

На правах рукописи



**Нгуен Чыонг Аи**

**СВЕРХПЛАСТИЧЕСКАЯ ФОРМОВКА ЛИСТОВ АЛЮМИНИЕВЫХ  
СПЛАВОВ С УЛЬТРАМЕЛКИМ ЗЕРНОМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОБОЛОЧЕК  
С РЕЛЬЕФОМ**

Специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2009

Работа выполнена на кафедре Технология и оборудование трубного производства Института технологии материалов Государственного технологического университета «Московский институт стали и сплавов».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор Смирнов Олег Михайлович

**Научный консультант:**

кандидат технических наук Полькин Владислав Игоревич

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук Панченко Евгений Васильевич

Тульский государственный университет.

кандидат технических наук Парамонов Владислав Викторович

ООО "Трансгарант".

**Ведущая организация: ОАО "НИИТавтпром"**

Защита состоится « 10 » июня 2009 г. на заседании диссертационного совета Д 212.132.09 при Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный технологический университет «Московский институт стали и сплавов» по адресу: 119049, Москва, Ленинский пр., д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного технологического университета «Московский институт стали и сплавов».

Автореферат разослан « 4 » мая 2009 г.

Справки по телефону (495) 955-01-27,  
e-mail: [irina@pdss.misis.ru](mailto:irina@pdss.misis.ru)

Ученый секретарь диссертационного совета

Ионов С.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Развитие и внедрение в производство научно-технического прогресса в машиностроительных отраслях промышленности. Одним из перспективных направлений совершенствования технологии листовой штамповки при производстве тонкостенных деталей в виде оболочек из конструкционных алюминиевых сплавов в условиях мелко- и среднесерийного производства является использование сверхпластической формовки (СПФ) листовых заготовок с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. По сравнению с традиционными методами получения таких деталей многооперационной листовой штамповкой, СПФ обладает рядом преимуществ, к числу которых относятся низкие энергетические, капитальные затраты и трудоемкость изготовления, высокий коэффициент использования материалов (КИМ), возможность получения сложнопрофильных изделий на маломощном прессовом оборудовании и простой дешевой оснастке. Применение СПФ позволяет сократить затраты ручного труда и снизить себестоимость получаемых изделий. Существенное расширение технологических возможностей процесса СПФ и проектных решений при конструировании деталей может быть достигнуто применением известных и новых сверхпластичных материалов (СПМ). Для СПФ, в частности, алюминиевых сплавов магналиев и дуралюминов, обладающих средним уровнем конструкционной прочности, но повышенным ресурсом деформационной способности и исключительно низкими напряжениями течения при СПД. Однако, освоение и практическое использование процессов СПФ затрудняется из-за недостатка теоретических и экспериментальных данных о влиянии количественных характеристик структуры и температуры на их реологическое поведение, а также технологические параметры процесса формовки, отсутствия технологической оценки формовки типовых элементов деталей, получаемых СПФ.

Применение СПФ открывает определенные перспективы в машиностроении, автомобилестроении, приборостроении, строительстве и железнодорожном транспорте при производстве изделий в виде оболочек с функциональным поверхностным рельефом типа мембран, сильфонов, крышек, фонарей, накладок и др. Большие остаточные деформации, характеризующие сверхпластическую формовку в сочетании с высокой теплопроводностью алюминиевых сплавов позволяют

изготавливать элементы теплообменников с большой площадью контакта с окружающей средой, и, следовательно, более интенсивным теплоотводом. Сложнопрофильные оболочки из алюминия применяются при производстве различных корпусных и приборных деталей.

В связи с этим настоящая работа посвящена разработке процессов сверхпластиической формовки оболочек из алюминиевых сплавов с ультрамелкозернистой структурой на основе исследования и описания влияния количественных характеристик микроструктуры сплавов и температуры на их реологическое поведение, технологические параметры процесса листовой сверхпластической формовки с использованием компьютерного и физического моделирования.

В работе определена количественная связь между размером структурных составляющих и реологическими характеристиками магниев (АМг6, 1570), дуралюмина (Д19) с матричной структурой при сверхпластической деформации. Так же термическая стабильность структуры сплавов при нагреве до оптимальной температуре СПФ. Проведены расчеты реологических параметров и характеристик сверхпластичности при растяжении исследуемых сплавов для выбора рациональных режимов сверхпластической формовки. Разработаны компьютерные конечно-элементные (FEM CAD) модели процессов СПФ полых оболочек с макро-, микро- и комбинированным рельефом, исследованы закономерности формоизменения при различных термомеханических режимах. Проведены эксперименты по СПФ типовых оболочек из сплавов АМг6 и Д19 для проверки расчетных результатов компьютерного моделирования.

Автором выносится на защиту:

- методика определения технологических режимов и параметров формовки оболочек простых и сложных форм с рельефом, использующая компьютерное моделирование, проверочные эксперименты на формуемость листовых заготовок с ультрамелким зерном;
- методика количественного определения показателей формуемости оболочек на основе анализа формирования макроформ и сложного поверхностного рельефа;
- численные параметры реологической модели вязкопластического течения материала с нелинейными показателями деформационного, скоростного и

- структурного упрочнения, зависящими от температуры СПД;
- результаты математического конечно-элементного моделирования процессов СПФ для исследования влияния на формоизменение технологических режимов формовки;
  - результаты экспериментальных исследований СПФ деталей разнообразной геометрической макроформы и элементов поверхностного рельефа из сплавов АМг6 и Д19;
  - рекомендации по проектированию инструмента, технологических режимов и технологий СПФ оболочек с рельефом из сплавов АМг6, 1570 и Д19 с УМЗ структурой.

Работа выполнена на кафедре «Технология и оборудование трубного производства» (ТОТП) ИТМ ГТУ «МИСиС». Работа является частью комплекса исследований по разработке теории и технологии эффективных наукоемких процессов обработки металлов давлением, проводимых ГТУ «МИСиС» в соответствии с планом госбюджетных НИР на 2007-2009 г.г.

Автор выражает глубокую признательность сотрудникам и преподавателям кафедры ТОТП, а также, к.т.н., с.н.с. Цепину М.А. за помощь, оказанную при выполнении работы и представлении её результатов.

**Цель работы:** исследование процессов сверхпластиической формовки листов алюминиевых сплавов с ультрамелким зерном для получения полых оболочек с рельефом на основе компьютерного и физического моделирования.

**Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:**

1. Анализ научно-технической и патентной литературы по сверхпластиичности и сверхпластиической формовке магниев и дуралюмина при получении тонкостенных оболочек.
2. Исследование параметров микроструктуры листов из алюминиевых сплавов АМг6, 1570 и Д19 с ультрамелким зерном, полученным специальной обработкой.
3. Расчеты численных значений параметров и реологических характеристик сверхпластиичности исследуемых сплавов для выбора рациональных режимов сверхпластиической формовки.
4. Разработка конечно-элементных компьютерных (FEM CAD) моделей процессов СПФ полых оболочек с рельефом и исследование закономерностей

формоизменения при различных термомеханических режимах.

5. Проведение экспериментов по СПФ из выбранных сплавов для проверки расчетных результатов компьютерного моделирования.

6. Разработка рекомендаций по проектированию оснастки, инструмента, схем, температурно-скоростных и силовых режимов технологии СПФ полых оболочек с рельефом.

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. Получены новые данные о реологических характеристиках СПД для сплавов АМг6, 1570 и Д19 и определены численные значения параметров, учитывающих влияние температуры деформации на напряжения течения в интервале скоростей СПД. Для сплава Д19 получены количественные зависимости напряжений СПД от скорости, температуры и размера зерна.

2. Разработана компьютерная программа и выполнены расчеты кривых деформационного упрочнения исследуемых сплавов, как результат изменения размера зерна, т.е. их роста при СПД.

3. Методами компьютерного моделирования и физического эксперимента выявлены основные закономерности формоизменения и определены характеристики распределения толщин стенок и деформаций по контуру для типовых оболочек простых и сложных форм с рельефом.

### **Практическая полезность работы.**

1. Получены базы данных реологических свойств исследуемых сплавов, которые могут быть использованы при компьютерном проектировании технологических процессов изготовления оболочек с использованием СПФ.

2. Разработаны 12 типовых компьютерных моделей СПФ оболочек простых и сложных форм, которые могут быть использованы в качестве прототипов или учебного материала для проектирования конкретных технологий СПФ.

3. Разработана комбинированная методика технологических проб для испытаний листовых материалов с ультрамелким зерном на пригодность к СПФ, сочетающая компьютерное моделирование и тестовые эксперименты.

4. Результаты работы нашли практическое применение в учебном процессе и исследовательской работе в ВятГУ, ГТУ «МИСиС» и ГТУ им Ле Куй Дона (СРВ) при выполнении курсовых и дипломных работ студентов.

## **Методы исследования.**

В работе, в качестве основного метода исследования процесса СПФ был выбран экспериментально-теоретический метод, включающий: компьютерное моделирование формоизменения полых оболочек из вязкопластического материала с нелинейным скоростным и деформационным упрочнением, параметры которого зависят от температуры деформации и структуры материала; экспериментальные исследования на натурных материалах из алюминиевых сплавов с ультрамелким зерном.

**Достоверность результатов** определяется тем, что они получены с помощью современного оборудования и технических средств, на основе применения экспериментальных и теоретических методов ОМД, корректно поставленными задачами моделирования и применением известных математических моделей и методов их решения, статистической обработкой результатов экспериментов и расчетов.

Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы теоретически и базируются на достоверных экспериментальных данных, прошли проверку в лабораторных условиях и учебно-педагогической практике.

## **Реализация результатов работы.**

Материалы диссертации используются в учебном процессе и исследовательской работе на кафедрах: ТОТП ИТМ ГТУ «МИСиС» (РФ), ОМД ГТУ им. Ле Куй Дона (СРВ) и ОКМ ВятГУ (г. Киров) при чтении лекции по курсам «Основы теории обработки металлов давлением» и «Технология листовой штамповки».

## **Апробация работы.**

Результаты работы изложены и обсуждены на международных научно-технических конференциях: «Наука-Производство-Экология», Киров, ВятГУ (2008, 2009 годы); «Авиакосмические технологии-2008», г. Воронеж; «Применение математических методов и компьютерной техники в прикладных задачах», Москва, МГЭИ (2007 год); на научной конференции МГВМИ «Экология, ресурсосбережение, материаловедение в производстве высококачественных металлов» (2008 год) и научных конференциях молодых ученых и студентов МИСиС (2007, 2008, 2009 годы).

## **Публикации.**

По теме работы опубликовано 11 статей в ведущих рецензируемых научно-технических журналах, в том числе в 3-х из перечня ВАК РФ, а также в сборниках материалов российских и международных научно-технических конференций, получено положительное решение о выдаче патента РФ на изобретение.

## **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных результатов работы и выводов, изложена на 167 страницах, включая 105 страниц машинописного текста, библиографический список литературных источников из 88 наименований, 80 рисунков, 21 таблицу и 4 приложения.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, ее научная новизна и практическая значимость, а также изложены основные положения, выносимые автором на защиту.

**В первой главе** выполнен обзор и анализ научно-технических публикаций, посвященных явлению сверхпластичности, ее разновидностей и условиям проявления, а также феноменологическим признакам, характеризующим материал в сверхпластичном состоянии. Рассмотрены основные схемы процесса формовки листового материала в состоянии сверхпластичности, называемого сверхпластической формовкой. Дан анализ основных схем и конструкций оснастки и инструмента для СПФ. Определена область применения изделий, получаемых с помощью СПФ. Рассмотрены основные методы исследования и разработки процессов СПФ. Выполнен обзор и анализ современных специализированных компьютерных вычислительных систем для моделирования процессов обработки металлов давлением. На основании результатов литературного обзора сформулированы цель и задачи исследования. Для решения этих проблем предложено использовать современные достижения в области экспериментально-теоретических методов ОМД и информационных технологий.

**Во второй главе** представлена общая методика проведения исследований. В качестве основных материалов были выбраны сверхпластичные алюминиевые сплавы АМг6, 1570 и Д19. Химический состав исследуемых сплавов приведен в табл. 1.

Сплавы АМг6 и 1570 относятся к промышленным деформируемым неупрочняемым сплавам средней прочности системы Al-Mg-Mn. По технологическим свойствам в металлургическом производстве сплав 1570 близок к АМг6, из него могут изготавливаться те же полуфабрикаты, что и из сплава АМг6, но с более высокими прочностными характеристиками, коррозионной стойкостью и более хорошей свариваемостью.

Таблица 1 - Химический состав исследуемых сплавов

| Марка сплав | ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ (%) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|             | Al                      | Mg   | Mn   | Zn   | Cu   | Fe   | Si   | Sc   | Zr   | Ti   |
| АМг6        | Основа                  | 6,4  | 0,6  | 0,1  | 0,15 | 0,3  | 0,2  | -    | -    | 0,05 |
| 1570        | Основа                  | 6,0  | 0,13 | 0,1  | 0,1  | 0,04 | 0,06 | 0,34 | 0,05 | -    |
| Д19         | Основа                  | 2,26 | 0,62 | 0,03 | 4,12 | 0,14 | 0,12 | -    | -    | 0,01 |

Исходным материалом для подготовки УМЗ структуры АМг6 являлись листы толщиной 5,0 мм (ГОСТ 21631-76) со средним размером зерна  $\sim 15$  мкм. Листы были подвергнуты холодной прокатке до толщины 1,0 мм с промежуточным отжигом ( $310\ldots355^{\circ}\text{C}$ , 50...60 мин) при толщине 2...3 мм (рис. 1-а).

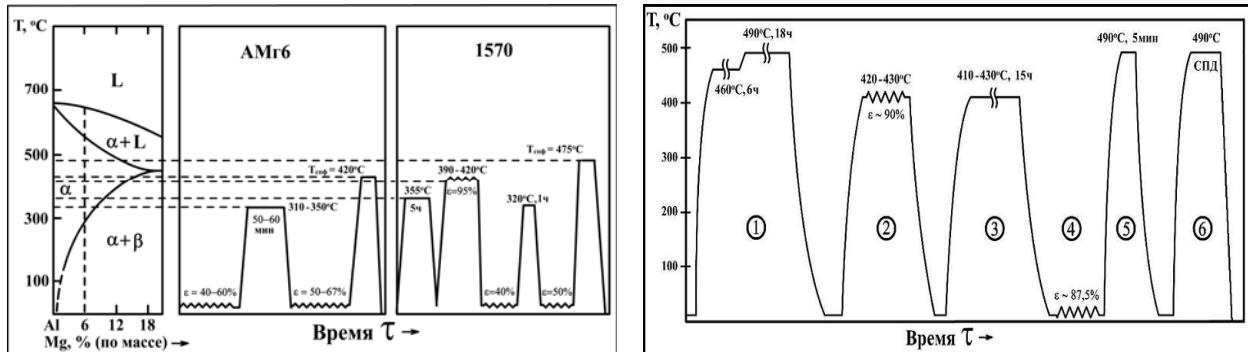


Рисунок 1 - Схема обработки для получения УМЗ структуры листов сплавов АМг6 и 1570 (а) и сплава Д19 (б): 1 - гомогенизационный отжиг; 2 - горячая прокатка; 3 - гетерогенизационный отжиг; 4 - холодная прокатка; 5 - рекристаллизационный отжиг в селитровой ванне; 6 - СПД

Листы сплава 1570 получали по технологии, включающей (рис. 1-а): гомогенизацию слитков сечением 165x550 мм при  $355^{\circ}\text{C}$ , 8 час; горячую прокатку слитков при  $390\ldots420^{\circ}\text{C}$  с единичным обжатием за проход  $\sim 20\%$  до толщины 7,0 мм; холодную прокатку до толщины 1,0 мм с промежуточным отжигом при  $300^{\circ}\text{C}$ , 1 час при толщине листа 4,0 мм; отжиг холоднокатанных листов при  $320^{\circ}\text{C}$ , 1 час и охлаждение в стопе на воздухе.

Для получения листов из сплава Д19 с УМЗ структурой использовали специальную термомеханическую обработку, представленную на схеме рисунка 1-б. Слитки гомогенизировали по двухступенчатому режиму: нагрев до  $460\pm5^{\circ}\text{C}$ , выдержка 6 ч; нагрев до  $490\pm5^{\circ}\text{C}$ , выдержка 18 ч. После гомогенизации слитки разрезали и фрезеровали со всех сторон. Отфрезерованные слитки размерами 800x520x70 мм нагревали в электропечи до температуры прокатки  $420\ldots430^{\circ}\text{C}$  и прокатывали в горячем состоянии до толщины 8 мм. Во время горячей прокатки на поверхность металла наносили технологическую плакировку из алюминия марки АД0, АД1. Горячекатаные заготовки подвергали гетерогенизационному отжигу по режиму: нагрев до температуры  $410\ldots430^{\circ}\text{C}$ , выдержка при этой температуре 15 ч; охлаждение с печью до температуры  $260^{\circ}\text{C}$  и далее на воздухе. Холодную прокатку проводили на стане "Дуо". Плиты толщиной 8 мм прокатывали до толщины 1 мм. После холодной прокатки технологическую плакировку удаляли травлением листов в растворе горячей щелочи. Окончательную операцию рекристаллизационного отжига в селитряной ванне по режиму  $490\pm5^{\circ}\text{C}$ , 5...7 мин, с последующей правкой на правильной машине.

С целью определения возможности применения тех или иных операций СПФ для получения сложного рельефа была разработана методика анализа формуемости оболочки. Она заключается в выборе типовых оболочек с рельефом в виде простых геометрических форм и элементов для анализа самого простого режима нагружения при постоянном давлении. Затем для них методами компьютерного моделирования определяются рациональные режимы давления газа, времени формовки и показатель формоизменения. На следующем этапе производится оценка качества оболочки, производительности и энергоемкости процесса СПФ на основе эксперимента на реальном металле.

Общая постановка задачи математического моделирования процессов СПФ основана на соотношениях теории течения Леви-Мизеса для решения задачи деформации изотропного вязкопластического твердого тела с нелинейными деформационным и скоростным упрочнением с использованием дискретизации сплошной среды на конечные элементы в постановке, приведенной в монографии Е.Н. Чумаченко, О.М. Смирнова, М.А. Цепина «Сверхпластичность: материалы, теория, технологии». На этой основе был сделан выбор программного обеспечения и

специализированных компьютерных вычислительных FEM CAD систем для создания и проектирования трехмерных компьютерных моделей процессов макро- и микроформовки тонкостенных оболочек с простым и комбинированным рельефом.

Компьютерное моделирование, обработка экспериментальных и расчетных данных, проектирование технологических операций, инструмента и оснастки, а также оформление и представление данных, рисунков и текста проводили в локальной компьютерной сети кафедры Технологии и оборудования трубного производства.

**В третьей главе** представлены результаты по определению размера зерна в листах с УМЗ структурой и расчетов численных значений реологических параметров и характеристик СПД исследуемых сплавов материалов.

Исследования микроструктуры листов из алюминиевых сплавов АМг6, 1570 и Д19 с предварительно подготовленной по специальным режимам ТМО УМЗ структурой показали, что средний размер зерна после нагрева листов до оптимальной температуры СПД и выдержки в течение до 10 мин составил для АМг6 10,4 мкм, для 1570 4,3 мкм и для Д19 6,6 мкм. Средний размер зерна микроструктуры у этих сплавов увеличивается за 5 часов, не превышая принятую в качестве условия проявления сверхпластичности границу (10...15 мкм).

В качестве базовой реологической модели поведения материала при СПФ в работе была выбрана известная модель СП-среды, описывающая изменение интенсивности скоростей деформации ( $\xi_e$ ) от среднего размера зерна ( $L$ ), температуры ( $T$ ) и интенсивности напряжений ( $\sigma_e$ ). Модель включает определяющее соотношение (уравнение связи) в виде:

$$\xi_e = \xi_{eq} \cdot \exp \left\{ \alpha \cdot L^\beta \cdot (\sigma_e - \sigma_{eq}^{sp} Z_T) \right\} \left[ \frac{(\sigma_e - \sigma_o^{sp} Z_T)}{(\sigma_s^{sp} Z_T - \sigma_e)} \right]^{n_v}, \quad (1)$$

где  $\xi_e$  - интенсивность скоростей сдвиговой деформации,  $\text{с}^{-1}$ ;  $L$  - обобщенный структурный параметр, мкм;  $\alpha$  - коэффициент пропорциональности влияния структурного параметра, м/Н;  $\beta$  - показатель степени влияния структурного параметра;  $n_v$  - показатель степени ползучести;  $\sigma_e$  - интенсивность напряжений течения, МПа;  $\sigma_o$  - пороговое напряжение, МПа;  $\sigma_{eq}$  - эквивалентное напряжение, МПа;  $\sigma_s$  - условный предел текучести, МПа;  $Z_T$  - температурный множитель Зиннера-Холломона, учитывающий сдвиг температурного интервала СПФ относительно оптимальной температуры деформации СПД:

$$Z_T = \exp\left[\frac{Q_\sigma}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{SP}}\right)\right], \quad (2)$$

где  $Q_\sigma$  – энергия активации, кДж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль\*К);  $T_{SP}$  – оптимальная температура СПД, К.

На основе результатов экспериментов, выполненных ранее в работах К.М. Семенко, А.М. Дискина и О.В. Соловьевой, с помощью специальной программы были рассчитаны значения реологических параметров и температурных коэффициентов в уравнениях (1) и (2), приведенные в таблице 2.

Таблица 2 - Реологические параметры уравнений (1, 2)

| Марка сплава | $T_{sp}$ , °C | $\sigma_0$ , МПа | $\sigma_{eq}$ , МПа | $\sigma_s$ , МПа | $\xi_{eq}$ , $c^{-1}$ | $\alpha$ , м/Н       | $\beta$ | $n_v$ | $Q_\sigma/R$ , град К |
|--------------|---------------|------------------|---------------------|------------------|-----------------------|----------------------|---------|-------|-----------------------|
| АМг6         | 420           | 3,0              | 43,5                | 87,7             | $9,25 \cdot 10^{-3}$  | $6,4 \cdot 10^{-5}$  | 2,66    | 1,22  | 3010,9                |
| 1570         | 475           | 0,65             | 21,30               | 42,40            | $2,29 \cdot 10^{-2}$  | $1,35 \cdot 10^{-3}$ | 2,39    | 1,18  | 3741,62               |
| Д19          | 490           | 0,98             | 24,75               | 47,5             | $1,90 \cdot 10^{-2}$  | $4,73 \cdot 10^{-4}$ | 2,63    | 1,192 | 7591,42               |

На основе данных таблицы 2 для всех исследуемых сплавов в работе были рассчитаны реологические зависимости напряжений течения  $\sigma_e$ , показатели скоростного упрочнения  $m = d(\lg \sigma_e)/d(\lg \xi_e)$  от скорости деформации  $\xi_e$  и величины зерна  $L$  по уравнению (1) и температурные зависимости характерных напряжений по уравнению (2) и построены соответствующие графики. Причем для сплава Д19 это было сделано впервые.

В выбранной для моделирования процессов СПФ вычислительной системе FEM CAD уравнения (1) и (2) впрямую использованы быть не могут, так как не входят в имеющуюся в этой системе базу данных, где обычно используются табличные зависимости типа  $\sigma_e = f(\xi_e, \varepsilon_e, T)$  или уравнение вязкопластической среды с нелинейным скоростным и деформационным упрочнением вида.

$$\sigma_e = k \cdot \exp\left[\frac{Q_d}{RT}\right] \xi_e^m \cdot \varepsilon_e^n + \sigma_s(T), \quad (3)$$

где  $\sigma_s(T)$  [МПа] – предел текучести при заданной температуре и скорости деформации при  $\varepsilon_e = 0$ ;  $m$  - показатель скоростного упрочнения;  $n$  - показатель деформационного упрочнения вязкопластической среды.

На основе полученных данных рассчитали реологические параметры уравнения (3), представленные в таблице 3.

Кроме этого по данным таблиц 2 и 3 с помощью специально разработанной

компьютерной программы в среде MathCAD были рассчитаны и построены кривые деформационного упрочнения исследуемых сплавов, как результат роста размера зерна при СПД с изменяющейся скоростью деформации.

Таблица 3 - Реологические параметры уравнения  $\sigma = \sigma(T, \varepsilon, \zeta)$

| Марка | T   |     | k                    | $Q_d/R$ ,<br>град К | m     | n     | $\sigma_s(T)$<br>МПа |
|-------|-----|-----|----------------------|---------------------|-------|-------|----------------------|
|       | °C  | K   |                      |                     |       |       |                      |
| AMг6  | 420 | 693 | 1,252                | $3,62 \cdot 10^6$   | 0,361 | 0,136 | 3,00                 |
| 1570  | 475 | 743 | 0,822                | $3,68 \cdot 10^6$   | 0,377 | 0,182 | 0,65                 |
| Д19   | 490 | 763 | $2,49 \cdot 10^{-5}$ | $1,29 \cdot 10^7$   | 0,638 | 0,181 | 0,98                 |

В четвертой главе приведены результаты компьютерного моделирования процессов формовки типовых оболочек. Моделирование производили в FEM CAD системе с использованием реологических параметров, определенных нами для исследуемых сплавов по уравнению (3). Предварительно была разработана специальная технология моделирования и проведена адаптация компьютерной системы к решению задачи СПФ листового материала и расширена база исходных данных этой системы путем формирования таблиц со значениями реологических характеристик сверхпластичных алюминиевых сплавов АМг6, 1570 и Д19.

Были разработаны 12 типовых компьютерных FEM CAD моделей для процессов СПФ полых оболочек с макро-, микро- и комбинированным рельефом. Расчеты на этих моделях позволили установить основные закономерности формоизменения оболочек с рельефом при рациональных и отличных от них режимах СПФ по температуре и скорости деформации.

Было проведено моделирование формовки оболочек, которые имеют форму купола, конуса, коробки, несимметричной геометрической формы, позитивного и ступенчатого цилиндра, а также оболочек с продольными рифтами различного сечения, оболочек с микрорельефом (рис. 2).



Рисунок 2 - Примеры типовых оболочек с рельефом, полученных при компьютерном моделировании СПФ

Результаты анализа расчетных данных, полученных при моделировании свободной формовки купола, показали, что они отражают известные экспериментальные и теоретические закономерности высокотемпературной ползучести оболочки при двухосном растяжении под давлением.

Процесс формообразования оболочки при СПФ условно делят на ряд стадий, различающихся напряженно-деформированным состоянием металла, условиями трения, энергетическими затратами и продолжительностью. Первая стадия формовки заключается в свободном выпучивании заготовки под действием избыточного давления газа в полость матрицы и завершается по достижении оболочкой рабочей поверхности инструмента. Формообразование оболочки происходит при этом за счет утонения части заготовки, свободной от контакта с поверхностью штампа. Это требует относительно малых величин давления газа, что связано с большими радиусами кривизны оболочки, и непродолжительно по времени. Стадия свободного формообразования оболочки является общей для всех процессов СПФ независимо от формы рабочего инструмента. А в ряде случаев, при свободной формовке оболочек типа тел вращения без использования инструмента (например, полусферической, эллипсоидной формы) и единственной стадией СПФ, в результате которой оболочка принимает окончательную форму. Число последующих стадий может быть различным и определяется формой рабочей поверхности инструмента и наличием рельефа в виде рифтов, пуклевок и т.д. Так при СПФ деталей коробчатой формы, наряду со свободным формоизменением оболочки, также выявляются стадии оформления двухмерных и трехмерных угловых элементов детали. На этих стадиях происходит непрерывное уменьшение радиуса кривизны оболочки, что вызывает необходимость увеличения давления газа. Формообразование оболочки здесь происходит в основном за счет утонения зон заготовки, свободных от контакта с инструментом, ввиду практически полного отсутствия скольжения материала заготовки после касания ей поверхности инструмента. Основным отличием стадии свободной формовки от последующих является то, что первая стадия определяет общее соотношение размеров оболочки по высоте и в плане, тогда как на последующих стадиях происходит местное формоизменение заготовки, определяемое максимальным давлением газа.

Результаты моделирования свободной формовки купола показали, что для листа толщиной 0,8 мм из сплава АМг6 при времени формовки 900 с рациональное давление газа равно 1,0 МПа, а для листов толщиной 1,0 мм из сплавов 1570 и Д19 рациональное при времени формовки 420...460 с давление газа не превышает 0,8 МПа.

При моделировании формовки конуса из листа сплава АМг6 толщиной 0,8 мм рациональное давление газа равно 1,0 МПа, а формовка происходит в течение времени ~ 14 мин. Для листа 1570 и Д19 толщиной 1,0 мм задавали давление газа 0,9...1,0 МПа, время выдержки составило 12...15 минут. Расчеты проводили для изотермических условий при оптимальной температуре СПД для каждого сплава.

Моделирование формовки сложнопрофильной несимметричной оболочки с рельефом показало наличие в оболочке трехмерной схемы напряженно-деформированного состояния с преобладанием двухосного растяжения и позволило оценить предельные характеристики деформированного состояния.

Из анализа результатов моделирования было установлено, что для оболочек с макрорельефом лучше использовать сплав 1570 взамен сплава АМг6, а для оболочек со сложным комбинированным рельефом целесообразно применять сплав Д19. Показано, что расчетная по времени и деформациям макро- и микроформуемость листов толщиной 0,8...1,0 мм из сплава АМг6 при максимальных давлениях до 1,5 МПа на 30-35% ниже, чем у сплавов Д19 и 1570.

**В пятой главе** описаны результаты экспериментальных исследований процессов СПФ разных оболочек с целью оценки формируемости тонколистовых материалов при получении различных геометрических форм, содержащих типовые элементы поверхностного рельефа.

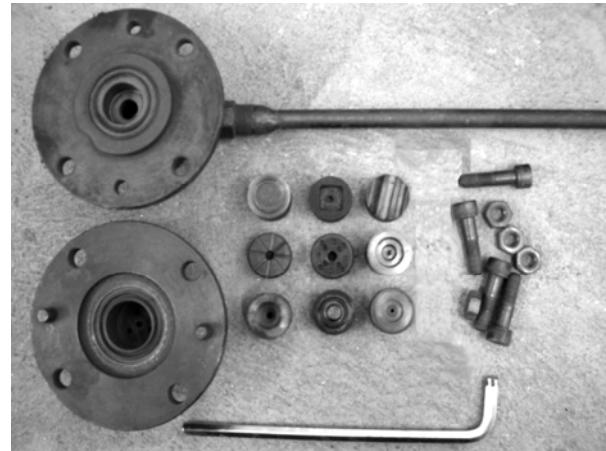
При этом сопоставляли экспериментальные результаты с данными компьютерным моделированием и разрабатывали рекомендации для технологии СПФ.

Для экспериментов по СПФ использовали изготовленный на основе результатов компьютерного моделирования штамповый блок, матрицы и вставки (рис. 3). А также при определении номенклатуры экспериментальных образцов исходили из принципа рационального разнообразия, достаточного для того, чтобы сделать обоснованные выводы о возможности воспроизведения достаточно простых макро- и микро-

элементов формируемого изделия при реальном формоизменении тонкой заготовки в процессе СПФ.



*a*



*б*

Рисунок 3 - Трехмерные модели матриц (а); фотографии штамповочного блока, матрицы и штамповых вставок (б)

Эксперименты по СПФ проводили следующим образом: заготовку укладывали в гнездо матрицы и закрывали крышку штампа. Специальным держателем подавали штамп под гидравлический пресс и производили его обжатие с целью формирования герметизирующих рифтов. Далее, не снимая усилия пресса, закручивали болты для запирания штампа и помещали штамповый блок в нагревательную электропечь. После достижения заготовкой температуры начала СПФ подавали сжатый газ в пространство между крышкой штампа и заготовкой, фиксировали время и отслеживали заданную длительность формовки. После этого давление внутри штампа сбрасывали, извлекали штамповый блок из печи на металлический верстак, где открывали его шведским ключом. Образцы извлекали из матрицы с помощью специального выталкивателя. Каждый образец маркировали, и данные о нем заносили в журнал. При завершении экспериментов производили компьютерную обработку полученных данных с построением соответствующих диаграмм и графиков. Примеры оболочек с комбинированным рельефом, полученные СПФ, показаны на рисунке 4.

В результате обработки результатов экспериментов были определены необходимые и достаточные значения технологических параметров СПФ для получения предельных и допустимых деформаций оболочек разных геометрических форм. Также были проанализированы распределения толщин стенок по характерным

сечениям оболочек, измерены их геометрические параметры и произведена оценка степени заполнения гравюр матриц.



Рисунок 4 - Фотографии оболочек с комбинированным рельефом, полученные СПФ

Как показали результаты экспериментов по формовке конических оболочек, с примерно постоянной скоростью деформации в вершине, оптимальным является давление 1,1...1,2 МПа для сплава АМг6 и 0,9...1,1 МПа для сплава Д19. Время выдержки при этом не оказывает решающего воздействие на формоизменение, так как основной геометрический параметр - высота конуса - достигает максимума уже после 10 минут и при этих величинах давления существенно не увеличивается. Дальнейшее увеличение давление приводит к разрыву стенки оболочки в вершине.

Аналогичные результаты были получены при свободной формовке куполов, а также СПФ коробчатых и ступенчатых цилиндрических оболочек, получаемых по негативной схеме заполнения полости матрицы. Во всех случаях, наибольшее утонение и последующие разрывы в оболочках происходили в местах, оформление которых происходило в последнюю очередь: в вершине куполов, трехмерных и двухмерных углах коробок и цилиндров, то есть там, где точки поверхности оболочки имеют максимальные перемещения.

При СПФ по схеме позитивной формовки, когда происходит обтяжка элемента (знака), выступающего над поверхностью дна матрицы, в отличие от результатов ранее проведенных исследований, было получено, что при формоизменении оболочки

достигаются большие по значениям деформации по толщине на сгибах выступов и вблизи них. При этом разрушение оболочки происходит именно в этих местах. Это позволило успешно опробовать комбинированную схему СПФ вытяжки с обтяжкой для увеличения площади поверхности формируемого изделия.

Результаты экспериментов по СПФ оболочек с рельефом показали, что конечная макроформа оболочки даже при больших местных деформациях ( $\varepsilon_e > 1,2 \dots 1,5$ ) получается достаточно четко, несмотря на относительно небольшое давление формовки ( $p = 0,7 \dots 0,9$  МПа). Но микрорельеф при этих давлениях оформляется не полностью. При формовке оболочки без значительных местных деформаций ( $\varepsilon_e < 0,5 \dots 0,7$ ), где может быть приложено большее по величине давление ( $p = 1,0 \dots 1,5$  МПа), микрорельеф проявляется полностью даже для элементов с размерами в плане менее 0,1 мм. Из этого следует, что совмещение макро- и микроформовки в одной операции требует соответствующего регулирования величины давления на разных стадиях формоизменения.

Полученные по результатам экспериментов зависимости глубины (высоты) элементов рельефа, а также их размеров в плане от времени СПФ и давления показали, что геометрические элементы рельефа с размерами в плане до 0,2 мм формуются полностью. Причем минимальные размеры рельефа очень мало зависят от величины рабочего давления формовки. При одинаковой высоте (глубине) оболочки геометрия микроэлементов зависит от приложенного давления, и чем больше высота элемента, тем эта зависимость сильнее. Поэтому качественные изделия с неглубоким или мелким рельефом могут быть отформованы при достаточно небольших давлениях (порядка 1,1...1,2 МПа), тогда как для получения глубокого рельефа требуется давление 1,2...1,5 МПа.

В результате экспериментальных исследований СПФ оболочек, сочетающих макроформу и поверхностный рельеф, было установлено, что рельеф высотой и глубиной до 0,02 мм может быть получен при максимально допустимых давлениях 1...1,5 МПа. При меньших значениях высотных размеров микрорельефа гравюры матрицы на оболочке он не оформляется даже при предельно допустимых по технике безопасности давлениях более 2 МПа. Это в свою очередь предъявляет повышенные требования к чистоте поверхностей матрицы, контактирующих с оболочкой, так как любая шероховатость или наличие посторонних элементов на поверхности гравюры

или зеркала переноситься в виде отпечатка на формируемой оболочке, ухудшая её качество.

При исследовании микроструктуры образцов было показано, что выдержка под давлением при СПФ более 25...30 минут при давлении до 1,5 МПа приводит к увеличению среднего размера зерна в 2-3 раза. Это объясняет потерю сверхпластичных свойств материала и замедление или полное прекращение заполнения гравюры матрицы при увеличении давления или времени СПФ, а также появление разрывов стенки оболочки в местах с наибольшей вытяжкой.

При анализе результатов экспериментов, было показано, что технологические режимы (давление, температура, время выдержки, коэффициент трения по контактной поверхности), использованные при проведении эксперимента, полностью совпали с теми, которые были получены при компьютерном моделировании. Сопоставление полученных данных показало, что при оптимальной температуре СПД и давлении СПФ до 1,5 МПа расчетные данные компьютерного моделирования соответствуют экспериментальным значениям по времени СПФ с точностью до 10%, а распределение толщин по профилю рельефных оболочек с точностью до 5...7% при толщинах стенки оболочек до 0,1 мм. Это свидетельствует достаточно высокой достоверности результатов компьютерного моделирования и их соответствие реальной картине физического эксперимента.

На основе полученных результатов была разработана комплексная методика определения технологических режимов и параметров СПФ для процессов изготовления из листа оболочек с рельефом. Также были разработаны рекомендации по температурно-скоростным, силовым и временными режимам СПФ алюминиевых оболочек. В частности:

- температурный интервал СПФ составляет 410 - 430°C для сплава АМг6, 465 - 485°C для сплава 1570 и 480 - 500°C для сплава Д19;
- скорость сверхпластической деформации при формовке в этих температурных интервалах изменяется от  $4 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$  до  $3 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1}$  для сплава АМг6, от  $3 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$  до  $2 \cdot 10^{-2} \text{с}^{-1}$  для сплава 1570 и от  $3 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$  до  $9 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1}$  для сплава Д19, соответствующая показателю скоростного упрочнения  $m > 0,3$ ;
- для заготовки из листов толщиной 0,8 - 1,5 мм с ультрамелким зерном до 10 мкм в зависимости от схемы СПФ и формы оболочек можно задавать давление газа от

0,9 до 1,5 МПа для сплава АМг6 и от 0,6 до 1,3 МПа для сплава Д19;

- время формовки обычно изменяется от 5 до 12 минут при макроформовке, от 10 до 15 минут при микроформовке. Чем сложнее форма и рельеф оболочки, тем требуется больше общее время СПФ.

Разработаны рекомендации для проектирования технологии СПФ рельефных оболочек из исследуемых алюминиевых сплавов, которая включает следующие основные этапы:

- анализ и выбор номенклатуры изделий, и разработка эскизов деталей с учетом требований технических условий для изготовления СПФ;
- построение на основании эскизов деталей объемных геометрических 3D-моделей заготовок в виде оболочек, изготовление которых проводится с помощью СПФ;
- проектирование геометрических 3D-моделей матриц с гравюрой, повторяющей форму оболочки;
- компьютерное конечно-элементное моделирование процесса СПФ оболочек из листа;
- анализ результатов моделирования и выбор рациональных технологических параметров формовки;
- изготовление матриц в металле по разработанным моделям и чертежам;
- формовка опытных образцов оболочек из листов с УМЗ структурой;
- исследование точности размеров и геометрических характеристик оболочек, структуры и свойств металла после СПФ для сравнения с ТУ;
- выбор финишной обработки, отделочных операций и технологии сборки изделия;
- составление технологической карты производства и промышленное освоение.

Также были разработаны рекомендации по проектированию штамповых блоков и инструмента для СПФ и предложены оригинальная конструкция штампа, по которой получено положительное решение о выдаче патента РФ на изобретение.

Результаты исследований и методика технологических проб листовых материалов на СПФ внедрены в учебный процесс и практику исследований в ВятГУ (г. Киров, Россия) и ГТУ им Ле Куй Дона (СРВ), используются на кафедре ТОПТ ГТУ «МИСиС».

## **Основные результаты работы и выводы**

1. На основе анализа научно-технической и патентной литературы выбраны для исследования процессы СПФ сплавы АМг6, 1570, Д19 и показано, что сведения о рациональных режимах формовки тонкостенных рельефных оболочек из них практически отсутствуют.

2. Исследования микроструктуры листов исследуемых сплавов толщиной 1-2 мм, полученных по специальным схемам ТМО, показали что средний размер зерна после нагрева до оптимальной температуры СПД и выдержки в течении до 10 минут составляет для АМг6 10,4 мкм, для 1570 4,3 мкм и для Д19 6,6 мкм.

3. На основе данных, проведенных ранее исследований сверхпластичности, рассчитаны реологические параметры и основные реологические зависимости для модели СП-среды с учетом изменения температуры и размера зерна. Показано, что это позволяет по условию  $m(\xi_e, L) > 0,3$  обоснованно выбрать рациональные термомеханические и кинематические режимы для компьютерного моделирования процессов СПФ рельефных оболочек.

4. Разработаны 12 компьютерных моделей процессов СПФ типовых полых оболочек с рельефом. Установлено, что расчеты по этим моделям позволяют установить основные закономерности и характеристики формоизменения оболочек при различных схемах и режимах СПФ, а также видах макро и микрорельефа.

5. По результатам экспериментов на СПФ для сплавов АМг6 и Д19 показано, что при оптимальной температуре СПД и максимальном давлении газа (до 1,5 МПа) расчетные данные компьютерного моделирования соответствуют экспериментальным значениям СПФ с точностью до 8-10%, а по распределению толщин по профилю рельефных оболочек с точностью до 5-7%. Показано, что реальная макро- и микроформуемость сплава АМг6 на 30-35% ниже, чем для сплава Д19.

6. Предложена методика комплексной оценки формуемости листов с УМЗ структурой, сочетающей компьютерное моделирование и экспериментальную проверку формовки типовых оболочек и их элементов, а также разработаны рекомендации по её практическому использованию. Показано, что на этой основе можно проектировать оснастку и инструмент, температурно-скоростным и силовым режимам СПФ полых оболочек с рельефом.

## Публикации по теме диссертации

- 1. О.М. Смирнов, Нгуен Чыонг Ан, М.А. Цепин, С.М. Поляков, А.В. Коровкина.** Исследование реологических свойств алюминиевых сплавов для моделирования процессов сверхпластической формовки. Технология легких сплавов, Москва, 2008, №1, с 67 - 71.
- 2. О.М. Смирнов, С.А. Тулупов, М.А. Цепин, Н.Л. Лисунец, В.В. Бегнарский, Нгуен Чыонг Ан.** Реологические модели как основной элемент моделирования процессов обработки металлов давлением. Вестник МГТУ, Магнитогорск, 2008, №2, с 45 - 52.
- 3. Нгуен Чыонг Ан, М.А. Цепин, К.Ю. Апатов, А.В. Коровкина.** Компьютерное моделирование сверхпластической формовки оболочек из алюминиевого сплава 1570, Цветные металлы, Москва, 2009, №1, с 64 - 66.
- 4. В.К. Портной, М.А. Цепин, Нгуен Чыонг Ан, А.В. Коровкина, Чан Дык Кыу,** Технологические пробы на сверхпластическую формовку оболочек из листов сплава Д19. Кузнечно-штамповочное производство, 2009, №4, с 39 - 43.
- 5. М.А. Цепин, В.В. Бегнарский, Нгуен Чыонг Ан.** Компьютерное моделирование реологических и структурных свойств материалов. В кн. Материалы межвузовской научно-практической конференции «Применение Математических методов и компьютерной техники в прикладных задачах», Москва, МГЭИ, 2007, с 90 - 100.
- 6. Нгуен Чыонг Ан, К.Ю. Апатов, М.А. Цепин, С.М. Поляков, А.В. Коровкина.** Моделирование процессов сверхпластической формовки оболочек из алюминиевых сплавов. В кн. Труды Всероссийской научно-технической конференции «Наука-Производство-Технологии-Экология», Киров, ВятГУ, 2008, с 117 - 122.
- 7. Нгуен Чыонг Ан, М.А. Цепин, К.Ю. Апатов, А.В. Коровкина.** Исследование влияния давления газа при сверхпластической формовке оболочек из алюминиевых сплавов компьютерным моделированием. В кн. Тезисы Девятой Всероссийской научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов «Авиакосмические технологии АКТ - 2008», Воронеж. 2008, с 27 - 28.
- 8. Нгуен Чыонг Ан, К.Ю. Апатов, М.А. Цепин.** Моделирование сверхпластической формовки оболочек из алюминиевых сплавов. В кн. «Экология, ресурсосбережение, материаловедение в производстве высококачественных металлов»: Труды МГВМИ, 2008. с 189 - 190.
- 9. Апатов К.Ю., Цепин М.А., Нгуен Чыонг Ан, Апатов Ю.Л.** Использование явления сверхпластичности для получения из листовых заготовок многокомпонентных изделий и разработка средств технологического оснащения. Сборник Всероссийской научно-технической конференции «Наука - производство - технология - экология», Киров, 2009, т.2, с 168-170.
- 10. Апатов К.Ю., Нгуен Чыонг Ан, Цепин М.А., Коровкина А.В.** Компьютерное моделирование сверхпластической формовки оболочек из алюминиевого сплава Д19. Сборник Всероссийской научно-технической конференции «Наука - производство - технология - экология», Киров, 2009, т.2, с 174-177.
- 11. Поляков С.М., Коровкин О.Н., Коровкина А.В., Нгуен Чыонг Ан, Цепин М.А.** Сверхпластическая формовка оболочек из листа сплава Д19 с ультрамелким зерном. Сборник Всероссийской научно-технической конференции «Наука - производство - технология - экология», Киров, 2009, т.2, с 217-220.
- 12. Апатов К.Ю., Апатов Ю.Л., Цепин М.А., Нгуен Чыонг Ан.** Устройство для получения изделий способом листовой формовки в состоянии сверхпластичности. Положительное решение о выдаче патента на изобретение от 24 февраля 2009 г по заявке №2009103330/22 (004340) от 2 февраля 2009 г.

Издательство ООО «ПКЦ Альтекс».  
Издательская лицензия ЛР №065802 от 09.04.98  
Подписано в печать 28.04.2009  
Формат 60x90 1/16 . П.л.1,25  
Тираж 100 экз. Заказ №86  
Отпечатано в типография ООО «Мультипринт».  
121357, Москва, ул. Верейская, д.29,  
Тел.: 638-45-55; 411-96-97; 998-71-71  
[multiprint@mail.ru](mailto:multiprint@mail.ru)    [www.k-multiprint.ru](http://www.k-multiprint.ru)