

УДК: 539.4-620.1

DOI: 10.20535/2409-7160.2023.XXIII.277967

Критерій пошкоджуваності конструкційних матеріалів

А.П. Грабовський, О.А. Бондарець, І.І. Бабієнко

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м.Київ, Україна

Анотація

В роботі розглядається кількісна оцінка накопичення розсіяних пошкоджень, як багатомасштабне і багатостадійне явище при пружно-пластичному навантаженні, що приводить до деградації фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів, що виражається в зміні модулів пружності G та E . В роботі пропонується критерій пошкоджуваності, що містить вплив пошкоджень на ресурс роботи конструкції під зовнішнім складним навантаженням. Фізикою процесу кінетики накопичення пошкоджень пропонується фактор структурних змін в результаті розпушування матеріалу при навантаженні на відрив та зріз репрезентативного елемента в найбільш навантаженому перетині.

Ключові слова: кінетика пошкоджень, інженерні об'єкти, м'який та жорсткий режим навантаження, фактор пошкодження, ресурс роботи обладнання.

Вступ

Експлуатація інженерних об'єктів супроводжується структурними змінами в матеріалі, які супроводжуються зародженням, ростом та накопиченням мікропошкоджень різної форми і природи, фізичною та хімічною флуктуацією в матеріалі викликаною рухом вакансій і дислокацій та їх концентрацією на границях кристалів і т.д., що приводить до деградації основних фізико-механічних властивостей на мікрорівні. При належних вимогах до виготовлення і контролю дефектності в матеріалі елементів конструкцій на стадії запуску в експлуатацію, їх довговічність визначається процесами накопичення розсіяних мікропошкоджень, які становлять до 90% загальної довговічності. Ця стадія супроводжується явищем нелінійного накопичення розсіяних мікропошкоджень до утворення локалізованої магістральної мікротріщини. Таким чином, довговічність експлуатації деталей обладнання і інженерних об'єктів визначається довговічністю стадії накопичення розсіяних мікропошкоджень і довговічністю стадії стадії розповсюдження небезпечної макротріщини – живучістю.

Процес руйнування матеріалу розглядається як сукупність дії двох напружень в небезпечних найбільш навантажених перерізах нормальних - σ та дотичних - τ , 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 визначаються рівняннями [1, 2]:

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

D_{σ} та D_{τ} - параметри пошкоджуваності матеріалів за дії відповідно нормальних та дотичних напружень, які визначають кінетику накопичення пошкоджень за нормальними та дотичними напруженнями і визначаються відношеннями [1,2]:

$$D_{\sigma} = 1 - \sqrt{\frac{E_{ij}}{E_0}}; \quad D_{\tau} = 1 - \sqrt{\frac{G_{kl}}{G_0}} \quad (2)$$

де E_{ij}, G_{kl} - поточні модулі пружності при осьовому навантаженні та зсуві; E_0, G_0 - початкові модулі пружності матеріалу.

$$C_{iklm} = C_{kilm} = C_{ikml} = C_{milkl}$$

Отримання тензора пошкоджуваності.

Згідно рівняння [3] пошкоджуваність тіла визначається тензором четвертого рангу C_{iklm} . В загальному випадку тензор четвертого рангу має 81 незалежну компоненту. При симетрії тензорів напружень та деформацій число незалежних компонент тензора пошкоджуваності зменшується до 21. При симетрії тензорів σ_{ik} та ε_{ik} отримаємо:

$$C_{iklm} = C_{kilm} = C_{ikml} = C_{milkl} ; \quad (4)$$

Симетрична матриця має вигляд:

$$C_{iklm} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1113} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2213} & C_{2212} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3313} & C_{3312} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2313} & C_{2312} \\ C_{1311} & C_{1322} & C_{1333} & C_{1323} & C_{1313} & C_{1312} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1213} & C_{1212} \end{bmatrix} \quad (5)$$

При переході від тривимірного тензору четвертого рангу до шестимірної матриці, елементи якої залежать від двох індексів, шляхом заміни пари індексів, приймаючих значення 1, 2, 3 (з врахуванням їх симетрії), одним індексом, приймаючим значення 1, 2, 3, 4, 5, 6 за наступною схемою:

$$(11) \leftrightarrow 1; (22) \leftrightarrow 2; (33) \leftrightarrow 3; (23) = (32) \leftrightarrow 4; (31) = (13) \leftrightarrow 5; (12) = (21) \leftrightarrow 6.$$

При цьому переході маємо: $C_{iklm} = C_{mn}$, причому в силу симетрії при $n \neq m$ $C_{nm} = C_{mn}$. Запишемо для наглядності матрицю (5)

$$C_{mn} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Компоненти пошкоджуваності матриці (6) в результаті зміни об'єму матеріалу при його деградації ΔV в наслідок прогресуючої пористості для репрезентативного елемента (РЕ) згідно моделі В.В. Новожилова [4-5] матричні компоненти замінимо $C_{mn} = \Delta V_{mn}$ об'ємним параметр пошкоджуваності D_{mn}

$$D_{mn} = \frac{V_{mn} - V_0}{V_{mn}} = 1 - \frac{V_0}{V_{mn}} = 1 - \frac{V_0}{\Delta V_{mn} + V_0} \quad (7)$$

$$D_{mm} = \frac{V_{mm} - V_0}{V_{mm}} = 1 - \frac{V_0}{V_{mm}} = 1 - \frac{V_0}{\Delta V_{mm} + V_0}$$

В виразах (7) V_0 - початковий об'єм (РЕ), ΔV_{mn} та ΔV_{mm} - величини зміни об'ємів (РЕ) викликані пошкоджуваністю, D_{mn} , D_{mm} - параметри пошкоджуваності матеріалу (РЕ).

Аналізуючи вирази (7) отримаємо зміни об'єму викликані деградацією матеріалу в результаті його розпушуваності

$$\Delta V_{mn} = V_0 \left[\frac{1}{1 - D_{mn}} \right]; \Delta V_{mm} = V_0 \left[\frac{1}{1 - D_{mm}} \right] \quad (8)$$

В зв'язку з тим, що зсувні компоненти пошкоджуваності не викликають зміну об'єму виділеного (PE), то:

$$\Delta V_{41} = \Delta V_{51} = \Delta V_{61} = 0; \Delta V_{42} = \Delta V_{52} = \Delta V_{62} = 0; \Delta V_{43} = \Delta V_{53} = \Delta V_{63} = 0; \quad (9)$$

Враховуючи дію навантаження, наприклад вздовж осі $y(x,z)$ на площадку, що перпендикулярна осям $z(y,x)$ і створюють пошкоджуваність у відповідних напрямках не можуть змінювати кут між осями z та x . Звідси приріст об'єму (PE) у відповідних напрямках

$$\Delta V_{45} = \Delta V_{46} = \Delta V_{56} = 0; \quad (10)$$

З урахуванням всіх викладів матриця (6) через зміну об'єму (PE) виглядає таким чином:

$$C_{mn} = \Delta V_{mn} = \begin{bmatrix} \Delta V_{11} & \Delta V_{12} & \Delta V_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \Delta V_{21} & \Delta V_{22} & \Delta V_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \Delta V_{31} & \Delta V_{32} & \Delta V_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \Delta V_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta V_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Delta V_{66} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Складові матриці ΔV_{44} , ΔV_{55} , ΔV_{66} з врахуванням напрямку зміни об'єму PE створюють додаткову зсувну пошкоджуваність, в вигляді зміни форми PE, яка створюється розпушуванням під дією зсувних напружень на відокремлений PE.

$$D_{\tau_{23}} = D_{\tau_{32}} = 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta_{44}} \rightarrow \Delta V_{44} = \frac{V_0 D_{\tau_{32}}}{(1 - D_{\tau_{32}})} \quad (12)$$

Аналогічно $\Delta V_{55} = \frac{V_0 D_{13}}{(1 - D_{13})}$; $\Delta V_{66} = \frac{V_0 D_{12}}{(1 - D_{12})}$

З врахуванням виразів (12) матрицю об'ємної пошкоджуваності (11) можна записати наступним чином

$$C_{iklm} = C_{mn} = V_0 \left[\frac{1}{1 - D_{mn}} \right] = V_0 \begin{bmatrix} \frac{1}{1 - D_{11}} & \frac{1}{1 - D_{12}} & \frac{1}{1 - D_{13}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{1 - D_{21}} & \frac{1}{1 - D_{22}} & \frac{1}{1 - D_{23}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{1 - D_{31}} & \frac{1}{1 - D_{32}} & \frac{1}{1 - D_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1 - D_{32})} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1 - D_{13})} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{(1 - D_{12})} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Матриця (13) може бути трансформована об'ємною пошкоджуваністю D_{mn} слідуочим виразом

$$D_{mn} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & 0 & 0 & 0 \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{12} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Критерій пошкоджуваності конструкційних матеріалів для об'ємного напруженого стану має вигляд :

$$D_{mn} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & 0 & 0 & 0 \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & 0 & 0 & 0 \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{12} \end{bmatrix} \leq [D_R] \quad (15)$$

де $[D_R]$ - критична величина пошкоджуваності для матеріалу при лінійному напруженому стані

Інваріанти критерію пошкоджуваності I_1 та I_2 дорівнюють:

$$\begin{aligned} I_1 &= D_{11} + D_{22} + D_{33} - 2(D_{12} + D_{23} + D_{31}) \\ I_2 &= D_{11} + D_{22} + D_{33} + D_{32} + D_{13} + D_{12} \end{aligned} \quad (16)$$

На рис. 1 представлені криві залежності кінетики накопичення пошкоджень D від рівня інтенсивності пластичних деформацій ϵ_{ip} для зразків сталі 12X18H10T отриманих при розтязі – крива 1; крученні – крива 2; пропорційному навантаженні – крива 3 та розрахованому згідно матриці (14) – крива 4 при параметрі жорсткості пропорційного навантаження $k = 0.5$.

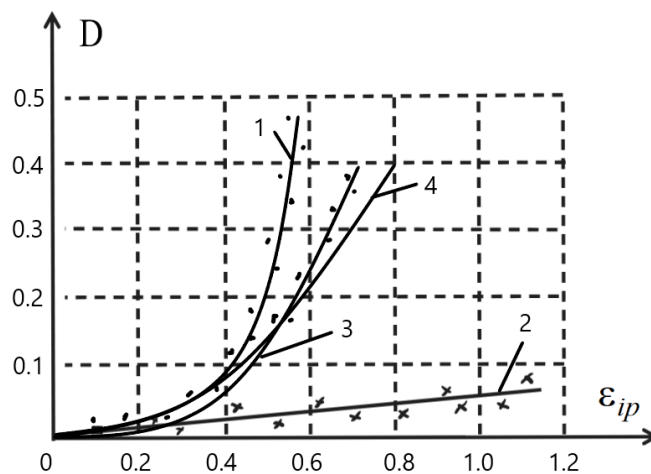


Рис. 1 Залежності кінетики накопичення пошкоджень від рівня інтенсивності пластичних деформацій для зразків сталі 12X18H10T

Розрахункова крива (4) рис.1 виконана для параметру жорсткості напруженого стану $k = 0.5$, який визначався згідно відношення:

$$K = \frac{\sigma_1}{3\sigma_i} \quad (17)$$

де $\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 - 3\tau^2}$, а інтенсивність деформацій $\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon^2 - \frac{\gamma^2}{3}}$.

Аналіз кривих (3) та (4) показує їх незначну розбіжність.

Список літератури

1. Bobyr, M. I., Khalimon, O. P., & Bondarets, O. A. (2012). Modeling of scattered damage accumulation kinetics under combined stress. *Strength of Materials*, 44(1), 20-26. doi:10.1007/s11223-012-9344-y
2. Грабовский А.П., Бондарец А.А. Деформационные модели кинетики повреждаемости конструкционных материалов при упругопластическом деформировании - Вестник Гомельского государственного технического университета им. ПО Сухого, 1 (52) , 2013
3. А. П. Грабовський Модель пошкоджуваності для розрахунку руйнування конструкційних матеріалів / А. П. Грабовський, О. А. Бондарець. І. І. Бабієнко / *Mechanics and Advanced Technologies* #3 (87), 2019. С.38-46.
4. Новожилов В. В. Микронапряжения в конструкционных материалах / Новожилов Валентин Валентинович, Кадашевич Юлий Исаакович. - Л.: Машиностроение, 1990. - 223 с.
5. Новожилов В. В. Разрыхление и критерий разрушения в условиях ползучести / В. В. Новожилов, Ю. И. Кадашевич, О. Г. Рыбакина// Доклады АН СССР. Т. 270, № 4. С. 831-835.

Criterion of damageability of structural materials

A.P. Grabovsky, O.A. Bondarets, I.I. Babienko

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Ukraine

Abstract. The work considers the quantitative assessment of the accumulation of scattered damage as a multi-scale and multi-stage phenomenon under elastic-plastic loading, which leads to the degradation of the physical and mechanical properties of structural materials, which is expressed in the change of the modulus of elasticity G and E . The paper proposes a criterion of damage, containing the effect of damage on the service life of the structure under an external complex load. The physics of the process of kinetics of damage accumulation suggests a factor of structural changes as a result of loosening of the material under load for separation and shearing of the representative element in the most loaded section.

Keywords: damage kinetics, engineering facilities, soft and hard load mode, damage factor, equipment life.