

## ВПЛИВ КОСМІЧНОЇ РАДІАЦІЇ ТА ЦИКЛІЧНОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ НА ПОШКОДЖУВАНІСТЬ СТРИЖНЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

В статті надано рівняння стану теплової та радіаційної повзучості, що супроводжується механізмами незворотної пошкоджуваності, які сформульовані для випадку періодичної зміни температур та напружень. Рівняння запропоновано для аналізу деформування та довготривалої міцності конструктивних елементів, що експлуатуються на космічних літальних апаратах. Розглянуто вплив механізмів пошкоджуваності внаслідок теплової повзучості, електронного опромінювання й циклічності змінювання температур на швидкість накопичування пошкоджень й час до закінчення прихованого руйнування полімерного стрижня.

**Ключові слова:** повзучість, пошкоджуваність, радіаційне опромінювання, температура, напруження, періодична зміна, руйнування.

The thermal and irradiation creep-damage constitutive equations for the case of periodic varying of stress and temperature are given in a paper. Those equations are suggested for the analysis of deformation and long term strength of structural members which are used in spacecrafts. The influence of damage due to thermal creep and electronic irradiation as well as cyclic temperature varying on the damage accumulation rate and time to fracture of polymer bar is regarded.

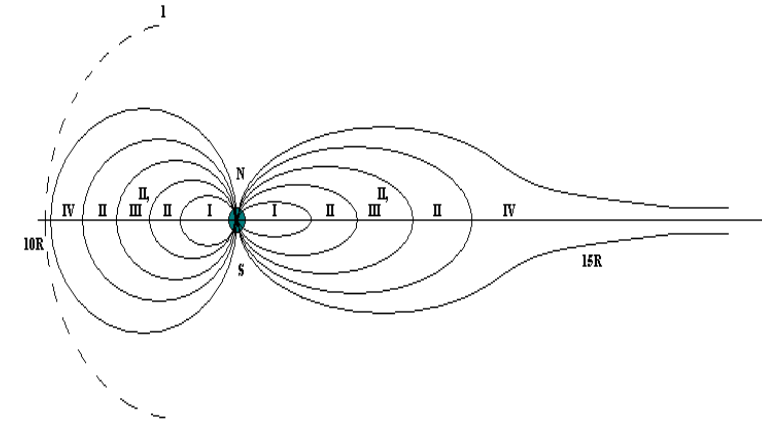
**Keywords:** creep, damage, irradiation, temperature, stress, periodic varying, fracture.

**1. Вступ.** В останні десятиріччя використання штучних супутників Землі (ШСЗ) набуло достатньо масового характеру у зв'язку з їхнім застосуванням у теле- та радіомовленні, навігаційних системах, при дистанційному зондуванні Землі тощо. На теперішній час істотно зросли й терміни функціонування ШСЗ на орбіті, при цьому довга тривалість їхньої роботи обумовлює й додаткові вимоги до довготривалої міцності матеріалів, з яких виготовляються конструктивні елементи ШСЗ, та самих елементів у цілому. Стаття присвячена опису методики оцінювання часу до закінчення прихованого руйнування (деградації) стрижневих елементів з полімерних матеріалів при дії на них термосилових та радіаційних полів.

**2. Умови роботи ШСЗ.** Конструктивні елементи ШСЗ, які знаходяться на навколосеземних орбітах, зазнають впливу космічної радіації. В залежності від відстані до Землі, вони можуть опинятись у поясах різних елементарних часток (рис. 1).

Для приклада розглянемо ШСЗ, який обертається навколо Землі за коловою орбітою з періодом 0.9 год (54 хв). Радіус обертання (відстань від центра Землі до ШСЗ) складає 25508 км, тобто ШСЗ знаходиться у зовнішньому електронному поясі (його границя – 22000 км від поверхні Землі).

На супутниках, що розглядаються, можуть бути розміщені різноманітні конструктивні елементи та елементи приладів, виконані з полімерних та композиційних матеріалів. За даними робіт [1, 2], електронне опромінювання та температурно-силова дія спричиняє істотну деградацію властивостей матеріалів, що розглядаються.



1- границя магнітосфери. I – внутрішній (протонний) пояс; II – пояс протонів малих енергій; III – зовнішній (електронний) пояс; IV – зона квазі-захвату часток сонячного вітру. Переріз відповідає полуденному меридіану

Рис. 1. Радіаційний пояс Землі

**3. Рівняння стану.** При дії на досліджуване тіло радіаційного потоку та силових полів деформація повзучості  $\varepsilon^c$  складається із чисто теплової деформації  $c_{ij}$  та деформації радіаційної повзучості  $\varepsilon_{ij}^r$ :

$$\varepsilon_{ij}^c = c_{ij} + \varepsilon_{ij}^r. \quad (1)$$

Для швидкості радіаційної складової деформації у випадку ізотропного тіла буде справедливе наступне рівняння [3]:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^r = \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}_i^r}{\sigma_i} s_{ij}, \quad (2)$$

де  $s_{ij}$  – компоненти девіатора тензору напружень,  $\sigma_i$ ,  $\varepsilon_i$  – інтенсивності напружень та деформацій відповідно.

Кінетичне рівняння для пошкоджуваності  $\omega$  внаслідок радіаційного опромінювання елементарними частками записуємо аналогічно формі рівняння Работнова-Качанова:

$$\dot{\omega}^r = P \frac{(\sigma_e)^\rho}{(1 - \omega)^a}, \quad \omega^r(0) = \omega_0^r, \quad \omega^r(t_*) = 1, \quad (3)$$

де  $\sigma_e$  – еквівалентне напруження, що приймається за критерієм міцності матеріалу;  $P$ ,  $\rho$ ,  $a$  – константи, які визначаються за експериментальними даними.

Швидкість об'ємної деформації  $\varepsilon^{V_0}$  буде складатися з температурної складової  $\varepsilon_{ij}^T$  та швидкості деформації радіаційного розпухання:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{V_0} = \dot{\varepsilon}_{ij}^T + \frac{1}{3} \dot{S}(\dot{\Phi}, t, T) \delta_{ij}, \quad (4)$$

де  $\Phi$  - інтегральний потік елементарних часток;  $S$  - функція інтегрального потоку елементарних часток (нейтронів, позитронів чи інших), температури  $T$  та часу  $t$ , яка визначається емпірично.

Рівняння стану повзучості матеріалів, що пошкоджуються внаслідок повзучості, для випадку періодично змінюваних температур і напружень побудовано з застосуванням до класичних рівнянь Бейлі-Нортон та Работнова - Качанова методу багатьох масштабів та осереднення на періоді змінювання циклічних складових [4]. Приймаємо їх у наступному вигляді:

$$\dot{c}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{g_T(T) g_n(M_k^{\sigma_i}) \sigma_i^{n-1}}{(1 - \omega)^k} s_{ij},$$

$$\dot{\omega} = g_m(M_k^{\sigma_e}) g_T^{\omega}(T) \frac{(\sigma_e)^m}{(1 - \omega)^l}, \quad \omega(0) = \omega_0, \quad \omega(t_*) = 1, \quad (5)$$

$$g_T(T) = b \int_0^1 \exp \left[ -\frac{Q}{T} \left( 1 + \sum_{i=1}^{\infty} M_i^T \sin(2\pi i \xi) \right)^{-1} \right] d\xi, \quad M_i^T = T_i^a / T,$$

$$g_n(M_k^{\sigma_i}) = \int_0^1 \left( 1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k^{\sigma_i} \sin(2\pi k \xi) \right)^n d\xi, \quad M_k^{\sigma_i} = \sigma_i^{ak} / \sigma_i,$$

$$g_m(M_k^{\sigma_e}) = \int_0^1 \left( 1 + \sum_{k=1}^{\infty} M_k^{\sigma_e} \sin(2\pi k \xi) \right)^m d\xi, \quad M_k^{\sigma_e} = \sigma_e^{ak} / \sigma_e,$$

$$g_T^{\omega}(T) = d \int_0^1 \exp \left[ -\frac{\bar{Q}}{T} (1 + M_i^T \sin(2\pi i \xi))^{-1} \right] d\xi, \quad M_i^T = T_i^a / T.$$

Тут  $Q$  і  $R$  - енергія активації процесу повзучості та універсальна газова стала;  $g_m, g_n, g_T, g_T^{\omega}$  - функції впливу на швидкість повзучості та накопичення пошкоджень періодичної дії напружень та температур, отримані в роботі [4];  $b, d, n, m, l, k$  - константи, що визначаються експериментально.

Таким чином, повна незворотна деформація має вигляд:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^C + \varepsilon_{ij}^{V_0}. \quad (6)$$

Для ряду матеріалів у певному діапазоні температур розвиваються тільки деформації радіаційної повзучості та розпухання, а деформації термоповзучості відсутні.

**4. Розрахунки пошкоджуваності поліпропіленового стрижня.** Для встановлення закономірностей довготривалої міцності матеріалів, що знаходяться під впливом теплових, силових та радіаційних полів, розглянуто

модельну задачу. Аналізується повзучість та довготривала міцність стрижнів з поліпропілену при  $T=303K$ , з та без урахування впливу радіаційного опромінювання, а також циклічності навантаження. Розглядається випадок простого напруженого стану.

За експериментальними даними, наведеними в роботі [5], визначені значення констант, що входять до рівнянь стану (5):  $b=4.33 \times 10^{-13}$  МПа<sup>-n</sup>/год.,  $n=8.8$ ,  $d=3.46 \times 10^{-22}$  МПа<sup>-m</sup>/год,  $m=16.8$ ,  $l=k=2.58$ .

Для порівняльного аналізу процесів накопичення пошкоджуваності та часу до руйнування (рис. 2) використовуємо термін 5 років, що складає 43800 годин. За даними розрахунку, за цей час буде зруйнований стрижневий зразок, навантажений статичним напруженням 9.28 МПа. Графік залежності параметру пошкоджуваності від часу на рис.2 позначено кривою 3.

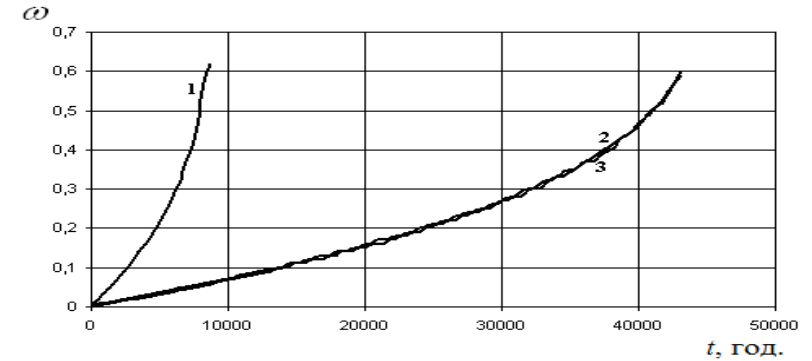


Рис. 2. Графік залежності параметру пошкоджуваності від часу

Прийmemo, за даними робіт [1 - 3], лінійну форму функції накопичення пошкоджуваності внаслідок електронного опромінювання. Проведено розрахунки параметру пошкоджуваності за умов дії двох її механізмів - внаслідок повзучості  $d\omega^c$  (визначено за рівняннями (5)) та радіаційного електронного опромінювання  $d\omega^r$ , так, що:

$$d\omega = d\omega^c + d\omega^r. \quad (7)$$

Константи, що входять до кінетичного рівняння для параметру пошкоджуваності внаслідок електронного опромінювання прийняті наступними:  $P=1.23 \times 10^{-6}$  МПа<sup>-m</sup>/год,  $\rho=1$ ,  $a=0$ . Це забезпечує приблизний опис даного типу пошкоджуваності: повна деградація матеріалу при цьому відбувається за 10 років.

На рис. 2 кривими 2 та 3 позначено процес накопичення пошкоджуваності при дії двох її механізмів. З рисунку видно, що невеликими відмінностями цих кривих практично можна нехувати: вони зникають завдяки суттєво нелінійному процесу накопичення високотемпературної пошкоджуваності внаслідок повзучості.

Далі врахуємо циклічність дії навантаження, пов'язану з обертанням ШСЗ, завдяки чому він частку періоду може знаходитись у тіні Землі. Відомо (це, наприклад, добре показано в роботі [6]), що циклічність навантаження може суттєво інтенсифікувати процеси повзучості та пошкоджуваності в матеріалах.

Приймемо, що час охолодження та нагріву до температури, при якій відбувається руйнування, складає 30% від періоду обертання. Для цих умов визначено значення функції впливу асиметрії циклу, що входить до рівняння (5): вона відображає факт значної інтенсифікації пошкоджуваності та дорівнює 4.15.

Урахування циклічності навантаження істотно, в п'ять разів, зменшує час до руйнування та інтенсифікує процес накопичення пошкоджень (крива 1 на рис. 2).

Таким чином, проведене моделювання демонструє, що в розглянутому прикладі, як і в багатьох раніше виконаних для конструкцій з металевих матеріалів [4], циклічність навантаження суттєво впливає на довготривалу міцність, та є більш вагомим чинником, ніж радіоактивне опромінювання.

В умовах відсутності повзучості матеріалу термін роботи буде збільшено, й він буде визначатись деградацією матеріалу внаслідок опромінювання.

**5. Висновки.** В статті рівняння стану, що описують деформування та накопичення пошкоджуваності в матеріалі конструктивних елементів, які використовуються у відкритому космосі, для випадку сумісної дії теплових, силових та радіаційних полів застосовано до моделювання довготривалої міцності полімерних стрижнів. Надано порівняння швидкостей накопичення пошкоджуваності та часу до руйнування для випадку врахування тільки теплової повзучості, спільної дії теплової й радіаційної повзучості та доданого до них впливу періодичного змінювання температури при обертанні ШСЗ навколо Землі. Показано істотний вплив циклічності навантаження на швидкість накопичення пошкоджень та час до руйнування.

**Список літератури:** 1. *Chen-Ping Chao*. Thermo-Viscoelastic Constitutive Modeling of Polymer Composites Subjected to Space Irradiation / Chen-Ping Chao, S.K. Chaturvedi // Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1998. - Vol. 17, No. 9. - P. 850-869. 2. *Fox D.* Space environmental effects on graphite-epoxy compressive properties and epoxy tensile properties. / D.Fox, G.Sykes, C.Herakovich. // NASA-TM-89297, ACEE Composites Project Office. - 1987. - Vol. 11. 3. *Ма Б.М.* Материалы ядерных энергетических установок: Пер. с англ./ Б.М. Ма. - М.: Энергоатомиздат, 1978.- 408 с. 4. *Бреславський Д.В.* Модель циклічної термоповзучості для тіл обертання./ Д.В. Бреславський, О.К. Морачковський, Ю.М. Коритко // Проблеми прочності. - Київ, 2011. - № 2. - С.33-46. 5. *Колтунов М.А.* Прочностные расчеты изделий из полимерных материалов./ М.А.Колтунов, В.П.Майборода, В.Г.Зубчанинов. - М.: Машиностроение, 1983. - 239с. 6. *Гварниери Г.* Характеристики длительной прочности листовых материалов при циклических нагрузках и температурах. / Г. Гварниери // Сборник статей под ред. Л.Б. Гецова и М.Г. Таубиной «Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях». - 1960. - С. 65-110.

Поступила в редколлегию 01.12.2012