Как видно из рис. 3, кривая 3 лучше согласуется с ординатой $\bar{y}_н$ при чистом изгибе и с экспериментальной кривой. При сравнении кривых I или 2 с кривой 3 видно, что формулы (4.27) и (4.3I), приведенные в работе [I], могут дать завышенное вдвое и более значение $\bar{y}_н$, 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 по усилию растяжения, обусловленными допусками на размеры элементов поперечного сечения профиля.

Литература

I. 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 (I), (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

Поставленная задача решалась на основе моментной теории пластических анизотропных оболочек с учетом упрочнения материала.

Запишем основные исходные уравнения.

Уравнение равновесия (рис. I):

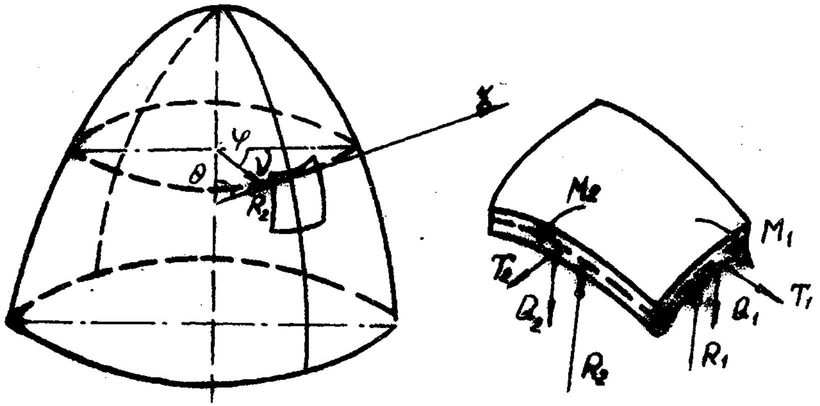


Рис. I. Геометрические и силовые параметры ооолочки

$$\frac{\nu}{R_1}\frac{dT_1}{d\theta}+(\bar{T}_1-\bar{T}_2)\cos\theta+\frac{\nu}{R_1}Q_1+q_1\nu=0;$$

$$\frac{\nu}{R_1}T_1+T_2\sin\theta-\frac{1}{R_1}\frac{d(\nu\bar{Q}_1)}{d\theta}-q_n\nu=0;$$

$$\nu\bar{Q}_1+\frac{\nu}{R_1}\frac{d\bar{M}_1}{d\theta}-(M_1-M_2)\cos\theta-\bar{L}\nu=0. \qquad (\mathrm{I})$$

Здесь $\bar{T}_1=\frac{T_1}{K}$; $\bar{T}_2=\frac{T_2}{K}$; $\bar{Q}_1=\frac{Q_1}{K}$;

$$T_{jk}=\int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}}\sigma_{jk}\,dz=\frac{h_0}{2}\lambda\int_{-1}^{+1}\sigma_{jk}\,dt;$$

$$M_{jk}=\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}}\sigma_{jk}\,z\,dz=\left(\frac{h_0}{2}\right)^2\lambda^2\int_{-1}^{+1}\sigma_{jk}\,t\,dt,\quad \lambda=\frac{h_k}{h_j},$$

где $\bar{q}_1$ и $\bar{q}_n$ – приведенные тангенциальные и нормальные поверхностные нагрузки равные

$$q_1=(q^{+}+q^{-}),\quad q_n=(q_n^{+}+q_n^{-}),\quad L=\frac{1}{2}(q_1^{+}-q_1^{-})h.$$

(Знак "+" относится к внешней поверхности, а "–" к внутренней)

Условие пластичности (3):

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\sigma_1^2 - 2\mu_{21}\sigma_1\sigma_2 + \bar{\mu}\sigma_2^2}\,, \qquad (2)$$

где $\bar{\mu} = \dfrac{\mu_{21}}{\mu_{12}}$.

Физические уравнения:

$$\sigma_1 = \frac{\mu_{12}}{1-\mu_{12}\mu_{21}}\,\frac{\sigma_{i1}}{e_{i1}}\left(\frac{e_1}{\mu_{12}} - e_2\right);$$

$$\sigma_2 = \frac{\mu_{12}}{1-\mu_{12}\mu_{21}}\,\frac{\sigma_{i1}}{e_{i1}}\left(e_1 + \frac{e_2}{\mu_{21}}\right). \qquad (3)$$

Степенной закон упрочнения

$$\sigma_{i1} = K e_{i1}^n\,, \qquad (4)$$

где

$$K = K_1\left(1-\mu_{12}\mu_{21}\right)^{-(1+0,5n)};$$

а $K_1 = \dfrac{\sigma_{\beta 1}(1+\delta_p)}{[\ln(1+\delta_p)]^n}$.

K – коэффициент, входящий в функцию упрочнения (4).

Интенсивность деформаций:

$$e_{i1} = \frac{1}{\sqrt{1-\mu_{12}\mu_{21}}}\sqrt{e_1^2 + 2\mu_{12}e_1e_2 + \bar{\mu}e_2^2}\,. \qquad (5)$$

Как видно, полученная система уравнений (I) – (5) является замкнутой, однако, пока не удается решить ее традиционными методами. В связи с этим был использован принципиально иной подход, который состоял в постановке обратной задачи.

Сущность обратной задачи заключается в том, что по заданной (окончательной) геометрической форме детали определяются силовые параметры, необходимые для ее получения. Такой подход позволяет уменьшить число неизвестных, входящих в систему (I)-(5). Однако приведенные моменты и усилия имеют интегральный вид, что вызывает определенные математические трудности при решении задачи. Чтобы их избежать, были введены специальные силовые функции, являющиеся аналогом интегралов от напряжений:

$$\Phi_K(-m, y_i) = \Phi_K(\gamma, y_i, y_1, y_2) = \int_{-1}^{+1} (y_0 + y_1 t + y_2 t^2)^{\gamma} t^2 dt, \qquad (6)$$

где y_0, y_1, y_2 – функции деформаций;

t – параметр интегрирования;

m, γ, K – коэффициенты, связанные с упрочнением.

Для дальнейшего упрощения функции были разложены в ряд:

$$\Phi_{2K} = 2e_{1c}^{\gamma_1}\left[\frac{1}{2K+1} + \sum_{z=1}^{\infty}\frac{\gamma_1(\gamma_1-1)\dots(\gamma_1-2z+1)}{(2z)!\,(2K+2z+1)}\left(\frac{\varkappa_1}{e_{1c}}\right)^{2z}\right];$$

$$\Phi_{2K+1} = 2e_{1c}^{\gamma_1}\left(\frac{\varkappa_1}{e_{1c}}\right)\left[\frac{1}{2K+3} + \sum_{z=1}^{\infty}\frac{\gamma_1(\gamma_1-1)\dots(\gamma_1-2z)}{(2z+1)!\,(2K+2z+3)}\left(\frac{\varkappa_1}{e_{1c}}\right)^{2z}\right]. \qquad (7)$$

Здесь e_{1c} – деформации срединной поверхности в направлении I;

$\varkappa$ – изменение кривизны детали в первом направлении.

В результате введения функций (6) приведенные усилия и моменты имеют следующий вид:

$$\bar{T}_1 = \frac{h_0}{2}\lambda_0\left[(e_{1c} + \mu_{12}e_{2c})\Phi(-m, y_i) + (\varkappa_1 + \mu_{12}\varkappa_2)\Phi_1(-m, y_i)\right];$$

$$\bar{T}_2 = \bar{\mu}\frac{h_0}{2}\lambda_0\left[(e_{2c} + \mu_{21}e_{1c})\Phi_0(-m, y_i) + (\varkappa_2 + \mu_{21}\varkappa_1)\Phi_1(-m, y_i)\right];$$

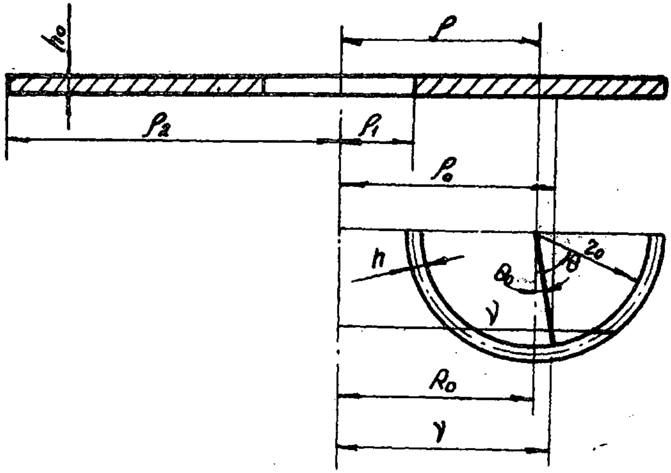
$$\bar{M}_1 = \frac{h_0^2}{4}\lambda_0^2\left[(e_{1c} + \mu_{12}e_{2c})\Phi_1(-m, y_i) + (\varkappa_1 + \mu_{12}\varkappa_2)\Phi_2(-m, y_i)\right];$$

$$\bar{M}_2 = \bar{\mu}\frac{h_0^2}{4}\lambda_0^2\left[(e_{2c} + \mu_{21}e_{1c})\Phi_1(-m, y_i) + (\varkappa_2 + \mu_{21}\varkappa_1)\Phi_2(-m, y_i)\right].$$

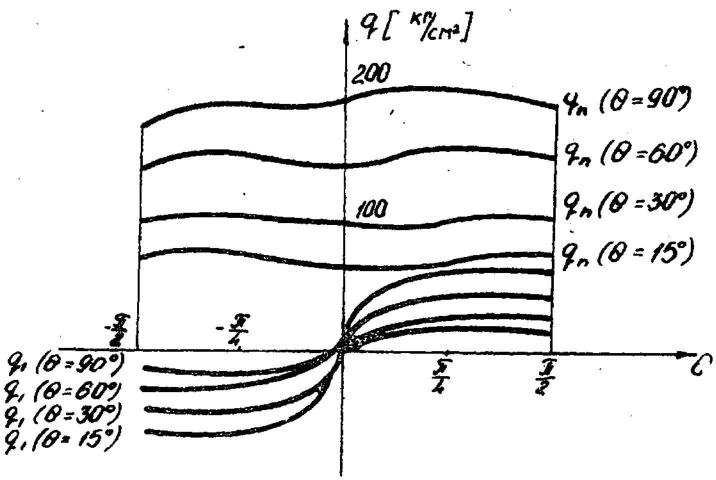
Если воспользоваться разложением (7), то уравнения (8) можно записать через элементарные функции.

Далее уравнения (I) разрешают относительно $\bar{q}_1$ и $\bar{q}_n$. Входящие в него неизвестные $\bar{T}_{ci}$ и $\bar{M}_i$ представляют в виде уравнения (8). Полученная система будет содержать определенные геометрические параметры, которые необходимо задать, чтобы получить численное решение.

Ц-3792

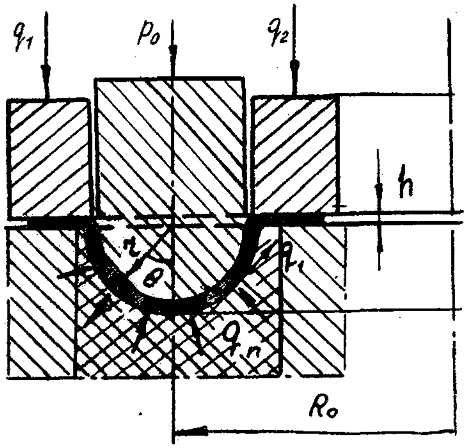


Р и с. 2. Изменение формы торообразной оболочки



Р и с. 3. Нагрузочные функции в процессе деформирования

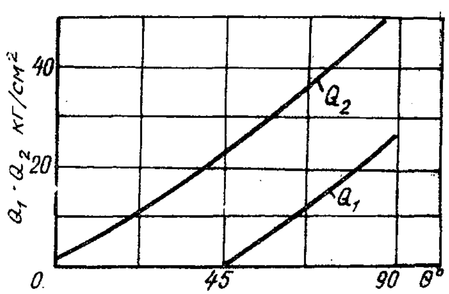
В качестве примера рассмотрим класс торообразных оболочек (рис. 2). Решение проводилось в два этапа. На первом из них по начальным и окончательным размерам были просчитаны возможные функции нагрузок, обеспечивающих равнотолщинность. Затем из всех возможных функций путем оптимизации была получена наиболее рациональная из них в технологическом плане, а именно – с равномерным утонением 10% и углом $\theta_0 = -20^0$ (угол между нейтральной точкой и вертикальным направлением).



Р и с. 4. Схема штамповки

Как видно из рис. 3, выбранная функция близка к равномерно распределенной (на всех этапах деформирования).

Принятая функция позволила выбрать схему штамповки (рис. 4), а также найти все необходимые силовые параметры, характер изменения которых представлен на рис. 3 и 5.



Р и с. 5. Изменение усилий прижима

Л и т е р а т у р а

1. М о ш н и н Е.Н. Технология штамповки крупногабаритных деталей. М., "Машиностроение", 1973.

2. М е л ь н и к о в Э.Л. Холодная штамповка днищ. М."Машиностроение", 1976.

3. А р ы ш е н с к и й Ю.М. Теория листовой штамповки анизотропных материалов. Издательство Саратовского университета, 1973.