

Расчет и конструирование машин

УДК.539.374; 621.983

Изотермическое деформирование элементов листовых конструкций цилиндрического и прямоугольного сечения в режиме кратковременной ползучести¹

С.Н. Ларин

Приведены математические модели изотермического деформирования элементов листовых конструкций цилиндрического и прямоугольного сечения в режиме кратковременной ползучести. Представлены результаты теоретических исследований силовых режимов и предельных возможностей формоизменения.

Ключевые слова: анизотропия, формоизменение, напряжение, деформация, скорость, давление, кратковременная ползучесть, разрушение, панель.

The mathematical models of isothermal deformation of the sheet structure elements of cylindrical and rectangular profiles under the short duration creep mode are provided. The results of theoretical investigations of power modes and limiting abilities of forming are given.

Keywords: anisotropy, forming, stress, deformation, speed, pressure, short duration creep, failure, panel.

¹ Работа выполнена по ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2011 гг.)», грантам РФФИ, гранту Президента РФ для поддержки молодых ученых — кандидатов наук и по государственным контрактам в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009—2013 гг.»



ЛАРИН
Сергей Николаевич
кандидат технических наук, доцент
(Тульский государственный университет)

Важной проблемой, стоящей перед современным машиностроением, является повышение эффективности и конкурентоспособности процессов изготовления изделий из металлов и сплавов методами обработки давлением, обеспечивающими максимально возможные эксплуатационные характеристики.

Совершенствование конструкций изделий ответственного назначения определяет применение высокопрочных материалов и изготовление деталей и узлов со специальными, зависящими от условий эксплуатации, характеристиками. Сложность технологических процессов обуславливает их длительную отработку, влияющую в конечном итоге на трудоемкость и качество изделий. Все это вызывает необходимость изыскания новых принципов технологии, точности ее расчета и сближения на этой основе стадий проектирования изделий и технологической подготовки производства.

К числу наиболее перспективных и принципиально новых технологических процессов, направленных на совершенствование современного производства, относится медленное горячее формоизменение листовых заготовок избыточным давлением газа (пневмоформовка) с предварительной или одновременной диффузионной сваркой [1–3].

Технологические принципы формоизменения листовых заготовок избыточным давлением газа и диффузионной сваркой могут быть применены в производстве сложных многослойных конструкций с различной конфигурацией базовых элементов и листовых панелей.

При медленном изотермическом деформировании таких материалов в зависимости от уровня избыточного давления (газостатическая формовка) и температуры обработки величины пластической деформации и деформации ползучести становятся соизмеримыми, что необходимо учитывать при расчетах технологических параметров процессов.

Листовой материал, подвергаемый штамповке, как правило, обладает анизотропией механических свойств, обусловленной маркой материала, технологическими режимами его получения. Анизотропия может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние

на устойчивое протекание технологических процессов обработки металлов давлением при различных температурно-скоростных режимах деформирования [1–3].

Рассмотрим деформирование анизотропного материала в условиях кратковременной ползучести. Под кратковременной ползучестью будем понимать медленное деформирование в условиях вязкого (ползучего) или вязкопластического (ползуче-пластического) течения материала. Упругими составляющими деформации пренебрегаем. Считаем, что если величина эквивалентного напряжения σ_e меньше некоторой величины σ_{e_0} , например, соответствующей эквивалентной остаточной степени деформации $\varepsilon_{e_0} = 0,2\%$, при эквивалентной скорости деформации $\xi_{e_0} = 0,02$ 1/с, 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

$$\xi_e^c = \frac{B(\sigma_e / \sigma_{e_0})^n}{(1 - \omega_A^c)^m}; \quad \dot{\omega}_A^c = \frac{\sigma_e \xi_e^c}{A_{np}^c}, \quad (1)$$

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

$$\xi_e^c = B \left(\frac{\sigma_e}{\sigma_{e_0}} \right)^n \frac{1}{(1 - \omega_e^c)^m}; \quad \dot{\omega}_e^c = \frac{\xi_e^c}{\varepsilon_{e np}^c}. \quad (2)$$

При вязкопластическом (ползуче-пластическом) течении материала ($\sigma_e > \sigma_{e_0}$) уравнения состояния имеют вид

$$\sigma_e = \sigma_{e_0} \left(\frac{\varepsilon_e^{cp}}{\varepsilon_{e_0}^{cp}} \right)^d \left(\frac{\xi_e^{cp}}{\xi_{e_0}^{cp}} \right)^k (1 - \omega_A^{cp})^r; \quad \dot{\omega}_A^{cp} = \frac{\sigma_e \xi_e^{cp}}{A_{np}^{cp}}, \quad (3)$$

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

$$\sigma_e = \sigma_{e_0} \left(\frac{\varepsilon_e^{cp}}{\varepsilon_{e_0}^{cp}} \right)^d \left(\frac{\xi_e^{cp}}{\xi_{e_0}^{cp}} \right)^k (1 - \omega_e^{cp})^r; \dot{\omega}_e^{cp} = \frac{\xi_e^{cp}}{\varepsilon_{e_0}^{cp}}, \quad (4)$$

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

В формулах (1)–(4) 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; $\omega_A^{cp}, \omega_A^c$ — повреждаемость материала при вязкопластической и вязкой деформации по деформационной и энергетической моделям разрушения соответственно.

Отметим, что в зависимости от температурно-скоростных условий деформирования, поведение материала может описываться уравнениями состояния (1) и (3) или (2) и (4) соответственно.

Компоненты скоростей деформации ξ_{ij} будем определять по ассоциированным законам течения

$$\xi_{ij} = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (5)$$

где λ — коэффициент пропорциональности; $f(\sigma_{ij})$ — потенциал скоростей деформации анизотропного тела при кратковременной ползучести; σ_{ij} — компоненты тензора напряжений.

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.

Экспериментальные исследования анизотропных свойств материалов в различных термомеханических условиях показали, что, как правило, эти свойства различны при вязком (деформация ползучести) и вязкопластическом (ползуче-пластическое деформирование) де-

формировании. Поэтому в дальнейшем характеристики вязкого течения будем обозначать индексом «с», а вязкопластического течения индексом «ср». Например: $\xi_e^c, \xi_e^{cp}, R_x^c, R_x^{cp}, R_y^c, R_y^{cp}$ и т. д.

Предельные возможности формоизменения в процессах обработки металлов давлением, протекающих при различных температурно-скоростных режимах деформирования, часто оценивают с помощью феноменологических моделей разрушения.

В зависимости от условий эксплуатации или последующей обработки изготавливаемого изделия уровень повреждаемости не должен превышать 1, т. е. $\omega \leq 1$.

При справедливости деформационного критерия деформируемости выражения для определения предельной эквивалентной деформации $\varepsilon_{e_{np}}^c$ и $\varepsilon_{e_{np}}^{cp}$ при вязком и вязкопластическом течениях материала можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon_{e_{np}}^{cp} = C \exp \left(A_1 \frac{\sigma}{\sigma_e} + A_2 \frac{\xi_e^{-p}}{\xi_{e_0}^{-p}} \right) \times (a_0 + a_1 \cos \alpha + a_2 \cos \beta + a_3 \cos \gamma); \quad (6)$$

$$\varepsilon_{e_{np}}^c = D (b_0 + b_1 \cos \alpha + b_2 \cos \beta + b_3 \cos \gamma), \quad (7)$$

где $C, A_1, A_2; a_0, a_1, a_2, a_3, D, b_0, b_1, b_2, b_3$ — экспериментальные константы материала; σ — среднее напряжение, $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$; 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', D', a_i' и b_i' , а $\varepsilon_{e_{np}}^{cp}$ и $\varepsilon_{e_{np}}^c$ на A_{np}^{cp} и A_{np}^c .

Для оценки возможности изготовления многослойных листовых конструкций с прямоугольными длинными каналами выполнены

теоретические исследования процесса горячего формообразования угловых элементов многослойных конструкций из анизотропного материала в режиме кратковременной ползучести.

Предполагается, что процесс деформирования реализуется за две стадии: свободная формовка оболочки и формообразование угловых элементов конструкции.

Выполнены теоретические исследования свободной горячей пневмоформовки длинной узкой прямоугольной мембраны, закрепленной вдоль длинных сторон, с учетом анизотропии механических свойств (рис. 1). Предполагается, что деформирование осуществляется в режиме кратковременной ползучести. Листовой материал принимается ортотропным с коэффициентами анизотропии R_x и R_y , удовлетворяющим уравнениям теории течения и подчиняющийся энергетическим или кинетическим уравнениям кратковременной ползучести и повреждаемости. Главные оси напряжений совпадают с главными осями анизотропии x, y, z .

Мембрана шириной $2a$, толщиной h_0 нагружается давлением p , изменяющимся во времени по некоторому закону (см. рис. 1): $p = p_0 + a_p t^{n_p}$, p_0, a_p, n_p — константы закона нагружения. Допускается, что направление длинных сторон заготовки совпадает с направлением прокатки.

Поскольку длина мембраны значительно превосходит ее ширину, то допускается, что

процесс реализуется в условиях плоской деформации, т. е. $\xi_x = 0$.

Принимается, что срединная поверхность мембраны при ее деформировании является частью поверхности кругового цилиндра с некоторым углом раствора. Напряжение, совпадающее по направлению с нормалью к срединной поверхности, приближенно принято равным нулю, т. е. реализуется плоское напряженное состояние.

В отличие от известных решений этой задачи в работе анализируется деформирование оболочки с возможностью изменения толщин вдоль дуги окружности. Рассмотрены возможные варианты формоизменения при известных законах изменения высоты мембраны от времени, давления от времени, а также случаи формоизменения при постоянной скорости деформации и постоянном давлении.

Подробное описание исследований свободной горячей пневмоформовки длинной узкой прямоугольной мембраны из анизотропного материала в режиме кратковременной ползучести приведены в работе [3].

Остановимся на теоретическом анализе процесса горячего формообразования угловых элементов многослойных конструкций (вторая стадия) из анизотропного материала в режиме кратковременной ползучести (рис. 2).

Поскольку условия деформирования в вершине и на краю оболочки одинаковы (эти точки не перемещаются), то в дальнейшем рассматривается равномерное деформированное состояние, т. е. толщина оболочки меняется

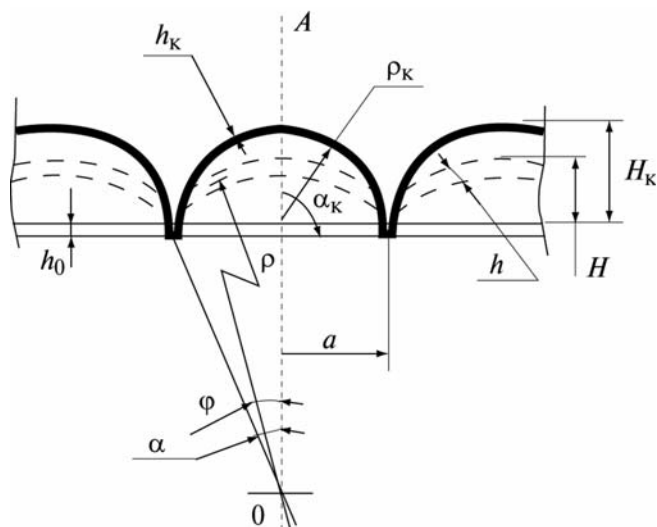


Рис. 1. Расчетная схема формообразования

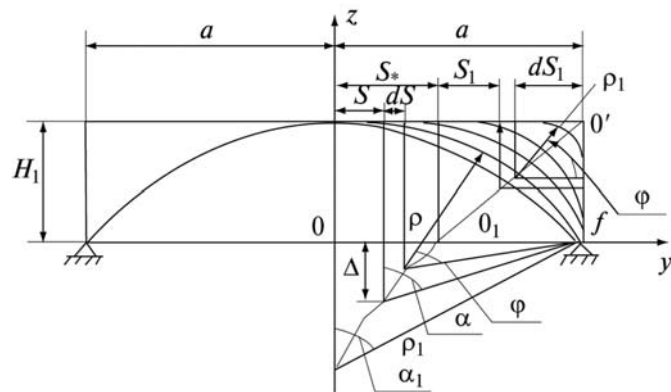


Рис. 2. Схема к анализу формоизменения угловых элементов на первом и втором этапах второй стадии деформирования

равномерно в каждой точке оболочки от начальных размеров, а форма деформируемой угловой части оболочки сохраняет форму части окружности.

На первом этапе второй стадии деформирования формируется плоский участок оболочки в окрестности вершины при скольжении без трения относительно обшивки до момента, когда $S = S_* = a - H_1$. В дальнейшем происходит симметричное деформирование оболочки относительно новой оси симметрии O_1O' со скольжением материал без трения. Течение материала принимается радиальным на каждом этапе деформирования.

Разработаны алгоритм расчета силовых и деформационных параметров исследуемого технологического процесса и программное обеспечение для ЭВМ.

Расчеты выполнены для алюминиевого сплава АМгб при температуре обработки $T = 450^\circ\text{C}$, поведение которого описывается энергетической теорией ползучести и повреждаемости, и для титанового сплава ВТ6С при температуре $T = 930^\circ\text{C}$, поведение которого описывается кинетической теорией ползучести и повреждаемости [2].

В результате теоретических исследований установлено, что с ростом относительной высоты прямоугольного канала $\bar{W} = H_1 / h_0$ осуществляется плавное уменьшение времени разрушения t_* , увеличение предельного радиуса мембраны $\bar{\rho}_{1*} = \rho_{1*} / h_0$ и толщины мембраны $\bar{h}_* = h_* / h_0$ в момент разрушения. Показано, что с увеличением n_p рост величин $\bar{\rho}_{1*}$ и \bar{h}_* становится более плавным.

Увеличение значений n_p и a_p приводит к уменьшению времени разрушения t_* и увеличению относительного предельного радиуса закругления мембраны $\bar{\rho}_*$ и толщины мембраны \bar{h}_* .

Установлено, что с увеличением коэффициента анизотропии R_y при фиксированных значениях R_x предельные величины времени разрушения t_* , радиуса закругления $\bar{\rho}_{1*}$ и толщины \bar{h}_* растут, причем, тем интенсивнее, чем меньше величина R_y .

Оценена погрешность результатов расчетов предельного времени разрушения t_* . Половины предельного угла раствора дуги α_* вычислены в предположении протекания процесса формоизменения в условиях вязкого и вязкопластического течения материала. Установлено, что учет накопленных микрповреждений оказывает большое влияние на величину относительного предельного радиуса закругления мембраны $\bar{\rho}_{1*}$. Установлено, что с уменьшением относительной высоты прямоугольного канала \bar{W} влияние учета накопленной повреждаемости ω_A^c на предельные геометрические характеристики мембраны ($\bar{\rho}_{1*}$) значительно увеличивается.

Полученные результаты исследований использованы при разработке новых технологических процессов изготовления многослойных листовых конструкций с прямоугольными длинными каналами из алюминиевого АМгб и титанового ВТ6С сплавов, применяемых в аэрокосмической технике. Элементы двухслойных листовых конструкций с прямоугольными длинными каналами из титанового сплава ВТ6С показаны на рис. 3.



Рис. 3. Элементы двухслойной листовой конструкции с прямоугольными длинными каналами

Новые технологические процессы обеспечивают: увеличение удельной прочности в 1,5–2 раза; уменьшение массы в 1,2 раза; снижение трудоемкости в 2–3 раза; увеличение коэффициента использования материала — 0,3 до 0,95.

Литература

1. Яковлев С.П., Яковлев С.С., Андрейченко В.А. Обработка давлением анизотропных материалов. Кишинев: Квант, 1997. 332 с.
2. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов / С.С. Яковлев, В.Н. Чудин, С.П. Яковлев, Я.А. Соболев, М.: Машиностроение, 2004. 427с.
3. Изотермическая пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов / С.С. Яковлев, С.Н. Ларин, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, Я.А. Соболев, В.И. Трегубов. М.: Машиностроение, 2009. 352 с.

Статья поступила в редакцию 10.09.2011