

УДК 621.98:539.376
DOI: 10.12737/17320

В.Н. Чудин, д.т.н.
(Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ))
E-mail: vladimir-chudin@yandex.ru

Газоформовка корпусных гофро-стрингерных панелей при кратковременной ползучести

Предложены технология и расчеты режима горячего формообразования давлением газа гофро-стрингерных панелей. Принято состояние ползучести деформируемого материала. Даны оценки давления газа, локальной устойчивости деформаций, повреждаемости материала и длительности процесса. Представлены технологические данные и образцы изделий.

Ключевые слова: ползучесть; деформации; скорости деформаций; напряжения; время; давление; устойчивость деформаций.

V.N. Chudin, d.en.s.
(Moscow State University of Railway Engineering (MIIT)).

Gas forming of body embossing-stringer panels at short-term creep

The technology and analysis of hot shape-forming mode by gas pressure of embossing-stringer panels are suggested. The creep state of a deformable material is assumed. The assessments of gas pressure, local stability of strain, material damageability and process duration are given. The technological data and samples of products are presented.

Keywords: creep; deformations; strain rates; stresses; time; pressure; strain stability.

Корпуса приборных отсеков ракетно-космических аппаратов имеют гофро-стрингерную конструкцию: две разнесенные оболочки, подкрепленные продольными ребрами между ними. Конструкция изготавливается из высокопрочных алюминиевых сплавов и обеспечивает необходимые механические характеристики. Традиционная технология их производства основана на процессах штамповки, сварки, клепки, что связано с большими трудозатратами и не всегда обеспечивает качество изделий.

В связи с этим предлагается технология, сочетающая сварку плавлением и формообразо-

вание газом. Газоформовка применительно к изготовлению радиаторных корпусных панелей топливных отсеков рассмотрена в работах [1, 2]. Показано, что технологические параметры процесса (давление, время, степень формообразования) определяют его стабильность и качество изделий. Схема изготовления гофро-стрингерной панели изображена на рис. 1.

На схеме процесса обозначено: l_0 , l – исходная и текущая длины растягиваемого участка внутреннего листа; Δl – текущее удлинение участка листа; δ_0 , δ – исходная и текущая толщины этого листа; h – высота панели; α – угол наклона внутренней стенки. При этом:

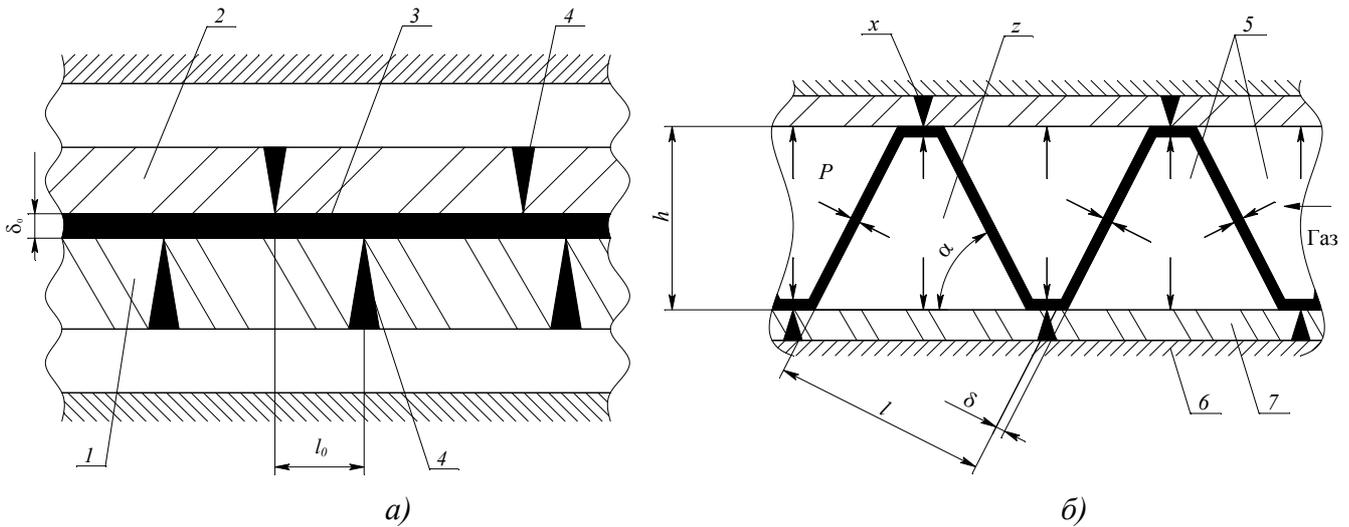


Рис. 1. Технологическая схема изготовления панели:

а – нагрев пакета заготовок; *б* – формирование панели газом; 1, 2 – наружные листы; 3 – внутренний лист; 4 – сварной шов; 5 – продольные полости; 6 – штамп; 7 – изделие

$$l = \frac{l_0}{\cos \alpha}, \quad \Delta l = l - l_0, \quad \alpha = \arctg \frac{h}{l_0}.$$

Три листа соединяют сваркой попарно продольными швами с обеих сторон. Полученный пакет заготовок герметизируют по периметру давлением гидропресса, нагревают и подают в пакет газ. Под давлением газа внешние листы раздвигаются, растягивая внутренний лист по свободным участкам с образованием продольных полостей. Получаемое изделие является гофро-стрингерной панелью.

Кинематика и деформации. Представим необходимые для расчета кинематические и деформационные зависимости в соответствии с технологической схемой процесса.

На произвольном этапе газотормовки скорости перемещения точек на растягиваемом участке внутреннего листа запишем функцией:

$$v = v_x = \frac{\Delta l}{l t} x, \quad (1)$$

где x – координата точки в зоне растяжения; t – время деформирования.

Функция (1) удовлетворяет граничным условиям:

$$x = 0, \quad v = 0, \quad x = \frac{l}{2}, \quad v = \frac{\Delta l}{2t}.$$

При условии плоской деформации компоненты скоростей деформаций, деформаций и их интенсивности представим, используя функцию (1), в виде

$$\xi_x = -\xi_z = \frac{dv}{dx} = \frac{\Delta l}{l t}, \quad \xi_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \xi_x = k \xi_x. \quad (2)$$

$$\varepsilon_x = -\varepsilon_z = \frac{\Delta l}{l}, \quad \varepsilon_i = k \frac{\Delta l}{l}. \quad (3)$$

Используя условие несжимаемости:

$$d\varepsilon_x = -d\varepsilon_z = \frac{dl}{l} = -\frac{d\delta}{\delta},$$

получим текущую толщину растягиваемого листа, т.е.

$$\delta = \delta_0 \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right)^{-1}. \quad (4)$$

Напряжение и давление газа. Деформируемый внутренний лист находится в состоянии ползучести, что определим уравнением состояния нелинейной вязкости материала [3]:

$$\sigma_i = A \xi_i^n = A (k \xi_x)^n, \quad (5)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; A, n – константы материала.

Рассчитаем компоненты напряжений в области деформаций внутреннего листа. Условие текучести при плоской деформации [4] записывается как

$$\sigma_x - \sigma_z = k \sigma_i.$$

Для данной схемы операции $\sigma_z = 0$. Из этого условия получим, что

$$\sigma_x = k \sigma_i, \quad \sigma_y = \frac{1}{2} \sigma_x, \quad (6)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – напряжения в плоскости внутреннего листа и по нормали к нему соответственно.

При известном растягивающем напряжении (6) давление газа можно выразить соотношением:

$$p = m \frac{S_1}{S_2} \sigma_x \sin \alpha = A m k^{1+n} \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{\Delta l}{l t}\right)^n \sin \alpha. \quad (7)$$

Аналогичное выражение получим, используя уравнение баланса мощностей внешних и внутренних сил [5], т.е.

$$p = \frac{ml}{2v_1} \frac{S_1}{S_2} \sigma_i \xi_i \sin \alpha, \quad (8)$$

где m – количество гофр; $S_1 = \delta L$ – площадь продольного сечения гофры; $S_2 = aL$ – площадь поверхности панели; a, L – ширина и длина панели соответственно.

Давление, как это следует из соотношений (7) и (8), нелинейно зависит от времени и его величина тем меньше, чем больше длительность операции.

Устойчивость деформаций. Растяжение внутреннего листа лимитируется возможной потерей устойчивости деформаций. На основе энергетического критерия устойчивость локальных деформаций при плоской схеме нагружения (6) выражена в работе [2] следующим условием:

$$\frac{1}{z_1 z_2} + b \xi_i \left(\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z_2} - b \xi_i \right) \geq t. \quad (9)$$

При этом $\sigma_z = 0, \xi_y = 0, \varepsilon_y = 0$, что соответствует данной схеме процесса; z_1, z_2 – подкасательные к кривым $\sigma_i(t), \xi_i(t)$ соответственно;

$$b = \left[1 - \left(\frac{\sigma_y}{\sigma_x} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \sigma_x, \sigma_y - \text{компоненты напряжений (6)}.$$

Запишем выражения для подкасательных, используя соотношения (2) и (5). Получим:

$$\frac{1}{z_1} = \frac{1}{\sigma_i} \frac{d\sigma_i}{dt} = -\frac{n}{t}, \quad \frac{1}{z_2} = \frac{1}{\xi_i} \frac{d\xi_i}{dt} = -\frac{1}{t}.$$

Внеся эти выражения в зависимость (9), получим условие устойчивости в виде:

$$t_{кр} \leq \left\{ \left\{ n + \left(\frac{\Delta l}{l} \right)^2 \left[(1-n) \frac{l}{\Delta l} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \right\}. \quad (10)$$

Условие (10) устанавливает критическое время $t_{кр}$ (длительность) формообразования без локализации деформаций.

Повреждаемость материала. Оценку повреждаемости материала растягиваемого листа панели можно сделать по уравнениям теории прочности при ползучести [2, 3]. Зададим, используя выражения (2), (3), (5), функции

$$\varepsilon_i = \frac{k \Delta l t}{l t_k} = \frac{k t}{t_k} (1 - \cos \alpha), \quad \xi_i = \frac{\varepsilon_i}{t}, \quad \sigma_i = A \xi_i^n,$$

где t, t_k – текущее и конечное время соответственно.

По уравнению энергетической теории прочности получим, используя эти функции, следующее:

$$\omega = \frac{1}{A_{пр}} \int_t \sigma_i \xi_i dt = \frac{A}{A_{пр}} [k(1 - \cos \alpha)]^{1+n} t_k^{-n}. \quad (11)$$

По уравнению деформационной теории

$$\omega = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{ипр}} = \frac{k}{\varepsilon_{ипр}} (1 - \cos \alpha), \quad (12)$$

где ω – повреждаемость материала; $A_{пр}, \varepsilon_{ипр}$ – предельная удельная работа в момент разрушения и предельная интенсивность деформаций.

Соотношение (11) применяется при зависимости повреждаемости от времени операции; соотношение (12) – при зависимости только от величины деформации. Критическое состояние определяется условием $\omega = 1$.

Технологические данные. Отработку технологии проводили применительно к изготовлению панелей из мелкозернистых алюминиевых сплавов АМг6, 1201, 1911. Размеры панелей: габариты 300×500 мм; $h = 25$ мм; $l_0 = 25$ мм; $\alpha = 45^\circ$. Толщина внешних листов 2 мм; внутреннего листа $\delta_0 = 1$ мм. Заготовки соединяли различными видами сварки: электронно-лучевая и лазерная сварки обеспечивают, в отличие от роликовой, узкий герметичный сварной шов на заданную глубину.

Закрытый штамп с пакетом заготовок нагревали и подавали в пакет аргон для формообразования изделия. Формообразование проводили на гидропрессе с системами нагрева и подачи аргона от баллона (рис.2). Для расчета использовали константы уравнений состояния, приведенные в работе [2].

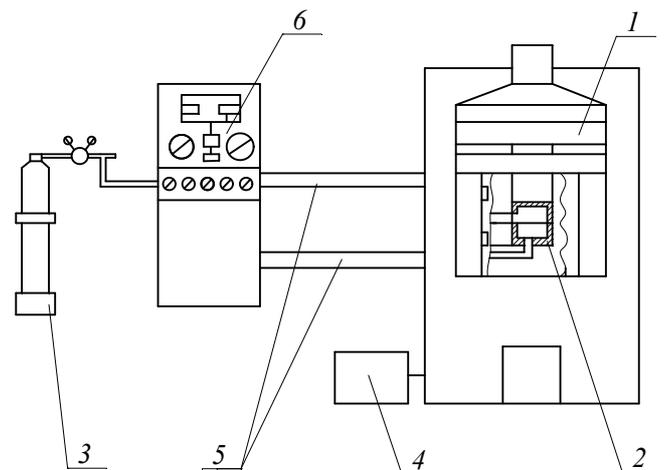


Рис. 2. Установка для формообразования панелей: 1 – гидропресс мод. ДБ2432; 2 – штамповый блок; 3 – баллон аргона; 4 – трансформатор системы нагрева; 5 – трубопроводы; 6 – пульт управления

Технологические режимы, полученные на основе расчетных и экспериментальных данных

Номер п/п	Операции	Технологические режимы		
		Температура, °С	Давление, МПа	Время, мин
1	Электронно-лучевая сварка трех листов в пакете с глубиной шва на две заготовки с переворотом пакета заготовок	По отдельному технологическому процессу		
2	Установка пакета в штамп. Нагрев. Закрытие штампа и герметизация пакета по контуру прессовым давлением	450...500	10...12	До 150
3	Подача газа в пакет. Формообразование	— —	1,0...1,2	12...15
4	Выдержка под давлением газа (калибровка)	— —	2,0...2,5	10...15
5	Охлаждение в закрытом штампе при постепенном сбросе давления газа. Раскрытие штампа. Съем изделия	100...120	50...70	120

При формообразовании панелей давление газа не превышало 1,2 МПа, что соответствовало расчету. Утонение внутреннего листа составляло 50...60 %. Расчетная величина повреждаемости не превышала 0,6...0,7 при устойчивой деформации. Увеличение угла конуса полости более 60° приводило к разрыву внутреннего листа. Технологические режимы, полученные на основе расчетных и экспериментальных данных, приведены в таблице.

Механическими испытаниями установлено, что предел прочности сплавов 1201, 1911 после формообразования панелей составлял 280...300 МПа; сплава АМг6 – 200...230 МПа. Термообработка сплавов 1201, 1911 повышала предел прочности до 350 МПа. Образцы гофрстрингерных панелей представлены на рис. 3.

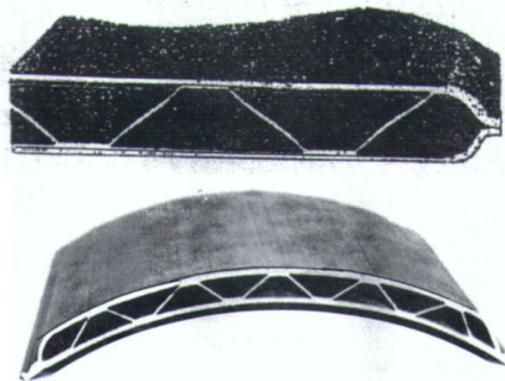


Рис. 3. Образцы изделий

Выводы

1. Технологический режим газотормовки панелей определяется температурно-скоростными условиями обработки, при которых развивается ползучесть. Увеличение длительности (времени) процесса способствует уменьшению давления.

2. Повреждаемость материала растягиваемого листа панели увеличивается в процессе его растяжения. Для данных алюминиевых сплавов она зависит от времени формообразования. При этом возможна локальная неустойчивость деформаций. В связи с этим время процесса деформирования должно быть ограничено «снизу» и «сверху».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чудин В.Н. Формообразование газом корпусных ячеистых панелей // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2015. № 9(51). С. 35–38.
2. Изотермическая пневмоформовка анизотропных высокопрочных листовых материалов/ С.С. Яковлев и др. М.: Машиностроение, 2009. 352 с.
3. Малинин Н.Н. Ползучесть в обработке металлов. М.: Машиностроение. 1986. 216 с.
4. Теория обработки металлов давлением / В.А. Голенков и др. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.
5. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: УПИ, 2001. 836 с.

REFERENCES

1. Chudin V.N. Shape forming by gas of body cell panels. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2015. № 9(51). Pp. 35–38.
2. Isothermal pneumatic forming of anisotropic high-strength sheet materials. S.S. Yakovlev et al. Moscow: Mashinostroyenie, 2009. 352 p.
3. Malinin N.N. Creep in metal working. Moscow: Mashinostroyenie, 1986. 216 p.
4. Theory of metal forming. V.A. Golenkov et al. Moscow: Mashinostroyenie, 2009. 442 p.
5. Kolmogorov V.L. Mechanics of metal forming. Ekaterinburg: UPI, 2001. 386 p.

Рецензент д.т.н. С.С. Яковлев