

На правах рукописи

Апатов Константин Юрьевич

**РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ОБОЛОЧЕК СЛОЖ-
НОЙ ФОРМЫ С ПОВЕРХНОСТНЫМ РЕЛЬЕФОМ ИЗ ЛИСТОВОЙ
ЛАТУНИ МЕТОДАМИ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКИ**

Специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2006

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории «Деформации сверхпластичных материалов» Московского Государственного института стали и сплавов (Технологического Университета).

Научный руководитель:

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Цепин Михаил Анатольевич

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Романов Константин Игоревич

Кандидат технических наук Семенко Константин Михайлович

Ведущее предприятие:

ОАО Гайский завод по обработке цветных металлов «Сплав»

Защита состоится «25» октября 2006 г. на заседании диссертационного совета Д 212.132.09 при Московском Государственном институте стали и сплавов (технологическом университете) по адресу: 117936, г. Москва, ГСП-1, Ленинский проспект, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского Государственного Института Стали и Сплавов (технологического университета).

Автореферат разослан «___» сентября 2006 г.

Справки по телефону (495) 955-01-27

Ученый секретарь диссертационного совета

Ионов С.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в связи с необходимостью интенсификации и развития отечественного машиностроения для повышения его конкурентоспособности стоит задача разработки и внедрения высокоэффективных наукоемких технологий, к числу которых относятся процессы обработки металлов давлением.

Сокращение объемов массового и крупносерийного производства в условиях рыночной экономики и повышения спроса на изделия, производимые мелкими сериями или в единичных экземплярах, характерно не только для потребительского рынка, но и для создания новых образцов техники и видов продукции различных отраслей машиностроительного производства.

В связи с этим возникает необходимость разработки новых и совершенствования существующих процессов обработки металлов давлением, эффективных в условиях единичного и мелкосерийного производства. К числу таких процессов относится листовая сверхпластическая формовка (СПФ) сложнопрофильных деталей из листовых конструкционных материалов с ультрамелкозернистой структурой.

Общий рост экономики Российской Федерации и отдельных отраслей машиностроения приводит к повышению благосостояния и покупательной способности населения. Это обеспечивает повышение устойчивого спроса на продукцию, позволяющую как индивидуальным, так и корпоративным потребителям предъявлять различные требования к качеству и стоимости товаров. На начальном этапе выпуска таких товаров величина приобретаемой единичной партии ограничена, но номенклатура его типоразмеров должна быть достаточно широкой. При этом традиционно востребованы тонкостенные изделия из листа, имеющие сложную пространственную форму и содержащие на своей поверхности различного рода функциональный или декоративный рельеф. Обычно они производятся с помощью процессов ручной или машинной чеканки, выколотки, формовки и др. - то есть методами листовой штамповки.

Одним из перспективных процессов изготовления такого рода изделий единичными или мелкосерийными партиями, является СПФ, называемая также пневмоформовкой или газостатической формовкой листовых материалов в состоянии сверхпластичности. Процессы СПФ оболочек из листа известны с 70-х годов XX века и были достаточно хорошо исследованы. К настоящему времени учеными разных стран специально для процессов СПФ по разным схемам были разработаны так называемые

сверхпластичные сплавы на основе титана, алюминия, меди, железа и т. д.

Сверхпластичные латуни Л63 и ЛЖМц59-1-1, технология производства которых была разработана ОАО Институт «Цветметобработка», МИСиС и ЗАО «Кировский завод по обработке цветных металлов», хорошо зарекомендовали себя при производстве эксклюзивной продукции художественно-декоративного назначения. Эти латуни имеют достаточно высокие механические свойства, привлекательный желтый цвет «под золото», обладают повышенной адгезией с другими материалами, что облегчает нанесение на поверхность латунного изделия различных покрытий лужением, анодированием, оксидированием, чернением и т. п.. Они также обладают высокой теплопроводностью и коррозионной стойкостью в слабоагрессивных средах. В связи с этим они могут использоваться как в производстве различных изделий машиностроения, так и при изготовлении потребительских товаров. Вместе с преимуществами СПФ это позволяет изготавливать из этих латуней широкую номенклатуру изделий. Большие перспективы открываются для их применения в архитектуре при изготовлении облицовочных стеновых панелей и других деталей декора стен и потолков, в которых сочетаются разнообразные фактуры, имитирующие эффект патины, коррозии, разного рода футуристических композиций (например оплавленных метеоритных ландшафтов), которые могут использоваться при оформлении помещений в стиле «high-tech». Также на латунных изделиях может быть имитирована фактура древней бронзы или золота при создании классических интерьеров.

Применение СПФ открывает определенные перспективы в общем и специальном машиностроении, при производстве изделий-оболочек с тонким функциональным поверхностным рельефом: мембран, сильфонов и т. д. Большие деформации, характеризующие сверхпластическую формовку в сочетании с высокой теплопроводностью латуни позволяют изготавливать элементы теплообменников с большой площадью контакта с окружающей средой, и, следовательно, более интенсивным теплоотводом. Сложнопрофильные оболочки из латуни применяются при производстве различных корпусных деталей.

В связи с этим актуальной научно-технической задачей, решению которой посвящена настоящая диссертационная работа, является исследование, разработка и совершенствование процессов сверхпластической формовки оболочек сложной формы с поверхностным функциональным и декоративным рельефом из листа сверхпла-

стичных латуней с ультрамелкозернистой структурой на основе использования экспериментально-теоретических методов обработки металлов давлением и применения современных информационных компьютерных технологий

Работа является частью комплекса исследований по разработке теории и технологии эффективных наукоемких процессов обработки металлов давлением, проводимых МИСиС (ТУ) совместно с Вятским Государственным университетом (г. Киров) и в соответствии планом госбюджетной НИР № 3018053 единого заказа по теме «Создание реологической теории и математической модели высокотемпературной деформации с учетом разогрева в процессах с микро- и макросдвигами и исследование их воздействия на металлы и сплавы» на 2003-2006 г.г. и по проекту № 3018001 «Исследование и разработка эффективных технологических процессов ОМД на основе физического и математического моделирования» ведомственной научной программы "Развитие научного потенциала высшей школы" на 2005 г.

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории Деформации сверхпластичных материалов Московского государственного института стали и сплавов (Технологического университета).

Автор выражает глубокую признательность д.т.н. проф. О.М. Смирнову за научно-методические консультации, а также благодарность всем сотрудникам НИЛ ДСПМ и кафедры ОМД МИСиС (ТУ) за большую помощь, оказанную при выполнении работы.

Целью работы является разработка и совершенствование процессов сверхпластической формовки для получения оболочек сложной формы с поверхностным рельефом из латуней Л63 и ЛЖМц 59-1-1 на основе использования экспериментально-теоретических методов обработки металлов давлением и применения информационных компьютерных технологий.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Провести анализ технологических возможностей процессов сверхпластической формовки при производстве тонкостенных сложнопрофильных оболочек с поверхностным рельефом различного назначения и выбрать наиболее рациональные и экономичные схемы формоизменения на основе обобщения данных научно-технической и патентной литературы;

2. Разработать комплексную методику проектирования технологии СПФ с ис-

пользованием методов натурного физического и математического моделирования с применением современных средств вычислительной техники, программного обеспечения и специализированных компьютерных вычислительных систем (ВС);

3. Для проведения экспериментальных исследований и отработки технологии СПФ спроектировать и изготовить рациональную конструкцию штампа и набор матриц для формовки типовых оболочек и элементов рельефа на основе расчетов условий нагружения штамповой оснастки в процессе формовки, расчетов на прочность и электронагрев штампового инструмента;

4. Определить количественные параметры изменения структуры и реологических свойств сверхпластичных латуней ЛЖМц 59-1-1 и Л63 и подготовить на этой основе информацию для баз данных свойств деформируемых материалов с целью адаптации специализированных компьютерных вычислительных систем для решения задач создания виртуальных моделей процессов СПФ оболочек из этих сплавов;

5. Экспериментально определить показатели формуемости и выбрать рациональные технологические режимы СПФ изделий в виде оболочек с поверхностным рельефом, на основе результатов экспериментально-теоретических исследований и компьютерного моделирования.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Получены новые количественные данные о влиянии температуры на изменение характеристик структуры и реологических свойств латуней ЛЖМц 59-1-1 и Л63 при СПФ в интервале температур сверхпластической деформации;

2. Рассчитаны значения реологических параметров моделей сверхпластической деформации латуней, которые использованы для формирования баз исходных данных специализированных компьютерных вычислительных систем, позволяющих моделировать процессы ОМД;

3. Разработана комплексная методика проектирования процессов СПФ для получения оболочек с декоративным или функциональным поверхностным рельефом с использованием различных специализированных систем автоматизированного проектирования;

4. Предложена типовая методика автоматизированных расчетов характеристик нагрева и проверки на прочность штамповой оснастки и инструмента для СПФ по беспрессовой схеме.

Практическая полезность работы.

1. Разработана новая конструкция штамповой оснастки и инструмента для экспериментального исследования и отработки технологии СПФ по беспрессовой схеме, защищенная патентом РФ.

2. Разработаны и экспериментально опробованы новые способы СПФ оболочек со сложным поверхностным рельефом, включая соединение и сборку с элементами крепления и деталями из других материалов (стали, стекла, камней и др.), признанные изобретением.

3. Разработаны образцы новых изделий с декоративным рельефом и технологии их получения с использованием процессов СПФ, которые приняты к внедрению для производства отделочных панелей и архитектурных элементов.

4. Методики и результаты экспериментально-теоретических исследований процессов СПФ использованы в учебном процессе на кафедре ОМД МИСиС (ТУ) и кафедре ОКМ ВятГУ (г. Киров) при выполнении курсовых и дипломных научно-исследовательских работ и проектов.

Методы исследования.

В работе, в качестве основного метода исследования закономерностей формоизменения в процессе сверхпластической формовки был выбран экспериментально-теоретический метод, включающий экспериментальные исследования на натурных материалах и математическое моделирование формоизменения сплошной среды со свойствами нелинейно-вязкой жидкости и изменяющейся микроструктурой.

Достоверность результатов определяется тем, что они получены с использованием 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 и опытно-промышленных условиях.

Реализация результатов работы.

Результаты работы внедрены в ОАО «Стройкомплект» г. С.Петербург, опробованы на машиностроительном предприятии и рекомендованы к использованию на

ряде производственных фирм.

Материалы диссертации используются в учебном процессе на кафедре ОМД МИСиС (ТУ) при чтении лекций по курсам «Теория обработки металлов давлением» и «Технология листовой штамповки»

Апробация работы.

Результаты работы доложены и обсуждены на международных научно-технических конференциях: «Наука-Производство-Экология», Киров, ВятГУ, 2004, 2005, 2006 года, «Авиакосмические технологии-2005», г. Воронеж, Девятом Международном Конгрессе «Кузнец-2005», научных конференциях молодых ученых МИСиС 2004, 2006 года.

Публикации.

По теме работы опубликовано 4 статьи в рецензируемых научно-технических журналах и 10 статей в сборниках материалов международных конгрессов и всероссийских научно-технических конференций, получен 1 патент РФ и 1 решение о выдаче патента.

Структура и объем работы. Диссертация содержит 184 страниц, в том числе 112 страниц машинописного текста, состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов, включает 87 рисунков, 27 таблиц, библиографический список из 92 наименований и 3 приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, ее научная новизна и 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 также сверхпластической формовкой. Дан анализ основных схем и конструкций оснастки 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 моделиро-

вания процессов обработки металлов давлением. На основании результатов литературного обзора сформулированы цель и задачи исследований.

Во второй главе представлена общая методика проведения исследований. В качестве основных материалов были выбраны промышленные сверхпластичные латуни марок ЛЖМц 59-1-1 и Л63 (с 0,13 % кремния). При экспериментальных исследованиях и опробовании процессов СПФ использовали листы производства Кировского завода ОЦМ. Для подготовки ультрамелкозернистой структуры, обеспечивающей проявление сверхпластических свойств, на заводе были использованы следующие термомеханические режимы обработки латуней.

Слитки из латуни ЛЖМц 59-1-1 по ГОСТ 15527-70 размером $110 \times 400 \times 900$ мм фрезеровали до толщины 100 мм, длины - 800 мм и подвергали горячей прокатке на двухвалковом стане за 8 проходов до толщины 5,0... 4,5 мм. Горячекатаный лист резали на гильотинных ножницах на карты длиной 1,5 м (без обрезки кромок) и подвергали холодной прокатке до $(2,0^{0,1})$ мм. Отжиг проводили при $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа. Повторную холодную прокатку производили на том же стане после перевалки на чистые валки до размера $(0,6^{0,1} \dots 0,8^{0,1})$ мм. Завершающий отжиг при $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ осуществляли в течение 1 часа.

Слитки из латуни Л63 (ГОСТ 15527-70) выплавляли на Кировском заводе ОЦМ в индукционной печи ИЛК - 1,6 и подвергали горячей прокатке на стане 2/850 за 8 проходов со 180 до $5,0^{0,45}$ мм. Холодную прокатку на стане Тандем - 1000 с 5,0 до $2,5^{0,22}$ мм выполняли по схеме рулонной прокатки. Рулоны отжигали в печи УКР 24 в течении 4 часов при температуре 500-500-550 $^{\circ}\text{C}$. Окончательную холодную прокатку рулонов до толщины $1,2^{0,09}$ мм проводили на стане 4/250. Для получения более тонкого листа проводили второй промежуточный отжиг при температуре 500 $^{\circ}\text{C}$ в течение 4 ч в той же печи. После зачистки кромок лист катали на стане 4/250 до конечной толщины $0,6^{0,1}$ мм. С целью стабилизации мелкозернистой структуры сплава проводили заключительный отжиг в камерной печи при температуре 440...450 $^{\circ}\text{C}$ в течение 5 часов. Рулоны резали на карты, которые использовали для получения заготовок под СПФ.

Химический состав сверхпластичных латуней приведен в таблице 1.

Исследования микроструктуры латуней проводили методами световой микроскопии и количественного металлографического анализа на листовых образцах после

изотермического нагрева, вырезанных из отформованных оболочек.

Таблица 1 – Химический состав исследуемых латуней

Марка сплава	Содержание элементов, процент по массе						
	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Al</i>	<i>Sn</i>	<i>Si</i>	<i>Zn</i>
ЛЖМц 59-1-1	58,7	0,89	0,68	0,16	0,55	-	ост.
Л63	61,6	-	-	-	-	0,13	ост.

С целью определения возможности применения тех или иных операций СПФ для получения сложного рельефа была разработана методика анализа формуемости оболочки¹. Она заключается в разбиении сложного рельефа на простые геометрические формы и элементы для выбора самого труднооформляемого. Затем для них экспериментальными и теоретическими методами определяются рациональные режимы давления и времени формовки. В результате производится оценка качества оболочки, производительности и энергоемкости процесса СПФ для прогнозирования себестоимости изготовления изделия и эффективности производства.

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 вариационного метода и дискретизации сплошной среды методом конечных элементов в постановке, приведенной в работе Е. Н. Чумаченко, О. М. Смирнова, М. А. Цепина. На этой основе сделан выбор программного обеспечения и специализированных компьютерных вычислительных систем для создания виртуальных компьютерных моделей процессов макро- и микроформовки тонкостенных оболочек со сложным рельефом, проектирования моделей оснастки и инструмента, а также их расчета на условия нагрева и прочность.

Математическое 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 НИЛ Деформации сверхпластичных материалов МИСиС.

В третьей главе приведены результаты количественного металлографического анализа микроструктуры двухфазных сверхпластичных латуней и расчетов численных значений реологических параметров для модели SP-среды с эволюцией структу-

¹ Разработано совместно с С.М. Поляковым и О.Н. Коровкиным

ры и модели вязкопластического течения материала с изменяющейся в процессе динамической рекристаллизации структурой.

В качестве базовой реологической модели поведения материала при СПФ в работе была выбрана модель SP-среды, описывающая изменение интенсивности скоростей деформации от величины структурного параметра (среднего размера зерна), температуры и интенсивности напряжений, возникающих под действием давления газовой среды. Модель включает следующие основные уравнения:

Определяющие соотношения (уравнения связи):

$$\xi_e = \xi_{eq} \cdot \exp\left\{\alpha \cdot \Omega^\beta \cdot (\sigma_e - \sigma_{eq}^{sp} Z_T)\right\} \left[\frac{(\sigma_e - \sigma_0^{sp} Z_T)}{(\sigma_s^{sp} Z_T - \sigma_e)} \right]^{n_v}, \quad (1)$$

где ξ_e – интенсивность скоростей деформации [с^{-1}]; Ω – обобщенный структурный параметр [мкм]; α – коэффициент влияния структурного параметра; β – показатель степени влияния структурного параметра; n – показатель степени ползучести; σ_e – интенсивность напряжений течения [МПа]; σ_0 – пороговое напряжение [МПа]; σ_{eq} – эквивалентное напряжение [МПа]; σ_s – условный предел текучести [МПа]; Z_T – температурный множитель Зиннера-Холломоуна, учитывающий сдвиг температурного интервала СПФ относительно оптимальной скорости сверхпластической 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_σ – энергия активации СПД [кДж/Моль]; R – универсальная газовая постоянная [$\text{кДж/(моль}\cdot\text{К)}$]; T_{sp} – оптимальная температура СПД [К].

Зависимость структурного параметра (среднего размера зерна) от времени нагрева перед СПФ (уравнение Бэка):

$$\Omega = \left\{ \Omega_0^e + B \cdot \exp\left(-\frac{Q_\Omega}{RT}\right) \cdot (\tau_h - \tau_0) \right\}^{1/d}, \quad (3)$$

где τ_h – время [с]; Ω_0 – начальный размер зерна [мкм] в момент времени τ_0 [с]; Q_Ω – энергия активации роста зерна [кДж/Моль]; d – показатель степени, учитывающий влияние текущего значения структурного параметра.

Скорость роста структурного параметра в зависимости от интенсивности скоростей деформации при СПФ:

$$\dot{\Omega} = \frac{d\Omega}{d\tau} = \frac{C_0}{\Omega^p} \cdot \exp\left[\frac{-Q_\xi}{RT}\right] \cdot (1 + a\xi_e^b), \quad (4)$$

где C_0 , a , b – эмпирические коэффициенты, зависящие от температуры СПД

Накопленная деформация (интенсивность деформаций)

$$\varepsilon_e = \int_0^\tau \xi_e d\tau, \quad (5)$$

Для более узкого скоростного интервала СПД применяли уравнения нелинейно-вязкой жидкости со структурной чувствительностью напряжений течения и температурным множителем Аррениуса:

$$\sigma = k \cdot \exp\left[\frac{Q_\sigma}{RT}\right] \xi_e^m \cdot \Omega^g, \quad (6)$$

где k – коэффициент пропорциональности [МПа]; m – показатель скоростного упрочнения; g – показатель структурного упрочнения.

Эта зависимость может также использоваться совместно с уравнениями (3) и (4).

В связи с тем, что в выбранной для моделирования процессов СПФ вычислительной системе Deform-3D, уравнения (1)-(6) напрямую использованы быть не могут, а в основном применяются табличные зависимости типа $\sigma_e = f(\xi_e, \varepsilon_e, T)$ или уравнение вязкопластической среды с нелинейным скоростным и деформационным упрочнением

$$\sigma = k \cdot \exp\left[\frac{Q_d}{RT}\right] \xi_e^m \cdot \varepsilon^n + \sigma_T, \quad (7)$$

где σ_T – предел текучести при заданной температуре и скорости деформации, МПа; n – показатель деформационного упрочнения.

Зависимость структурного параметра Ω_{rex} после деформации определяется с помощью уравнения динамической рекристаллизации

$$\Omega_{rex} = k \exp\left(\frac{Q_d}{RT}\right) \cdot \Omega_0^{k_d} \cdot \xi_e^m \cdot \varepsilon_e^{n_d} + c, \quad (8)$$

где T – температура, К; Ω_0 – исходный размер зерна, мкм; Ω_{rex} – величина зерна после рекристаллизации, мкм; k , k_d , n_d , c – коэффициенты, зависящие от материала.

Поэтому в работе с помощью специально разработанной программы, в BS MathCAD 12 были произведены расчеты значений параметров уравнений (7) и (8) на основе данных, полученных нами для уравнений (1)-(5). При этом предполагали, что деформационное упрочнение латуни при СПФ в основном происходит за счет роста среднего размера зерна в процессе СПД. Поэтому, экспериментально определив зави-

симось изменения значения структурного параметра по времени, получили зависимости напряжений от степени и скорости деформации для материала с изменяющейся во время СПД структурой от температуры деформации.

Для определения значений Ω проводили количественный анализ микроструктур латуней при трех температурах 500 °С, 550 °С и 600 °С, соответствующих границам температурного интервала СПД для сплава ЛЖМц 59-1-1 и временами выдержки 0, 10, 120, 480 мин. Затем методом случайных секущих выявляли распределение размеров α и β фаз, после чего определяли значение величины структурного параметра для каждого интервала времени выдержки при каждой температуре. По результатам были построены графики зависимости размера зерна от температуры и времени.

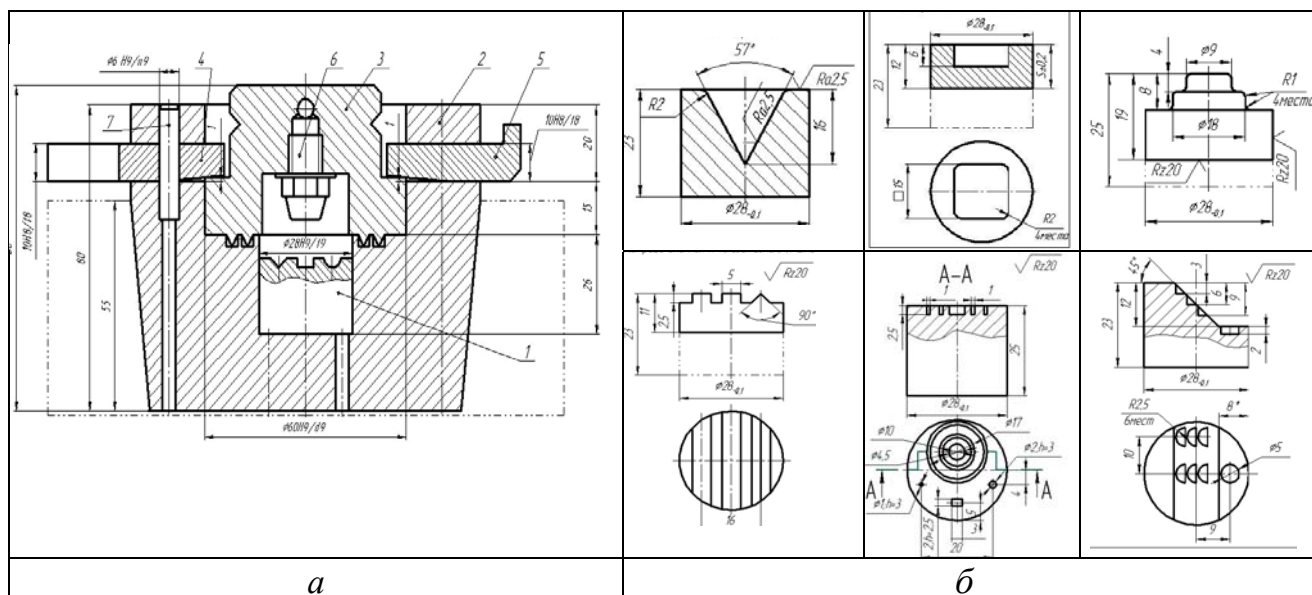
Аналогичные данные были получены нами для латуни Л63 при проверке результатов расчетов реологических параметров СПД, выполненных ранее в МИСиС в работах А. М. Африкантова, С. М. Полякова, А. М. Р. Миада.

Для экспериментально определенных и расчетных величин размера зерна и известных реологических параметров SP-среды на основе полученных нами зависимостей, описывающих изменение значений характерных напряжений от температуры деформации, были построены зависимости напряжений течения от скорости деформации для температурного диапазона СПД обеих латуней.

Для ввода в базу компьютерной ВС исходных данных реологических свойств материалов для уравнения (7) на основе результатов исследований структурных изменений и реологических зависимостей были подготовлены таблицы зависимостей $\sigma_e = f(\varepsilon \xi T)$ в широком интервале изменения значений переменных. Также для латуней ЛЖМц 59-1-1 и Л63 были построены зависимости сдвиговой вязкости и показателей скоростного и деформационного упрочнения от скорости и температуры деформации, необходимые для оптимизации силовых режимов СПФ.

В четвертой главе описаны результаты экспериментальных исследований процессов макро- и микроформовки разных типовых оболочек с целью оценки формовости тонколистовых материалов при получении различных геометрических форм, содержащих типовые элементы поверхностного рельефа.

Для проведения экспериментов нами был разработан и изготовлен новый штамповый блок (рис.1) для СПФ, работающий по беспрессовой схеме «печь-штамп». На конструкцию этого штампа был получен патент РФ №54541.



1- матрица, 2 – корпус, 3 – крышка, 4 – зажимной кулачок, 5 – фиксирующий клин, 6 – сопло для подачи рабочей среды, 7 - штифт

Рисунок 1 – Экспериментальный штамповый блок для СПФ (а) и набор матриц (б)

Для исследования формруемости тонких листов в таких основных процессах, как свободная формовка, формовка простых геометрических макроформ (конус, коробка, ступенчатый цилиндр и др.), формовка прямых рифтов с различным профилем, а также процессов сочетающих элементы макро- и микроформовки для штампового блока были спроектированы и изготовлены 10 комплектов матриц, гравюра которых включала простой и комбинированный поверхностный рельеф.

При экспериментах по СПФ² использовали следующую методику. Заготовку укладывали в полость с уплотнительными канавками, выполненную в корпусе штампа, и закрывали крышкой. Затем блок штампа с заготовкой и крышкой обжимали на прессе с целью герметизации рабочей зоны матрицы, фиксировали крышку с помощью поворотных эксцентриковых зажимов и клиньев. После этого блок помещали в камерную печь электросопротивления для нагрева до температур сверхпластичности. Температуру нагрева в рабочей зоне матрицы контролировали с помощью хромель-алюмелевой термопары и цифрового мультиметра модели М838. После нагрева до температуры СПФ, блок соединяли с пневмосистемой и подавали формующую среду, в качестве которой использовали углекислый газ. При формовке заготовку выдержи-

² В экспериментах участвовали студенты-дипломники кафедры технологии автоматизированного машиностроения ВятГУ и кафедры ОМД МИСиС.

вали под давлением в течение заданного промежутка времени, который фиксировали по секундомеру. Затем давление сбрасывали и извлекали блок из печи, разбирали и с помощью специального выталкивателя матрицу и полученный образец вынимали из штампа. Для всех образцов на инструментальном микроскопе производили измерения всех размеров по наружной и внутренней поверхности оболочки, далее их разрезали по характерным сечениям и замеряли распределение толщин по контуру. По полученным данным строили зависимости распределений толщин и характерных размеров оболочек от времени и давления формовки при заданных температурах СПФ.

В результате статистической обработки результатов экспериментов были определены необходимые и достаточные значения технологических параметров СПФ для получения предельных и допустимых деформаций оболочек разных геометрических форм, проанализированы распределения толщин стенок по характерным сечениям оболочек, измерены геометрические параметры форм и произведена оценка степени заполненности гравюр матриц. Также были получены зависимости глубины (высоты) элементов рельефа, а также их размеров в плане от времени СПФ и давления,

Для выявления изменений в структуре латуни после СПФ, был выполнен количественный металлографический анализ микроструктуры на образцах, вырезанных из наиболее полно оформленных оболочек. Микроструктуры, профили центральных сечений некоторых оболочек и технологические режимы СПФ, при которых они получены, представлены на рис. 2

Как показали результаты экспериментов по СПФ конических оболочек, рациональные с точки зрения формоизменения являются величины давления 0,7-0,8 МПа. Время выдержки при этом не оказывает решающего воздействия на формоизменение, так как основной геометрический параметр-высота конуса достигает максимума уже после 10 минут и при этих величинах давления существенно не увеличивается. Повышение давления до 1-1,2 МПа, приводит к разрывам в полюсе оболочки

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 на поверхности оболочки проходят наибольший путь от исходного положения на заготовке.

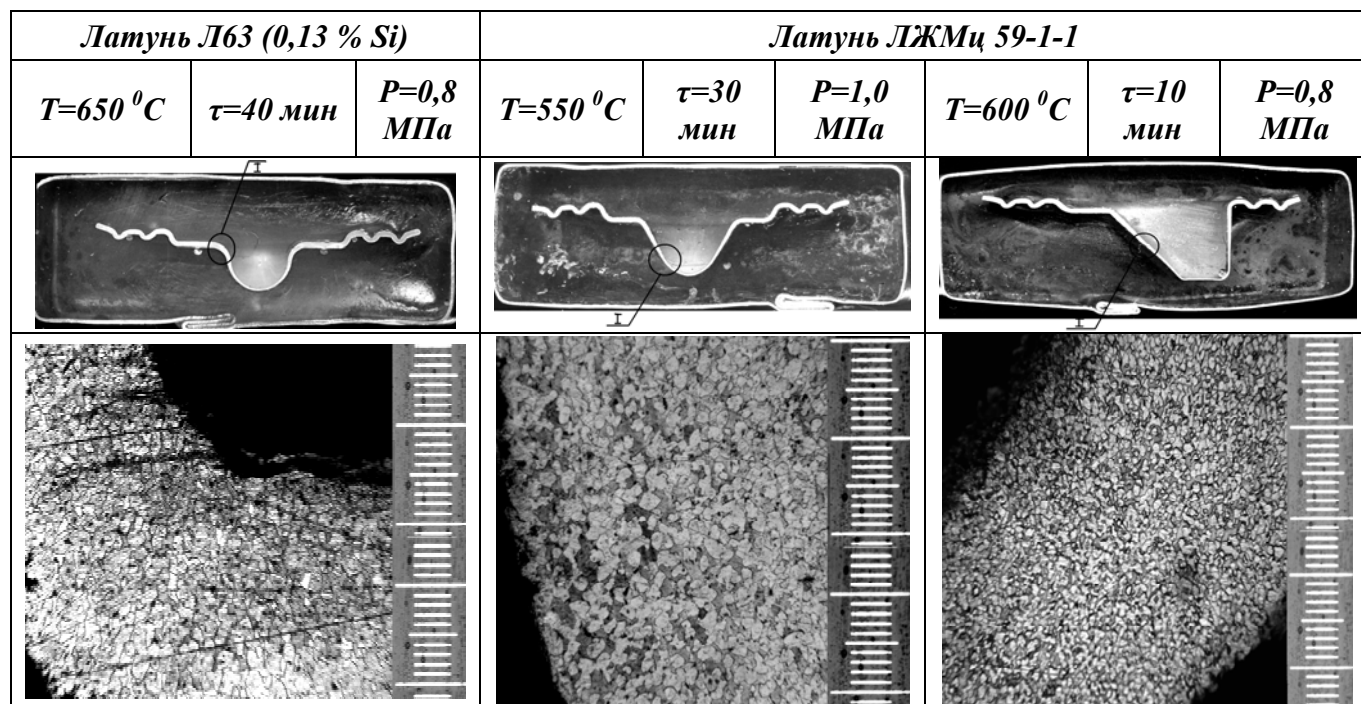


Рисунок 2 – Режимы СПФ, профили оболочек и микроструктуры в местах вырезки микрошлифов

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 комбинированный процесс, включающий вытяжку и просечку отверстия в оболочке в месте установки знака с заостренными краями.

Как показали результаты экспериментов по СПФ оболочек с рельефом, начальная макроформа даже при больших местных деформациях ($\epsilon_e > 1,2 - 1,5$) получается достаточно четко, несмотря на относительно небольшое давление формовки ($p = 0,7 - 0,9$ МПа), но рельеф при этих давлениях оформляется не полностью. При формовке оболочки без значительных местных деформаций ($\epsilon_e < 0,5 - 0,7$), где может быть приложено большее по величине давление ($p = 1,0 - 1,5$ МПа), поверхностный рельеф проявляется достаточно четко даже для элементов размером в плане менее 0,1 мм. Из этого, по-видимому, следует, что, совмещение операции макро- и микроформовки в одном процессе, не всегда целесообразно с точки зрения качества рельефа.

Было установлено, что геометрические элементы рельефа с размерами в плане до 0,2 мм формируются полностью, причем размеры очень мало зависят от величины рабочего давления формовки. В то же время геометрия элементов рельефа по высоте в сечении оболочки очень сильно зависит от приложенного давления. Причем, чем больше габарит элемента, тем эта зависимость сильнее. Поэтому качественные изделия с неглубоким или мелким рельефом могут быть отформованы при достаточно небольших давлениях (порядка 0,7-1 МПа), тогда как для получения глубокого рисунка требуется 1-1,5 МПа. Таким образом, в результате экспериментальных исследований СПФ оболочек с рельефом 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 профиля гравюры матрицы поверхностный рельеф не оформляется даже при максимальных давлениях более 2 МПа. Это в свою очередь предъявляет повышенные требования к чистоте поверхности гравюры матрицы, контактирующей с оболочкой, так как любая шероховатость на поверхности матрицы или другие неровности переносятся на формируемую оболочку, ухудшая её качество.

Было также установлено, что выдержка под давлением при СПФ более 20-25 минут приводит к увеличению среднего размера зерна до значений 10 мкм и более. Это в дальнейшем обуславливает потерю сверхпластичных свойств материала и, при увеличении давления или времени СПФ, замедляет и полностью прекращает заполнение гравюры матрицы, а при макроформовке приводит к разрушению оболочки.

В пятой главе приведены результаты компьютерного моделирования процессов макро- и микроформовки. Моделирование производили в BC Deform-3D с использованием реологических параметров, определенных нами для исследуемых латуней. Предварительно была разработана специальная технология моделирования и проведена адаптация BC Deform-3D к решению задачи СПФ листового материала и расширена база исходных данных этой ВС путем формирования таблиц со значениями реологических характеристик сверхпластичных латуней и параметров модели динамической рекристаллизации при СПФ для всего температурного интервала СПД.

При моделировании исследовали и анализировали различные процессы СПФ, предварительно реализованные в экспериментах.

Моделирование формовки простого конуса в матрицу выполнили для опреде-

ления возможности получения трехмерной модели при заданных режимах СПФ, сравнения её с геометрией экспериментального образца и проверки достоверности результатов моделирования. В результате построения виртуальной модели процесса СПФ, её расчетов и анализа результатов моделирования были получены геометрические параметры формуемой оболочки на любой стадии формоизменения конуса и зависимость его высоты, а также толщины стенок от времени СПФ и величины коэффициента трения. Из анализа этих данных следует, что увеличение контактного трения приводит к уменьшению высоты оболочки, увеличению утонения стенки и росту разнотолщинности оболочки. Было показано, что при сравнении с экспериментом отличие расчетных значений для $f=0,15$ по высоте конуса составляет не более 1,5%, по диаметру образующей – не более 0,5%, по разнотолщинности стенок 5-7%. Таким образом, по нашему мнению, была доказана высокая достоверность результатов моделирования и их соответствие реальной картине физического эксперимента.

При моделировании свободной формовки купола использовали функцию «трассировка точек» для определения зависимости изменения геометрических параметров оболочки (высоты купола и толщины стенки в его вершине - полюсе) от технологических режимов СПФ. Анализ расчетных данных показал, что они отражают известные экспериментальные и теоретические закономерности высокотемпературной ползучести оболочки при двухосном растяжении под давлением.

Моделирование формовки сложнопрофильной несимметричной оболочки с рельефом, показало наличие в оболочке трехмерной схемы напряженно-деформированного состояния (НДС) с преобладанием двухосного растяжения и позволило определить характеристики силового воздействия на штамповую оснастку на разных стадиях формоизменения.

Полученные данные использовали для расчетов условий градиентного нагрева штампового блока до температуры СПФ и расчетов его конструкции на упругие деформации и прочность при максимальных давлениях СПФ с помощью ВС Cosmos Design Star. Результаты этих расчетов позволили скорректировать режимы нагрева штампа в печи и оценить условия надежной герметизации рабочей полости штампа.

В шестой главе рассмотрены вопросы практического применения результатов экспериментально-теоретических исследований СПФ для разработки процессов получения оболочек с рельефом из латуней.

Была разработана комплексная методика проектирования технологии СПФ новых видов изделий, включающая следующие основные этапы:

- 1 – выбор номенклатуры изделий по результатам исследования рынка и создания эскизов типовых деталей и элементов рельефа;
- 2 – разработка виртуальных компьютерных трехмерных моделей и чертежей для выбранных изделий и деталей;
- 3 – анализ формоизменения заготовки при СПФ с помощью экспериментальных исследований и компьютерного моделирования;
- 4 – геометрическое моделирование и твердотельное проектирование инструмента и оснастки для СПФ;
- 5 – разработка модели и чертежей технологического блока для СПФ и расчеты конструкции на прочность и условия нагрева;
- 6 – проектирование и изготовление электрода (медного или алюминиевого) для последующей электроэрозионной обработки при получении гравюры матрицы;
7. - подготовка программ для станков с числовым управлением (типа «обрабатывающий центр») и изготовление остальных деталей штампового блока, оснастки и инструмента;
- 8 – подготовка производства и отработка технологии получения новых изделий с использованием процессов СПФ.

В диссертации приведены примеры реализации этой методики для производства таких изделий, как «мембрана щелевая», «панель ячеистая», «панель стеновая рельефная», «корпус фонаря декоративного». Для всех изделий по заказам ряда коммерческих предприятий были разработаны чертежи и трехмерные модели, спроектированы технологические блоки и инструмент для СПФ, в виде чертежей и трехмерных моделей. С помощью компьютерного моделирования был произведен анализ формоизменения заготовок и определены энергосиловые и временные характеристики виртуальных процессов формовки, а также сделаны предварительные расчеты эффективности технологии и себестоимости изготовления. Была разработана управляющая программа станка с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» фирмы «FANUK» (Япония) для изготовления матрицы детали «панель стеновая рельефная» способом высокоскоростного фрезерования.

На основе результатов экспериментальных исследований по СПФ был разрабо-

тан новый процесс получения оболочек сложной формы путем соединения разнородных компонентов, с помощью так называемого «кузнечного замка». Сборка всего изделия осуществляется за счет обтекания формуемым сверхпластичным материалом дополнительных элементов из других металлических и неметаллических материалов, образуются полости с поднутрениями, которые обеспечивают надежное закрепление соединяемого элемента на поверхности оболочки. Этот способ был реализован для соединения с оболочкой из латуни стальных крепежных элементов, винтов, а также при соединении с декоративными элементами в виде вставок из керамики, полудрагоценных камней, стекла и др. На данный способ было получено решение о выдаче патента РФ по заявке №2005132609 от 19 ноября 2005.

В диссертации представлена общая схема разработки типового технологического процесса, использующего СПФ для получения новых изделий в виде сложнопрофильных оболочек с функциональным или декоративным поверхностным рельефом.

Основные результаты и выводы по работе

1. Анализ технологических возможностей СПФ по данным исследований научно-технической и патентной литературы показал, что этим процессом ОМД можно получать как геометрически простые, так и сложнопрофильные изделия с тонким декоративным или функциональным рельефом. Установлено, что для латуней ЛЖМц 59-1-1 и Л63 с ультрамелким зерном ранее были разработаны и внедрены технологии изготовления методом СПФ товаров народного потребления с художественным рельефом в основном в серийном и крупносерийном производства на промышленном прессовом оборудовании. Предложено для единичного и мелкосерийного производства использовать схему «печь-штамп», как наиболее простую, гибкую и удобную для исследования, отработки и внедрения новых видов изделий.

2. Разработана комплексная методика проектирования технологий СПФ, построенная на совместном использовании методов физического и математического моделирования с применением средств вычислительной техники и программного обеспечения. Показано, что эта методика позволяет создавать геометрические математические модели деталей и заготовок, изготавливаемых сверхпластической формовкой, проектировать штамповую оснастку и инструмент, осуществлять автоматизированные расчеты их конструкций и элементов на упругие деформации и прочность,

оценивать характеристики и температурные режимы работы при нагреве, прогнозировать формоизменение листовых заготовок при различных схемах СПФ и определять технологические характеристики и параметры процесса производства изделий в целом.

3. Для проведения исследований процессов СПФ, условий нагружения оснастки и инструмента с использованием разработанной методики спроектирован, проверен расчетами на прочность и условия нагрева, изготовлен экспериментальный штамповый блок для СПФ по схеме «печь-штамп», на конструкцию которого был получен патент РФ №54541.

4. В результате исследования изменений структуры и реологических свойств латуни марок ЛЖМц 59-1-1 и Л63 при СПФ получены новые количественные данные о влиянии температуры на параметры реологических моделей SP – среды и вязкопластической среды с нелинейным скоростным и деформационным упрочнением. Показано, что на их основе могут быть подготовлены базы данных для адаптации существующих компьютерных вычислительных систем, используемых для решения задач ОМД методом конечных элементов.

5. В результате экспериментально-теоретических исследований процессов СПФ установлено, что при макроформовке изделий геометрически простых форм утонение стенки без разрушения оболочки не должно превышать 200 % от начальной толщины заготовки. Установлено, что при толщине стенки 0,2 мм и менее резко возрастает вероятность образования разрывов, а толщина менее 0,15 мм является предельной для оформления макроформы оболочки, что по-видимому объясняется предельной прочностью латуни на межфазных границах (α и β фаз).

6. В результате моделирования установлено, что решающим технологическим параметром при макроформовке является величина давления и время его воздействия на заготовку. Для предотвращения быстрого разрыва оболочки давление не должно превышать 0,4 МПа для стадии свободной формовки и 0,8 МПа для формовки конических, коробчатых и цилиндрических макроформ. Общее время макроформовки составляет при этом порядка 5-10 минут. При микроформовке тонкого рельефа на оболочке время выдержки может достигать 20-25 минут. При этом величина давления, необходимая для формирования качественного поверхностного рельефа не должна быть меньше 1 МПа, а наилучшие результаты достигаются при значениях 1,2-1,5

МПа. Выход за указанные предельные технологические режимы СПФ приводит к росту размеров структурных составляющих латуни более 10-12 мкм и потере сверхпластичных свойств и прекращению заполнения гравюры матрицы.

7. В результате проведенных экспериментально-теоретических исследований разработаны и опробованы в лабораторных условиях ряд новых процессов СПФ сложнорельефных оболочек из латуней, на некоторые из которых по заявке на изобретение № 2005132609. получено решение о выдаче патента РФ. Методики и результаты исследования процессов СПФ использованы в учебном процессе на кафедре ОМД МИСиС (ТУ) и кафедре ОКМ ВятГУ (г. Киров) при выполнении курсовых и дипломных научно-исследовательских работ и проектов.

Основные публикации по теме диссертации.

1. Апатов К. Ю., Цепин М. А., Поляков С. М. и др. Двухфазные латуни с ультра-мелким зерном для листовой сверхпластической формовки художественных изделий. Цветные металлы №1, 2005, с. 67...70.
2. Апатов К. Ю., Цепин М. А., Сеницын М. В. и др. Оценка условий работы оснастки и инструмента при их нагреве и сверхпластической формовке изделий с художественным рельефом. Кузнечно-штамповочное производство. №11, 2005, с. 28-32.
3. Апатов К. Ю., Селедкин Е. М. Цепин М. А. и др. Моделирование процессов сверхпластической формовки полых оболочек из листа. Известия Вузов - Черная металлургия. №11, 2005, с. 21-24.
4. Апатов К. Ю. Лисунец Н. Л., Цепин М. А. и др. Конечноэлементное моделирование формоизменения в процессе объемной штамповки несимметричной пространственной детали. В кн. Труды международной научно-технической конференции: «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов», С-Петербург, 2005 с. 20-24.
5. Апатов К. Ю., Лисунец Н. Л. Цепин М. А. и др., Моделирование формоизменения заготовки в процессе штамповки несимметричной пространственной детали. Труды шестой международной научно-технической конференции «Авиакосмические технологии-2005», Воронеж. 2005, с. 51...57.
6. Апатов К. Ю. Бегнарский В. В., Цепин М. А. и др. Феноменологические уравнения для скоростных характеристик сверхпластичной латуни. В кн. Труды всероссийской научно-технической конференции «Наука-Производство-Экология», Киров, ВятГУ, 2005, том 3, с. 41-43.
7. Апатов К. Ю. Африкантов А. А., Цепин М. А. Экспериментальный штамповый блок для сверхпластической формовки. В кн. Труды всероссийской научно-технической конференции «Наука-Производство-Экология», Киров, ВятГУ, 2005, том 3, с. 45-46.
8. Апатов К. Ю. Плошкин В. В. Эксплуатационные свойства штамповой оснастки, упрочненной электроэрозионным способом. В кн. Состояние, проблемы и перспективы металлургии и обработки металлов давлением: Труды МГВМИ, 2005, с. 343-348.
9. Апатов К. Ю., Поляков С.М., Цепин М.А., и др. Использование твердотельного моделирования для решения технологических задач обработки металлов давлением». Труды всероссийской научно-технической конференции «Наука-Производство-Экология», Киров, ВятГУ, 2003. Том 5, с. 50-51.
10. Апатов К. Ю., Цепин М. А. Поляков С. М. и др. Устройство для листовой формовки в состоянии сверхпластичности. Патент РФ на полезную модель № 54541.
11. Апатов К. Ю., Цепин М. А., Африкантов А. А. и др. Способ получения изделий из листовых заготовок в состоянии сверхпластичности. Решение о выдаче патента на изобретение по заявке №2005132609 от 24 октября 2005 г.
12. Апатов К. Ю., Панчев С. В., Балакин В. П. Исследование деформационных способностей рельефной формовки ленты из сплава Х20Н80-Н. Кузнечно-штамповочное производство. № 5, 2006, с 14-18