

В.Н. Чудин, д.т.н.
(ФГА ОУВО «Российский университет транспорта» (МИИТ), 125315, г. Москва, Часовая, 22),
С.Н. Ларин, д.т.н.
(ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»,
300012, г. Тула, проспект Ленина, 92)
E-mail: vladimir-chudin@yandex.ru; mpf-tula@rambler.ru

Газоформовка деталей конструкций при нелинейно-вязком деформировании анизотропных материалов

Предложены соотношения для расчета технологических параметров формообразования элементов конструкций газом. Принято состояние нелинейной вязкости (ползучести) материала. Используются энергетическое уравнение равновесия, уравнения повреждаемости и критерий устойчивости локальной деформации. Рассчитаны давление газа, длительность (время) операции, повреждаемость материала, критическая деформация при формовке оболочки емкости. Представлены образцы изделий.

Ключевые слова: вязкость; деформация; давление; время; повреждаемость материала; устойчивость деформаций.

V.N. Chudin, Dr. Sc. Tech.
(FGA OUVO "Russian University of Transport" (MIIT), 22, Chasovaya Str., Moscow, 125315)
S.N. Larin, Dr.Sc. Tech.
(FSBEI HE "Tula State University", 92, Lenin Avenue, Tula, 300012)

Gas molding of structure parts at non-linear ductile deformation of anisotropic materials

There are offered correlations for the computation of gas shaping technological parameters of structure elements. A state of material non-linear viscosity (creep) is accepted. The energetic equilibrium equation, equations of damage capacity and a criterion of local deformation stability are used. There is computed gas pressure, operation duration (time), material damage capacity, critical deformation at the formation of volume casing. Product samples are presented.

Keywords: viscosity; deformation; pressure; time; material damage capacity; deformation stability.

Процессы формообразования давлением газа могут применяться для изготовления конструкций из листовых материалов: оболочек емкостей, корпусных ячеистых оболочек, пластинчатых радиаторов и др. [1, 2]. Газоформовка позволяет заменить многопереходную штамповку и не требует мощного прессового оборудования. Она эффективна для производства деталей из высокопрочных сплавов, которые в определенных температурно-скоростных условиях пластичны. Этот фактор

связан с проявлением вязких свойств нагретого материала – ползучестью.

Для производства изделий режимы деформирования исходных заготовок (деформации, давление, время и др.) являются предметом расчета при разработке технологии. Рассмотрим процесс на примере формообразования куполообразных оболочек.

Схема формообразования купола оболочки (обечайки) показана на рис. 1. Данная схема соответствует газоформовке шаровых и торо-

вых оболочек емкостей, корпусных панелей вафельного и стрингерного типов и др. При плоской схеме напряжений для сферического купола имеем:

$$\sigma_\phi = \sigma_\theta; \sigma_z = 0; \varepsilon_\phi = \varepsilon_\theta; \varepsilon_z = -2\varepsilon_\phi. \quad (1)$$

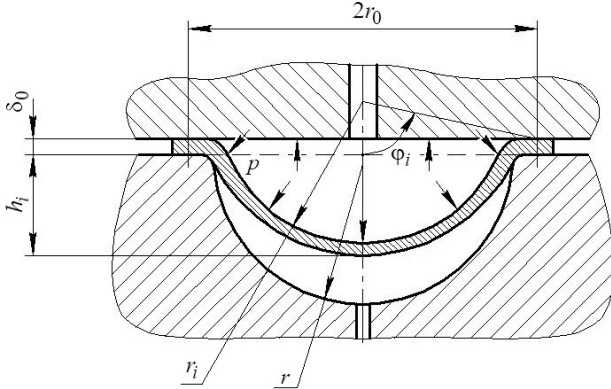


Рис. 1. Расчетная схема газоформовки

Для торового купола схемы напряжений и деформаций плоские, т.е.:

$\sigma_\phi \neq 0; \sigma_\theta \neq 0; \sigma_z = 0; \varepsilon_\phi = -\varepsilon_z; \varepsilon_\theta = 0$, (2)
 где $\sigma_\phi, \sigma_\theta, \sigma_z$ – напряжения по меридиональному направлению, окружному и толщине стенки обечайки; $\varepsilon_\phi, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ – деформации по этим направлениям; R – коэффициент материала заготовки. Для изотропного материала $R = 1$.

Для расчета режимов формообразования будем исходить из кинематики деформирования. Для этого эквивалентные деформации (интенсивности) и скорости деформаций представим следующими функциями:

$$\varepsilon_e = k\varepsilon_\phi = k\left(1 - \frac{\phi}{\phi_i}\right), \xi_e = \frac{1}{t_i}\varepsilon_e, \quad (3)$$

где

$$k = \lambda \cdot \ln \frac{r_i \phi_i}{r_0},$$

$$\lambda = 2 \left(\frac{3}{2+R}\right)^{\frac{1}{2}} \text{ – для сферы;}$$

$\lambda = \frac{1}{1+2R} \left[\frac{2}{3}(2+R)(1+3R+2R^2)\right]^{\frac{1}{2}} \text{ – для тора;}$

r_0 – исходный размер листовой заготовки; r_i – радиус сечения оболочки на i -м этапе; ϕ, ϕ_i – половина угла раствора сечения и текущий угол на этапе; t_i – время этапа операции при заданной на этапе деформации (3).

В соответствии с уравнением состояния материала при нелинейно-вязком деформировании [2, 3] эквивалентное напряжение выразим, учитывая соотношения (3), как

$$\sigma_e = \left(\frac{1}{B} \xi_e\right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{\varepsilon_e}{B t_i}\right)^{\frac{1}{n}}, \quad (4)$$

где B, n – константы вязкости материала.

Напряжения в куполе получим из условий текучести трансверсально-изотропного материала [4]. Для сферического купола при плоском напряженном состоянии

$$\sigma_\phi = \sigma_\theta = \sigma_e, \sigma_z = 0; \quad (5)$$

для торового при плоской деформации

$$\sigma_\phi = \frac{1+R}{(1+2R)^{1/2}} \sigma_e, \sigma_\theta = \frac{R}{(1+2R)^{1/2}} \sigma_e, \sigma_z = 0. \quad (6)$$

Рассчитаем толщину стенки вдоль образующей купола на рассматриваемом этапе. В соответствии с выражениями (1), (2) запишем

$$\eta \varepsilon_\phi = - \int \frac{d\delta}{\delta} = - \ln \frac{\delta_i}{\delta_0},$$

где $\eta = 2$ – для сферы и $\eta = 1$ – для тора;

δ_i – толщина стенки купола на i -том этапе;

δ_0 – толщина заготовки.

Из этого соотношения получим зависимость для расчета толщины стенки по образующей купола. Зависимость запишем в виде

$$\delta_i = (\delta_0 - \delta_k) \frac{\phi}{\phi_i} + \delta_k, \quad (7)$$

где

$$\delta_k = \delta_0 \exp(-\eta k), \quad (8)$$

где δ_k – толщина стенки в вершине купола.

Функция (7) соответствует граничным условиям:

$$\phi = 0, \delta_i = \delta_k; \quad \phi = \phi_i, \delta_i = \delta_0.$$

Для последующих расчетов параметров процесса необходимо выразить радиальную скорость движения точек образующей купола. На i -том этапе зададим ее в соответствии с граничными условиями:

$$\phi = 0, V = \frac{h_i}{t_i}; \quad \phi = \phi_i, V = 0;$$

функцией угловой координаты на рассматриваемом этапе формообразования в виде

$$V(\phi) = \frac{h_i}{t_i} \left(1 - \frac{\phi}{\phi_i}\right), \quad (9)$$

где h_i – высота купола на этапе к моменту времени t_i .

Используя полученные соотношения, сделаем оценку текущего давления газа по уравнению баланса мощностей внешних и внутренних сил [5]. Из этого уравнения при учете выражений (3), (4), (7), (9) получим:

$$p_i = \int \delta_i \sigma_e \xi_e d\phi / \int V(\phi) d\phi = \\ = 2 \left(\frac{1}{B t_i}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{k^{1+\frac{1}{n}}}{h_i \phi_i} \int_0^{\phi_i} \left(1 - \frac{\phi}{\phi_i}\right)^{1+\frac{1}{n}} \left[\delta_k + (\delta_0 - \delta_k) \frac{\phi}{\phi_i}\right] d\phi. \quad (10)$$

Давление, как следует из выражения (10), зависит от степени формообразования, анизотропии материала и длительности процесса (времени).

Формообразование заготовки сопровождается повреждаемостью материала в связи с

развитием деформаций в условиях растяжения. Этот фактор может привести к потере качества изделия и разрушению. Получим соотношения для оценки повреждаемости материала. Опасной точкой является вершина купола оболочки. Для этой области справедливы выражения (3), (4) при $\phi = 0$. Воспользуемся уравнениями кинетики повреждаемости [2, 3].

По энергетическому уравнению с учетом выражений (3), (4) на рассматриваемом этапе операции имеем

$$\omega = \frac{1}{A_{\text{пр}}} \int \sigma_e \xi_e dt = \frac{1}{A_{\text{пр}}} \left(\frac{1}{Bt_i} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\lambda \ln \frac{\phi_i r_i}{r_0} \right)^{1+\frac{1}{n}}. \quad (11)$$

По деформационному уравнению

$$\omega = \frac{\varepsilon_e}{(\varepsilon_e)_{\text{пр}}} = \frac{\lambda}{(\varepsilon_e)_{\text{пр}}} \ln \frac{\phi_i r_i}{r_0}, \quad (12)$$

где $0 \leq \omega \leq 1$ – повреждаемость в вершине купола на рассматриваемом этапе формообразования; $A_{\text{пр}}$ – предельная удельная работа в момент разрушения; $(\varepsilon_e)_{\text{пр}}$ – предельная эквивалентная деформация данного материала при данной температуре.

Выражение (11) относится к материалам, повреждаемость которых зависит от времени. Если зависимости от времени нет, то повреждаемость определяется только степенью деформации (12). При полной повреждаемости $\omega = 1$ и по этим выражениям можно установить критический размер купола оболочки, т.е.

$$(r_i \phi_i)_{\text{кр}} = r_0 \exp \left(\frac{t_i}{\lambda} A_{\text{пр}}^{\frac{n}{1+n}} \cdot B^{\frac{1}{1+n}} \right), \quad (13)$$

$$(r_i \phi_i)_{\text{кр}} = r_0 \exp \frac{(\varepsilon_e)_{\text{пр}}}{\lambda}. \quad (14)$$

В вершине купола оболочки возможна потеря устойчивости деформаций, что приводит к разрушению материала заготовки. Здесь $\phi = \phi_i$ и в соответствии с выражениями (3), (4) имеем

$$\varepsilon_e = \lambda \ln \frac{r_i \phi_i}{r_0} = k, \quad \xi_e = \frac{k}{t_i}, \quad \sigma_e = \left(\frac{k}{Bt_i} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (15)$$

Для расчета критических условий привлечем энергетический критерий локальной устойчивости деформаций анизотропного материала при ползучести [2]. Для плосконапряженного состояния оболочки запишем его в виде

$$\left[\frac{1}{z_1 z_2} + \left(\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z_2} \right) a \xi_e - (a \xi_e)^2 \right] > 0. \quad (16)$$

Здесь в соответствии с соотношениями (15)

$$\frac{1}{z_1} = \frac{1}{\sigma_e} \frac{d\sigma_e}{dt_i} = -\frac{1}{nt_i}, \quad \frac{1}{z_2} = \frac{1}{\xi_e} \frac{d\xi_e}{dt_i} = -\frac{1}{t_i}. \quad (17)$$

Для сферы:

$$a = (a_x - 2a_{xy} + a_y m^2)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{3}{2+R} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (18)$$

$$\text{где } a_x = a_y = \frac{3(1+R)}{2(2+R)}, \quad a_{xy} = \frac{3R}{2(2+R)}; \quad m = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_\phi} = 1,$$

что следует из выражений (5).

Для тора:

$$a = (a_x - a_y m^2)^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{3(1+2R)}{2(1+R)(2+R)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (19)$$

$$\text{где } m = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_\phi} = \frac{R}{1+R}, \quad \text{что следует из выражений (6).}$$

Выражение (17) внесем в условие (16) и приравняем его нулю, что соответствует моменту потери устойчивости. Получим уравнение

$$(\varepsilon_e)_{\text{кр}}^2 - \frac{1}{a} \left(1 - \frac{1}{n} \right) (\varepsilon_e)_{\text{кр}} - \frac{1}{a^2 n} = 0.$$

Отсюда следует, что:

$$(\varepsilon_e)_{\text{кр}} = \left[\frac{1}{2a} \left(1 - \frac{1}{n} \right) + \left[\frac{1}{2a} \left(1 - \frac{1}{n} \right) \right]^2 + \frac{1}{a^2 n} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (20)$$

где $(\varepsilon_e)_{\text{кр}}$ – критическая деформация к моменту разрушения.

Критическая длина половины образующей при этом

$$(r_i \phi_i)_{\text{кр}} = r_0 \exp \frac{1}{\lambda} (\varepsilon_e)_{\text{кр}}. \quad (21)$$

Соотношения (20), (21) справедливы для сферического и торового куполов при соответствующих выражениях (19) и (20).

Расчеты выполнены для газоформовки сферического купола из алюминиевого сплава АМг6 при 450 °С. Приняты размеры: $r_i = 200$ мм; $h_i = 100$ мм; $\delta_0 = 2$ мм. Графики давления газа и изменения толщины стенки в вершине купола приведены на рис. 2. Деформация составила $\varepsilon_e = 0,47$ при критической $(\varepsilon_e)_{\text{кр}} = 1,3$. Из графиков следует, что силовой режим процесса зависит от длительности формообразования. Давление уменьшается при увеличении времени операции. При этом для ряда материалов уменьшается повреждаемость. Процесс сопровождается неравномерностью толщины стенки изделия, которая практически не зависит от времени. Равномерность толщины стенки достигается реверсивной газоформовкой или подстуживанием центральной части заготовки.

Формообразование сферических и торовых оболочек устойчиво в части локальных деформаций. На рис. 3 представлены образцы изделий, полученные газоформовкой из листовых заготовок. Ряд процессов формообразования газом деталей и конструкций приведены в работах [6 – 8].

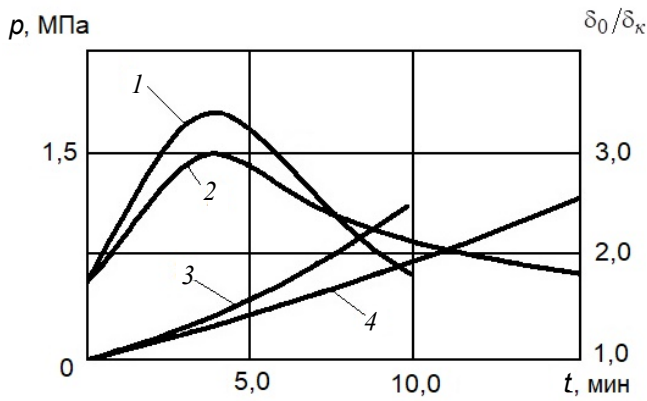


Рис. 2. Графики давления и относительной толщины в вершине купола:

1, 2 – давление при $t = 10$ и 15 мин соответственно;
3, 4 – толщина в вершине купола



Рис. 3. Изделия, полученные газотворкой:
а – оболочки емкостей (BT14, AMg6); б – радиаторные панели (AMg6); в – корпусные панели (AMg6, BT6С, BT14)

Выводы:

1. Процессы газотворки деталей из листовых материалов проводятся за одну операцию и не требуют мощного прессового оборудования, т.к. осуществляются в условиях вязкого деформирования материала (ползучести).
2. Технологические режимы формования, в том числе давление газа, степень

формообразования, зависят от длительности процесса, анизотропии исходного материала и его скоростного упрочнения (вязкости).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Новые** наукоемкие технологии в технике: Энциклопедия в 4 т.Т. 4. / под ред. К.С. Касаева. – М.: МЦ «Аспект». РКА, 1994. – С. 92-101.
2. **Изотермическая** пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов / С.С. Яковлев, С.П. Яковлев, В.Н. Чудин, Я.А. Соболев, В.И. Трегубов, С.Н. Ларин. – М.: Машиностроение, 2009. – 352 с.
3. **Романов, К.И.** Механика горячего формоизменения металлов.–М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.
4. **Яковлев, С.П.** Обработка давлением анизотропных материалов / С.П.Яковлев, С.С.Яковлев, В.А. Андрейченко. – Кишинев: Квант, 1997. – 332 с.
5. **Теория** обработки металлов давлением / В.А. Голенков, С.П. Яковлев и др. – М.: Машиностроение, 2009. – 442 с.
6. **Яковлев, С.С., Ларин, С.Н., Чудин, В.Н., Соболев, Я.А.** Инновационные технологические процессы изотермического деформирования двух- и трехслойных листовых конструкций // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2013. – № 11. – С. 30-33.
7. **Чудин, В.Н.** Формообразование газом корпусных ячеистых панелей // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2015. – № 9(51). – С. 35-39.
8. **Чудин, В.Н.** Газоформовка оболочки в условиях нелинейной вязкости материала // Заготовительные производства в машиностроении. – 2018. – Т. 16. – № 7. – С.302.

REFERENCES

1. *New Science Intensive Technologies in Engineering: Encyclopedia in 4 Vol., Vol.4.* / under the editorship of K.S. Kasaeva. – М.: MC “Aspect”. RKA, 1994. pp. 92-101.
 2. *Isothermal Pneumatic Molding of High-strength Sheet Materials* / S.S. Yakovlev, S.P. Yakovlev, V.N. Chudin, Ya.A. Sobolev, V.I. Tregubov, S.N. Larin. – М.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 352.
 3. Romanov, K.I., *Mechanics of Metal Hot Forming.* – М.: Mechanical Engineering, 1993. – pp. 240.
 4. Yakovlev, S.P. *Anisotropic Material Pressure Shaping* / S.P. Yakovlev, S.S. Yakovlev, V.A. Andreichenko. – Kishinyov: Quantum, 1997. – pp. 332.
 5. *Theory of Metal Forming* / V.A. Golenkov, S.P. Yakovlev et al. – М.: Mechanical Engineering, 2009. – pp. 442.
 6. Yakovlev, S.S., Larin, S.N., Chudin, V.N., Sobolev, Ya.A. *Innovation technological processes of isothermal deformation of two- and three-layer sheet structures* // *Forging and Stamping Production. Metal Forming.* – 2013. – No.11. – pp. 30-33.
 7. Chudin, V.N. *Gas shaping of frame cellular boards* // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2015. – No.9 (51). – pp. 35-39.
 8. Chudin, V.N. *Gas shaping of shell under conditions of material non-linear viscosity* // *Pre-production in Mechanical Engineering.* – 2018. – Vol.16. – No.7. – pp. 302-305.
- Рецензент д.т.н. Я.А. Соболев