

ПОВЗУЧИСТЬ І ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ВНАСЛІДОК ПОВЗУЧОСТІ ГНУЧКИХ ПОЛОГИХ ОБОЛОНОК ІЗ МАТЕРІАЛІВ З ХАРАКТЕРИСТИКАМИ, ЩО ЗАЛЕЖАТЬ ВІД ВИДУ НАВАНТАЖЕННЯ

Розглянуто задачу повзучості та пошкоджуваності внаслідок повзучості геометрично нелінійних пологих оболонок із матеріалів, характеристики яких залежать від типу навантаження. Запропоновано метод розв'язування, який базується на сумісному застосуванні методів R-функцій і Рунге – Кутта – Мерсона. Наведено результати досліджень впливу виду навантаження та геометричної форми на повзучість і тривалу міцність гнучких пологих оболонок.

Задачі повзучості гнучких оболонок і пластин досліджувалися у роботах [1, 3, 4, 6–8, 10, 11] та ін. У більшість публікацій розглядаються оболонки та пластини з традиційних матеріалів, нечутливих до типу навантаження. Лише одиничні роботи, наприклад [7, 11], присвячені дослідженню повзучості геометрично нелінійних оболонок з матеріалів з характеристиками, що залежать від виду навантаження. Публікації, де розглядаються задачі повзучості та пошкоджуваності внаслідок повзучості гнучких пологих оболонок неканонічної форми з матеріалів з характеристиками, залежними від типу навантаження, у відомих автору літературних джерелах відсутні.

Ефекти, що визначають залежність характеристик ізотропних матеріалів від виду навантаження, на основі аналізу великої кількості експериментальних даних про пружну та непружну поведінку конструкційних матеріалів вперше були сформульовані в роботі [2]. Це різноопірність розтягу та стиску, незалежне протікання деформування в умовах кручення, вплив гідростатичного тиску, стисливість матеріалу при повзучості, ефект Пойнтінга (осьове видовження при чистому скруті). До таких матеріалів можна віднести легкі сплави, деякі конструкційні сталі, суперсплави, композиційні матеріали й ін.

У статті будуть розглянуті задачі повзучості та пошкоджуваності внаслідок повзучості гнучких пологих оболонок складної форми в плані. Буде досліджено вплив геометричної форми та виду навантаження на повзучість і пошкоджуваність гнучких пологих оболонок.

Розглянемо в прямокутній декартовій системі координат Ox_1x_2z ізотропну тонку пологу оболонку товщини h довільної форми Ω в плані. На оболонку діє поперечне навантаження $q_z = q_z(x_1, x_2, t)$ і контурні зусилля $P_n^0(x_1, x_2, t)$ і $P_\tau^0(x_1, x_2, t)$ у площині Ox_1x_2 . Тут t – час. Вісь Oz перпендикулярна до плану оболонки. Припускаємо, що виконуються гіпотези Кірхгофа – Лява, й у процесі повзучості деформації оболонки залишаються малими. Температуру вважаємо сталою.

Кінематично можливі швидкості переміщень точок координатної поверхні оболонки $\dot{u}_1(x_1, x_2, t)$, $\dot{u}_2(x_1, x_2, t)$, $\dot{w}(x_1, x_2, t)$ уздовж осей Ox_1 , Ox_2 , Oz у довільний момент часу $t \neq 0$ повинні задовольняти варіаційне рівняння $\delta U = 0$ для функціонала в формі Лагранжа

$$U(\dot{u}_1, \dot{u}_2, \dot{w}) = U_L(\dot{u}_1, \dot{u}_2, \dot{w}) + U_N(\dot{u}_1, \dot{u}_2, \dot{w}), \quad (1)$$

де доданки U_L , U_N мають вигляд [6]

$$U_L = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} [A_1[\dot{u}_{1,1}^2 + \dot{u}_{2,2}^2 + \dot{w}^2(k_1^2 + k_2^2)] + 2k_1\dot{w}\dot{u}_{1,1} + 2k_2\dot{w}\dot{u}_{2,2}] + 2A_2[\dot{u}_{1,1}\dot{u}_{2,2} + \dot{w}(k_1\dot{u}_{2,2} + k_2\dot{u}_{1,1}) + k_1k_2\dot{w}^2] + A_3(\dot{u}_{1,2} + \dot{u}_{2,1})^2 -$$

$$\begin{aligned}
& -2B_1[\dot{u}_{1,1}\dot{w}_{,11} + \dot{u}_{2,2}\dot{w}_{,22} + \dot{w}(k_1\dot{w}_{,11} + k_2\dot{w}_{,22})] - 2B_2[\dot{u}_{1,1}\dot{w}_{,22} + \\
& + \dot{u}_{2,2}\dot{w}_{,11} + \dot{w}(k_1\dot{w}_{,22} + k_2\dot{w}_{,11})] - 2B_3\dot{w}_{,12}(\dot{u}_{1,2} + \dot{u}_{2,1}) + \\
& + D_{11}(\dot{w}_{,11}^2 + \dot{w}_{,22}^2) + 2D_{22}\dot{w}_{,11}\dot{w}_{,22} + D_{33}\dot{w}_{,12}^2] dx_1 dx_2 - \\
& - \iint_{\Omega} \dot{q}_2 \dot{w} dx_1 dx_2 - \int_{\partial\Omega} [\dot{P}_n^0(\dot{u}_1 n_1 + \dot{u}_2 n_2) + \dot{P}_\tau^0(\dot{u}_2 n_1 + \dot{u}_1 n_2)] dS, \\
U_N = & \frac{1}{2} \iint_{\Omega} [A_1[w_{,1}^2 \dot{w}_{,1}^2 + w_{,2}^2 \dot{w}_{,2}^2 + 2w_{,1}\dot{u}_{1,1}\dot{w}_{,1} + 2w_{,2}\dot{u}_{2,2}\dot{w}_{,2} + 2\dot{w}(k_1 w_{,1}\dot{w}_{,1} + \\
& + k_2 w_{,2}\dot{w}_{,2})] + 2A_2[w_{,1}\dot{u}_{2,2}\dot{w}_{,1} + w_{,2}\dot{u}_{1,1}\dot{w}_{,2} + \dot{w}(k_1 w_{,2}\dot{w}_{,2} + \\
& + k_2 w_{,1}\dot{w}_{,1}) + w_{,1}w_{,2}\dot{w}_{,1}\dot{w}_{,2}] + A_3[w_{,1}^2 \dot{w}_{,2}^2 + w_{,2}^2 \dot{w}_{,1}^2 + 2(w_{,1}\dot{w}_{,2} + \\
& + w_{,2}\dot{w}_{,1})(\dot{u}_{1,2} + \dot{u}_{2,1}) + 2w_{,1}w_{,2}\dot{w}_{,1}\dot{w}_{,2}] - 2B_1(w_{,1}\dot{w}_{,1}\dot{w}_{,11} + \\
& + w_{,2}\dot{w}_{,2}\dot{w}_{,22}) - 2B_2(w_{,1}\dot{w}_{,1}\dot{w}_{,22} + w_{,2}\dot{w}_{,2}\dot{w}_{,11}) - 2B_3\dot{w}_{,12}(w_{,1}\dot{w}_{,2} + \\
& + w_{,2}\dot{w}_{,1}) + a_{11}\dot{w}_{,1}^2 + a_{22}\dot{w}_{,2}^2 + 2a_{12}\dot{w}_{,1}\dot{w}_{,2}] dx_1 dx_2 - \\
& - \iint_{\Omega} [\dot{N}_{11}^c(\dot{u}_{1,1} + w_{,1}\dot{w}_{,1}) + \dot{N}_{22}^c(\dot{u}_{2,2} + w_{,2}\dot{w}_{,2}) + \\
& + \dot{N}_{12}^c(\dot{u}_{1,2} + \dot{u}_{2,1} + w_{,1}\dot{w}_{,2} + w_{,2}\dot{w}_{,1}) - \dot{M}_{11}^c \dot{w}_{,11} - \\
& - \dot{M}_{22}^c \dot{w}_{,22} - 2\dot{M}_{12}^c \dot{w}_{,12} + \dot{q}_c \dot{w}] dx_1 dx_2.
\end{aligned}$$

Тут

$$\begin{aligned}
A_1 &= \int_{(h)} \frac{E}{1-\nu^2} dz, & A_2 &= \nu A_1, & A_3 &= \int_{(h)} G dz, \\
B_1 &= \int_{(h)} \frac{Ez}{1-\nu^2} dz, & B_2 &= \nu B_1, & B_3 &= 2 \int_{(h)} Gz dz, \\
D_{11} &= \int_{(h)} \frac{Ez^2}{1-\nu^2} dz, & D_{22} &= \nu D_1, & D_{33} &= 4 \int_{(h)} Gz^2 dz, \\
\dot{N}_{11}^c &= \int_{(h)} \frac{E}{1-\nu^2} (\dot{p}_{11} + \nu \dot{p}_{22}) dz, & \dot{N}_{22}^c &= \int_{(h)} \frac{E}{1-\nu^2} (\dot{p}_{22} + \nu \dot{p}_{11}) dz, \\
\dot{N}_{12}^c &= 2 \int_{(h)} G \dot{p}_{12} dz, & \dot{M}_{11}^c &= \int_{(h)} \frac{Ez}{1-\nu^2} (\dot{p}_{11} + \nu \dot{p}_{22}) dz, \\
\dot{M}_{22}^c &= \int_{(h)} \frac{Ez}{1-\nu^2} (\dot{p}_{22} + \nu \dot{p}_{11}) dz, & \dot{M}_{12}^c &= 2 \int_{(h)} G \dot{p}_{12} z dz, \\
\dot{q}^c &= \int_{(h)} \frac{E}{1-\nu^2} [(k_1(\dot{p}_{11} + \nu \dot{p}_{22}) + k_2(\dot{p}_{22} + \nu \dot{p}_{11}))] dz, \\
a_{11} &= \int_{(h)} \sigma_{11} dz, & a_{22} &= \int_{(h)} \sigma_{22} dz, & a_{12} &= \int_{(h)} \sigma_{12} dz,
\end{aligned}$$

k_1, k_2 – головні кривини координатної поверхні оболонки; E, G, ν – модуль пружності, модуль зсуву та коефіцієнт Пуассона матеріалу. Компоненти тензора швидкостей деформацій повзучості \dot{p}_{ij} , $i, j = 1, 2$, напруження σ_{ij} , а також функції w_i вважаються заданими і не варіюються.

Основні невідомі початково-крайової задачі повзучості можуть бути знайдені з розв'язку задачі Коші за часом:

$$\begin{aligned}
\frac{du_1}{dt} &= \dot{u}_1, & \frac{du_2}{dt} &= \dot{u}_2, & \frac{dw}{dt} &= \dot{w}, & \frac{dw_{,1}}{dt} &= \dot{w}_{,1}, & \frac{dw_{,2}}{dt} &= \dot{w}_{,2}, \\
\frac{d\varepsilon_{11}}{dt} &= \dot{\varepsilon}_{1,1} + k_1 \dot{w} - z \dot{w}_{,11} + w_{,1} \dot{w}_{,1}, \\
\frac{d\varepsilon_{22}}{dt} &= \dot{\varepsilon}_{2,2} + k_2 \dot{w} - z \dot{w}_{,22} + w_{,2} \dot{w}_{,2}, \\
\frac{d\gamma_{12}}{dt} &= 2 \frac{d\varepsilon_{12}}{dt} = \dot{\varepsilon}_{1,2} + \dot{\varepsilon}_{2,1} - 2z \dot{w}_{,12} + w_{,1} \dot{w}_{,2} + w_{,2} \dot{w}_{,1}, \\
\frac{d\sigma_{11}}{dt} &= \frac{E}{1-\nu^2} [\dot{\varepsilon}_{11} + \nu \dot{\varepsilon}_{22} - (\dot{p}_{11} + \nu \dot{p}_{22})], \\
\frac{d\sigma_{22}}{dt} &= \frac{E}{1-\nu^2} [\dot{\varepsilon}_{22} + \nu \dot{\varepsilon}_{11} - (\dot{p}_{22} + \nu \dot{p}_{11})], \\
\frac{d\sigma_{12}}{dt} &= 2G(\dot{\varepsilon}_{12} - \dot{p}_{12}), \\
\frac{dp_{11}}{dt} &= \dot{p}_{11}, & \frac{dp_{22}}{dt} &= \dot{p}_{22}, & \frac{dp_{12}}{dt} &= \dot{p}_{12}, & \frac{d\psi}{dt} &= \dot{\psi},
\end{aligned} \tag{2}$$

де ε_{ij} , $i, j = 1, 2$, – компоненти тензора повних деформацій; ψ – параметр пошкоджуваності. Початкові умови для рівнянь (2) знаходять із розв'язку задачі пружного деформування оболонки.

Для швидкостей деформацій повзучості приймемо визначальні співвідношення, що описують різноопірність матеріалу розтягу та стиску в умовах повзучості, незалежне протікання деформування в умовах чистого кручення, вплив гідростатичного тиску, стисливість матеріалу при повзучості, ефект Пойнтінга, а також різний розвиток пошкоджуваності при розтягу, стиску та зсуві, взаємозв'язок процесів повзучості й пошкоджуваності, анізотропію, зумовлену пошкоджуваністю [12]:

$$\dot{p}_{k\ell} = \sigma_e^m \psi^{-\beta} \left(\frac{\psi_*}{\psi_* - \psi} \right)^q \left(\frac{C\sigma_{k\ell} + AI_1 \delta_{k\ell}}{\sigma_2} + B e_k e_\ell \right), \quad k, \ell = 1, 2, 3,$$

де σ_e – еквівалентне напруження, яке є інваріантною скалярною функцією тензора напружень σ_{ij} і тензорного добутку $\mathbf{e} \otimes \mathbf{e} = e_i e_k$: $\sigma_e = \sigma_2 + B \sigma_{k\ell} e_k e_\ell$.

Тут $\sigma_2^2 = AI_1^2 + CI_2$, $I_1 = \sigma_{k\ell} \delta_{k\ell}$, $I_2 = \sigma_{k\ell} \sigma_{k\ell}$; $\mathbf{e} = (e_1, e_2, e_3)$ – одиничний вектор, спрямований перпендикулярно до площини мікротріщини; A, B, C – сталі матеріалу. Тензорний добуток $\mathbf{e} \otimes \mathbf{e}$ утворює тензор 2-го рангу (діаду), що характеризує анізотропію матеріалу, обумовлену пошкоджуваністю. У роботі [12] визначено вектор пошкоджуваності $\Psi = \psi \mathbf{e}$ і тензор пошкоджуваності другого рангу $\psi_{ij} = \psi \mathbf{e} \otimes \mathbf{e} = \psi e_i e_j$, що дозволяє враховувати анізотропний характер пошкоджуваності.

Якщо мікротріщини в матеріалі зорієнтовані перпендикулярно до напрямку дії максимального головного напруження, то параметри A, B, C визначаємо за формулами [12]

$$B = K_+^{1/(m+1)} - K_-^{1/(m+1)}, \quad \sqrt{2C} = K_0^{1/(m+1)} - B, \quad A = K_-^{2/(m+1)} - C,$$

де $K_+, K_-, K_0, m, \beta, q$ – константи матеріалу, відомі з базових експериментів на розтяг, стиск і кручення.

За скалярну міру пошкоджуваності ψ приймемо питому енергію, розсіяну в процесі повзучості [9]:

$$\psi = \int_0^t W dt = \int_0^t \sigma_{ij} \dot{\rho}_{ij} dt.$$

Тоді кінетичне рівняння для ψ буде мати вигляд [12]

$$\dot{\psi} = \sigma_e^{m+1} \psi^{-\beta} \left(\frac{\psi_*}{\psi_* - \psi} \right)^q.$$

Тут $\psi_* = \int_0^{t_*} W dt$ – критичне значення параметра пошкоджуваності в момент часу $t = t_*$, який відповідає часу до руйнування.

Для розв'язання початково-крайової задачі повзучості будемо використовувати метод R -функцій [5] разом із методом Рунге – Кутта – Мерсона з автоматичним вибором кроку інтегрування за часом задачі Коші (2). Мінімізацію функціонала Лагранжа (1) на кожному часовому кроці в моменти часу, що відповідають схемі метода Рунге – Кутта – Мерсона, будемо проводити методом Рітца.

Основні типи закріплення торців оболонки, кінематичні граничні умови та відповідні їм структури розв'язку наведено в роботі [6].

Розглянемо повзучість і пошкоджуваність внаслідок повзучості прямокутної в плані оболонки й оболонки складної форми (рис. 1). Матеріал оболонки – титановий сплав ОТ-4 при температурі $T = 748$ К. Інтенсивність рівномірно розподіленого поперечного навантаження $|q_z| = 15$ МПа. Розміри в плані: $2a = 0.36$ м, $2b = 0.24$ м, $r = 0.08$ м. Головні кривини: $k_1 = 0$, $k_2 = 5$ м⁻¹. Товщина $h = 0.01$ м. Умови закріплення – нерухомий шарнір. Пружні константи матеріалу: $E = 60$ ГПа, $\nu = 0.3$. Границя міцності за розтягу $\sigma_B = 430$ МПа. Константи матеріалу:

$$\beta = 0.0, \quad m = 4, \quad q = 2, \quad K_+ = 13.5 \cdot 10^{-2} \text{ ГПа}^{-m} \text{ год}^{-1},$$

$$K_- = 7.5 \cdot 10^{-2} \text{ ГПа}^{-m} \text{ год}^{-1}, \quad K_0 = 2.77 \text{ ГПа}^{-m} \text{ год}^{-1}, \quad \psi_* = 100.0 \text{ МДж/м}^3.$$

Для нерухомого шарніра головні граничні умови та відповідна структура розв'язку мають вигляд

$$\dot{w} = \dot{u}_1 = \dot{u}_2 = 0,$$

$$\dot{w} = \omega \Phi_1, \quad \dot{u}_1 = \omega \Phi_2, \quad \dot{u}_2 = \omega \Phi_3, \quad (3)$$

де $\Phi_i, i = 1, 2, 3$, – невизначені компоненти структури розв'язку, а функція $\omega(x), x = (x_1, x_2)$, задовольняє умови [5]

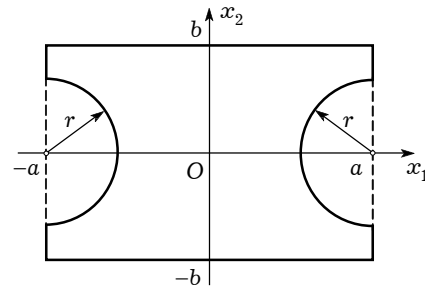


Рис. 1

$$\omega(x) > 0, \quad x \in \Omega,$$

$$\omega(x) = 0, \quad \omega_{,n} = -1, \quad x \in \partial\Omega,$$

де \mathbf{n} – зовнішня нормаль до межі області Ω .

Рівняння меж прямокутної оболонки й оболонки складної форми будуть мати відповідно такий вигляд:

$$\omega(x) = F_1 \wedge_0 F_2 = 0,$$

$$\omega(x) = [(F_1 \wedge_0 F_2) \wedge_0 F_3] \wedge_0 F_4 = 0,$$

$$\text{де } F_1 = \frac{1}{2b}(b^2 - x_2^2), \quad F_2 = \frac{1}{2a}(a^2 - x_1^2),$$

$$F_3 = \frac{1}{2r}[(x_1 - a)^2 - x_2^2 - r^2], \quad F_4 = \frac{1}{2r}[(x_1 + a)^2 - x_2^2 - r^2].$$

Символ \wedge_0 позначає операцію R -кон'юнкції [5]: $f_1 \wedge_0 f_2 = f_1 + f_2 - \sqrt{f_1^2 + f_2^2}$.

Невизначені компоненти структури розв'язку подаємо у вигляді

$\Phi_i(x) = \Phi_{iN}(x) = \sum_{k=1}^{N_i} C_k^{(i)} \varphi_k(x)$, де $\{\varphi_k\}$ – система степеневих поліномів вигляду $x_1^m x_2^n$; степінь полінома визначається як $P = m + n$, $m, n = 0, 1, \dots$; $C_k^{(i)}$ – невизначені коефіцієнти.

При розв'язуванні враховували симетрію задачі. Для прямокутної в плані оболонки загальна кількість вузлів інтегрування по чверті області дорівнювала 100, за товщиною – 10. Степені поліномів у структурі розв'язку (3): $P_1 = 10$, $P_2 = P_3 = 7$. Для оболонки з круговими вирізами кількість вузлів інтегрування по чверті області дорівнювала 200, за товщиною – 10. Степені поліномів: $P_1 = 14$, $P_2 = P_3 = 11$. Похибка розв'язку задачі Коші за часом $\delta_0 = 0.01$.

Чисельні результати дослідження повзучості та пошкоджуваності внаслідок повзучості для прямокутної оболонки (криві 1) і оболонки складної форми (криві 2) при $q_z = 15.0$ МПа наведено на рис. 2–6. На рис. 2 наведено зростання в часі безрозмірних прогинів w/h у центрі оболонок. На рис. 3 і рис. 4 показано зміну в часі нормальних напружень σ_{22} і параметра пошкоджуваності ψ в центрі на внутрішній поверхні $z = 0.5 h$.

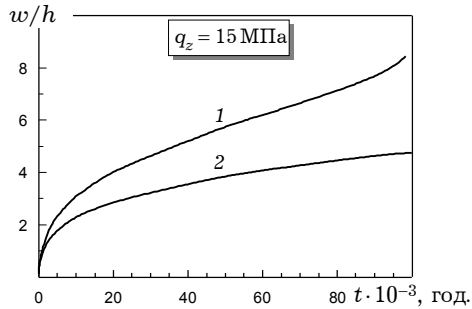


Рис. 2

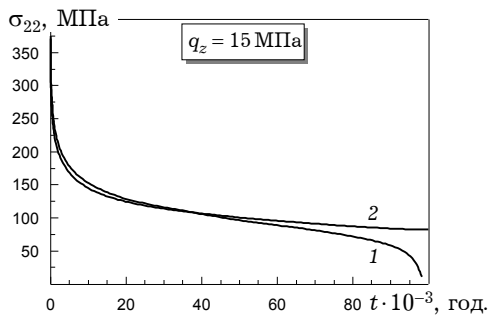


Рис. 3

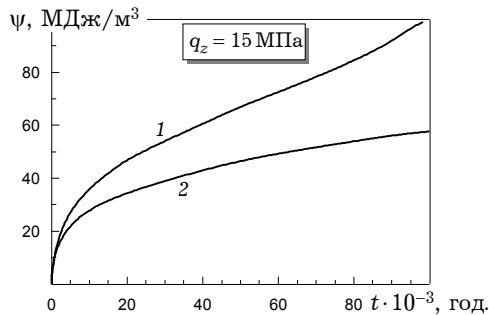


Рис. 4

На рис. 5, 6 наведено графіки зміни в часі повних ε_{22} і пружних ε_{22}^e деформацій у центрі на внутрішній поверхні прямокутної оболонки та оболонки складної форми.

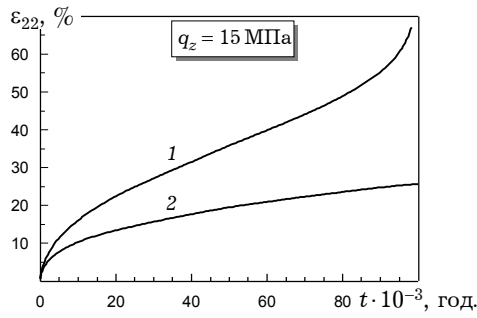


Рис. 5

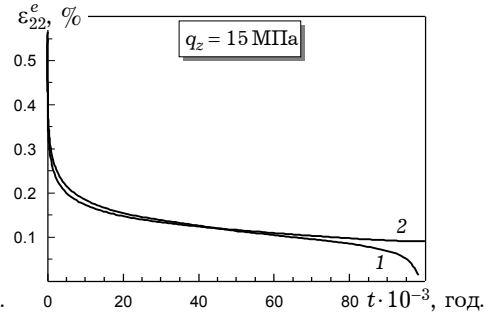


Рис. 6

На рис. 7–9 наведено графіки відповідно прогинів w/h , напружень σ_{22} і параметра пошкоджуваності ψ у центрі на внутрішній поверхні прямокутної оболонки (криві 1) та оболонки складної форми (криві 2) при $q_z = -15.0$ МПа.

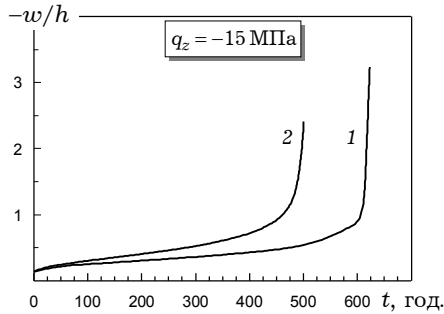


Рис. 7

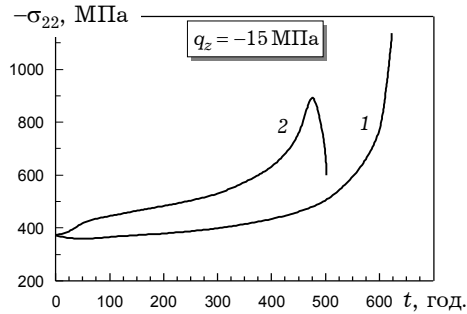


Рис. 8

Критичний час t_* будемо визначати не тільки з умови досягнення питомою енергією, розсіяною в процесі повзучості, критичного значення в будь-якій точці, але й за допомогою наступних двох умов: 1) умови досягнення найбільшою за модулем головною деформацією деякої граничної величини ε_* ; 2) умови досягнення найбільшим за модулем головним напруженням деякого граничного значення σ_* , що є характеристикою матеріалу.

Для визначеності приймаємо, що критичний час t_* настає при виконанні однієї з таких трьох умов у будь-якій точці оболонки:

$$\psi = 99.99 \text{ МДж/м}^3,$$

$$\max \{ |\varepsilon_1|, |\varepsilon_2| \} = \varepsilon_* = 5 \%,$$

$$\max \{ |\sigma_1|, |\sigma_2| \} = \sigma_* = \alpha \sigma_B, \quad \text{де} \quad \alpha = 1.$$

При дії на оболонку зовнішнього тиску $q_z = 15.0$ МПа критичний час t_* знаходимо з умови $\max \{ |\varepsilon_1|, |\varepsilon_2| \} = \varepsilon_{22} = 5\%$. Для прямокутної в плані оболонки $t_* \approx 1100$ год., а для оболонки з круговими вирізами $t_* \approx 1900$ год.

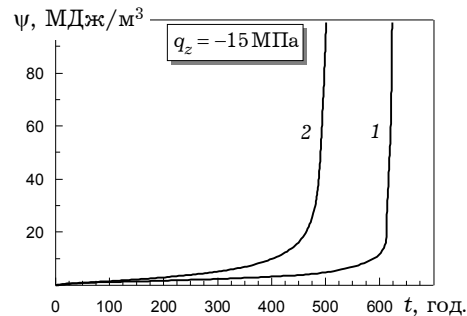


Рис. 9

У цьому випадку стріла прогинів за досить короткий час досягає значень декількох товщин оболонки (рис. 2), а повні деформації стають скінченними ($\epsilon_{22} > 5\%$) (рис. 5). Як видно з наведених результатів, за рахунок інтенсивної повзучості спостерігається зменшення пружних деформацій (рис. 6) і відповідно швидка релаксація максимальних напружень (рис. 3). Фактично у цьому випадку визначаємо не час до руйнування, а ресурс роботи за допустимих деформацій. При цьому кругові вирізи збільшують ресурс роботи. Для більш точного моделювання процесів повзучості та пошкоджуваності внаслідок повзучості при деформаціях, більших ніж 5%, необхідно залучати теорію скінченних деформацій.

При дії на оболонку внутрішнього тиску $q_z = -15.0$ МПа критичний час t_* знаходимо з умови $\max\{|\sigma_1|, |\sigma_2|\} = |\sigma_{22}| = \sigma_v$. Для прямокутної в плані оболонки $t_* \approx 400$ год, а для оболонки з круговими вирізами $t_* \approx 60$ год. Тут спостерігається протилежна картина. Стріла прогинів значно менша, ніж при дії на оболонку зовнішнього тиску, і відповідно нижчим є рівень деформацій. У центрі оболонки (по всій товщині) напруження є стискувальними і процес повзучості йде з меншою інтенсивністю, ніж при розтягу. При цьому пружні деформації зростають і відповідно зростають напруження (рис. 8), які швидко досягають критичного значення. Тут час до руйнування більше залежить від абсолютної величини напружень, ніж від величини питомої енергії, розсіяної в процесі повзучості. При цьому наявність кругових вирізів зменшує критичний час.

З наведених результатів розрахунку повзучості гнучких пологих оболонок з матеріалів з характеристиками, що залежать від виду навантаження, можна зробити висновок, що процеси повзучості та пошкоджуваності в оболонці значною мірою залежать від напрямку дії зовнішнього навантаження. При цьому спостерігаються істотні не тільки кількісні, але і якісні розходження у розвитку процесів повзучості та пошкоджуваності.

1. Бурлаков А. В., Львов Г. И., Морачковский О. К. Длительная прочность оболочек. – Харьков: Вища шк., 1981. – 104 с.
2. Золочевский А. А. Разработка математических моделей упругости, пластичности, ползучести изотропных и анизотропных тел с характеристиками, зависящими от вида нагружения: Дис. ... докт. техн. наук. – Харьков, 1994. – 521 с.
3. Кантор Б. Я., Коломак В. Д. К технической теории ползучести гибких оболочек // Динамика и прочность машин. – 1975. – Вып. 21. – С. 26–33.
4. Подгорный А. Н., В. В. Бортовой, П. П. Гонтаровский и др. Ползучесть элементов машиностроительных конструкций. – Киев: Наук. думка, 1984. – 264 с.
5. Рвачев В. Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения. – Киев: Наук. думка, 1982. – 552 с.
6. Склепус С. Метод R-функций у задачах повзучості гнучких пологих оболонок // Машинознавство. – 2002. – № 9 (63). – С. 8–13.
7. Склепус С. Н. Исследование ползучести гибких пологих оболочек из материалов с различными свойствами при растяжении и сжатии // Вісн. НТУ «ХПІ». – 2005. – 22. – С. 29–36.
8. Скребуова Т. К., Федоров В. А. Ползучесть и хрупкое разрушение гибкой круглой пластинки // Динамика и прочность машин. – 1984. – Вып. 39. – С. 24–28.
9. Соснин О. В., Горев Б. В., Никитенко А. Ф. Энергетический вариант теории ползучести. – Новосибирск: Ин-т гидродинамики АН СССР, 1986. – 96 с.
10. Терегулов И. Г. Изгиб и устойчивость тонких пластин и оболочек при ползучести. – Москва: Наука, 1969. – 206 с.
11. Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K., Sychov A. Zum Kriechen dunner Rotationsschalen unter Einbeziehung geometrischer Nichtlinearität sowie der Asymmetrie der Werkstoffeigenschaften // Forschung im Ingenieurwesen. – 1996. – 62, No. 3. – S. 47–57.
12. Betten J., Sklepus S., Zolochevsky A. A creep damage model for initially isotropic materials with different properties in tension and compression // Eng. Fract. Mech. – 1998. – 59, No. 5. – P. 623–641.

**ПОЛЗУЧЕСТЬ И ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ВСЛЕДСТВИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ
ГИБКИХ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК ИЗ МАТЕРИАЛОВ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ,
ЗАВИСЯЩИМИ ОТ ВИДА НАГРУЖЕНИЯ**

Рассмотрена задача ползучести и повреждаемости вследствие ползучести геометрически нелинейных пологих оболочек из материалов с характеристиками, которые зависят от вида нагружения. Разработан метод решения, базирующийся на совместном применении методов R-функций и Рунге – Кутта – Мерсона. Приведены результаты исследования влияния вида нагружения и геометрической формы на ползучесть и длительную прочность гибких пологих оболочек.

**CREEP AND DAMAGE DUE TO CREEP OF FLEXIBLE SHALLOW
SHELLS FROM MATERIALS WITH CHARACTERISTICS
DEPENDING ON TYPE OF LOADING**

A creep and damage due to creep problem for geometrically nonlinear shallow shells from materials with characteristics depending on type of loading is considered. The R-function method and the Runge – Kutta – Merson method have been used for solution procedure. The influence of external load direction and geometric form of shell on creep behavior and long-time strength of flexible shallow shells has been investigated.

Ін-т проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України, Харків

Одержано
27.06.06