

531.534: 620.22- 419.8

## РЕШЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ СТАТИКИ АНИЗОТРОПНЫХ КОМПОЗИТНЫХ КОРПУСОВ АНТЕННЫХ РЕФЛЕКТОРОВ

Асп. Н. А. ДАНГ

*Показано влияние на деформацию корпуса рефлектора учёта нелинейных деформационных соотношений. В качестве метода решения применяется метод конечных элементов (МКЭ), а для решения нелинейной задачи – метод Ньютона.*

*Influence on a strain of the case of a reflector of the account of nonlinear deformation ratio is displayed. The finite element method alongside with Newton method (for a nonlinear task) were applied*

Деформированное состояние будем описывать компонентами тензора деформаций Грина-Лагранжа  $\mathbf{e}$  и выделим в них линейные  $\boldsymbol{\varepsilon}$  и нелинейные  $\boldsymbol{\eta}$  (квадратичные) составляющие

$$\mathbf{e} = \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\eta}. \quad (1)$$

Для решения нелинейной задачи статики воспользуемся итерационным шаговым методом. Будем считать, что для  $m$ -го шага все деформации известны

$$\mathbf{e}_{(m)} = \boldsymbol{\varepsilon}_{(m)} + \boldsymbol{\eta}_{(m)}. \quad (2)$$

Здесь и далее нижним индексом в круглых скобках будем отмечать принадлежность к конкретному шагу решения. Деформации на  $(m+1)$ -ом шаге требуется определить

$$\mathbf{e}_{(m+1)} = \boldsymbol{\varepsilon}_{(m+1)} + \boldsymbol{\eta}_{(m+1)} = \mathbf{e}_{(m)} + \Delta \mathbf{e}_{(m)}, \quad (3)$$

$$\text{где } \Delta \mathbf{e}_{(m)} = (\boldsymbol{\varepsilon}_{(m+1)} + \boldsymbol{\eta}_{(m+1)}) - (\boldsymbol{\varepsilon}_{(m)} + \boldsymbol{\eta}_{(m)}) = \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{(m)} + \Delta \boldsymbol{\eta}_{(m)}. \quad (4)$$

Для выражения (4) заметим, что компоненты приращения деформаций  $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{(m)}$  пропорциональны приращениям перемещений  $\Delta \mathbf{U}_{(m)}$  (т.е. они являются линеаризованными относительно  $m$ -го шага), а в нелинейные приращения деформаций  $\Delta \boldsymbol{\eta}_{(m)}$  входят коэффициенты, пропорциональные квадратам или произведениям приращений перемещений  $\Delta \mathbf{U}_{(m)}$ . По известным приращениям перемещений  $\Delta \mathbf{U}_{(m)}$  всегда можно вычислить приращение полных деформаций, воспользовавшись (4).

Для описания напряженного состояния будем пользоваться компонентами напряжений второго тензора Пиолы-Кирхгофа  $\boldsymbol{\sigma}$  и считать, что на  $(m)$ -м шаге нам эти напряжения известны, а на  $(m+1)$ -м шаге их требуется определить

$$\boldsymbol{\sigma}_{(m+1)} = \boldsymbol{\sigma}_{(m)} + \Delta \boldsymbol{\sigma}_{(m)}. \quad (5)$$

Для линейно-упругого тела приращения напряжений  $\Delta\sigma_{(m)}$  пропорциональны приращениям деформаций  $\Delta e_{(m)}$ , т.е.

$$\Delta\sigma_{(m)} = \mathbf{E} \Delta e_{(m)}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{E}$  представляет коэффициенты упругости (при использовании векторно-матричной символики  $\mathbf{E}$  будет квадратной, симметричной, положительно определённой матрицей). Зная приращения перемещений  $\Delta U_{(m)}$ , вычисляются  $\Delta e_{(m)}$  (4), затем приращения напряжения (6) и напряжения (5).

Будем считать, что  $(m+1)$ -я итерация приводит к равновесному состоянию, и для этого равновесного состояния запишем формулировку принципа возможных перемещений. Считая силы “мертвыми”, пользуясь компонентами тензора деформаций Грина—Лагранжа и компонентами тензора напряжений Пиолы—Кирхгофа, эту формулировку можно записать относительно начальной конфигурации системы

$$\iiint_V \delta e_{(m+1)}^T \sigma_{(m+1)} dV = \delta f_{(m+1)} \quad (7)$$

где  $\delta f_{(m+1)} = \iiint_V \delta U_{(m+1)}^T g dV + \iint_{S_p} \delta U_{(m+1)}^T p dS$  - работа внешних сил на возможных перемещениях;  $V$  - объём рассматриваемого тела;  $S_p$  - поверхность, где заданы поверхностные силы;  $g$  - объёмные силы;  $\delta e$  - возможные деформации;  $\delta U$  - возможные перемещения. Считается, что на поверхности  $S_U = S - S_p$  заданы нулевые перемещения и  $U = \delta U = 0$  на поверхности  $S_U$ .

Поскольку на  $(m)$ -м шаге перемещения  $U_{(m)}$ , деформации  $e_{(m)}$  считаются известными, то в (7) для вариаций перемещений и деформаций следует воспользоваться выражениями

$$\delta U_{(m+1)} = \delta \Delta U_{(m)}; \quad \delta e_{(m+1)} = \delta \Delta e_{(m)} = \delta \Delta \varepsilon_{(m)} + \delta \Delta \eta_{(m)},$$

тогда с учётом (4), (5), (6) уравнение (7) можно записать в виде

$$\iiint_V (\delta \Delta \varepsilon_{(m)}^T + \delta \Delta \eta_{(m)}^T) (\sigma_{(m)} + \mathbf{E} (\Delta \varepsilon_{(m)} + \Delta \eta_{(m)})) dV = \delta f_{(m+1)}, \quad (8)$$

где 
$$\delta f_{(m+1)} = \iiint_V \delta \Delta U_{(m)}^T g dV + \iint_{S_p} \delta \Delta U_{(m)}^T p dS.$$

Поскольку слагаемые в (8) имеют разные порядки малости и можно считать, что выражения:

$$\iiint_V \delta \Delta \varepsilon_{(m)}^T \mathbf{E} \Delta \eta_{(m)} dV = 0(\Delta \varepsilon^3);$$

$$\iiint_V \delta \Delta \eta_{(m)}^T \mathbf{E} \Delta \varepsilon_{(m)} dV = 0(\Delta \varepsilon^3);$$

$$\iiint_V \delta \Delta \eta_{(m)}^T \mathbf{E} \Delta \eta_{(m)} dV = 0(\Delta \varepsilon^4);$$

имеют третий и четвёртый порядки малости. Оставив в (8) слагаемые, имеющие первый и второй порядки малости, окончательно можно записать

$$\iiint_V (\delta \Delta \varepsilon_{(m)}^T \mathbf{E} \Delta \varepsilon_{(m)} + \delta \Delta \eta_{(m)}^T \sigma_{(m)}) dV =$$

$$\theta = \iiint_V \delta \Delta U_{(m)}^T \mathbf{g} dV + \iint_S \delta \Delta U_{(m)}^T p dS - \iiint_V (\delta \Delta \varepsilon_{(m)}^T \sigma_{(m)}) dV. \quad (9)$$

Полученная формулировка задачи (9) позволяет для МКЭ построить итерационный процесс решения, соответствующий методу Ньютона.

Рассмотрим оболочку вращения, представляющую собой поверхность, образованную вращением образующей вокруг оси. В качестве переменных величин, характеризующих местную геометрию оболочки вращения, выберем радиус кривизны дуги меридиана  $R_1$ , второй главной радиус  $R_2$  и угол  $\theta$  между нормалью к срединной поверхности и осью симметрии (рис. 1). Радиус  $R_2$  равен расстоянию от срединной поверхности по нормали до точки пересечения с осью симметрии. Все три введенные выше величины ( $R_1, R_2$  и  $\theta$ ) являются функцией расположения точки А на поверхности.

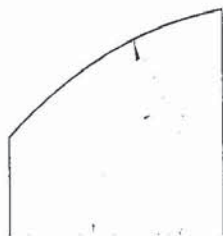


Рис. 1. Геометрические характеристики оболочки вращения

Форма срединной поверхности оболочки после деформации носит название упругой поверхности оболочки. Она может быть охарактеризована тремя проекциями полного перемещения произвольно взятой точки А (рис. 2) на оси  $x, y$  и  $z$ . Обозначим эти проекции соответственно через  $u, v$  и  $w$ .

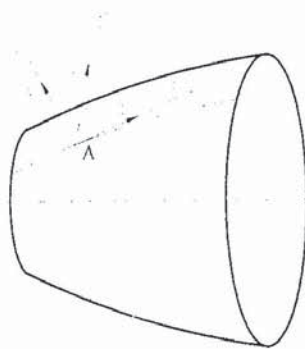


Рис. 2. Связанная система координат и перемещения

Оболочки вращения будем набирать конечными элементами конических оболочек. Коническую оболочку (рис. 3) будем характеризовать начальным радиусом параллели  $r_0$  и углом конусности  $\theta$ , который отсчитывается от оси вращения до вектора внешней нормали  $\vec{n}$  по направлению часовой стрелки (рис. 1, 3).

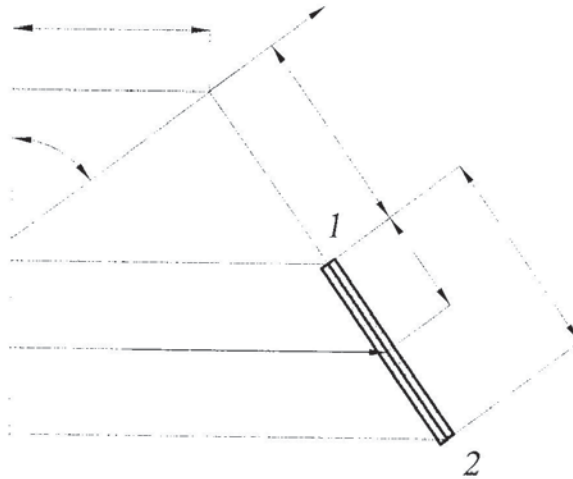


Рис.3. Координаты отсчета конечного элемента

Для конической оболочки при осесимметричном деформировании деформационные соотношения имеют вид [1]:

$$\left. \begin{aligned} e_x &= u' + \frac{1}{2}(w')^2 \\ e_y &= \varepsilon_y = c_r u + s_r w \\ e_{xy} &= \gamma_{xy} = -c_r v + v' \\ \kappa_x &= -w'' \\ \kappa_y &= -c_r w' - s_r^2 w - s_r c_r u \\ \chi_{xy} &= -2s_r c_r v + 2s_r v' \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где  $u, v, w$  – меридианальное, окружное и нормальное перемещения;  $c_r = \frac{\cos \theta}{r}$ ;  $s_r = \frac{\sin \theta}{r}$ ;  $(\cdot)' = \frac{d}{dx}(\cdot)$ ;

$x$  – координата вдоль образующей от начального сечения КЭ;  $\theta$  – угол между внешней нормалью и осью вращения;  $r$  – радиус параллели  $r = r_0 + x \cos \theta$ ;  $r_0$  – радиус параллели в начальном сечении конуса. Как видно из (10), в деформационных соотношениях только в деформации  $e_x$  содержится не-

линейная составляющая  $\varepsilon_x = \frac{1}{2}(w')^2$

Тогда согласно (4) определяем полное приращение меридианальной деформации

$$\Delta e_{x(m)} = e_{x(m+1)} - e_{x(m)} = (u'_{(m)} + \Delta u'_{(m)}) + \frac{1}{2}(w'_{(m)} + \Delta w'_{(m)})^2 -$$

$$- u'_{(m)} - \frac{1}{2}(w'_{(m)})^2 = \Delta u'_{(m)} + w'_{(m)} \Delta w'_{(m)} + \frac{1}{2}(\Delta w'_{(m)})^2$$

Обозначив  $\alpha_{(m)} = w'_{(m)}$  и  $\Delta \alpha_{(m)} = \Delta w'_{(m)}$ , получим для приращения деформации  $\Delta e_{x(m)}$  линейризованные составляющие

$$\Delta \varepsilon_{x(m)} = \Delta u'_{(m)} + \alpha_{(m)} \Delta w'_{(m)} \quad (11)$$

и нелинейные составляющие

$$\Delta \gamma_{x(m)} = \frac{1}{2}(\Delta w'_{(m)})^2 \quad (12)$$

Линеаризованные обобщенные деформационные соотношения представим в матричном форме

$$\Delta \varepsilon_{(m)} = \mathbf{L}_{(m)} \Delta \mathbf{U}_{(m)} \quad (13)$$

или в развернутом виде

$$\begin{bmatrix} \Delta e_{x(m)} \\ \Delta e_{y(m)} \\ \Delta g_{xy(m)} \\ \Delta k_{x(m)} \\ \Delta k_{y(m)} \\ \Delta c_{xy(m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d/dx & w'_{(m)} d/dx & 0 \\ c_r & s_r & 0 \\ 0 & 0 & -c_r + d/dx \\ 0 & -d^2/dx^2 & 0 \\ -s_r c_r & -s_r^2 - c_r d/dx & 0 \\ 0 & 0 & -2s_r c_r + 2s_r d/dx \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{(m)} \\ \Delta w_{(m)} \\ \Delta v_{(m)} \end{bmatrix}$$

Такая же связь справедлива и для возможных линеаризованных обобщенных деформаций

$$\delta \Delta \varepsilon_{(m)} = \mathbf{L}_{(m)} \delta \Delta \mathbf{U}_{(m)} \quad (13')$$

Соотношения упругости с учетом начальных и температурных деформаций, аналогичные (6), для многослойной оболочки представим в виде:

$$\Delta \mathbf{N}_{(m)} = \mathbf{D} \Delta \mathbf{e}_{(m)} + \Delta \mathbf{N}_0 - \Delta \mathbf{N}_T \quad (14)$$

где  $\Delta \mathbf{N}_{(m)} = [\Delta N_{x(m)}, \Delta N_{y(m)}, \Delta N_{xy(m)}, \Delta M_{x(m)}, \Delta M_{y(m)}, \Delta M_{xy}]$

- приращение внутренних силовых факторов;

$$\Delta \mathbf{e}_{(m)} = [\Delta e_{x(m)}, \Delta e_{y(m)}, \Delta \gamma_{xy(m)}, \Delta \kappa_{x(m)}, \Delta \kappa_{y(m)}, \Delta \chi_{xy(m)}]^T$$

- приращение обобщенных деформаций;  $\mathbf{D}$  - матрица приведённых жёсткостных характеристик стенки оболочки; приращение начальных силовых факторов  $\Delta \mathbf{N}_0 = 0$ . Начальные составляющие сило-

вых факторов учитываются на первом шаге

$$N_{10} = \sum_{k=1}^n (E_{11}^{[k]} \varepsilon_{10} + E_{12}^{[k]} \varepsilon_{20})(z_{k+1} - z_k) = B_{11} \varepsilon_{10} + B_{12} \varepsilon_{20}$$

$$M_{10} = C_{11} \varepsilon_{10} + C_{12} \varepsilon_{20}; \quad N_{120} = M_{120} = \mathbf{0};$$

приращение температурных составляющих внутренних силовых факторов  $\Delta \mathbf{N}_y = 0$ , а на первом шаге вычисляем:

$$N_{1r} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{1r} dz, \quad M_{1r} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{1r} z dz, \quad (1 \rightarrow 2) \quad N_{12r} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{12r} dz, \quad M_{12r} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{12r} z dz$$

где температурные составляющие напряжений вычисляются через температурные деформации

$$\sigma_{1r} = (E_{11} \alpha_1^o + E_{12} \alpha_2^o) \Delta T \quad (1 \rightarrow 2),$$

здесь  $\Delta T$  - приращение температуры;  $\alpha_1^o, \alpha_2^o$  - коэффициенты линейного температурного расширения (КЛТР) в меридиональном и окружном направлениях;  $E_{ij}$  - коэффициенты упругости. С учётом (13), (13') первое слагаемое левой части (9) для конической оболочки можно представить так

$$\iiint_V (\delta \Delta \varepsilon_{(m)}^T \mathbf{E} \Delta \varepsilon_{(m)}) dV = 2\pi \int_0^l (\mathbf{L}_{(m)} \delta \Delta \mathbf{U}_{(m)})^T \mathbf{D} \mathbf{L}_{(m)} \Delta \mathbf{U}_{(m)} r dx, \quad (15)$$

где  $l$  - длина образующей конической оболочки.

Для определения второго слагаемого в левой части уравнения (9) воспользуемся (12) и запишем, что

$$\iiint_V \delta \Delta \eta_{(m)}^T \sigma_{(m)} dV = 2\pi \int_0^l \delta \Delta w'_{(m)} N_{x(m)} \Delta w'_{(m)} r dx. \quad (16)$$

Для КЭ конической оболочки аппроксимацию приращений перемещений принимаем в виде

$$\Delta \mathbf{U}_{(m)} = \mathbf{\Phi} \mathbf{a} \quad \text{или} \quad \begin{bmatrix} \Delta u_{(m)} \\ \Delta w_{(m)} \\ \Delta v_{(m)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & x & x^2 & x^3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x \end{bmatrix} \mathbf{a}$$

где  $\mathbf{a} = [a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8]^T$  - вектор-столбец коэффициентов аппроксимации. (Потом от этих коэффициентов выполняется стандартный переход к глобальным степеням свободы КЭ.) Приращение угла поворота нормали будет определено

$$\Delta \omega_{(m)} = \mathbf{\Omega} \mathbf{a} = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 2x \ 3x^2 \ 0 \ 0] \mathbf{a}$$

Линеаризованные приращения деформаций для выбранной аппроксимации перемещений будут иметь следующий вид  $\Delta \mathbf{e}_{(m)} = \mathbf{L}_{(m)} \Delta \mathbf{U}_{(m)} = \mathbf{B} \mathbf{a} =$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \omega_{(m)} & \omega_{(m)}2x & \omega_{(m)}3x^2 & 0 & 0 \\ c_r & c_r x & s_r & s_r x & s_r x^2 & s_r x^3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -c_r & 1 - c_r x \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & -6x & 0 & 0 \\ -s_r c_r & -s_r c_r x & -s_r^2 & -s_r^2 x - c_r & -s_r^2 x^2 - 2c_r x^2 & -s_r^2 x^3 - 3c_r x^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2s_r c_r & -2s_r c_r x + 2s_r \end{bmatrix} \mathbf{a}$$

Здесь учитывается, что

$$\Delta \varepsilon_{x(m)} = a_2 + \omega_{(m)}(a_4 + 2x a_5 + 3x a_6); \Delta s_{y(m)} = c_r(a_1 + x a_2) + s_r(a_3 + x a_4 + x^2 a_5 + x^3 a_6)$$

$$\Delta \gamma_{xy(m)} = -c_r a_7 + (-c_r x + 1)a_8; \Delta \kappa_{x(m)} = -2a_5 - 6x a_6;$$

$$\Delta \kappa_{y(m)} = -s_r c_r a_1 - s_r c_r x a_2 - s_r^2 a_3 + (-s_r^2 x - c_r) a_4 + (-s_r^2 x^2 - 2c_r x) a_5 + (-s_r^2 x^3 - 3c_r x^2) a_6;$$

$$\Delta \chi_{xy(m)} = -2s_r c_r a_7 + (-2s_r c_r x + 2s_r) a_8.$$

Для работы приращений внутренних сил получаем

$$\iiint_V (\delta \Delta \mathbf{e}_{(m)}^T \mathbf{E} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{(m)}) dV = 2\pi \delta \mathbf{a}^T \mathbf{K}_a \mathbf{a},$$

где 
$$\mathbf{K}_a = \int_0^1 \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} r dx$$

Аналогично получаем 
$$\iiint_V \delta \Delta \boldsymbol{\pi}_{(m)}^T \boldsymbol{\sigma}_{(m)} dV = 2\pi \delta \mathbf{a}^T \mathbf{S}_a \mathbf{a},$$

где 
$$\mathbf{S}_a = \int_0^1 \boldsymbol{\Phi}^T N_{x(m)} \boldsymbol{\Phi} r dx.$$

При объемных силах  $\mathbf{g}=0$  и поверхностных силах  $\mathbf{p} \neq \mathbf{0}$  получаем

$$\iint_{S_p} \delta \Delta \mathbf{U}_{(m+1)}^T \mathbf{p} dS = 2\pi \delta \mathbf{a}^T \mathbf{P}_{ap},$$

$$\iiint_V (\delta \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{(m)}^T \mathbf{s}_{(m)}) dV = 2\pi \delta \mathbf{a}^T \mathbf{P}_{a(m)},$$

где 
$$\mathbf{P}_{a(m)} = \int_0^1 \mathbf{B}^T \mathbf{N}_{(m)} r dx; \mathbf{P}_{ap} = \int_0^1 \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{p} r dx.$$

Переход от коэффициентов аппроксимации  $\mathbf{a}$  к глобальным степеням свободы  $\Delta \mathbf{q}_{(m)}$  осуществляется стандартным методом замены переменных. Компоненты  $\Delta \mathbf{q}_{(m)}$  содержат приращения радиальных, осевых, касательных перемещений и углов поворота нормалей в узловых сечениях КЭ.

После формирования разрешающей СЛАУ МКЭ с учетом граничных условий будем иметь:

$$(\mathbf{K}_{(m)} - \mathbf{S}_{(m)}) \Delta \mathbf{q}_{(m)} = \Delta \mathbf{P}_{(m)},$$

где  $\Delta \mathbf{P}_{(m)} = \mathbf{P}_p - \mathbf{P}_{(m)}$  - невязка внешних и внутренних сил. Определив  $\Delta \mathbf{q}_{(m)}$ , вычисляем в середине КЭ приращения линейаризованных деформаций  $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{(m)} = \mathbf{B}_{(x=1/2)} \Delta \mathbf{q}_{(m)}$ , приращение нелинейных деформаций в середине КЭ  $\Delta \mathcal{W}_{x(m)} = \frac{1}{2} (\Delta w'_{(m)})^2$ , полное приращение деформаций в середине КЭ  $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{x(m)} = \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{x(m)} + \Delta \boldsymbol{\eta}_{x(m)}$ , углы поворота нормали в середине КЭ  $\omega_{(m+1)} = \omega_{(m)} + \Delta \omega_{(m)}$  и внутренние силовые факторы в середине КЭ  $\mathbf{N}_{(m+1)} = \mathbf{N}_{(m)} + \mathbf{D} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_{(m)}$ . После этого можно переходить к следующему шагу итерационного процесса.

Сходимость решения задачи обычно оценивают по энергетической норме, и полученное решение называют обобщенным. Следует помнить, что решение получено на дискретных носителях аппроксимации. Также следует помнить, что точное решение в точке экспериментально подтвердить практически невозможно, поскольку в эксперименте используется конечная база тензомера.

Проверка достоверности разработанной модели осуществлялась аналогично [3] на экспериментальных образцах трёхслойных параболических оболочек, полученных склеиванием несущих слоев со слоем заполнителя при нагреве. Оболочки имели диаметр 649 мм, при этом каждую из обшивок рефлектора (НС) формовали из четырёх монослоев углепластика со следующей структурой укладки:  $[0^0 / -60^0 / 60^0 / 0^0]$ ;  $[0^0 / -70^0 / 70^0 / 0^0]$ ;  $[0^0 / -75^0 / 75^0 / 0^0]$ . Толщина НС после формования составляла 0,45...0,48 мм. Толщина монослоя  $h=0,12$ мм. Заполнитель – алюминиевые соты высотой  $H=10$ мм. Оправка аппроксимируется сферическим сегментом с внутренним радиусом (совпадающим с радиусом оправки)  $R_{опр} = 1100$ мм и углом полураствора  $\varphi = 16^0$ .

Поскольку формование обшивок и последующее склеивание оболочки рефлектора происходит при повышенной температуре, в расчетах учитываются зависимости свойств углепластика от температуры. Так, например, при температуре 175°С были приняты следующие свойства углепластика:  $E_1 = 128,8$ ГПа;  $E_2 = 2,8$ ГПа;  $G_{12} = 0$ ;  $G_{13} = G_{23} = G_{12}$ ;  $\nu_{12} = 0,33$ ;  $\alpha_1^0 = -2,125 \times 10^{-6}$  1/град.;  $\alpha_2^0 = 63 \times 10^{-6}$  1/град. Результаты расчетов и экспериментальных исследований удовлетворительно согласуются для угла укладки  $\varphi = 67^0$  [4].

При решении нелинейных задач было выявлено, что при углах укладки  $\varphi < 67^0$ , рефлектор имеет форму, похожую на ту, которая представлена на рис.4.



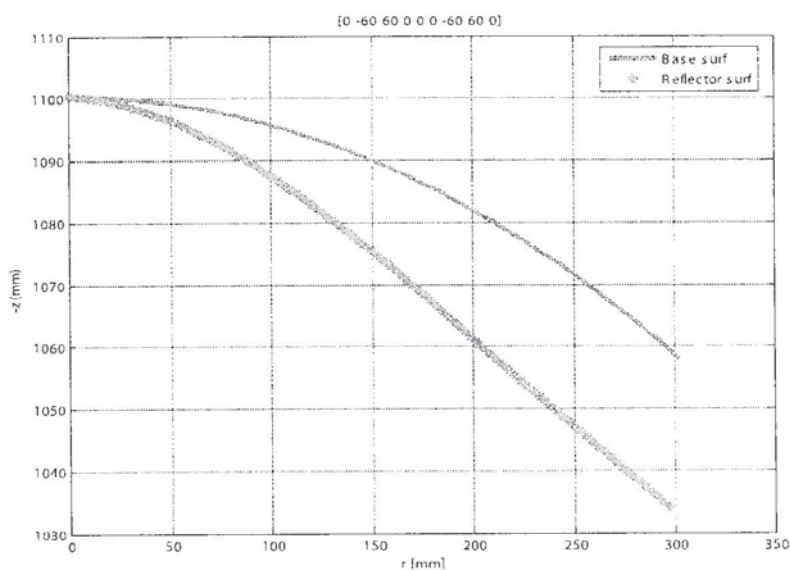


Рис.4. Отклонение профиля поверхности оболочки (схема армирования НС/0°/-60°/+60°/0°) после склеивания с нагревом; 1- оправка; 2- рефлектор.

Для углов укладки  $\varphi > 67^\circ$  характерная форма рефлектора имеет вид, показанный на рис.6. В диапазоне  $67 \leq \varphi \leq 74$  рефлектора принимает форму, показанную на рис.5. Можно предположить, что в этом диапазоне углов укладки имеет место смена равновесных форм, аналогичная потери устойчивости.

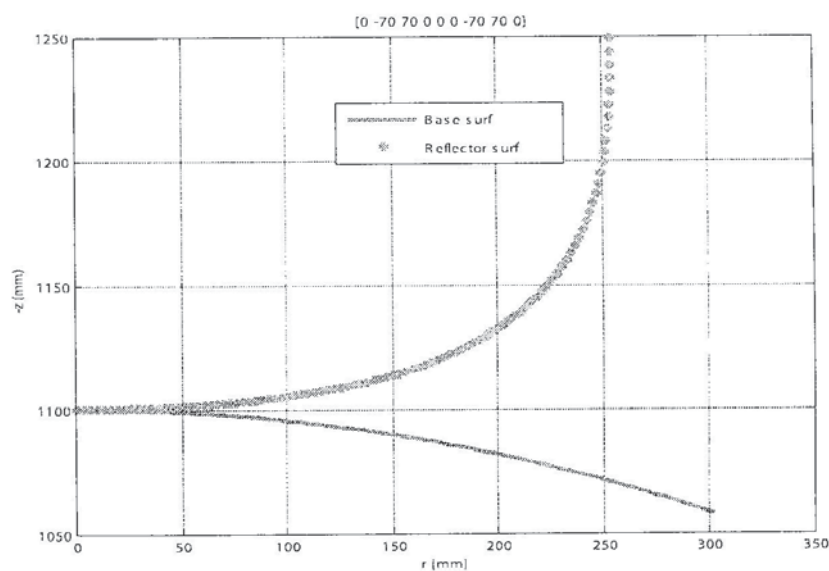


Рис.5. Отклонение профиля поверхности оболочки (схема армирования НС /0°/-70°/+70°/0°) после склеивания с нагревом; 1- оправка; 2- рефлектор.

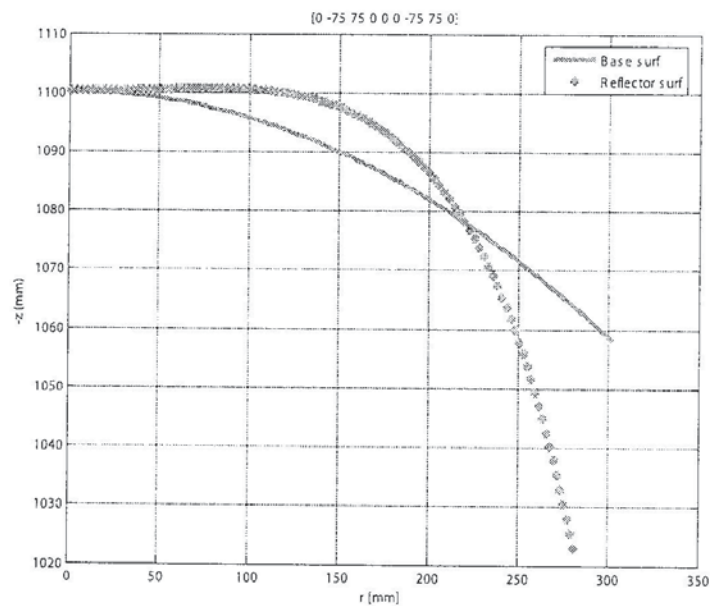


Рис.6. Отклонение профиля поверхности оболочки (схема армирования НС /0°/-75° /+75° /0°) после склеивания с нагревом; 1- оправка; 2- рефлектор.

### Выводы

На базе МКЭ и метода Ньютона разработана модель, позволяющая рассчитывать нелинейные размерные отклонения формы трёхслойных сотовых конструкций корпуса рефлектора с учётом начальных и температурных напряжений. Выявлена зона укладки спиральных слоев, в которой происходит качественная смена равновесных форм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бидерман В. Л. Механика тонкостенных конструкций. Статика. М.,— Машиностроение, 1977, 488 с.
2. Попов Б.Г. Расчет многослойных конструкций вариационно-матричными методами.— М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1993.-294с.
3. Попов Б. Г., Буланов И. М., Сумин Ю. В. Анализ размерных отклонений трёхслойных параболических композитных рефлекторов при сборке.// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер «Машиностроение». – 2005.- № 1 — С. 22- 40.
4. Данг Н. А. Решение задачи геометрической стабильности анизотропных композитных корпусов антенных рефлекторов// Вестник МГТУ им.Н.Э. Баумана. Сер «Машиностроение». – 2008.- №2.—С.25-41