Г. Д. Гавриленко, В. И. Мацнер, В. Н. Вайсман, Устойчивость конических оболочек со спиральным подкреплением, *Исслед. по теор. пластин и оболочек*, 1992, выпуск 25, 53–58

Литература

1. Антоненко Э.В. Свободные колебания и устойчивость оболочек с упругими краевыми ребрами // Прикл. механика. - 1975. - № 6. - С.44 - 50.

2. Антоненко Э.В., Зоголь В.Н. и др. Экспериментальное исследование устойчивости цилиндрических оболочек с упруго закреплёнными краями // Прикл. механика. - 1980. - № 10. - С.41 - 46.

3. Антоненко Э.В. Частоты свободных колебаний гладких и подкрепленных цилиндрических оболочек с упруго закрепленными краями // Прикл. механика. - 1989. - № 8. - С.122 - 126.

4. Заруцкий В.А. Приближенные формулы для вычисления минимальных собственных частот колебаний подкрепленных цилиндрических оболочек // Прикл. механика. - 1977. - № 5. - С.43 - 51.

5. Кан С.Н., Антоненко Э.В. Расчет круговых цилиндрических оболочек на изгиб // Расчет пространственных конструкций. - М.: Госстройиздат, 1964. - Вып.9. - С.161 - 186.

6. Кан С.Н. Строительная механика оболочек. - М.: Машиностроение, 1966. - 508 с.

Г.Д.Гавриленко, В.И.Мацнер, В.Н.Вайсман

УСТОЙЧИВОСТЬ КОНИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК СО СПИРАЛЬНЫМ ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

Традиционные способы подкрепления оболочек продольно-поперечным набором позволяют добиться определенного уровня повышения несущей способности конструкций. Дальнейшее увеличение ее возможно при использовании нетрадиционных типов подкрепляющего набора, в частности спирального. Если для цилиндрических оболочек этот вопрос в какой-то мере освещен в литературе [1 - 4], то для конических оболочек таких данных нет.

Необходимо разработать методику расчета для конических оболочек и оценить эффективность спирального подкрепления для них.

Рассматривается коническая оболочка со спиральным подкреплением.

Предлагается алгоритм численного расчета на устойчивость по методу конечных разностей, учитывающий неоднородность докритического напряженно-деформированного состояния. Определяется оптимальный угол наклона элементов жесткости к оси оболочки, обеспечивающий максимальное значение критической нагрузки. Оценивается относительная эффективность спирального подкрепления по сравнению с равными ему по весу шпангоутными.

Докритическое состояние конической оболочки со спиральным подкреплением определяется из решения уравнений равновесия

$$B_{11}E_{11}' + B_{12}E_{22}' + A_{11}K_{11}' + A_{12}K_{22}' = 0 ,$$

$$cK_{11} + C_2K_{11}'' + C_4K_{22} + C_6K_{22}'' + C_{10}E_{11} +$$

$$+ C_{12}E_{11}'' + C_{14}E_{22} + C_{17}E_{22}'' = -q , \qquad (I)$$

где

$$\frac{\partial(\ )}{A_1\partial\alpha_1} = (\ )' , \frac{\partial(\ )}{A_2\partial\alpha_2} = (\ )^{\cdot} , B = Et/(1-\nu^2), D = Bt^2/12 ,$$

$$B_{11} = B + 2EF_c\cos^4\theta/l_c , B_{12} = B_{21} = \nu B + EF_c\sin^2 2\theta/2l_c , B_{22} = B + \delta E_iF_i +$$

$$+2EF_c\sin^4\theta/l_c , A_{11} = 2ES_c\cos^4\theta/l_c , A_{12} = A_{21} = ES_c\sin^2 2\theta/2l_c , \qquad (2)$$

$$C_{14} = -k_2B_{22} , A_{22} = \delta E_iS_i + 2ES_c\sin^4\theta/l_c , D_{11} = D + (2EI_c\cos^4\theta + GI_{кр.c}\sin^2 2\theta/$$

$$/2)/l_c , D_{12} = \nu D + (EI_c - GI_{кр.c})\sin^2 2\theta/2l_c , c = -k_2A_{21} , C_2 = D_{11} , C_4 = -k_2A_{22} ,$$

$$C_6 = D_{12} , C_{10} = -k_2B_{21} , C_{12} = A_{11} , C_{17} = A_{12} , k_2 = \sin\beta/A_2 , A_2 = R_0 + \alpha_1\cos\beta ,$$

где q – величина внешнего давления, R_0 – радиус верхнего основания конуса, θ – угол наклона спирали к образующей конуса, β – угол при основании конуса. Величины E_{11}, E_{22}, K_{11}; K_{22} можно получить из [5, 6].

Для нахождения параметра критической нагрузки используются уравнения устойчивости

$$B_{11}E_{11}' + B_{12}E_{22}' + A_{11}K_{11}' + A_{12}K_{22}' + 2A_{33}\dot{K}_{12} + B_{33}\dot{E}_{12} = 0 ,$$

$$b E_{12} + b_1 \dot{E}_{22} + b_2 \dot{E}_{11} + b_3 E'_{12} + b_4 K_{12} + b_5 \dot{K}_{22} +$$

$$+ b_6 \dot{K}_{11} + b_7 K'_{12} + \dot{b}_{14} \theta_2 = 0 ,$$

$$c K_{11} + c_1 K'_{11} + c_2 K''_{11} + c_3 \ddot{K}_{11} + c_4 K_{22} + c_5 K'_{22} + c_6 K''_{22} +$$

$$+ c_7 \ddot{K}_{22} + c_8 \dot{K}_{12} + c_9 \dot{K}'_{12} + c_{10} E_{11} + c_{11} E'_{11} + c_{12} E''_{11} + \qquad (3)$$

$$+ c_{13} \ddot{E}_{11} + c_{14} \dot{E}_{22} + c_{15} E'_{22} + c_{16} \ddot{E}_{22} + c_{17} E''_{22} + c_{18} \dot{E}_{12} +$$

$$+ c_{19} \dot{E}'_{12} + c_{24} \theta_1 + c_{25} \theta'_1 + c_{26} \dot{\theta}_2 = 0 ,$$

где

$$b = -k_2 B_{33} \dot{\theta}_1 ,\ b_1 = B_{22} + k_2 A_{22} ,\ b_{22} = B_{21} + k_2 A_{21} ,$$

$$b_3 = B_{33} + 2 k_2 A_{33} ,\ b_4 = -2 k_2 A_{33} \dot{\theta}_1 ,\ b_5 = A_{22} + k_2 \mathcal{D}_{22} ,$$

$$b_6 = A_{21} + k_2 \mathcal{D}_{21} ,\ b_7 = 2(A_{33} + 2 k_2 \mathcal{D}_{33}) ,\ b_{14} = -k_2 T^0_{22} ,$$

$$T^0_{22} = B_{22} E^0_{22} + B_{21} E^0_{11} + A_{22} K^0_{22} + A_{21} K^0_{11} ,\ c_1 = -A_{11} \theta^0_1 ,$$

$$c_3 = \mathcal{D}_{21} ,\ c_4 = -A_{12} (\theta^0_1)' - k_2 A_{33} ,\ c_5 = -A_{12} \theta^0_1 ,$$

$$c_7 = \mathcal{D}_{22} ,\ c_8 = -2 A_{33} \theta^0_1 ,\ c_{10} = -B_{11} (\theta^0_1)' - k_2 B_{22} ,$$

$$c_{15} = -B_{12} \theta^0_1 ,\ c_{18} = -B_{33} \theta^0_1 ,\ c_{24} = -(T^0_{11})' ,$$

$$c_{25} = -T^0_{11} ,\ c_{26} = -T^0_{22} ,\ B_{21} = B_{12} ,$$

$$T^0_{11} = B_{11} E^0_{11} + B_{12} E^0_{22} + A_{11} K^0_{11} + A_{12} K^0_{22} ,\ A_{33} = A_{12} ,$$

$$\mathcal{D}_{22} = \mathcal{D} + \delta E_i I_i ,\ B_{33} = (1-\nu) B/2 + E F_c \sin^2 2\theta / 4 l_c , \qquad (4)$$

$$c_{11} = -B_{11} \theta^0_1 ,\ c_{13} = A_{21} ,\ c_{14} = -B_{11} (\theta^0_1)' - k_2 B_{21} ,$$

где $\theta_1^0=(w^0)'$, w^0 – упругие радиальные перемещения, индекс "0" относится к величинам докритического состояния.

Решения уравнений докритического состояния (I) находятся по методу конечных разностей (МКР). Параметр критической нагрузки определяется из уравнений (3) с использованием одинарных тригонометрических рядов и МКР.

Результаты расчета на устойчивость идеальных конических оболочек со спиральным подкреплением представлены на рис. I, 2. Действующая нагрузка – внешнее давление. На рисунке I представлена зависимость $\bar{q}=q_{кр}/q_{кл}=f(\theta)$, где $R_{cp}=(R_0+R_1)/2$, $q_{кл}=$ $=\pi E\sqrt{6}\,R_{cp}^{-5/2}/9\bar{L}(1-\nu^2)^{3/4}$, L – длина образующей конуса. Сплошные линии относятся к оболочкам с $\bar{L}=L/R_{cp}=4{,}14$, а штриховые – с $\bar{L}=2{,}07$ ($\bar{R}_{cp}=R_{cp}/t=1000$, $\beta=75^0$, $\bar{\ell}_c=\ell_c/t=200$ и $\bar{\ell}_c=300$). Поперечное сечение спиралей ($a\times H$) принято в виде квадрата с отношением $a/t=4$, где a – сторона квадрата ($a=H$). При расчетах принята сетка, имеющая 8I узел по длине оболочки.

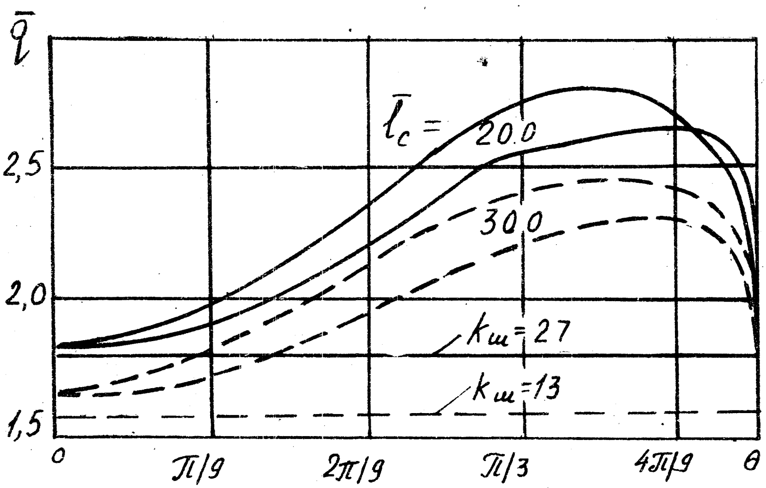

Рис. I

Как видно из рисунка, существует оптимальный угол наклона спиралей к образующей, обеспечивающей максимальное значение критической нагрузки в зависимости от расстояния между спиралями ℓ_c. Так, например, при $\bar{L}=4{,}14$ максимальное значение $\bar{q}=2{,}84$ соответствует примерно $\theta=70^0$ ($\bar{\ell}_c=200$) и $\bar{q}=2{,}67$ при $\theta=80^0$

($\bar{l}_c$ = 300). Увеличение расстояния между спиралями снижает $\bar{q}_{max}$ при фиксированной длине на 6 % при $\bar{L}$ = 4,14 и на 7 % при $\bar{L}$ =2,07.

Горизонтальные прямые на рис.1 соответствуют конической оболочке, подкрепленной шпангоутами, равной по весу оболочке со спиральным подкреплением. Число шпангоутов ($K_ш$) и число спиралей (N_θ) определяются формулами

$$K_ш = 2L\sin\beta/l_c \; ; \; N_\theta = 2\pi A_2 \cos\theta/l_c \, .$$

Сплошная прямая - оболочке с $\bar{L}$ = 4,14, $\bar{l}_c$= 300, штриховая - $\bar{L}$ = 2,07, $\bar{l}_c$ = 300.

Из рисунка следует, что для рассмотренных параметров обшивки и ребер спиральное подкрепление предпочтительнее. В диапазоне $0 \leq \theta \leq \pi/9$ и при θ, близком к $\pi/2$, оба подкрепления приводят к мало отличающимся значениям $\bar{q}$, а при $\theta > \pi/9$ спиральное подкрепление более эффективно, чем подкрепление шпангоутами.

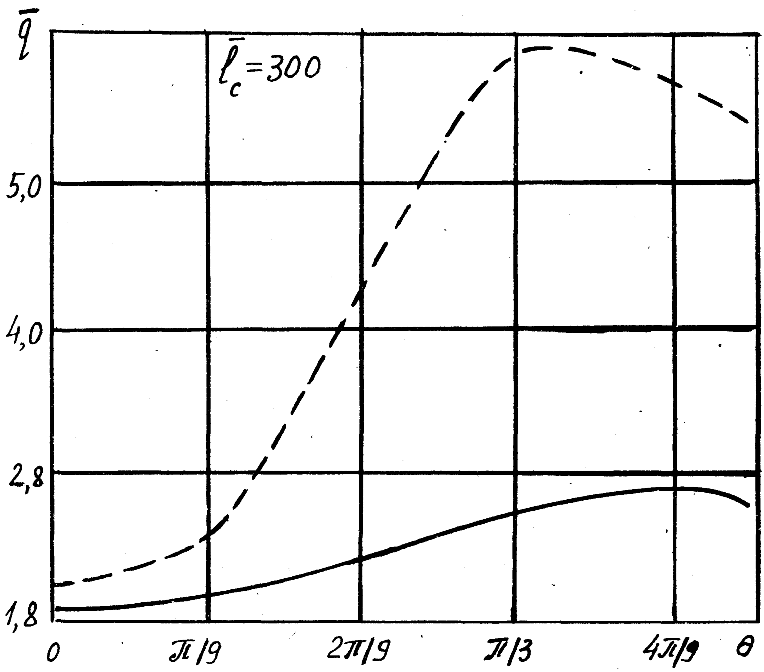

Рис. 2

Увеличение площадей поперечных сечений спиралей (рис.2) приводит к росту $\bar{q}$ более чем в 2 раза при тех же $\bar{l}_c$.

Литература

1. Соонг Цай-чжен. Устойчивость цилиндрических оболочек с эксцентричным спиральным подкреплением // Ракет. техника и космонавтика. - 1969. - Т.7. - № 1. - С.74 - 84.
2. Маневич А.И. Устойчивость и оптимальное проектирование подкрепленных оболочек. Киев - Донецк, 1979. - 152 с.
3. Зубков Г.Д., Нерубайло Б.В., Федин И.И. К определению устойчивости цилиндрических оболочек со спиральным подкреплением // Численные и экспериментальные методы исследования прочности, устойчивости и колебания конструкций ЛА. Тр. МАИ. - 1983. - С.21 - 25.
4. Образцов И.Ф., Нерубайло Б.В., Зубков Г.Д., Федик И.И. К выбору оптимальных параметров цилиндрических оболочек с эксцентричным спиральным подкреплением по критерию устойчивости // Расчеты на прочность. - 1985. - Вып.26. - С.3 - 19.
5. Гавриленко Г.Д. Основные нелинейные и линеаризованные уравнения теории несовершенных ребристых оболочек вращения // Прикл. механика. - 1983. - № 7. - С.55 - 60.
6. Гавриленко Г.Д. Устойчивость несовершенных сферических поясов при внешнем давлении // Докл. АН УССР. - 1988. - № 7. - С.33 - 36.

А.Ю.Евкин

О НОВОМ ПОДХОДЕ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ КРИТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ВЫПУКЛОЙ ПОЛОГОЙ ОБОЛОЧКИ С НАЧАЛЬНЫМИ НЕСОВЕРШЕНСТВАМИ

Известные методы определения критических нагрузок оболочек, имеющих несовершенства формы срединной поверхности, в настоящее время, как правило, не используются в инженерной практике [1], поскольку предполагают знание полной картины начальной погиби. Замер поля начальных несовершенств натурных конструкций является трудоемким процессом и должен выполняться для каждой конкретной оболочки. Кроме того, на величину критической нагрузки существенным образом могут влиять остаточные напряжения, возникающие как при изготовлении оболочки, так и в процессе ее эксплуатации.