

М. Е. Бабешко, В. Г. Савченко

**УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ
ОБОЛОЧЕК В УСЛОВИЯХ ТЕРМОСИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ
И РАДИАЦИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ**

*Институт механики им. С.П.Тимошенко НАНУ,
ул. Нестерова, 3, 03057, Киев, Украина; e-mail: plast@inmech.kiev.ua*

Abstract. A method of numerical study of the thermoelastoplastic axisymmetric stress-strain state of thin isotropic shells under the thermo-force loading and irradiation is described. The modified constitutive equations of thermoelasticity that describe the non-elastic deformation processes along the trajectories of small curvature are used. An analysis of results of calculation of thermoelastoplastic state of the shell in the form of spherical segment with allowance for irradiation effect is given.

Key words: thermoelastoplastic deformation process, constitutive equations, stress-strain state, thermo-force loading, irradiation.

Введение.

Некоторые тонкостенные элементы современных конструкций, работающие в условиях термосилового нагружения, подвергаются радиационному воздействию, в результате которого значительно изменяются механические свойства материалов. В ряде работ [4, 5, 7, 13 и др.] исследовано влияние радиационного облучения на свойства различных конструкционных материалов. Установлено, что действие нейтронных потоков на элементы конструкций изменяет характеристики материалов и приводит к их распуханию. Показано, что изменение упругих свойств изотропных материалов под действием радиационного облучения незначительно, но изменение пределов текучести, упрочнения и прочностных свойств может быть существенным. Поэтому при исследовании эксплуатационных и предельных режимов работы такой конструкции наряду с зависимостью свойств ее материалов от температуры и истории нагружения необходимо учитывать влияние радиационного облучения. В частности, особый интерес представляют исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкций, работающих в условиях неравномерного нагрева и облучения, поскольку с повышением температуры пределы текучести и упрочнения для многих сталей уменьшаются, а с увеличением дозы облучения пределы текучести металлов увеличиваются при значительном уменьшении их упрочнения.

В работах [10, 11, 14] предложены методики и приведены результаты определения осесимметричного упругопластического НДС тонких оболочек при простом и сложном нагружении и радиационном облучении, но не исследовано НДС оболочки при совместном действии температуры и облучения.

В данной статье изложен метод численного исследования процесса деформирования тонких оболочек вращения из изотропных материалов, работающих в условиях совместного действия силового нагружения, неравномерного нагрева и радиационного облучения, и на конкретном примере выполнен анализ влияния нагрузок на НДС оболочки. Алгоритм численного исследования НДС оболочки основан на использовании модифицированных уравнений терморadiационной пластичности для описания процессов деформирования изотропных материалов по траекториям малой кривизны.

Использованы идеи работы [8], в которой предложены определяющие уравнения теории течения с изотропным и анизотропным упрочнением с учетом зависимости свойств материалов не только от температуры, но и от радиационного облучения. Аналогичный подход использован в определяющих уравнениях теории пластического деформирования с трансляционным упрочнением [1]. В [1, 8] приняты такие предположения: тензор деформаций представлен в виде суммы тензоров упругой и неупругой составляющих; упругие деформации подчиняются обобщенному закону Гука; при изменении температуры имеет место закон температурного расширения, а при изменении флюенса (интегрального потока ионизирующего излучения) – закон распухания. В данной работе приняты такие же предположения, но в отличие от [1, 8] определяющие уравнения сформулированы для напряжений и деформаций, а не их приращений. Заметим, что при отсутствии облучения используемые модифицированные определяющие уравнения описывают процессы деформирования по траекториям малой кривизны, как и классические варианты теории течения с изотропным упрочнением [19 – 22].

1. Постановка задачи и основные соотношения.

Рассмотрена оболочка вращения, изготовленная из изотропного материала, первоначально находящаяся в ненапряженном и необлученном состоянии при начальной температуре $T = T_0$, а затем подвергнутая действию осесимметричных силовых нагрузок, не вызывающих кручения, неравномерному нагреву и радиационному облучению. Предполагаем, что в процессе нагружения в материале оболочки наряду с упругими деформациями могут возникать зоны пластических деформаций, в которых может происходить разгрузка; уровни нагрузок и время их действия таковы, что деформации ползучести не возникают. Распределение температуры T и флюенс Φ по меридиональному сечению оболочки предполагаются известными на протяжении рассматриваемого процесса нагружения. В частности, температурные поля оболочки и распределение дозы облучения в ней могут быть найдены путем решения соответствующих краевых задач [13, 16, 19]. Оболочка рассматривается в криволинейной ортогональной системе координат s, θ, ζ , где s – меридиональная координата непрерывной координатной поверхности; $s_a \leq s \leq s_b$, s_a, s_b – координаты, соответствующие торцам оболочки; θ ($0 \leq \theta \leq 2\pi$) – окружная координата, а ζ – координата, отсчитываемая по нормали к координатной поверхности, $\zeta_0 \leq \zeta \leq \zeta_k$, ζ_0 – соответствует внутренней поверхности, а ζ_k – наружной поверхности; толщина оболочки $h = \zeta_k - \zeta_0$. Задача решается в геометрически линейной квазистатической постановке в пределах малых деформаций с использованием гипотез Кирхгофа – Лява [6].

Для исследования упругопластического НДС оболочек в условиях термосилового нагружения и радиационного облучения процесс нагружения разбивается на ряд малых этапов таким образом, чтобы моменты времени, разграничивающие этапы, хорошо согласовались с моментами изменения направления процесса в элементах оболочки, работающих за пределами упругости материала, т. е. перехода от активного нагружения к разгрузке и наоборот. На каждом этапе нагружения используется система уравнений равновесия, геометрические и физические (определяющие) соотношения. Уравнения равновесия и геометрические соотношения используем в форме [6]. В качестве физических соотношений используем модифицированные уравнения терморadiационной пластичности, описывающие процессы деформирования вдоль траекторий малой кривизны. Для линеаризации определяющих уравнений используем метод дополнительных напряжений [11, 19], широко применяемый при решении краевых задач для оболочек и тел [9 – 11, 14 – 18, 21 и др.]. В соответствии с этим методом в общем виде связь между компонентами тензоров напряжений σ_{ij} и деформаций ε_{ij} представляем в форме обобщенного закона Гука с дополнительными напряжениями $\sigma_{ij}^{(d)}$, которые предполагаются известными из предыдущего приближения,

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + (K - 2G)\varepsilon_0\delta_{ij} - \sigma_{ij}^{(d)}; \quad (1)$$

$$\sigma_{ij}^{(d)} = 2G\varepsilon_{ij}^{(p)} + K\varepsilon_{T\Phi}\delta_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (2)$$

где

$$K = E/(1 - 2\nu); \quad E = 2G(1 + \nu); \quad \varepsilon_{T\Phi} = \varepsilon_T + \varepsilon_\Phi; \quad \varepsilon_T = \alpha_T(T - T_0); \quad \varepsilon_\Phi = \alpha_\Phi\Phi; \quad (3)$$

$$\delta_{ij} = 1 \text{ при } i = j \text{ и } \delta_{ij} = 0 \text{ при } i \neq j.$$

В формулах (2), (3) E и G – модули упругости и сдвига материала, зависящие от температуры и флюенса; ν , α_T и α_Φ – коэффициенты Пуассона, линейного теплового расширения и радиационного распухания материала, соответственно. В осесимметрично нагруженной оболочке вращения напряженное состояние характеризуется меридиональным σ_{ss} и окружным $\sigma_{\theta\theta}$ напряжениями, а деформированное состояние – меридиональной ε_{ss} , окружной $\varepsilon_{\theta\theta}$ и нормальной $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ деформациями. Поэтому уравнения (1) записываем в виде

$$\sigma_{ss} = A_{11}\varepsilon_{ss} + A_{12}\varepsilon_{\theta\theta} - \sigma_{ss}^{(d)}; \quad \sigma_{\theta\theta} = A_{12}\varepsilon_{ss} + A_{22}\varepsilon_{\theta\theta} - \sigma_{\theta\theta}^{(d)}, \quad (4)$$

где коэффициенты A_{11} , A_{12} , A_{22} и дополнительные напряжения $\sigma_{ss}^{(d)}$, $\sigma_{\theta\theta}^{(d)}$ имеют вид

$$A_{11} = A_{22} = \frac{E}{1 - \nu^2}; \quad A_{12} = A_{11}\nu; \quad (5)$$

$$\sigma_{ss}^{(d)} = A_{1D} = A_{11}\varepsilon_{T\Phi}(1 + \nu) + A_{11}(e_{ss}^{(p)} + \nu e_{\theta\theta}^{(p)}); \quad (6)$$

$$\sigma_{\theta\theta}^{(d)} = A_{2D} = A_{11}\varepsilon_{T\Phi}(1 + \nu) + A_{11}(e_{\theta\theta}^{(p)} + \nu e_{ss}^{(p)}).$$

Входящие в (6) величины пластических составляющих компонент деформации $e_{ss}^{(p)} = \varepsilon_{ss}^{(p)}(s, \theta)$ на произвольном M -м этапе нагружения определяются как суммы их приращений за все предыдущие этапы

$$e_{ss}^{(p)} = \sum_{k=1}^M \Delta_k e_{ss}^{(p)}(s, \theta), \quad (7)$$

где

$$\Delta_k e_{ss}^{(p)} = \left\langle \frac{\sigma_{ss} - \sigma_0}{S} \right\rangle_k \Delta_k \Gamma_p(s, \theta); \quad \sigma_0 = \frac{\sigma_{ss} + \sigma_{\theta\theta}}{3}; \quad (8)$$

$$S = \sqrt{(\sigma_{ss}^2 - \sigma_{ss}\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{\theta\theta}^2)/3} \quad (9)$$

– интенсивность касательных напряжений;

$$\Gamma_p = \sum_{k=1}^M \Delta_k \Gamma_p \quad (10)$$

– интенсивность накопленных пластических деформаций сдвига. В (8) угловыми скобками обозначено среднее за этап значение находящейся в них величины. Входящие в (7) приращения пластических составляющих деформаций $\Delta_k e_{ss}^{(p)}(s, \theta)$ необходимо уточнять в процессе последовательных приближений. При вычислении $\Delta_k e_{ss}^{(p)}(s, \theta)$ используется предположение о существовании зависимости

$$S = F(\Gamma, T, \Phi) \quad (11)$$

между интенсивностью касательных напряжений S (9), интенсивностью деформаций сдвига

$$\Gamma = \sqrt{\left[(\varepsilon_{ss} - \varepsilon_{\theta\theta})^2 + (\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_{\zeta\zeta})^2 + (\varepsilon_{\zeta\zeta} - \varepsilon_{ss})^2 \right]} / 6, \quad (12)$$

температурой T и флюенсом Φ . Для конкретизации зависимости (11) используем диаграммы $\sigma \sim \varepsilon$ (σ – напряжение; ε – продольная деформация образца), полученные в экспериментах на растяжение цилиндрических образцов при различных фиксированных значениях температуры и дозы радиационного облучения, выполненных со скоростями нагружения, не влияющими на форму диаграмм $\sigma \sim \varepsilon$. Переход от σ и ε к S и Γ осуществляется по формулам [19]

$$S = \sigma / \sqrt{3}; \quad \Gamma = S / (2G) + \sqrt{3} \varepsilon^{(p)} / 2; \quad \varepsilon^{(p)} = \varepsilon - \sigma / E. \quad (13)$$

Используя связь между напряжениями и деформациями в виде (4), соотношения между усилиями, моментами и деформациями координатной поверхности оболочки представим в виде

$$\begin{aligned} N_s &= C_{11}^{(0)} \varepsilon_s + C_{12}^{(0)} \varepsilon_\theta + C_{11}^{(1)} \kappa_s + C_{12}^{(1)} \kappa_\theta - N_{1D}^{(0)}; \\ N_\theta &= C_{12}^{(0)} \varepsilon_s + C_{11}^{(0)} \varepsilon_\theta + C_{12}^{(1)} \kappa_s + C_{11}^{(1)} \kappa_\theta - N_{2D}^{(0)}; \\ M_s &= C_{11}^{(1)} \varepsilon_s + C_{12}^{(1)} \varepsilon_\theta + C_{11}^{(2)} \kappa_s + C_{12}^{(2)} \kappa_\theta - N_{1D}^{(1)}; \\ M_\theta &= C_{12}^{(1)} \varepsilon_s + C_{11}^{(1)} \varepsilon_\theta + C_{12}^{(2)} \kappa_s + C_{11}^{(2)} \kappa_\theta - N_{2D}^{(1)}, \end{aligned} \quad (14)$$

где N_s, M_s – нормальное усилие и момент, действующие в сечении оболочки $s = \text{const}$; N_θ, M_θ – аналогичные усилие и момент, действующие в сечении оболочки $\theta = \text{const}$; $\varepsilon_s, \varepsilon_\theta$ и κ_s, κ_θ – деформации и изменения кривизны координатной поверхности оболочки в меридиональном и окружном направлениях. В (14) обозначено

$$C_{mn}^{(j)} = \int_{\zeta_0}^{\zeta_k} A_{mn} \zeta^j d\zeta; \quad N_{mD}^{(j)} = \int_{\zeta_0}^{\zeta_k} A_{mD} \zeta^j d\zeta \quad (m, n = 1, 2; j = 0, 1, 2). \quad (15)$$

Соотношения (14) вместе с тремя статическими и пятью геометрическими соотношениями [6] образуют систему 12 уравнений, которая приводится к системе 6 обыкновенных дифференциальных уравнений относительно неизвестных функций $N_s, M_s, Q_s, u, w, \vartheta_s$, где Q_s – перерезывающее усилие в сечении оболочки $s = \text{const}$; u, w – перемещения точек координатной поверхности в направлениях s и ζ , соответственно; ϑ_s – угол поворота нормали к координатной поверхности в меридиональной плоскости. Эта система в векторной форме имеет вид

$$\frac{d\vec{Y}}{ds} = P(s)\vec{Y} + \vec{f}(s) \quad (16)$$

при заданных граничных условиях

$$B_1 \vec{Y}(s_a) = \vec{b}_1; \quad B_2 \vec{Y}(s_b) = \vec{b}_2. \quad (17)$$

В (16), (17) \vec{Y} – вектор разрешающих функций; $\vec{Y} = \{N_s, Q_s, M_s, u, w, \vartheta_s\}$; $P(s)$ – матрица системы; $\vec{f}(s)$ – вектор дополнительных слагаемых; B_1, B_2 – заданные мат-

рицы; \vec{b}_1, \vec{b}_2 – заданные векторы граничных условий. Ненулевые элементы матрицы $P(s)$ вычисляются по формулам

$$\begin{aligned}
p_{11} &= -\frac{\cos \varphi}{r}(1 + \lambda_1); \quad p_{12} = -\frac{1}{R_s}; \quad p_{13} = -\frac{\cos \varphi}{r}\lambda_2; \quad p_{14} = \frac{\cos^2 \varphi}{r^2}(\lambda_1 C_{12}^{(0)} + C_{22}^{(0)} + \lambda_2 C_{12}^{(1)}); \\
p_{15} &= p_{14} \operatorname{tg} \varphi; \quad p_{16} = -\frac{\cos^2 \varphi}{r^2}(\lambda_3 C_{12}^{(0)} + \lambda_4 C_{12}^{(1)} - C_{22}^{(1)}); \quad p_{21} = \frac{1}{R_s} - \frac{\lambda_1 \sin \varphi}{r}; \quad p_{22} = -\frac{\cos \varphi}{r}; \\
p_{23} &= -\frac{\sin \varphi}{r}\lambda_2; \quad p_{24} = p_{15}; \quad p_{25} = p_{15} \operatorname{tg} \varphi; \quad p_{26} = p_{16} \operatorname{tg} \varphi; \quad p_{31} = -p_{22}\lambda_3; \quad p_{32} = -1; \\
p_{33} &= -\frac{\cos \varphi}{r}(1 - \lambda_4); \quad p_{34} = \frac{\cos^2 \varphi}{r^2}(\lambda_1 C_{12}^{(1)} + C_{22}^{(1)} + \lambda_2 C_{12}^{(2)}); \quad p_{35} = p_{34} \operatorname{tg} \varphi; \quad (18) \\
p_{36} &= -\frac{\cos^2 \varphi}{r^2}(\lambda_3 C_{12}^{(1)} - C_{22}^{(2)} + \lambda_4 C_{12}^{(2)}); \quad p_{41} = \frac{C_{11}^{(2)}}{\delta_1}; \quad p_{43} = -\frac{C_{11}^{(1)}}{\delta_1}; \quad p_{44} = -\lambda_1 p_{22}; \\
p_{45} &= -p_{21}; \quad p_{46} = -p_{31}; \quad p_{54} = -p_{12}; \quad p_{56} = -1; \quad p_{61} = p_{43}; \quad p_{63} = \frac{C_{11}^{(0)}}{\delta_1}; \\
p_{64} &= -p_{13}; \quad p_{65} = -p_{23}; \quad p_{66} = \lambda_4 p_{22},
\end{aligned}$$

где r – радиус параллельного круга координатной поверхности оболочки; $\pi - \varphi$ – угол между нормалью к этой поверхности и осью вращения; R_s – радиус кривизны меридиана,

$$\lambda_1 = (C_{11}^{(1)} C_{12}^{(1)} - C_{12}^{(0)} C_{11}^{(2)}) / \delta_1; \quad \lambda_2 = (C_{11}^{(1)} C_{12}^{(0)} - C_{12}^{(1)} C_{11}^{(0)}) / \delta_1;$$

$$\lambda_3 = (C_{11}^{(2)} C_{12}^{(1)} - C_{12}^{(2)} C_{11}^{(1)}) / \delta_1; \quad \lambda_4 = (C_{11}^{(0)} C_{12}^{(2)} - C_{12}^{(1)} C_{11}^{(2)}) / \delta_1; \quad \delta_1 = C_{11}^{(0)} C_{11}^{(2)} - (C_{11}^{(1)})^2.$$

Компоненты вектора $\vec{f}(s)$ определяются выражениями

$$\begin{aligned}
f_1 &= -\frac{\cos \varphi}{r}[\lambda_1 N_{1D}^{(0)} + \lambda_2 N_{1D}^{(1)} + N_{2D}^{(0)}] - q_s; \quad f_2 = -\frac{\sin \varphi}{r}[\lambda_1 N_{1D}^{(0)} + \lambda_2 N_{1D}^{(1)} + N_{2D}^{(0)}] - q_\zeta; \\
f_3 &= \frac{\cos \varphi}{r}[\lambda_3 N_{1D}^{(0)} + \lambda_4 N_{1D}^{(1)} - N_{2D}^{(0)}]; \quad f_4 = \frac{C_{11}^{(2)} N_{1D}^{(0)} - C_{11}^{(1)} N_{1D}^{(1)}}{\delta_1}; \quad (19) \\
f_5 &= 0; \quad f_6 = -\frac{C_{11}^{(1)} N_{1D}^{(0)} - C_{11}^{(0)} N_{1D}^{(1)}}{\delta_1},
\end{aligned}$$

где q_s, q_ζ – компоненты распределенной нагрузки.

Из формул (18), (19) следует, что элементы матрицы $P(s)$ вычисляются через геометрические параметры оболочки, упругие характеристики ее материалов, зависящие от температуры и радиации, а в компоненты вектора \vec{f} посредством $N_{mD}^{(j)}$ (15) входят еще и $\varepsilon_{T\Phi}$ (3), а также величины пластических составляющих деформаций (7, 8), которые определяются в процессе последовательных приближений.

2. Алгоритм решения задачи.

Для проведения расчетов НДС исследуемой оболочки необходимо задать параметры ее геометрии, характеристики материалов, количество этапов нагружения, силовые нагрузки и условия закрепления, распределения температуры и дозы радиационного облучения по меридиональному сечению на каждом этапе. В качестве параметров геометрии оболочки задаем количество звеньев меридиана и форму каждого звена, значение меридиональной координаты и толщину оболочки в начале и конце каждого звена, а также количество точек разбиения по меридиану и толщине. Характеристики материалов задаем в виде таблиц диаграмм $\sigma \sim \varepsilon$ и значений коэффициента Пуассона и коэффициентов теплового расширения α_T и радиационного распухания α_Φ для нескольких значений температуры и флюенса из рассматриваемого диапазона.

Начиная вычисления на первом этапе нагружения, предполагаем, что в (6) $e_{ss}^{(p)} = \varepsilon_{ss}^{(p)} = 0 (s, \theta)$. При построении процесса последовательных приближений на произвольном M -м этапе, считаем, что известны компоненты НДС и величины $(e_{ss}^{(p)})_{M-1}, (e_{\theta\theta}^{(p)})_{M-1} (\Gamma_p)_{M-1}$ на предыдущем $(M-1)$ -м этапе. Для вычисления элементов (18) матрицы разрешающей системы определяем значения модуля упругости и коэффициента Пуассона материала в каждой точке разбиения меридионального сечения оболочки для значений температуры и флюенса, соответствующих рассматриваемому этапу нагружения, и находим величины $C_{mn}^{(j)}$ (15). Входящие в (15) интегралы определяем с использованием формулы Симпсона. Для вычисления компонент (19) вектора \vec{f} находим значения коэффициентов α_T и α_Φ в каждой точке меридионального сечения оболочки для соответствующих значений температуры и флюенса на данном этапе и определяем величины $\varepsilon_{T\Phi}$ (3), а также используем значения пластических составляющих деформаций, известных из предыдущего приближения (в первом приближении из предыдущего этапа) и определяем $N_{mD}^{(j)}$ (15).

Затем решаем краевую задачу (16), (17) путем сведения к задачам Коши, для решения которых используем метод Рунге – Кутты с дискретной ортогонализацией [2]. Точность решения краевой задачи оценивается путем последовательного сгущения сетки принятого разбиения оболочки. Получив в результате разрешающие функции, находим компоненты деформаций, а по ним – компоненты напряжений (4), т.е. получаем НДС оболочки в текущем приближении. По заданным зависимостям $\sigma \sim \varepsilon$, преобразованным по формулам (13) к виду $S \sim \Gamma$, путем линейной интерполяции по температуре и флюенсу определяем соответствующую кривую, на которой найдем значение $S^{(d)}$, соответствующее значению интенсивности деформаций сдвига $\Gamma = (\Gamma_p)_{M-1} + S/2G$, где S вычислено по формуле (9). Тогда $\Delta_M \Gamma_p = (S - S^{(d)})/2G$. Это значение используем для определения приращений (8) пластических составляющих деформаций и компонент (7), после чего уточняем значения величин $A_{1D} = \sigma_{ss}^{(d)}$, $A_{2D} = \sigma_{\theta\theta}^{(d)}$ (6) и можем решать краевую задачу (16), (17) в следующем приближении. В общем случае в L -м приближении на M -м этапе приращение интенсивности пластической деформации сдвига вычисляем по формулам

$$\Delta_M \Gamma_p = \sum_{i=1}^{L-1} \Delta_{Mi} \Gamma_p + \Delta_{ML} \Gamma_p; \quad \Delta_{ML} \Gamma_p = \frac{S - S^{(d)}}{2G}, \quad |\Delta_{ML} \Gamma_p| \leq \delta,$$

где δ – наперед заданное число, определяющее точность решения задачи.

Описанный алгоритм реализуется при активном процессе нагружения. Для определения направленности процесса необходимо в каждом элементе оболочки, в котором возникли пластические деформации ($\Gamma_p > 0$), после решения задачи в первом приближении текущего этапа проверить выполнение условия $\Delta \Gamma_p > 0$. При выполнении

нии этого условия вычисления ведутся по описанному выше алгоритму. В противном случае в данном элементе происходит разгрузка и для ее учета в данном элементе оболочки необходимо положить $\Delta\Gamma_p = 0$ и продолжить расчет с использованием значений пластических деформаций, соответствующих концу предыдущего этапа.

Правильность разбиения на этапы проверяется путем повторного расчета при уменьшении величины этапов в два раза.

3. Числовые результаты.

В качестве примера приведем результаты исследования термоупругопластического НДС оболочки, моделирующей сферический купол, предназначенный для защиты электромеханического оборудования различного назначения от внешнего силового, температурного и радиационного воздействий. Оболочка, первоначально находившаяся в ненапряженном и необлученном состоянии при температуре $T = T_0 = 293^\circ K$, подвергается действию нормальной к срединной поверхности распределенной нагрузки, температуры и радиационного облучения. Оболочка изготовлена из стали 347; радиус кривизны ее срединной поверхности $R_s = 1,5$ м; толщина $h = 0,05$ м, длина меридиана $s_b - s_a = 1,5$ м, $s_a = 0$. Предполагается, что температура линейно изменяется по толщине от $T = T_0$ на внутренней поверхности оболочки $\zeta = -h/2$ до T_B на внешней поверхности $\zeta = h/2$; на поверхность $\zeta = h/2$ действует нормальная распределенная нагрузка q_ζ и падает нормальный поток нейтронов $\Phi_0 = 2 \cdot 10^{23}$ нейтрон / (м²·с); по меридиану T и Φ не меняются. Граничные условия имеют следующий вид:

$$\text{в полюсе [2] } s = s_a = 0 \quad N_s = 0, u = 0, \vartheta_s = 0;$$

$$\text{на внешнем контуре } s = s_b \quad u = 0, w = 0, \vartheta_s = 0.$$

Для проведения расчетов процесс нагружения оболочки был разбит на 20 этапов. Величина нагрузки q_ζ и температура на внешней поверхности оболочки T_B в зависимости от номера этапа заданы табл.1.

Таблица 1

Величина нагрузки, температура	Номер этапа					
	1	5	9	13	17	20
q_ζ , МПа	0,2	0,6	1,0	1,4	1,8	2,1
T_B , K	293	333	373	423	453	473

Для вычисления флюенса был использован приближенный подход, предложенный в [3], в соответствии с которым принимается, что если на поверхность $\zeta = h/2$ падает нормальный поток нейтронов интенсивности Φ_0 нейтрон / (м²·сек), то к моменту времени t через площадку на глубине $(h/2) - \zeta$ пройдет суммарный поток $\Phi = \Phi_0 e^{-\mu(h/2-\zeta)t}$ нейтрон / м² [3], где μ есть константа материала. На разных этапах нагружения значения флюенса $\Phi \cdot 10^{-22}$ нейтрон / м² заданы табл. 2.

Таблица 2

ζ , м	Номер этапа					
	1	5	9	13	17	20
-0,025	0,06	0,32	0,58	0,83	1,09	1,28
-0,0125	0,13	0,64	1,14	1,65	2,16	2,54
0	0,25	1,26	2,28	3,29	4,3	5,06
0,0125	0,5	2,51	4,53	6,54	8,55	10,06
0,025	1,0	5,0	9,0	13,0	17,0	20,0

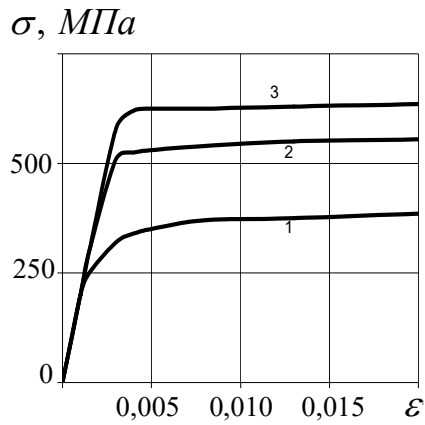


Рис. 1

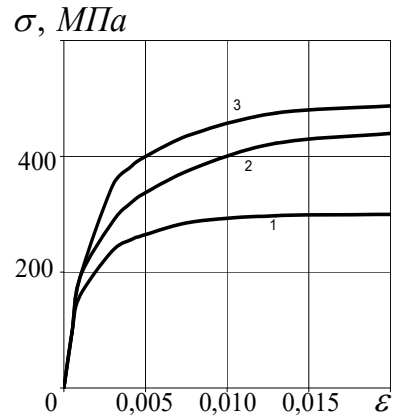


Рис. 2

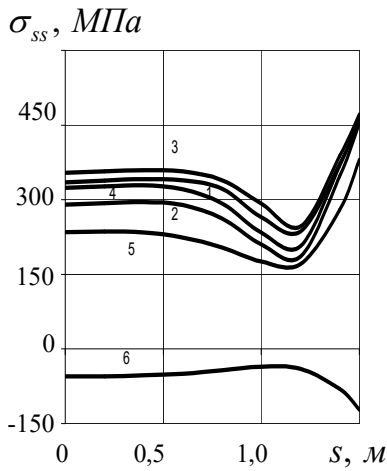


Рис. 3

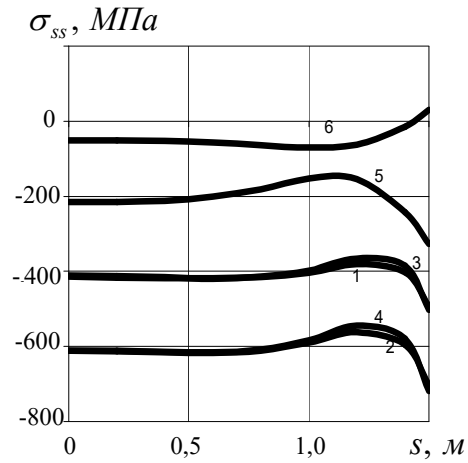


Рис. 4

Данные о свойствах материала оболочки взяты из [2]. Построенные по этим данным диаграммы $\sigma \sim \varepsilon$ при значениях температуры $T = 293^\circ K$ и $T = 588^\circ K$ приведены на рис. 1 и 2, соответственно; кривые 1 – 3 на рис. 1 соответствуют значениям дозы радиации $0, 1 \cdot 10^{23}, 2 \cdot 10^{23}$ нейтрон / m^2 , а на рис. 2 – $0, 1 \cdot 10^{26}, 3 \cdot 10^{26}$ нейтрон / m^2 . Коэффициенты Пуассона, а также теплового расширения и радиационного распухания приняты постоянными, $\nu = 0,3$, $\alpha_T = 1 \cdot 10^{-12}$ (град) $^{-1}$, $\alpha_\Phi = 3 \cdot 10^{-26}$ (нейтрон/ m^2) $^{-1}$.

По разработанной методике определено НДС оболочки при действии как всех указанных нагрузок, так и каждой из них в отдельности. Некоторые результаты расчетов на 20-м этапе нагружения приведены на рис. 3 – 6. На рис. 3 и 4 приведены кривые изменения вдоль меридиана меридионального напряжения у внутренней поверхности $\zeta = -h/2$ и внешней поверхности $\zeta = h/2$, соответственно, а на рис. 5 и 6 – аналогичные кривые для окружного напряжения. Кривые 1 – 6 на этих рисунках соответствуют действию на оболочку таких нагрузок: 1 – температуры, облучения и распределенной нагрузки q_ζ ; 2 – облучения и q_ζ ; 3 – облучения и температуры; 4 – только облучения; 5 – только температуры; 6 – только q_ζ . Как показали расчеты, действие только заданной силовой нагрузки q_ζ не вызывает в данной оболочке пластических

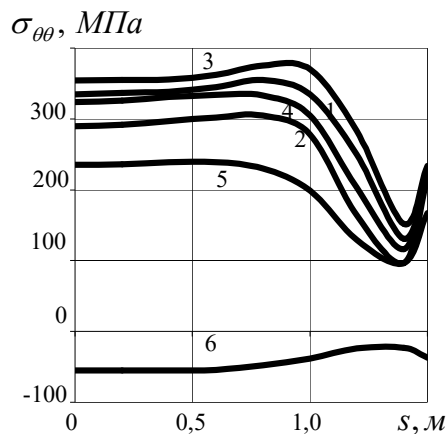


Рис. 5

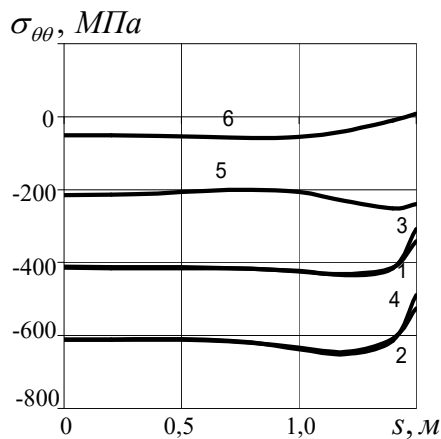


Рис. 6

деформаций. Под действием температуры в оболочке возникают пластические деформации возле внешней поверхности и распространяются по толщине оболочки в окрестности контура $s = s_b$. При действии только облучения в оболочке возникают максимальные по абсолютной величине значения напряжений и деформаций. В этом случае области пластических деформаций возникают у внешней и внутренней поверхностей оболочки, и при $s \geq 1,3$ м материал работает за пределом упругости по всей толщине, а значения интенсивности пластических деформаций в 4 – 5 раз превышают соответствующие значения, возникшие при действии только температуры. Как видно из рис. 3, 5, в конце рассматриваемого процесса нагружения максимальные значения растягивающих напряжений возникают при совместном действии облучения и температуры, а добавление распределенной нагрузки немного их снижает. Максимальные значения сжимающих напряжений (рис. 4, 6) соответствуют совместному действию облучения и распределенной нагрузки. При совместном действии всех нагрузок в оболочке на втором этапе нагружения возникла область пластических деформаций в окрестности внешней поверхности оболочки. В процессе нагружения у внутренней поверхности также возникла область пластических деформаций. С увеличением нагрузок обе пластические области

увеличились и в окрестности контура $s = s_b$ слились. В работающих за пределом упругости элементах оболочки активный процесс неоднократно сменялся разгрузкой и наоборот, что объясняется тем, что при повышении температуры упрочнение материала уменьшается, а при облучении – повышается (см. рис. 1, 2).

Рассмотренный пример показывает необходимость разработки алгоритмов расчета упругопластического НДС оболочек, позволяющих учитывать совместное действие термосиловых нагрузок и облучения.

Заключение.

В работе приведена постановка задачи терморadiационной пластичности для тонких изотропных оболочек вращения и изложена методика ее решения. Методика базируется на использовании модифицированных определяющих уравнений, описывающих процессы деформирования изотропных материалов вдоль траекторий малой кривизны с учетом зависимости свойств материала от температуры и радиационного облучения. Для линеаризации задачи пластичности используется метод дополнительных напряжений. Процесс нагружения разбивается на ряд этапов, на каждом из которых НДС оболочки определяется в процессе последовательных приближений. Приведено решение конкретной задачи и проанализировано влияние радиационного облучения, температуры и силовой нагрузки на напряженное состояние оболочки.

РЕЗЮМЕ. Описано метод чисельного дослідження термопружнопластичного осесиметричного напружено-деформованого стану тонких ізотропних оболонок при термосиловому навантаженні та радіаційному опроміненні. Використано модифіковані визначальні рівняння термопластичності, що описують процеси непружного деформування вздовж траєкторій малої кривизни. Наведено аналіз результатів розрахунку термопружнопластичного стану оболонки у вигляді сферичного сегмента з урахуванням впливу радіаційного опромінення.

Научные исследования, результаты которых опубликованы в данной статье, выполнены за счет средств бюджетной программы «Поддержка приоритетных направлений научных исследований» (КПКВК 6541230).

1. Бондарь В.С. Неупругость. Варианты теории. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 144с.
2. Григоренко Я.М., Василенко А.Т. Методы расчета оболочек: в 5-ти томах. Т.4. Теория оболочек переменной жесткости. – К.: Наук. думка, 1981. – 544 с.
3. Ильюшин А.А., Огибалов П.М. О прочности оболочек, толстостенного цилиндра и полого шара, подвергнутых облучению // Инж. сборник. – 1960. – **28**. – С. 134 – 144.
4. Киселевский В.Н. Изменение механических свойств сталей и сплавов при радиационном облучении. – К.: Наук. думка, 1977. – 104 с.
5. Ленский В.С. Влияние радиоактивных облучений на механические свойства твердых тел // Инж. сборник. – 1960. – **28**. – С. 97 – 133.
6. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 432 с.
7. Писаренко Г.С., Киселевский В.Н. Прочность и пластичность материалов в радиационных потоках. – К.: Наук. думка, 1979. – 284с.
8. Шевченко Ю.Н. Уравнения терморadiационной пластичности // Тепловые напряжения в элементах конструкций. – 1972. – Вып. 12. – С. 39 – 52.
9. Babeshko M.E., Galishin A.Z., Semenets A.I., Shevchenko Yu.N. On Effect of a Kind of Stress State on Strength of High Pressure Vessels // Int. Appl. Mech. – 2015. – **51**, N 3. – P. 319 – 325.
10. Babeshko M.E., Savchenko V.G. Study of the Elastoplastic Axisymmetric Stress - Strain State of Irradiated Laminated Shells with a Loading History // Int. Appl. Mech. – 2001. – **37**, N 11. – P. 1441 – 1446.
11. Babeshko M.E., Savchenko V.G. Axisymmetric Elastoplastic State of Compound Shells Subject to Thermal and Mechanical Loading and Radiation Exposure // Int. Appl. Mech. – 2017. – **53**, N 4. – P. 368 – 373.
12. Babeshko M.E., Savchenko V.G. Allowing for the Third Deviatoric Stress Invariant in Analyzing the Deformation of Thin Shells // Int. Appl. Mech. – 2018. – **54**, N 2. – P. 163 – 171.
13. Olszak W., Rychlewski J., Urbanowski W. Plasticity Under Non-Homogenous Conditions. – New York: Academic Press, 1962. – 152 p.
14. Savchenko V.G., Babeshko M.E. The Elastoplastic Axisymmetric Stress-Strain State of Flexible Layered Shells Exposed to Radiation // Int. Appl. Mech. – 2000. – **36**, N 9. – P. 1218 – 1224.
15. Savchenko V.G., Babeshko M.E. Thermostressed State of Layered Bodies of Revolution Damaging under of Deformation // Int. Appl. Mech. – 2018. – **54**, N 3. – P. 287 – 305.
16. Savchenko V.G., Shevchenko Yu.N. Nonaxisymmetric thermal stress state of laminated rotational bodies of orthotropic materials under nonisothermic loading // Mechanics of Composite Materials. – 2004. – **40**, N 6. – P. 731 – 752.
17. Shevchenko Yu.N., Babeshko M.E. Numerical Analysis of the Thermoelastoplastic Stress- Strain State of Laminated Orthotropic Shells Under Axisymmetric Loading // J. Thermal Stresses. – 2006. – **29**, N 12. – P. 1143 – 1162.
18. Shevchenko Yu.N., Babeshko M.E. The thermoviscoelastoplastic state of laminated shells of revolution under axisymmetric complex loading. – Proc. of the 6th Int. Congress on Thermal Stress and Related Topics, TS2005, 26 – 29 May 2005, Vienna. – P.227 – 230.
19. Shevchenko Yu.N., Savchenko V.G. Three-Dimensional Problems of Thermoviscoplasticity: Focus on Ukrainian Research (Review) // Int. Appl. Mech. – 2016. – **52**, N 3. – P. 217 – 271.
20. Steblyanko P.A., Shevchenko Yu.N. Computational Methods in Stationary and Nonstationary Thermal – Plasticity Problems. In.: «Encyclopedia of Thermal Stresses. In. 11 volumes (Ed. R.B.Hetnarski). – New York: Springer, 2014. Vol. 2, C-D, P. 507-1084». – P. 623 – 630.
21. Zolochovsky A., Galishin A., Sklepys S., Voyiadjis G.Z. Analysis of creep deformation and creep damage in thin-walled branches shells from materials with different behavior in tension and compression // Int. J. Solids and Struct. – 2007. – **44**, N 16. – P. 5075 – 5100.
22. Zyczkowski M. Combined Loadings in the Theory of Plasticity. – Warszawa: PWN, 1981. – 714 p.

Поступила 12.11.2018

Утверждена в печать 04.06.2019