

УДК 621.983(681.14;658.512)

Н. Н. Убизький, А. И. Хащина

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГОФР НА ТОНКИХ СТЕНКАХ ПРОФИЛЬНЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ШПАНГОУТОВ

Приведено методикау визначення критичного радіуса вигину профілів, що мають тонкі стінки, схильні до утворення гофри при вигині.

Ключові слова: *критичний радіус, гофри, вигин, профіль, тонкі стінки.*

Приведена методика определения критического радиуса изгиба профилей, которые имеют тонкие стенки, склонные к образованию гофр при изгибе.

Ключевые слова: *критический радиус, гофры, изгиб, профиль, тонкие стенки.*

Methodology over of determination of critical radius of bend of profiles which have thin walls feel like formation of gofers at a bend is brought.

Keywords: *critical radius, gofers, bend, profile, thin walls.*

Для изготовления шпангоутов изделий ракетно-космической техники широко применяют различные способы изгиба профильных заготовок. Значительная часть профильных заготовок имеет тонкую стенку. Для радиусов гибки, которые характерны при производстве шпангоутов, профиля у которых отношение длины стенки к её толщине более 10 относятся к разряду тонкостенных.

В научно-технической литературе отсутствуют рекомендации по обоснованному выбору способов и технологического маршрута гибки при производстве шпангоутов из профилей, имеющих тонкую стенку. Эти обстоятельства приводят к значительному объёму доводочных и слесарных работ и неоправданному увеличению сроков и стоимости технологической подготовки производства изделий новой техники.

С целью предупреждения местной потери устойчивости в процессе изгиба применяют различные практические меры, а именно: используются различные наполнители внутреннего объёма поперечного сечения, вкладыши, местный подогрев заготовок [1,2,3] или предусматривают последующую калибровку в штампе.

При изгибе тавровых профилей образование гофр происходит в том случае, когда плоская стенка (большая её часть) находится в зоне сжатия. В работах [4,5,6] напряжённое состояние, предшествующее моменту потери устойчивости, принято линейным. В [5] величина критического радиуса

Тонкую стенку с размерами поперечного сечения a и d , см. рис. 1, можно рассматривать как оболочку.

Задача определения критического радиуса кривизны при местной потере устойчивости цилиндрических и конических стенок, которые находятся в условиях линейного напряженного состояния ($\sigma_\alpha = \sigma_\gamma = 0$), решается в соответствии с методом, разработанным С. П. Тимошенко [7] и распространенным на задачи устойчивости за пределом упругости А. А. Ильюшиным [8]. Согласно энергетическому критерию устойчивости уравнение критического состояния равновесия имеет вид:

$$\int_0^a \int_0^a \left[W + \frac{1}{2} d \sigma_\beta \left(\frac{\partial \omega}{\partial z_1} \right)^2 \right] d\alpha dz_1 = 0 \quad (1)$$

где: W – потенциал изгибающих и крутящего моментов, обусловленных образованием гофров в результате потери устойчивости; ω – функция, аппроксимирующая форму гофров; a^* – длина полуволны; Oz_1 – ось, совпадающая с направлением касательной к оси $O\beta$.

Граничные условия для функции прогиба ω имеют следующий вид:

$$\omega = 0 \quad \text{при} \quad \alpha = z_1 = 0. \quad (2)$$

В уравнении критического состояния равновесия (1) принимаем функцию, аппроксимирующую форму волны и удовлетворяющую граничным условиям (2), в следующем виде:

$$\omega = \omega_0 \left(1 - \cos \frac{\pi \alpha}{2a} \right) \sin \frac{\pi z_1}{2a^*}. \quad (3)$$

Напряженное состояние, предшествующее моменту потери устойчивости, принимаем линейным. Величина относительной тангенциальной деформации в условиях линейного напряженного состояния равна

$$\varepsilon_\beta = \frac{-\eta + \alpha \sin \varphi_0}{R}, \quad (4)$$

где η – расстояние от нейтральной линии.

Кривую упрочнения принимаем в виде $\sigma_i = A\varepsilon_i^n$.

Потенциал изгибающих и крутящих моментов из (1), обусловленных горообразованием, определяется по формуле [9]:

$$W = \frac{2}{3} E_{\rho} I \left[x_{z1}^2 + x_{z1} x_{\alpha} + x_{\alpha}^2 + x_{z1\alpha}^2 - \frac{3}{4} \left(1 - \frac{E_t}{E_{\rho}} \right) \frac{X^2}{\sigma_i^2} \right], \quad (5)$$

где I – момент инерции полоски единичной длины, вырезанной из исследуемой стенки; E_{ρ} – модуль пластичности; E_t – касательный модуль; x_{z1} , x_{α} , $x_{z1\alpha}$ – вторые частные производные от функции прогиба $\omega(\alpha, z_1)$ по соответствующим переменным; $X = \sigma_{\beta} x_{z1}$, σ_{β} – тангенциальное напряжение.

Учитывая линейный характер напряженного состояния, имеем

$$\varepsilon_i = |\varepsilon_{\beta}|; \quad (6)$$

$$\sigma_{\beta} = -\sigma_i = -k \left| \frac{-\eta + \alpha \sin \varphi_0}{R} \right|^n. \quad (7)$$

Подставляя выражения с (5)- по (7) в уравнение критического состояния равновесия (1), беря частные производные и вычисляя определенные интегралы, находим выражения для радиуса кривизны нейтрального слоя профильной заготовки

$$R = \frac{9}{\pi^2 d^2} I_5 \frac{16a^2 a^4}{16a^4 c I_1 + a^4 I_3 + 4a^2 a^2 (I_4 - I_2)}, \quad (8)$$

где $I_j = \int_a^0 \pi_1^{n-1} f_j(\alpha) d\alpha; \quad j = 1, 2, \dots, 5;$

$$f_1(\alpha) = \left(1 - \cos \frac{\pi\alpha}{2a} \right)^2; \quad f_2(\alpha) = \cos \frac{\pi\alpha}{2a} \left(1 - \cos \frac{\pi\alpha}{2a} \right);$$

$$f_3(\alpha) = \cos^2 \frac{\pi\alpha}{2a}; \quad f_4(\alpha) = \sin^2 \frac{\pi\alpha}{2a};$$

$$f_5(\alpha) = \left(1 - \cos \frac{\pi\alpha}{2a} \right); \quad c = 1 - 0,75(1 - n);$$

$$\eta_1 = |-\eta + \alpha \sin \varphi_0|; \quad c_1 = \left(\frac{c I_1}{I_3} \right)^{1/2}.$$

Находим экстремум функции $R = R(a^*)$ из условия $\frac{\partial R(a^*)}{\partial a^*} = 0$.

Окончательно:

$$a^* = 2a \left(\frac{cI_1}{I_3} \right)^{1/4}; \quad (9)$$

$$R_{кр} = \frac{36a^2}{\pi^2 d^2} \frac{c_1 I_5}{2cI_1 + (I_4 - I_2)c_1}, \quad (10)$$

где $R_{кр}$ – максимальный радиус кривизны, при котором происходит местная потеря устойчивости стенок профиля.

Для расчета критического радиуса кривизны и длины полуволны по формулам с (3) по (10) составлен алгоритм решения и программа. Исходными данными являются геометрические характеристики профиля: a , d , φ_0 (см. рис. 1), а также показатель степени n в выражении для кривой упрочнения. Последняя величина находится по соответствующим таблицам, приведенным в [9]. Интегралы $I_1 - I_5$, входящие в выражения (9) и (10), вычислялись численно с помощью стандартных программ, реализующих вычисления определенного интеграла по квадратурной формуле Гаусса с десятью узлами.

На рис. 3. показаны зависимости, полученные в результате расчета критического радиуса гибки. Расчеты проведены для прессованных профилей из алюминиевого сплава Амгб-М. Толщина конической стенки принималась равной $d = 6$ мм. Длина стенки a и угол наклона φ_0 варьировались.

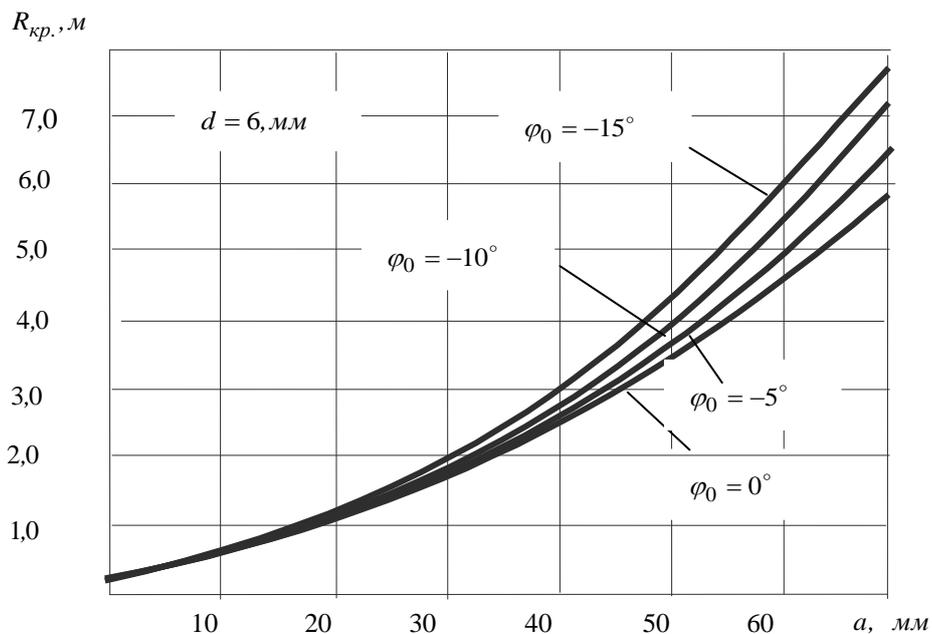


Рис. 3. Влияние геометрических размеров стенки и её угла наклона на критический радиус гибки

Проведенные экспериментальные исследования на специально изготовленной опытной партии профилей показали, что экспериментальные и расчетные значения критического радиуса гибки тонкостенных профилей, отличаются не более чем на 5%.

Выводы. Предложенная методика предназначена для предварительных расчетов, с целью определения целесообразности изготовления шпангоутов из выбранного типа профиля. В том случае, когда значения критического радиуса больше, чем радиус гибки, рекомендуется выбрать другой тип профиля или при проектировании технологического маршрута изготовления своевременно предусмотреть калибровку в штампе для устранения гофров, образующихся при местной потере устойчивости.

Библиографические ссылки

1. Громова, А.Н. Изготовление деталей из листов и профилей при серийном производстве /А.Н. Громова, В.И. Завьялова, В.К. Коробов // М.: Оборонгиз, 1960. – 344 с.
2. Громова, А.Н. Безштамповое изготовление деталей из листов, профилей и труб /А.Н. Громова, Е.Н. Попова, Е.С. Сизов // М.: ЦИНТИМАШ, 1962. – 91 с.
3. Губкин, С. И. Основы обработки металлов давлением /С.И. Губкин, Б.П. Звороно и др // М.: Машгиз, 1959. – 539 с.
4. Ершов, А.Г. Исследование процессов формообразования пластическим изгибом и подсечкой деталей из прессованных и сварных профилей титановых сплавов /А.Г. Ершов // М.: НИАТ, 1974. – 53 с.
5. Лысов, М. И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки /М. И. Лысов // М.: Машиностроение, 1966. – 236 с.
6. Разумихин, М.И. Гофрообразование при изгибе тонкостенных профилей /М.И. Разумихин, Ю.Б. //Кузнечно-штамповочное производство, 1967, №9, С.23 – 24.
7. Тимошенко, С.П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек /С.П. Тимошенко //М.: Наука, 1971. – 807 с.
8. Ильюшин, А.А. Пластичность /А.А. Ильюшин // М.: ГИТЛ, 1948. – 376с.

Надійшла до редколегії 28.01.2019