

УДК 539.4+620.1

КІНЕТИКА ПОШКОДЖУВАНOSTІ АНІЗОТРОПНИХ МАТЕРІАЛІВ В БУДІВНИЦТВІ

А.П. Грабовський,

канд. техн. наук, доцент

О.А. Бондарець,

канд. техн. наук, доцент

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
03056, м. Київ, Берестейський просп., 37*

DOI: 10.32347/2410-2547.2025.114.94-100

В статті розглядається кінетика накопичення пошкоджень в анізотропних матеріалах під дією пружнопластичного навантаження, що враховує зміну об'єму і форми одиничного розміру виділеного елементу - репрезентативного елементу (РЕ) та фізико-механічні властивості матеріалу.

Ключові слова: кінетика накопичення розсіяних пошкоджень, анізотропія механічних властивостей, репрезентативний елемент, ефективні напруження.

Вступ

В сучасному будівництві широко використовуються анізотропні матеріали які підлягають різного виду дії пружного пластичних навантажень і визначення ресурсу їх експлуатації на сьогодні являється актуальною проблемою. Кінетика пошкоджуваності анізотропних матеріалів в контексті сучасного будівництва має велике як теоретичне, так і практичне значення, особливо в галузі розрахунку залишкової міцності – це один з трендових напрямків. Техніко-економічна ефективність розрахунку кінетики накопичення пошкоджень в анізотропних матеріалах під дією зовнішніх силових факторів залежить від того наскільки спрогнозовано пошкоджуваність матеріалу при забезпеченні міцності і жорсткості виробів при їх експлуатації. В роботі розглядається кінетика накопичення пошкоджень в анізотропних матеріалах під дією пружнопластичного навантаження, що враховує зміну об'єму і форми одиничного розміру виділеного елементу - репрезентативного елементу (РЕ) та фізико-механічні властивості матеріалу. Розглядаються узагальнені закони Гука віднесені до осей симетрії ортотропного матеріалу та загальні випадки орієнтації осей, при яких напруження, діючі на площадках співпадають та не співпадають з осями симетрії ортотропного матеріалу. Розглядається експериментально і теоретично кінетика пошкоджуваності в анізотропному матеріалі на прикладі експлуатації полівінілхлоридних зразків (ПВХ) профілів для вікон та дверей житлових будівель.

Експлуатація конструкцій з анізотропних матеріалів з часом супроводжується структурними змінами в матеріалі, які сприяють зародженню, росту та накопиченню мікропошкоджень різної природи і форми, фізичною та хімічною флуктуацією в матеріалі, викликану рухом різного роду мікропошкоджень в вигляді розривів міжмолекулярних зв'язків, порушенню зв'язків між основою та наповнювачем, що призводить до зародження і розвитку різного виду макроскопічних пошкоджень, появою макротріщини в матеріалі і в кінцевому результаті до руйнування і втрати працездатності. Поява різного виду мікропошкоджень призводить до деградації фізико-механічних властивостей матеріалу – модулів пружності, коефіцієнтів поперечних деформацій, що в кінцевому результаті приводить до додаткової зміни дослідного об'єму РЕ по площадках перпендикулярним осям - x', y', z' не співпадаючих з осями симетрії ортотропного матеріалу та зміною його форми по відповідності до осей симетрії на додаткові кути $\gamma_{x'y'}, \gamma_{y'z'}, \gamma_{z'x'}$.

1. Компоненти пошкоджуваності

Процес руйнування анізотропного матеріалу розглядається як сукупність дії двох напружень в небезпечних найбільш навантажених перетинах – нормальних σ та дотичних τ , як

сукупність двох механізмів руйнування – відриву та зрізу [1], що характеризується критичними значеннями величин пошкодження від нормальних напружень D_σ та дотичних напружень D_τ .

Процес кінетики накопичення пошкоджень в РЕ анізотропного матеріалу визначається поточною величиною зміни об'єму $\Delta V_i = V_i - V_0$ і поточною величиною зміни форми між початковим і поточним напрямом координатних осей $\Delta\theta_i = \theta_i - \theta_0$, де V_i – поточний об'єм РЕ та θ_i – поточний кут напрямку осей координат РЕ, а V_0 та θ_0 початкові величини об'єму РЕ та початковий напрям координатних осей РЕ до навантаження.

Величини пошкоджень анізотропного матеріалу, які приводять до зміни об'єму $-D_\sigma$ виражаються відношенням:

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

Пошкодження анізотропного матеріалу, які призводять до зміни його форми - D_τ виражаються відношенням:

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

де $\varepsilon_V = \Delta V_V / V_0$ - відносна зміна об'єму РЕ за напрямом координатних осей x', y', z' не співпадаючих з осями симетрії ортотропного матеріалу: $\varepsilon_V = \varepsilon_{x'} + \varepsilon_{y'} + \varepsilon_{z'}$; $\theta_V = \Delta\theta_V / \theta_0$ - відносна зміна форми РЕ між площадками РЕ, по яких діють напруження $\tau_{x'y'}, \tau_{y'z'}, \tau_{z'x'}$ відповідно

$$\gamma_V = \gamma_{x'y'} + \gamma_{y'z'} + \gamma_{z'x'}; \quad F(D_\sigma) = \frac{D_{\sigma_i}}{1 - D_{\sigma_i}} - \text{функція}$$

зміни об'єму $0 \leq F(D_\sigma) \rightarrow \infty$ відношення ушкодженого об'єму РЕ до незруйнованого об'єму

$$(1 - D_\sigma); \quad F(D_\tau) = \frac{D_{\tau_i}}{1 - D_{\tau_i}} - \text{функція зміни форми}$$

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

Характерні особливості зміни об'єму і форми пошкоджуваності анізотропних матеріалів в напрямі координатних осей - x', y', z' зображено на рис. 1.

При навантаженні на гранях РЕ з урахуванням пошкоджуваності виникають на довільних площадках ефективні нормальні $\tilde{\sigma}$ та дотичні $\tilde{\tau}$ напруження, що в свою чергу визначаються відношеннями [2,3]:

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma_0}{1 - D_\sigma}, \quad \tilde{\tau} = \frac{\tau_0}{1 - D_\tau}.$$

Де нормальні σ_0 та τ_0 та дотичні напруження в РЕ в пружній зоні навантажень; D_σ та D_τ -

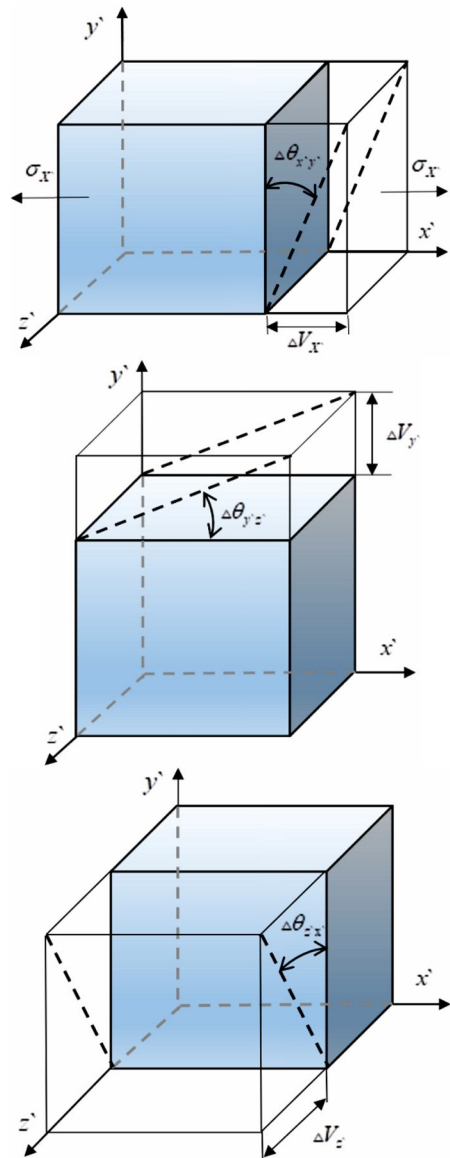


Рис. 1

кінетика накопичення пошкоджень в результаті зміни об'єму ε_V та форми γ_V .

Тоді отримаємо наступне:

$$\tilde{\sigma} - \sigma_0 = \tilde{\sigma} \cdot D_\sigma, \quad \tilde{\tau} - \tau_0 = \tilde{\tau} \cdot D_\tau.$$

Визначення зон впливу величини пошкоджень D_σ та D_τ на величини ефективних напружень $\tilde{\sigma}$ та $\tilde{\tau}$ при фіксованих значеннях деформацій лінійних - ε та куткових - γ зображено на рис. 2.

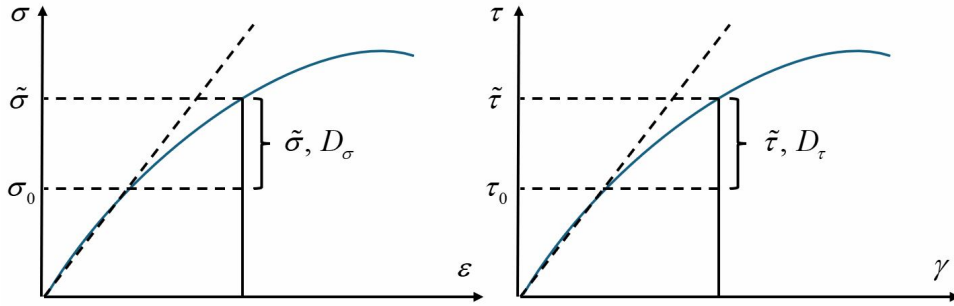


Рис. 2

2. Пошкоджуваність анізотропних матеріалів

Для анізотропних матеріалів закон Гука залежить не тільки від величини діючих напружень, але і від напрямку їх дії в матеріалі. Коли всі осі координат x, y, z співпадають з напрямом осей симетрії ортотропного матеріалу закон Гука має вигляд [4]:

$$F(D_{\sigma x}) = \varepsilon_x = \frac{\sigma_x - \sigma_0}{E_x} - \mu_{yx} \frac{\sigma_y - \sigma_0}{E_y} - \mu_{zx} \frac{\sigma_z - \sigma_0}{E_z},$$

$$F(D_{\sigma y}) = \varepsilon_y = -\mu_{xy} \frac{\sigma_x - \sigma_0}{E_x} + \frac{\sigma_y - \sigma_0}{E_y} - \mu_{zy} \frac{\sigma_z - \sigma_0}{E_z},$$

$$F(D_{\sigma z}) = \varepsilon_z = -\mu_{xz} \frac{\sigma_x - \sigma_0}{E_x} - \mu_{yz} \frac{\sigma_y - \sigma_0}{E_y} + \frac{\sigma_z - \sigma_0}{E_z},$$

$$F(D_{\tau_{xy}}) = \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy} - \tau_0}{G_{xy}}, \quad F(D_{\tau_{yz}}) = \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz} - \tau_0}{G_{yz}}, \quad F(D_{\tau_{zx}}) = \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx} - \tau_0}{G_{zx}}.$$

Тут μ - коефіцієнт поперечної деформації, перший індекс означає напрям дії напруження, а другий - напрям деформації; G - модуль зсуву, де індекси відповідають напрямку, між якими відбувається зміна прямого кута.

Розглядаючи далі загальний випадок, при якому напруження діючі по площадках перпендикулярних осям x', y', z' , які не співпадають з осями симетрії ортотропного матеріалу та враховуючи вище отримані залежності отримаємо відносні величини функцій пошкоджуваності в загальному випадку орієнтації координатних осей анізотропного матеріалу, які характеризують зміну об'єму і форми при відповідній величині кінетики пошкоджуваності в ньому

$$\begin{aligned} F(D_{\sigma x'}) &= \varepsilon_{x'} = \frac{\tilde{\sigma}_{x'} - \sigma_{0x'}}{E_{x'}} - \mu_{y'x'} \frac{\tilde{\sigma}_{y'} - \sigma_{0y'}}{E_{y'}} - \mu_{z'x'} \frac{\tilde{\sigma}_{z'} - \sigma_{0z'}}{E_{z'}} + \\ &+ \nu_{x'y'x'} \frac{\tilde{\tau}_{x'y'} - \tau_{0x'y'}}{G_{x'y'}} + \nu_{y'z'x'} \frac{\tilde{\tau}_{y'z'} - \tau_{0y'z'}}{G_{y'z'}} + \nu_{z'y'x'} \frac{\tilde{\tau}_{z'x'} - \tau_{0z'x'}}{G_{z'x'}}, \\ F(D_{\sigma y'}) &= \varepsilon_{y'} = -\mu_{x'y'} \frac{\tilde{\sigma}_{x'} - \sigma_{0x'}}{E_{x'}} + \frac{\tilde{\sigma}_{y'} - \sigma_{0y'}}{E_{y'}} - \mu_{z'y'} \frac{\tilde{\sigma}_{z'} - \sigma_{0z'}}{E_{z'}} + \\ &+ \nu_{x'y'y'} \frac{\tilde{\tau}_{x'y'} - \tau_{0x'y'}}{G_{x'y'}} + \nu_{y'z'y'} \frac{\tilde{\tau}_{y'z'} - \tau_{0y'z'}}{G_{y'z'}} + \nu_{z'x'y'} \frac{\tilde{\tau}_{z'x'} - \tau_{0z'x'}}{G_{z'x'}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F(D_{\sigma_z}) &= \varepsilon_z = -\mu_{x'z'} \frac{\tilde{\sigma}_{x'} - \sigma_{0x'}}{E_{x'}} - \mu_{y'z'} \frac{\tilde{\sigma}_{y'} - \sigma_{0y'}}{E_{y'}} + \frac{\tilde{\sigma}_{z'} - \sigma_{0z'}}{E_{z'}} + \\
&+ \nu_{x'y',z'} \frac{\tilde{\tau}_{x'y'} - \tau_{0x'y'}}{G_{x'y'}} + \nu_{y'z',z'} \frac{\tilde{\tau}_{y'z'} - \tau_{0y'z'}}{G_{y'z'}} + \nu_{z'x',z'} \frac{\tilde{\tau}_{z'x'} - \tau_{0z'x'}}{G_{z'x'}}, \\
F(D_{\tau_{xy'}}) &= \gamma_{x'y'} = \frac{\tilde{\sigma}_{x'} - \sigma_{0x'}}{E_{x'}} \nu_{x',x'y'} + \frac{\tilde{\sigma}_{y'} - \sigma_{0y'}}{E_{y'}} \nu_{y',x'y'} + \frac{\tilde{\sigma}_{z'} - \sigma_{0z'}}{E_{z'}} \nu_{z',x'y'} + \\
&+ \frac{\tilde{\tau}_{x'y'} - \tau_{0x'y'}}{G_{x'y'}} + \eta_{y'z',x'y'} \frac{\tilde{\tau}_{y'z'} - \tau_{0y'z'}}{G_{y'z'}} + \eta_{z'x',x'y'} \frac{\tilde{\tau}_{z'x'} - \tau_{0z'x'}}{G_{z'x'}}, \\
F(D_{\tau_{yz'}}) &= \gamma_{y'z'} = \frac{\tilde{\sigma}_{x'} - \sigma_{0x'}}{E_{x'}} \nu_{x',y'z'} + \frac{\tilde{\sigma}_{y'} - \sigma_{0y'}}{E_{y'}} \nu_{y',y'z'} + \frac{\tilde{\sigma}_{z'} - \sigma_{0z'}}{E_{z'}} \nu_{z',y'z'} + \\
&+ \eta_{x'y',y'z'} \frac{\tilde{\tau}_{x'y'} - \tau_{0x'y'}}{G_{x'y'}} + \frac{\tilde{\tau}_{y'z'} - \tau_{0y'z'}}{G_{y'z'}} + \eta_{z'x',y'z'} \frac{\tilde{\tau}_{z'x'} - \tau_{0z'x'}}{G_{z'x'}}, \\
F(D_{\tau_{zx'}}) &= \gamma_{z'x'} = \frac{\tilde{\sigma}_{x'} - \sigma_{0x'}}{E_{x'}} \nu_{x',z'x'} + \frac{\tilde{\sigma}_{y'} - \sigma_{0y'}}{E_{y'}} \nu_{y',z'x'} + \frac{\tilde{\sigma}_{z'} - \sigma_{0z'}}{E_{z'}} \nu_{z',z'x'} + \\
&+ \eta_{x'y',z'x'} \frac{\tilde{\tau}_{x'y'} - \tau_{0x'y'}}{G_{x'y'}} + \eta_{y'z',z'x'} \frac{\tilde{\tau}_{y'z'} - \tau_{0y'z'}}{G_{y'z'}} + \frac{\tilde{\tau}_{z'x'} - \tau_{0z'x'}}{G_{z'x'}}.
\end{aligned}$$

В даних формулах $F(D_{\sigma_{x'}}) = \varepsilon_{x'}$, $F(D_{\sigma_{y'}}) = \varepsilon_{y'}$, $F(D_{\sigma_{z'}}) = \varepsilon_{z'}$ - відносні зміни видовження в напрямі координат x' , y' , z' викликані зміною об'єму РЕ в результаті кінетики накопичення пошкоджень в анізотропному матеріалі; $F(D_{\tau_{xy'}}) = \gamma_{x'y'}$, $F(D_{\tau_{yz'}}) = \gamma_{y'z'}$, $F(D_{\tau_{zx'}}) = \gamma_{z'x'}$ - відносні зсуви між площадками по яких діють напруження зсуву $\tau_{x'y'}$, $\tau_{y'z'}$, $\tau_{z'x'}$, що викликають зміну форми РЕ; E, G, μ, ν, η - відповідно модуль пружності, модуль зсуву, коефіцієнти поперечних деформацій і взаємного впливу. Перший індекс біля коефіцієнту поперечної деформації - μ означає напрям дії напруження, другий - напрям деформації. Подвійні індекси при модулі зсуву G відповідають напрямам, між якими проходить зміна прямого кута при накопиченні пошкоджень в матеріалі. Біля коефіцієнтів взаємного впливу ν індекси, які стоять до коми, означають напрям дії напруження, що викликає деформацію, а індекси, які стоять після коми - напрям деформації, наприклад: $\nu_{x',x'y'}$ - коефіцієнт, який визначає величину лінійної деформації в напрямку координати x' при дії одних тільки дотичних напружень $\tau_{x'y'}$; $\nu_{x'y',x'}$ - коефіцієнт, що визначає величину додаткової деформації зсуву від кінетики накопичення пошкоджень, що викликає додатковий кут зсуву матеріалу $\gamma_{x'y'}$ при дії тільки нормальних напружень $\tilde{\sigma}_{x'}$; коефіцієнт $\eta_{x'y',y'z'}$ визначає додатковий кут зсуву при кінетиці накопичення пошкоджень додатковою зміною дотичних напружень $\tilde{\tau}_{x'y'}$, в напрямі $\gamma_{y'z'}$.

Для простого одновісного осьового навантаження на розтяг анізотропного матеріалу в напрямі довільно розташованої осі x' кінетика накопичення пошкоджень оцінюється відношеннями:

$$\begin{aligned}
F(D_{\sigma_{x'}}) &= \varepsilon_{x'} = \frac{\tilde{\sigma}_{x'} - \sigma_{0x'}}{E_{x'}}, \quad F(D_{\sigma_{y'}}) = \varepsilon_{y'} = -\mu_{x'y'} \frac{\tilde{\sigma}_{x'} - \sigma_{0x'}}{E_{x'}}, \\
F(D_{\sigma_{z'}}) &= \varepsilon_z = -\mu_{x'z'} \frac{\tilde{\sigma}_{x'} - \sigma_{0x'}}{E_{x'}}, \quad F(D_{\tau_{xy'}}) = \gamma_{x'y'} = \frac{\tilde{\sigma}_{x'} - \sigma_{0x'}}{E_{x'}} \nu_{x',x'y'}, \\
F(D_{\tau_{yz'}}) &= \gamma_{y'z'} = \frac{\tilde{\sigma}_{x'} - \sigma_{0x'}}{E_{x'}} \nu_{x',y'z'}, \quad F(D_{\tau_{zx'}}) = \gamma_{z'x'} = \frac{\tilde{\sigma}_{x'} - \sigma_{0x'}}{E_{x'}} \nu_{x',z'x'};
\end{aligned}$$

Приведені залежності показують, що в анізотропних матеріалах нормальні напруження діючі в довільних напрямках викликають крім поздовжніх і кутові пошкодження. Дотичні напруження можуть бути причиною не тільки кутових, але і причиною поздовжніх пошкоджень. Звідси виникає те, що відсутність зміни кута між двома взаємно перпендикулярними площадками ще не означає відсутності пошкоджень, що призводить до зміни форми на цих площадках. Тому в загальному випадку напрям пошкоджень, що призводить до зміни об'єму в анізотропних матеріалах не співпадає з напрямком дії головних напружень. Осі еліпсоїда пошкоджень співпадають з осями еліпсоїда напружень в ортотропному матеріалі тільки в тому випадку, якщо головні напруження діють по осях пружної симетрії матеріалу. При іншій орієнтації еліпсоїди пошкоджень і еліпсоїди напружень не коаксіальні.

Для ізотропного матеріалу у випадку гідростатичного тиску при якому $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma$, а $\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ пошкодження у всіх напрямках координат x, y, z будуть однаковими (пружне зменшення об'єму при постійній формі тіла викликане дією нормальних напружень $-\sigma$). При цьому пошкодження викликані зміною форми відсутні. В анізотропному тілі, що підлягає дії всебічного стискування або розтягування пошкодження викликані кінетикою їх росту в різних напрямках будуть різними. Тому форма тіла зміниться.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Трошенко В.Т., Красовский А.Я., Покровский В.В., Сосновский Л.А., Стрижало В.А. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: в 2 т. Справочное пособие. — Киев: Наукова думка, 1993. — Т. 1: 288 с.
2. Грабовський А., Бондарець О., Бабієнко І. Пошкоджуваність матеріалів при пропорційному навантаженні // *Mechanics and Advanced Technologies*. — 2023. — Т. 7, № 2 (98). — С. 223–227. DOI: 10.20535/2521-1943.2023.7.2.261955.
3. Грабовський А., Бондарець О., Бабієнко І. Кінетика пошкоджуваності матеріалів при різних режимах повторно-змінних навантажень // *Mechanics and Advanced Technologies*. — 2021. — Т. 5, № 3. — С. 325–331. DOI: 10.20535/2521-1943.2021.5.3.248026.
4. Волков И. А., Коротких Ю. Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. — М.: Физматлит, 2008. — 424 с. — ISBN: 978-5-9221-0965-9.
5. Lemaître J., Desmorat R., Sauzay M. Anisotropic damage law of evolution. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2000, vol. 19, no. 2, pp. 187–208. [https://doi.org/10.1016/s0997-7538\(00\)00161-3](https://doi.org/10.1016/s0997-7538(00)00161-3).
6. Bobyr M.I., Bondarets O.A. Phenomenological model of scattered fracture for anisotropic materials. *Strength of Materials*, 2023, vol. 55, pp. 945–953. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00585-6>

REFERENCES

1. Troshchenko V.T., Krasovskiy A.Ya., Pokrovskiy V.V., Sosnovskiy L.A., Strizhallo V.A. Soprotivlenie materialov deformirovaniyu i razrusheniyu: Spravochnoe posobie, V 2-kh ch. (Resistance of Materials to Deformation and Fracture: In 2 Volumes. Reference Manual). - Kyiv: Naukova Dumka, 1993. Vol. 1. - 288 p.
2. Grabovskiy A., Bondarets O., Babienko I. Poshkodzhuvaniest materialiv pry proportsiinomu navantazheni (Damage of materials under proportional loading). - *Mechanics and Advanced Technologies*, 2023, vol. 7, no. 2 (98), pp. 223–227. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.2.261955>.
3. Grabovskiy A., Bondarets O., Babienko I. Kinetyka poshkodzhuvanosti materialiv pry riznykh rezhymakh povtorno-zminnykh navantazhen (Kinetics of damage of materials under various regimes of variable loading). - *Mechanics and Advanced Technologies*, 2021, vol. 5, no. 3, pp. 325–331. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.248026>
4. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. Uravneniya sostoyaniya vyzkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniyami (Constitutive equations of viscoelastoplastic media with damage). Moscow: Fizmatlit, 2008. 424 p. ISBN 978-5-9221-0965-9
5. Lemaître J., Desmorat R., Sauzay M. Anisotropic damage law of evolution. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2000, vol. 19, no. 2, pp. 187–208. [https://doi.org/10.1016/s0997-7538\(00\)00161-3](https://doi.org/10.1016/s0997-7538(00)00161-3)
6. Bobyr M.I., Bondarets O.A. Phenomenological model of scattered fracture for anisotropic materials. *Strength of Materials*, 2023, vol. 55, pp. 945–953. <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00585-6>

Стаття надійшла 14.04.2025

Грабовський А.П., Бондарець О.А.

КІНЕТИКА ПОШКОДЖУВАНOSTІ АНІЗОТРОПНИХ МАТЕРІАЛІВ В БУДІВНИЦТВІ

В сучасному будівництві широко використовуються анізотропні матеріали які підлягають різного виду дії пружного пластичних навантажень і визначення ресурсу їх експлуатації на сьогодні являється актуальною проблемою. Кінетика пошкоджуваності анізотропних матеріалів в контексті сучасного будівництва має велике як теоретичне, так і практичне значення, особливо в галузі розрахунку залишкової міцності — це один з трендових напрямків. Техніко-економічна ефективність розрахунку кінетики накопичення пошкоджень в анізотропних матеріалах під дією зовнішніх силових

факторів залежить від того наскільки спрогнозовано пошкоджуваність матеріалу при забезпеченні міцності і жорсткості виробів при їх експлуатації. В роботі розглядається кінетика накопичення пошкоджень в анізотропних матеріалах під дією навантаження, що враховує зміну об'єму і форми одиничного розміру виділеного елемента - репрезентативного елемента (РЕ) та фізико-механічні властивості матеріалу. Розглядаються узагальнені закони Гука віднесені до осей симетрії ортотропного матеріалу та загальні випадки орієнтації осей, при яких напруження, діючі на площадках співпадають та не співпадають з осями симетрії ортотропного матеріалу. Розглядається експериментально і теоретично кінетика пошкоджуваності в анізотропному матеріалі на прикладі експлуатації полівінілхлоридних зразків (ПВХ) профілів для вікон та дверей житлових будівель.

Експлуатація конструкцій з анізотропних матеріалів з часом супроводжується структурними змінами в матеріалі, які сприяють зародженню, росту та накопиченню мікропошкоджень різної природи і форми, фізичною та хімічною флуктуацією в матеріалі, викликану рухом різного роду мікропошкоджень в вигляді розривів міжмолекулярних зв'язків, порушенню зв'язків між основою та наповнювачем, що призводить до зародження і розвитку різного виду макроскопічних пошкоджень, появою макротріщини в матеріалі і в кінцевому результаті до руйнування і втрати працездатності. Поява різного виду мікропошкоджень призводить до деградації фізико-механічних властивостей матеріалу – модуль пружності, коефіцієнтів поперечних деформацій, що в кінцевому результаті приводить до додаткової зміни дослідного об'єму РЕ по площадках перпендикулярним осям - не співпадаючих з осями симетрії ортотропного матеріалу та зміною його форми по відповідності до осей симетрії на додаткові кути

Приведені дослідження показують, що в анізотропних матеріалах нормальні напруження діючі в довільних напрямках викликають крім поздовжніх і кутові пошкодження. Дотичні напруження можуть бути причиною не тільки кутових, але і причиною поздовжніх пошкоджень. Звідси виникає те, що відсутність зміни кута між двома взаємно перпендикулярними площадками ще не означає відсутності пошкоджень, що призводить до зміни форми на цих площадках. Тому в загальному випадку напрям пошкоджень, що призводить до зміни об'єму в анізотропних матеріалах не співпадає з напрямком дії головних напружень. Осі еліпсоїда пошкоджень співпадають з осями еліпсоїда напружень в ортотропному матеріалі тільки в тому випадку, якщо головні напруження діють по осях пружної симетрії матеріалу. При іншій орієнтації еліпсоїди пошкоджень і еліпсоїди напружень не коаксіальні.

Ключові слова: кінетика накопичення розсіяних пошкоджень, анізотропія механічних властивостей, репрезентативний елемент, ефективні напруження.

Hrabovskiy A.P., Bondarets O.A.

DAMAGE KINETICS OF ANISOTROPIC MATERIALS IN CONSTRUCTION

Anisotropic materials are widely used in modern construction and are subjected to various types of elastoplastic loads. Assessing their service life remains a relevant and pressing challenge. The study of damage kinetics in anisotropic materials holds both theoretical and practical significance, particularly in the field of residual strength assessment - one of the leading research directions. The technical and economic efficiency of damage accumulation modeling under external force factors depends on the accuracy of predicting the material's damage evolution while maintaining strength and rigidity during operation.

This paper investigates the kinetics of damage accumulation in anisotropic materials under loading conditions, taking into account changes in the volume and shape of a unit-size representative element (RE), as well as the material's physical and mechanical properties. Generalized Hooke's laws, aligned with the symmetry axes of orthotropic materials, are analyzed, including cases where stress planes coincide or do not coincide with these symmetry axes. Theoretical and experimental studies of damage kinetics are carried out using polyvinyl chloride (PVC) samples employed in window and door profiles for residential buildings.

Over time, the operation of structures made of anisotropic materials leads to structural changes that initiate, propagate, and accumulate micro-damages of various origins and forms. These are driven by physical and chemical fluctuations within the material, such as the rupture of intermolecular bonds and breakdowns at the matrix-filler interface, resulting in the formation of macroscopic damage and ultimately leading to crack formation and structural failure. The emergence of such micro-damages degrades the material's physical and mechanical properties—namely, elastic moduli and Poisson's ratios—ultimately altering the test volume of the RE in planes that are not aligned with the material's symmetry axes and modifying its shape by introducing additional angular distortions.

The research shows that, in anisotropic materials, normal stresses in arbitrary directions lead not only to longitudinal but also angular damage. Shear stresses can cause both angular and longitudinal damage. Hence, the absence of angular change between two mutually perpendicular planes does not imply the absence of damage, as deformation still occurs on these planes. In general, the direction of damage-induced volume change in anisotropic materials does not align with the direction of principal stresses. The axes of the damage ellipsoid coincide with those of the stress ellipsoid only when the principal stresses act along the axes of elastic symmetry. In all other orientations, the damage and stress ellipsoids are not coaxial.

Keywords: kinetics of scattered damage accumulation, anisotropy of mechanical properties, representative element, effective stress.

УДК 539.4+620.1

Грабо́вський А.П., Бонда́рець О.А.. Кінетика пошкоджуваності анізотропних матеріалів в будівництві // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА. 2025. – Вип. 114. – С. 94-100. – Англ.

У статті досліджено кінетику накопичення ушкоджень в анізотропних матеріалах під дією пружнопластичного навантаження з урахуванням зміни об'єму та форми репрезентативного елемента (РЕ), а також фізико-механічних властивостей матеріалу.

Лл. 2. Бібліогр. 6 назв.

UDC 539.4+620.1

Hrabovskiy A.P., Bondarets O.A.. Damage kinetics of anisotropic materials in construction // Strength of Materials and Theory of Structures. – 2025. – Issue 114. – P. 94-100.

The paper examines the kinetics of damage accumulation in anisotropic materials under elastoplastic loading, taking into account changes in the volume and shape of a unit-sized representative element (RE), as well as the physical and mechanical properties of the material.

Fig. 2. Бібліогр. Ref. 6.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Грабовський Анатолій Павлович

Адреса робоча: 03056 Україна, м. Київ, просп. Берестейський, 37, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кафедра динаміки і міцності машин та опору матеріалів, Грабовський Анатолій Павлович

Роб. тел. +38(044) 204-95-36

E-mail: ap_48@ukr.net

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-0334-5381>

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Бондарець Олександр Анатолійович

Адреса робоча: 03056 Україна, м. Київ, просп. Берестейський, 37, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кафедра динаміки і міцності машин та опору матеріалів, Бондарець Олександр анатолійович

Роб. тел. +38(044) 204-95-36

E-mail: Bondarets.O@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2897-0116>