

НАУКОЕМКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ИЗ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

HIGH TECHNOLOGIES OF PLASTIC DEFORMATION OF RESPONSIBLE DETAILS OF MECHANICAL ENGINEERING FROM ANISOTROPIC MATERIALS

С.С. Яковлев

ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет», г. Тула, пр. Ленина, 92, mpf-tula@rambler.ru

Abstract

Scientific justification and innovative progressive technological processes and design solutions of production of details and the knots of products of a special purpose providing increase efficiency of their production are given, at various thermomechanical modes of deformation.

Материалы, подвергаемые процессам пластического деформирования, как правило, обладают анизотропией механических свойств. Анизотропия проката является следствием образования текстуры предпочтительной ориентировки кристаллографических осей в зернах обрабатываемого материала, характера распределения и ориентировки фаз дефектов металла и остаточных напряжений, возникающих вследствие неоднородности пластической деформации при прокате [1-5]. Анизотропия механических свойств металлов проявляется в различии пределов текучести $\sigma_{0,2}$, временного сопротивления разрыву σ_{δ} , относительного удлинения δ и других параметров в разных направлениях плоскости листа. Анизотропия механических свойств может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивое протекание технологических процессов пластического формообразования при различных термомеханических режимах [4-12].

Теоретические работы по учету анизотропии и неоднородности механических свойств материалов в процессах пластического формоизменения, разработке математических моделей формообразования при различных температурно-скоростных режимах деформирования ведутся в Тульском государственном университете с 1965 года. За это время опубликованы 20 монографий и более 400 научных статей, получены 20 патентов и авторских свидетельств на изобретения, защищены 35 докторских и более 100 кандидатских диссертаций. Результаты научных работ в указанном направлении отмечены рядом специальных премий: Государственная премия РФ (1998 г.), Ленинского комсомола (1981 г.), Совета министров СССР (1982 г.),

$$2f(\sigma_{ij}) \equiv F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (1)$$

и ассоциированный закон пластического течения

$$d\epsilon_{ij} = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (2)$$

где F, G, H, L, M, N - параметры, характеризующие текущее состояние анизотропии; σ_{ij} - компоненты тензора напряжений в главных осях

Минвуза СССР (1986 г.), премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники (2006 г.), премии Правительства Российской Федерации в области образования (2011 г.), премий им С.И. Мосина (1976, 2003, 2006, 2009 и 2010 г.г.), премии им. А.Н. Косыгина (2005 г.), премии Тульской области в сфере науки и техники им. Б.С. Стечкина (2005 г.).

Анализ процессов пластического деформирования анизотропных металлов давлением в настоящее время осуществляется в рамках идеально пластического или изотропно упрочняющегося материала. Однако указанные предположения не позволяют оценить развивающуюся анизотропию механических свойств материала заготовки в процессе пластической обработки, о чем свидетельствует анализ экспериментальных исследований. Наибольшее распространение при анализе процессов пластического деформирования нашла теория течения анизотропного материала Мизеса - Хилла, которая также не позволяет объяснить изменение анизотропии механических свойств материала заготовки.

Предложен вариант теории пластичности начально ортотропного тела с анизотропным упрочнением, который основан на условии текучести Мизеса-Хилла, неоднородном расширении поверхности нагружения без перемещения в шестимерном пространстве напряжений, связанном с главными осями анизотропии, и предполагает справедливость ассоциированного закона течения [8, 13, 14].

Материал принимается несжимаемым, жесткопластическим, ортотропным, для которого справедливы условие текучести Мизеса - Хилла [4, 9]

анизотропии; $d\epsilon_{ij}$ - компоненты приращения тензора деформаций; $d\lambda$ - коэффициент пропорциональности. Здесь x, y, z - главные оси анизотропии.

Параметры анизотропии F, G, H, L, M, N связаны с величинами сопротивления материала пластическому деформированию следующими соотношениями:

$$2F = \frac{1}{\sigma_{sy}^2} + \frac{1}{\sigma_{sz}^2} - \frac{1}{\sigma_{sx}^2}; 2G = \frac{1}{\sigma_{sz}^2} + \frac{1}{\sigma_{sx}^2} - \frac{1}{\sigma_{sy}^2}; 2H = \frac{1}{\sigma_{sx}^2} + \frac{1}{\sigma_{sy}^2} - \frac{1}{\sigma_{sz}^2};$$

$$2L = \frac{1}{\tau_{sy}^2}; 2M = \frac{1}{\tau_{sz}^2}; 2N = \frac{1}{\tau_{sx}^2},$$

где σ_{sx} , σ_{sy} и σ_{sz} - величины сопротивления материала пластическому деформированию при растяжении в главных осях анизотропии; τ_{sxy} , τ_{syx} , τ_{syz} , τ_{szy} - величины сопротивления материала

пластическому деформированию при сдвиге по отношению к главным осям анизотропии.

Используются понятия интенсивности напряжений σ_i и приращения интенсивности деформации $d\varepsilon_i$, которые определяются по выражениям:

$$\sigma_i = \sqrt{3/[2(F+G+H)]} \left[F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2 + 2N\tau_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$и \quad d\varepsilon_i = \sqrt{\frac{2}{3}}(F+G+H) \left[F \left(\frac{Gd\varepsilon_y - Hd\varepsilon_z}{FG+GH+HF} \right)^2 + G \left(\frac{Hd\varepsilon_z - Fd\varepsilon_x}{FG+GH+HF} \right)^2 + H \left(\frac{Fd\varepsilon_x - Gd\varepsilon_y}{FG+GH+HF} \right)^2 + \frac{2d\gamma_{yz}^2}{L} + \frac{2d\gamma_{zx}^2}{M} + \frac{2d\gamma_{xy}^2}{N} \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Ряд процессов пластического деформирования анизотропных материалов реализуются в условиях близких к плоскому напряженному или плоскому деформированному состояниям. Для анализа этих процессов необходимо использовать частные выражения условий текучести [4, 7, 13, 14]. Анизотропию механических свойств в условиях плоского напряженного и плоского деформированного состояний принято характеризовать коэффициентами

анизотропии R_β и характеристикой анизотропии C соответственно.

Величины коэффициентов анизотропии листовых материалов R_x , R_{45} и R_y могут быть вычислены через параметры анизотропии F, G, H и N следующим образом:

$$R_x = H/G; R_y = H/F; R_{45} = -\frac{1}{2} + (N/F)(1 + G/F). \quad (6)$$

Изотропное упрочнение - простейшая модель упрочняющегося тела. Она реализуется в предположении, что поверхность нагружения расширяется подобно начальной поверхности текучести. В этом случае сопротивление материала пластическому деформированию растет в зависимости от одного параметра и состояние анизотропии механических свойств не изменяется.

Для учета анизотропного упрочнения в процессах пластического деформирования, предложена математическая модель анизотропного упрочнения ортотропного материала. Допускается, что поверхность текучести не перемещается в пространстве напряжений. В качестве параметров упрочнения используются величина интенсивности деформации ε_i и компоненты тензора деформаций ε_{ij} в главных осях анизотропии x , y и z :

$$\sigma_{sii} = \left\{ \sigma_{0,2ii} + A_{ii}(\varepsilon_i)^{n_{ii}} \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_{ii}}{\varepsilon_i} \right)^2 \right]^{m_{ii}} \right\} (1 - \omega_e)^k;$$

$$\tau_{sij} = \left[\tau_{0,2ij} + A_{ij}(\varepsilon_i)^{n_{ij}} \right] (1 - \omega_e)^k,$$

где A_{ii} , A_{ij} , n_{ii} , n_{ij} , m_{ii} , k - константы материала; $\sigma_{0,2ii}$ и $\tau_{0,2ij}$ - условные пределы текучести материала в направлениях главных осей анизотропии X , Y , Z и при сдвиге в главных осях анизотропии; ε_i - величина интенсивности деформаций; ε_{ij} - компоненты тензора деформаций; ω_e - повреждаемость материала при пластическом формоизменении по деформационной модели разрушения.

Предельные возможности формоизменения при холодной штамповке обычно определяются по величине максимального растягивающего напряжения [15-17], а также по допустимой величине накопленных микроповреждений:

$$\omega_e = \int_0^{\varepsilon_i} \frac{d\varepsilon_i}{\varepsilon_{i np} (1 - \omega_e)^k} < 1. \quad (8)$$

$$\varepsilon_{i np} = A \exp \left(B \frac{\sigma}{\sigma_i} \right) (a_0 + a_1 \cos \alpha + a_2 \cos \beta + a_3 \cos \gamma), \quad (9)$$

где A , B - константы материала, определяемые в зависимости от рода материала согласно работам В.Л. Колмогорова и А.А. Богатова [18-21]; a_0 , a_1 , a_2 и a_3 - константы материала, зависящие от анизотропии механических свойств материала заготовки и определяемые из опытов на растяжение образцов в условиях плоского напряженного и плоского деформированного состояний.

Для деталей ответственного назначения предельные возможности формоизменения могут быть ограничены различными видами потерей устойчивости заготовки. Предложены критерии шейкообразования анизотропного упрочняющегося материала при плоском напряженном состоянии из условия положительности добавочных нагрузок; критерий потери устойчивости трубной заготовки в виде образования складок на основе статического критерия устойчивости, а также условия потери устойчивости кольцевой заготовки по критерию минимума полной потенциальной энергии и конической оболочки в виде образования гофров на основе энергетического метода [6, 8, 13, 14].

Для теоретических исследований процессов пластического формоизменения необходимо иметь информацию о механических свойствах исходного материала. С этой целью разработана методика и выполнены экспериментальные исследования характеристик анизотропии механических свойств, констант кривых анизотропного упрочнения и разрушения ряда листовых материалов, которые приведены в работах [4, 7, 8, 13, 14].

$$2f(\sigma_{ij}) \equiv H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + 2N\tau_{xy}^2 + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{zx}^2, \quad (10)$$

который совпадает с условием перехода материала из вязкого состояния в вязкопластическое, когда

Здесь ω_e - повреждаемость материала при пластическом формоизменении по деформационной модели разрушения; k - константа материала; $\varepsilon_{i np} = \varepsilon_{i np}(\sigma/\sigma_i, \alpha, \beta, \gamma)$;

$\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ - среднее напряжение;

σ_1 , σ_2 и σ_3 - главные напряжения; σ_i - интенсивность напряжения; α , β , γ - углы между первой главной осью напряжений и главными осями анизотропии X , Y , Z .

Этот критерий разрушения является обобщением известных критериев на случай анизотропного материала. Учитывается ускорение процесса повреждаемости под влиянием уже накопленных в материале повреждений. Интегрирование в выражении (8) ведется вдоль траектории рассматриваемых элементарных объемов.

В дальнейшем принимается

При анализе процессов холодной штамповки необходимо к указанным выше соотношениям присоединить уравнения равновесия, соотношения Коши, условие несжимаемости материала и анализировать полученную систему уравнений численно с учетом граничных условий в напряжениях и скоростях. Приведенные выше соотношения могут быть использованы для анализа процессов пластического деформирования анизотропных материалов.

Совершенствование конструкций изделий ответственного назначения определяет применение высокопрочных материалов и изготовление деталей и узлов со специальными, зависящими от условий эксплуатации характеристиками. К числу наиболее перспективных и принципиально новых технологических процессов, направленных на совершенствование современного производства, относится медленное горячее формоизменение [9, 10, 22-26].

Предложено теоретический анализ процессов медленного горячего деформирования анизотропных материалов выполнять в рамках теории кратковременной ползучести без учета упругих составляющих деформации. Под кратковременной ползучестью понимается медленное деформирование в условиях вязкого или вязкопластического течения материала с продолжительностью деформирования от нескольких минут до нескольких часов.

Вводится потенциал скоростей деформации анизотропного тела при кратковременной ползучести в виде:

$$2f(\sigma_{ij}) = 1, \text{ где } H, F, G, N, L, M - \text{ па-}$$

параметры анизотропии при кратковременной ползучести. В этом случае компоненты скоростей деформации ξ_{ij} определяются в соответствии с ассоциированным законом течения [9, 10, 22-26].

При вязком и вязкопластическом течениях материала вводятся понятия эквивалентного напряжения σ_e и эквивалентной скорости деформации ξ_e при формоизменении в условиях кратковременной ползучести по аналогии с работами Р. Хилла и Н.Н. Малинина [9, 10, 22-26].

$$\xi_e^c = \frac{B(\sigma_e/\sigma_{e0})^n}{(1-\omega_A^c)^m}; \quad \dot{\omega}_A^c = \frac{\sigma_e \xi_e^c}{A_{np}^c}, \quad (11)$$

а применительно к группе материалов, подчиняющихся кинетическим уравнениям ползучести и повреждаемости, так

$$\xi_e^c = B \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{e0}} \right)^n \frac{1}{(1-\omega_e^c)^m}; \quad \dot{\omega}_e^c = \frac{\xi_e^c}{\varepsilon_{e np}^c}, \quad (12)$$

а если величина σ_e больше значения σ_{e0} , то будет осуществляться процесс деформирования в условиях вязкопластического течения.

Считаем, что если величина эквивалентного напряжения σ_e меньше некоторой величины σ_{e0} , соответствующей эквивалентной степени деформации ε_{e0} при эквивалентной скорости деформации ξ_{e0} , то процесс деформирования будет протекать в условиях вязкого течения материала и уравнения состояния с учетом повреждаемости, описывающие поведение материала, подчиняющегося энергетической теории ползучести и повреждаемости, могут быть записаны в виде [11]:

При вязкопластическом течении материала ($\sigma_e > \sigma_{e0}$) уравнения состояния имеют вид

$$\sigma_e = \sigma_{e0} \left(\frac{\varepsilon_e^{cp}}{\varepsilon_{e0}^{cp}} \right)^d \left(\frac{\xi_e^{cp}}{\xi_{e0}^{cp}} \right)^k (1-\omega_A^{cp})^r; \quad \dot{\omega}_A^{cp} = \frac{\sigma_e \xi_e^{cp}}{A_{np}^{cp}}, \quad (13)$$

если поведение материала описывается энергетической теорией нелинейного вязкопластического течения и разрушения, и

$$\sigma_e = \sigma_{e0} \left(\frac{\varepsilon_e^{cp}}{\varepsilon_{e0}^{cp}} \right)^d \left(\frac{\xi_e^{cp}}{\xi_{e0}^{cp}} \right)^k (1-\omega_e^{cp})^r; \quad \dot{\omega}_e^{cp} = \frac{\xi_e^{cp}}{\varepsilon_{e np}^{cp}}, \quad (14)$$

если поведение материала описывается кинетической теорией нелинейного вязкопластического течения и разрушения.

Здесь B, n, m, k, d, r - константы материала, зависящие от температуры испытаний; ε_e^{cp} и ε_e^c - величины эквивалентной деформации при вязкопластическом и вязком течении материала; $A_{np}^c, A_{np}^{cp}, \varepsilon_{e np}^c$ и $\varepsilon_{e np}^{cp}$ - удельная работа разрушения и предельная эквивалентная деформация при вязком и вязкопластическом течениях материала; $\omega_e^{cp}, \omega_e^c$ и $\omega_A^{cp}, \omega_A^c$ - повреждаемость материала при вязкопластической и вязкой деформации по деформационной и энергетической моделям разрушения соответственно.

Величину σ_{e0} , разделяющую вязкое и вязкопластическое течение, назначаем в зависимости от механических свойств материала при заданной температуре деформирования, чувствительности материала к деформационному упрочнению при соответствующей скорости деформации ξ_{e0} .

Заметим, что в зависимости от температурно-скоростных условий деформирования, поведение материала может описываться уравнениями состояния (11) и (13) или (12) и (14) соответственно.

Введение повреждаемости в определяющие соотношения кратковременной ползучести усложняет задачу анализа напряженного и деформированного состояний и требует одновременного расчета как компонент напряжений, скоростей течения и деформаций, эквивалентной деформации или удельной работы деформации, так и повреждаемо-

сти в областях вязкопластической и вязкой деформации, однако позволяет получить более реальную картину формоизменения.

Предельные возможности формоизменения в процессах обработки металлов давлением, протекающих при различных температурно-скоростных режимах деформирования, часто оцениваются на базе феноменологических моделей разрушения [9, 22-26].

Предлагается условие деформируемости материала при вязкопластическом течении без разрушения записать в виде:

$$\omega_e^{cp} = \int_0^t \frac{\xi_e^{cp} dt}{\varepsilon_{enp}^{cp}} < 1, \quad (15)$$

а при вязком течении - в виде

$$\omega_e^c = \int_0^t \frac{\xi_e^c dt}{\varepsilon_{enp}^c} < 1, \quad (16)$$

если справедлив деформационный критерий разрушения, и в виде

$$\varepsilon_{enp}^{cp} = C \exp \left(A_1 \frac{\sigma}{\sigma_e} + A_2 \frac{\xi_e^{cp}}{\xi_{e0}^{cp}} \right) \times (a_0 + a_1 \cos \alpha + a_2 \cos \beta + a_3 \cos \gamma); \quad (19)$$

$$\varepsilon_{enp}^c = D(b_0 + b_1 \cos \alpha + b_2 \cos \beta + b_3 \cos \gamma), \quad (20)$$

где $C, A_1, A_2; a_0, a_1, a_2, a_3$ и D, b_0, b_1, b_2, b_3 - экспериментальные константы материала; $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ - среднее напряжение; σ_1, σ_2 и σ_3 - главные напряжения; α, β, γ - углы ориентации первой главной оси напряжений σ_1 относительно главных осей анизотропии X, Y и Z соответственно.

При рассмотрении критерия разрушения в энергетической постановке предельная величина удельной работы разрушения при вязкопластической и вязкой деформации может быть вычислена по аналогичным формулам с заменой буквенных коэффициентов C, A_1, A_2, D, a_i, b_i на соответствующие им коэффициенты $C', A_1', A_2', B', D', a_i'$ и b_i' , а ε_{enp}^{cp} и ε_{enp}^c на A_{np}^{cp} и A_{np}^c .

Константы материала, входящие в уравнения состояния (11)-(14) и в выражения для определения предельной эквивалентной деформации (19) и (20), или предельной величины удельной работы разрушения предложено определять путем обработки результатов экспериментальных исследований по растяжению стандартных плоских образцов, вырезанных в пределах одного листа под углами 0° ,

$$\omega_A^{cp} = \int_0^t \frac{\sigma_e \xi_e^{cp} dt}{A_{np}^{cp}} < 1 \quad (17)$$

и

$$\omega_A^c = \int_0^t \frac{\sigma_e \xi_e^c dt}{A_{np}^c} < 1. \quad (18)$$

если справедлив энергетический критерий разрушения.

Здесь $\omega_e^{cp}, \omega_e^c$ и $\omega_A^{cp}, \omega_A^c$ - повреждаемость материала при вязкопластической и вязкой деформации по деформационной и энергетической моделям разрушения соответственно.

При справедливости деформационного критерия деформируемости выражения для определения предельной эквивалентной деформации при

вязкопластическом ε_{enp}^{cp} и вязком ε_{enp}^c течениях материала можно записать в следующем виде:

45° и 90° к направлению прокатки, до разрушения в условиях вязкого и вязкопластического течения материала.

При изготовлении ряда изделий ответственного назначения из листового материала по условиям эксплуатации не допускается локализация деформации, которая проявляется в образовании местного утонения. Поэтому степень формоизменения, при которой начинается шейкообразование, в этом случае может считаться предельной. На основе постулата Друкера для реономных сред предложены критерии локальной потери устойчивости анизотропного материала при различных схемах напряженного и деформированного состояний заготовки в режиме кратковременной ползучести [22].

Аналогичным образом, как и для случая пластического деформирования, предложены условия устойчивости трубной и кольцевой заготовок из анизотропного материала в виде образования складок и гофр при кратковременной ползучести [22, 23].

Для теоретических исследований процессов медленного горячего деформирования необходимо иметь информацию о механических свойствах исходного материала. Разработана методика и выполнены экспериментальные исследования характеристик анизотропии механических свойств, констант уравнений состояний и разрушения ряда высокопрочных материалов при вязком и вязкопластиче-

ском течении, которые приведены в работах [9, 11, 22, 23].

На основе полученных соотношений разработаны математические модели изотермической пневмоформовки куполообразных оболочек, элементов стрингерных конструкций цилиндрического, прямоугольного и трапецевидного профиля, пневмоформовки мембраны в матрицу прямоугольного и квадратного поперечного сечений, применительно к изготовлению многослойных листовых конструкций летательных аппаратов [11, 22, 25].

Предложены математические модели деформирования листовых и трубных заготовок жестким инструментом: комбинированной вытяжки, вытяжки без утонения и с утонением стенки, обжима и раздачи трубных заготовок, многооперационной и реверсивной вытяжки, вытяжки с утонением двухслойных материалов, прямого, обратного и комбинированного выдавливания, вытяжки коробчатых деталей, ротационной вытяжки осесимметричных деталей из анизотропных листовых и трубных за-

готовок при различных температурно-скоростных режимах обработки [11, 12, 23].

Выявлено влияние анизотропии механических свойств материала, технологических параметров, геометрических характеристик заготовки и инструмента, законов нагружения во времени на напряженное и деформированное состояние заготовки, силовые режимы и предельные возможности формообразования, оцененные по приведенным выше критериям деформируемости.

Показано, что анизотропия механических свойств оказывает существенное влияние на напряженное состояние и силовые режимы (до 40 %), предельные возможности формообразования (до 50 %), а также на устойчивое протекание технологических процессов деформирования [8, 13, 14, 22-27].

Разработаны элементы теории фестонообразования при вытяжке цилиндрических и коробчатых деталей, которые позволили дать рекомендации по построению профиля заготовки для вытяжки цилиндрических и коробчатых деталей без фестонов (рис. 1 и 2).

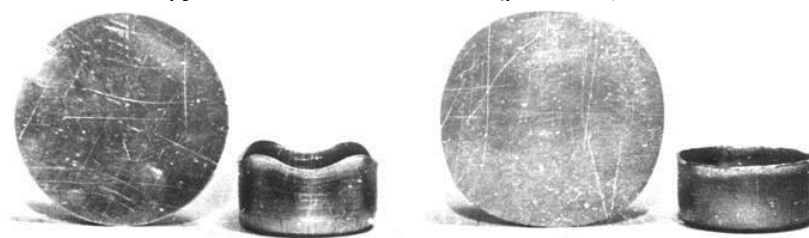


Рис. 1. Стаканы, вытянутые из круглой и профильной заготовок (сплав АМцАМ)

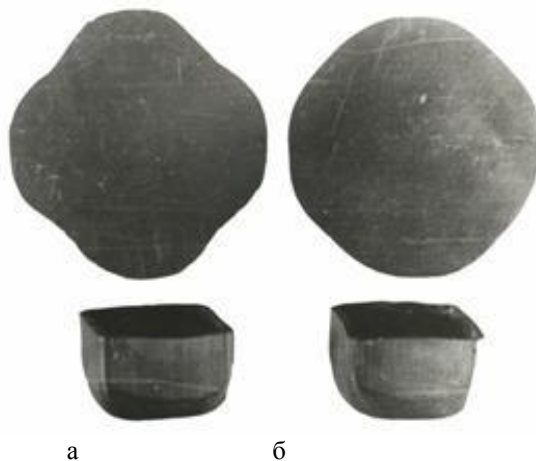


Рис. 2. Квадратные коробки, вытянутые из профильных заготовок при их ориентации направлением R_{\max} в угол (а) и R_{\min} в угол (б)

На основе выполненных исследований созданы научно обоснованные методики проектирования наукоемких прогрессивных технологических процессов деформирования анизотропных материалов, реализуемых при различных температурно-скоростных режимах формообразования.

Технологические процессы производства деталей и узлов ракетно-космической техники имеют основную задачу - обеспечение проектных тактико-технических характеристик изделий при оптималь-

ных сроках освоения серийного производства. Основной объем по металлоемкости в изделиях занимают корпусные узлы. Корпусными узлами летательных аппаратов являются оболочки различной геометрической формы (плоские, цилиндрические, сферические, ячеистые и т.д.), несущие нагрузку в процессе эксплуатации. Это обтекатели, корпуса отсеков, емкости, крылья, радиаторы из алюминиевых и титановых сплавов. Они должны иметь высокую удельную прочность, так как несут большую

критическую нагрузку, и надежно работать на продольный изгиб и поперечное сжатие. Типовые конструкции корпусных узлов представлены на рис. 3.

Технологические методы производства изделий ракетно-космической техники связаны в настоящее время с процессами механической обработки резанием, прокатки, сварки плавлением или пайки, соединения элементов клепкой и т.д. Это достаточ-

но трудоемкие процессы обработки, требующие высокой исходной точности заготовок и полуфабрикатов, длительного цикла обработки, приводящие к высокому расходу металла, а также применению большого числа сборочных единиц и крепежных деталей, что повышает себестоимость изготовления деталей в условиях мелкосерийного и среднесерийного производства.

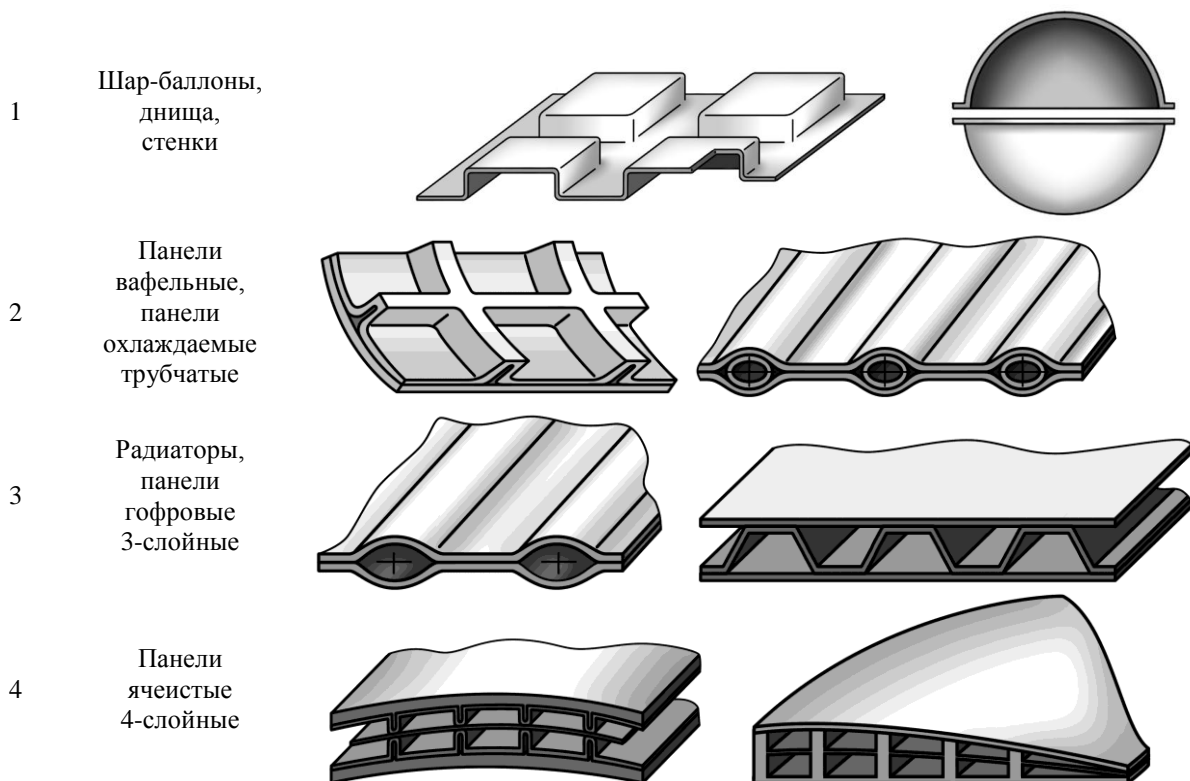


Рис. 3. Типовые конструкции корпусных узлов

Реализация эффективной технологии может быть обеспечена внедрением технологических методов обработки, построенных на совмещенных процессах изотермической пневмоформовки с термофиксацией, пневмоформовки с диффузионной сваркой давлением и термофиксацией на одной позиции. В основу процессов положена способность материалов в определенных температурно-скоростных условиях к вязкому или вязкопластическому течению материала, что обеспечивает большие конечные деформации при сравнительно малых внешних силах и высокую точность получаемых геометрических форм.

Традиционные методы изготовления полусферических оболочек штамповкой на прессах трудоемки. Разработаны новые наукоемкие технологические процессы изготовления полусферических оболочек из высокопрочных титановых и алюминиевых сплавов. Созданы технологические схемы изотермической пневмоформовки полусферических оболочек, прессовая установка для газотворной и универсальный блок-штамп, технологическая оснастка для изотермической пневмоформовки полусферических оболочек из титановых и алюминиевых сплавов и инновационный технологический процесс. На рис. 4 представлены изготовленные полусферические оболочки.



Рис. 4. Полусферические оболочки, изготовленные изотермической пневмоформовкой из высокопрочных титановых и алюминиевых сплавов

Существующие технологические процессы изготовления однослойных и многослойных ячеистых конструкций включают в себя операции механической обработки (фрезерование) и электроэрозии. Разработаны технологические схемы изготовления однослойных и многослойных ячеистых листовых конструкций, штамповый блок к пресс-вакуумной установке, а также инновационные технологические процессы формообразования вафельных конструкций и четырехслойных панелей.

Стрингерные конструкции с длинными круглыми и прямоугольными каналами являются элементами двухслойных панелей радиаторов систем терморегулирования отсеков летательных космиче-

ских аппаратов. Стрингерные трехслойные панели используют для корпусов изделий. Разработаны технологические схемы формообразования стрингерных конструкций с длинными круглыми, прямоугольными и трапециевидными каналами, а также инновационные технологические процессы формообразования стрингерных конструкций.

Элементы одно-, двух- и многослойных листовых конструкций, изготовленные методами изотермической пневмоформовки, сварки давлением и термофиксацией на одной рабочей позиции, из высокопрочных анизотропных материалов представлены на рис. 5.



Рис. 5. Элементы одно- (а), двух- (б) и многослойных (в) листовых конструкций, изготовленные изотермической пневмоформовкой, сваркой давлением и термофиксацией, из высокопрочных титановые и алюминиевых сплавов

Оребренные панели и элементы арматуры трубопроводов, изготовленные объемной изотермической штамповкой и выдавливанием из высо-

копрочных и малопластичных титановых и алюминиевых сплавов представлены на рис. 6.

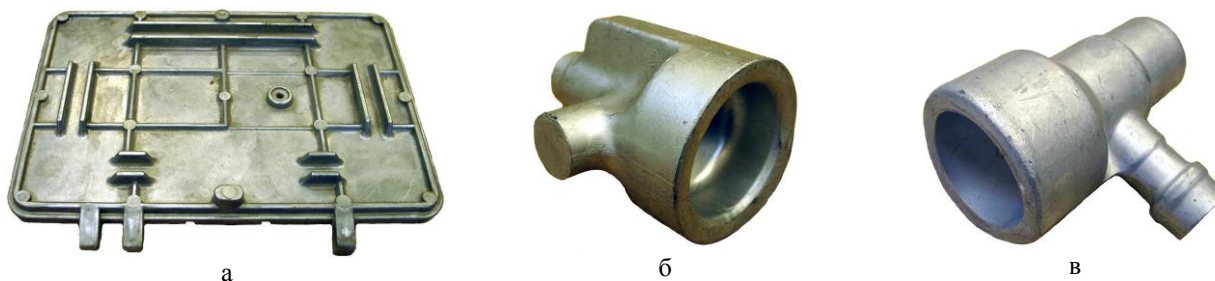


Рис. 6. Оребренные панели (а) и элементы арматуры трубопроводов (б, в), изготовленные объемной изотермической штамповкой и выдавливанием

Разработанное научное обоснование процессов пластического деформирования анизотропных материалов и комплексы технологических процессов обеспечивают следующую технико-экономическую эффективность: повышение удельной прочности узлов изделий на 30...50 % за счет применения новых конструкций и технологий; снижение массы изделия на 20...30 %; повышение точности геометрии узлов в 3...5 раз за счет ликвидации процессов сварки плавлением, клепки; со-

кращение количества входящих в узел изделия деталей в 5...10 раз; снижение трудоемкости производства в 2...3 раза за счет совмещения операций обработки и сокращения объема сборочных и доводочных работ; сокращение сроков подготовки производства в 1,5...2 раза.

Растущая потребность в производстве сложнопрофильных осесимметричных деталей (рис. 7) определяют необходимость совершенствования методов их изготовления.

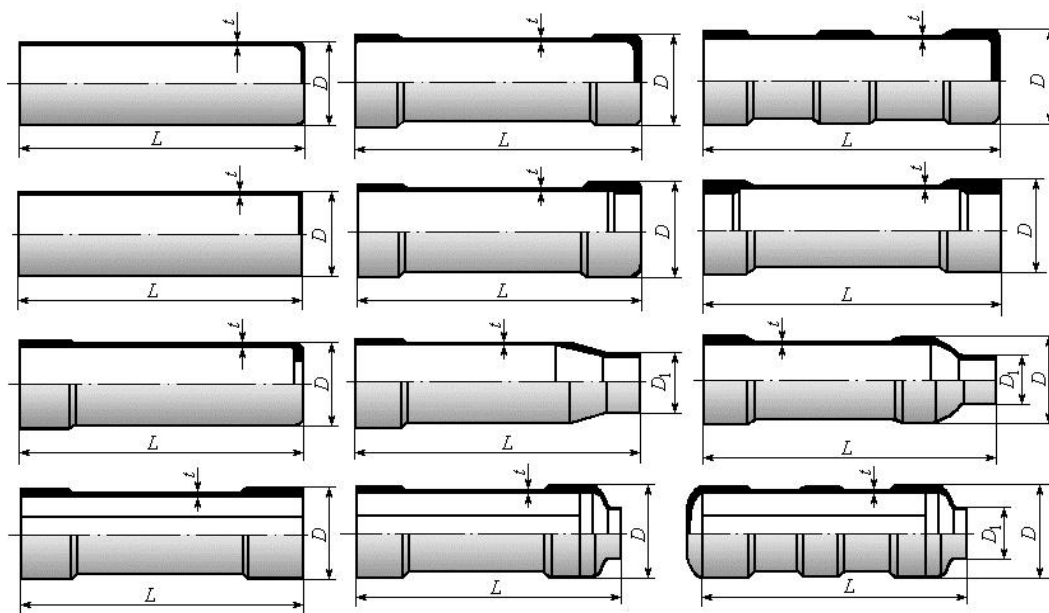


Рис. 7. Типовые конструкции сложногопрофильных осесимметричных деталей, изготавливаемых ротационной вытяжкой

Вместе с традиционными методами изготовления сложногопрофильных осесимметричных деталей механической обработкой и многооперационной вытяжкой за последние годы широкое применение находит ротационная вытяжка на специализированном оборудовании с использованием в качестве деформирующих элементов роликов. Выбор схемы ротационной вытяжки (РВ) определяется конструктивными особенностями изготавливаемых деталей, технологическими возможностями

используемого оборудования и свойствами обрабатываемого материала.

Существуют два способа ротационной вытяжки: прямой и обратный. В зависимости от количества деформирующих роликов схемы ротационной вытяжки разделяются на однороликовые и многороликовые. Для производства сложногопрофильных осесимметричных деталей находят успешное применение схемы ротационной вытяжки роликами с открытой и закрытой калибровкой, а также с разделением очага деформации (рис. 8).

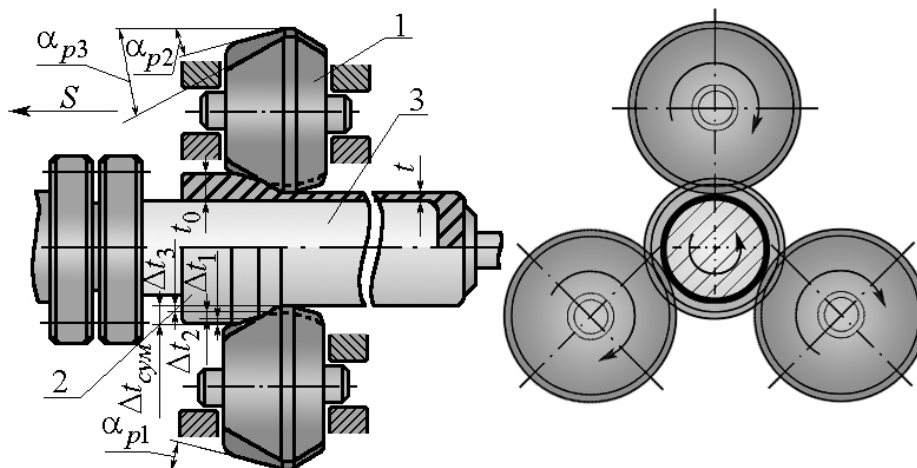


Рис. 8. Трехроликовая схема ротационной вытяжки осесимметричных деталей с разделением деформации при радиальном смещении роликов:

1 – ролик; 2 – деталь; 3 – оправка

Схема с разделением очага деформации имеет ряд важных преимуществ, состоящих в снижении потребных деформирующих сил ротационной вытяжки, достижении более высоких степеней деформации за один проход, что позволяет интенсифицировать процесс ротационной вытяжки. Сущность указанных схем состоит в том, что суммарная деформация разделяется между группой роликов по определенной зависимости (рис. 9). Разделение деформации осуществляется взаимным смещением роликов либо в осевом и радиальном направлениях, либо смещением только в радиальном направлении, при этом используются ролики с различным профилем [26, 27].

Разработаны научно обоснованные методики по расчету и проектированию технологических процессов ротационной вытяжки сложнопрофильных осесимметричных деталей ответственного назначения на специализированном оборудовании с использованием существующих и новых схем ротационной вытяжки с разделением деформации, которые использованы при создании новых технологических процессов ротационной вытяжки сложнопрофильных оболочек с переменной толщиной стенки и наличием кольцевых центрирующих утолщений из стали 10; осесимметричных сложнопрофильных деталей методом ротационной вытяжки и ротационного обжима из стали 10; осесимметричных корпусов головных частей реактивного снаряда с нагревом на стане «Лейкомат 600»; тонкостенных осесимметричных деталей с наружными и внутренними утолщениями из многокомпонентной стали 12ХЗГНМФА; осесимметричных деталей с двумя концевыми наружными утолщениями из алюминиевого сплава АМгб; осесимметричных деталей с внутренним винтовым профилем из алюминиевого сплава Д1; лейнеров из трубной заготовки (сталь 12ХЗГНМФА) и т.д.

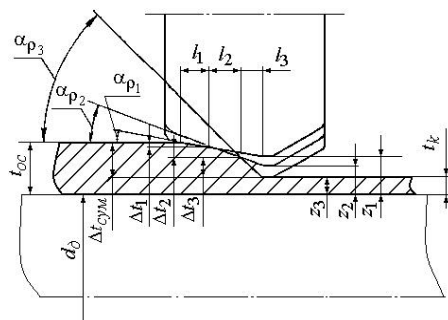


Рис. 10. Детали изделия ответственного назначения, изготовленные ротационной вытяжкой из высокопрочных сталей, меди, алюминиевых сплавов

Разработано научное обоснование процессов пластического деформирования анизотропных материалов и комплексы технологических процессов вытяжки осесимметричных и коробчатых деталей,

Рис. 9. Схема очага деформации при ротационной вытяжке деталей тремя роликами, смещенными в радиальном направлении

Ниже приведены изделия ответственного назначения, изготовленные ротационной вытяжкой (рис. 10).

Новые наукоемкие технологические процессы ротационной вытяжки сложнопрофильных осесимметричных деталей ответственного назначения обеспечивают следующую технико-экономическую эффективность:

по сравнению с традиционными методами обработки металлов давлением: сокращение сроков подготовки производства в 3...4 раза и более; достижение высоких степеней деформации (до 80 %) без промежуточной термической обработки; уменьшение материальных затрат при подготовке производства в 2...4 раза; снижение трудоемкости производства в 1,5...2,5 раза при изготовлении деталей средних размеров, а при изготовлении крупных деталей (длиной свыше 1м) ротационная вытяжка является едва ли не единственным экономически целесообразным методом; понизить себестоимость изготавливаемой продукции за счет того, что стоимость оснащения для РВ составляет 5...10 % суммарной стоимости штампов, а расход материала в 3...6 раз меньше, чем для изготовления штампов для тех же операций.

по сравнению с механической обработкой: повышение прочности деталей на 30...50 %; снижение массы детали на 25...40 % за счет упрочнения материала; увеличение коэффициента использования металла (КИМ) с 0,2...0,3 до 0,6...0,9.



многоступенчатой и реверсивной вытяжки крупногабаритных полусфер, днищ и торовых полуфабрикатов ракетно-космической техники (рис. 11) [13, 26].



Рис. 11. Крупногабаритные полусферы, днища и торовые полуфабрикаты, изготовленные многоступенчатой и реверсивной вытяжкой, из титановых и алюминиевых сплавов

Разработанное научное обоснование процессов пластического деформирования анизотропных материалов и комплексы технологических процессов изготовления изделий специального назначения обеспечивают: уменьшение трудоемкости изготовления в 1,5...2 раза; повышение прочности деталей в 1,5 раза; уменьшение металлоемкости деталей в 1,2...1,3 раза; сокращение сроков подготовки производства новых изделий в 1,5...2 раза.

Таким образом, разработано научное обоснование и комплексы наукоемких конкурентоспособных технологических процессов изготовления деталей и узлов изделий оборонной и ракетно-космической техники, обеспечивающих повышение эффективности их производства.

Работа выполнена по государственному заданию Министерства образования и науки Российской Федерации на 2012-2014 годы и грантам РФФИ.

Список литературы

1. Адамеску Р.А., Гельд П.В., Митюшков Е.А. Анизотропия физических свойств металлов. М.: Металлургия, 1985. 136 с.
2. Ашкенази Е.К. Анизотропия машиностроительных материалов. Л.: Машиностроение, 1969. 112 с.
3. Микляев П.Г., Фридман Я.Б. Анизотропия механических свойств металлов. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
4. Яковлев С.П., Шевелев В.В. Анизотропия листовых материалов и ее влияние на вытяжку. М.: Машиностроение. 1972. 136 с.
5. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 1998. 446 с.
6. Головлев В.Д. Расчет процессов листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1974. 136 с.
7. Яковлев С.П., Кухарь В.Д. Штамповка анизотропных заготовок. М.: Машиностроение, 1986. 136 с.
8. Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А. Обработка давлением анизотропных материалов. Кишинев: Квант. 1997. 332 с.
9. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение. 1975. 400 с.
10. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением / В.А. Голенков [и др.] // М.: Машиностроение, 2004. 464 с.
11. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных металлов / С.П. Яковлев [и др.] // М.: Машиностроение, 2004. 427 с.
12. Яковлев С.С., Пилипенко О.В. Изотермическая вытяжка анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 2007. 212 с.
13. Яковлев С.С., Трегубов В.И. Теория и технология изготовления крупногабаритных осесимметричных деталей ответственного назначения из высокопрочных анизотропных материалов / под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 230 с.
14. Яковлев С.С., Кухарь В.Д., Трегубов В.И. Теория и технология штамповки анизотропных материалов / под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2012. 400 с.
15. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1968. 283 с.
16. Попов Е.А., Ковалев В.Г., Шубин И.Н. Технология и автоматизация листовой штамповки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 480 с.
17. Теория обработки металлов давлением / В.А. Голенков [и др.] // под редакцией В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.
18. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
19. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. 329 с.
20. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Вища школа, 1983. 175 с.
21. Дель Г.Д. Технологическая механика. М.: Машиностроение, 1978. 174 с.
22. Изотермическая пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов / Яковлев С.С. [и др.] // под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 352 с.
23. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / Яковлев С.С. [и др.] // под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 412 с.
24. Яковлев С.С., Черняев А.В., Трегубов В.И. Изотермическое деформирование осесиммет-

ричных деталей в режиме кратковременной ползучести // под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. 161 с.

25. Яковлев С.С., Ларин С.Н., Трегубов В.И. Изотермическая пневмоформовка элементов ячеистых многослойных листовых конструкций из анизотропных высокопрочных материалов в режиме ползучести / под ред. С.С. Яковлева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. 173 с.

26. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка / Под общ. ред. С.С. Яковлева; ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2010. 732 с.

27. Яковлев С.С., Трегубов В.И., Яковлев С.П. Ротационная вытяжка с утонением стенки осесимметричных деталей из анизотропных трубных заготовок на специализированном оборудовании // под ред. С.С. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 265 с.