

Влияние закрепления края на ресурс повреждающейся вследствие ползучести тонкой сферической крышки вакуумной камеры

О. К. Морачковский, Ю. В. Ромашов

Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, Украина

Для расчетного исследования ресурса при ползучести тонкой сферической крышки вакуумной камеры рассмотрены математические постановки и предложен метод решения начально-краевых задач теории ползучести тонких оболочек с учетом повреждаемости материала. Исследовано влияние закреплений вдоль нормали и касательной к срединной поверхности, а также угловых закреплений края на ресурс крышки при ползучести под атмосферным давлением. По расчетным данным установлена зависимость ресурса крышки от закреплений ее края: существенная по времени скрытого разрушения и незначительная по допускаемому прогибу.

Ключевые слова: ресурс, ползучесть, повреждаемость, время разрушения, крышка вакуумной камеры, сферическая оболочка, метод Бубнова–Галеркина.

Введение. Вакуумные системы применяются для разнообразных технологических и научно-исследовательских целей. Из-за специфики последних элементы систем могут эксплуатироваться в условиях ползучести. Прогнозирование ресурса работающих элементов конструкций обусловлено обеспечением их безопасной эксплуатации и поэтому представляет актуальную научно-техническую проблему.

Обеспечение необходимого ресурса элементов вакуумных систем при заданных уровнях температуры и интенсивностей механических нагрузок традиционно осуществляется выбором материалов, геометрической формы и некоторых размеров. Ограниченность в выборе материалов и размеров конструкций обусловлена известными объективными причинами. Закрепления элемента конструкции влияют на ресурс и представляют дополнительный фактор в его обеспечении.

Целью данной работы является расчетное исследование влияния закрепления края на ресурс повреждающейся при ползучести сферической крышки вакуумной камеры. Метод исследования – математическое моделирование процессов деформирования и повреждаемости вследствие ползучести и обобщение накопленных результатов численных экспериментов.

Математическая постановка задачи. Сферическую крышку вакуумной камеры, отделяющую вакуумный объем от атмосферы, рассматриваем в виде тонкой оболочки, а именно: сферического купола постоянной толщины h , радиусом R и углом раствора 2θ (рис. 1), нагруженного давлением p . Для моделирования высокотемпературной ползучести и повреждаемости материала крышки примем закон ползучести типа Бейли–Норттона и континуальный вариант теории повреждаемости, предложенный Работновым [1, 2]. При осесимметричном деформировании тонких оболочек [2, 3] параметры Ламе сре-

динной поверхности сферической оболочки зависят лишь от координаты x_1 , а параметры напряженно-деформированного состояния и повреждаемости вследствие ползучести изменяются со временем t и зависят от координат x_1, x_3 .

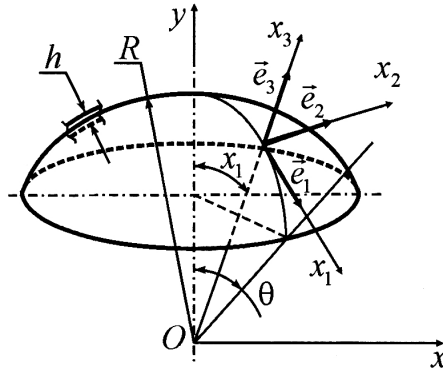


Рис. 1. Расчетная схема крышки вакуумной камеры.

Разрешающие дифференциальные уравнения в смешанной форме относительно неизвестных внутренних сил, моментов, перемещений и угла поворота нормали срединной поверхности сферической оболочки имеют вид [2, 3]

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{N_1^0}{Eh} + \frac{\nu N_2^0}{Eh} + \frac{1}{A_1} \frac{\partial u_1^0}{\partial x_1} + k_1 u_3^0 = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} c_{11} dx_3; \\ -\frac{N_2^0}{Eh} + \frac{\nu N_1^0}{Eh} + \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial x_1} u_1^0 + k_2 u_3^0 = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} c_{22} dx_3; \\ -\frac{M_1^0}{Eh} + \frac{\nu M_2^0}{Eh} - \frac{1}{A_1} \frac{\partial \vartheta_1^0}{\partial x_1} = \frac{12}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} c_{11} x_3 dx_3; \\ -\frac{M_2^0}{Eh} + \frac{\nu M_1^0}{Eh} - \frac{1}{A_1 A_2} \frac{\partial A_2}{\partial x_1} \vartheta_1^0 = \frac{12}{h^3} \int_{-h/2}^{h/2} c_{22} x_3 dx_3; \\ -k_1 u_1^0 + \frac{1}{A_1} \frac{\partial u_3^0}{\partial x_1} - \vartheta_1^0 = 0; \\ \left(\frac{\partial A_2}{\partial x_1} + A_2 \frac{\partial}{\partial x_1} \right) N_1^0 - \frac{\partial A_2}{\partial x_1} N_2^0 + k_1 A_1 A_2 Q_1^0 = 0; \\ k_1 N_1^0 + k_2 N_2^0 - \frac{1}{A_1 A_2} \left(\frac{\partial A_2}{\partial x_1} + A_2 \frac{\partial}{\partial x_1} \right) Q_1^0 = -p; \\ \left(\frac{\partial A_2}{\partial x_1} + A_2 \frac{\partial}{\partial x_1} \right) M_1^0 - \frac{\partial A_2}{\partial x_1} M_2^0 - A_1 A_2 Q_1^0 = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $A_1 = R$, $A_2 = R \sin x_1$ – параметры Ламе; $k_1 = k_2 = 1/R$ – главные кривизны; u_1^0, u_3^0 – перемещения точки срединной поверхности; ϑ_1^0 – угол пово-

рота нормали; N_1^0, N_2^0, Q_1^0 – мембранные и перерезывающая силы соответственно; M_1^0, M_2^0 – изгибающие моменты; c_{11}, c_{22} – компоненты тензора деформаций ползучести; E, ν – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала.

Уравнения состояния ползучести с повреждаемостью записываются так:

$$\dot{c}_{11} = \frac{3}{2} \frac{B\sigma_i^{n-1}}{(1-\omega^r)^n} \left(\frac{2}{3}\sigma_{11} - \frac{1}{3}\sigma_{22} \right); \quad \dot{c}_{22} = \frac{3}{2} \frac{B\sigma_i^{n-1}}{(1-\omega^r)^n} \left(\frac{2}{3}\sigma_{22} - \frac{1}{3}\sigma_{11} \right);$$

$$\dot{\omega} = \frac{A\sigma_i^k}{(1-\omega^r)^k},$$
(2)

где B, A, n, k, r – материальные постоянные, определяемые при заданной температуре по кривым ползучести и длительной прочности вплоть до разрушения; ω – параметр повреждаемости; σ_i – интенсивность напряжений; σ_{11}, σ_{22} – компоненты тензора напряжений;

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{11})^2};$$

$$\sigma_{11} = \frac{1}{h} N_1^0 + \frac{12x_3}{h^3} M_1^0 + \frac{E}{h(1-\nu^2)} \int_{-h/2}^{h/2} (c_{11} + \nu c_{22}) dx_3 +$$

$$+ \frac{12Ex_3}{h^3(1-\nu^2)} \int_{-h/2}^{h/2} (c_{11} + \nu c_{22}) x_3 dx_3 - \frac{E}{1-\nu^2} (c_{11} + \nu c_{22});$$

$$\sigma_{22} = \frac{1}{h} N_2^0 + \frac{12x_3}{h^3} M_2^0 + \frac{E}{h(1-\nu^2)} \int_{-h/2}^{h/2} (c_{22} + \nu c_{11}) dx_3 +$$

$$+ \frac{12Ex_3}{h^3(1-\nu^2)} \int_{-h/2}^{h/2} (c_{22} + \nu c_{11}) x_3 dx_3 - \frac{E}{1-\nu^2} (c_{22} + \nu c_{11}).$$

Полная система разрешающих уравнений (1), (2) отвечает начально-краевой задаче теории ползучести тонких оболочек, решением которой определяются изменяемые во времени поля напряженно-деформированного состояния, перемещений срединной поверхности, деформаций ползучести и параметра повреждаемости для сферической крышки вакуумной камеры. Эти уравнения дополняются условиями симметрии в вершине крышки $x_1 = 0$, граничными условиями закрепления края $x_1 = \theta$ и начальными условиями.

Условия симметрии в вершине крышки имеют вид

$$u_1^0(t, 0) = 0; \quad Q_1^0(t, 0) = 0; \quad \vartheta_1^0(t, 0) = 0.$$
(3)

Далее рассмотрим шесть вариантов закреплений края крышки, три из которых отвечают жесткому угловому закреплению, исключающему поворот сечения $x_1 = \theta$ (рис. 2,а), и три – шарнирному, представляющему опору с нулевой угловой жесткостью (рис. 2,б).

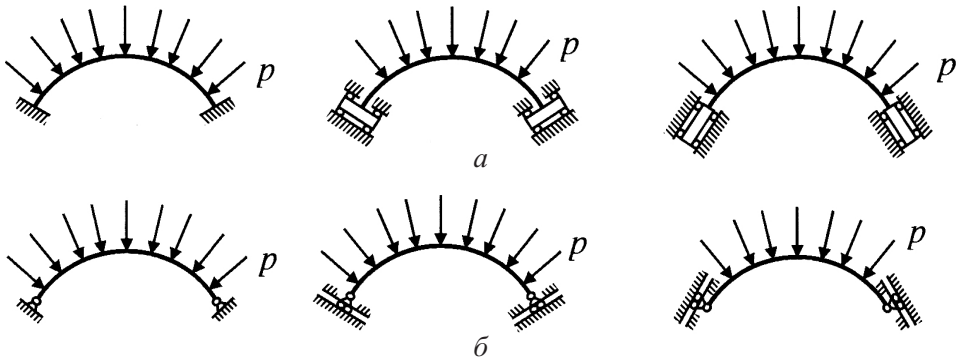


Рис. 2. Варианты закреплений крышки вакуумной камеры.

Граничные условия, отвечающие жесткому угловому закреплению края крышки (на рис. 2,а слева направо), имеют вид

$$u_1^0(t, \theta) = 0, \quad u_3^0(t, \theta) = 0, \quad \vartheta_1^0(t, \theta) = 0; \quad (4)$$

$$u_1^0(t, \theta) = 0, \quad Q_1^0(t, \theta) = 0, \quad \vartheta_1^0(t, \theta) = 0; \quad (5)$$

$$N_1^0(t, \theta) = 0, \quad u_3^0(t, \theta) = 0, \quad \vartheta_1^0(t, \theta) = 0. \quad (6)$$

Граничные условия, отвечающие шарнирным закреплениям края крышки (на рис. 2,б слева направо), записываются так:

$$u_1^0(t, \theta) = 0, \quad u_3^0(t, \theta) = 0, \quad M_1^0(t, \theta) = 0; \quad (7)$$

$$u_1^0(t, \theta) = 0, \quad Q_1^0(t, \theta) = 0, \quad M_1^0(t, \theta) = 0; \quad (8)$$

$$N_1^0(t, \theta) = 0, \quad u_3^0(t, \theta) = 0, \quad M_1^0(t, \theta) = 0. \quad (9)$$

Начальные условия примем отвечающими упругому деформированию:

$$c_{11}(0, x_1, x_3) = 0, \quad c_{22}(0, x_1, x_3) = 0, \quad \omega(0, x_1, x_3) = 0. \quad (10)$$

При определении ресурса крышки в качестве предельного состояния рассматриваем независимо как окончание скрытого разрушения, так и нарушение нормальной эксплуатации вследствие недопустимо большого прогиба [4].

Время окончания скрытого разрушения t_ω крышки определяем из условия

$$\omega(t_\omega, x_1, x_3) = \omega_*, \quad (11)$$

где ω_* – критическое значение параметра повреждаемости, которое теоретически равно единице.

Существенное увеличение скорости деформации ползучести и параметра повреждаемости при $\omega \approx 1$ усложняет интегрирование уравнений (1), (2) и незначительно уточняет время окончания скрытого разрушения. Поэтому при выполнении расчетов целесообразно определять время окончания скрытого разрушения по значению $0,5 \leq \omega_* \leq 0,9$, далее принято $\omega_* = 0,6$, по достижении параметром повреждаемости этого значения решение задачи останавливается.

Время нарушения нормальной эксплуатации вследствие сильного изменения формы t_u крышки определяем по прогибу в ее вершине:

$$u_3^0(t_u, 0) \leq u_*, \quad (12)$$

где u_* – допустимое значение прогиба крышки в ее вершине.

Метод решения задачи. Рассмотрим применение метода Бубнова–Галеркина к решению начально-краевой задачи ползучести (1), (2) с начальными и граничными условиями. Искомые неизвестные представляем аналитическими глобальными аппроксимациями по заданным системам пробных функций пространственных координат с неизвестными коэффициентами – функциями времени [5, 6]. Выбором пробных функций удовлетворяем все граничные условия. Коэффициенты аппроксимаций определяем из задачи Коши, получаемой по условиям ортогональности уравнений (1), (2) к пробным функциям.

Аппроксимации деформаций ползучести и параметра повреждаемости с учетом начальных условий (10) принимаем в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{11}(t, x_1, x_3) = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^m a_{kj}^{(c1)}(t) \psi_k(x_1) \psi_j(x_3), \quad a_{kj}^{(v1)} \Big|_{t=0} = 0; \\ c_{22}(t, x_1, x_3) = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^m a_{kj}^{(c2)}(t) \psi_k(x_1) \psi_j(x_3), \quad a_{kj}^{(v2)} \Big|_{t=0} = 0; \\ \omega(t, x_1, x_3) = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^m a_{kj}^{(\omega)}(t) \psi_k(x_1) \psi_j(x_3), \quad a_{kj}^{(v3)} \Big|_{t=0} = 0, \end{array} \right. \quad (13)$$

где m – число пробных функций; ψ_k – полиномы Чебышева; $a_{kj}^{(c1)}$, $a_{kj}^{(c2)}$, $a_{kj}^{(\omega)}$ – искомые коэффициенты аппроксимаций.

Искомые функции, с помощью которых определяется напряженно-деформированное состояние оболочки, представляем аппроксимациями, тождест-

венно удовлетворяющими условиям симметрии в вершине крышки (3) и граничным условиям (4)–(9). Построение таких аппроксимаций в рассматриваемых задачах облегчается тем, что исследуемая область имеет каноническую форму, ее граница совпадает с координатной линией $x_1 = \theta$ и граничные условия не содержат производных искомого неизвестного. Для областей сложной формы построение аппроксимаций, тождественно удовлетворяющих граничным условиям, можно осуществить методами теории R -функций [7]. Приведем аппроксимации, удовлетворяющие условиям (3) и (4), отвечающим жесткому закреплению края купола (рис. 2,а):

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1^0(t, x_1) = \frac{x_1}{\theta} \left(1 - \frac{x_1}{\theta}\right) \sum_{k=1}^n a_k^{(u1)}(t) \psi_k(x_1); \\ u_3^0(t, x_1) = \left(1 - \frac{x_1}{\theta}\right) \sum_{k=1}^n a_k^{(u2)}(t) \psi_k(x_1); \\ \vartheta_1^0(t, x_1) = \frac{x_1}{\theta} \left(1 - \frac{x_1}{\theta}\right) \sum_{k=1}^n a_k^{(u3)}(t) \psi_k(x_1); \\ N_1^0(t, x_1) = \sum_{k=1}^n a_k^{(u4)}(t) \psi_k(x_1); \quad N_2^0(t, x_1) = \sum_{k=1}^n a_k^{(u5)}(t) \psi_k(x_1); \\ M_1^0(t, x_1) = \sum_{k=1}^n a_k^{(u6)}(t) \psi_k(x_1); \quad M_2^0(t, x_1) = \sum_{k=1}^n a_k^{(u7)}(t) \psi_k(x_1); \\ Q_1^0 = \sum_{k=1}^n a_k^{(u8)}(t) \psi_k(x_1). \end{array} \right. \quad (14)$$

Аппроксимации, удовлетворяющие условиям (3) и (5)–(9), аналогичны (13), (14).

Рассмотрим применение метода Бубнова–Галеркина к построению задачи Коши, в результате решения которой определяются коэффициенты аппроксимаций [6]. Вначале представим уравнения (1), (2) в операторной форме:

$$\mathbf{A}\mathbf{u} = \mathbf{f} + \mathbf{C}\mathbf{v}; \quad (15)$$

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{w}(\mathbf{v}; \mathbf{u}), \quad (16)$$

где вектор $\mathbf{u}^T = (N_1^0 \quad N_2^0 \quad M_1^0 \quad M_2^0 \quad Q_1^0 \quad u_1^0 \quad u_3^0 \quad \vartheta_1^0)$; вектор $\mathbf{v}^T = (c_{11} \quad c_{22} \quad \omega)$; \mathbf{A} , \mathbf{C} , \mathbf{w} – операторы; \mathbf{f} – вектор, вид которого очевидным образом определяется по векторам \mathbf{u} , \mathbf{v} и уравнениям (1), (2).

Представим аппроксимации искомого неизвестного в матрично-векторной форме:

$$\mathbf{u}(t, \mathbf{x}) \approx \mathbf{u}^{(n)}(t, \mathbf{x}) = \mathbf{u}_v(\mathbf{x}) + \Phi_{\mathbf{u}}^{(n)}(\mathbf{x}) \mathbf{a}_{\mathbf{u}}^{(n)}(t); \quad (17)$$

$$\mathbf{v}(t, \mathbf{x}) \approx \mathbf{v}^{(m)}(t, \mathbf{x}) = \Phi_{\mathbf{v}}^{(m)}(\mathbf{x}) \mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(m)}(t); \quad \mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(m)}(0) = \mathbf{0}, \quad (18)$$

где вектор $\mathbf{x}^T = (x_1, x_3)$; n – число пробных функций; \mathbf{u}_v – вектор, продолжающий граничные значения внутрь области; $\Phi_{\mathbf{u}}^{(n)}$, $\Phi_{\mathbf{v}}^{(m)}$ – матрицы, составленные из $8n$ и $3m^2$ столбцов из пробных функций; $\mathbf{a}_{\mathbf{u}}^{(n)}$, $\mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(m)}$ – векторы, составленные из подлежащих определению коэффициентов аппроксимаций – функций времени.

Подставив аппроксимации (17), (18) в уравнения (15), (16) и записав условия ортогональности к пробным функциям, получим

$$\int_{\Gamma^0} (\Phi_{\mathbf{u}}^{(n)})^T (\mathbf{A}(\mathbf{u}_v + \Phi_{\mathbf{u}}^{(n)} \mathbf{a}_{\mathbf{u}}^{(n)}) - \mathbf{f} - \mathbf{C}(\Phi_{\mathbf{v}}^{(m)} \mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(m)})) d\Gamma^0 = 0; \quad (19)$$

$$\int_{\Gamma} (\Phi_{\mathbf{v}}^{(m)})^T (\Phi_{\mathbf{v}}^{(m)} \dot{\mathbf{a}}_{\mathbf{v}}^{(m)} - \mathbf{w}(\Phi_{\mathbf{v}}^{(m)} \mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(m)}; \mathbf{u}_v + \Phi_{\mathbf{u}}^{(n)} \mathbf{a}_{\mathbf{u}}^{(n)})) d\Gamma = 0, \quad (20)$$

где Γ^0 – срединная поверхность; Γ – объем исследуемой оболочки.

Линейность операторов \mathbf{A} , \mathbf{C} позволяет представить условия ортогональности (19), (20) в виде

$$\begin{aligned} \mathbf{A}^{(n)} \mathbf{a}_{\mathbf{u}}^{(n)} &= \mathbf{f}^{(n)} + \mathbf{C}^{(nm)} \mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(m)}; \\ \dot{\mathbf{a}}_{\mathbf{v}}^{(m)} &= (\mathbf{K}^{(m)})^{-1} \mathbf{w}^{(m)}(\mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(m)}; \mathbf{a}_{\mathbf{u}}^{(n)}), \end{aligned} \quad (21)$$

где

$$\mathbf{A}^{(n)} = \int_{\Gamma^0} (\Phi_{\mathbf{u}}^{(n)})^T (\mathbf{A} \Phi_{\mathbf{u}}^{(n)}) d\Gamma^0; \quad \mathbf{C}^{(nm)} = \int_{\Gamma^0} (\Phi_{\mathbf{u}}^{(n)})^T (\mathbf{C} \Phi_{\mathbf{v}}^{(m)}) d\Gamma^0;$$

$$\mathbf{f}^{(n)} = \int_{\Gamma^0} (\Phi_{\mathbf{u}}^{(n)})^T (\mathbf{f} - \mathbf{A} \mathbf{u}_v) d\Gamma^0; \quad \mathbf{K}^{(m)} = \int_{\Gamma} (\Phi_{\mathbf{v}}^{(m)})^T \Phi_{\mathbf{v}}^{(m)} d\Gamma;$$

$$\mathbf{w}^{(m)}(\mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(m)}; \mathbf{a}_{\mathbf{u}}^{(n)}) = \int_{\Gamma} (\Phi_{\mathbf{v}}^{(m)})^T \mathbf{w}(\Phi_{\mathbf{v}}^{(m)} \mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(m)}; \mathbf{u}_v + \Phi_{\mathbf{u}}^{(n)} \mathbf{a}_{\mathbf{u}}^{(n)}) d\Gamma.$$

С использованием первого уравнения (21) исключим вектор $\mathbf{a}_{\mathbf{u}}^{(n)}$ из второго и получим таким образом задачу Коши относительно вектора $\mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(m)}$:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{a}}_{\mathbf{v}}^{(m)} &= (\mathbf{K}^{(m)})^{-1} \mathbf{w}^{(m)}(\mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(m)}); \\ \mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(m)}(0) &= \mathbf{0}, \end{aligned} \quad (22)$$

где

$$\mathbf{w}^{(m)}(\mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(m)}) = (\mathbf{K}^{(m)})^{-1} \mathbf{w}^{(m)}(\mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(m)}; \mathbf{a}_{\mathbf{u}}^{(n)});$$

$$\mathbf{a}_{\mathbf{u}}^{(n)} = (\mathbf{A}^{(n)})^{-1} (\mathbf{f}^{(n)} + \mathbf{C}^{(nm)} \mathbf{a}_{\mathbf{v}}^{(m)}).$$

Решение задачи Коши (22) с помощью любого приближенного пошагового метода, например Рунге-Кутта в модификации Мерсона [8], позволяет находить на шаге интегрирования коэффициенты аппроксимаций $\mathbf{a}_u^{(n)}$, $\mathbf{a}_v^{(m)}$, а по их значениям – искомые функции, определяющие напряженно-деформированное состояние, деформации ползучести и параметр повреждаемости в каждой точке оболочки.

Расчетные исследования. Рассмотрим результаты расчетов крышки вакуумной камеры из сплава Д16АТ с жесткими угловыми и шарнирными закреплениями (рис. 2), нагруженной давлением $p = 0,1$ МПа. Размеры крышки: $R = 0,35$ м, $h = 0,003$ м, $\theta = 60^\circ$; физико-механические характеристики материала принимаем по данным работы [9]: $E = 72$ ГПа, $\nu = 0,35$, $n = k = 2,93$, $B = 3,4 \cdot 10^{-8}$ МПа $^{-n}$, $A = 1,9 \cdot 10^{-7}$ МПа $^{-k}$, $r = 1,38$.

Расчеты показывают, что закрепления повреждающейся вследствие ползучести крышки существенно влияют на ее ресурс, определяемый условием (11) окончания скрытого разрушения. В крышке с тангенциальными закреплениями вида (5) и (8) реализуется безмоментное состояние, при котором напряжения, изменяясь во времени, остаются равномерно распределенными по толщине, а полученное расчетное время t_ω окончания скрытого разрушения составляет около 9977 ч. При наличии закреплений вдоль нормали вида (6) и (9) напряжения неравномерно распределены и существенно перераспределяются по толщине в результате ползучести, при этом t_ω равно примерно 12 и 10 ч соответственно. В случае жесткого (4) и неподвижного шарнирного (7) закреплений края крышки напряжения неравномерно распределены и существенно перераспределяются по толщине вследствие ползучести (рис. 3). Для крышки с жестко закрепленным краем $t_\omega = 4938$ ч, опасное сечение расположено в заделке, для крышки с неподвижным шарнирным закреплением края $t_\omega \cong 7281$ ч, опасное сечение расположено на некотором расстоянии от закрепленного края и имеет координату $x_1 \cong 1,006$ рад, что составляет $\cong 57,6^\circ$.

Результаты расчетов получены при удержании членов ряда в аппроксимациях решений (13), (14) – $m = n = 16$, когда расхождение во времени до разрушения при $m = n = 15$ составило 0,2...0,4%. Для закреплений (5) и (8) при безмоментном деформировании сферической оболочки численные решения совпадают с аналитическим.

Закрепления влияют на ресурс, определяемый условием (12) для допускаемого прогиба крышки в процессе эксплуатации (рис. 4). Наибольшее в некоторый фиксированный момент времени перемещение вершины крышки получено для жестких закреплений края, наименьшее – для тангенциальных.

На рис. 5 представлены данные о формоизменении срединной поверхности крышки вакуумной камеры с различными закреплениями края вследствие ползучести в исходном состоянии и в момент окончания скрытого разрушения. Видно, что форма срединной поверхности крышки весьма существенно изменяется с течением времени. Во всех примерах в начальный момент времени при упругом деформировании оболочки прогибы намного меньше толщины, что отвечает геометрической линейности задачи. Заметный рост прогибов ($0 < |u_3/h| < 2,5$) вплоть до исчерпания ресурса оболочки обусловлен лишь самопроизвольными необратимыми деформациями ползучести.

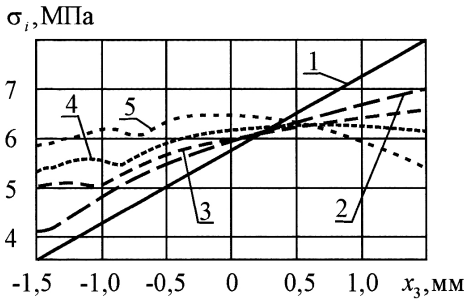


Рис. 3

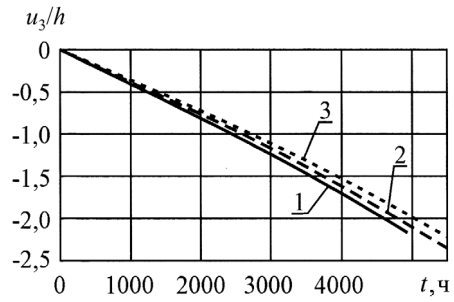


Рис. 4

Рис. 3. Перераспределение интенсивности напряжений по толщине в опасном сечении шарнирно закрепленной крышки: 1 – $t = 0$; 2 – $t \cong 13$ ч; 3 – $t \cong 1007$ ч; 4 – $t \cong 6005$ ч; 5 – $t \cong 7281$ ч.

Рис. 4. Перемещение вследствие ползучести вершины крышки с жестким (4) – 1, неподвижным шарнирным (7) – 2 и тангенциальными видами (5), (8) – 3 закреплениями.

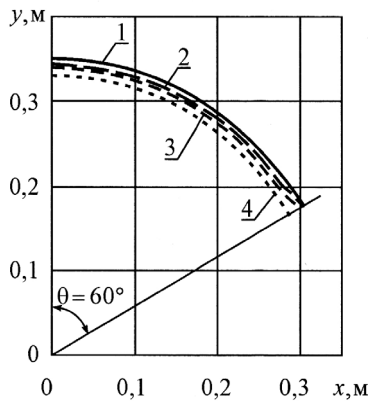


Рис. 5. Формоизменение срединной поверхности недеформированной крышки – 1, с жестким (4) – 2, неподвижным шарнирным (7) – 3 и тангенциальными видами (5), (8) – 4 закреплениями.

Выводы

1. Закрепления краев влияют на ресурс повреждающейся вследствие ползучести крышки вакуумной камеры под атмосферным давлением, причем существенно на время окончания скрытого разрушения и незначительно – на время предельного формоизменения.

2. Наибольший ресурс по времени окончания скрытого разрушения обеспечивают тангенциальные закрепления, наименьший – закрепления вдоль нормали к срединной поверхности крышки. Наименьший ресурс по формоизменению обеспечивается жесткими закреплениями, наибольший – тангенциальными.

Резюме

Для розрахункового дослідження ресурсу при повзучості тонкої сферичної кришки вакуумної камери розглянуто математичні постановки і запропоновано метод розв'язку початково-крайових задач теорії повзучості тонких оболонок з урахуванням пошкоджуваності матеріалу. Досліджено вплив закріплень вздовж нормалі та дотичної до срединної поверхні, а також куту-

вих закріплень краю на ресурс кришки при повзучості під атмосферним тиском. За розрахунковими даними встановлено залежність ресурсу кришки від закріплень її краю: суттєва за часом прихованого руйнування і несуттєва за допустимим прогином.

1. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
2. *Бурлаков А. В., Львов Г. И., Морачковский О. К.* Ползучесть тонких оболочек. – Харьков: Вища шк. Изд-во при Харьков. ун-те, 1977. – 124 с.
3. *Гольденвейзер А. Л.* Теория упругих тонких оболочек. – М.: Наука, 1976. – 512 с.
4. *Гетман А. Ф.* Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 428 с.
5. *Флетчер К.* Численные методы на основе метода Галеркина / Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 352 с.
6. *Морачковский О. К., Ромашов Ю. В.* Решение начально-краевых задач теории ползучести повреждающихся тел методом Бубнова–Галеркина // Теорет. и прикл. механика. – 2006. – Вып. 42. – С. 23 – 28.
7. *Рвачев В. Л.* Теория R-функций и некоторые ее приложения. – Киев: Наук. думка, 1982. – 566 с.
8. *Ланс Дж. Н.* Численные методы для быстродействующих вычислительных машин / Пер. с англ. – М.: Иностран. лит., 1962. – 208 с.
9. *Конкин В. Н., Морачковский О. К.* Ползучесть и длительная прочность легких сплавов, проявляющих анизотропные свойства // Пробл. прочности. – 1987. – № 5. – С. 38 – 42.

Поступила 19. 07. 2010