**Селедкин Сергей Евгеньевич. Сверхпластическая формовка листовых заготовок с регулированием утонения стенок : диссертация ... кандидата технических наук : 05.03.05.- Тула, 2006.- 198 с.: ил. РГБ ОД, 61 07-5/371**

**ГОУ ВПО** "Тульский государственный университет"

*На правах рукописи*

**Селедкин Сергей Евгеньевич**

**СВЕРХПЛАСТИЧЕСКАЯ ФОРМОВКА ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК С РЕГУЛИРОВАНИЕМ УТОНЕНИЯ СТЕНОК**

Специальность 05.03.05 - **Технологии и машины обработки давлением**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор С.П.Яковлев

Тула 2006

**СОДЕРЖАНИЕ**

[ВВЕДЕНИЕ 4](#bookmark2)

Глава 1. ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

В СОСТОЯНИИ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ 10

1. Сверхпластичность металлических материалов

и условия ее проявления 10

1. Проблемы обработки металлов давлением в

состоянии сверхпластичности 18

1. Сверхпластическая формовка полых изделий из листа 22
2. [Математическое моделирование процессов СПФ 32](#bookmark6)
3. Уравнение реологического состояния сверхпластического материала 32
4. Моделирование процессов СПФ 36
5. [Цель и задачи исследования 42](#bookmark7)

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО

МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СПФ 43

1. Математическая модель процесса СПФ

(базовая система уравнений) 44

1. [Вариационная формулировка краевой задачи СПД 46](#bookmark13)
2. [Применение МКЭ для анализа процессов СПФ 48](#bookmark14)
3. Получение разрешающей системы алгебраических

конечноэлементных уравнений 52

1. Алгоритм решения задачи сверхпластического

формоизменения 56

1. Численная реализация разработанной

модели процесса СПФ 58

1. [Выбор оптимальных параметров расчетной модели 59](#bookmark27)
2. [Выводы по главе 65](#bookmark31)

ГЛАВА 3. СВОБОДНАЯ ВЫДУВКА И ФОРМОВКА В

МАТРИЦУ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК В РЕЖИМЕ СП 67

1. Постановка задачи свободной пневмоформовки купола в режиме СП и апробация численного

решения 68

1. Исследование процесса пневмоформовки купола

в режиме СП 78

1. [Высота купола и деформированное состояние .. 79](#bookmark39)
2. [Утонение стенки заготовки 88](#bookmark41)
3. Расчет оптимального давления газовой среды 91

**з**

при СПФ полусферической заготовки

* 1. [Пневмоформовка цилиндрических стаканов 95](#bookmark43)
     1. Отработка модели пневмоформовки в матрицу 96
     2. [Утонение стенки при пневмоформовке цилиндрических стаканов 107](#bookmark50)
  2. [Выводы по главе 112](#bookmark52)

Глава 4. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ ПРИ СПФ

ПОЛУСФЕРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ 115

1. Управление утонением стенки с помощью

тормозящих элементов 115

1. [Анализ процесса реверсивной ПФ с применением полусферической тормозящей пробки 115](#bookmark55)
2. [Анализ процесса реверсивной ПФ с применением цилиндрического вкладыша 126](#bookmark65)
3. [Управление утонением стенки с помощью донного буфера 131](#bookmark72)
4. Управление утонением за счет использования

заготовки переменной толщины 141

[4.3 Выводы по главе 144](#bookmark81)

Глава 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ СПФ

СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ 146

1. Режимы СПФ для изготовления детали

«корпус» 147

1. [Прдварительный анализ процесса СПФ детали «корпус» 149](#bookmark85)
2. [Разработка режима СПФ детали «корпус» 156](#bookmark88)
3. [СПФ детали «крышка» 164](#bookmark90)
4. [Основные технологические рекомендации 168](#bookmark91)
5. [Разработка конструкций индивидуальных устройств для пневмоформовки деталей 169](#bookmark92)
6. [Формообразующая оснастка для пневмоформовки 173](#bookmark94)
7. [Нагрев оснастки и контроль температуры 175](#bookmark95)
8. Выводы по главе 178

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ 180

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 182

ПРИЛОЖЕНИЯ 197

**ВВЕДЕНИЕ**

Прогресс в машиностроении в значительной степени определяется разработкой новых и совершенствованием существующих технологий из­готовления изделий различного назначения. Существенная доля деталей в различных отраслях машиностроения изготовляется обработкой давлени­ем и, в частности, методами листовой штамповки.

Использование традиционных методов получения изделий листовой вытяжкой с утонением стенки отличается большим количеством операций и переходов с необходимостью определения технологической силы про­цесса на каждом из них, оценки кинематики течения металла при каждой операции и стойкости технологической оснастки. При этом необходимы методы точного прогнозирования формоизменяющих операций, учиты­вающие силовые и кинематические параметры на каждом этапе нагруже­ния.

Внедрение в технологическую практику современных методов ма­тематического и компьютерного моделирования дает возможность полу­чить точную картину распределения полей напряжений и деформаций по объему заготовки и определить размеры, форму и утонение стенки в лю­бой момент формоизменения листовой заготовки, а также ресурс ее де­формационной способности. Такой подход позволяет обосновать создание наиболее рационального оборудования и специальной оснастки, обеспе­чивающих высокую точность и качество получаемых изделий, значитель­ную экономию основных и расходных материалов. Подготовка новых производств с использованием математического моделирования ускоряет внедрение новых технологических процессов получения ответственных изделий.

Одним из эффективных путей решения задач формообразования листового материала из малопластичных сплавов является использование

процессов пневмоформовки (ПФ) листовых заготовок в состоянии сверх­пластичности (СП). Разработка эффективных технологий изготовления высокоточных корпусных изделий, куполообразных оболочек, элементов защитных и несущих конструкций авиакосмической техники методами сверхпластической формовки (СПФ) требует создания эффективных науч­но обоснованных методов управления толщиной листового материала при формообразовании тонкостенных оболочек различной геометрической формы.

Актуальной задачей СПФ является снижение разнотолщинности стенок при вытяжке корпусных изделий сложных геометрических форм, что позволит расширить возможности технологических процессов изго­товления высокоточных изделий и существенно повысить их качество при общем снижении себестоимости. Решение этой задачи возможно на основе разработки новых научно обоснованных методов управления толщиной стенок полых изделий в процессе их формообразования при заданных тех­нологических параметрах.

Решению части данных вопросов посвящена настоящая диссертация, в которой содержится новое решение актуальной научно-технической за­дачи обеспечения требуемой точности геометрических характеристик по­лых осесимметричных изделий, получаемых сверхпластической формов­кой из листовых труднодеформируемых материалов, в том числе перемен­ной толщины стенки по заданному закону.

При выполнении работы получены следующие новые результаты:

Создана математическая модель процесса пневмоформовки в режи­ме сверхпластичности, включающая возможность регулирования утонения стенки с помощью тормозящих элементов различной формы, которая по­зволила установить количественные и качественные характеристики рас­пределения утонений в изделии при свободном формоизменении или штамповке в матрицу заданной формы, а также выявить закономерности влияния технологических параметров процесса СПФ с применением тор­мозящих элементов на характер распределения утонений в процессе фор­моизменения.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Предложенная математическую модель процесса пневмоформовки листовой заготовки в режиме сверхпластичности и разработанная на ее основе методика инженерного анализа процессов СПФ полых осесиммет­ричных изделий.
2. Установленные режимы деформирования листовой заготовки с регулированием утонения стенки в процессе формоизменения, способст­вующие снижению разнотолщинности в готовом изделии.
3. Уточненные технологические режимы СПФ с регулированием утонения стенки при производстве сложнопрофильного корпусного изде­лия из алюминиевого сплава АМгб с учетом технических и технологиче­ских ограничений на процесс формообразования.

Работа выполнена в соответствии с грантом Президента РФ на под­держку ведущих научных школ на выполнение научных исследований (гранты № НШ-1456.2003.8 и № НШ-4190.2006.8), грантом РФФИ № 04- 01-00378 «Теория формоизменения мембран и тонколистовых заготовок из анизотропного труднодеформируемого материала в условиях кратко­временной ползучести» (2004-2006 гг.) и научно-технической программой Министерства образования и науки Российской Федерации «Развитие на­учного потенциала высшей школы (2006-2008 гг.)» (проект № РНП 2.1.2.8355 «Создание научных основ формирования свойств изделий об­щего и специального назначения методами комбинированного термопла­стического деформирования материалов»).

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой в работе проблемы, указана ее научная новизна и практическая значимость, а также кратко раскрыто содержание разделов диссертации.

В первой главе выполнен обзор теоретических и экспериментальных исследований отечественных и зарубежных ученых самого явления и ме­ханизмов сверхпластической деформации и практического использования этого эффекта в различных процессах ОМД. Среди основных направлений практического использования эффекта СП особое место занимает процесс пневмоформовки изделий из листовых заготовок, когда роль формующего пуансона выполняет газовая среда. Такой процесс позволяет исключить дорогостоящее штамповое оборудование, значительно сократить число технологических операций и многократно повысить стойкость формооб­разующих сменных матриц.

Среди основных проблем эффективного применения пневмофор- мовки в режиме СП при изготовлении полых осесимметричных изделий отмечено отсутствие надежных методик научно обоснованного расчета технологических параметров, позволяющих воздействовать на характер распределения утонения стенок в процессе формоизменения.

Проведенный обзор технической литературы позволил обозначить основные проблемы в области пневмоформовки листовых заготовок в со­стоянии СП и сформулировать цель и задачи исследований.

Вторая глава посвящена разработке варианта моделирования про­цессов ПФ в режиме СП с использованием метода конечных элементов.

На базе теории пластического течения сформулирована замкнутая система интегро-дифференциальных уравнений для анализа технологиче­ских процессов пневмоформовки и предложен подход к ее решению на основе использования вариационного принципа и метода конечных эле­ментов. В аналитическом виде получена разрешающая система алгебраи­

ческих конечноэлементных уравнений и предложен способ ее линеариза­ции. Разработан алгоритм решения задачи, составлен пакет прикладных программ для выполнения численных расчетов на ЭВМ.

В третьей главе представлены результаты теоретических исследова­ний процессов свободной пневмоформовки и пневмоформовки в матрицу заданной формы. Сопоставление расчетных данных, полученных с ис­пользованием разработанной методики, с данными, полученными при рас­чете аналитическим методом и экспериментом, подтвердило адекватность предложенного варианта моделирования процессов ПФ в режиме СП.

Установлены основные закономерности процесса формообразования и взаимосвязь основных технологических параметров процесса ПФ. Вы­полнен анализ качественных и количественных характеристик утонений стенок изделия для ряда процессов ПФ.

В четвертой главе на основе результатов численных исследований проанализированы различные способы снижения неравномерности утоне­ния стенки изделия, которые распределялись на две основные группы: а) связанные с внешним воздействием на заготовку с целью торможения те­чения на участках с максимальным утонением и интенсифицирования те­чения на соседних с ними участках; б) связанные с предварительной под­готовкой заготовки, заключающейся в создании геометрической неравно­мерности исходной заготовки.

В пятой главе приведено обоснование режимов технологических процессов пневмоформовки некоторых осесимметричных корпусных из­делий специального назначения с целью улучшения их качественных ха­рактеристик за счет снижения разнотолщинности.

В заключении приведены основные результаты исследования про­цессов пневмоформовки в режиме СП изделий из листовых заготовок и сделаны соответствующие выводы.

Настоящая работа является частью комплекса исследований по раз­работке основ теории и технологии изотермического деформирования труднодеформируемых материалов, проводимых в Тульском государст­венном университете на кафедре «Механика пластического формоизмене­ния» под руководством доктора технических наук, профессора С.ПЯковлева.

Автор выражает искреннюю благодарность д.т.н., проф. Е.В.Панченко за оказанные консультации при выполнении работы, крити­ческие замечания и рекомендации.

* радиусы переходов должны выбираться не менее 3...4 толщин ма­териала;
* особое внимание должно обращаться на чистоту поверхности боко­вых стенок матрицы.

Кроме того, следует иметь в виду, что достижимая величина увели­чения поверхности детали определяется в основном значением *т* (а точнее средним его значением) в допустимом диапазоне скоростей деформации. Поэтому пневмоформовкой можно получать детали с отношением площа­ди поверхности к площади исходной заготовки не более значения, которое для каждого материала должно устанавливаться экспериментально.

Так как радиус округления ребер детали выполняется на заключи­тельной стадии формовки, его величина должна быть согласована с мак­симально достижимым давлением и ограничивается допустимым числом ступеней изменения давления, которое по условиям эксплуатации не должно превышать 10... 15.

1. Панченко Е.В., Арнаутова С.С., Соколов М.Д., Арбатская JT.C. Матрица для штамповки листовых материалов. Авторское свидетельство СССР № 582032.
2. Панченко Е.В. Экспериментальное определение параметров *т* и *к* механического уравнения состояния материалов при пневмоформовке в режиме сверхпластичности // Исследование в области пластичности и об­работки металлов давлением, Тул. политехи, институт, Тула, 1977. - С. 121-132.
3. Панченко Е.В., Ренне И.П. Расчет давления формующей среды и времени формовки деталей в режиме сверхпластичности // Вестник маши­ностроения. - № 5. Москва, 1980. - С. 66-70.
4. Панченко Е.В. Определение параметров процесса пневмофор­мовки изделий в режиме сверхпластичности // Металлы, 1996. - № 4. - С. 57-61.
5. Панченко Е.В., Селедкин Е.М. Пневмоформовка листовых заго­товок в режиме сверхпластичности. Решение технологических задач. - Ту­ла, изд-во ТулГУ, 2004. - 304 с.
6. Панченко Е.В., Селедкин С.Е. Управление разнотолщинностью при пневмомеханической штамповке заготовок из листа // Материалы Ме­ждународной научно-технической конференции «Автоматизация: пробле­мы, идеи, решения», Тула, 14-15 октября 2004 г. - 84-85.
7. Панченко Е.В. Пневмосистема для автоматизации управления формовкой изделий из листовых заготовок // Сб. научн. тр. международной научно-технической конференции «Автоматизация: проблемы, идеи, ре­шения», Тула, 14-15 октября 2004 г. - 52-54.
8. Пресняков А.А., Старикова Г.В. О кинетическом соответствии между превращением и деформацией при возникновении сверхпластично­сти // Изв. АН СССР, Металлургия и горное дело, 1963. - № 4. - С. 127-129.
9. Пресняков А.А. Сверхпластичность металлов и сплавов. - Алма- Ата: Наука, 1969. - 203 с.
10. Рагаб А.Р., Дункан Дж.Л. Сверхпластичность: определяющие уравнения и проблемы формоизменения // Кн. Механика, М.: Мир, 1973. - № 4 (140). - С.121-132.
11. Разностенность куполообразных деталей при пневмотермической формовке / Пашкевич А.Г., Орехов А.В., Архангельская Л.В. и др. // Изв. вузов. Машиностроение, 1983. - № 3. - С. 136-139.
12. Расчет формоизменения оболочек вращения при газостатической формовке в состоянии сверхпластичности / Е.Н. Чумаченко, Л.Т. Макаро­ва, А.Н. Скороходов и др. // Изв. вузов. Черная металлургия, 1985. - № 3. С. 71-75.
13. Романов К.И. Механика горячего формоизменения. М.: Машино­строение, 1993. - 240 с.
14. Сафиуллин Р.В., Еникеев Ф.У. Расчет режимов сверхпластиче- ской формовки протяженной прямоугольной мембраны // Кузнечно­штамповочное производство. 2001. - № 3. - С. 35-40.
15. Сахаров А.С., Кислоокий В.Н., Кирический В.В. и др. Метод ко­нечных элементов в механике твердых тел. - Киев: Вища школа, 1982. - 480 с.
16. Сверхпластичность металлических материалов / Шоршоров М.Х., Тихонов А.С., Булат С.И. и др. М., Металлургия, 1973. - 217 с.
17. Сверхпластическая формовка конструкционных сплавов / Под ред. НЕ.Пейтона и К.Х.Гамильтона. - М.: Металлургия, 1985. - 312 с.
18. Сверхмелкое зерно в металлах / Сбор, статей под ред. Дж.Барка и Ф.Вайса: Пер. с англ.- М.: Металлургия, 1973. - 324 с.
19. Сегерлинд JI. Применение метода конечных элементов. - М.: Мир, 1979. - 392 с.
20. Секулович М. Метод конечных элементов / Пер. с серб. Ю.Н.Зуева; Под ред. В.Ш.Барбакадзе. - М.: Стройиздат, 1993. - 664 с.
21. Селедкин С.Е., Фурсов И.В. Расчет напряженно- деформированного состояния в процессе пневмоформовки заготовки из анизотропного материала // XXVIII Гагаринские чтения. Тезисы докладов Международной молодежной научной конференции. Том 1. - М., 2002. - С.
22. Селедкин С.Е. Моделирование процесса формовки конического обтекателя с переменной толщиной стенки // XXX Гагаринские чтения. Те­зисы докладов Международной молодежной научной конференции. Том 1. -М., 2004.-С. 51.
23. Селедкин С.Е. Компьютерное моделирование процесса пневмо­формовки листовой заготовки // Материалы Международной научно- технической конференции «Автоматизация: проблемы, идеи, решения»,

. Тула, 14-15 октября 2004 **г.** - 36-39.

1. Селедкин С.Е. Моделирование свободной пневмоформовки по­лусферических заготовок с управлением процессом формирования разно- толщинности // Изв. ТулГУ. Сер. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. - Вып. 1. - Тула: ТулГУ, 2005. - С. 208- 213.
2. Селедкин С.Е. Применение тормозящих элементов при газоста­тической формовке тонких мембран // XXXI Гагаринские чтения. Тезисы докладов Международной молодежной научной конференции. Том 1. М., 2005.-С. 101-102.
3. Селедкин С.Е. Экспериментальное исследование процесса пнев­моформовки корпусных осесимметричных деталей в режиме сверхпла­стичности // Изв. ТулГУ. Сер. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. - Вып. 2. - Тула, ТулГУ. - 2005. - С. 218- 211**.**
4. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обра­ботки металлов. Инженерные методы расчета. - JL: Машиностроение, 1968. - 272 с.
5. Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. - М.: Машиностроение, 1979. - 184 с.
6. Смирнов О.М. Достижения и перспективы использования сверх­пластичности в обработке материалов давлением // Кузнечно­штамповочное производство. 1994. - № 4. - С. 2-5.
7. Смирнов О.М. Сверхпластичность материалов: от реологии к технологии // Кузнечно-штамповочное производство. 1998. - № 2. - С. 18-
8. Сюэри М., Бодле Б. Вопросы, связанные со структурой, реологи­ей и механизмами сверхпластической деформации // В сб. Сверхпластиче- ская формовка конструкционных сплавов / Под ред. Пейтона Н., Гамиль­тона К.: Пер. с анг. - М.: Металлургия, 1985. - С. 106-128.
9. Таюпов А.Р., Цепин М.А., Егоров О.В. Методика моделирования формообразования материалов с ультрамелкозернистой структурой в про­цессах сверхпластической формовки. - М.: ЦНТИ «ПОИСК», - НПО ма­шиностроения, 1991. - 54 с.
10. Теория пластических деформаций металлов / Е.П.Унксов, У.Джонсон, В. JI.Колмогоров и др. Под ред. Е.П.Унксова, А.Г.Овчинникова. - М.: Машиностроение, 1983. - 598 с.
11. Теория ковки и штамповки: учеб. пособие для студентов маши­ностроительных и металлургических специальностей вузов / Е.П.Унксов, У.Джонсон, В.Л.Колмогоров и др. Под общ. ред. Е.П.Унксова, А.Г.Овчинникова. - М.: Машиностроение, 1992. - 720 с.
12. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных за­дач. - М.: Наука, 1986. - 288 с.
13. Тихонов А.С. Элементы физико-химической теории деформи­руемости сплавов. -М: Наука, 1972. - 160 С.
14. Тихонов А.С. Эффект сверхпластичности металлов и сплавов. - М.: Наука, 1978. - 142 с.
15. Формовка полых изделий из листа в состоянии сверхпластично­сти / Я.М. Охрименко, О.М. Смирнов, B.C. Горбунов, М.А. Цепин. - М.: Машиностроение, 1976. - 38 с.
16. Цепин М.А. Исследование пневмостатической формовки некото­рых сплавов в состоянии сверхпластичности. Автореф. канд. дисс. Москва, МИСиС, 1975.
17. Цепин М.А., Ершов А.Н., Юхтанов Д.В. Определение реологиче­ских коэффициентов сверхпластичных материалов // Изв. вузов. Черная металлургия, 1985. - № 3. - С.67-71.
18. Цепин М.А., Ершов А.Н, Феноменологические закономерности структурной сверхпластичности // Известия ВУЗов. Черная Металлургия, 1991.-№ 11.-С. 47-49.
19. Цепин М.А., Дженг Сын, Лисунец Н.Л., Чекин А.В. Реологиче­ская модель течения материала с изменяющейся структурой при сверхпла- стическом деформировании // Инженерно-физический журнал, 2003. - Май-июнь. - Том 76. - № 3.
20. Чашников Д.И., Черемных Д.М. Сверхпластичность металли­ческих материалов // Физика и химия обработки материалов, 1972. - С. 90-
21. Чудин В.Н. Изготовление листовых радиаторов формообразова­нием - диффузионной сваркой - пайкой // Сварочное производство. 1996. - № 12.-С. 4-6.
22. Чудин В.Н. Процессы формообразования при ползучести и сверхпластичности // Кузнечно-штамповочное производство, 1997. - № 7. - С. 20-23.
23. Чумаченко Е.Н. Расчет технологических параметров пневмофор­мовки оболочек в матрицу // Кузнечно-штамповочное производство, 1987. - № 2. - С. 5-6.
24. Чумаченко Е.Н., Троицкий В.П., Чумаченко С.Е. Автоматизиро­ванный расчет тяжело нагруженных деталей и узлов металлургических машин. Уч. пособие. М.: МИСиС, 1998. - 120 с.
25. Чумаченко Е.Н. Математическое моделирование формоизмене­ния оболочек в условиях сверхпластичности. Учебное пособие. - Моск. гос. институт электроники и математики. - М., 1999. - 158 с.
26. Чумаченко Е.Н., Цепин М.А., Чумаченко С.Е., Рогалевич Л.Э. Проектирование технологических процессов объемной штамповки и рас­чет элементов штампового инструмента, оснастки и оборудования на базе вычислительного комплекса SPLEN // // Вестник машиностроения. 2000. - №4.-С. 37-45.
27. Чумаченко Е.Н., Чумаченко С.Е. Математическое моделирова­ние режимов давления, обеспечивающих формоизменение нелинейновяз­ких оболочек в условиях локальной реализации сверхпластического тече­ния // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2000. - № 6. - С. 134-142.
28. Чумаченко Е.Н., Цепин М.А., Чумаченко С.Е., Чекин А.В. Мо­делирование процессов сверхпластической формовки с учетом структур­ных изменений в металле // Наукоемкие технологии. 2001. - № 1. - С. 38-
29. Чумаченко Е.Н., Портной В.К., Аксенов С.А., Рылов Д.С. Сверх- пластическая формовка титановых оболочек в широком диапазоне темпе­ратур // Наука производству, 2003. - №12. - С. 2-6.
30. Чумаченко Е.Н., Смирнов О.М., Цепин М.А Сверхпластичность: материалы, теория, технологии. - М.: КомКнига, 2005. - 320 с.
31. Яковлев С.П., Чудин В.Н., Яковлев С.С. Изотермическая штам­повка трапециевидных элементов трехслойных листовых конструкций из анизотропного материала // Кузнечно-штамповочное производство. 1996. - № 8. - С. 6-9.
32. Яковлев С.П., Чудин В.Н., Яковлев С.С., Соболев Я.А. Изотер­мическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов. - М., Тула: Машиностроение-1; изд-во ТулГУ, 2003. - 427 с.
33. Яковлев С.П., Селедкин С.Е., Африкантов А.А. Сверхпластиче- ская реверсивная пневмоформовка полусферических заготовок с регулиро­ванием разнотолщинности стенок // Изв. ТулГУ. Сер. Механика деформи­руемого твердого тела и обработка металлов давлением. - Тула: ТулГУ, - Вып. 1,2005.-С. 263-268.
34. Avery D.M., Backofen W.A. A structural basis for superplasticity. Transaction of the ASM, v.58,1965. - P. 551-562.
35. Backofen W.A., Turner J.R., Avery D.H. Superplasticity in Zn-Al alloys // Transactions of the ASM. - V.57,1964. - P. 914-919.
36. Baldo O., Diaz J., Martinez F. et.al. Numerical Simulation of SPF/DB Processes // Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. By N. Ridley. The Institute of Materials. 1995. P. 218-234.
37. BibaN.V., Lishnij A.I., Sadykhov O.V., Stiebounov S.A. Design and Analysis of SPF Technology with FORM-2D Sistem // Materials Science Forum. 1994. V170-172. P. 687-692.
38. Chandra N., Rama S.C., Rama **J.** Design and Analysis of 3D Superplastic Forming Processes // Materials Science Forum. 1994. V170-172. P. 577-582.
39. Chumachenko E.N., Smirnov O.M. Computer Aided Design of SPF Processes Based on the SPLEN Program Set // Materials Science Forum. 1994. V170-172. P. 601-606.
40. Collier A.D., Jackson N. Induatrialization of SPF within Bae Military Aircraft // Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. By N. Ridley. The Institute of Materials. 1995. P. 377-383.
41. Comfild G.C. and Johnson R.H. The forming of superplastic sheet metal // Int. J. Mesh. Science, 1970, № 12, p. 479-490.
42. Dressei C.F. Application of SPF/DB Titanium Technology to Large Commercial aircraft // Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. By N. Ridley. The Institute of Materials. 1995. P. 359-376.
43. Fitzpatrick G.A. The Exploitation of Superplasticity for Rolls- Royces Wide Chord Fan Blsde // Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. By N. Ridley. The Institute of Materials. 1995. P. 347-350.
44. Gibson R.C., Brophy J.H. Microduplex Nickel-Iron-Chromium Alloys, Proceedings of the 16th Sagamore Army Materials Conference, 1969.
45. Ghosh A.K., Hamilton C.H. Mechanical Behaviour and Hardening Characteristics of Superplastic Ti-6A1-4V alloy. Metallurgical Transatios A., 1979, v.lOA. - N 6. - P. 699-706.
46. Ghosh A.K. and Hamilton C.H. Superplastic Forming of Long Restangular Box Section Analysis and Experiments. Proc. ASM Conference on Process Modeling, 1980. -P. 303-331.
47. Hamilton C.H., Chosh A.K., Wert J.A. Superplasticity in engineering alloys: a review//Metals Forum.- 1985.- V.8. -N 4. - P.172-190.
48. Holt D.N., Backofen W.A. Superplasticity in the Al-Cu eutectic alloy. Transactions of the ASM. - V.59, 1966. - P. 755-768.
49. Holt D. The relation between superplasticily and grain boundary shear in the Aluminium-Zinc Eutectoid alloy // Transactions of Met. Soc. of AIME, 1987, v. 239, № 4, p. 1034-1040.
50. Johnson R.H. Superplasticity in metals and alloys // Spectrum, 1969. -N64.-P. 8-10.
51. Jovane F. An approximate analysis of the superplastic forming of a thin circula diaphragm. Intern. // J. Mech. Set., 1968. - N10. - P. 423-427.
52. Kahandal R., Yasui K. Recent Advancements in SPF/DB Technology // Materials Science Forum. 1997. V. 243-245. P. 687-694.
53. Marciniak Z. "Arch.Hutn", 1969, v.13, p. 305.
54. Matsuo M. Properties of Superplastic 5083 Alloy and its Applications // Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. By N. Ridley. The Institute of Materials. 1995. P. 277-283.
55. Morrison W.B. Superplasticity of low allow steels // Transactions Qvvartarty. - V.61. - W.3, 1968. - P. 423-434.
56. Nieh T.G., Wadsworta J., Sherby O.D. Superplasticity in Metals and Ceramics. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 1997. 273 p.
57. Osada K., Yoshida H. Recent Applications of Superplastic Materials in Japan // Materials Science Forum. 1994. V. 170-172. P. 715-724.
58. Packer C.M. and Sherby O.D. An Interpretation of the Superplasticity Phenomenon in Two-Phase Alloys // Trans. Quart. ASM, 60, 1967.-P. 21.
59. Pearce R., Swanson C.J. Superplasticity and metal forming // Sheet Metal Ind., 1970, 47. - N 7. - P. 599-603.
60. Pearson C.E. The viscous properties of extruded eutectic alloys of lead-tin and bismuth-tin. J.Inst.Metals, 1934, v. 54, pp. 11-123.
61. Rassmann V.G., Muller P. and Grabner W. Neue Hiitte, 17, Jg. Heft, August, 1972.
62. Sadeghi R., Pursell Z. Finite Element Modeling of Superplastic Forming Using Analytical Contact Surfacts // Materials Science Forum. 1997. V243-245. P. 719-728.
63. Schelosky H. Beitrag zum Verhalten superplastischer Werkstoffe beim Massivumformen. Ber. Inst. Umformtechen. Univ. Stuttgart, 1976, N 37, 185 p.
64. Shang B., Mao W., Li Z. Superplastic Forming of ТІ3АІ Alloy and its Application in Aerospase // Materials Science Forum. 1997. V243-245. P. 775-
65. Sherby O.D., Wadsworth J. Superplasticity and superplastic forming proceses. // Material Science and Tehnology. - 1985. - V.l. -N9. - P. 925-936.
66. Sherby O.D., Wadsworth J. Superplasticity - Recent + advanced and future directions // Progress in Materials Sciences. - 1989. - Vol. 33. - P. 169- 221.
67. Stacey R.J., Butter R.G. New Market Areas for Superplastic Aluminum // Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. By N. Ridley. The Institute of Materials. 1995. P. 284-295.
68. Swale W. Superplastic Forming of Large Titanium 6A14V and Turbo Prop. Nacelle Products // Superplasticity: 60 Years after Pearson. Ed. By N. Ridley. The Institute of Materials. 1995. P. 351-358.
69. Thomsen Т.Н., Holt D.L., Backofen W.A. Forming of Superplastic Sheet Metal in Bulging Dies. // Metals Engng. Quart, 1970, 10. - N 2. - P. 1.

Underwood E.E. A raview of superplasticity. Journal of Metals, 1962.- v. 14.-P.914-919