

Про параметри розсіяного руйнування конструкційних матеріалів

В. М. Малинський¹ • М. І. Бобир¹ • О. В. Тимошенко¹

Received: 23 April 2024 / Revised: 22 May 2024 / Accepted: 4 June 2024

Анотація. Описані результати застосування різних механічних характеристик конструкційних матеріалів в якості скалярних параметрів пошкоджуваності. Розсіяне руйнування супроводжується деградацією основних механічних характеристик пружності: модуля Юнга першого роду E та другого G , об'ємного модуля K та коефіцієнту Пуассона ν .

Прийняті гіпотези еквівалентності деформацій (ГЕД) та питомих енергій деформування (ГЕЕ) для не пошкодженого та пошкодженого станів початково ізотропних металічних матеріалів. Показано взаємозв'язок між скалярними параметрами пошкоджуваності згідно гіпотези еквівалентності питомих енергій (ГЕЕ) та гіпотези еквівалентності деформацій (ГЕД). За результатами проведених експериментальних досліджень отримані закономірності накопичення розсіяних руйнувань для сталі 12Х18Н10Т та алюмінієвого сплаву Д16Т за умов активного пружно-пластичного деформування з врахуванням двох механізмів руйнування: відрив та зріз, згідно різних методик та гіпотез еквівалентності станів матеріалу.

Аналізуючи зв'язок між тензором впливу пошкодження N та двома скалярними змінними пошкодженнями D_E та D_G , отримані залежності пружних характеристик для ізотропного пошкодженого матеріалу, що дало можливість розраховувати ефективний коефіцієнт Пуассона та ефективний об'ємний модуль.

Встановлено, що використання двох феноменологічних параметрів пошкоджуваності на основі гіпотези еквівалентності питомих енергій деформування та використовуючи ефект деградації модуля пружності E і модуля пружності G з врахуванням об'ємного модуля K дає суттєве уточнення визначення напружено-деформованого стану високо навантажених елементів конструкцій різного призначення.

Ключові слова: ізотропне пошкодження, тензор пошкоджень, параметр пошкоджень, подвійні скалярні змінні, деградація модулів пружності, гіпотеза еквівалентних питомих енергій та деформацій.

Вступ

Одним із основних та перспективних напрямів підвищення ефективності і достовірності визначення напружено-деформованого стану елементів конструкцій різного призначення, як на стадії проектування, так і на стадії експлуатації, є розробка відповідних рівнянь стану. Аналогічну наукову проблему необхідно вирішувати також при прогнозуванні ресурсу високонавантажуваних елементів конструкцій.

Деформування конструкційних матеріалів, яке реалізується за умов термосилового навантаження,

супроводжується складними процесами зміни структури, зародженням, локалізацією та злиттям мікротріщин, мікропор, створенням макротріщини та її розвитком з наступним макроруйнуванням елементу конструкції. Умовно перша стадія (тривалість розсіяного руйнування) складає біля 80–90 % життєвого циклу виробу нової техніки [1]–[5]. Вона описується, як правило, феноменологічними моделями у вигляді кінетичних рівнянь. В них пошкоджуваність матеріалу характеризується формально деяким параметром, який може бути у вигляді скаляра, вектора або тензора [6]–[12]. Ключова стадія руйнування (живучість) схематизована в моделях механіки руйнування, на основі яких встановлюють умови втрати стійкості вже сформованих макротріщин.

Розглянемо початково ізотропний конструкційний матеріал. Стадія розсіяного руйнування супроводжується деградацією його основних механічних

✉ М.І. Бобир
m.bobyr@kpi.ua

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

характеристик, таких як модуль пружності першого E та другого роду G , коефіцієнт Пуассона ν і об'ємний модуль K . Їх використовують в якості параметрів пошкоджуваності (макропредставників процесів розсіяного руйнування) матеріалу на мікро- та мезорівнях [1], [13]–[15]. Порогове значення напружень, коли починаються процеси зародження мікропошкоджень та мікроруйнувань в репрезентативному об'ємі, становить границя витривалості металічного конструкційного матеріалу [14]. Для випадків проектування технологічних процесів в прикладній теорії пластичності назване порогове значення приймається на рівні границі текучості матеріалу [1], [16]–[20]. В якості першого наближення за параметр пошкоджуваності, як правило, вибирають скаляр [1], [2], [14], [21]–[23]. Для опису процесів розсіяного руйнування конструкційних матеріалів та силових елементів конструкцій на мікро- та мезорівнях використовують основні положення механіки твердого деформівного тіла та континуальної механіки пошкоджень [1], [2], [13]. Приймають гіпотезу еквівалентних деформацій та питомих енергій розсіювання пошкодженого і непошкодженого матеріалів. Тоді поточні (з врахуванням накопичення пошкоджень в конструкційному матеріалі) значення основних скалярних характеристик позначаються у вигляді: \bar{E} , \bar{G} , $\bar{\nu}$ та \bar{K} . Для ізотропної теорії пошкоджуваності [1], [2], [14], згідно якої пошкодження характеризується однією змінною та приймаючи гіпотезу, що $\bar{\nu} = \nu$, то можна отримати наступний результат: $\frac{\bar{E}}{E} = \frac{\bar{G}}{G} = \frac{\bar{K}}{K}$ [1],

[3]. Найбільш часто використовують одну скалярну змінну пошкоджуваності у вигляді відносного поточного модуля \bar{E} . Його значення визначається із базових експериментів на одновісний розтяг зразків з розвантаженням [1], [2]. Однак, як показано в роботах [3], [20], для опису двох механізмів мікроруйнування (відрив та зсув) в матеріалі необхідно використовувати два скалярних параметри. Була використана гіпотеза еквівалентності деформацій. Метою даної роботи є використання гіпотези еквівалентності питомих енергій для обґрунтування скалярних параметрів пошкоджуваності стосовно металічних конструкційних матеріалів з різними рівнями граничної пластичності.

Результати досліджень

Гіпотеза еквівалентних деформацій (ГЕД) дозволяє визначити скалярні параметри пошкоджуваності у вигляді:

$$D_E = 1 - \frac{\bar{E}}{E}; \quad D_G = 1 - \frac{\bar{G}}{G}; \quad D_\nu = 1 - \frac{\bar{\nu}}{\nu} \quad \text{та} \quad D_K = 1 - \frac{\bar{K}}{K}.$$

В свою чергу згідно гіпотези еквівалентних питомих енергій розсіювання (ГЕЕ), використовуючи

основні положення термодинаміки незворотніх процесів, названі параметри приймуть вигляд:

$$D_E = 1 - \sqrt{\frac{\bar{E}}{E}}; \quad D_G = 1 - \sqrt{\frac{\bar{G}}{G}}; \quad D_\nu = 1 - \sqrt{\frac{\bar{\nu}}{\nu}} \quad \text{та}$$

$$D_K = 1 - \sqrt{\frac{\bar{K}}{K}}.$$

Залежність між скалярними характеристиками пошкодженого та непошкодженого станів конструкційного матеріалу залишається незмінною. Так для пошкодженого стану матеріалу маємо:

$$\bar{K} = \frac{\bar{E}}{3(1-2\bar{\nu})}; \quad \bar{G} = \frac{\bar{E}}{3(1+\bar{\nu})}. \quad (1)$$

Базовим експериментом для оцінки впливу параметра пошкоджуваності на несучу здатність елементів конструкцій найбільш обґрунтованим виступає визначення закономірностей деградації модуля пружності E [1], [2], [14]. Для визначення обох механізмів руйнування, а саме: відрив та зріз, необхідно мати параметри пошкодження у вигляді D_E , D_G та D_ν . Взаємозв'язок між скалярними параметрами пошкоджуваності згідно гіпотези еквівалентності питомих енергій (ГЕЕ) та гіпотези еквівалентності деформацій (ГЕД) показані в табл. 1.

Базуючись на класичній теорії пружності, ізотропний тензор пружної жорсткості C , який є симетричним тензором 4-го порядку для непошкодженого матеріалу, може складатися з двох незалежних скалярних параметрів:

$$C_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + 2G \delta_{ik} \delta_{jl}, \quad (2)$$

де λ та G визначають пружні властивості ізотропного тіла, і називаються коефіцієнтами Ляме.

Аналогічно, ізотропний тензор впливу пошкоджень 4-го порядку N також може бути сформульований двома незалежними змінними масштабування ψ_1 та ψ_2 [13]:

$$N_{klmn} = \psi_1 \delta_{kl} \delta_{mn} + \psi_2 \delta_{km} \delta_{ln}. \quad (3)$$

Загалом, наведене вище рівняння, зазвичай, виконується для ізотропного виду пошкоджень. Підстановка цих двох рівнянь у співвідношення між ефективним і початковим для непошкодженого матеріалу видом тензора пружної жорсткості $\bar{C}_{ijkl} = C_{ijop} N_{opkl}$ дає нам наступне рівняння:

$$\bar{C}_{ijkl} = [(3\psi_1 + \psi_2)\lambda + 2G\psi_1] \delta_{ij} \delta_{kl} + 2G\psi_2 \delta_{ik} \delta_{jl}. \quad (4)$$

Ефективний тензор пружної жорсткості C можна виразити так:

$$\bar{C}_{ijkl} = \bar{\lambda} \delta_{ij} \delta_{kl} + 2\bar{G} \delta_{ik} \delta_{jl}, \quad (5)$$

Таблиця 1. Методика визначення параметрів пошкоджуваності

№ п/п	ГЕЕ	ГЕД
1	$D_v = 1 - \sqrt{\frac{E(1-D_E)^2 - 2G(1-D_G)^2}{(1-D_G)^2(E-2G)}}$ $D_K = D_E \sqrt{\frac{1-2G}{1-2G(1-D_v)^2}}$	$D_G = 1 - \frac{(1-D_E)(1+\nu)}{1+\nu(1-D_v)}$
2	$D_G = 1 - \sqrt{\frac{E(1-D_E)^2 - 2G(1-D_G)^2}{(1-D_G)^2(E-2G)}}$ $D_K = D_E \sqrt{\frac{1-2G}{1-2G(1-D_v)^2}}$	$D_v = 1 - \frac{E}{E-2G} \left(\frac{1-D_E}{1-D_G} \right)$
3	$D_v = 1 - \sqrt{\frac{E(1-D_E)^2 - 2G(1-D_G)^2}{(1-D_G)^2(E-2G)}}$ $D_G = 1 - \sqrt{\frac{E(1-D_E)^2 - 2G(1-D_G)^2}{(1-D_G)^2(E-2G)}}$	$D_K = 1 - \frac{(1-D_E)(1-2\nu)}{[1-2\nu(1-D_v)]}$

де $\bar{\lambda} = (3\Psi_1 + \Psi_2)\lambda + 2G\Psi_1$,
 $\bar{G} = G\Psi_2$,

де $\tilde{\lambda}$ та \tilde{G} називаються ефективними коефіцієнтами Ламе для ізотропного пошкодженого матеріалу.

У свою чергу значення Ψ_1 та Ψ_2 можна отримати у вигляді :

$$\Psi_1 = \frac{G\bar{\lambda} - \lambda\bar{G}}{(3\lambda + 2G)G}, \quad \Psi_2 = \frac{\bar{G}}{G}. \quad (6)$$

В результаті для непошкодженого та пошкодженого станів матеріалу маємо:

$$\lambda = \frac{G(E-2G)}{3G-E} \quad \text{та} \quad \tilde{\lambda} = \frac{\bar{G}(\bar{E}-2\bar{G})}{3\bar{G}-\bar{E}}. \quad (7)$$

Компоненти ефективного тензора пружної жорсткості можуть бути отримані як:

$$\bar{C}_{ijkl} = 2\bar{G} \left(\frac{\bar{E}-2\bar{G}}{6\bar{G}-2\bar{E}} \delta_{ij}\delta_{kl} + \delta_{ik}\delta_{jl} \right). \quad (8)$$

Ефективний тензор пружної жорсткості виражається двома незалежними поточними (ефективними) інженерними коефіцієнтами пружності, \bar{E} та \bar{G} .

Компоненти тензора впливу пошкодження N , що відноситься до обох \bar{E} та \bar{G} записуються:

$$N_{ijmn} = \frac{G}{\bar{G}} \left[\frac{3\left(\frac{\bar{E}}{E} - \frac{\bar{G}}{G}\right)}{3\bar{G}} \delta_{ij}\delta_{mn} + \delta_{im}\delta_{jn} \right] \cdot G - \left(\frac{\bar{E}}{E} \right) \left(\frac{E}{G} \right) \quad (9)$$

Таким чином, зв'язок між тензором впливу пошкодження та двома скалярними змінними пошкодженнями, D_E та D_G можна вдосконалити наступним чином:

$$N_{ijmn} = (1-D_G) \left[\frac{D_E - D_G}{3\bar{G}} \delta_{ij}\delta_{mn} + \delta_{im}\delta_{jn} \right] \cdot \left(G - \left(\frac{\bar{E}}{E} \right) \left(\frac{E}{G} \right) \right) \quad (10)$$

Тензор впливу пошкоджень N тепер характеризується іншою парою пошкоджень, D_E та D_G замість Ψ_1 та Ψ_2 . Беручи до уваги відповідні співвідношення у вигляді:

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad \text{та} \quad K = \frac{GE}{3(3G-E)}, \quad (11)$$

можна отримати подібні залежності для ізотропного пошкодженого матеріалу, наприклад:

$$\bar{\nu} = \frac{E(1-D_E)}{2G(1-D_G)} - 1 \quad \text{та} \quad \bar{K} = \frac{GE(1-D_G)(1-D_E)}{3G[3G(1-D_G) - E(1-D_G)]} - 1. \quad (12)$$

Ефективний коефіцієнт Пуассона $\bar{\nu}$ та ефективний об'ємний модуль \bar{K} можна розрахувати за допомогою цих рівнянь, якщо пошкодження D_E та D_G відомі.

Експериментальні результати досліджень

Для визначення границь використання двох названих гіпотез проведені експериментальні дослідження на розтяг та кручення (з відповідним роз-

вантаженням) зразків із сталі типу 12X18H10T та алюмінієвого сплаву типу Д16Т. Механічні характеристики конструкційних матеріалів, що випробувались, показані в табл. 2. Методика проведення досліджень та відповідне експериментальне обладнання детально описані в роботі [14]. Вимірювання модулів пружності \bar{E} та \bar{G} , а також коефіцієнта $\bar{\nu}$ при розвантаженні в залежності від рівня пружно-пластичного деформування дозволили встановити закономірності їх деградації.

Таблиця 2. Основні механічні характеристики матеріалів

Матеріал	Механічні характеристики						
	$E \cdot 10^5$, МПа	$G \cdot 10^5$, МПа	$K \cdot 10^5$, МПа	ν	δ , %	σ_B , МПа	σ_T , МПа
12X18H10T	1,84	0,77	1,66	0,3	88,0	644,0	180,0
Д16Т	0,72	0,29	0,46	2,24	12,0	547,7	402,0

Закономірності зміни модуля пружності E від рівня пошкоджуваності згідно з прийнятими гіпотезами показані на рис. 1.

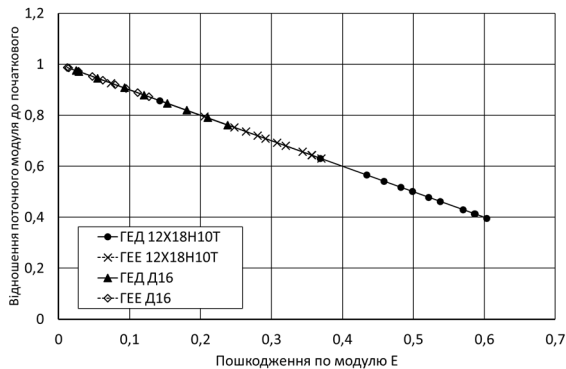


Рис. 1. Залежність модуля пружності E у відносних величинах від рівня накопичення пошкоджень для алюмінієвого сплаву Д16Т та сталі 12X18H10T

З нього видно, що гіпотеза еквівалентних деформацій дає більш вищі показники накопичення пошкоджень до утворення макротріщини по відношенню до гіпотези еквівалентних енергій. В той же час для більш пластичного матеріалу (сталь 12X18H10T) параметр пошкоджуваності D_E досягає більших граничних значень по відношенню до таких з меншим ресурсом пластичності δ . Аналогічні закономірності отримані також для модуля пружності G , які показані на рис. 2.

З нього видно, що параметри пошкоджуваності, які розраховані через модуль G характеризуються меншими граничними значеннями по відношенню до таких, які розраховані через модуль E (рис. 1). Але і в цьому виді розрахунків ГЕД дає більш високі значення

пошкоджуваності по відношенню до розрахунків пошкоджуваності на основі ГЕЕ.

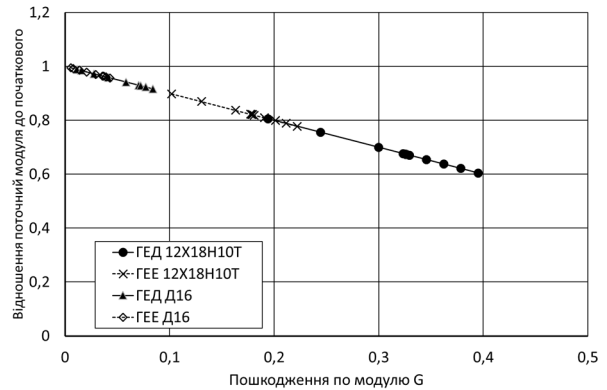


Рис. 2. Залежність відносного модуля пружності G від рівня накопичення пошкоджень для алюмінієвого сплаву Д16Т та сталі 12X18H10T

Порівняння кінетики накопичення розсіяних руйнувань, базуючись на розрахунку параметрів пошкоджуваності D_V та D_K для алюмінієвого сплаву Д16Т показані на рис. 3.

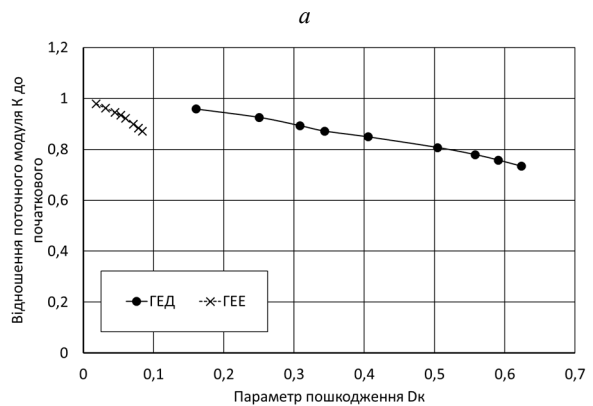
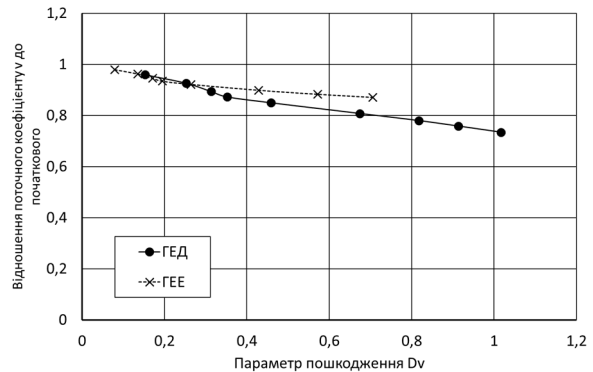


Рис. 3. Залежність кінетики накопичення пошкоджень для алюмінієвого сплаву Д16Т на основі розрахунків D_V (а) та D_K (б) від відносних величин коефіцієнту Пуассона ν та об'ємного модуля K

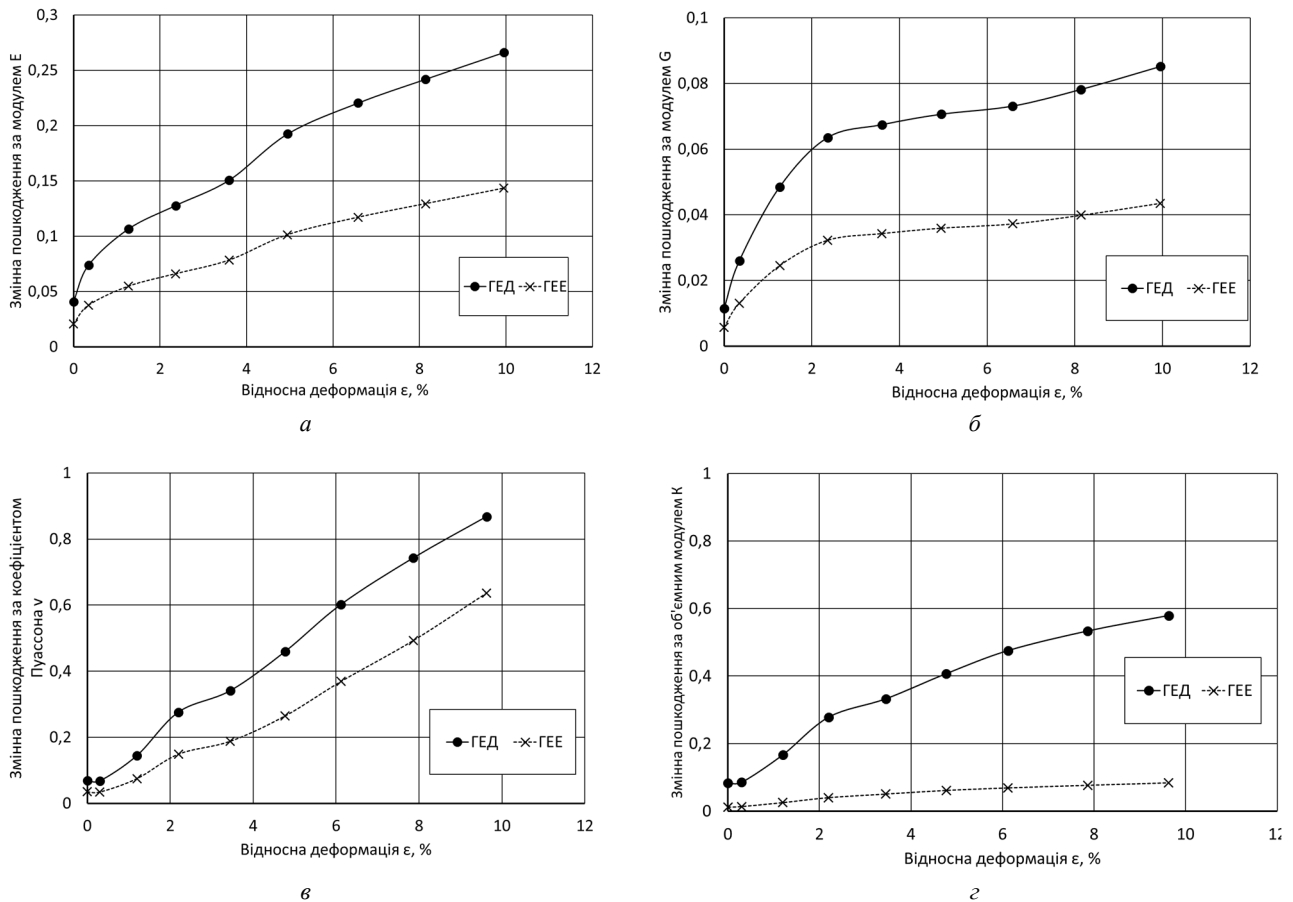


Рис. 4. Кінетичні діаграми пошкоджуваності сплаву типу Д16Т згідно різних методик та гіпотез еквівалентності станів матеріалу

З нього видно, що використання ГЕЕ дає менші значення граничного пошкодження. Це необхідно враховувати при інженерних розрахунках. Аналіз закономірностей кінетики накопичення пошкоджень з використанням параметрів пошкоджуваності D_E , D_G , D_V та D_K згідно табл. 1, для алюмінієвого сплаву Д16Т показані на рис. 4.

Аналіз наведених результатів показує, що для розрахунків граничного стану металічних конструкційних матеріалів на стадії зародження макротріщини за основу необхідно використовувати енергетичний підхід. В той же час на сьогодні поки недостатньо отримано експериментальних результатів для достовірного визначення параметрів пошкоджуваності, які могли б оцінювати ступінь впливу кожного із двох механізмів руйнування в сучасних металічних матеріалів, а саме: відрив та зріз. А це, в свою чергу, необхідно для розробки ефективних критеріїв руйнування та методів прогнозування ресурсу елементів конструкцій на стадії зародження макротріщини.

Висновки

На основі проведених досліджень конструкційних матеріалів з різним рівнем граничної пластичності встановлено, що:

1. Закономірності накопичення пошкоджень на мікро- та мезорівнях в металічних конструкційних матеріалах не залежать від їх класифікації по рівню граничної пластичності;
2. Використовуючи феноменологічний підхід для визначення несучої здатності металічних матеріалів, необхідно використовувати енергетичну гіпотезу питомих еквівалентних енергій пружно-пластичного деформування;
3. Концепція двох механізмів мікро- та мезоруйнування початково ізотропних металічних матеріалів вимагає розглядати мінімум два феноменологічних параметри пошкоджуваності. Для цього необхідно використовувати ефект деградації модуля пружності E та модуля пружності G з врахуванням об'ємного модуля K .

References

- [1] J. Lemaitre and R. Desmorat, *Engineering Damage Mechanics*, Springer, Paris, 2005, 380 p.
- [2] N. I. Bobyr' and V. V. Koval', "Damage Contribution to the Assessment of the Stress-Strain State of Structure Elements," *Strength of mater*, No. 49, pp. 361–368, 2017, doi: 10.1007/s11223-017-9876-2.
- [3] H. Badreddine, K. Saanouni and T. D. Nguyen, "Damage anisotropy and its effect on the plastic anisotropy evolution under finite strains," *International Journal of Solids and Structures*, No. 63, pp. 11–31, 2015, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2015.02.009.
- [4] Lu Dechun et al., "Double scalar variables plastic-damage model for concrete," *Journal of Engineering Mechanics*, 148, 2, 2022, doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0002050.
- [5] L. Xing et al., "A micromechanics-based damage constitutive model considering microstructure for aluminum alloys," *International Journal of Plasticity*, 157, 2022, doi: 10.1016/j.ijplas.2022.103390.
- [6] M. G. Chausov, P.O. Maruschak, V. Hutsaylyuk, L. Śnieżek and A. P. Pylypenko, "Effect of complex combined loading mode on the fracture toughness of titanium alloys," *Vacuum*, 147, pp. 51–57, 2018, doi: 10.1016/j.vacuum.2017.10.010.
- [7] J. Betten, "Damage tensors in continuum mechanics," *Journal de mécanique théorique appliquée*, No. 1, pp. 13–32, 1983.
- [8] Shedbale, Amit Subhash, Gang Sun, and Leong Hien Poh, "A localizing gradient enhanced isotropic damage model with Ottosen equivalent strain for the mixed-mode fracture of concrete," *International Journal of Mechanical Sciences*, 199, 2021, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106410.
- [9] Brünig, Michael, Sanjeev Koirala, and Steffen Gerke, "Micro-mechanical numerical analysis on ductile damage in multiaxially loaded anisotropic metals," *Computational Mechanics*, 73.2, pp. 223–232, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s00466-023-02364-1>.
- [10] Keshavarz, Arash, and Rahmatollah Ghajar, "Effect of isotropic and anisotropic damage and plasticity on ductile crack initiation," *International Journal of Damage Mechanics*, Vol.28, No. 6, pp. 918–942, 2019, doi: 10.1177/1056789518802625.
- [11] L. Xing et al., "A micromechanics-based damage constitutive model considering microstructure for aluminum alloys," *International Journal of Plasticity*, 157, 2022, 103390, <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2022.103390>
- [12] Z. Yue et al. "Failure prediction on steel sheet under different loading paths based on fully coupled ductile damage model," *International Journal of Mechanical Sciences*, No. 153, pp. 1–9, 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.01.029.
- [13] C. Y. Tang, W. Shen, L. H. Peng and T. C. Lee, "Characterization of Isotropic Damage Using Double Scalar Variables," *Intern. Journal of Damage Mechanics*, Vol. 11, pp. 3–25, Jan. 2002, doi: 10.1106/105678902023194.
- [14] M. I. Bobyr , V. V. Koval and D. K. Fam, "Poshkodzhuvaniist ta hranychnyi stan elementiv konstruksii pry skladnomu navantazhenni," Kyiv, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023, 292 p.
- [15] Lluís Pérez Caro et al., "Damage and fracture during sheet-metal forming of alloy 718," *International Journal of Material Forming*, Vol. 13, pp. 15–28, 2020, doi: 10.1007/s12289-018-01461-4.
- [16] L. Kachanov, *Time of the Rupture Process under Creep Conditions*, Izv. Akad. Nauk SSSR, Otd. Teck. Nauk, 8, 1958, pp. 26–31.
- [17] L. M. Araújo et al., "Fatigue analysis for the aluminum alloy 7050-T7451 performed by a two scale continuum damage mechanics model," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 105, 2020, doi: 10.1016/j.tafmec.2019.102439.
- [18] Wang, Xiao et al., "Plastic damage evolution in structural steel and its non-destructive evaluation." *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9.2, pp. 1189–1199, 2020, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.11.046.
- [19] Zhiyu Tuo et al., "Comparison of two uncoupled ductile damage initiation models applied to DP900 steel sheet under various loading paths," *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 30.1, pp. 25–45, 2021, doi: 10.1177/1056789520945002.
- [20] P. Ladeveze, *Damage and Fracture of Tridirectional Composites*, Proc. ICCM-IV, 1982, pp. 649–658.
- [21] B. Masseron, G. Rastiello and R. Desmorat, "Analytical strain localization analysis of isotropic and anisotropic damage models for quasi-brittle materials," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 254, 2022, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2022.111869.
- [22] Philipp Lennemann, P. Korkolis Yannis and A. Erman Tekkaya, "Influence of changing loading directions on damage in sheet metal forming," *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, Vol. 8, 2024, doi: 10.1016/j.aime.2024.100139.
- [23] Hai Rong et al., "Modeling the anisotropic plasticity and damage of AA7075 alloy in hot forming," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 215, 2022, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2021.106951.
- [24] Sanjeev Kumar, "Modelling ductile damage in metals and alloys through Weyl condition exploiting local gauge symmetries," *International Journal of Solids and Structures*, 2024, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2024.112820.
- [25] Faraz Sadeghi et al., "Damage identification of steel-concrete composite beams based on modal strain energy changes through general regression neural network," *Engineering Structures*, Vol. 244, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112824.

On the parameters of scattered destruction of structural materials

V.M. Malynskiy, M.I. Bobyr, O.V. Tymoshenko

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract. *The results of the application of various mechanical characteristics of structural materials as scalar parameters of damage are described. Scattered fracture is accompanied by degradation of the main mechanical characteristics of elasticity: Young's modulus of the first kind E and second G , bulk modulus K and Poisson's ratio ν .*

Hypotheses of strain equivalence (HED) and specific strain energies (HEE) for undamaged and damaged states of initially isotropic metallic materials are accepted. The relationship between the scalar parameters of damage according to the hypothesis of equivalence of specific energies (HEE) and the hypothesis of equivalence of strains (HED) is shown.

According to the results of the experimental studies, the patterns of scattered fracture accumulation were obtained for 12Cr18Ni10Ti steel and D16Ti aluminium alloy under conditions of active elastic-plastic deformation, taking into account two fracture mechanisms: tear and shear, according to various methods and hypotheses of equivalence of material states.

Analysing the relationship between the damage influence tensor N and two scalar variable damages DE and DG , the dependences of elastic characteristics for an isotropic damaged material are obtained. which made it possible to calculate the effective Poisson's ratio and the effective bulk modulus.

It was established that the use of two phenomenological parameters of damage based on the hypothesis of the equivalence of specific strain energies and using the effect of degradation of the modulus of elasticity E and modulus of elasticity G , taking into account the volume modulus K , provides a significant clarification of the definition of the stress-strain state of highly loaded structural elements of various purposes.

Keywords: isotropic damage, damage tensor, damage parameter, dual scalar variables, degradation of elastic modules, hypothesis of equivalent specific energies and strains.