

МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ З ВРАХУВАННЯМ НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ

Грабовський А.П., Ковтун С.В. (НТУУ „КПІ”, м. Київ, Україна)
E-mail: mmi@kpi.ua

Анотація. В роботі розглянута оцінка кінетики накопичення розсіяних пошкоджень в конструкційних матеріалах для загального вигляду складного навантаження. Отримано тензор ефективних напружень з врахуванням пошкоджуваності для загального виду складного навантаження, представляючи функцію пошкоджуваності через розглянуті математичні моделі при осьовому навантаженні та зсуві (крученні), для яких необхідні значення тільки залишкових пружно-пластичних осьових та кутових деформацій. Розкладено даний тензор на дев'яторну та шарову частини, визначені перший, другий, третій інваріанти тензорів

Ключові слова: пошкоджуваність, навантаження, залишкова деформація, ефективне напруження, тензор ефективних напружень, модуль пружності, модель накопичення пошкоджень

1. Вступ

В умовах експлуатації елементи конструкцій сприймають складний комплекс зовнішніх впливів, що приводить до цілого ряду незворотних фізико-хімічних процесів, які протікають у матеріалі конструкції на мікро- і макрорівнях. Внаслідок цього відбувається зміна первинної структури матеріалу, зародження, розвиток і злиття пор, утворення мікротріщин, зменшення ефективного поперечного перерізу елемента конструкції і його подальше руйнування. Надалі під пошкоджуваністю матеріалу приймаємо величину, що характеризує порушення суцільності матеріалу, яка виникла під впливом деформацій і становиться причиною погіршення його фізико-механічних властивостей.

Введено гіпотезу, що мікропустоти та мікротріщини достатньо рівномірно розподіляються в об'ємі матеріалу, тобто пошкодження матеріалу, в першому наближенні носить ізотропний характер.

Згідно [1, 2, 3] ефективна площа поперечного перерізу $\tilde{F}$ дорівнює:

$$\tilde{F} = F - F_{\Pi} \quad (1)$$

де F_{Π} – площа мікродефектів в матеріалі, F – повна площа поперечного перерізу елементарного об'єму тіла.

Параметр пошкоджуваності D_n , що відповідає нормалі $\vec{n}$ до перерізу, дорівнює:

$$D_n = \frac{F - \tilde{F}}{F} \quad (2)$$

З фізичної точки зору змінна D_n це скорегована площа мікродефектів: тріщин та пор, що припадають на одиницю поверхні перерізу елемента площиною перпендикулярною до нормалі $\vec{n}$.

З математичної точки зору при наближенні F до нуля, D являє собою скореговану поверхневу щільність дефектів в тілі відносно нормалі $\vec{n}$.

Якщо $\vec{P}$ – навантаження, що діє на переріз F елемента, то

$$\vec{\sigma} = \frac{\vec{P}}{F} \quad (3)$$

є вектор напруження, що приводить до тензора напруження Коші σ за співвідношенням $\vec{\sigma} = \sigma \cdot \vec{n}$. Величина $\tilde{F} = F(1-D)$ є ефективною площею, що фактично несе навантаження $\vec{P}$. Тоді формулу (3) можна переписати у вигляді вектору ефективного напруження:

$$\tilde{\vec{\sigma}} = \frac{\vec{\sigma}}{1-D} \quad (4)$$

За параметр, що відображає процес накопичення пошкоджуваності в конструкційному матеріалі в першому наближенні можна прийняти скалярну функцію D :

$$D = f(\varepsilon_i^{(p)}, \sigma_i, T, t, N, \dots) \quad (6)$$

де $\varepsilon_i^{(p)}$ та σ_i – інтенсивність пластичної деформації та напружень відповідно, T – температура, t – час, N – кількість циклів втомного навантаження.

Згідно гіпотези Я.Б.Фрідмана [4] процес руйнування матеріалу можна розглядати, як сукупність дії двох механізмів руйнування – відриву та зсуву, що охоплює в'язке, крихке та в'язко-крихке руйнування:

$$\vec{D} = \vec{D}_\sigma + \vec{D}_\tau \quad (7)$$

де $\vec{D}_\sigma$ – вектор пошкоджуваності в матеріальній точці в напрямку відриву, а $\vec{D}_\tau$ – вектор пошкоджуваності в напрямку зсуву (кручення).

Об'ємний напружений стан з врахуванням пошкоджуваності

В загальному випадку напруженого стану при довільній орієнтації елементарного паралелепіпеда, виділеного в межах точки навантаженого тіла, на його гранях діють шість незалежних компонент тензора напружень: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{zx}, \tau_{xz}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$ (рис. 1).

Тензор ефективних напружень з врахуванням пошкоджуваності в загальному випадку на довільно нахиленій площадці має вигляд:

$$T(\tilde{\vec{\sigma}}) = \begin{pmatrix} \tilde{\sigma}_x & \tilde{\tau}_{xy} & \tilde{\tau}_{xz} \\ \tilde{\tau}_{yx} & \tilde{\sigma}_y & \tilde{\tau}_{yz} \\ \tilde{\tau}_{zx} & \tilde{\tau}_{zy} & \tilde{\sigma}_z \end{pmatrix} \quad (8)$$

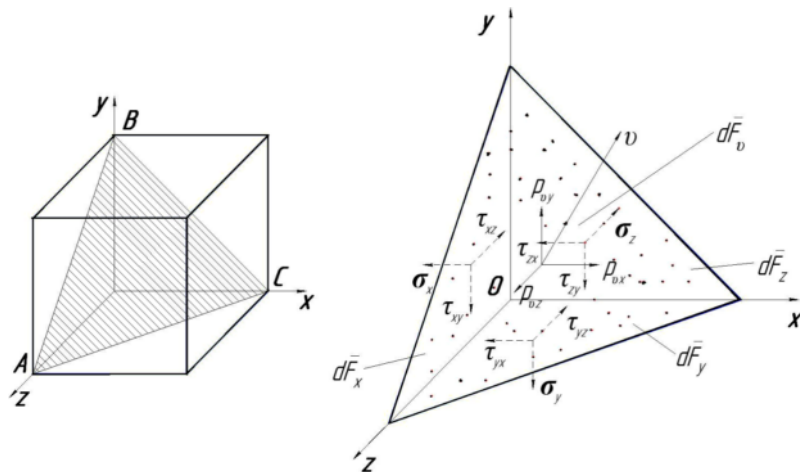


Рис. 1. Об'ємний напружений стан на довільно нахиленій площадці з врахуванням пошкоджуваності

Розглянемо детальніше залежності загальної та ефективної площі [5]. Нехай δF - загальна площа а δF_D - пошкоджувана площа (площа, що враховує концентрації мікронапружень та взаємодію між близькими дефектами), тоді вираз для ефективної площі $\tilde{\delta F}$:

$$\tilde{\delta F} = \delta F - \delta F_D = \delta F (1 - D) \quad (9)$$

Пошкодження часто є анізотропним, внаслідок того, що мікроруйнування в більший або менший мірі перпендикулярне до напрямку найбільшого позитивного головного напруження. Тоді, поверхнева щільність мікрodefektів в площині з нормаллю $\vec{n}$ представляється оператором, який трансформує площу δF і нормаль $\vec{n}$ в меншу, але безперервну площу $\tilde{\delta F} = \delta F - \delta F_D$ і іншу нормаль $\tilde{\vec{n}}$ (рис. 2).

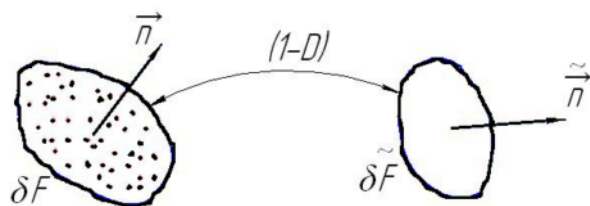


Рис. 2. Трансформація однієї площі в іншу

Ця трансформація виглядає наступним чином

$$(I - D)\vec{n} \delta F = \tilde{\vec{n}} \tilde{\delta F} \quad \text{або} \quad (I_{ij} - D_{ij})n_j \delta F = \tilde{n}_j \tilde{\delta F} \quad (10)$$

Для отримання ефективних напружень запишемо тензор напружень у двох конфігураціях

$$T_i \delta F = \tilde{T}_i \tilde{\delta F} \quad (11)$$

Вираз для знаходження компонентів тензора ефективних напружень має вигляд

$$\tilde{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} (I_{ij} - D_{ij})^{-1} \quad (12)$$

Після проведеного вище розрахунку тензор ефективних напружень з врахуванням пошкоджуваності (через параметр пошкоджуваності D_{ij})

$$T(\tilde{\sigma}) = \begin{pmatrix} \frac{\sigma_x}{1-D_x} & \frac{\tau_{xy}}{1-D_{xy}} & \frac{\tau_{xz}}{1-D_{xz}} \\ \frac{\tau_{yx}}{1-D_{yx}} & \frac{\sigma_y}{1-D_y} & \frac{\tau_{yz}}{1-D_{yz}} \\ \frac{\tau_{zx}}{1-D_{zx}} & \frac{\tau_{zy}}{1-D_{zy}} & \frac{\sigma_z}{1-D_z} \end{pmatrix} \quad (13)$$

Розглянемо інваріанти тензора ефективних напружень з врахуванням пошкоджуваності [6]. Отже перший інваріант пошкоджуваності дорівнює:

$$I_1(\tilde{\sigma}) = \frac{\sigma_x}{1-D_x} + \frac{\sigma_y}{1-D_y} + \frac{\sigma_z}{1-D_z} \quad (14)$$

Другий інваріант виражається співвідношенням:

$$I_2(\tilde{\sigma}) = \begin{vmatrix} \frac{\sigma_x}{1-D_x} & \frac{\tau_{xy}}{1-D_{xy}} \\ \frac{\tau_{yx}}{1-D_{yx}} & \frac{\sigma_y}{1-D_y} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{\sigma_x}{1-D_x} & \frac{\tau_{xz}}{1-D_{xz}} \\ \frac{\tau_{zx}}{1-D_{zx}} & \frac{\sigma_z}{1-D_z} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{\sigma_y}{1-D_y} & \frac{\tau_{yz}}{1-D_{yz}} \\ \frac{\tau_{zy}}{1-D_{zy}} & \frac{\sigma_z}{1-D_z} \end{vmatrix} = \frac{\sigma_x \sigma_y}{(1-D_x)(1-D_y)} + \frac{\sigma_x \sigma_z}{(1-D_x)(1-D_z)} + \frac{\sigma_y \sigma_z}{(1-D_y)(1-D_z)} - \frac{\tau_{xy}^2}{(1-D_{xy})^2} - \frac{\tau_{xz}^2}{(1-D_{xz})^2} - \frac{\tau_{yz}^2}{(1-D_{yz})^2} \quad (15)$$

Третій інваріант має вигляд:

$$I_3(\tilde{\sigma}) = \begin{vmatrix} \frac{\sigma_x}{1-D_x} & \frac{\tau_{xy}}{1-D_{xy}} & \frac{\tau_{xz}}{1-D_{xz}} \\ \frac{\tau_{yx}}{1-D_{yx}} & \frac{\sigma_y}{1-D_y} & \frac{\tau_{yz}}{1-D_{yz}} \\ \frac{\tau_{zx}}{1-D_{zx}} & \frac{\tau_{zy}}{1-D_{zy}} & \frac{\sigma_z}{1-D_z} \end{vmatrix} = \frac{\sigma_x \sigma_y \sigma_z}{(1-D_x)(1-D_y)(1-D_z)} +$$

$$+ \frac{2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx}}{(1-D_{xy})(1-D_{yz})(1-D_{zx})} - \frac{\sigma_x \tau_{yz}^2}{(1-D_x)(1-D_{yz})^2} - \frac{\sigma_y \tau_{xz}^2}{(1-D_y)(1-D_{xz})^2} - \frac{\sigma_z \tau_{xy}^2}{(1-D_z)(1-D_{xy})^2}$$

Розкладання тензора ефективних напружень з врахуванням пошкоджуваності на девіаторну і шарову частини

Описуючи закономірності кінетики накопичення пошкоджуваності в конструкційних матеріалах при складному напруженому стані введемо поняття «середнього напруження» з врахуванням пошкоджуваності, яке дорівнює середньому арифметичному від нормальних напружень:

$$\tilde{\sigma}_0 = \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma_x}{1-D_x} + \frac{\sigma_y}{1-D_y} + \frac{\sigma_z}{1-D_z} \right) \quad (17)$$

Середнє напруження характеризує собою рівновісне розтягування-стискання і відповідає тільки за зміну об'єму. Якщо від компонентів тензора ефективних напружень відокремимо ті, які пов'язані тільки з об'ємною деформацією, то отримаємо компоненти напружень $(\tilde{\sigma}_x - \tilde{\sigma}_0, \tilde{\sigma}_y - \tilde{\sigma}_0, \tilde{\sigma}_z - \tilde{\sigma}_0, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{xz}, \tau_{zx})$, які мають відношення тільки до зміни форми. Таким чином, загальний випадок напруженого стану на довільно нахилений площадці, з врахуванням пошкоджуваності, можна розглядати як напружений стан, пов'язаний лише із зміною форми, на яку «накладене» гідростатичне розтягування-стискання (рис. 3).

Приведені міркування про можливість розкладання напруженого стану дозволяють представити тензор ефективних напружень з врахуванням пошкоджуваності у вигляді двох складових: $T(\tilde{\sigma}) = T^0(\tilde{\sigma}) + L(\tilde{\sigma})$, де $T^0(\tilde{\sigma})$ - шаровий тензор ефективних напружень, який характеризує зміну об'єму тіла без зміни його форми (рис. 3.б)

$$T^0(\tilde{\sigma}) = \begin{pmatrix} \tilde{\sigma}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \tilde{\sigma}_0 & 0 \\ 0 & 0 & \tilde{\sigma}_0 \end{pmatrix}. \quad (18)$$

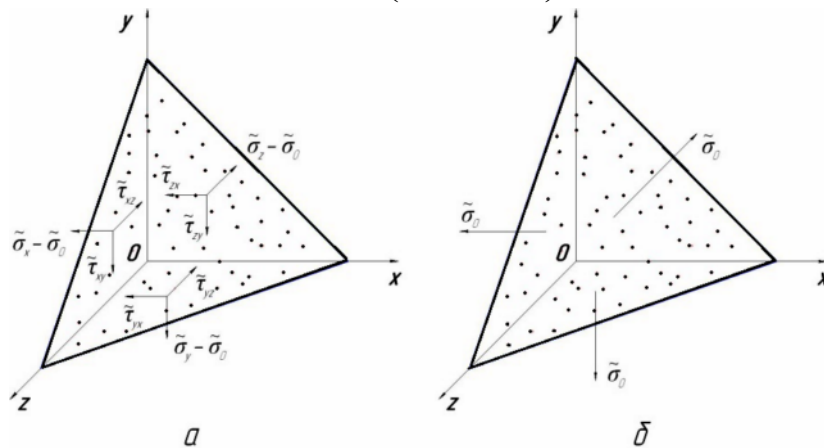


Рис. 3. Розкладання тензора ефективних напружень з врахуванням пошкоджуваності на девіаторну (а) і шарову (б) частини

$L(\tilde{\sigma})$ - девіатор ефективних напружень, який характеризує зміну форми тіла без зміни його об'єму (рис. 3.а)

$$L(\tilde{\sigma}) = \begin{pmatrix} \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_x}{1-D_x} - \frac{\sigma_y}{1-D_y} - \frac{\sigma_z}{1-D_z} \right) & \frac{\tau_{xy}}{1-D_{xy}} & \frac{\tau_{xz}}{1-D_{xz}} \\ \frac{\tau_{yx}}{1-D_{yx}} & \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_y}{1-D_y} - \frac{\sigma_x}{1-D_x} - \frac{\sigma_z}{1-D_z} \right) & \frac{\tau_{yz}}{1-D_{yz}} \\ \frac{\tau_{zx}}{1-D_{zx}} & \frac{\tau_{zy}}{1-D_{zy}} & \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_z}{1-D_z} - \frac{\sigma_x}{1-D_x} - \frac{\sigma_y}{1-D_y} \right) \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Перший інваріант шарового тензора ефективних напружень співпадає з першим інваріантом тензора ефективних напружень з врахуванням пошкоджуваності

$$I_1^0(\tilde{\sigma}) = 3\tilde{\sigma}_0 = \frac{\sigma_x}{1-D_x} + \frac{\sigma_y}{1-D_y} + \frac{\sigma_z}{1-D_z} = I_1(\tilde{\sigma}). \quad (20)$$

Перший інваріант девіатора ефективних напружень за властивістю дорівнює нулю

$$I_1'(\tilde{\sigma}) = \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_x}{1-D_x} - \frac{\sigma_y}{1-D_y} - \frac{\sigma_z}{1-D_z} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_y}{1-D_y} - \frac{\sigma_x}{1-D_x} - \frac{\sigma_z}{1-D_z} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_z}{1-D_z} - \frac{\sigma_x}{1-D_x} - \frac{\sigma_y}{1-D_y} \right) = 0. \quad (21)$$

Очевидно, що при напруженому стані, який описується девіатором, середнє напруження дорівнює нулю, тобто складова об'ємного ефективного напруження не змінюється.

Другий і третій інваріанти шарового тензора ефективних напружень та девіатора ефективних напружень відповідно дорівнюють:

$$I_2^0(\tilde{\sigma}) = 3\tilde{\sigma}_0^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma_x}{1-D_x} + \frac{\sigma_y}{1-D_y} + \frac{\sigma_z}{1-D_z} \right)^2 = \frac{1}{3} I_1^2(\tilde{\sigma}) \quad (22)$$

$$I_3^0(\tilde{\sigma}) = \tilde{\sigma}_0^3 = \frac{1}{27} \left(\frac{\sigma_x}{1-D_x} + \frac{\sigma_y}{1-D_y} + \frac{\sigma_z}{1-D_z} \right)^3 = \frac{1}{27} I_1^3(\tilde{\sigma}) \quad (23)$$

$$I_2'(\tilde{\sigma}) = \left| \begin{pmatrix} \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_x}{1-D_x} - \frac{\sigma_y}{1-D_y} - \frac{\sigma_z}{1-D_z} \right) & \frac{\tau_{xy}}{1-D_{xy}} \\ \frac{\tau_{yx}}{1-D_{yx}} & \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_y}{1-D_y} - \frac{\sigma_x}{1-D_x} - \frac{\sigma_z}{1-D_z} \right) \end{pmatrix} \right| + \left| \begin{pmatrix} \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_x}{1-D_x} - \frac{\sigma_y}{1-D_y} - \frac{\sigma_z}{1-D_z} \right) & \frac{\tau_{xz}}{1-D_{xz}} \\ \frac{\tau_{zx}}{1-D_{zx}} & \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_z}{1-D_z} - \frac{\sigma_x}{1-D_x} - \frac{\sigma_y}{1-D_y} \right) \end{pmatrix} \right| + \left| \begin{pmatrix} \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_y}{1-D_y} - \frac{\sigma_x}{1-D_x} - \frac{\sigma_z}{1-D_z} \right) & \frac{\tau_{yz}}{1-D_{yz}} \\ \frac{\tau_{zy}}{1-D_{zy}} & \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_z}{1-D_z} - \frac{\sigma_x}{1-D_x} - \frac{\sigma_y}{1-D_y} \right) \end{pmatrix} \right| \quad (24)$$

$$I'_3(\bar{\sigma}) = \begin{vmatrix} \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_x}{1-D_x} - \frac{\sigma_y}{1-D_y} - \frac{\sigma_z}{1-D_z} \right) & \frac{\tau_{xy}}{1-D_{xy}} & \frac{\tau_{xz}}{1-D_{xz}} \\ \frac{\tau_{yx}}{1-D_{yx}} & \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_y}{1-D_y} - \frac{\sigma_x}{1-D_x} - \frac{\sigma_z}{1-D_z} \right) & \frac{\tau_{yz}}{1-D_z} \\ \frac{\tau_{zx}}{1-D_{zx}} & \frac{\tau_{zy}}{1-D_{zy}} & \frac{1}{3} \left(\frac{2\sigma_z}{1-D_z} - \frac{\sigma_x}{1-D_x} - \frac{\sigma_y}{1-D_y} \right) \end{vmatrix} \quad (25)$$

Інтенсивність ефективних напружень при пропорційному пружно-пластичному деформуванні

В ході дослідження були проведені експериментальні випробування на пропорційне навантаження зразків зі сталі 07X16H6. Дослідження проводилися на автоматизованій експериментальній установці УМЕ-10 ТМ. Дані знімалися з датчиків осевого зусилля розтягу, моменту, осевої поздовжньої деформації, кута закручування, поперечної деформації та значень електричного опору робочої зони зразка. За отриманими даними було розраховано значення інтенсивності ефективних напружень за запропонованим тензором ефективних напружень та порівняння його значень з іншими розрахунками.

При пропорційному навантаженні на довільно нахилену площадку діють осеве ефективне напруження та зсувні ефективні напруження в площині (ху), перпендикулярній напрямку осевого навантаження (вісь z). При цьому напруження в усіх інших напрямках дорівнюють нулю

$$\tilde{\sigma}_x = \tilde{\sigma}_y = \tilde{\tau}_{xz} = \tilde{\tau}_{zx} = \tilde{\tau}_{yz} = \tilde{\tau}_{zy} = 0 \quad (33)$$

В цьому випадку, тензор ефективних напружень з врахуванням пошкоджуваності при пропорційному навантаженні запишеться у вигляді:

$$T(\bar{\sigma}) = \begin{pmatrix} 0 & \frac{\tau_{xy}}{1-D_{xy}} & 0 \\ \frac{\tau_{yx}}{1-D_{yx}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_z}{1-D_z} \end{pmatrix} \quad (34)$$

Для випадку пропорційного пружно-пластичного деформування сталі 07X16H6 були розраховані компоненти тензора ефективних напружень.

За отриманими компонентами тензорів ефективних напружень була розрахована інтенсивність ефективних напружень (35) та порівняна з інтенсивністю дійсних напружень в залежності від інтенсивності деформацій (36):

$$\tilde{\sigma}_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\tilde{\sigma}_x - \tilde{\sigma}_y)^2 + (\tilde{\sigma}_y - \tilde{\sigma}_z)^2 + (\tilde{\sigma}_z - \tilde{\sigma}_x)^2 + 6(\tilde{\tau}_{xy}^2 + \tilde{\tau}_{yz}^2 + \tilde{\tau}_{zx}^2)} \quad (35)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + 6(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)} \quad (36)$$

Для випадку пропорційного пружно-пластичного деформування формули інтенсивності ефективних напружень (35) та інтенсивності деформацій (36) мають вигляд:

$$\tilde{\sigma}_i = \sqrt{\tilde{\sigma}_z^2 + 3\tilde{\tau}_{xy}^2} \quad (37)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{2\varepsilon_z^2 + 6\gamma_{xy}^2} \quad (38)$$

Для сталі 07X16H6 на рис. 4 приведено графік порівняння кривої інтенсивності ефективних напружень, розрахованої через компоненти тензора ефективних напружень

(34) за рівнянням (37), кривої інтенсивності ефективних напружень, розрахованої з врахуванням пошкоджуваності від зміни електричного опору та кривої інтенсивності дійсних напружень в залежності від значення інтенсивності деформацій, розрахованої за рівнянням (38). Крива 1 – інтенсивність ефективних напружень, розрахована через запропонований тензор ефективних напружень (34); крива 2 – інтенсивність ефективних напружень з врахуванням пошкоджуваності через зміну питомого електричного опору робочої зони зразка; крива 3 – інтенсивність дійсних напружень.

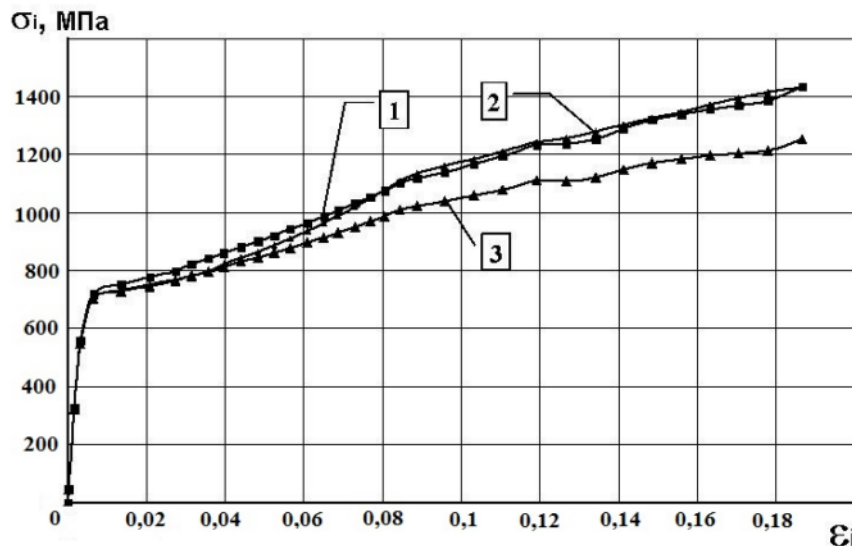


Рис. 4. Порівняння значень інтенсивності ефективних напружень для сталі 07Х16Н6

Як видно з графіку значення інтенсивності ефективних напружень, розрахованої з врахуванням запропонованого в ході дослідження тензора ефективних напружень з врахуванням пошкоджуваності, лежить найближче до еталонного значення інтенсивності ефективних напружень, розрахованої з врахуванням пошкоджуваності через зміну питомого електричного опору.

Середня похибка розрахунку інтенсивності ефективних напружень через зміну питомого електричного опору та з врахуванням запропонованого тензора ефективних напружень при пропорційному пружно-пластичному деформуванні становить близько 2 %.

Висновки: 1. В загальному вигляді складного навантаження конструкційні матеріали змінюють свої фізико-механічні властивості, що призводить до розпушення матеріалу. 2. Отримано тензор ефективних напружень з врахуванням пошкоджуваності для об'ємного напруженого стану на довільно нахилений площадці. 3. Знайдено перший, другий та третій інваріанти тензора ефективних напружень з врахуванням пошкоджуваності. 4. Розкладено тензор ефективних напружень на девіаторну і шарову частини та знайдено інваріанти для них відповідно. 5. Розраховано і проведено порівняння інтенсивності ефективних напружень при пропорційному пружно-пластичному деформуванні зразка сталі 07Х16Н6, визначеної через компоненти тензора ефективних напружень, з врахуванням пошкоджуваності від зміни електричного опору та в залежності від значення інтенсивності деформацій. Встановлено що середня похибка розрахунку еталонного значення інтенсивності ефективних напружень та значення інтенсивності від запропонованого тензора становить близько 2 %.

Список літератури: 1. Качанов Л.М. Основы механики разрушения.-М.: Наука, 1974.-312 с. 2. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения.-М.:Наука, 1987.-80с. 3. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций.-М.: Наука, 1966.-732с. 4. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов: В 2 ч.: Деформация и разрушение. – М.:Машиностроение, 1974. – Ч.1. – 472 с. 5. Lemaitre J. Damage mechanics – The Bath Press, Great Britain, - 1990. – 556 p. 6. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц, М., Издательство «Наука», 1988, 548 с. 7. Бобир М.І., Грабовський А.П. Моделі накопичення пошкоджень та руйнування при складному навантаженні// Вестник НТУУ „КПІ”, серия Машиностроение, 2003, №44. с.15-18. 8. Грабовський А.П., Тимошенко О.В., Масло О.М., Халімон О.П., Дослідження кінетики пошкоджуваності в конструкційних матеріалах при складному напруженому стані// Вестник НТУУ «КПІ», серия «Машиностроение», 2003, №44, с. 43-47.

DURABILITY OF CONSTRUCTION ELEMENTS WITH TAKING INTO ACCOUNT ACCUMULATION OF DAMAGES

Grabovsky A.P., Kovtun S.V. (NTUU “KPI”, Kyiv, Ukraine)

The paper considers the evaluation of the kinetics of accumulation of scattered damage in structural materials for the general form of complex loading. Obtained by the tensor of effective stresses, taking into account damage to the general form of complex loading, introducing the function of damage through the considered mathematical models under axial loading and torsion, which requires only the value of the residual elastic axial and angular deformities. Decomposed this tensor on the deviatoric and spherical parts, defined first, second, third invariants of the tensors

Key words: damage, loading, residual deformation, effective stresses, effective stresses tensor, elasticity modulus, damage kinetics models

ПРОЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Грабовский А.П., Ковтун С.В. (НТУУ „КПИ”, г. Киев, Украина)

В работе рассмотрена оценка кинетики накопления рассеянных повреждений в конструкционных материалах для общего вида сложного нагружения. Получен тензор эффективных напряжений с учетом повреждаемости для общего вида сложного нагружения, представляя функцию повреждаемости через рассмотренные математические модели при осевом нагружении и сдвиге (кручении), для которых нужны значения только остаточных упругопластических осевых и угловых деформаций. Разложено данный тензор на девиаторную и шаровую части, определены первый, второй, третий инварианты тензоров

Ключевые слова: *повреждаемость, нагружение, остаточная деформация, эффективное напряжение, тензор эффективных напряжений, модуль упругости, модель накопления повреждений*

Надійшла до редколегії 20.06.2011 р.