

*На правах рукописи*



**ЛЕОНОВА ЕВГЕНИЯ ВИТАЛЬЕВНА**

**ПНЕВМОФОРМОВКА КОРОБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ЛИСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Специальность 05.02.09 - Технологии и машины обработки  
давлением**

**А в т о р е ф е р а т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Тула 2015**

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,  
Ларин Сергей Николаевич

Официальные оппоненты: Пилипенко Ольга Васильевна,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Государственный университет—  
учебно-научно-производственный комплекс»  
(г. Орел), ректор;

Булычев Владимир Александрович,  
кандидат технических наук, доцент,  
ОАО «Центральное конструкторское бюро аппара-  
тостроения» (г. Тула), главный специалист.

Ведущая организация: ОАО «Научно-производственное объединение  
«СПЛАВ» (г. Тула).

Защита состоится «9» июня 2015 г. в 12 час. на заседании  
диссертационного совета Д 212.271.01 при ФГБОУ ВПО «Тульский государст-  
венный университет» (300012, г. Тула, ГСП, просп. Ленина, д. 92, 9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет» и на сайте:  
<http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/leonova-ev/>

Автореферат разослан «15» апреля 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Черняев Алексей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В последнее время при изготовлении деталей из листовых высокопрочных сплавов в различных отраслях машиностроения нашло применение деформирование в режиме вязкого течения материала (при скоростях деформации  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  1/с в интервале температур (0,4...0,8) от температуры плавления) с предварительной или одновременной сваркой давлением. При производстве элементов многослойных листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов используют технологические принципы деформирования в режиме вязкого течения листовых заготовок и сварки давлением.

Листовой материал, подвергаемый штамповке, обладает анизотропией механических свойств, обусловленной технологическими режимами его получения. Анизотропия механических свойств материала заготовки может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивое протекание технологических процессов обработки металлов давлением при пластическом деформировании, реализуемом на традиционном прессовом оборудовании, а также при медленном деформировании, осуществляемом в режиме вязкого течения материала.

Широкое внедрение в промышленность процессов медленного деформирования в режиме вязкого течения материала элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных сплавов сдерживается недостаточно развитой теорией деформирования при повышенных температурах с учетом реальных свойств материала, позволяющей оценить напряженное и деформированное состояния заготовки, кинематику течения материала, предельные возможности деформирования, силовые режимы и энергозатраты процесса. Поэтому теоретическое обоснование выбора технологических режимов операций изотермического деформирования элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных сплавов в режиме вязкого течения материала является актуальной, важной научно-технической задачей, решение которой вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса.

Работа выполнялась в соответствии с государственными контрактами №02.513.11.3299, № 14.740.11.0038 и № 14.740.11.0580 в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы Министерства образования и науки Российской Федерации, грантами РФФИ № 07-01-96409, № 10-08-97526-р\_центр\_а, № 10-01-00085-а и № 11-08-97526-р\_центр\_а, научно-технической программой Министерства образования и науки Российской Федерации «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект № РНП № 2.1.2/730), грантом Президента Российской Федерации для поддержки молодых ученых – кандидатов наук № МК – 641.2011.8, Государственным заданием №2014/227, а также хозяйственными договорами с рядом предприятий России.

**Цель работы.** Повышение эффективности операций изотермического деформирования однослойных элементов листовых конструкций в матрицу квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов путем теоретического обоснования технологических режимов деформирования в условиях вязкого течения материала.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены и решены следующие **задачи исследований:**

1 Разработка математических моделей изотермического свободного и стесненного (заполнение угловых элементов матрицы) деформирования листовых заготовок из материалов, обладающих плоскостной анизотропией механических свойств, в матрицу квадратного поперечного сечения в режиме вязкого течения материала.

2 Выполнение теоретических исследований операций изотермической пневмоформовки однослойных листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения. Установление закономерностей влияния анизотропии механических свойств, геометрических размеров заготовки и закона нагружения на напряженное состояние, силовые режимы и предельные возможности операций изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения, связанные с величиной накопленных микроповреждений и локальной потерей устойчивости заготовки, в режиме вязкого течения материала.

3 Выполнение экспериментальных исследований операций изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала.

4 Разработка рекомендаций по проектированию технологических параметров операций изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала.

5 Использование результатов исследований в промышленности и учебном процессе.

**Объект исследования.** Процессы изотермического деформирования анизотропных высокопрочных материалов в режиме кратковременной ползучести.

**Предмет исследования.** Изотермическая пневмоформовка элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала.

**Методы исследования.** В работе использован комплексный метод исследований, включающий теоретический анализ и экспериментальную проверку полученных результатов в лабораторных и производственных условиях. Теоретические исследования операций изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения выполнены на основе теории кратковременной ползучести анизотропного материала. Предельные возможности формоизменения установлены на базе использования феноменологических критериев разрушения (энергетического и деформационного), связанных с накоплением микроповреждений, анизотропного материала и условия локальной потери устойчивости для реономных сред при вязком течении материала. Анализ процессов реализован численно методом конечно-разностных соотношений с использованием ЭВМ. При проведении экспериментальных исследований использованы: установка для изотермического деформирования на базе гидравлического пресса модели ДА2234, оснащенной системой нагрева оснастки, вакуумной системой, системой газоподачи аргона в штамп, системами контроля и регулирования всех параметров технологического процесса, изотермический блок и регистрирующая аппаратура. Обработка опытных данных проводилась методами математической статистики.

**Автор защищает:**

- результаты теоретических исследований напряженного состояния, геометрических размеров изготавливаемых листовых конструкций, силовых режимов и предельных возможностей деформирования операций изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала, полученных на основе разработанных математических моделей изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения;

- математические модели изотермического свободного и стесненного (заполнение угловых элементов матрицы) деформирования листовых заготовок из высокопрочных малопластичных материалов, обладающих плоскостной анизотропией механических свойств, в матрицу квадратного поперечного сечения в режиме вязкого течения материала;

- результаты экспериментальных исследований геометрических размеров изготавливаемых листовых конструкций, силовых режимов и предельных возможностей операций изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из ряда высокопрочных анизотропных материалов;

- рекомендации по проектированию технологических параметров операций изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала, которые использованы при изготовлении элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из алюминиевых сплавов АМгб, латуни ЛбЗ, а также титанового сплава ВТбС.

**Научная новизна.** Установлены закономерности изменения напряженного состояния, силовых режимов и предельных возможностей деформирования, связанных с накоплением микрповреждений, анизотропного материала и условия локальной потери устойчивости от законов (условий) нагружения во времени, анизотропии механических свойств материала, геометрии рабочего инструмента на основе разработанных математических моделей операций изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из высокопрочных материалов, обладающих плоскостной анизотропией механических свойств, в режиме вязкого течения материала.

**Достоверность результатов** обеспечивается обоснованностью использованных теоретических зависимостей, допущений и ограничений, корректностью постановки задач, применением известных математических методов и подтверждается качественным и количественным согласованием результатов теоретических исследований с экспериментальными данными, а также использованием результатов работы в промышленности.

**Практическая значимость.** На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации и создано программное обеспечение для ЭВМ по расчету рациональных технологических параметров операций изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала, обеспечивающих интенсификацию технологических процессов, уменьшение трудоемкости и металлоемкости деталей, заданное качество их изготовления, сокращение сроков подготовки производства новых изделий.

**Реализация работы.** Созданы рекомендации по проектированию технологических параметров операций изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала, которые использованы в опытном производстве на ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение» при разработке технологических процессов изотермической пневмоформовки элементов однослойных листовых конструкций из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала.

Отдельные результаты исследований использованы в учебном процессе на кафедре «Механика пластического формоизменения» ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет».

**Апробация работы.** Результаты исследований доложены на международных молодежных научных конференциях " XXXIII - XXXX Гагаринские чтения" (г. Москва, 2007-2013 гг.), на Международной научно-технической конференции «Автоматизация; проблемы, идеи, решения» (Тула: ТулГУ, 2010 – 2012 гг.), на Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации» (Тула: ТулГУ, 2008 - 2013 гг.), на III Международной научно-технической конференции «Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением» (Тула: ТулГУ, 2014 г.), а также на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Тульского государственного университета (2007 – 2014 г.г.).

**Публикации.** Материалы проведенных исследований отражены в 9 статьях в рецензируемых изданиях, внесенных в список ВАК, в 6 статьях в межвузовских сборниках, в 17 тезисах докладов всероссийской научной конференции объемом 10,2 печ. л., из них авторских – 4 печ. л.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения и пяти разделов, заключения, списка использованных источников из 148 наименований, 3 приложений и включает 185 страниц машинописного текста, содержит 66 рисунков и 7 таблиц. Общий объем - 227 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность рассматриваемой в работе задачи, ее научная новизна, практическая ценность работы и кратко раскрыто содержание разделов диссертационной работы.

**В первом разделе** рассмотрено современное состояние теории и технологии изотермического деформирования высокопрочных материалов, проведен анализ существующих технологических процессов изготовления элементов листовых конструкций из изотропных и анизотропных высокопрочных материалов, намечены пути повышения эффективности их изготовления. Обоснована постановка задачи исследования.

Обзор научно-технической литературы показал, что технологические методы производства элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов связаны в настоящее время с достаточно трудоемкими процессами обработки, требующими высокой исходной точности заготовок и полуфабрикатов, длительного цикла обработки, приводящими к высокому расходу металла, а также применения большого числа сборочных единиц и крепежных деталей, что повышает себестоимость изго-

товления изделий в условиях мелкого и среднесерийного производства. К таким процессам относят прокатку, механическую обработку резанием, сварку плавлением или пайку, соединение элементов клепкой, раздувание канала внутренним давлением и т.д. Реализация эффективной технологии может быть обеспечена внедрением технологических методов обработки, построенных на совмещенных процессах изотермического деформирования газом из листа с термофиксацией, изотермического деформирования со сваркой давлением на одной позиции обработки.

Значительный вклад в развитие теории пластичности, ползучести, методов анализа процессов обработки металлов давлением изотропных и анизотропных материалов внесли Ю.А. Алюшин, Ю.М. Арышенский, А.А. Богатов, Р.А. Васин, С.И. Вдовин, Э. Ву, В.Д. Головлев, Ф.В. Гречников, С.И. Губкин, Г.Я. Гун, В.Л. Данилов, Г.Д. Дель, А.М. Дмитриев, Д. Друкер, Г. Закс, А.А. Ильюшин, Ю.Г. Калпин, Л.М. Качанов, В.Л. Колмогоров, В.Д. Кухарь, С.Н. Ларин, А.М. Локощенко, Н.Н. Малинин, С.Г. Милейко, А.Г. Овчинников, В.А. Огородников, С.С. Одинг, Е.А. Попов, Ю.Н. Работнов, И.П. Ренне, К.И. Романов, Ф.И. Рузанов, Г. Свифт, Е.И. Семенов, О.М. Смирнов, Я.А. Соболев, О.В. Соснин, Л.Г. Степанский, О.В. Пилипенко, А.Д. Томленов, Е.П. Унксов, Р. Хилл, В.Н. Чудин, В.В. Шевелев, С.А. Шестериков, С.П. Яковлев и др.

На основе приведенного обзора работ следует, что теория ползучести обычно применяется для расчета на прочность конструкций, работающих длительное время при высоких температурах. В научно-технической литературе недостаточно внимания уделяется технологическим задачам обработки металлов давлением анизотропных материалов в условиях вязкого течения материала, реализуемого при скоростях деформации  $10^{-3} \dots 10^{-4}$  1/с. При разработке технологических процессов изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из высокопрочных материалов, обладающих плоскостной анизотропией механических свойств, в основном используют эмпирические зависимости из различных справочных материалов, которые не учитывают многие практически важные параметры. Во многих случаях это приводит к необходимости экспериментальной отработки этих процессов, что удлиняет сроки подготовки производства изделия.

**Во втором разделе** приводятся уравнения состояния при вязком течении анизотропных материалов, критерии деформируемости (энергетический и деформационный) и локальной потери устойчивости анизотропного листового материала при вязком течении материала, которые в последующем используются при теоретических исследованиях.

Рассмотрено деформирование материала, обладающего плоскостной анизотропией механических свойств, в условиях вязкого течения. Упругими составляющими деформации пренебрегаем. Вводится потенциал скоростей деформации анизотропного тела при ползучести. Компоненты скоростей деформации  $\xi_{ij}$  определяются в соответствии с ассоциированным законом течения. При вязком течении материала вводятся понятия эквивалентного напряжения  $\sigma_e$  и эквивалентной скорости деформации  $\xi_e$ .

Уравнения состояния с учетом повреждаемости в условиях вязкого течения материала, описывающие поведение материала, подчиняющегося энергетической теории ползучести и повреждаемости, записывается в виде

$$\xi_e^c = B(\sigma_e / \sigma_{e0})^n / (1 - \omega_A^c)^m; \quad \dot{\omega}_A^c = \sigma_e \xi_e^c / A_{np}^c, \quad (1)$$

а применительно к группе материалов, подчиняющихся кинетическим уравнениям ползучести и повреждаемости, в виде:

$$\xi_e^c = B(\sigma_e / \sigma_{e0})^n / (1 - \omega_e^c)^m; \quad \dot{\omega}_e^c = \xi_e^c / \varepsilon_{enp}^c, \quad (2)$$

где  $B$ ,  $n$ ,  $m$  - константы материала, зависящие от температуры испытаний;  $\varepsilon_e^c$  - величина эквивалентной деформации при вязком течении материала;  $A_{np}^c$  и  $\varepsilon_{enp}^c$  - удельная работа разрушения и предельная эквивалентная деформация при вязком течении материала;  $\omega_e^c$  и  $\omega_A^c$  - повреждаемость материала при вязкой деформации по деформационной и энергетической моделям разрушения соответственно. Уровень повреждаемости  $\omega$  не должен превышать 1.

При справедливости деформационного критерия формоизменения выражения для определения предельной эквивалентной деформации  $\varepsilon_{enp}^c$  при вязком течении материала можно записать так:

$$\varepsilon_{enp}^c = D(b_0 + b_1 \cos \alpha + b_2 \cos \beta + b_3 \cos \gamma), \quad (3)$$

где  $D, b_0, b_1, b_2, b_3$  - экспериментальные константы материала;  $\alpha, \beta, \gamma$  - углы ориентации первой главной оси напряжений  $\sigma_1$  относительно главных осей анизотропии  $x, y$  и  $z$  соответственно.

При рассмотрении критерия разрушения в энергетической постановке предельная величина удельной работы разрушения при деформации ползучести может быть вычислена по аналогичным зависимостям.

В работе приведен критерий локальной потери устойчивости анизотропного листового материала, полученный на основе постулата устойчивости Друкера для реономных сред в режиме вязкого течения материала.

Приведенные выше уравнения и соотношения для вязкого течения анизотропных материалов, критерии деформируемости (энергетический и деформационный) и локальной потери устойчивости анизотропного листовых материалов при вязком течении материала использованы при дальнейших теоретических исследованиях.

**В третьем разделе** приведены разработанные математические модели изотермического свободного и стесненного (заполнение угловых элементов матрицы) деформирования листовых заготовок из высокопрочных материалов, обладающих плоскостной анизотропией механических свойств, в матрицу квадратного поперечного сечения в режиме вязкого течения материала.

Элементы многослойных листовых конструкций квадратного поперечного сечения предлагается изготавливать изотермической пневмоформовкой листов (заполнителей), предварительно жестко соединенных по контуру с наружными листами (обшивками) до полного их прилегания к последним. Принимается, что процесс формообразования осуществляется в две стадии: свободное деформирование оболочки и формообразование угловых элементов конструкций. Свободная формовка оболочки продолжается до момента  $t_1$ , когда оболочка достигнет обшивки.

Рассмотрено деформирование листовой заготовки в матрицу квадратного поперечного сечения со сторонами  $2a$  в режиме вязкого течения материала под действием гидростатического давления  $p = p_0 + a_p t^{n_p}$ , где  $a_p$  и  $n_p$  - параметры закона нагружения (рисунок 1). Принимается, что деформирование осуществляется в условиях вязкого течения материала; упругими деформациями пренебрегаем; заготовка закреплена по внешнему контуру. Листовой материал принимается ортотропным с коэффициентами анизотропии  $R_x$  и  $R_y$ , поведение которых описывается энергетической или кинетической теорией ползучести и повреждаемости.

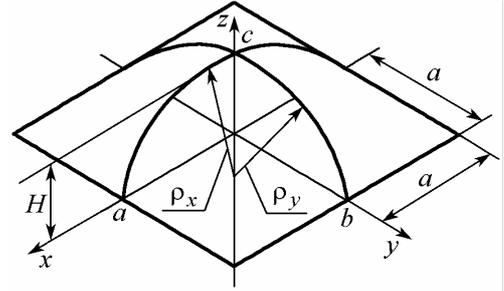


Рисунок 1 - Схема изотермического деформирования ячейки квадратного поперечного сечения

Главные оси напряжений совпадают с главными осями анизотропии  $x, y, z$ . Предполагается, что материал изотропно упрочняется при вязком течении материала - от величины эквивалентной скорости деформации.

При свободном деформировании учитывали, что операция реализуется в условии плоского напряженного состояния ( $\sigma_z = 0$ ) и поверхность заготовки при деформировании является частью сферы, причем профиль заготовки вдоль осей симметрии – окружность. Так как листовая заготовка закреплена по внешнему контуру, то принималось, что вдоль линии закрепления листовой заготовки реализуется плоское деформированное состояние, напряжения равномерно распределяются по толщине деформируемой заготовки.

Радиусы кривизны окружностей в плоскостях  $xOz$  и  $xOy$  равны:

$$\rho_x = \rho_y = (H^2 + a^2)/(2H). \quad (4)$$

Допускаем, что траектории точек ортогональны в данный момент образующемуся профилю. Величины толщины заготовки в точках «с», «а» и «b» вычисляются по выражениям:

$$h_c = h_0 \left[ \frac{a^2}{H^2 + a^2} \right]^2; \quad h_a = h_b = h_0 \frac{a^2}{H^2 + a^2}, \quad (5)$$

где  $h_0$  - начальная толщина заготовки.

Принимая, что напряжения равномерно распределены по толщине, компоненты напряжений определяем из совместного решения уравнения равновесия безмоментной оболочки, нагруженной равномерным давлением  $p$ , и ассоциированного закона течения ( $\xi_{xc}^c$  и  $\xi_{yc}^c$ ). Приведем окончательные выражения для определения компонент тензора напряжений  $\sigma_{xc}$  и  $\sigma_{yc}$ :

$$\sigma_{xc} = \chi \sigma_{yc}; \quad \sigma_{yc} = \frac{p \rho_y}{h(1+\chi)}; \quad \chi = \frac{R_x(1+R_y) + R_x R_y}{R_y(1+R_x) + R_x R_y}. \quad (6)$$

Поскольку величина давления  $p$  в каждый момент деформирования равномерно распределена по поверхности оболочки, то определяем его величину в полюсе сферы (точка с). Приведем окончательные выражения для определения

величин давления  $p$  и повреждаемости для материалов, подчиняющихся уравнениям энергетической теории ползучести и повреждаемости:

$$p^n dt = \frac{C_1 (\sigma_{e0})^n (1 - \omega_A^c)^m 2^{2n+1} h_0^n a^{4n} (1 + \chi) H^{n+1} dH}{BD_1^n (H^2 + a^2)^{3n+1}}; \quad (7)$$

$$\dot{\omega}_{Ac}^c = \frac{D_1 C_1 (H^2 + a^2)^2 p \dot{H}}{h_0 a^4 (1 + \chi) A_{npc}^c}, \quad (8)$$

где  $C_1 = F(R_x, R_y)$ ;  $D_1 = F1(R_x, R_y, \chi)$ .

Аналогичным образом получены основные уравнения и соотношения для решения поставленной задачи в предположении, что поведение материала подчиняется уравнениям кинетической теории ползучести и повреждаемости при известном законе давления от времени.

Рассмотрено формирование углового элемента оболочки в плоскостях симметрии  $yOz$  и  $xOz$  (рисунок 2). Принимаем, что  $a > H_1$ . Допускаем, что известны давление  $p_1$ , высота оболочки  $H_1$ , накопленная повреждаемость  $\omega_0$  и распределение толщины оболочки  $h_1 = h_1(\varphi)$  в момент  $t = t_1$ , где  $\varphi$  - угол, характеризующий положение точки на угловом элементе заготовки.

Процесс формообразования угловых элементов конструкций осуществляется в соответствии с рисунком 2. На первом этапе второй стадии деформирования в плоскостях  $yOz$  и  $xOz$  формируется плоский участок в окрестности вершины купола до момента, когда  $S_1 = S_{1*} = a - H_1$  и  $S_3 = S_{3*} = a - H_1$  соответственно.

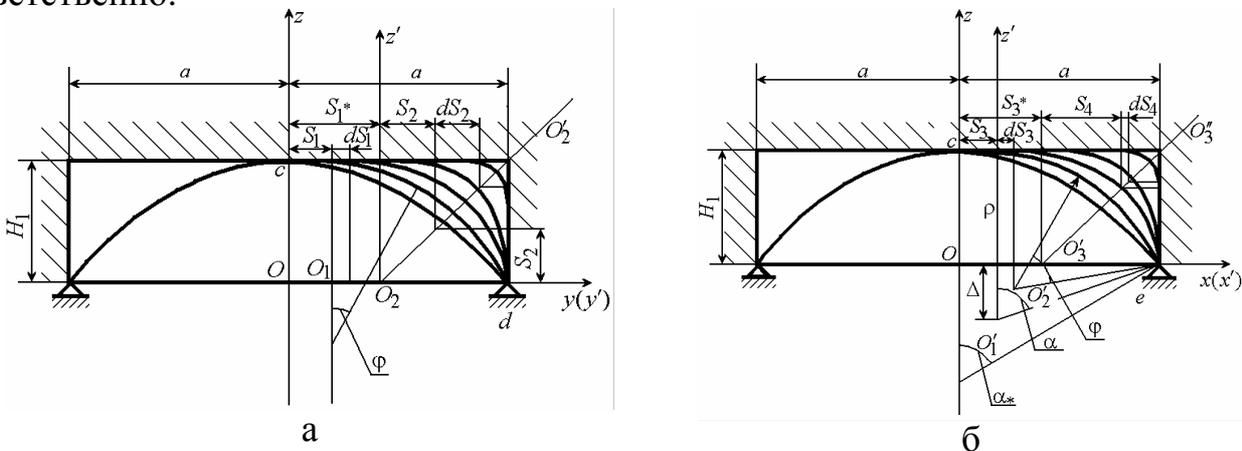


Рисунок 2 - Формообразование угловых элементов в плоскостях  $yOz$  (а) и  $xOz$  (б)

В дальнейшем на втором этапе второй стадии происходит симметричное деформирование оболочки относительно новых осей симметрии  $O_2O_2''$  и  $O_3O_3''$  с образованием симметрично плоских участков в угловой части оболочки; при этом форма деформируемой свободной угловой части в указанных выше плоскостях имеет форму части окружности (рисунок 2). Рассмотрим следующие возможные ситуации на втором этапе второй стадии деформирования:

- 1)  $S_1 \leq S_{1*}, S_3 \leq S_{3*}$ ; 2)  $S_1 > S_{1*} (S_2 > 0), S_3 > S_{3*} (S_4 > 0)$ .

Получены необходимые уравнения и соотношения для теоретического анализа напряженного и деформированного состояний заготовки при изотермическом формообразовании угловых элементов конструкции.

**В четвертом разделе** приведены результаты теоретических исследований по влиянию закона нагружения, геометрических размеров заготовки, анизотропии механических свойств исходного материала на напряженное состояние, силовые режимы и предельные возможности процесса изотермической пневмоформовки листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала, связанные с накоплением микрповреждений и критерием локальной потери устойчивости.

Расчеты выполнены для алюминиевого сплава АМгб при температуре формоизменения  $T = 380^\circ \text{C}$  и латуни Л63 при температуре деформирования  $T = 650^\circ \text{C}$ , поведение которых описывается энергетической теорией ползучести и повреждаемости, и для титанового сплава ВТ6С при температуре  $T = 930^\circ \text{C}$ , поведение которого подчиняется кинетической теорией ползучести и повреждаемости. Толщина листовой заготовки  $h_0 = 1$  мм. Анализ результатов расчетов показывает, что с ростом времени деформирования  $t$  до определенного предела осуществляются резкое увеличение относительной высоты заготовки  $\bar{H} = H/h_0$  и уменьшение относительной толщины заготовки в куполе  $\bar{h}_c = h_c/h_0$  и в месте ее закрепления  $\bar{h}_a = h_a/h_0$ . При дальнейшем увеличении времени происходит резкое изменение относительных величин  $\bar{H}$ ,  $\bar{h}_c$  и  $\bar{h}_a$ , что связано с интенсивным ростом накопления микрповреждений в заключительной стадии процесса. Установлено, что изменение относительной толщины в куполе заготовки  $\bar{h}_c$  происходит более интенсивно по сравнению с изменением относительной толщины в месте ее закрепления  $\bar{h}_a$ . С ростом времени деформирования  $t$  эта разница увеличивается и может достигать 40 %.

Зависимости изменения критической толщины заготовки  $\bar{h}_{a*} = h_{a*}/h_0$  в местах закрепления (кривая 1), куполе заготовки  $\bar{h}_{c*} = h_{c*}/h_0$  (кривая 2), времени разрушения заготовки  $t_*$  (кривая 3) и критической высоты заготовки  $\bar{H}_* = H_*/h_0$  (кривая 4) при свободном изотермическом формоизменении от параметра закона нагружения  $a_p$  для алюминиевого сплава АМгб при температуре деформирования  $T = 380^\circ \text{C}$  ( $a = 25$  мм) приведены на рисунке 3. Анализ результатов расчетов показывает, что увеличение параметров закона нагружения  $a_p$ ,  $n_p$  приводит к уменьшению времени разрушения  $t_*$  и относительной высоты заготовки  $\bar{H}_* = H_*/h_0$ , а также – к увеличению относительной толщины в куполе заготовки  $\bar{h}_{c*} = h_{c*}/h_0$  и в точках заземления  $\bar{h}_{a*} = h_{a*}/h_0$  в момент разрушения заготовки. Предельные возможности свободной пневмоформовки листовой заготовки квадратного поперечного сечения ограничиваются феноменологическим критерием по накоплению микрповреждений или критериям локальной потери устойчивости в зависимости от условий деформирования. Предельные возможности формоизменения в режиме вязкого течения титанового сплава ВТ6С, поведение которого подчиняется кинетической теории ползучести и повреждаемости, не зависят от условий нагружения заготовки. Показана существенная зависимость времени разрушения  $t_*$  от параметров нагружения  $a_p$  и  $n_p$ . Установлено, что для титанового сплава ВТ6С в исследо-

ванных условиях нагружения ( $a_p, n_p$ ) при изотермическом свободном деформировании элементов листовых конструкций в режиме вязкого течения материала возможно разрушение в местах их закрепления или разрушение в куполе заготовки (точка «с»).

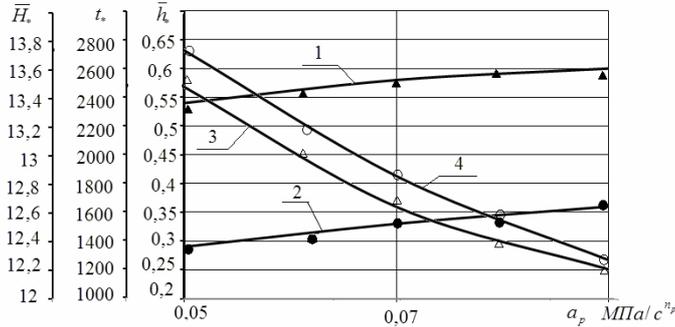


Рисунок 3 - Зависимости изменения  $\bar{h}_{a^*}$ ,  $\bar{h}_{c^*}$ ,  $t^*$ ,  $\bar{H}^*$  от  $a_p$  ( $n_p = 0,45$ )

На основе теоретических расчетов построены графические зависимости изменения зоны контакта заготовки с верхней частью матрицы для алюминиевого сплава АМгб, на которых в характерных точках показана величина накопленных микрповреждений  $\omega_A$  ( $a=25$  мм,  $H=10$  мм). Эти зависимости приведены на рисунке 4. Здесь введены обозначения: кривая 1 -  $\omega_{Ac} = 0,42$ ,  $t = 1380c$ ; кривая 2 -  $\omega_{Ac} = 0,45$ ,  $t = 1388c$ ; кривая 3 -  $\omega_{Ac} = 0,5$ ,  $t = 1404c$ ; кривая 4 -  $\omega_{Ac} = 0,55$ ,  $t = 1424c$ ; кривая 5 -  $\omega_{Ac} = 0,6$ ,  $t = 1459c$ ; кривая 6 -  $\omega_{Ac} = 0,68$ ,  $t = 1720c$ ; кривая 7 -  $\omega_{Ac} = 0,92$ ,  $t = 2163c$ .

Установлено, что с ростом времени деформирования  $t$  зона контакта заготовки с верхней частью матрицы и максимальная величина накопленных повреждений  $\omega_A$  возрастают. Выявлено несимметричное заполнение угловых элементов матрицы при плоскостной анизотропии механических свойств листовой заготовки (рисунок 4). Сопоставление теоретических и экспериментальных данных по относительной толщине в куполе заготовки и базовых точках, а также относительной высоте заготовки указывает на удовлетворительное их согласование (до 10 %). Выявлены закономерности изменения коэффициента заполнения  $\delta_F = F/F_0$  и максимальной величины накопленных микрповреждений  $\omega_A$  от времени деформирования  $t$ , где  $F$  и  $F_0$  - текущая и полная площади верхней части матрицы.

Установлено, что процесс заполнения угловых элементов условно можно разделить на три стадии: стадия плавного увеличения значения  $\delta_F$ , последующая стадия интенсивного его роста и стадия плавного увеличения значения  $\delta_F$ .

Выявлено, что с ростом параметров закона нагружения  $n_p$  и  $a_p$  наблюдается увеличение относительной величины критического радиуса закругления  $\bar{r}_* = r_*/h_0$  для алюминиевого сплава АМгб. Установлено, что с увеличением па-

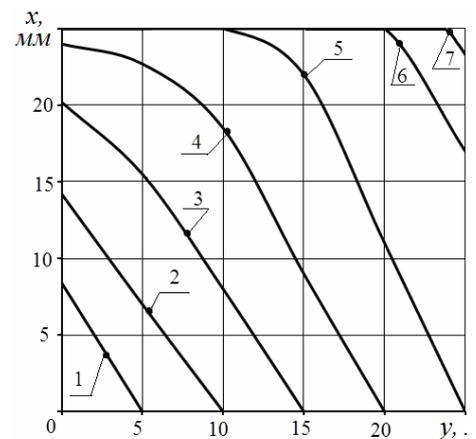


Рисунок 4 - Зависимости изменения зоны контакта заготовки с верхней частью матрицы в процессе деформирования

раметров нагружения  $n_p$  и  $a_p$  время разрушения  $t_*$  существенно уменьшается. Показано, что для материалов, подчиняющихся кинетической теории ползучести и повреждаемости, например для титанового сплава ВТ6С, относительный критический радиус закругления  $\bar{r}_*$  не изменяется, а время разрушения  $t_*$  уменьшается с ростом параметров нагружения  $n_p$  и  $a_p$ .

Выявлено влияние плоскостной анизотропии механических свойств на предельные возможности формоизменения. Показано, что неучет плоскостной анизотропии механических свойств заготовки дает погрешность в оценке времени разрушения порядка 35...40 %, а относительной высоты и толщины в куполе заготовки в момент разрушения – 15...20 %.

**В пятом разделе** изложены результаты выполненных экспериментальных исследований операций изотермической пневмоформовки листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала, а также результаты практической реализации теоретических и экспериментальных исследований.

Проведены экспериментальные исследования применительно к изготовлению одно- и двухслойных конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала из специальных листовых титановых и алюминиевых сплавов, применяемых в ракетно-космической технике. Технологические процессы основаны на выполнении последовательности действий над исходными заготовками на одной рабочей позиции: нагрев, вакуумирование – сварка давлением заготовок - формообразование - термофиксация - охлаждение. Экспериментально установлено, что при изотермической пневмоформовке заготовки в матрицу квадратного поперечного сечения разрушение может происходить в куполе или в месте ее закрепления, что подтверждается результатами теоретических исследований.

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по расчету рациональных технологических параметров операций изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала. Эти рекомендации использованы при разработке технологических процессов изготовления изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов (300×300 мм), которые приняты к внедрению в опытное производство на ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение» (см. рисунок 5).

Технологические процессы обеспечивают: увеличение удельной прочности деталей на 20...30 %; снижение массы деталей на 20...25 %; сокращение сроков подготовки производства и снижение трудоемкости изготовления изделий в 1,5...2 раза.

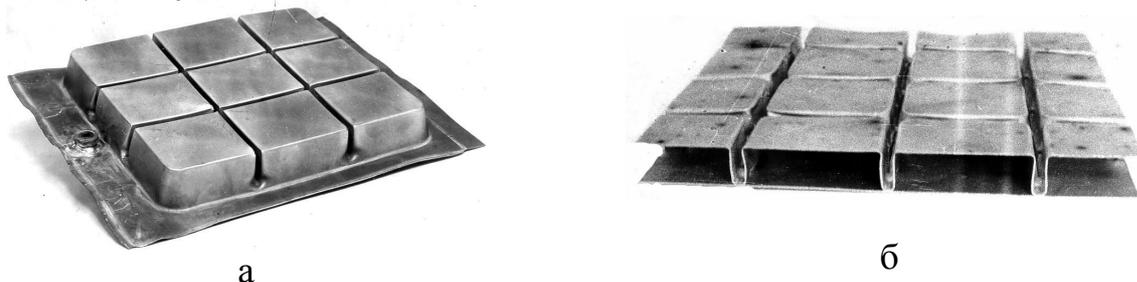


Рисунок 5 - Формованный ячеистый наполнитель из алюминиевого АМг6 (а) и титанового ВТ6С (б) сплавов

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная научно-техническая задача, имеющая важное значение для различных отраслей машиностроения и состоящая в теоретическом обосновании выбора технологических режимов операций, обеспечивающих повышение эффективности изотермического деформирования элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных сплавов в режиме вязкого течения материала, решение которой вносит значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса.

В процессе теоретического и экспериментального исследований получены следующие **основные результаты и сделаны выводы**.

1 Разработаны математические модели изотермического свободного и стесненного деформирования (заполнение угловых элементов матрицы) элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения при вязком течении высокопрочных листовых анизотропных материалов, обладающих плоскостной анизотропией механических свойств, учитывающие упрочнение и реономные свойства листового материала.

2 На основе разработанных математических моделей деформирования выполнены теоретические исследования операций изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала. Теоретические исследования процессов изотермического деформирования выполнены для групп материалов, поведение которых описывается уравнениями энергетической или кинетической теории ползучести и повреждаемости. Выявлено влияние закона нагружения, анизотропии механических свойств исходного материала, геометрических размеров заготовки и детали на напряженное состояние, силовые режимы и предельные возможности изотермического свободного и стесненного деформирования элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения, связанные с накоплением микроповреждений и локальной потерей устойчивости заготовки, в режиме вязкого течения материала.

3 Установлено, что изменение относительной толщины в куполе заготовки происходит более интенсивно по сравнению с изменением относительной толщины в базовых точках для исследуемой операции. С ростом времени деформирования  $t$  эта разница увеличивается и может достигать 30...50 %. Показано, что на начальном этапе деформирования относительные величины напряжений в куполе заготовки уменьшаются, что связано с резким изменением радиуса кривизны заготовки. Дальнейшее увеличение времени деформирования сопровождается резким увеличением относительных величин напряжений, которое обусловлено интенсивным накоплением микроповреждений.

4 Выявлено, что увеличение параметров нагружения ( $n_p = 0,3...0,6$  и  $a_p = 0,5...0,8 \text{ МПа/с}^{n_p}$ ) приводит к повышению предельной толщины в куполе и в базовых точках листовой заготовки, а также к уменьшению относительной предельной высоты заготовки и времени разрушения на 25...45 %. Относительная толщина в куполе заготовки меньше, чем в местах ее закрепления, на 20...35 %. Установлено, что предельные возможности деформирования при изотермическом свободном формоизменении элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечений в режиме вязкого течения материала могут ограничиваться как по критерию накопленных микроповреждений, так и по критерию локальной потери устойчивости. Предельные возможности формоиз-

менения при изотермическом свободном деформировании анизотропных материалов, поведение которых описывается кинетической теорией ползучести и повреждаемости, не зависят от условий нагружения заготовки. Однако время разрушения существенно зависит от параметров нагружения.

5 Показано, что увеличение параметров закона нагружения сопровождается ростом коэффициента заполнения угловых элементов ячейки, относительной величины критического радиуса закругления и существенным уменьшением времени разрушения на 25...45 %.

6 Установлено влияние плоскостной анизотропии механических свойств на предельные возможности формоизменения. Неучет плоскостной анизотропии механических свойств заготовки дает погрешность в оценке времени разрушения порядка 35...40 %, а относительной высоты и толщины в куполе заготовки в момент разрушения – 15...20 %.

7 Выполнены экспериментальные исследования процессов изотермической пневмоформовки элементов однослойных листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала. Экспериментально установлено, что при изотермической пневмоформовке заготовки в матрицу квадратного поперечного сечения разрушение может происходить в куполе или в месте ее закрепления, что подтверждается результатами теоретических исследований. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных по относительной толщине в куполе заготовки и базовых точках, а также относительной высоте заготовки указывает на удовлетворительное их согласование (до 10 %).

8 Разработаны рекомендации по проектированию технологических параметров операций изотермической пневмоформовки элементов листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала, которые использованы в опытном производстве на ОАО «Корпорация «Тактическое ракетное вооружение» при разработке технологических процессов изотермической пневмоформовки элементов одно- и двухслойных листовых конструкций из анизотропных высокопрочных материалов в режиме вязкого течения материала. Предложенные технологические процессы обеспечивают: увеличение удельной прочности деталей на 20...30%; снижение массы деталей на 20...25 %; сокращение сроков подготовки производства и снижение трудоемкости изготовления изделий в 1,5...2 раза.

Отдельные результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе.

#### **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В 32 – Х ПУБЛИКАЦИЯХ, ОСНОВНЫМИ ИЗ КОТОРЫХ ЯВЛЯЮТСЯ**

1. **Леонова Е.В., Ларин С.Н., Яковлев С.П. Изотермическая пневмоформовка элементов ячеистых многослойных листовых конструкций прямоугольного поперечного сечения из анизотропного материала // Известия ТулГУ. Сер. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып. 4. С. 9-15.**

2. **Леонова Е.В., Ларин С.Н., Чарин А.В. Изотермическое стесненное деформирование анизотропной листовой заготовки в квадратную матрицу // Известия ТулГУ. Сер. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением. Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. Вып. 2. С. 333-337.**

3. **Леонова Е.В. Газоформовка ячеистых листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных материалов // Материалы Всероссийской на-**

учно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные технологии обработки металлов и средства их автоматизации». Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. С. 28-30.

4. **Экспериментальные исследования изотермического формоизменения вафельных конструкций / Е.В. Леонова, С.Н. Ларин, С.С. Яковлев, В.Н. Чудин // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 1. С. 245-252.**

5. **Изотермическая пневмоформовка вафельных панелей и трубчатых конструкций / Е.В. Леонова, С.Н. Ларин, С.С. Яковлев, В.Н. Чудин // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. Вып. 2. С. 196-202.**

6. Леонова Е.В., Ларин С.Н. Термомеханические режимы деформирования элементов панелей вафельного фона в режиме кратковременной ползучести // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения. Тула: ТулГУ, 2012. С. 195-199.

7. Леонова Е.В. Проектирование технологических процессов изготовления корпусных узлов из высокопрочных материалов // XXXVIII Гагаринские чтения. Международная молодежная научная конференция: тезисы докладов. М.: МАТИ, 2012. С. 284-286.

8. **Леонова Е.В., Яковлев С.С., Ларин С.Н. Изотермическое деформирование элементов вафельных листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 4. С. 46-59.**

9. **Леонова Е.В., Яковлев С.С., Ларин С.Н. Теория кратковременной ползучести анизотропного материала // Известия ТулГУ. Естественные науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013, Вып. 2. Ч. 2. С. 297-312.**

10. **Леонова Е.В., Яковлев С.С., Ларин С.Н. Изотермическое деформирование элементов вафельных листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных материалов // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Вып. 4. С. 46-59.**

11. Леонова Е.В. Изотермическая пневмоформовка вафельных панелей из высокопрочных материалов // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ, 2013. С. 188-189.

12. **Леонова Е.В., Яковлев С.С., Ларин С.Н. Теоретические основы изотермического деформирования анизотропных высокопрочных материалов в режиме кратковременной ползучести // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 1. С. 110-122.**

13. **Штамповая оснастка для изотермической пневмоформовки листовых высокопрочных материалов в режиме кратковременной ползучести / Е.В. Леонова, С.Н. Ларин, С.С. Яковлев, В.И. Платонов // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Вып. 11. С. 124-129.**

14. Леонова Е.В. Предельные возможности изотермического деформирования элементов вафельных листовых конструкций квадратного поперечного сечения из анизотропных материалов // Молодежный вестник политехнического института. Тула: ТулГУ. 2014. С. 143-144.