

УДК 539.4+620.1

## ДЕТЕРМІНОВАНА МОДЕЛЬ РУЙНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ КІНЕТИКИ ПОШКОДЖУВАНOSTІ МАТЕРІАЛІВ

**Грабовський А.П., Бабієнко І.І.**

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

***Анотація.** В роботі розглядається кінетика накопичення пошкоджень в конструкційних матеріалах при осьовому навантаженні та при зсуві. Розглянуті критерії оцінки пошкоджуваності конструкційних матеріалів, які характеризують сукупність дії двох механізмів руйнування на відрив та зсув від початку навантаження до руйнування. Отримані тензори функцій пошкоджуваності для статичних навантажень і повторно-змінних навантажень при осьовому навантаженні при зсуві. Представлені порівняння результати розрахунків та експериментальних даних.*

***Ключові слова:** пружнопластичне навантаження; конструкційні матеріали; навантаження.*

Експлуатація об'єктів народного господарства супроводжується структурними змінами в конструкційних матеріалах зародженням, ростом та накопиченням мікро-пошкоджень різної природи і форми, фізичною флуктуацією в матеріалі викликану рухом ваканцій і дислокацій та їх концентрацією на границях кристалів і т.д., які приводять до деградації його основних фізико-механічних властивостей на макрорівні. При належних вимогах до виготовлення і контролю дефектності відповідальних елементів конструкцій на стадії запуску і експлуатації, їх довговічність визначається, в основному, процесами накопичення розсіяних пошкоджень до появи локальних магістральних тріщин, які становлять 80-90 % загальної довговічності. Таким чином довговічність об'єктів визначається довготривалістю стадії накопичення розсіяних мікропошкоджень і довговічністю стадії розповсюдження небезпечних макротріщин – живучістю.

Згідно гіпотези Я.Б. Фрідмана процес руйнування матеріалу можна розглядати як сукупність дії двох механізмів руйнування – відриву та зсуву, що охоплює в'язке, крихке та в'язко-крихке руйнування.

Ефективні напруження при відриві –  $\tilde{\sigma}$  та зсуві (крученні) –  $\tilde{\tau}$  з врахуванням кінетики накопичення пошкоджень при осьовому навантаженні –  $D_{\sigma}$  та зсуві (крученні) –  $D_{\tau}$  виражаються відношеннями :

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D_{\sigma}}; \quad \tilde{\tau} = \frac{\tau}{1 - D_{\tau}}; \quad (1)$$

де  $D_{\sigma} = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}}{E_0}}$  - кінетика накопичення пошкоджень при відриві;

$D_{\tau} = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{G}}{G_0}}$  - кінетика накопичення пошкоджень при зсуві;

$\tilde{E}$ ,  $\tilde{G}$  - поточні модулі пружності при осьовому навантаженні та зсуві;

$E_0, G_0$  - початкові величини модулів пружності на відрив та зсув.

На рисунках 1 та 2 представлені характерні криві деградації модулів пружності  $E$  та  $G$  при напруцюванні.

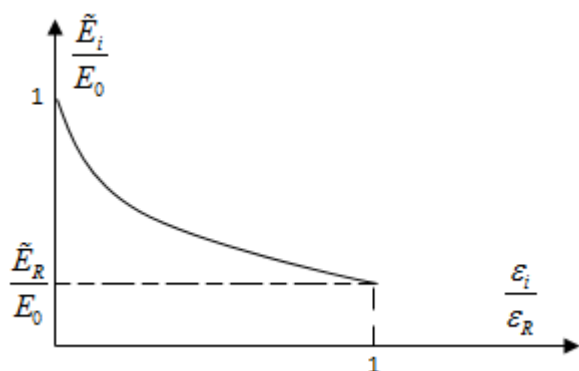


Рис. 1. Зміна модуля пружності при осьовому навантаженні -  $\tilde{E}$  від початкового значення -  $E_0$  до величини -  $\tilde{E}_R$  при руйнуванні

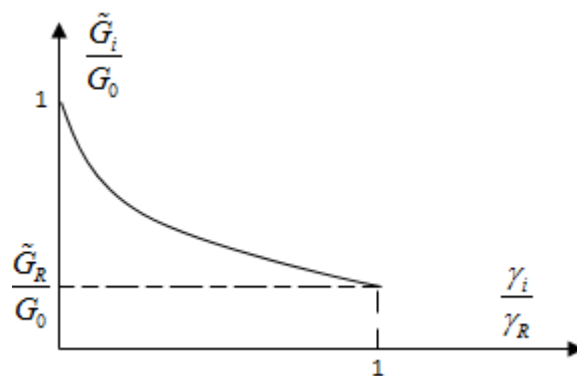


Рис. 2. Зміна модуля пружності при зсуві (крученні) -  $\tilde{G}$  від початкового значення -  $G_0$  до величини -  $\tilde{G}_R$  при руйнуванні

Критерії степені пошкоджуваності матеріалу при осьовому навантаженні -  $\psi_\sigma$  та при зсуві (крученні) -  $\psi_\tau$  в часі -  $T$ :

$$\psi_\sigma(D_\sigma, T) = \frac{D_\sigma}{D_{\sigma R}} = \frac{\sqrt{E_0} - \sqrt{\tilde{E}}}{\sqrt{E_0} - \sqrt{E_R}} \quad 0 \leq \psi_\sigma(D_\sigma, T) \leq 1; \quad (3)$$

$$\psi_\tau(D_\tau, T) = \frac{D_\tau}{D_{\tau R}} = \frac{\sqrt{G_0} - \sqrt{\tilde{G}}}{\sqrt{G_0} - \sqrt{G_R}} \quad 0 \leq \psi_\tau(D_\tau, T) \leq 1; \quad (4)$$

Ефективні напруження з врахуванням кінетики накопичення пошкоджень виражаються відношеннями:

- Для статичного навантаження:

$$\tilde{\sigma}_{ij} = M_{ijkl} \sigma_{kl}; \quad (5)$$

- Для повторно статичного навантаження:

$$\tilde{\sigma}'_{ij} = M'_{ijkl} \sigma'_{kl} \quad (6)$$

де  $M_{ijkl}$  та  $M'_{ijkl}$  тензори четвертого рангу пошкоджуваності матеріалу при пружнопластичному і статичному навантаженні;  $\sigma_{ij}$  та  $\sigma'_{ij}$  тензори напруження при статичному та повторно статичному навантаженнях.

В роботі отримані тензори функції кінетики накопичення пошкоджень для статичного навантаження:

$$M_{ijkl} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{11}}} & -\frac{1}{\mu_{12}} \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{22}}} & -\frac{1}{\mu_{13}} \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{33}}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\mu_{21}} \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{11}}} & \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{22}}} & -\frac{1}{\mu_{23}} \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{33}}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{\mu_{31}} \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{11}}} & -\frac{1}{\mu_{32}} \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{22}}} & \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{33}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sigma_0}{\tilde{\sigma}_{32}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sigma_0}{\tilde{\sigma}_{13}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sigma_0}{\tilde{\sigma}_{12}}} \end{bmatrix}$$

з відповідними інваріантами тензора кінетики накопичення пошкоджень

$$I_1 = \sqrt{\frac{E_0}{E_{11}}} + \sqrt{\frac{E_0}{E_{22}}} + \sqrt{\frac{E_0}{E_{33}}} - 2 \left( \frac{1}{\mu_{12}} \sqrt{\frac{E_0}{E_{11}}} + \frac{1}{\mu_{23}} \sqrt{\frac{E_0}{E_{22}}} + \frac{1}{\mu_{31}} \sqrt{\frac{E_0}{E_{33}}} \right); \quad (7)$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{E_0}{E_{11}}} + \sqrt{\frac{E_0}{E_{22}}} + \sqrt{\frac{E_0}{E_{33}}} + \sqrt{\frac{E_0}{E_{11}}} + \sqrt{\frac{G_0}{G_{32}}} + \sqrt{\frac{G_0}{G_{13}}} + \sqrt{\frac{G_0}{G_{12}}};$$

та отримано тензор функції кінетики накопичення пошкоджень для повторно статичного навантаження з врахуванням коефіцієнтів заліковування пошкоджень на відрив  $h_\sigma$  та зсув  $h_\tau$

$$M'_{ijkl} = \begin{bmatrix} h_\sigma \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{11}}} & -h_\sigma \frac{1}{\mu_{12}} \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{22}}} & -h_\sigma \frac{1}{\mu_{13}} \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{33}}} & 0 & 0 & 0 \\ h_\sigma \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{11}}} & h_\sigma \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{22}}} & -h_\sigma \frac{1}{\mu_{23}} \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{33}}} & 0 & 0 & 0 \\ -h_\sigma \frac{1}{\mu_{31}} \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{11}}} & -h_\sigma \frac{1}{\mu_{32}} \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{22}}} & \sqrt{\frac{E_0}{\tilde{E}_{33}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{h_\tau}{2} \sqrt{\frac{\sigma_0}{\tilde{\sigma}_{32}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{h_\tau}{2} \sqrt{\frac{\sigma_0}{\tilde{\sigma}_{13}}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{h_\tau}{2} \sqrt{\frac{\sigma_0}{\tilde{\sigma}_{12}}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

з відповідними інваріантами тензора кінетики накопичення пошкоджень

$$I'_1 = h_{\sigma_1} \sqrt{\frac{E_0}{E_{11}}} + h_{\sigma_2} \sqrt{\frac{E_0}{E_{22}}} + h_{\sigma_3} \sqrt{\frac{E_0}{E_{33}}} - 2 \left( \frac{h_{\sigma_1}}{\mu_{12}} \sqrt{\frac{E_0}{E_{11}}} + \frac{h_{\sigma_2}}{\mu_{23}} \sqrt{\frac{E_0}{E_{22}}} + \frac{h_{\sigma_3}}{\mu_{31}} \sqrt{\frac{E_0}{E_{33}}} \right); \quad (9)$$

$$I'_2 = h_{\sigma_1} \sqrt{\frac{E_0}{E_{11}}} + h_{\sigma_2} \sqrt{\frac{E_0}{E_{22}}} + h_{\sigma_3} \sqrt{\frac{E_0}{E_{33}}} + h_{\tau_{32}} \sqrt{\frac{G_0}{G_{32}}} + h_{\tau_{13}} \sqrt{\frac{G_0}{G_{13}}} + h_{\tau_{12}} \sqrt{\frac{G_0}{G_{12}}}.$$

Де в відношеннях (6) – (9)  $\sigma_{ii}$  та  $\sigma_{ij}$  відповідно поточні величини модулів пружності з врахуванням кінетики пошкоджуваності конструкційних матеріалів;  $\mu_{ij}$  - поточні величини коефіцієнтів поперечних деформацій в відповідних напрямках;  $h_{\sigma_i}$  - - коефіцієнт заліковування мікропошкоджень при осьовому повторно- статичному навантаженні в відповідних напрямках; - коефіцієнт заліковування мікропошкоджень при повторно-статичному зсуві в відповідних напрямках.

**References:**

1. *A.B. Ханефм* "Основи теорії еластичності", КемГУ, 2009 - 99 стор.
2. *A. Ganczarski, L.Barwacz* "Notes on Damage Effect Tensors of Two-scalar Variable", Inst. of Applied Mechanics, Cracow Univer. of Technology, Intern. Journ of Damage Mechanics, vol 13, July 2004.
3. *C.J. Tang, W. Shen* "Characterization of Isotropic..." // Inter. Journ. Of Damage Mechanics, vol 11, January 2002.