

На правах рукописи



ПЛАТОНОВ ВАЛЕРИЙ ИВАНОВИЧ

**ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ВЫТЯЖКА С УТОНЕНИЕМ СТЕНКИ
ТОНКО- И ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ЗАГОТОВОК ИЗ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ
В РЕЖИМЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ**

Специальность 05 03 05 - **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 2007

Работа выполнена на кафедре «Механика пластического формоизменения»
в ГОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Яковлев Сергей Петрович

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор
Сосенушкин Евгений Николаевич
доктор технических наук, профессор
Журавлев Геннадий Модестович

Ведущая организация - ОАО «ТНИИ» (г Тула)

Защита состоится « 30 » мая 2007 г в 12 час на заседании
диссертационного совета Д 212 271 01 при ГОУ ВПО «Тульский государственный
университет» (300600, г Тула, ГСП, просп им Ленина, д 92, 9 корп , ауд
101)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ГОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Автореферат разослан « 24 » апреля 2007 г

Ученый секретарь
диссертационного совета



А Б Орлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важной задачей, стоящей перед современным машиностроением, является повышение эффективности и конкурентоспособности процессов изготовления изделий из металлов и сплавов методами обработки давлением, обеспечивающих необходимые эксплуатационные характеристики. Совершенствование конструкций изделий ответственного назначения определяет применение анизотропных высокопрочных материалов и изготовление деталей узлов со специальными, зависящими от условий эксплуатации, характеристиками. К числу наиболее перспективных и принципиально новых технологических процессов, направленных на совершенствование современного производства, относятся процессы медленного горячего формоизменения в режиме вязкого течения материала.

В различных отраслях машиностроения широкое распространение нашли цилиндрические изделия, изготавливаемые методами глубокой вытяжки. Технологические принципы формоизменения листовых заготовок в режиме вязкого течения материала могут быть применены в производстве цилиндрических деталей из анизотропных высокопрочных сплавов.

Материал, подвергаемый штамповке, как правило, обладает анизотропией механических свойств, которая может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивое протекание технологических процессов обработки металлов давлением при различных термомеханических режимах деформирования.

Широкое внедрение в промышленность процессов изотермической вытяжки с утонением стенки цилиндрических деталей из высокопрочных материалов сдерживается недостаточно развитой теорией медленного деформирования при повышенных температурах с учетом реальных свойств материала, позволяющей оценить кинематику течения материала, напряженное и деформированное состояние заготовки, силовые режимы, предельные возможности формообразования и энергозатраты процесса. Таким образом, разработка теории и технологии изготовления цилиндрических деталей из анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести является актуальной задачей.

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»).

Цель работы. Интенсификация технологических процессов изотермической вытяжки с утонением цилиндрических деталей из высокопрочных анизотропных упрочняющихся материалов, обладающих цилиндрической анизотропией механических свойств, обеспечивающих заданное качество их изготовления, уменьшение трудоемкости и металлоемкости деталей, сокращение сроков подготовки производства новых изделий.

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

1. Разработать математические модели изотермической вытяжки с утонением стенки тонкостенных и толстостенных цилиндрических заготовок из вы-

сокопрочных материалов, обладающих цилиндрической анизотропией механических свойств

2 Получить основные уравнения и соотношения для анализа операции изотермической вытяжки с утонением стенки цилиндрических заготовок в конических матрицах, протекающих в условиях плоского деформированного (вытяжка с утонением тонкостенных заготовок) или осесимметричного напряженного состояния (вытяжка с утонением толстостенных заготовок) из анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести

3 Выполнить теоретические и экспериментальные исследования изотермической вытяжки с утонением стенки цилиндрических деталей из анизотропных материалов в конических матрицах при кратковременной ползучести

4 Установить влияние технологических параметров, анизотропии механических свойств, геометрических размеров заготовки и детали, скорости перемещения пуансона на кинематику течения материала, напряженное и деформированное состояния, силовые режимы и предельные возможности исследуемых операций изотермической вытяжки

5 Разработать рекомендации по расчету технологических параметров изотермической вытяжки с утонением стенки цилиндрических деталей из высокопрочных анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести

6 Использовать результаты исследований в промышленности и в учебном процессе

Методы исследования. Теоретические исследования процессов изотермического деформирования выполнены на основе теории кратковременной ползучести анизотропного материала. Анализ напряженного и деформированного состояния заготовки в процессах изотермической вытяжки с утонением стенки цилиндрических заготовок из анизотропных высокопрочных материалов осуществлен численно методом конечно-разностных соотношений с использованием ЭВМ путем решения приближенных уравнений равновесия с уравнением состояния анизотропного материала при кратковременной ползучести. Предельные возможности формоизменения оценивались по феноменологическим критериям разрушения (энергетическому или деформационному) анизотропного материала, связанного с накоплением микрповреждений. При проведении экспериментальных исследований использованы современные испытательные машины и регистрирующая аппаратура. Обработка опытных данных проводилась методами математической статистики.

Автор защищает:

- математические модели изотермической вытяжки с утонением стенки цилиндрических заготовок в конических матрицах, протекающих в условиях плоского деформированного (вытяжка с утонением тонкостенных заготовок) или осесимметричного напряженного состояния (вытяжка с утонением толстостенных заготовок) из анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести,

- результаты теоретических и экспериментальных исследований изотермической вытяжки с утонением стенки цилиндрических деталей из анизотропных материалов в конических матрицах в режиме кратковременной ползучести,

- установленные зависимости влияния технологических параметров, скорости перемещения пуансона, условий трения на контактных поверхностях рабочего инструмента и заготовки, анизотропии механических свойств материала заготовки на кинематику течения материала, напряженное и деформированное

состояния заготовки, силовые режимы и предельные возможности деформирования, связанные с допустимой величиной накопленных микрповреждений,

- результаты экспериментальных исследований операций изотермической вытяжки с утонением стенки тонкостенных и толстостенных цилиндрических заготовок из анизотропных высокопрочных материалов,

- разработанные рекомендации по проектированию технологических процессов

- технологический процесс изготовления цилиндрических деталей из титанового сплава ВТ6

Научная новизна. Установлены закономерности изменения кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояний заготовки, силовых режимов и предельных возможностей формоизменения в зависимости от технологических параметров, скорости перемещения пуансона и анизотропии механических свойств материала заготовки на основе разработанных математических моделей течения анизотропного материала в клиновом канале в условиях плоского деформированного состояния и в конической матрице в условиях осесимметричного напряженного и деформированного состояния в режиме кратковременной ползучести

Практическая значимость. На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации и созданы пакеты прикладных программ для ЭВМ по расчету технологических параметров операций вытяжки с утонением стенки тонкостенных и толстостенных цилиндрических заготовок из высокопрочных анизотропных материалов, что позволяет получать детали с повышенными точностными характеристиками по диаметру и толщине с более упрочненной стенкой, а также достигать больших степеней деформации по сравнению с другими видами вытяжки, значительно сократить число операций технологического процесса

Реализация работы. Разработан технологический процесс изготовления цилиндрических деталей с высокими эксплуатационными характеристиками Технологический процесс принят к внедрению в опытное производство на ФГУП «ГНПП «Сплав» (г Тула) Отдельные результаты исследований использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 150400 «Технологические машины и оборудование» и инженеров, обучающихся по направлению 150200 «Машиностроительные технологии и оборудование» специальности 150201 «Машины и технология обработки металлов давлением» и включены в разделы лекционных курсов «Штамповка анизотропных материалов» и «Механика процессов пластического формоизменения», а также использованы в научно-исследовательской работе студентов, при выполнении курсовых и дипломных проектов

Апробация работы. Результаты исследований доложены на международных молодежных научных конференциях XXIX – XXXIII «Гагаринские чтения» (г Москва МГТУ «МАТИ», 2003-2007 гг), на международной научно-технической конференции «Механика пластического формоизменения Технологии и оборудование обработки материалов давлением» (г Тула ТулГУ, 2004 г), на международной научно-технической конференции «Образование, наука, производство и управление» (г Старый Оскол Старооскольский технологический институт, 2007 г), на I-й Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Идеи молодых – Новой России» (г Тула ТулГУ, 2004 г), а также на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Тульского государственного университета (2002-2007 гг)

Публикации. Материалы проведенных исследований отражены в 8 статьях в рецензируемых изданиях, внесенных в список ВАК, 5 тезисах и материалах Всероссийских и международных научно-технических конференций объемом 4 3 печ л, из них авторских – 2 4 печ л

Автор выражает глубокую благодарность д т н, профессору С С Яковлеву и д т н, профессору Ю Г Нечепуренко за оказанную помощь при выполнении работы, критические замечания и рекомендации

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения и пяти разделов, заключения, списка использованных источников из 148 наименований, 3 приложений и включает 96 страниц машинописного текста, содержит 47 рисунков и 6 таблиц Общий объем - 178 страниц

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой в работе задачи, ее научная новизна, практическая ценность работы, приведены положения, выносимые на защиту, и краткое содержание разделов диссертации

В первом разделе рассмотрено современное состояние теории и технологии изотермического формоизменения высокопрочных материалов, проведен анализ существующих технологических процессов изготовления цилиндрических деталей из листового материала, намечены пути повышения эффективности их изготовления Обоснована постановка задач исследований

Значительный вклад в развитие теории пластичности, ползучести, методов анализа процессов обработки металлов давлением изотропных и анизотропных материалов внесли Ю А Аверкиев, Ю А Алошин, 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, Ф У Еникеев, Г Закс, А А Ильюшин, Е И Исаченков, Ю Г Калпин, Л М Качанов, В Л Колмогоров, А А Колтунов, В Д Кухарь, Д Лубан, Н Н Малинин, А Д Матвеев, 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, И А Смарагдов, О М Смирнов, Я А Соболев, О В Соcнин, Л Г Степанский, А Д Томленов, Е П Унксов, Р Хилл, В Н Чудин, В В Шевелев, С А Шестериков, С П Яковлев, С С Яковлев и другие

На основе приведенного обзора работ установлено, что анизотропия механических свойств обрабатываемых материалов оказывает существенное влияние на силовые режимы и предельные возможности формоизменения не только в условиях холодной обработки металлов давлением, но и при медленном горячем деформировании, и ее следует учитывать при расчетах технологических параметров процессов обработки металлов давлением Несмотря на большое количество работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям процессов вытяжки с утонением стенки, вопросы теории формообразования анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести в настоящее время практически не разработаны Мало внимания уделяется в научно-технической литературе исследованиям кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояний заготовки, силовых режимов и предельных возможностей формообразования при осесимметричной вытяжке с утонением стенки цилиндрических заготовок в режиме вязкого течения материала Реализация эффективности технологии может быть обеспечена внедрением технологических процессов медленного горячего деформирования При разработке технологических процессов изотермической вытяжки с утонением стенки цилиндрических деталей в основном используют эмпирические зависи-

мости из различных справочных материалов, которые не учитывают многие практически важные параметры. Во многих случаях это приводит к необходимости экспериментальной обработки этих процессов, что удлиняет сроки подготовки производства изделия.

Во втором разделе приведены основные соотношения и уравнения, необходимые для теоретического анализа процессов медленного горячего деформирования анизотропного материала, приведены уравнения связи между скоростями деформации и напряжениями, уравнения состояния при вязком и вязко-пластическом течениях анизотропного материала, критерии деформируемости (энергетический и деформационный) анизотропного материала при вязком и вязко-пластическом течении, которые в последующем используются при теоретических исследованиях.

Рассмотрено деформирование анизотропного материала в условиях ползучего течения. Упругими составляющими деформации пренебрегаем. Вводится потенциал скоростей деформации анизотропного тела при ползучем течении. Компоненты скоростей деформации ξ_{ij} определяются в соответствии с ассоциированным законом течения. При вязком течении материала по аналогии с работами Р. Хилла и Н.Н. Малинина введены понятия эквивалентного напряжения σ_e и эквивалентной скорости деформации ξ_e .

Предельные возможности формоизменения в процессах обработки металлов давлением, протекающих при различных температурно-скоростных режимах деформирования, часто оцениваются на базе феноменологических моделей разрушения. В зависимости от условий эксплуатации или последующей обработки изготавливаемого изделия уровень повреждаемости не должен превышать 1, т.е. $\omega \leq 1$.

Третий раздел посвящен теоретическим исследованиям изотермической вытяжки с утонением стенки тонкостенных цилиндрических деталей из анизотропного материала в режимах вязкого и вязкопластического течения материала. Процессы изотермической вытяжки рассмотрены для групп материалов, для которых справедливы уравнения энергетической и деформационной теории ползучести и повреждаемости [7, 10, 11, 12].

Выполнены теоретические исследования процесса изотермической вытяжки с утонением стенки анизотропного материала в режиме медленного деформирования (ползучести) через коническую матрицу с углом α (рис. 1). Течение материала реализуется в условиях плоской деформации. На контактных границах заготовки и инструмента реализуется закон трения Кулона:

$$\tau_M = \mu_M \sigma_k, \quad \tau_{II} = \mu_{II} \sigma_k,$$

где μ_M и μ_{II} - коэффициенты трения на контактных поверхностях матрицы и пуансона, σ_k - нормальные напряжения на контактных поверхностях матрицы и пуансона.

Поле скоростей в цилиндрической системе координат ρ, θ, y' принимаем радиальным с равномерным распределением компоненты скорости V_ρ .

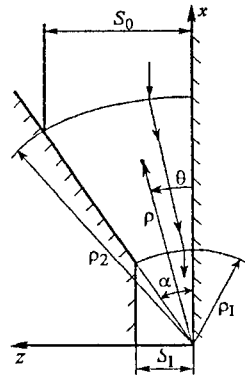


Рис. 1. Схема к теоретическому анализу кинематики течения материала.

$$V_\rho = V_\rho(\rho), \quad V_\theta = 0, \quad V_{y'} = 0 \quad (1)$$

Для определения вида зависимости радиальной скорости от координат используем уравнение несжимаемости материала, которое с учетом уравнений (1) запишется

$$\frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} (\rho V_\rho) = 0$$

Величина радиальной скорости определяется по выражению

$$V_\rho = \frac{\bar{B}}{\rho}, \quad \bar{B} = -\frac{V_n \cdot s_1}{\alpha}, \quad (2)$$

где V_n - скорость перемещения пуансона

Компоненты скоростей деформации в нашем случае рассчитываются по формулам

$$\xi_\rho = -\frac{\bar{B}}{\rho^2}, \quad \xi_{\rho\theta} = 0, \quad \xi_\theta = \frac{\bar{B}}{\rho^2}, \quad \xi_{\theta y'} = 0, \quad \xi_y = 0, \quad \xi_{y'\rho} = 0 \quad (3)$$

Поскольку физические уравнения ортотропного тела связаны с главными осями анизотропии, запишем выражения для компонент деформаций в новых осях x, y, z (главные оси анизотропии) с помощью формул преобразования компонент скоростей деформаций

$$\xi_x = -\frac{\bar{B}}{\rho^2} \cos 2\theta, \quad \xi_z = \frac{\bar{B}}{\rho^2} \cos 2\theta, \quad \xi_{y'} = 0, \quad \xi_{xz} = -\frac{1}{2} \frac{\bar{B}}{\rho^2} \sin 2\theta \quad (4)$$

Принимая во внимание, что течение материала происходит в условиях плоской деформации, т е

$$\xi_{y'} = 0, \quad \xi_{xy'} = \xi_{zy'} = 0, \quad \xi_{xz} = 0, \quad (5)$$

$$\sigma_{y'} = \frac{H\sigma_x + F\sigma_z}{H + F}, \quad \tau_{y'z} = \tau_{y'x} = 0,$$

получаем выражения для определения эквивалентной скорости деформации ξ_e и эквивалентного напряжения σ_e

Далее определяем компоненты напряжений в системе координат x, y, z через компоненты напряжений в системе координат ρ, θ, z' и записываем выражения для нахождения эквивалентного напряжения σ_e и эквивалентной скорости деформации ξ_e в системе координат x, y, z

В дальнейшем примем, что компоненты напряжений $\sigma_\rho, \sigma_\theta$ и компоненты скоростей деформаций ξ_ρ, ξ_{xz} зависят только от координаты ρ и связываются со средним углом матрицы, т е полагаем $\theta = \alpha/2$, $\sigma_\theta = \sigma_k$

Приведем окончательную систему уравнений для определения компонент тензора напряжений и повреждаемости материала

$$\sigma_\rho - \sigma_k = \sigma_e \sqrt{\frac{2(R_x + R_y + R_x^c R_y)}{3R_y}} \times \left(\frac{R_x + R_y + 1}{R_y + 1} \cos^2 \alpha + \frac{1}{2} R_{xz} \sin^2 \alpha \right)^{-1/2}, \quad (6)$$

$$\sigma_e = \frac{\sigma_e 0}{B^{1/n}} \xi_e^{(1/n)}, \quad \omega_A = \frac{\sigma_e \xi_e}{A_{np}}, \quad (7)$$

$$\xi_e = \sqrt{\frac{2(R_x + R_y + R_x R_y)}{3R_y^c}} \times \left(\frac{R_y + 1}{R_x + R_y + 1} \cos^2 \alpha + \frac{1}{2R_{zx}} \sin^2 \alpha \right)^{1/2} \frac{|\bar{B}|}{\rho^2}, \quad (8)$$

и уравнение равновесия

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_k(1 + M) = 0, \quad (9)$$

если поведение материала описывается энергетической теорией ползучести и повреждаемости, где $M = -(\mu_{II} - \mu_M)/tg\alpha$, $R_x = H/G$, $R_y = H/F$, $R_{xy} = N/G$; $R_{yz} = L/G$, $R_{zx} = M/G$, F, G, H, L, M, N - параметры анизотропии

В том случае, когда поведение материала подчиняется кинетической теории ползучести и повреждаемости, используются уравнения (6) - (9) и вместо уравнения состояния (7) -

$$\sigma_e = \frac{\sigma_{e0}}{B} \frac{\xi}{1/n} \xi^{1/n}, \quad \omega_e = \xi_e / \varepsilon_{enp} \quad (10)$$

Системы уравнений (6-9) и (6), (8), (9), (10) решаются методом конечно-разностных соотношений вместе с методом итераций

Изменение направления течения при входе и выходе из очага деформации будем учитывать изменением величины радиального напряжения на величину

$$\Delta\sigma_\rho = -\frac{\sigma_\rho - \sigma_k}{2} tg \frac{\alpha}{2} \quad (11)$$

Осевое напряжение σ_x с учетом поворота течения материала на угол $\alpha/2$ на выходе из очага деформации вычисляется следующим образом

$$\sigma_x = \sigma_\rho \Big|_{\rho=\rho_1} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_k}{2} tg \frac{\alpha}{2} \quad (12)$$

Сила вытяжки с утонением определяется по формуле

$$P = \pi d_1 s_1 \sigma_x + \pi \mu_{II} d_{II} \int_{\rho_1}^{\rho_2} |\sigma_k| d\rho \quad (13)$$

Подобный подход к решению задачи реализован при теоретическом анализе операции изотермической вытяжки с утонением стенки цилиндрических тонкостенных заготовок из анизотропного материала в режиме ползуче-пластического течения материала [2, 3]

Приведенные выше соотношения для анализа процесса изотермической вытяжки с утонением стенки позволили установить влияние технологических параметров процесса, скорости перемещения пуансона при V_n , анизотропии механических свойств исходного материала на напряженное и деформированное состояния, силовые режимы и предельные возможности формоизменения исследуемого процесса

Графические зависимости изменения относительных величин силы $\bar{P} = P/(2\pi r_1 s_0 \sigma_{e0})$ и осевого напряжения $\bar{\sigma}_x = \sigma_x / \sigma_{e0}$ при вытяжке с утонением стенки алюминиевого сплава АМг6 ($T = 450^\circ$), поведение которого описывается энергетической теорией кратковременной ползучести и повреждаемости, от угла конусности матрицы α при фиксированном значении скорости перемещения пуансона V_n , обеспечивающей ползучее течение материалов, пред-

ставлены на рис 2 Здесь введены обозначения кривая 1 - $m_s = 0,5$, кривая 2 - $m_s = 0,6$, кривая 3 - $m_s = 0,7$, кривая 4 - $m_s = 0,8$, кривая 5 - $m_s = 0,9$.

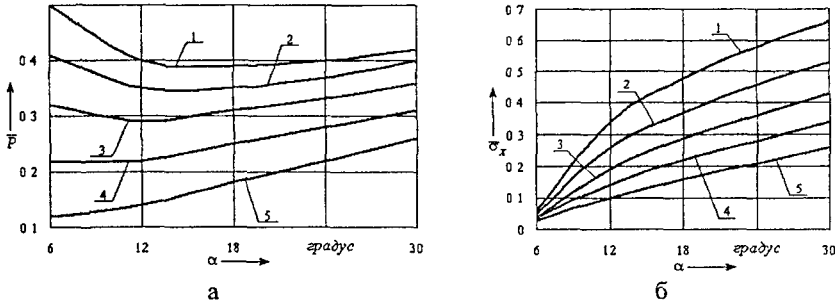


Рис 2 Графические зависимости изменения \bar{P} (а) и $\bar{\sigma}_x$ (б) от α при изотермической вытяжке с утонением сплава АМг6 (450°С) ($\mu_M = 0,1$, $\mu_{II} = 0,2$, $V_n = 0,004$ мм/с)

Анализ результатов расчетов и графических зависимостей показывает, что относительная величина силы \bar{P} с ростом коэффициента утонения m_s уменьшается. Относительная величина осевого напряжения $\bar{\sigma}_x$ возрастает с ростом угла конусности матрицы α и уменьшением коэффициента утонения m_s . Выявлено существование оптимальных углов конусности матрицы в пределах 12–24°, соответствующих наименьшей величине силы, при коэффициентах утонения $m_s \leq 0,7$. При величинах коэффициентов утонения $m_s \geq 0,7$ увеличение угла конусности матрицы α приводит к увеличению относительной силы \bar{P} (рис 2). Величина оптимальных углов конусности матрицы α с уменьшением коэффициента утонения m_s смещается в сторону больших углов. Этот характер изменения относительных величин силы \bar{P} и напряжений $\bar{\sigma}_x$ справедлив, как для ползучего, так и ползуче-пластического течения материала.

Установлено, что с ростом коэффициента трения на пуансоне μ_{II} (при фиксированном значении μ_M) величина относительной силы \bar{P} резко возрастает, как при ползучем, так и ползуче-пластическом течении материала.

Предельные возможные формоизменения в процессах обработки металлов давлением, протекающих при различных температурно-скоростных режимах деформирования, оценивались на базе феноменологических моделей разрушения. В зависимости от условий эксплуатации или последующей обработки изготавливаемого изделия уровень повреждаемости не должен превышать величины χ , т.е.

$$\omega_e \leq \chi \quad (14)$$

При назначении величин степеней деформации в процессах формоизменения в дальнейшем учитывались рекомендации по допустимой величине накопленных микрповреждений (степени использования запаса пластичности) В Л Колмогорова и А А Богатова

Анализ результатов расчета показывает, что при вытяжке с утонением высокопрочных материалов, поведение которых описывается энергетической теорией ползучести и повреждаемости, с увеличением угла конусности матри-

цы α и скорости перемещения пуансона V_n предельный коэффициент утонения m_{spr} увеличивается, т.е. ухудшаются условия утонения. Установлено, что изменение условий трения на контактной поверхности пуансона μ_{II} существенно влияет на предельный коэффициент утонения ($\mu_M = const$). С ростом коэффициента трения на пуансоне снижается предельное значение коэффициента утонения m_{spr} . Этот эффект проявляется существенно на малых углах конусности матрицы α .

Предельные возможности формоизменения вытяжки с утонением стенки цилиндрических деталей из материала, поведение которого подчиняется кинетической теории ползучести и повреждаемости, в режиме ползучести не зависят от скорости перемещения пуансона V_n . Увеличение угла конусности матрицы α сопровождается ростом предельного коэффициента утонения m_{spr} (для материалов, подчиняющихся энергетической теории ползучести и повреждаемости).

При ползуко-пластическом течении анизотропного материала с увеличением угла конусности матрицы α и снижением скорости перемещения пуансона V_n предельный коэффициент утонения m_{spr} возрастает (для материалов, подчиняющихся энергетической теории ползучести и повреждаемости). Рост коэффициента трения на пуансоне μ_{II} (при фиксированном коэффициенте трения на матрице μ_M) снижает предельное значение коэффициента утонения m_{spr} .

Четвертый раздел содержит результаты теоретических исследований процесса изотермической вытяжки с утонением стенки осесимметричной толстоственной цилиндрической заготовки через коническую матрицу с углом α в режиме медленного деформирования (ползучести). Приведены основные уравнения и необходимые соотношения для анализа напряженного и деформированного состояния, силовых режимов и предельных возможностей формоизменения исследуемой операции изотермической вытяжки [4, 5, 6].

Принимается, что материал заготовки жесткопластический, обладает цилиндрической анизотропией механических свойств. Упругими составляющими деформации пренебрегаем. Течение материала принимается осесимметричным. Анализ процесса вытяжки с утонением стенки реализуется в цилиндрической системе координат.

Схема к анализу вытяжки с утонением стенки приведена на рис. 3.

Допускается, что условия трения на контактной поверхности инструмента с заготовкой подчиняются закону Кулона. Течение материала принимается установившимся.

Компоненты тензора скоростей деформаций определяются через компоненты скоростей течения соотношениями

$$\xi_r = \frac{\partial V_r}{\partial r}, \quad \xi_\theta = \frac{V_r}{r}, \quad \xi_z = \frac{\partial V_z}{\partial z}, \quad 2\xi_{rz} = \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r}, \quad (15)$$

где V_r, V_z - компоненты скоростей течения, $\xi_r, \xi_\theta, \xi_z, \xi_{rz}$ - компоненты тензора скоростей деформаций,

$$\begin{aligned}
 V_z &= -V_0 \frac{[\rho + (l-z)tg\beta]^2 - \rho_{II}^2}{\rho^2 - \rho_{II}^2}, \\
 V_\rho &= -V_0 \frac{[\rho + (l-z)tg\beta]^2 - \rho_{II}^2}{\rho^2 - \rho_{II}^2} tg\beta, \\
 tg\beta &= \frac{tg\alpha(\rho - \rho_{II})}{s_0 - tg\alpha(l-z)} \quad (16)
 \end{aligned}$$

Условие несжимаемости материала позволяет установить связь между скоростью течения материала на входе в очаг деформации и выходе из очага деформации в виде

$$V_0 = V_n \frac{s_1(s_1 + 2\rho_{II})}{s_0(s_0 + 2\rho_{II})},$$

где V_n - скорость перемещения пуансона

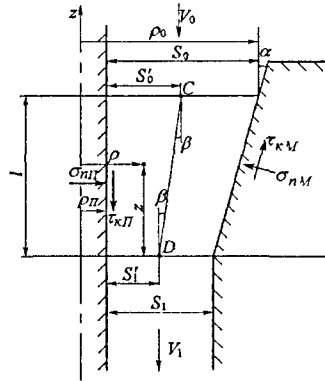


Рис 3 Схема к анализу вытяжки с утонением стенки

Выражение для вычисления эквивалентной скорости деформации, принимая во внимание условие несжимаемости $\xi_\rho = -\xi_z - \xi_\theta$, запишется так

$$\begin{aligned}
 \xi_e^c &= \sqrt{2(R_z + R_\theta + R_\theta R_z)} \times \\
 &\times \left\{ R_\theta^2 [(1+R)\xi_\theta + R_z \xi_z]^2 + R_\theta R_z [(1+R_\theta)\xi_z + R_\theta \xi_\theta]^2 + \right. \\
 &\left. + R_\theta (R_z \xi_z - R_\theta \xi_\theta)^2 + \frac{2\xi_{\rho z}^2 R_\theta^2 (1+R_\theta + R_z)}{R_{\rho z}} \right\}^{1/2} \\
 &[\sqrt{3}R_z^{1/2} R_\theta (1+R_\theta + R_z)], \quad (17)
 \end{aligned}$$

где $R_z = H/G$, $R_\theta = H/F$, $R_{\rho z} = M/F$ - коэффициенты анизотропии

Учитывая выражения для определения компонент скоростей течения (16), компоненты тензора скоростей деформаций определяются так

$$\begin{aligned}
 \xi_z^c &= \frac{\partial V_z}{\partial z} = 2V_0 \frac{s_0 tg\alpha [\rho s_0 - (l-z)tg\alpha \rho_{II}]}{(\rho + \rho_{II}) [s_0 - (l-z)tg\alpha]^3}, \\
 \xi_\theta^c &= \frac{V_\rho}{\rho} = -V_0 \frac{s_0 [s_0(\rho + \rho_{II}) - 2(l-z)\rho_{II}tg\alpha] (\rho - \rho_{II}) tg\alpha}{(\rho + \rho_{II}) \rho [s_0 - (l-z)tg\alpha]^3}, \\
 \xi_\rho^c &= -V_0 \frac{tg\alpha s_0 [s_0 \rho^2 + s_0 \rho_{II}^2 - 2(l-z)\rho_{II}tg\alpha]}{(\rho + \rho_{II}) [s_0 - (l-z)tg\alpha]^3 \rho}, \\
 \xi_{\rho z}^c &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_\rho}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial \rho} \right) = \frac{1}{2} V_0 \frac{U}{V},
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 U &= s_0 tg^2 \alpha (\rho^2 - \rho_{II}^2) [3\rho s_0 - 4(l-z)\rho_{II}tg\alpha + \rho_{II}s_0] - \\
 &- 2s_0 \rho_{II} (l-z)tg\alpha [s_0 - (l-z)tg\alpha]^2, \\
 V &= (\rho + \rho_{II})^2 [s_0 - (l-z)tg\alpha]^4
 \end{aligned}$$

Нормальные и касательные напряжения в очаге деформации определяются путем численного решения уравнений равновесия в цилиндрической системе координат

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_p}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{pz}}{\partial z} + \frac{\sigma_p - \sigma_\theta}{\rho} &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{z\rho}}{\partial \rho} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{z\rho}}{\rho} &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

совместно с уравнениями теории пластического течения анизотропного материала

$$\begin{aligned} \sigma_z - \sigma_\theta &= \frac{2 \sigma_{ecp}^c (R_\theta R_z + R_z + R_\theta) (\xi_z \xi_\theta - R_\theta \xi_\theta)}{3 \xi_{ecp}^c R_\theta R_z (R_z + 1 + R_\theta)}, \\ \sigma_\theta - \sigma_p &= \frac{2 \sigma_{ecp}^c (R_\theta R_z + R_z + R_\theta) (\xi_\theta - R_z \xi_\rho)}{3 \xi_{ecp}^c R_z (R_z + 1 + R_\theta)}, \\ \sigma_p - \sigma_z &= \frac{2 \sigma_{ecp}^c (R_\theta R_z + R_z + R_\theta) (R_\theta \xi_\rho - \xi_z)}{3 \xi_{ecp}^c R_\theta (R_z + 1 + R_\theta)}, \\ \tau_{pz} &= \frac{1 \sigma_{ecp}^c (R_\theta R_z + R_z + R_\theta) \xi_{pz}}{3 \xi_{ecp}^c R_\theta R_z} \end{aligned} \quad (19)$$

и уравненнем состояния без учета повреждаемости, описывающие поведение материала, подчиняющегося теории ползучести,

$$\xi_e = B(\sigma_e / \sigma_{e0})^n, \quad \sigma_e = \frac{\sigma_{e0} \xi_e^{1/n_1}}{B^{1/n_1}} \quad (20)$$

при граничных условиях, заданных в напряжениях
при $z = l$ $\sigma_z = \Delta \sigma_z$

Здесь $\sigma_p, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{pz}$ - нормальные и касательное напряжения, являющиеся функциями ρ и z , B, n_1 - константы материала, в зависящие от температуры испытаний, σ_{e0} - произвольно выбранная величина эквивалентного напряжения, ξ_{ecp} и σ_{ecp} - средние величины скорости деформации и эквивалентного напряжения в очаге деформации, $\Delta \sigma_z$ - величина приращения осевого напряжения связанное с изменением направления течения материала на входе в очаг деформации

В соответствии с выбранной кинематикой течения материала на входе в очаг деформации и выходе из него происходит резкое изменение направления течения от вертикального до наклонного к осевой под углом β на входе в очаг деформации и от наклонного к вертикальному на выходе из очага деформации, что связано с разрывом тангенциальной составляющей скорости течения. Это изменение направления течения учитывается путем коррекции осевого напряжения на границе очага деформации по методу баланса мощностей

$$\Delta \sigma_z = \frac{1}{2} \tau_{z\rho} \sin 2\beta \quad (21)$$

Величина накопленной эквивалентной деформации вдоль k - ой траектории определяется в очаге деформации по формуле

$$\varepsilon_{ek}^c = \sum_z \frac{\xi_{ek}^c \Delta z}{V_{zk}} + \sqrt{\frac{R_z + R_0 + R_0 R_z}{3 R_z R_{\rho z}}} \operatorname{tg} \beta_k \quad (22)$$

Если нужно найти накопленную эквивалентную деформацию в изделии после деформации, то следует к рассчитанной величине по формуле (22) добавить еще второй член этого выражения, т.е. учесть изменение направления течения материала на входе и выходе из очага деформации

Определение силы процесса вытяжки осуществляется следующим образом. Рассчитывается на выходе напряжение $\sigma_z(\rho)$ с учетом изменения направления течения материала на входе в очаг деформации и выходе из него. Находится составляющая силы P_{z1k} для преодоления трения на матрице

$$P_{z1k} = \pi \mu_M \sigma_{nMcp} (2\rho_{II} + s_0 + s_1) l$$

Величину напряжения σ_{nM} определим по формуле преобразования компонент напряжений при переходе от одной системы координат к другой

$$\sigma_{nM} = \sigma_\rho \cos^2 \alpha + \sigma_z \sin^2 \alpha - \tau_{\rho z} \sin 2\alpha$$

Сила, разгружающая стенку изделия, определяется по выражению

$$P_{z2k} = \pi \mu_{II} \sigma_{nIIcp} \rho_{II} l$$

Сила, передающаяся на стенку изделия, находится так

$$P_{cm} = 2\pi \int_{\rho_{II}}^{\rho_{II} + s_1} \sigma_z(\rho) \rho d\rho + P_{z1k}, \quad (23)$$

Величина силы операции вытяжки с утонением стенки вычисляется следующим образом

$$P = 2\pi \int_{\rho_{II}}^{\rho_{II} + s_1} \sigma_z(\rho) \rho d\rho + P_{z1k} + P_{z2k}, \quad (24)$$

где $\sigma_{nMcp} = \frac{1}{L} \int_0^L \sigma_{nM}(L) dL$, $L = \frac{l}{\cos \alpha}$, $\sigma_{\rho IIcp} = \frac{1}{l} \int_0^l \sigma_{\rho II}(l) dl$

Приведенные выше соотношения использованы для оценки напряженно-деформированного состояний, силовых режимов формообразования процесса вытяжки с утонением стенки толстостенных цилиндрических заготовок из анизотропных материалов

Относительные величины осевого напряжения $\bar{\sigma}_z$ и силы процесса \bar{P} определялись по формулам

$$\bar{\sigma}_z = \sigma_z / \sigma_{e0}, \quad \bar{P} = \frac{P_{cm}}{\pi(D_0 - s_0)s_0\sigma_{e0}}, \quad (25)$$

где $D_0 = 2\rho_0$

На рис. 4 приведены графические зависимости изменения относительных величин осевого напряжения $\bar{\sigma}_z$ и силы процесса \bar{P} от скорости перемещения пуансона V_n при вытяжке с утонением стенки полых цилиндрических заготовок из алюминиевого сплава АМг6 при температуре обработки $T = 450^\circ \text{C}$

Расчеты выполнены при следующих геометрических размерах заготовки $s_0 = 4$ мм, $D_0 = 40$ мм и различных углах конусности матрицы α

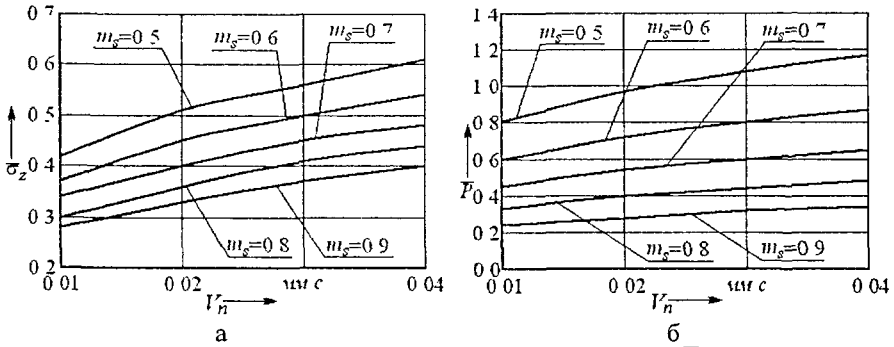


Рис 4 Графические зависимости изменения $\bar{\sigma}_z$ и \bar{P} от V_n
 $(\alpha = 18^\circ, \mu_M = 0,1, \mu_{II} = 0,2)$

Анализ графиков и результатов расчета показывает, что с увеличением угла конусности матрицы α и скорости перемещения пуансона V_n , уменьшением коэффициента утонения m_s и величины D_0/s_0 относительная величина осевого напряжения $\bar{\sigma}_z$ возрастает

Установлено, что существуют оптимальные углы конусности матрицы в пределах $12^\circ - 24^\circ$, соответствующие наименьшей величине силы, при коэффициентах утонения $m_s \geq 0,6$. При величинах коэффициентов утонения $m_s \leq 0,6$ увеличение угла конусности матрицы α приводит к уменьшению относительной силы \bar{P} . Величина оптимальных углов конусности матрицы α с уменьшением коэффициента утонения m_s смещается в сторону больших углов. Показано, что с увеличением скорости перемещения пуансона V_n величина относительной силы \bar{P} возрастает (рис 4).

Показано, что изменение условий трения на контактной поверхности пуансона и матрицы существенно влияет на относительную силу \bar{P} . С ростом коэффициента трения на матрице μ_M (при $\mu_M = \mu_{II}$) величина \bar{P} возрастает. Этот эффект проявляется существенно при малых величинах коэффициента утонения m_s . С увеличением коэффициента утонения m_s относительная величина силы \bar{P} уменьшается. Относительная величина D_0/s_0 не оказывает существенного влияния на \bar{P} .

Установлено, что с увеличением относительной величины $\bar{s} = s'_1/s_1$ (рис 3) и уменьшением коэффициента утонения m_s накопленные величины эквивалентной деформации ϵ_e и микрповреждений ω_e на выходе из очага пластической деформации увеличиваются. Максимальные величины ϵ_e и ω_e соответствуют траектории течения материала по поверхности матрицы.

Предельные возможности формоизменения при вытяжке с утонением толстостенных цилиндрических заготовок определялись на базе феноменологических моделей разрушения (14).

Графические зависимости изменения предельного коэффициента утонения m_{snp} , вычисленного по критерию разрушения (14), от угла конусности матрицы α для алюминиевого сплава АМг6 приведены на рис 5.

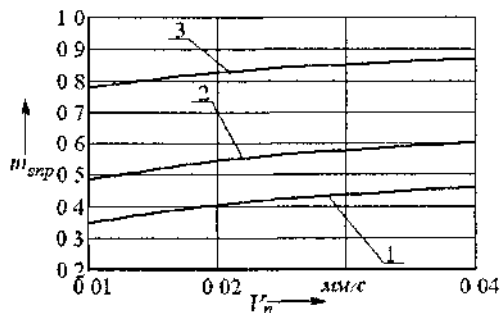


Рис 5 Графические зависимости изменения m_{snp} от V_n при вытяжке с утонением стенки алюминиевого сплава АМГ6 ($\alpha = 18^\circ$, $\mu_M = 0,1$, $\mu_D = 0,2$)

Здесь кривая 1 соответствует величине m_{snp} , определенной по величине накопленных микрповреждений при $\chi = 1$, кривая 2 — при $\chi = 0,65$, кривая 3 — при $\chi = 0,25$. Положения кривых 1 — 3 определяют возможности деформирования заготовки в зависимости от технических требований на изделие. Анализ графиков и результатов расчета показывает, что с увеличением угла конусности матрицы α и уменьшением относительной величины D_0/s_0 предельный коэффициент утонения m_{snp} возрастает. Установлено, что с увеличением скорости перемещения пуансона V_n предельные коэффициенты утонения m_{snp} возрастают (рис 5).

Предельные возможности формоизменения вытяжки с утонением стенки цилиндрических деталей из материала, поведение которого подчиняется кинетической теории ползучести и повреждаемости (например, титановый сплав ВТ6), не зависят от скорости перемещения пуансона V_n .

В пятом разделе диссертационной работы изложены результаты выполненных экспериментальных исследований изотермической вытяжки с утонением стенки тонкостенных и толстостенных цилиндрических деталей из высокопрочных материалов в режиме ползучести, а также результаты практической реализации теоретических и экспериментальных исследований.

Экспериментальные работы по изотермической вытяжке цилиндрических деталей проводились на алюминиевом АМГ6 и титановом ВТ6 сплавах. Использовались графито-меловые смазки с добавкой минерального масла. Фиксировалась сила операции при различных скоростях перемещения пуансона. Для изготовления цилиндрических заготовок использовалась комбинированная вытяжка листового материала толщиной $s_0 = 5$ мм. Температура обработки для заготовок из титанового сплава ВТ6 — 930°C , а для алюминиевого сплава АМГ6 — 450°C . Сравнение теоретических расчетов и экспериментальных данных по силовым режимам изотермической вытяжки с утонением стенки тонкостенных и толстостенных заготовок указывает на удовлетворительное их согласование (расхождение не превышает 10 %).

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований созданы рекомендации по расчету технологических параметров изотермической вытяжки с утонением стенки цилиндрических деталей в режиме ползу-

чести, которые использованы при разработке нового технологического процесса изготовления цилиндрических заготовок детали «Патрубок газоведа» из титанового сплава ВТ6. Технологический процесс принят к внедрению в опытно-производстве на ФГУП «ГНПП «Сплав». Технико-экономическая эффективность описанного процесса связана с сокращением трудоемкости изготовления деталей на 20 % (уменьшение объема механической обработки, устранение сварки), уменьшением металлоемкости заготовок на 10–15 % за счет сокращения величины припусков, повышением качества за счет геометрической точности и формирования волокнистой структуры.

Отдельные результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе на кафедре «Механика пластического формоизменения» Тульского государственного университета.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная научно-техническая задача, имеющая важное народнохозяйственное значение в ракетно-космической, оборонной, авиационной, судостроительной, транспортной и других отраслях машиностроения, состоящая в разработке теории и технологии изготовления цилиндрических деталей из анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести с целью интенсификации технологических процессов изотермической вытяжки с утонением цилиндрических изделий из высокопрочных анизотропных упрочняющихся материалов, обладающих цилиндрической анизотропией механических свойств, обеспечивающих заданное качество их изготовления, уменьшение трудоемкости и металлоемкости деталей, сокращение сроков подготовки производства новых изделий.

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

1 Разработана математическая модель изотермической вытяжки с утонением стенки тонкостенных и толстостенных цилиндрических деталей из анизотропных материалов. Получены основные уравнения и необходимые соотношения для анализа кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояния, силовых режимов и предельных возможностей формоизменения изотермической осесимметричной вытяжки с утонением стенки тонкостенных и толстостенных цилиндрических деталей из анизотропных материалов в режиме ползучести. Разработаны алгоритм расчета кинематики течения материала, напряженного и деформированного состояний, силовых режимов и предельных возможностей формообразования, а также программное обеспечение для ЭВМ.

2 Выполнены теоретические исследования изотермической вытяжки с утонением цилиндрических деталей при вязком и вязкопластическом течении анизотропного материала. Процессы изотермической вытяжки рассмотрены для групп материалов, для которых справедливы уравнения энергетической и кинетической теорий кратковременной ползучести и повреждаемости.

3 Установлены закономерности изменения напряженного и деформированного состояния заготовки, силовых режимов и предельных возможностей исследуемых технологических процессов вытяжки с утонением стенки, связанных с допустимой величиной накопленных микрповреждений, от технологических параметров, угла конусности матрицы, скорости перемещения пуансона, условий трения на рабочем инструменте и заготовке и исходной анизотропии механических свойств материала заготовки.

4 Показано, что с увеличением угла конусности матрицы α , уменьшением коэффициента утонения m_s и величины D_0/s_0 относительная величина осевого напряжения $\bar{\sigma}_z$ возрастает. Установлено, что с увеличением скорости

пуансона V_n от 0,01 мм/с до 0,04 мм/с относительная величина осевого напряжения $\bar{\sigma}_z$ при вытяжке с утонением цилиндрических заготовок из алюминиевого сплава АМг6 возрастает на 40 %, а при вытяжке с утонением титанового сплава ВТ6 увеличение V_n от 0,005 мм/с до 0,02 мм/с приводит к росту относительного осевого напряжения $\bar{\sigma}_z$ в 2 раза Выявлено существование оптимальных углов конусности матрицы в пределах 12...24°, соответствующие наименьшей величине силы, при коэффициентах утонения $m_s \geq 0,6$ При величинах коэффициентов утонения $m_s \leq 0,6$ увеличение угла конусности матрицы α приводит к уменьшению относительной силы \bar{P} Величина оптимальных углов конусности матрицы α с уменьшением коэффициента утонения m_s смещается в сторону больших углов Величина силы существенно зависит от скорости перемещения пуансона и коэффициента утонения Показано, что с увеличением скорости перемещения пуансона V_n величина относительной силы \bar{P} возрастает Интенсивность роста увеличивается с уменьшением коэффициента утонения Изменение условий трения на контактной поверхности пуансона и матрицы существенно влияет на относительную силу \bar{P} С ростом коэффициента трения на матрице μ_M (при $\mu_M = \mu_{II}$) величина \bar{P} возрастает Этот эффект проявляется существенно при малых величинах коэффициента утонения m_s С увеличением коэффициента утонения m_s относительная величина силы \bar{P} уменьшается Установлено, что относительная величина D_0/s_0 не оказывает существенного влияния на \bar{P}

5 Количественно определены предельные возможности формообразования при вытяжке с утонением стенки анизотропных цилиндрических заготовок, связанные с допустимой величиной накопленных микроповреждений Показано, что при вытяжке с утонением высокопрочных материалов, поведение которых описывается энергетической теорией ползучести и повреждаемости, с увеличением угла конусности матрицы α и скорости перемещения пуансона V_n предельный коэффициент утонения m_{snp} увеличивается, т.е. ухудшаются условия утонения Результаты расчетов показывают, что предельные возможности формоизменения вытяжки с утонением стенки цилиндрических деталей из материала, поведение которого подчиняется кинетической теории ползучести и повреждаемости, в режиме ползучести не зависят от скорости перемещения пуансона Установлено, что с увеличением угла конусности матрицы α и скорости перемещения пуансона V_n предельный коэффициент утонения m_{snp} возрастает Рост коэффициента трения на пуансоне μ_{II} (при фиксированном коэффициенте трения на матрице μ_M) снижает предельное значение коэффициента утонения m_{snp}

6 Оценено влияние анизотропии механических свойств на силовые режимы и предельные возможности формообразования изотермической вытяжки с утонением стенки в режиме ползучести Установлено, что величины относительного напряжения и силы увеличиваются с ростом коэффициента анизотропии R и уменьшением коэффициента утонения Увеличение коэффициента нормальной анизотропии R от 0,2 до 2 приводит к росту относительных величин осевого напряжения $\bar{\sigma}_z$ на 40 %, а силы \bar{P} - на 25 %

7 Проведены экспериментальные работы по исследованиям силовых режимов изотермической вытяжки с утонением стенки цилиндрических деталей из алюминиевого АМг6 и титанового ВТ6 сплавов Сравнение теоретических

расчетов и экспериментальных данных по силовым режимам операции изотермической вытяжки с утонением стенки указывает на удовлетворительное их согласование (расхождение не превышает 10 %)

8 На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны рекомендации по расчету технологических параметров изотермической глубокой вытяжкой цилиндрических деталей в режиме ползучести, которые использованы при разработке технологического процесса изготовления цилиндрической заготовки детали «Патрубок газоведа» из титанового сплава ВТ6 Отдельные результаты диссертационной работы использованы в учебном процессе

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1 Пилипенко О В, Платонов В И Вытяжка с утонением стенки анизотропного материала в режиме ползучести // Известия ТулГУ Серия Актуальные вопросы механики - Тула ТулГУ, 2004 – Том 1 - Вып 1 – С 168 – 177

2 Яковлев С С Пилипенко О В, Платонов В И Математическая модель изотермической вытяжки с утонением анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести // Известия ТулГУ Серия Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением – Тула Изд-во ТулГУ, 2005 – Вып 1 – С 30 – 38

3 Пилипенко О В, Платонов В И, Агеева А И Предельные возможности формоизменения вытяжки с утонением анизотропных материалов в режиме кратковременной ползучести // Известия ТулГУ Серия Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением – 2005 – Вып 2 – С 141-147

4 Вытяжка с утонением стенки толстостенной цилиндрической заготовки из анизотропного материала в режиме ползучести / С П Яковлев, В И Платонов, О В Пилипенко, Ю Г Нечепуренко // Известия ТулГУ Серия Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением - Тула Изд-во ТулГУ, 2006 – Вып 2 – С 13 – 26

5 Пилипенко О В, Платонов В И Математическая модель процесса вытяжки с утонением стенки толстостенных цилиндрических заготовок из анизотропных материалов в режиме ползучести // Известия ТулГУ Серия Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением - Тула Изд-во ТулГУ, 2006 – Вып 3 – С 180-187

6 Платонов В И Прогнозирование разрушения анизотропного материала при осесимметричной вытяжке с утонением в режиме ползучести // Известия ТулГУ Серия Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением - Тула Изд-во ТулГУ, 2006 – Вып 3 – С 240-247

7 Платонов В И, Агеева А И Технологические параметры изотермической вытяжки с утонением стенки анизотропного материала // Лучшие научные работы студентов и аспирантов технологического факультета – Тула Изд-во ТулГУ, 2005 – С.117-123

8 Платонов В И, Логвинова С В Влияние технологических параметров изотермической вытяжки анизотропного материала на предельные возможности формоизменения // XXIX Гагаринские чтения Международная молодежная научная конференция Тезисы докладов - М МАТИ, 2003 – Том 1 – С 101-102

9 Платонов В И, Агеева А И Технологические параметры изотермической вытяжки анизотропного материала в режиме ползучести // Идея моло-

дых – Новой России Сб тез док I-й Всероссийск научно-техн конф студ и асп 24 – 26 марта 2004 г - Тула Изд-во ТулГУ, 2004 – С 47-48

10 Изотермическая вытяжка анизотропного материала в режиме ползучести / В А Андрейченко, А В Черняев, С В Логвинова, В И Платонов // Сборник тезисов II международной научно-технической конференции «Механика пластического формоизменения Технологии и оборудование обработки материалов давлением» – Тула ТулГУ, 2004 – С 38-40

11 Черняев А В, Агеева А И, Платонов В И Технологические параметры изотермической вытяжки с утонением стенки анизотропного материала в режиме ползучести // Сборник тезисов II международной научно-технической конференции «Механика пластического формоизменения Технологии и оборудование обработки материалов давлением» – Тула ТулГУ, 2004 – С 40-42

12 Платонов В И, Леонова Е В Оценка механических свойств титанового сплава ВТ23 при различных температурно-скоростных режимах деформирования // XXXIII Гагаринские чтения Международная молодежная научная конференция Тезисы докладов - М МАТИ, 2007. – Том 1 – С 254-255

13 Пилипенко О В, Платонов В И Технологические процессы изотермической глубокой вытяжки цилиндрических деталей // Материалы международной научно-технической конференции «Образование, наука, производство и управление» 23 – 24 ноября 2006 г – Старый Оскол Старооскольский технологический институт, 2007 – С 30-32

Подписано в печать ____ .04.2007.

Формат бумаги 60×84 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,1. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ 042 .

Тульский государственный университет.

300600, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ.

300600, г. Тула, ул. Болдина, 151