

Анатолій Павлович Грабовський¹, Олександр Анатолійович Бондарець²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: grabovskiy@gmail.com, **ORCID** <https://orcid.org/0009-0002-0334-5381>, **Scopus Author ID:** 55249720600

²кандидат технічних наук, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” (Київ, Україна)

E-mail: bondarets.o@gmail.com, **ORCID** <https://orcid.org/0000-0003-2897-0116>, **Scopus Author ID:** 57195440534

ПОШКОДЖУВАНІСТЬ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ З АНІЗОТРОПНИХ МАТЕРІАЛІВ

На основі принципів та підходів до аналізу кінетики накопичення пошкоджень при експлуатації конструкцій з анізотропних матеріалів у роботі представлено методику оцінювання деградації фізико-механічних властивостей анізотропного матеріалу під дією пружно-пластичного навантаження, що враховує зміну об'єму і форми одиничного розміру об'єму виділеного елемента матеріалу - репрезентативного елемента (РЕ).

Ключові слова: анізотропія ефективних напружень; репрезентативний елемент; розсіяні пошкодження; зміна об'єму; зміна форми.

Рис.: 1. Бібл.: 6.

Актуальність теми дослідження. У сучасному машинобудуванні, авіації, суднобудуванні, космічній та енергетичній галузях дедалі частіше використовують анізотропні матеріали, що мають високу питому міцність та жорсткість, проте їхня експлуатаційна надійність значною мірою зумовлена складними механізмами анізотропії пошкоджуваності, що значно відрізняються від аналогічних процесів в ізотропних матеріалах. Деградація фізико-механічних властивостей при накопиченні розсіяних пошкоджень в анізотропному матеріалі конструкції характеризує ресурс часу її експлуатації до руйнування. На сьогодні немає усталених універсальних методик для оцінки пошкоджуваності анізотропних конструкцій – тому потрібні нові підходи, моделі та критерії, розробка яких має велике як наукове, так і практичне значення.

Постановка проблеми. При проектуванні та експлуатації виробів та конструкцій із полімерних анізотропних матеріалів постає задача визначення ресурсу роботи, яка на пряму залежить від деградації фізико-механічних характеристик матеріалу з часом експлуатації інженерних об'єктів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням функціонального аналізу деградації фізико-механічних властивостей при експлуатації конструкцій присвячено надзвичайно широке коло наукових праць [1-5]. Зокрема в монографії М. Бобири [1] узагальнені тензор-феноменологічні моделі та критерії пошкоджуваності композиційних анізотропних матеріалів для умов малоциклового та динамічного навантаження. У роботах [2-4] проведено аналіз феноменологічних моделей кінетики пошкодження та доведено суттєвий вплив анізотропії на характеристики пошкоджуваності, у роботі [5] представлено узагальнену модель накопичення мікропошкоджень з врахуванням анізотропії, що дозволяє будувати кінетичні криві та зменшити кількість базових експериментів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що питання вивчення деградації фізико-механічних властивостей анізотропних матеріалів при пружно-пластичному навантаженні інженерних об'єктів мало вивчене. Тому для вивчення ресурсу їх експлуатації питання розрахунку пошкоджуваності анізотропних матеріалів, на сьогодні, актуальні.

Метою статті є розробка методики розрахунку кінетики накопичення пошкоджень в анізотропних матеріалах, яка враховує зміну об'єму і форми в матеріалі при пружно-пластичному навантаженні інженерних об'єктів.

Виклад основного матеріалу. У процесі експлуатації інженерних об'єктів з анізотропних матеріалів, які перебувають під дією експлуатаційного пружно-пластичного навантаження, у матеріалі відбуваються структурні зміни, що створюють ріст та накопичення мікропошкоджень різної форми і природи, відбувається фізична та хімічна флуктуація в матеріалі, викликана розривами міжатомних та міжмолекулярних зв'язків, що призводить до зародження і розвитку макроскопічних тріщин, які згодом накопичуються до утворення магістральної тріщини й у кінцевому результаті до руйнування.

Поява різного роду мікропошкоджень у матеріалі призводить до зміни об'єму $\Delta V_i = V_i - V_0$ і форми $\Delta \theta_i = \theta_i - \theta_0$ РЕ матеріалу згідно з початковими положеннями координатних осей (рис. 1) [6].

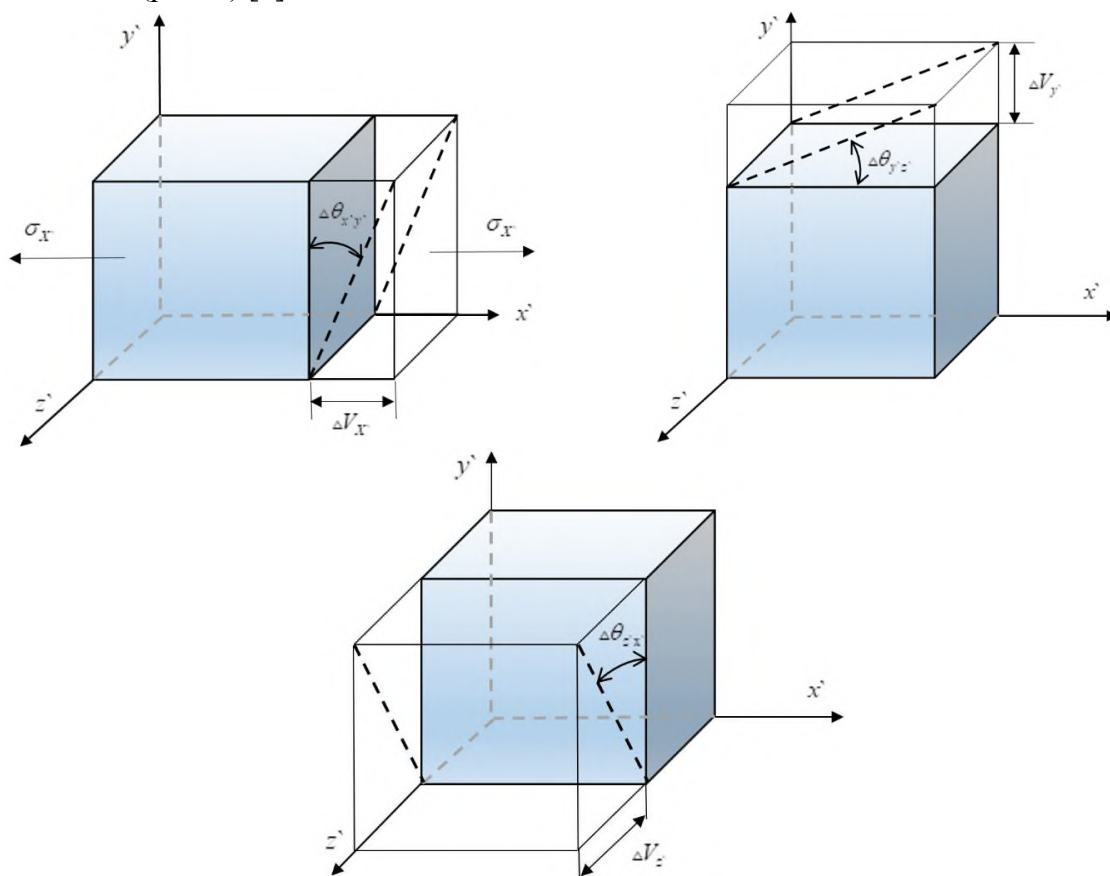


Рис. 1. Характер зміни об'єму і форм РЕ при появі мікропошкоджень для координатних осей [6]

Відносна величина пошкоджень анізотропного матеріалу, що характеризує зміну об'єму $-D_\sigma$ визначається відношенням:

$$D_\sigma = \frac{V_i - V_0}{V_i} = 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_V} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_V}; \rightarrow \varepsilon_V = \frac{D_{\sigma_i}}{1 - D_{\sigma_i}} = F(D_\sigma), \quad (1)$$

Відносна величина пошкоджень анізотропного матеріалу, що характеризує зміну форми виражається відношенням:

$$D_\tau = \frac{\theta_i - \theta_0}{\theta_i} = 1 - \frac{\theta_0}{\theta_0 + \Delta \theta_V} = 1 - \frac{1}{1 + \gamma_V}; \rightarrow \gamma_V = \frac{D_{\tau_i}}{1 - D_{\tau_i}} = F(D_\tau), \quad (2)$$

де $\varepsilon_V = \Delta V_V / V_0$ - відносна зміна об'єму РЕ за напрямками координатних осей

$$\varepsilon_V = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z, \quad (3)$$

$\theta_V = \Delta\theta_V / \theta_0$ - відносна зміна форми РЕ між площадками РЕ відповідно:

$$\gamma_V = \gamma_{x'y'} + \gamma_{y'z'} + \gamma_{z'x'}, \quad (4)$$

функція зміни об'єму при пошкодженні $0 \leq F(D_\sigma) \rightarrow \infty$, відношення ушкодженого об'єму РЕ $-D_\sigma$ до незруйнованого об'єму $(1-D_\sigma)$:

$$F(D_\sigma) = \frac{D_{\sigma_i}}{1-D_{\sigma_i}} \quad (5)$$

функція зміни форми при пошкодженні $0 \leq F(D_\tau) \rightarrow \infty$, відношення ушкодженого об'єму РЕ $-D_\tau$ до незруйнованої зміни форми $(1-D_\tau)$ анізотропного матеріалу:

$$F(D_\tau) = \frac{D_{\tau_i}}{1-D_{\tau_i}} \quad (6)$$

При загальному пружно-пластичному навантаженні матеріалу на гранях РЕ виникають ефективні нормальні $-\tilde{\sigma}$ та дотичні $-\tilde{\tau}$ напруження [2-3]

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma_0}{1-D_\sigma}; \quad \tilde{\tau} = \frac{\tau_0}{1-D_\tau}, \quad (7)$$

де σ_0 та τ_0 - нормальні та дотичні напруження в РЕ до межі пружності матеріалу, D_σ та D_τ - кінетика накопичення пошкоджень у результаті зміни об'єму ε_V та форми γ_V .

З відношення (2) випливає:

$$\tilde{\sigma} - \sigma_0 = \tilde{\sigma} \cdot D_\sigma, \quad \tilde{\tau} - \tau_0 = \tilde{\tau} \cdot D_\tau; \quad (8)$$

використовуючи (1) та (3) загальна функція зміни об'єму для РЕ дорівнює:

$$F(D_\sigma) = F_{D_{\sigma_x}} + F_{D_{\sigma_y}} + F_{D_{\sigma_z}} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \frac{D_{\sigma_x}}{1-D_{\sigma_x}} + \frac{D_{\sigma_y}}{1-D_{\sigma_y}} + \frac{D_{\sigma_z}}{1-D_{\sigma_z}}, \quad (9)$$

використовуючи відношення (2) та (4) загальна функція зміни форми для РЕ дорівнює:

$$F(D_\tau) = F_{D_{\tau_{xy}}} + F_{D_{\tau_{yz}}} + F_{D_{\tau_{zx}}} = \gamma_{xy} + \gamma_{yz} + \gamma_{zx} = \frac{D_{\tau_{xy}}}{1-D_{\tau_{xy}}} + \frac{D_{\tau_{yz}}}{1-D_{\tau_{yz}}} + \frac{D_{\tau_{zx}}}{1-D_{\tau_{zx}}}. \quad (10)$$

Використовуючи закон Гука, тензорна форма функції пошкоджуваності, яка враховує функції зміни форми й об'єму виражається залежністю:

$$F_{(D)} = \frac{D_{lm}}{1-D_{lm}} = C_{iklm} (\tilde{\sigma} - \sigma_0)_{ik}, \quad (11)$$

де індекси i, k, l, m - послідовно приймають значення 1, 2, 3,

$D_{lm} / (1-D_{lm})$ - відносна величина пошкоджуваності;

$(\tilde{\sigma} - \sigma_0)_{ik}$ - зміна напруження;

C_{iklm} - пружні постійні, які характеризують матеріал і визначаються експериментально.

Відповідні позначення напружень систематизовано в табл. 1.

При повороті осей координат компоненти тензора четвертого рангу змінюються згідно із законом (множниками тут є добутки чотирьох косинусів кутів між новими і старими напрямками координатних осей).

$$F_{(D)} = \frac{D_{l'm'}}{1-D_{l'm'}} = C_{i'k'l'm'} = C_{iklm} C_{i'i} C_{k'k} C_{l'l} C_{m'm}. \quad (12)$$

Таблиця 1 – Схематизація позначень компонент тензора напружень

Система позначення	Компоненти тензора напружень		
Буквенне позначення	$(\tilde{\sigma}-\sigma_0)_x$	$(\tilde{\tau}-\tau_0)_{xy}$	$(\tilde{\tau}-\tau_0)_{xz}$
	$(\tilde{\tau}-\tau_0)_{yx}$	$(\tilde{\sigma}-\sigma_0)_y$	$(\tilde{\tau}-\tau_0)_{yz}$
	$(\tilde{\tau}-\tau_0)_{xz}$	$(\tilde{\tau}-\tau_0)_{zy}$	$(\tilde{\sigma}-\sigma_0)_z$
Числове позначення	σ_{11}	σ_{12}	σ_{13}
	σ_{21}	σ_{22}	σ_{23}
	σ_{31}	σ_{32}	σ_{33}

Формула (12) дозволяє обчислити величину пружних постійних для довільно орієнтованих в матеріалі напрямів (нових осей координат x', y', z'), якщо відомі їхні величини для певних головних напрямів (старих осей координат x, y, z). Формула (12) записана у скороченій формі, яка характеризує складання за всіма індексами, які двічі зустрічаються в правій частині. Усі індекси послідовно набувають значення 1,2,3. Буквами C позначені косинуси кутів між старою і новою системами координат.

Для обчислення всіх функцій пошкоджуваності анізотропного матеріалу в загальному випадку потребується 81 значення пружних постійних, які створюють тензор четвертого рангу. З умов рівноваги випливає, що попарна перестановка індексів не змінить компоненти тензора пружних постійних:

$$C_{iklm} = C_{kilm} = C_{ikml} = C_{kiml} \quad (13)$$

Таким чином, чисельність різних компонент тензора четвертого рангу зменшиться до 36 у загальному випадку анізотропного тіла й у випадку незбігу осей координат із головними осями анізотропії ортотропного тіла. У табл. 2 наведено 36 компонент тензора четвертого рангу.

Таблиця 2 – Компоненти тензора четвертого рангу

Друга пара індексів	Перша пара індексів					
	11	22	33	12	23	31
11	C_{1111}	C_{2211}	C_{3311}	$2C_{1211}$	$2C_{2311}$	$2C_{3111}$
22	C_{1122}	C_{2222}	C_{3322}	$2C_{1222}$	$2C_{2322}$	$2C_{3122}$
33	C_{1133}	C_{2233}	C_{3333}	$2C_{1233}$	$2C_{2333}$	$2C_{3133}$
12	$2C_{1112}$	$2C_{2212}$	$2C_{3312}$	$4C_{1212}$	$4C_{2312}$	$4C_{3112}$
23	$2C_{1123}$	$2C_{2223}$	$2C_{3323}$	$4C_{1223}$	$4C_{2323}$	$4C_{3123}$
31	$2C_{1131}$	$2C_{2231}$	$2C_{3331}$	$4C_{1231}$	$4C_{2331}$	$4C_{3131}$

У табл. 3 наведено функції зміни об'єму $\frac{D_{\sigma_{x'}}}{1-D_{\sigma_{x'}}}; \frac{D_{\sigma_{y'}}}{1-D_{\sigma_{y'}}}; \frac{D_{\sigma_{z'}}}{1-D_{\sigma_{z'}}$ в напрямку дії нормальних напружень $\sigma_{x'}, \sigma_{y'}, \sigma_{z'}$, а також відповідні функції зміни форми $\frac{D_{\tau_{xy'}}}{1-D_{\tau_{xy'}}}; \frac{D_{\tau_{yz'}}}{1-D_{\tau_{yz'}}}; \frac{D_{\tau_{zx'}}}{1-D_{\tau_{zx'}}$ в напрямку дії дотичних напружень $\tau_{xy'}, \tau_{yz'}, \tau_{zx'}$.

Таблиця 3 – Технічні пружні постійні анізотропного тіла

Індекси функції деформацій	Індекси напружень					
	11	22	33	12	23	31
11	$\frac{1}{E_{x'}}$	$-\frac{\mu_{y'x'}}{E_{y'}}$	$-\frac{\mu_{z'x'}}{E_{z'}}$	$\frac{\nu_{x'y',x'}}{G_{x'y'}}$	$\frac{\nu_{y'z',x'}}{G_{y'z'}}$	$\frac{\nu_{z'x',x'}}{G_{z'x'}}$
22	$-\frac{\mu_{x'y'}}{E_{x'}}$	$\frac{1}{E_{y'}}$	$-\frac{\mu_{z'y'}}{E_{z'}}$	$\frac{\nu_{x'y',y'}}{G_{x'y'}}$	$\frac{\nu_{y'z',y'}}{G_{y'z'}}$	$\frac{\nu_{z'x',y'}}{G_{z'x'}}$
33	$-\frac{\mu_{x'z'}}{E_{x'}}$	$-\frac{\mu_{y'z'}}{E_{y'}}$	$\frac{1}{E_{z'}}$	$\frac{\nu_{x'y',z'}}{G_{x'y'}}$	$\frac{\nu_{y'z',z'}}{G_{y'z'}}$	$\frac{\nu_{z'x',z'}}{G_{z'x'}}$
12	$\frac{\nu_{x',x'y'}}{E_{x'}}$	$\frac{\nu_{y',x'y'}}{E_{y'}}$	$\frac{\nu_{z',x'y'}}{E_{z'}}$	$\frac{1}{G_{x'y'}}$	$\frac{\eta_{y'z',x'y'}}{G_{y'z'}}$	$\frac{\eta_{z'x',x'y'}}{G_{z'x'}}$
23	$\frac{\nu_{x',y'z'}}{E_{x'}}$	$\frac{\nu_{y',y'z'}}{E_{y'}}$	$\frac{\nu_{z',y'z'}}{E_{z'}}$	$\frac{\eta_{x'y',y'z'}}{G_{x'y'}}$	$\frac{1}{G_{y'z'}}$	$\frac{\eta_{z'x',x'z'}}{G_{z'x'}}$
31	$\frac{\nu_{x',z'x'}}{E_{x'}}$	$\frac{\nu_{y',z'x'}}{E_{y'}}$	$\frac{\nu_{z',z'x'}}{E_{z'}}$	$\frac{\eta_{x'y',z'x'}}{G_{x'y'}}$	$\frac{\eta_{y'z',z'x'}}{G_{y'z'}}$	$\frac{1}{G_{z'x'}}$

де E, G, μ, ν, η – модулі пружності, зсуву, коефіцієнти поперечної деформації та взаємного впливу. Індекси у E, G, μ мають значення відповідних величин для кожного напрямку в матеріалі. Перший індекс при μ означає напрям дії напруження, а другий напрям дії деформації. Подвійні індекси у G відповідають напрямам, між якими проходить зміна прямого кута. Для коефіцієнтів ν та η індекси, які стоять до коми, означають напрям дії напруження, яке викликає деформацію, а індекси, що стоять після коми – напрям деформації, наприклад: $\nu_{x',x'y'}$ - коефіцієнт, що визначає величину лінійної деформації в напрямку x' при дії одних тільки дотичних напружень $\tau_{x'y'}$. Своєю чергою коефіцієнти $\eta_{x'y',y'z'}$ визначають кути зсуву $\gamma_{y'z'}$ при дії дотичних напружень $\tau_{x'y'}$. Для компонент представлених в таблиці 3 виконуються 15 співвідношень, що випливають з умови (12), що справедливі для будь-якого анізотропного матеріалу для якого справедливе допущення про існування пружного потенціалу:

$$\begin{aligned} \text{три співвідношення вигляду } \frac{\mu_{ki}}{E_k} &= \frac{\mu_{ik}}{E_i} \\ \text{дев'ять відношення вигляду } \frac{\gamma_{i,kl}}{E_i} &= \frac{\gamma_{kl,i}}{G_{kl}} \\ \text{три співвідношення вигляду } \frac{\eta_{ik,lm}}{G_{ik}} &= \frac{\eta_{lm,ik}}{G_{im}} \end{aligned} \quad (14)$$

Для ортотропного матеріалу в головних осях анізотропії x, y, z згідно з обов'язковими трьома співвідношеннями.

$$\frac{\mu_{xy}}{E_x} = \frac{\mu_{yx}}{E_y}; \frac{\mu_{xz}}{E_x} = \frac{\mu_{zx}}{E_z}; \frac{\mu_{yz}}{E_y} = \frac{\mu_{zy}}{E_z}; \quad (15)$$

з урахуванням яких число незалежних постійних дорівнює 9.

Таблиця 4 – Технічні пружні постійні в осях симетрії ортотропного матеріалу

Індекси функції пошкоджень	Індекси напружень					
	11	22	33	12	23	31
11	$\frac{1}{E_x}$	$-\frac{\mu_{yx}}{E_y}$	$-\frac{\mu_{zx}}{E_z}$	0	0	0
22	$-\frac{\mu_{xy}}{E_x}$	$\frac{1}{E_y}$	$-\frac{\mu_{zy}}{E_z}$	0	0	0
33	$-\frac{\mu_{xz}}{E_x}$	$-\frac{\mu_{yz}}{E_y}$	$\frac{1}{E_z}$	0	0	0
12	0	0	0	$\frac{1}{G_{xy}}$	0	0
23	0	0	0	0	$\frac{1}{G_{yz}}$	0
31	0	0	0	0	0	$\frac{1}{G_{zx}}$

У табл. 4 в головних осях анізотропії ортотропного матеріалу маємо:

$$\left. \begin{aligned}
 C_{1111} &= \frac{1}{E_x}; 4C_{1212} = \frac{1}{G_{xy}} \\
 C_{2222} &= \frac{1}{E_y}; 4C_{2323} = \frac{1}{G_{yz}} \\
 C_{3333} &= \frac{1}{E_z}; 4C_{3131} = \frac{1}{G_{zx}} \\
 C_{1122} &= -\frac{\mu_{xz}}{E_x} = -\frac{\mu_{yx}}{E_y} \\
 C_{2233} &= -\frac{\mu_{yz}}{E_y} = -\frac{\mu_{zy}}{E_z} \\
 C_{3311} &= -\frac{\mu_{zx}}{E_z} = -\frac{\mu_{xz}}{E_x}
 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Висновки. У роботі отримані відношення, які характеризують функції кінетики накопичення пошкоджень за зміною об'єму і форми репрезентативного одиничного об'єму (РЕ) при експлуатації інженерних об'єктів із анізотропних матеріалів. Встановлені межі зміни функцій об'єму і форми від початку навантаження до руйнування. Отримано узагальнений тензор функції пошкоджуваності анізотропного матеріалу, який враховує зміну об'єму і форми в результаті накопичення пошкоджень при експлуатації інженерних об'єктів. У роботі отримано тензор четвертого рангу для обчислення кінетики накопичення пошкоджень у загальному вигляді орієнтації координатних осей, що не збігаються з головними напрямками орієнтації та тензор кінетики накопичення пошкоджень для ортотропного матеріалу в головних осях анізотропії.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автори НЕ використовували генеративний ШІ та технологій на основі ШІ.

Список використаних джерел

1. Бобир, М. І., Коваль, В. В., & Фам, Д. К. (2023). *Пошкоджуваність та граничний стан елементів конструкцій при складному навантаженні* (Монографія). КПІ ім. Ігоря Сікорського.
2. Грабовський, А., Бондарець, О., & Бабієнко, І. (2023). Пошкоджуваність матеріалів при пропорційному навантаженні. *Mechanics and Advanced Technologies*, 7(2 (98)), 223–227. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.2.261955>.
3. Грабовський, А., Бондарець, О., & Бабієнко, І. (2021). Кінетика пошкоджуваності матеріалів при різних режимах повторно-змінних навантажень. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 325–331. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.248026>.
4. Lemaitre, J., Desmorat, R., & Sauzay, M. (2000). Anisotropic damage law of evolution. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 19(2), 187–208. [https://doi.org/10.1016/s0997-7538\(00\)00161-3](https://doi.org/10.1016/s0997-7538(00)00161-3).
5. Bobyr, M. I., & Bondarets, O. A. (2023). Phenomenological model of scattered fracture for anisotropic materials. *Strength of Materials*, 55, 945–953. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00585-6>.
6. Hrabovskyi, A., & Bondarets, O. (2025). Damage kinetics of anisotropic materials in construction. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 114, 94–100. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.114.94-100>.

References

1. Bobyr, M. I., Koval, V. V., & Pham, D. K. (2023). *Poshkodzhuvanist ta hranichnyi stan elementiv konstruktsii pry skladnomu navantazheni [Damage accumulation and limit state of structural elements under complex loading]*. KPI imeni Ihoria Sikorskoho – Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.
2. Grabovskyi, A., Bondarets, O., & Babiyenko, I. (2023). Poshkodzhuvanist materialiv pry proporsiiinomu navantazheni. [Damageability of materials under proportional loading.] *Mechanics and Advanced Technologies*, 7(2 (98)), 223–227. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.2.261955>.
3. Grabovskyi, A., Bondarets, O., & Babiyenko, I. (2021). Kinetyka poshkodzhuvanosti materialiv pry riznykh rezhymakh povtorno-zminnykh navantazhen. [Damage kinetics of materials under different modes of repeated variable loading]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 5(3), 325–331. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.248026>.
4. Lemaitre, J., Desmorat, R., & Sauzay, M. (2000). Anisotropic damage law of evolution. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 19(2), 187–208. [https://doi.org/10.1016/s0997-7538\(00\)00161-3](https://doi.org/10.1016/s0997-7538(00)00161-3).
5. Bobyr, M. I., & Bondarets, O. A. (2023). Phenomenological model of scattered fracture for anisotropic materials. *Strength of Materials*, 55, 945–953. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00585-6>.
6. Hrabovskyi, A., & Bondarets, O. (2025). Damage kinetics of anisotropic materials in construction. *Strength of Materials and Theory of Structures*, 114, 94–100. <https://doi.org/10.32347/2410-2547.2025.114.94-100>.

Отримано 19.06.2025

UDC 539.4+620.1

Anatolii Hrabovskyi¹, Oleksandr Bondarets²

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Dynamics and Strength of Machines and Strenght of Materials National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: grabovskyi@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0009-0002-0334-5381>. Scopus Author ID: 55249720600

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Dynamics and Strength of Machines and Strenght of Materials National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” (Kyiv, Ukraine)

E-mail: bondarets.o@gmail.com. ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2897-0116>. Scopus Author ID: 5195440534

DAMAGE EVOLUTION DURING THE SERVICE LIFE OF STRUCTURES MADE OF ANISOTROPIC MATERIALS

In modern mechanical engineering, aviation, shipbuilding, aerospace, and energy industries, anisotropic materials with high specific strength and stiffness are increasingly used. However, their operational reliability is largely determined by complex anisotropic damage mechanisms that differ significantly from analogous processes in isotropic materials. When designing and operating

products and structures made from polymer anisotropic materials, it is essential to determine the service life, which directly depends on the degradation of the material's physico-mechanical properties over time during the operation of engineering objects.

The analysis of recent studies and publications shows that the degradation of mechanical properties of anisotropic materials under elastoplastic loading of engineering structures is insufficiently studied and is the subject of an extensive body of scientific work. The purpose of this article is to develop a methodology for calculating the kinetics of damage accumulation in anisotropic materials, taking into account changes in volume and shape of the material under elastoplastic loading of engineering structures.

The work derives relationships characterizing the kinetics functions of damage accumulation based on changes in volume and shape of a representative elementary volume (REV) during the operation of engineering objects made of anisotropic materials. The limits of variation in volume and shape functions from the start of loading to failure are established. A generalized damage tensor function for anisotropic materials is obtained, which accounts for changes in volume and shape as a result of damage accumulation during the operation of engineering objects.

Keywords: anisotropy of effective stresses; representative element; scattered damage; volume change; shape change.

Рис.: 1. Бібл.: 6.