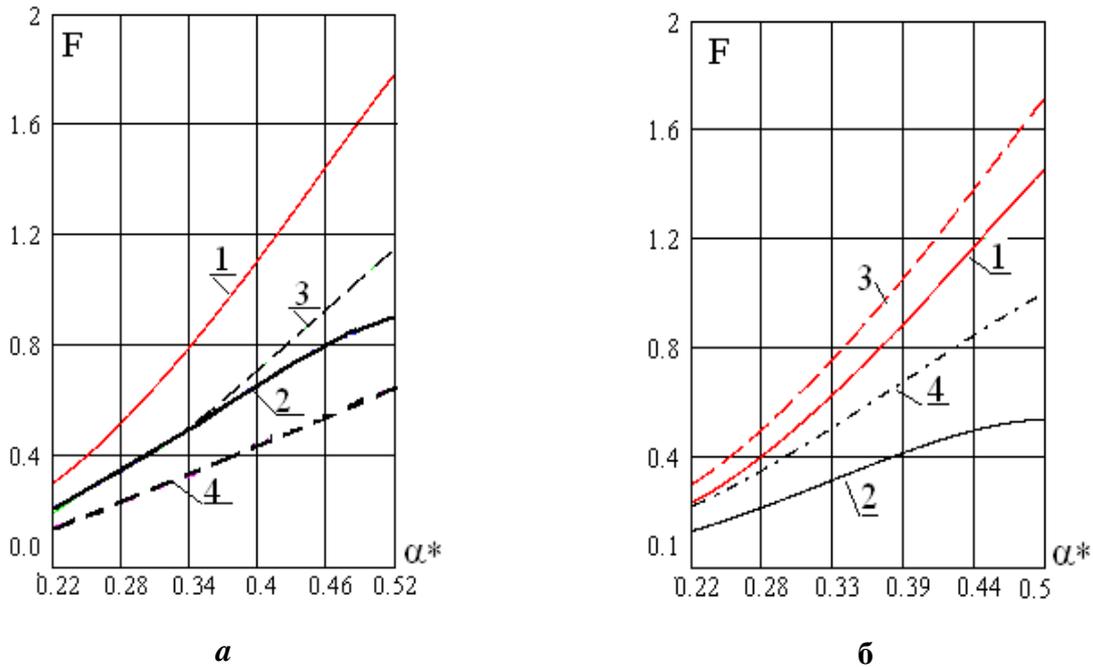


Рисунок 13 – Зависимость усилия прессования от угла α^* при $\beta = -0,1561$; а) $\Lambda=1,5$; $\chi=0,3$ (кривая 1); $\chi=0,5$ (кривая 2); б) $\Lambda=2,5$; $\chi=0,3$ (кривая 1); $\chi=0,5$ (кривая 2); пунктирные линии соответствуют усилиям прессования с оптимизацией (кривая 3 - $\chi=0,3$; кривая 4 - $\chi=0,5$)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертации представлено решение **научной проблемы**, имеющее важное хозяйственное значение и состоящее в развитии теории управления процессами объемного формоизменения алюминиевых сплавов, главной целью которого является прогнозирование изготовления в установленных температурно-скоростных условиях изделий с качественными структурными показателями.

В процессе теоретического исследования и тщательного анализа экспериментальных данных получены **следующие основные результаты**:

1. Сформулирована система уравнений, пригодная для математического моделирования процессов управления пластическим течением металлов и сплавов.

2. Осуществлен анализ накопленных экспериментальных данных по изучению закономерностей деформационного поведения группы промышленных алюминиевых сплавов в широком диапазоне температур и скоростей деформаций. В качестве основного результата выделены и представлены в аналитической форме скоростные условия реализации сверхпластичности при температурах, не выходящих за её термический диапазон. При этом сверхпластичность объясняется возникновением и развитием при нагреве и деформации структурного фазового перехода – динамической рекристаллизации, в процессе которой исходная деформированная или литая структура становится равноосной ультрамелкозернистой.

3. Предложено принять в качестве уравнения состояния зависимость между напряжениями, температурой и кинематическими переменными, полученную в рамках синергетического подхода и подтвержденную сравнением с опытными данными как для сверхпластичности, так и для пограничных областей высокотемпературной ползучести и термопластичности.

4. Разработана методология математического моделирования задач управления технологическими процессами изотермического объемного формоизменения. Указанная методология основана на принципиально новых представлениях об эффектах, наблюдаемых в очаге пластической деформации и заключающихся в возникновении в нем областей с неодинаковыми структурными характеристиками при определенном сочетании внешних термических, силовых и скоростных воздействий. Так открывается возможность управлять структурной ситуацией, установив энергосиловые и кинематические параметры как отклик на процессы, происходящие в очаге деформации.

5. Установлено, что исследования краевых задач, моделирующих технологические процессы, должны быть дополнены выработкой оптимальных функций управления указанными процессами, обусловленными конечной целью – получения изделий со структурой, близкой к ультрамелкозернистой. Показано, что для этого объем области сверхпластичности, занимающий, естественно, часть очага деформации, должен стремиться к максимуму с удовлетворением скоростных условий реализации эффекта и располагаться в очаге таким образом, чтобы на выходе получался соответствующий полуфабрикат. Такой подход позволяет прогнозировать управление качеством и оптимизировать энергосиловые и кинематические параметры процесса.

6. В рамках динамической модели с естественным пространственным обобщением на базе соотношений теории упругопластических процессов малой кривизны исследован класс задач управления процессами объемного типа с использованием сверхпластичности. Моделированием операций:

– изготовления тонкостенного цилиндрического изделия с днищем, выполненного по схеме обратного выдавливания;

– прямого прессования прутка круглого поперечного сечения в конической матрице;

– прямого прессования прямоугольной полосы в клиновидной матрице;

– изготовления прямоугольной полосы прессопрокаткой

показана возможность управлять в процессе нагрева и деформации размером зерна и, как следствие, прогнозировать изготовление деталей и полуфабрикатов с наперед заданными свойствами, в частности с ультрамелкозернистой структурой.

7. На примере конкретной технологической операции изготовления в термомеханических условиях сверхпластичности детали типа «стакан» обратным выдавливанием из сплава АМг5 произведено сравнение структурного состояния изделия после штамповки и полученным стандартной технологией – резанием. Можно утверждать, что в штампованных деталях формируется

структура, близкая к ультрамелкозернистой, а, следовательно, и более качественная, не говоря уже о резком возрастании коэффициента использования металла. Аналогичная ситуация наблюдается при прокатке тонкого листа из сплава 1561 в исходном литом состоянии путем сопоставления со стандартными технологиями, причем с приближением к режимам сверхпластичности заметно снижается деформационная анизотропия.

Основное содержание диссертации отражено в публикациях:

В монографии -

1. Сулайманова, С.М. Математическое моделирование процессов объемного формоизменения в режимах сверхпластичности [Текст]: монография / С.М. Сулайманова – Б.: Изд-во КРСУ, 2012. – 176 с.

Статьи в изданиях, входящих в «Перечень периодических изданий, рекомендованных ВАК КР для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук»:

2. Сулайманова, С.М. Двумерная задача прессования полосы с использованием сверхпластичности. К определению разрешающей функции [Текст] / С.М. Сулайманова // Вестник КГУСТА. 2007. - Выпуск 3(17). - С.150-154.

3. Сулайманова, С.М. Двумерная задача прессования полосы с использованием сверхпластичности [Текст] / Я.И. Рудаев, С.М. Сулайманова // Материалы V Международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций». – Оренбург, 2008.- Т.2.- С.333 - 340.

4. Сулайманова, С.М. Об оптимизации процесса прессования полосы с использованием сверхпластичности [Текст] / Я.И. Рудаев, С.М. Сулайманова // Материалы Международной юбилейной научной конференции посвященной 15-летию образования Кыргызско - Российского Славянского Университета «Актуальные проблемы теории управления, топологии и операторных уравнений». - Бишкек, 2008.- С. 104-109.

5. Сулайманова, С.М. Математическое моделирование технологического процесса прессование полосы с использованием сверхпластичности [Текст] / Я. И Рудаев, Ш.Т. Пазылов, С.М. Сулайманова // Математическое моделирование систем и процессов. Пермь, 2008. - №16. - С.100-110.

6. Сулайманова, С.М. Математическое моделирование прессопрокатки алюминиевого листа [Текст] / С.М. Сулайманова // Известия вузов. Бишкек, 2008. - №5-6,– С.3-9.

7. Сулайманова, С.М. Управление процессом прессопрокатки алюминиевого листа в режимах сверхпластичности [Текст] / Я.И. Рудаев, С.М. Сулайманова // Известия вузов. Бишкек, 2008. - №5–6, – С.200–203.

8. Sulaimanova, S.M. About optimization of process pressing of a plate with use of superplasticity [Текст] / Y. J. Rudaev, S.M. Sulaimanova /Actual Problems of Control Theory, Topology and Operator Equations. International Jubilee Conference at the KRSU Bishkek, Kyrgyzstan, September 15-21, 2008. Shaker Verlag Aachen 2009. P.179-185.

9. Сулайманова, С.М. К формулировке задачи объемного

формоизменения металлов в режимах сверхпластичности [Текст] / С.М. Сулайманова // Труды международной конференции по распространению упругих и упругопластических волн посвящ. 100 лет. юбилею Х.А. Рахматуллина. Бишкек, 2009. - С.368 – 371.

10. Сулайманова, С.М. Управление технологическим процессом прессования прутка с использованием сверхпластичности [Текст] / Я.И. Рудаев, С.М. Сулайманова // Известия Кырг. государственного технологического университета им. И. Раззакова. 2009. - №15. - С.32-37.

11. Сулайманова, С.М. Технологические задачи объемного формоизменения с использованием сверхпластичности [Текст] / Я.И. Рудаев, С.М. Сулайманова // Теория, численные методы и матем. эксперимент в газовой динамике. Материалы научно-технического семинара. – М.: ЦИАМ, 2009.- С.

12. Сулайманова С.М. Краевая задача прессования прутка с использованием сверхпластичности [Текст] / С.М. Сулайманова // Наука и новые технологии. Физика. Техника. Сейсмология. Бишкек, 2009. - №3. - С.19-26.

13. Сулайманова, С.М. Об оптимизации прессования прутка при использовании сверхпластичности [Текст] / Я.И. Рудаев, С.М. Сулайманова // Наука и новые технологии. Научные сообщения. Бишкек, 2009. - №3. - С. 251-256.

14. Сулайманова, С.М. О напряженном состоянии при обратном выдавливании с использованием сверхпластичности [Текст] / С.М. Сулайманова, Ч.К. Ташбаев // Современные проблемы механики сплошных сред: Гидрогазодинамика, геомеханика и геотехнологии /Комитет по теорет. и прикл. механике Кыргызстана, Ин-т геомеханики и освоения недр НАН КР.- Б.:2009. - Вып.10.- С.107 - 115.

15. Сулайманова, С.М. Краевая задача прокати металлов с использованием сверхпластичности [Текст] / С.М. Сулайманова // Вестник КГУСТА, 2010.- Выпуск 3(27). - С.150-154.

16. Сулайманова, С.М. Теория обратного выдавливания в режимах сверхпластичности [Текст] /Я.И. Рудаев С.М. Сулайманова, Ч.К. Ташбаев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки, 2010. - 1(94). - С.91-103.

17. Сулайманова, С.М. Технологические задачи объемного формоизменения [Текст] / Я. И. Рудаев, А.Дж. Картанова, С.М. Сулайманова //Материалы V11 Международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций». - Оренбург, Россия, 2010.- Т.2.- С.501 - 511.

18. Сулайманова, С.М. Моделирование процессов объемного формоизменения в режимах сверхпластичности [Текст] / С.М. Сулайманова //Труды международной конференции «Рахматулинские чтения» по направлениям «Газовая и волновая динамика» и «Композиты и наноматериалы». - Бишкек, 2011. - С.283-287.

19. Сулайманова, С.М. Сверхпластичность в процессах объемного формоизменения [Текст] / Я. И. Рудаев, Д. Китаева, Ш.Т. Пазылов, С.М. Сулайманова // Современные металлические материалы и технологии (СММТ 2011). Труды международной научно-технической конференции. - Санкт-

Петербург, 2011.- С.195-197.

20. Сулайманова, С.М. Сверхпластичность динамического типа в технологиях объемного деформирования [Текст] / С.М. Сулайманова, Ч.К. Ташбаев // Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций: тез. докл. II Всерос. конф. - Новосибирск: Из-во НГТУ, 2011.- С.105

21. Сулайманова С.М. Моделирование процессов объемного формоизменения в режимах сверхпластичности [Текст] / Я.И. Рудаев, С.М. Сулайманова, Ч.К. Ташбаев // Известия КГТУ им. И.Раззакова. - Бишкек, 2011. - №24.- С393-397.

22. Сулайманова, С.М. Некоторые особенности объемного формоизменения в рамках сверхпластичности [Текст] / С.М. Сулайманова // Вестник КазНТУ им. К.И.Сатпаева. - Алматы, 2012.- №1(89).- С.181-187.

23. Сулайманова, С.М. Об одной задаче прессования кругового прутка в режимах сверхпластичности [Текст] / Я.И. Рудаев, С.М. Сулайманова // Современные проблемы механики сплошных сред: Гидрогазодинамика, геомеханика и геотехнологии. Комитет по теорет.и прикл. Механике Кыргызстана, Институт геомеханики и освоение недр НАН КР.- Бишкек, 2012. – Вып.16. - С.214-219.

24. Сулайманова, С.М. Об объемной штамповке в режимах сверхпластичности [Текст] / С.М. Сулайманова // Современные проблемы механики сплошных сред: Гидрогазодинамика, геомеханика и геотехнологии. Комитет по теорет.и прикл. Механике Кыргызстана, Институт геомеханики и освоение недр НАН КР.- Бишкек, 2012. – Вып.16. - С.219-224.

25. Рудаев, Я.И. Математическое моделирование процессов объемного формоизменения с управляемой сверхпластичностью [Текст] / Я.И. Рудаев, С.М. Сулайманова // Труды Международной научной конференции, посвященной памяти академика М.Я. Леонова «Современные проблемы механики сплошной среды». - Бишкек, 2012. – С.190 – 195.

26. Sulaimanova, S.M. About stability of process superplastic axial tension [Текст] / D.F. Kitaeva, Ya.I. Rudaev, S.M. Sulaimanova // The Seventh International Conference on Material Technologies and Modeling MMT-2012, Ariel University Center of Samaria, Ariel, Israel, 2012. – P.246-253.

27. Сулайманова, С.М. Конкретизация условий реализации эффекта сверхпластичности [Текст] / Я.И. Рудаев, С.М. Сулайманова // Вестник КГУСТА - 2012. - №2(36). – С.128 – 133.

28. Сулайманова С.М. Об уравнении состояния в моделировании процессов объемного формоизменения в режимах сверхпластичности [Текст] / С.М. Сулайманова // Вестник КГУСТА - 2012. - №2(36). – С.133– 140.

29. Сулайманова, С.М. Сверхпластичность динамического типа в технологиях объемного деформирования [Текст] / С.М. Сулайманова // Динамика сплошной среды. Механика структурно-неоднородных сред. – Новосибирск. - 2012. – Выпуск 127. – С.102 – 106.

РЕЗЮМЕ

Сулайманова Света Мукашовна

Көлөмдүк форма өзгөртүүчү процесстерди эң жогорку ийкемдүүлүк режиминде математикалык моделдөө

05.13.18 – Математикалык моделдөө, сандык эсептөө ыкмасы жана программалар комплекси адистиги боюнча физика-математика илимдеринин доктору илимий даражасын алууга жазылган диссертация.

Ачкыч сөздөр: чыңалуу, деформация ылдамдыгы, температура, эң жогорку ийкемдүүлүк, деформациялоочу күч, деформация очогу.

Изилдөөнүн объектиси болуп жогорку ийкемдүүлүк эффектиси структуралык фазалык өтүү б. а. динамикалык рекристаллизация процессинде өнүккөн өндүрүштүк алюминий кошулмалары эсептелет.

Аппаратура: IBM PC Pentium

Алынган жыйынтыктар: Металлдардын жана кошулмалардын пластикалык агымдарын башкаруу процесстерин математикалык моделдөө үчүн керектүү теңдемелер системасы жазылды; изотермикалык көлөмдүк форма өзгөртүүчү технологиялык процесстердин маселелерин математикалык моделдөөнүн жалпы ыкмасы иштелип чыкты; эң жогорку ийкемдүүлүк режиминде кошулмалады штамптоо, кандоо жана престөө технологиялык процесстерин башкаруу жана оптимизациялоо маселелеринин аналитикалык чыгарылыштары берилди; эң жогорку ийкемдүүлүк эффектисин колдонуу менен көлөмдүк формасы жагынан өзгөрүүчү технологиялык процесстердин конкреттүү мисалдары келтирилди.

Жыйынтыктардын жаңылыгы: Негизги максаты аныкталган температура ылдамдыктын шарттарында сапаттуу структуралык көрсөткүчтөрдү прогноздоо болгон, алюминий кошулмаларынын көлөмдүк форма өзгөртүү процесстерин башкаруу теориясын өнүктүрүү болуп эсептелет.

Колдонуу областы: Көлөмдүк форма өзгөртүү процесстерин оптимизациялоо жана башкаруу теориясы. Металлдарды басым күчү менен кайра иштетүү теориясы.

РЕЗЮМЕ

Сулайманова Света Мукашовна

Моделирование процессов объемного формоизменения в режимах сверхпластичности

Диссертация представлена на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Ключевые слова: Напряжение, скорость деформации, температура, сверхпластичность, деформирующее усилие, очаг деформации.

Объектом исследования являются промышленные алюминиевые сплавы, эффект сверхпластичности, которых развивается в процессе структурного фазового перехода – динамической рекристаллизации.

Аппаратура: IBM PC Pentium

Полученные результаты. Сформулирована система уравнений, пригодная для математического моделирования процессов управления пластическим течением металлов и сплавов; разработана методология математического моделирования задач управления технологическими процессами изотермического объемного формоизменения; дано аналитическое решение задач оптимизации и управления технологическими процессами штамповки, прессопрокатки и прессования в режимах сверхпластичности; приведены конкретные технологические примеры объемного формоизменения с использованием сверхпластичности.

Новизна результатов работы состоит в развитии теории управления процессами объемного формоизменения алюминиевых сплавов, главной целью которого является прогнозирование изготовления в установленных температурно-скоростных условиях изделий с качественными структурными показателями.

Область применения. Теория оптимизации и управления процессами объемного формоизменения металлов и сплавов. Теория обработки металлов давлением.

SUMMARY

Sulaimanova Sveta Mukashovna

The mathematical modeling of processes form changes in superplasticity regimes

The dissertation is presented on competition of a scientific degree Doctor of physical and mathematical sciences on specialty 05.13.18 – Mathematical modeling, numerical methods and complexes of program.

The keywords: Stress, strain rate, temperature, superplasticity, deforming effort, deformation centre.

The object of research are industrial aluminums alloys, effect of superplasticity which develops in the course of structural phase transition - dynamical recrystallization.

The equipment: IBM PC Pentium

The received results. The system of the equations, suitable for mathematical modeling of managerial processes by a plastic current of metals and alloys is formulated; the methodology of mathematical modeling of problems of management by technological processes isothermal volume form changes is developed; the analytical decision of problems of optimization and management of technological processes of superplastic sheet pressing, rolling and pressing is given; concrete technological examples volume form changes with superplasticity use are resulted.

Novelty of results of work consists in development of the theory of management by processes volume form changes the aluminums alloys which overall objective is manufacturing forecasting in the established temperature-rate conditions of products with qualitative structural indicators.

Field of application. The control and optimization theory of processes volume form changes metals and alloys. The metal forming theory.

СУЛАЙМАНОВА СВЕТА МУКАШОВНА

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЪЕМНОГО
ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ В РЕЖИМАХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ**

Автореферат диссертации

Подписано к печати .11.2012г. Формат бумаги 60x84¹/₁₆.

Бумага офс. Печать офс. Объем 1,00п.л. Тираж 100экз.

Отпечатано ОсОО «Кут-Бер» г. Бишкек, ул. Медерова, 68

Подписано в печать 25.12.2012. Формат бумаги 60.84 16

