

8. Попов И.П., Маслов В.Д. Устойчивость формоизменения цилиндрической оболочки в жестком контейнере. Межвузовский сб.: "Теория и технология обработки металлов давлением", КуАИ, 1977.

УДК 621.981.1

М.Н.Добреля, Л.А.Фадеева

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОЛОЖЕНИЯ ОСИ ПОВОРОТА СЕЧЕНИЙ ПРИ ИЗГИБЕ ПРОФИЛЕЙ С РАСТЯЖЕНИЕМ

Аналитическое определение параметров процесса изгиба профилей с растяжением связано с решением уравнений равновесия внутренних и внешних сил и моментов. Их точность определяется точностью применяемой аналитической аппроксимации диаграммы $\sigma - \varepsilon$ и точностью определения положения оси поворота сечений при изгибе, что важно при определении деформации изгиба, а затем и тангенциальных напряжений в произвольном волокне профиля вследствие расположения на ней начала координатной системы.

Положение оси поворота сечений при изгибе пластически растянутого элемента соответствует условию равновесия внешних и внутренних сил [1]:

$$P = \int_{(F)} \sigma dF \quad (1)$$

Интегрирование правой части уравнения (1) ведется по элементам поперечного сечения профиля. При составлении уравнения равновесия внешних и внутренних сил в поперечном сечении профиля принимается, что при нагружении по схеме растяжение - изгиб (РИ) ось поворота сечений располагается в пределах высоты стенки профиля, а упруго деформированная при изгибе зона распространяется до внутренней полки профиля (стенкой будем называть полку профиля, лежащую в плоскости изгиба). Эти предпосылки позволяют составить уравнение равновесия с пределами интегрирования, независимыми от соотношения между размерами элементов поперечного сечения профиля, степени предварительного растяжения и кривизны изгиба.

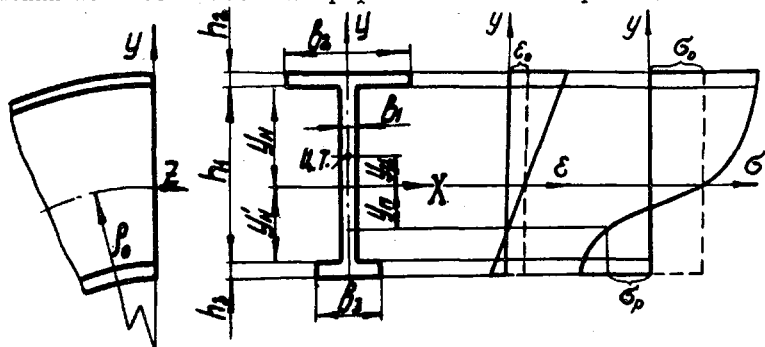
Уравнение равновесия, составленное на основе линейно-степенной аппроксимации диаграммы $\sigma - \varepsilon$ (4.27) [1], не позволяет выразить в явном виде ординату z_n , определяющую положение оси по-

ворота сечений по высоте поперечного сечения профиля, она определяется методом итераций. Поэтому автором получено упрощенное уравнение равновесия, в котором принята линейная аппроксимация диаграммы $\sigma - \varepsilon$ в пластически деформированной наружной зоне с переменным модулем линейного упрочнения $D_\varepsilon = \frac{\sigma_\delta - \sigma_0}{\varepsilon_\delta - \varepsilon_0}$, зависящим от деформации предварительного растяжения ε_0 .

Для всей внутренней зоны сечения принята линейная аппроксимация диаграммы $\sigma - \varepsilon$ с постоянным модулем упрочнения E .

Упрощенное уравнение равновесия (4.31) [I] выражает величину y_n в явном виде. Однако уравнение (4.27) [I] отвечает действительному распределению напряжений в поперечном сечении профиля лишь в частном случае нагружения РИ. В общем случае ось поворота сечений может располагаться не только в пределах высоты стенки, но и в пределах толщины внутренней полки. Действительно, так как при упруго пластическом изгибе с предварительным растяжением ось поворота сечений смещается от центра тяжести сечения к центру кривизны [I], при изгибе стенкой наружу Т-образного профиля с массивной внутренней полкой и "легкой" стенкой (центр тяжести сечения расположен вблизи внутренней полки) ось поворота сечений, сместясь от центра тяжести, располагается в пределах толщины внутренней полки. Соответственно граница упруго и пластически сжатых при изгибе зон поперечного сечения профиля может располагаться в пределах высоты стенки, толщины внутренней полки профиля и выйти за пределы сечения, т.е. вся внутренняя зона сечения может быть сжата упруго.

Комплексное сечение профиля и распределение деформаций и напряжений по высоте сечения профиля показаны на рис. I.



Р и с. I. Комплексное сечение профиля и система координат при анализе изгиба профилей с растяжением

При линейно-степенной аппроксимации диаграммы σ - ε деформация и напряжение в произвольном волокне, согласно [1], определяются следующими зависимостями:

деформация произвольного волокна

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \chi_0 y; \quad (2)$$

напряжение в произвольном волокне наружной зоны сечения
(при $y \geq 0$)

$$\sigma = K (\varepsilon_0 + \chi_0 y)^n; \quad (3)$$

напряжение в произвольном волокне упруго сжатой зоны
($0 > y > y_n$)

$$\sigma = E \left(\frac{\sigma_0}{E} + \chi_0 y \right); \quad (4)$$

напряжение в произвольном волокне пластически сжатой зоны
($y \leq y_n$)

$$\sigma = K \left(\frac{\sigma_0}{E} + \chi_0 y \right)^n, \quad (5)$$

где χ_0 - кривизна слоя, проходящего через оси поворота сечений при изгибе;

σ_0, ε_0 - напряжение и относительная деформация предварительного растяжения;

E - модуль упругости первого ряда;

K, n - константы аппроксимирующей кривой упрочнения.

Ордината границы упруго и пластически сжатых зон

$$y_n = - \frac{\sigma_0 + \sigma_p}{E \chi_0}, \quad (6)$$

где σ_p - напряжение предела пропорциональности материала.

Для случая расположения оси поворота сечений и границы упруго и пластически сжатых зон в пределах высоты стенки, т.е. при $y_n < h_1$ и $y_n \leq h_1 + y_n$ (см. рис. I), уравнение равновесия внешних и внутренних сил в поперечном сечении профиля можно записать в виде (пределы интегрирования см. на рис. I)

$$P = \sigma_2 K \int_{y_n+h_2}^{y_n+h_1} (\varepsilon_0 + \chi_0 y)^n dy + \sigma_1 K \int_0^{y_n} (\varepsilon_0 + \chi_0 y)^n dy + \sigma_1 E \int_{y_n}^0 \left(\frac{\sigma_0}{E} + \chi_0 y \right) dy + \sigma_1 K \int_{y_n}^{y_n'} \left(\frac{\sigma_0}{E} + \chi_0 y \right)^n dy + \sigma_3 K \int_{y_n'-h_3}^{y_n'} \left(\frac{\sigma_0}{E} + \chi_0 y \right)^n dy.$$

Учитывая, что $P = K \varepsilon_0^n F$, где F - площадь поперечного сечения профиля, после интегрирования, преобразований и введения безразмерных относительных величин получим

$$\frac{F}{h_1} \eta^n = \delta_2 \varphi_1 + \delta_1 \varphi_2 + \delta_3 \varphi_3, \quad (7)$$

где

$$\varphi_1 = \frac{(\eta + \bar{y}_H + \bar{h}_2)^{n+1} - (\eta + \bar{y}_H)^{n+1}}{n+1};$$

$$\varphi_2 = \frac{(\eta + \bar{y}_H)^{n+1} - \eta^{n+1} + \eta_p^{n+1} - (\eta \eta - 1 + \bar{y}_H)^{n+1}}{n+1} + A \frac{\eta^2 - \eta_p^2}{2};$$

$$\varphi_3 = \frac{(\eta \eta - 1 + \bar{y}_H)^{n+1} - (\eta \eta - 1 + \bar{y}_H - \bar{h}_3)^{n+1}}{n+1};$$

$$\bar{y}_H = \frac{y_H}{h_1}; \quad \bar{h}_2 = \frac{h_2}{h_1}; \quad \bar{h}_3 = \frac{h_3}{h_1}; \quad \eta = \frac{\varepsilon_0}{\chi_0 h_1}; \quad \eta \eta = \frac{\varepsilon y}{\chi_0 h_1} = \frac{\sigma_0}{E \chi_0 h_1}; \quad \eta_p = \frac{\sigma_p}{E \chi_0 h_1}; \quad A = \frac{E}{K (\chi_0 h_1)^n}$$

При изменении положения границы упруго и пластически сжатых зон или оси поворота сечения пределы интегрирования в уравнении равновесия изменятся, соответственно изменится и вид уравнений равновесия, поэтому уравнение (7) справедливо лишь при указанных условиях.

Произвольным условиям нагружения по схеме РИ, кроме уравнения (7), соответствуют следующие уравнения равновесия:

$$\frac{F}{h_1} \eta^n = \delta_2 \varphi_1 + \delta_1 \varphi_4 + \delta_3 \varphi_5; \quad (8)$$

$$\frac{F}{h_1} \eta^n = \delta_2 \varphi_1 + \delta_1 \varphi_6 + \delta_3 \varphi_7; \quad (9)$$

$$\frac{F}{h_1} \eta^n = \delta_2 \varphi_1 + \delta_1 \varphi_4 + \delta_3 \varphi_8; \quad (10)$$

$$\frac{F}{h_1} \eta^n = \delta_2 \varphi_1 + \delta_1 \varphi_6 + \delta_3 \varphi_9; \quad (11)$$

где

$$\varphi_4 = \frac{(\eta + \bar{y}_H)^{n+1} - \eta^{n+1}}{n+1} - A \left[\eta y (\bar{y}_H - 1) + \frac{(\bar{y}_H - 1)^2}{2} \right];$$

$$\varphi_5 = A \left[\eta y (\bar{y}_H - 1 + \eta y + \eta_p) + \frac{(\bar{y}_H - 1)^2 - (\eta y + \eta_p)^2}{2} \right] + \frac{\eta_p^{n+1} - (\eta y + \bar{y}_H - 1 - h_3)^{n+1}}{n+1};$$

$$\varphi_6 = \frac{(\eta + \bar{y}_H)^{n+1} - (\eta + \bar{y}_H - 1)^{n+1}}{n+1};$$

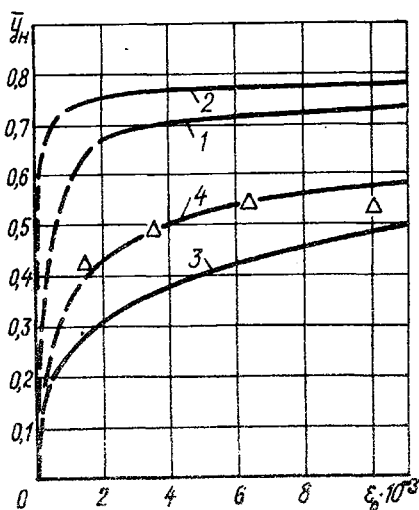
$$\varphi_7 = \frac{(\gamma + \bar{y}_H - 1)^{n+1} - \gamma^{n+1} + \gamma \rho^{n+1} - (\gamma \rho + \bar{y}_H - 1 - \bar{h}_3)^{n+1}}{2} + A \frac{\gamma^2 - \rho^2}{2};$$

$$\varphi_8 = \bar{h}_3 \left(\gamma + \bar{y}_H - 1 - \frac{\bar{h}_3}{2} \right);$$

$$\varphi_9 = \frac{(\gamma + \bar{y}_H - 1)^{n+1} - \gamma^{n+1}}{n+1} + A \frac{(\bar{y}_H - 1 - \bar{h}_3)(1 + \bar{h}_3 - \bar{y}_H - 2\gamma)}{2}.$$

Условие применимости уравнений (7)-(10) и схема решения задачи по определению ординаты оси поворота сечений показаны на рис.2. Уравнения (7)-(10) не решаются в явном виде относительно искомой величины \bar{y}_H , ее вычисляют методом итераций.

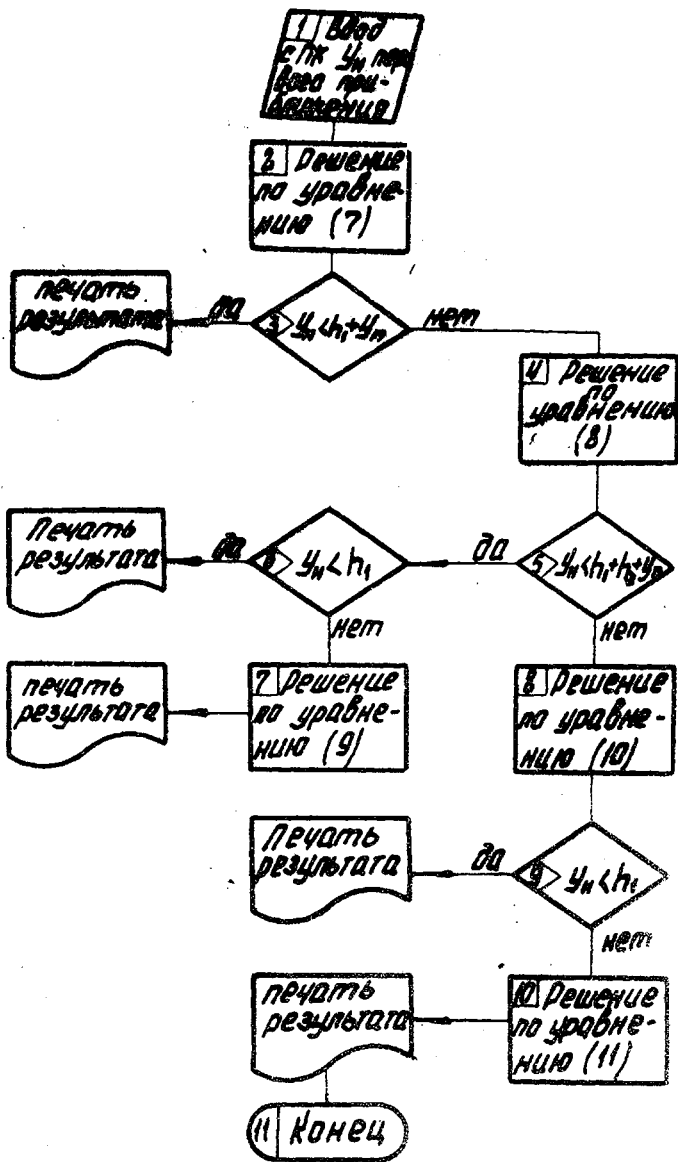
В качестве значения \bar{y}_H первого приближения можно использовать величину, соответствующую положению центра тяжести сечения.



Р и с.3. График зависимости $\bar{y}_H = f(\epsilon_0)$ для Т-образного профиля Пр II3-I из сплава Д16АМ при изгибе стенкой внутрь, рассчитанный по формулам: 1 - (4.27) [I]; 2 - (4.31) [I]; 3 - (7)-(II); 4 - усредненный результат эксперимента

Расчет величины \bar{y}_H целесообразно выполнять с использованием ЭВМ. На рис. 3 показаны зависимости величины \bar{y}_H от величины деформации предварительного растяжения ϵ_0 , рассчитанные по формулам (4.27) - кривая 1 и (4.31) - кривая 2 [I] и по уравнениям (7) - (10) - кривая 3 для Т-образного профиля Пр II3-I из сплава Д16АМ при изгибе стенкой внутрь с относительным наружным радиусом $\bar{R}_H = R_H/h_T = 14,2$. Кривая 4 построена по экспериментальным значениям ординаты \bar{y}_H , треугольниками отмечены ее средние значения. Ордината $\bar{y}_H = 0,0113$ соответствует положению оси поворота сечений

при чистом упруго пластическом изгибе. Расчет выполнен на ЭВМ ЕС-1022, программа составлена на языке "Фортран - IV".



Р и с. 2. Блок-схема алгоритма определения положения оси поворота сечений по уравнениям (7) - (11)

Как видно из рис. 3, кривая 3 лучше согласуется с ординатой \bar{y}_n при чистом изгибе и с экспериментальной кривой. При сравнении кривых 1 или 2 с кривой 3 видно, что формулы (4.27) и (4.31), приведенные в работе [1], могут дать завышенное вдвое и более значение \bar{y}_n , что приведет к существенным погрешностям в определении момента внутренних сил и пружинения при разгрузке.

Расхождение экспериментальной кривой 4 с кривой 3 объясняется отклонением действительных констант E, K, n материала от их усредненных значений, принятых в расчете, а также погрешностями в определении величины деформации предварительного растяжения ϵ_0 и усилию растяжения, обусловленными допусками на размеры элементов поперечного сечения профиля.

Л и т е р а т у р а

И. Лысов М.И. Теория и расчет процессов изготовления деталей методами гибки. М., "Машиностроение", 1966.

УДК 621.98.016.3

В.Ю.Арышенский

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ С МИНИМАЛЬНОЙ РАЗНОТОЛЩИННОСТЬЮ *

Все возрастающие требования к современным конструкциям летательных аппаратов диктуют необходимость изготовления равнопрочных деталей, особенно деталей, составляющих аэродинамический контур. Как известно, они представляют собой различного рода оболочки, часто сложной геометрической формы и чем сложнее контур, резче изменение кривизны, тем труднее ответить на вопрос - можно ли получить детали с равномерным распределением толщины стенки.

В настоящее время имеются лишь отдельные попытки решить этот вопрос в каждом конкретном случае на основе опытных данных и частных конструктивных решений (1), (2). Целью данной статьи является разработка общей методики получения равномерных осесимметричных оболочек и установление путей ее практической реализации.

* Работа выполнена под руководством к.т.н. И.И.Калужского