

Научная статья
УДК 621.983.3.539.376
doi:10.30987/2223-4608-2022-3-10-13

Формообразование газом обечаек торовой ёмкости

Владимир Николаевич Чудин, д.т.н.
Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Россия
vladimir-chudin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8757-9411>

Аннотация. Рассмотрены технологическая схема и соотношения для расчета режимов формообразования обечаек торовых ёмкостей давлением газа. Материал заготовок принят анизотропным, проявляющим в условиях горячего деформирования вязкие свойства (ползучесть). Для расчета давления газа использовано уравнение равновесия Лапласа. Оценка повреждаемости материала заготовки произведена по уравнениям кинетики повреждаемости. Приведены расчётные результаты по режиму технологии газоформовки.

Ключевые слова: вязкость, деформации, время, давление, повреждаемость материала

Для цитирования: Чудин В.Н. Формообразование газом обечаек торовой ёмкости // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2022. – №3 (129). – С. 10-13. doi: 10.30987/2223-4608-2022-3-10-13.

Original article

Vladimir N. Chudin, Dr. Sc. Tech.
Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia
vladimir-chudin@yandex.ru

Gas molding of toroidal tank shells

Annotation The process flow diagram and ratios for calculating the modes of molding toroidal tank shells by gas pressure are described. The work material is assumed to be anisotropic, exhibiting viscous properties (creep flow) under conditions of hot working. The Laplace equilibrium equation is used to calculate gas pressure. Damaging assessment of the work material was made according to the damaging kinetics equations. The calculated results on the mode of gas molding technology are given.

Keywords: viscosity, deformation, time, pressure, damaging

For citation: Chudin V.N. Gas molding of toroidal tank shells. / Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2022, no.3 (129), pp. 10-13. doi: 10.30987/2223-4608-2022-3-10-13.

В энергетических установках применяют торовые ёмкости для сред высокого давления. Материалы ёмкостей – высокопрочные титановые и алюминиевые сплавы. Производство корпусов ёмкостей связано с многoperеходной прессовой штамповкой обечаек. Альтернативным процессом является формообразование обечаек газом с нагревом плоской листовой заготовки. Особенностью процесса является зависимость технологических режимов от температурно-скоростных условий обработки, так как деформируемый горячий мате-

риал проявляет вязкие свойства. Рассмотрим газоформовку обечаек давлением газа для расчета технологических условий обработки. Материал заготовки примем нелинейно-вязким [1, 2], анизотропным [3, 4].

Формообразование обечайки производится путем подачи нейтрального газа на поверхность плоской заготовки, закрепленной по контуру. Давление газа вызывает необратимые деформации ползучести нагретой заготовки и заполнение формы оснастки (рис. 1).

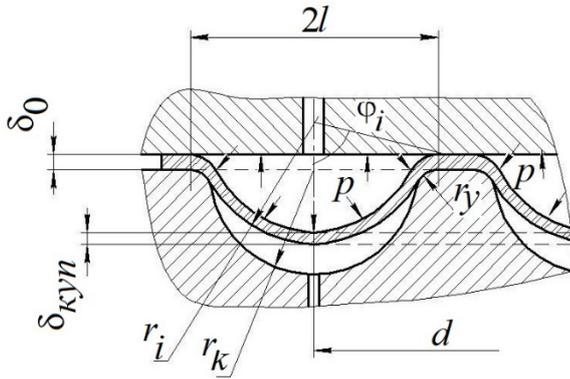


Рис. 1. Расчетная схема газоформовки торовой обечайки

Деформируемый материал находится в состоянии вязкого течения (ползучести), что выражается уравнением [1, 3]:

$$\frac{d\varepsilon_e}{dt} = \xi_e = B\sigma_e^n, \quad (1)$$

где ε_e , ξ_e , σ_e – соответственно эквивалентные деформации, скорость деформаций и напряжение; B , n – константы ползучести материала.

Расчетам подлежат кинематика процесса, деформации, давление газа, распределение толщины стенки формируемой обечайки, повреждаемость материала. На произвольном i -том этапе формообразования торовой обечайки состояния напряжений и деформаций плоские, т.е.:

$$\sigma_\varphi \neq 0, \quad \sigma_\theta = \frac{1}{2}\sigma_\varphi, \quad \sigma_\delta = 0;$$

$$\varepsilon_\varphi = -\varepsilon_\delta, \quad \varepsilon_\theta = 0,$$

где σ_φ , σ_θ , σ_δ – напряжения меридиональное, окружное и по толщине заготовки; ε_φ , ε_θ , ε_δ – деформации по этим направлениям.

Компоненты деформаций зависят от времени и положения точки на куполе. С учетом изгиба заготовки на угловой поверхности матрицы выразим их функцией:

$$\varepsilon_\varphi = -\varepsilon_\delta = \frac{t}{t_i} \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_i} \right) k_1. \quad (2)$$

где; $k_1 = \ln \left[\frac{1}{l} (r_i \varphi_i + \alpha r_y) \right] + \varepsilon_y$;

$\varepsilon_y = \delta_0 / [r_y (r_y + \delta_0)]^{1/2}$ – угловая деформация; $2l$ – ширина исходной кольцевой части заготовки; $r_i \varphi_i$ – радиус и угол раствора купола на i -м этапе; φ – угловая координата точки купола; t , t_i – текущее время и время формообразования на i -м этапе; r_y – угловой радиус матрицы; α – угол охвата заготовкой углового радиуса на этапе; δ_0 – толщина заготовки.

Эквивалентные деформацию, скорость деформаций и напряжение представим, учитывая выражение (2) и уравнение (1), в виде:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_e &= \lambda \varepsilon_\varphi; \quad \xi_e = \frac{\lambda}{t_i} \varepsilon_\varphi; \\ \sigma_e &= \left(\frac{\lambda k_i}{B t_i} \right)^{1/n} \left(1 - \frac{\varphi}{n \varphi_i} \right), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для анизотропного материала при плоской схеме деформаций [4]:

$$\lambda = \left[\frac{2(1+3R+2R^2)}{3(2+R)} \right]^{1/2},$$

где R – коэффициент анизотропии, при изотропном материале $R = 1$, $\lambda = 2/\sqrt{3}$.

В вершине купола при $t = t_i$, $\varphi = 0$ из выражения (2) следует, что:

$$\varepsilon_{\varphi_{куп}} = k_1. \quad (4)$$

Так как по условию несжимаемости:

$$\varepsilon_\varphi + \varepsilon_\delta = \varepsilon_\varphi - \int_{\delta_i}^{\delta_0} \frac{d\delta}{\delta} = 0,$$

то при учете выражения (4) рассчитаем толщину стенки в вершине купола

$$\delta_{куп} = \delta_0 \exp(-k_1). \quad (5)$$

Распределение толщины по образующей купола представим функцией текущего угла раствора купола на i -м этапе, т.е.:

$$\delta_i(\varphi) = \delta_{куп} \left(1 + f \frac{\varphi}{\varphi_i} \right), \quad (6)$$

где $f = \delta_0 / \delta_{куп} - 1$.

Выражение (6) соответствует условиям:

$$\varphi = 0, \quad \delta_i(\varphi) = \delta_{куп}; \quad \varphi = \varphi_i, \quad \delta_i(\varphi) = \delta_0.$$

Используем полученные соотношения для оценки давления газа по уравнению равновесия Лапласа:

$$\frac{\sigma_\varphi}{r_i} + \frac{\sigma_\theta}{r_*} = \frac{p_i}{\delta_i(\varphi)}, \quad (7)$$

где p_i – давление газа; r_i , $r_* = \infty$ – радиусы кривизны оболочки в поперечных сечениях.

По линейному условию текучести при плоской деформации имеем:

$$\sigma_\varphi = \gamma \sigma_e, \quad \sigma_\theta = \frac{1}{2} \sigma_\varphi = \frac{1}{2} \gamma \sigma_e, \quad (8)$$

где $\gamma = (1+R)/(1+2R)^{1/2}$; для изотропного материала $\gamma = 2/\sqrt{3}$.

Выражения (3), (6), (8) внесем в уравнение (7).

Получим зависимость для расчета давления газа на произвольном i -м этапе операции в виде:

$$p_i = \frac{\gamma}{r_i} \int_0^{\varphi_i} \sigma_e(\varphi) \delta_i(\varphi) d\varphi = \lambda \delta_{\text{куп}} \frac{\varphi_i}{r_i} \left[f \left(1 - \frac{1}{2n} \right) + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3n} \right) \right] \left(\frac{\lambda k_1}{B t_i} \right)^{1/n}. \quad (9)$$

Давление зависит, как следует из соотношения (9), от длительности газоформовки.

Повреждаемость материала заготовки при газоформовке обечаек можно рассчитать по энергетическому или деформационному уравнениям [1 – 3]. Используя выражения (3), запишем соответственно для вершины купола:

$$\omega = \frac{1}{A_{\text{пр}}} \int \sigma_e \xi_e dt = \frac{1}{A_{\text{пр}}} \left(\frac{1}{B} \right)^{1/n} (\lambda k_1)^{1+1/n} t_i^{-1/n}; \quad (10)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_{\text{епр}}} = \frac{\lambda k_1}{\varepsilon_{\text{епр}}}, \quad (11)$$

где $0 \leq \omega \leq 1$ – повреждаемость материала; $A_{\text{пр}}$, $\varepsilon_{\text{епр}}$ – предельные константы разрушения [1].

Соотношение (10), применимо для материалов, повреждаемость которых при заданной деформации зависит от времени. Для ряда материалов повреждаемость зависит только от величины деформации (11).

Расчеты выполнены для формообразования торových обечаек из алюминиевого сплава АМг6 при 475 °С. Константы материала [1]:

$B = 5 \cdot 10^{-7} \text{ 1/с} \cdot \text{Мпа}^n$; $n = 4$; $A_{\text{пр}} = 7,5 \text{ МПа}$. Приняты размеры: $r_i = r_k = 100 \text{ мм}$; $r_y = 3 \text{ мм}$; $\alpha = \varphi_i = \pi/2$; $l = 100 \text{ мм}$; $\delta_0 = 2 \text{ мм}$. Коэффициент анизотропии $R = 1$. Давление газоформовки обечаек составило 2 МПа и 1,7 МПа за время 10 мин и 15 мин соответственно при деформации в вершине купола $\varepsilon_e = 0,54$. Повреждаемость данного сплава зависит от времени, чему соответствует энергетическое уравнение (10).

При газоформовке обечаек повреждаемость в куполе составила $\omega = 0,37$ при $t_i = 20 \text{ мин}$. Расчетная толщина стенки в вершине купола $\delta_k = 0,63\delta_0$. Неравномерность толщины стенки уменьшается при отводе тепла от вершины купола плоской заготовки. Технологические и расчетные работы по газоформовке обечаек ёмкостей приведены в работах [3, 5, 6].

На рис. 2 показана установка для газоформовки.

Образец торовой оболочки из сваренных обечаек представлен на рис. 3.

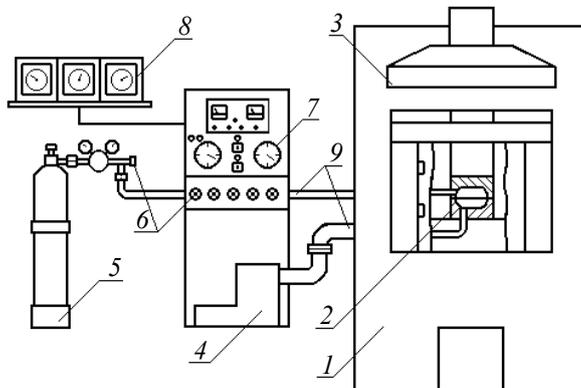


Рис. 2. Установка для газоформовки обечаек:

1 – пресс гидравлический; 2 – оснастка; 3 – вакуумные насосы; 4 – потенциометры; 5 – баллон с аргоном; 6 – шкаф управления



Рис. 3. Образец торовой сварной емкости

Выводы

1. Газоформовка обечаек производится в состоянии ползучести при низком давлении газа. Давление уменьшается при увеличении длительности операции.

2. Формообразование сопровождается неравномерностью толщины стенки обечайки независимо от длительности.

3. Повреждаемость материала в вершине купола обечайки зависит для данного материала при данной температуре от длительности формообразования и уменьшается при увеличении времени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Изотермическое** деформирование высокопрочных анизотропных материалов / Яковлев С.П., Чудин В.Н. и др. М.: Машиностроение, 2003. – 427 с.

2. **Малинин, Н.Н.** Ползучесть в обработке металлов. – М.: Юрайт, 2020. – 402 с.

3. **Чудин, В.Н., Ларин, С.Н.** Газоформовка деталей при нелинейновязком деформировании анизотропных материалов // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2020. – №4 (106). – С. 18-21.

4. **Яковлев, С.П., Яковлев, С.С., Андрейченко, В.А.** Обработка давлением анизотропных материалов. – Кишинёв: Квант, 1997. – 330 с.

5. **Чудин, В.Н.** Газоформовка оболочки в условиях нелинейной вязкости материала // Заготовительные производства в машиностроении. – 2018. – №7. – С. 302-305.

6. **Ларин, С.Н.** Технологические процессы формования однослойных оболочек газом // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. – Вып. 3. – С. 134-137.

REFERENCES

1. Isothermal deformation of high-strength anisotropic materials / Yakovlev S.P., Chudin V.N. et al., Moscow: Mashinostroenie, 2003, 427 p.

2. Malinin, N.N. Creep in metal processing, Moscow: Yurayt, 2020, 402 p.

3. Chudin, V.N., Larin, S.N. Gas molding of structure parts at non-linear ductile deformation of anisotropic materials. /Science intensive technologies in Mechanical Engineering, 2020, no.4 (106), pp. 18-21.

4. Yakovlev, S.P., Yakovlev, S.S., Andreichenko, V.A. Obrabotka davleniem anizotropnykh materialov (Pressure Treatment of Anisotropic Materials), Chisinau: Kvant, 1997, 330 p.

5. Chudin, V.N. Gas molding of shell under conditions of material non-linear viscosity // Pre-production in Mechanical Engineering, 2018, no.7, pp. 302-305.

6. Larin, S.N. Gas molding processing procedure of single-layer shells. /Izvestiya of Tula State University. Technical sciences, 2010, Issue 3, pp. 134-137.

Статья поступила в редакцию 12.11.2021; одобрена после рецензирования 13.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

The article was submitted 12.11.2021; approved after reviewing 13.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.

