

ЗАКОНОМІРНОСТІ І МЕХАНІЗМИ ПОШКОДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ НАПРАЦЮВАННІ

Grabovskii A., Babiienko I.
The National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine (mmi@kpi.ua)

THE MECHANICS OF DAMAGE ACCUMULATIONS KINETICS IN STRUCTURAL MATERIALS AT A WORK

В роботі розглядається тензор кінетики накопичення пошкоджень в конструкційних матеріалах, який трансформується тензором функцій додаткових лінійних та кутових деформацій при пружнопластичному деформуванні. Отримано параметр інтенсивності пошкоджень через параметр інтенсивності деформацій при довільному напрямку координатних осей. Експериментально розглянута кінетика параметра інтенсивності пошкоджень від параметра інтенсивності деформацій для пропорційного деформування на зразках сталей 12X18H10T та 07X16H6 в порівнянні з величинами пошкоджуваності отриманими по кінетиці зміни питомого електричного опору в матеріалі при напрацюванні.

Ключові слова: тензор кінетики, інтенсивність пошкоджуваності, пружнопластичне деформування, зміна форми, зміна об'єму.

Вступ

Одна із основних завдань сучасного машинобудування - обґрунтування ресурсу роботи обладнання і систем інженерних об'єктів на стадії їх проектування, оцінка виробленого і прогноз залишкового ресурсу конструктивних вузлів в процесі експлуатації об'єктів, продовження терміну служби після відпрацювання мотивованого терміну. Особливо актуальні ці завдання для об'єктів, термін служби яких складає декілька десятків років (атомні енергетичні установки, нафтохімічне обладнання, резервуари для збереження газоподібних і зріджених хімічних продуктів, магістральні газо- і нафтопроводи і т.п.).

За критерій оцінки несучої спроможності конструкційних матеріалів в умовах експлуатації деталей і конструкцій приймається рівень пошкоджуваності матеріалу. Вона характеризує зміну його первинної структури – зародження, розвиток і злиття пор, утворення мікротріщин та інших дефектів, що призводить до незворотної зміни фізико-механічних властивостей матеріалів при напрацюванні (модуль пружності E та G , електропровідність, магнітної проникності, щільності [1-6] та інших показників), тобто деградації його фізико – механічних властивостей.

Мета роботи

Розробити тензор накопичення пошкоджуваності в конструкційних матеріалах при напрацюванні для загального випадку складного напруженого стану. На його базі отримати інваріанти і інтенсивність пошкоджуваності для загального випадку складного деформування, пропорційного деформування (осьове навантаження – кручення). Провести порівняння теоретичних значень інтенсивності пошкоджуваності з експериментальними результатами для пропорційного деформування на зразках сталей 12X18H10T та 07X16H6.

Основний матеріал

Деформування матеріалу, яке спричинене температурно-силовими діями супроводжується глибокими змінами його структури у зв'язку з розпушенням - утворення розривів у субмікро – та мікрооб'ємах, виділення нових фаз, утворення текстури, хімічних та фізичних флуктуацій і т.п. При пружнопластичному деформуванні розпушення матеріалу, в залежності від напрямку дії напружень, призводить до додаткової зміни об'єму і форми виділеного одинарного елементу (БОЕ) конструкційного матеріалу, що характеризує кінетику накопичення пошкоджень в ньому - D .

На рис.1 представлені напруження на гранях довільно виділеного елементарного паралелепіпеда конструкційного матеріалу (БОЕ) – a , які викликають в ньому додаткову зміну об'єму (складові $\Delta V_{xx}, \Delta V_{yy}, \Delta V_{zz}$) та додаткову зміну форми (складові $\Delta V_{xy}, \Delta V_{xz}, \Delta V_{yx}, \Delta V_{yz}, \Delta V_{zx}, \Delta V_{zy}$) – b , що викликана його пошкоджуваністю при осьових деформаціях (D_{xx}, D_{yy}, D_{zz}) та деформаціях зсуву ($D_{xy}, D_{xz}, D_{yx}, D_{yz}, D_{zx}, D_{zy}$) при пружнопластичному деформуванні.

Згідно робіт [6, 7] залежність загальної пошкоджуваності, що викликає додаткову зміну форми і об'єму BOE - D від величини об'ємної деформації – $\varepsilon_V^{(D)}$ виражається відношенням:

$$D = 1 - \frac{V_0}{V_i} = 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_i} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_V^{(D)}} = \frac{\varepsilon_V^{(D)}}{1 + \varepsilon_V^{(D)}}; \quad (1)$$

де V_0 - початковий об'єм BOE конструкційного матеріалу до пружнопластичного деформування;

$V_i = V_0 + \Delta V_i$ - поточний об'єм BOE при пружнопластичному деформування, що включає загальну додаткову зміну його об'єму і зміну форми від величини пошкоджуваності;

ΔV_i - абсолютна складова загальної додаткової зміни об'єму і форми BOE.

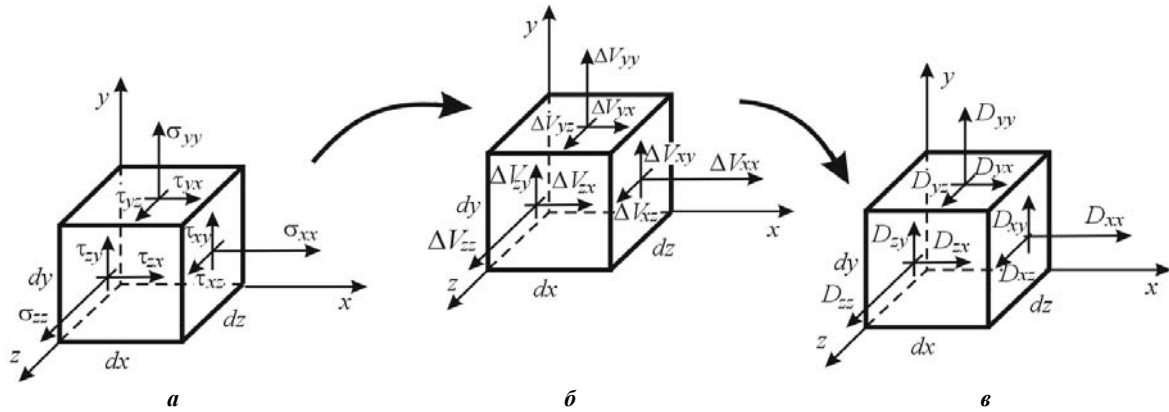


Рис. 1. Компоненти напружень – а, зміни об'єму і форми – б та пошкоджуваності – в, BOE конструкційного матеріалу при пружнопластичному навантаженні

Кінетика накопичення пошкоджень в BOE, яка викликана величинами додаткової зміни об'єму, через величини відносних деформацій в напрямках осей координат x, y, z виражається відношеннями:

в напрямку осі – x :

$$D_{xx} = 1 - \frac{V_o}{V_{xx}} = 1 - \frac{V_o}{V_0 + \Delta V_{xx}} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_{xx}^{(D)}} = \frac{\varepsilon_{xx}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{xx}^{(D)}}; \quad (2)$$

де V_{xx} - поточний об'єм BOE при пружнопластичному навантаженні, що включає додаткову зміну об'єму від пошкоджуваності в напрямку осі- x ;

ΔV_{xx} - абсолютна складова додаткової зміни об'єму BOE від пошкоджуваності в напрямку осі – x ;

$\varepsilon_{xx}^{(D)}$ - відносна величина додаткової зміни об'єму BOE від пошкоджуваності в напрямку осі – x ;

в напрямку осі – y

$$D_{yy} = 1 - \frac{V_o}{V_{yy}} = 1 - \frac{V_o}{V_0 + \Delta V_{yy}} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_{yy}^{(D)}} = \frac{\varepsilon_{yy}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{yy}^{(D)}}; \quad (3)$$

де V_{yy} - поточний об'єм BOE при пружнопластичному навантаженні, що включає зміну об'єму пошкоджуваності в напрямку осі – y ;

ΔV_{yy} - абсолютна складова додаткової зміни об'єму BOE від пошкоджуваності в напрямку осі – y ;

$\varepsilon_{yy}^{(D)}$ - відносна величина додаткової зміни об'єму BOE від пошкоджуваності в напрямку осі – y ;

в напрямку осі – z

$$D_{zz} = 1 - \frac{V_o}{V_{zz}} = 1 - \frac{V_o}{V_0 + \Delta V_{zz}} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_{zz}^{(D)}} = \frac{\varepsilon_{zz}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{zz}^{(D)}}; \quad (4)$$

де V_{zz} – поточний об'єм BOE при пружнопластичному навантаженні, що включає додаткову зміну об'єму від пошкоджуваності в напрямку осі – z ;

ΔV_{zz} - абсолютна складова додаткової зміни об'єму BOE від пошкоджуваності в напрямку осі – z ;

$\varepsilon_{zz}^{(D)}$ - Відносна величина додаткової зміни об'єму BOE від пошкоджуваності в напрямку осі – z .

Кінетика накопичення пошкоджень в БОЕ, що викликає додаткову зміну форми при дії зсувних пружнопластичних деформацій з врахуванням парності дотичних напружень на його гранях в напрямках осей $xu-yx$, $yz-zu$, $zx-xz$ виражається відношеннями:

на гранях в напрямках осей $xu-yx$:

$$\begin{aligned} D_{xy} &= 1 - \frac{V_o}{V_{xy}} = 1 - \frac{V_o}{V_0 + \Delta V_{xy}} = 1 - \frac{1}{1 + 1/2 \gamma_{xy}^{(D)}} = \frac{1/2 \gamma_{xy}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{xy}^{(D)}}; \\ D_{yx} &= 1 - \frac{V_o}{V_{yx}} = 1 - \frac{V_o}{V_0 + \Delta V_{yx}} = 1 - \frac{1}{1 + 1/2 \gamma_{yx}^{(D)}} = \frac{1/2 \gamma_{yx}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{yx}^{(D)}}; \end{aligned} \quad (5)$$

де $V_{xy} - V_{yx}$ - поточні додаткові зміни форми БОЕ викликані пошкоджуваністю при пружнопластичному деформуванні на відповідних площадках в напрямках $xu-yx$;

$\Delta V_{xy} - \Delta V_{yx}$ - абсолютні складові додаткової зміни форми БОЕ викликані пошкоджуваністю на відповідних

площадках в напрямках $xu-yx$; $\frac{1}{2} \gamma_{xy}^{(D)} - \frac{1}{2} \gamma_{yx}^{(D)}$ - відносні величини додаткової зміни форми БОЕ від

пошкоджуваності відповідних площадок в напрямках $xu-yx$;

на гранях в напрямках осей $yz-zu$:

$$\begin{aligned} D_{yz} &= 1 - \frac{V_o}{V_{yz}} = 1 - \frac{V_o}{V_0 + \Delta V_{yz}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \gamma_{yz}^{(D)}} = \frac{\frac{1}{2} \gamma_{yz}^{(D)}}{1 + \frac{1}{2} \gamma_{yz}^{(D)}}; \\ D_{zy} &= 1 - \frac{V_o}{V_{zy}} = 1 - \frac{V_o}{V_0 + \Delta V_{zy}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \gamma_{zy}^{(D)}} = \frac{\frac{1}{2} \gamma_{zy}^{(D)}}{1 + \frac{1}{2} \gamma_{zy}^{(D)}}; \end{aligned} \quad (6)$$

де $V_{yz} - V_{zy}$ - поточні додаткові зміни форми БОЕ викликані пошкоджуваністю при пружнопластичному навантаженні на відповідних площадках в напрямках $yz-zu$;

$\Delta V_{yz} - \Delta V_{zy}$ - абсолютні складові додаткової зміни форми БОЕ викликані пошкоджуваністю на відповідних

площадках в напрямках $yz-zu$; $\frac{1}{2} \gamma_{yz}^{(D)} - \frac{1}{2} \gamma_{zy}^{(D)}$ - відносні величини додаткової зміни форми БОЕ від

пошкоджуваності відповідних площадок в напрямках $yz-zu$.

на гранях в напрямках осей $zx-xz$:

$$\begin{aligned} D_{zx} &= 1 - \frac{V_o}{V_{zx}} = 1 - \frac{V_o}{V_0 + \Delta V_{zx}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \gamma_{zx}^{(D)}} = \frac{\frac{1}{2} \gamma_{zx}^{(D)}}{1 + \frac{1}{2} \gamma_{zx}^{(D)}}; \\ D_{xz} &= 1 - \frac{V_o}{V_{xz}} = 1 - \frac{V_o}{V_0 + \Delta V_{xz}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \gamma_{xz}^{(D)}} = \frac{\frac{1}{2} \gamma_{xz}^{(D)}}{1 + \frac{1}{2} \gamma_{xz}^{(D)}}; \end{aligned} \quad (7)$$

де $V_{zx} - V_{xz}$ - поточні додаткові зміни форми БОЕ викликані пошкоджуваністю при пружнопластичному деформуванні на відповідних площадках в напрямках $zx-xz$;

$\Delta V_{zx} - \Delta V_{xz}$ - абсолютні складові додаткової зміни форми БОЕ викликані пошкоджуваністю на відповідних

площадках в напрямках $zx-xz$; $\frac{1}{2} \gamma_{zx}^{(D)} - \frac{1}{2} \gamma_{xz}^{(D)}$ - відносні величини додаткової зміни форми БОЕ від пошкоджуваності

відповідних площадок в напрямках $zx-xz$.

Враховуючи відношення (1)-(7) тензор пошкоджуваності і величини функцій відносних додаткових осьових і кутових переміщень при пружнопластичних деформаціях, які характеризують пошкоджуваність БОЕ конструкційного матеріалу представляються слідуючими тензорними величинами.

$$D = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\varepsilon_{xx}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{xx}^{(D)}} & \frac{1/2 \gamma_{xy}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{xy}^{(D)}} & \frac{1/2 \gamma_{xz}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{xz}^{(D)}} \\ \frac{1/2 \gamma_{yx}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{yx}^{(D)}} & \frac{\varepsilon_{yy}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{yy}^{(D)}} & \frac{1/2 \gamma_{yz}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{yz}^{(D)}} \\ \frac{1/2 \gamma_{zx}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{zx}^{(D)}} & \frac{1/2 \gamma_{zy}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{zy}^{(D)}} & \frac{\varepsilon_{zz}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{zz}^{(D)}} \end{bmatrix}; \quad (8)$$

Перший і другий інваріанти тензорів пошкоджуваності дорівнюють:

$$I_1 = D_{xx} + D_{yy} + D_{zz} = \frac{\varepsilon_{xx}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{xx}^{(D)}} + \frac{\varepsilon_{yy}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{yy}^{(D)}} + \frac{\varepsilon_{zz}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{zz}^{(D)}}; \quad (9)$$

$$I_2 = \begin{vmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{yx} & D_{yy} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zy} & D_{zz} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} D_{xx} & D_{xz} \\ D_{zx} & D_{zz} \end{vmatrix} = D_{xx}D_{yy} + D_{yy}D_{zz} + D_{xx}D_{zz} - D_{xy}D_{yx} - D_{zy}D_{yz} - D_{zx}D_{xz} =$$

$$= \frac{\frac{\varepsilon_{xx}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{xx}^{(D)}} \cdot \frac{1/2 \gamma_{xy}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{xy}^{(D)}}}{\frac{1/2 \gamma_{yx}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{yx}^{(D)}} \cdot \frac{\varepsilon_{yy}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{yy}^{(D)}}} + \frac{\frac{\varepsilon_{yy}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{yy}^{(D)}} \cdot \frac{1/2 \gamma_{yz}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{yz}^{(D)}}}{\frac{1/2 \gamma_{zy}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{zy}^{(D)}} \cdot \frac{\varepsilon_{zz}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{zz}^{(D)}}} + \frac{\frac{\varepsilon_{xx}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{xx}^{(D)}} \cdot \frac{1/2 \gamma_{zx}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{zx}^{(D)}}}{\frac{1/2 \gamma_{xz}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{xz}^{(D)}} \cdot \frac{\varepsilon_{zz}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{zz}^{(D)}}} =$$

$$= \frac{\varepsilon_{xx}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{xx}^{(D)}} \cdot \frac{\varepsilon_{yy}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{yy}^{(D)}} + \frac{\varepsilon_{yy}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{yy}^{(D)}} \cdot \frac{\varepsilon_{zz}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{zz}^{(D)}} + \frac{\varepsilon_{xx}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{xx}^{(D)}} \cdot \frac{\varepsilon_{zz}^{(D)}}{1 + \varepsilon_{zz}^{(D)}} -$$

$$- \frac{1/2 \gamma_{xy}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{xy}^{(D)}} \cdot \frac{1/2 \gamma_{yx}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{yx}^{(D)}} - \frac{1/2 \gamma_{xy}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{xy}^{(D)}} \cdot \frac{1/2 \gamma_{yz}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{yz}^{(D)}} - \frac{1/2 \gamma_{xz}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{xz}^{(D)}} \cdot \frac{1/2 \gamma_{zx}^{(D)}}{1 + 1/2 \gamma_{zx}^{(D)}} \quad (10)$$

Інтенсивність пошкоджуваності - D_i через інтенсивність відносних деформацій від пошкоджуваності - $\varepsilon_i^{(D)}$ при довільному напрямі координатних осей відповідно дорівнює:

$$D_i = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_i^{(D)}} = \frac{\varepsilon_i^{(D)}}{1 + \varepsilon_i^{(D)}}; \quad (11)$$

Інтенсивність пошкодження (11) через величину інтенсивності деформацій [8] при довільному напрямі координатних осей виразиться відношенням:

$$D_i = \frac{\sqrt{2} \sqrt{(\varepsilon_{xx}^{(D)} - \varepsilon_{yy}^{(D)})^2 + (\varepsilon_{yy}^{(D)} - \varepsilon_{zz}^{(D)})^2 + (\varepsilon_{zz}^{(D)} - \varepsilon_{xx}^{(D)})^2} + \frac{3}{2} (\gamma_{xy}^{(D)} \gamma_{yx}^{(D)} + \gamma_{yz}^{(D)} \gamma_{zy}^{(D)} + \gamma_{zx}^{(D)} \gamma_{xz}^{(D)})}{3 + \sqrt{2} \sqrt{((\varepsilon_{xx}^{(D)} - \varepsilon_{yy}^{(D)})^2 + (\varepsilon_{yy}^{(D)} - \varepsilon_{zz}^{(D)})^2 + (\varepsilon_{zz}^{(D)} - \varepsilon_{xx}^{(D)})^2) + \frac{3}{2} (\gamma_{xy}^{(D)} \gamma_{yx}^{(D)} + \gamma_{yz}^{(D)} \gamma_{zy}^{(D)} + \gamma_{zx}^{(D)} \gamma_{xz}^{(D)})}}; \quad (12)$$

При пропорційному деформуванні (осьове навантаження по осі x та кручення в площині осей $y-z$) з використанням закону парності дотичних напружень при зсуві, інтенсивність пошкоджуваності - D_i , з виразу (12), дорівнює:

$$D_i = \frac{2\sqrt{(\varepsilon_{xx}^{(D)})^2 + \frac{3}{4}(\gamma_{yz}^{(D)})^2}}{3 + 2\sqrt{(\varepsilon_{xx}^{(D)})^2 + \frac{3}{4}(\gamma_{yz}^{(D)})^2}}; \quad (13)$$

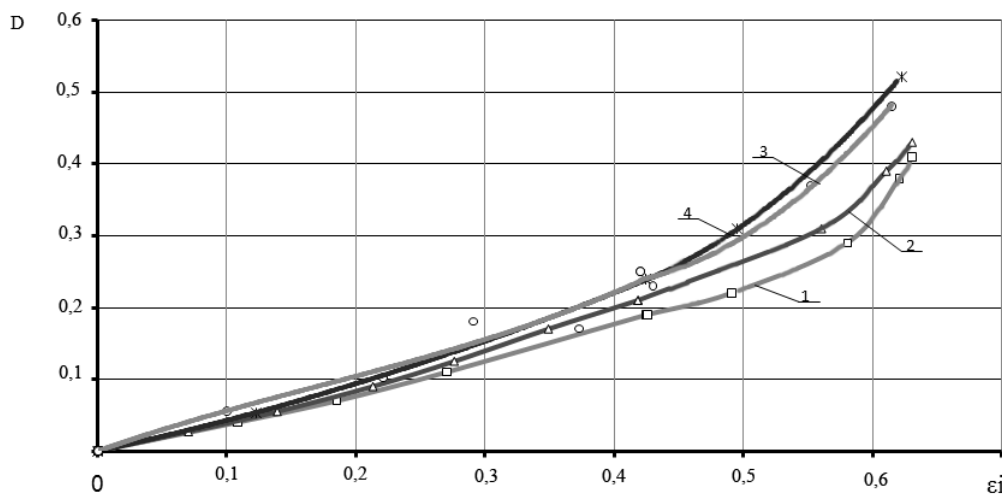


Рис. 2. Інтенсивність накопичення пошкоджень в зразках сталі 12X18N10T від величини інтенсивності деформацій при пропорційному деформуванні

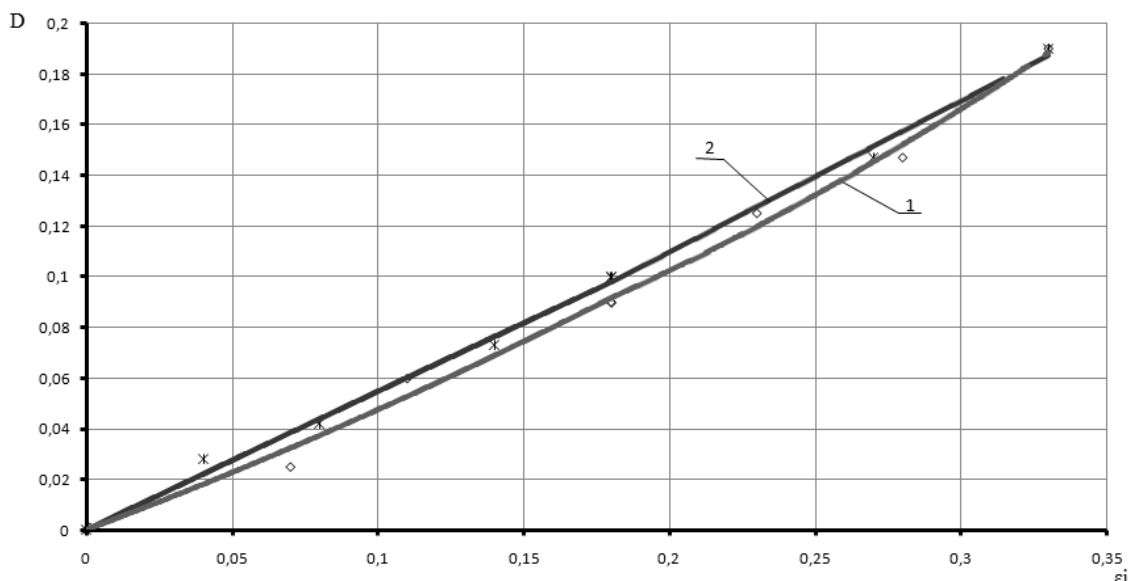


Рис. 3. Інтенсивність накопичення пошкоджень в зразках сталі 07X16H6 від величини інтенсивності деформацій при пропорційному деформуванні

На рис. 2. та рис. 3 приведені криві кінетики накопичення інтенсивності пошкоджень при пропорційному деформуванні для зразків сталі 12X18H10T (рис.2) та зразків сталі 07X16H6 (рис.3), які побудовані в координатах залежності інтенсивності пошкоджень - D_i від інтенсивності деформацій - ε_i . Криві 1,2 рис 2 та крива 2 рис. 3 побудовані згідно розрахунків за формулою (13), де показники осевої деформації - ε_{xx} і кутових деформацій зсуву γ_{yz} - отримані із експериментальних результатів пропорційного деформування відповідних зразків. Криві 3, 4 рис. 2 та крива 1 рис.3 характеризують кінетику накопичення пошкоджень в зразках через зміну питомого електричного опору при пропорційному деформуванні, яка визначалась згідно відношення $D_i = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_i}$; де ρ_0 - початковий питомий опір зразків до навантаження і ρ_i - поточна величина питомого електричного опору при їх деформуванні [9].

Аналізуючи криві рис.2 та рис.3 можна зробити висновок, що за формою і величиною показників залежності $D_i = f(\varepsilon_i)$ близькі між собою.

Висновки

1. В процесі пружнопластичного навантаження в конструкційних матеріалах проходять незворотні фізико-механічні процеси, що приводять до утворення мікропошкоджень, спричиняючи розпушення матеріалу – додаткову зміну його об'єму і форми, що приводить до погіршення їх фізико-механічних властивостей.

2. Запропонований тензор пошкоджуваності, який трансформується тензором функції додаткових лінійних і кутових переміщень при складному пружнов'язкопластичному деформуванні конструкційних матеріалів.

3. Вводиться в розрахунки параметр інтенсивності пошкоджень, який при довільному напрямку координатних осей визначається величинами додаткових лінійних і кутових відносних деформацій при пружнопластичних деформуваннях конструкційного матеріалу.

4. Проведене порівняння експериментальних досліджень інтенсивності пошкоджень від величини інтенсивності деформацій при пропорційному деформуванні зразків сталей 12X18H10T та 07X16H6 методом порівняння результатів отриманих через додаткові відносні кутові і лінійні деформації з результатами зміни питомого електричного опору.

5. Показано, що результати експериментальних досліджень за характером кривих і величинами інтенсивності пошкоджень близькі між собою.

Анотація. В работе рассматривается тензор кинетики накопления повреждений в конструкционных материалах, который трансформируется тензором дополнительных функции линейных и угловых деформаций при упругопластическом деформировании. Получен параметр интенсивности повреждений через параметр интенсивности деформаций при произвольном направлении координатных осей. Экспериментально рассмотрена кинетика параметр интенсивности повреждений от параметра интенсивности деформаций при пропорциональном деформировании на образцах сталей

12X18H10T и 07X16H6 в сравнении с величинами поврежденности полученными по кинетике изменения удельного электросопротивления в материале при наработке.

Ключевые слова: тензор кинетики, интенсивность повреждаемости, упругопластическая деформация, изменения формы, изменение объема.

Abstract. Purpose. At the present time, much attention is given to the problem of reliable prediction of the life of structural materials in designing plastic shaping processes and operating the critical structural elements of modern machinery of the machine-building complex at the design stage and of remaining life at the operation stage.

Design/methodology/approach The tensor of accumulation of damages is in-process examined on the change of volume of the selected unit element of construction material at the elastoplastic loading, which is transformed by degradation of physical-mechanical properties of material at work.

Findings. Scattered damage accumulation under proportional loading were compared with the experimental data obtained for 12Cr18Ni10Ti and 07Cr16Ni6 steels. The laws governing the kinetics of scattered damage accumulation were obtained by two method: electrical resistivity variation and elastic modulus variations.

Originality/value. Presented lifetime prediction method for structural materials elements under complex stress state with damage.

Keywords: Damage tensor, Intensity of damageability, elastoplastic deformation, form change, volume change.

1. Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом нагружении / [Лебедев А.А., Чаусов Н.Г., Недосека С.А., Бонинич И.А.] – К.: Проблемы прочности, 1995, №7 – сс.31-37.
2. Лебедев А.О. Механіка матеріалів для інженерів. Навчальний посібник / Лебедев А.О., Бобир М.І., Ламашевський В.П. – К.: НТУУ «КПІ», ВПІ ВПК «Політехніка», 2006, – 286 с.
3. Дослідження кінетики пошкоджуваності в конструкційних матеріалах при складному напруженому стані [Грабовський А.П., Тимошенко О.В., Масло О.М., Халімон О.П.] – К.: Вестник НТУУ «КПІ», серія «Машиностроение», 2003, №4, – сс. 43-47.
4. Грабовський А.П. Деградація фізико-механічних властивостей конструкцій матеріалів при пружнопластичному розтягуванні та крученні // – К.: Вестник НТУУ «КПІ» серія «Машиностроение», 2007, №50, – с.155-161.
5. Lemaitre J. Damage mechanics –The Bath Press, Great Bratain. – 1990, – 556p.
6. Castagne S., Habraken A., Cescotto S. Application of Damage Model to an Aluminium Alloy // International Journal of Damage Mechanics – vol 12-Januar, 2003, p.5-30.
7. Грабовський А.П. Деформування і кінетика мікропошкоджуваності конструкційних матеріалів / Грабовський А.П., Марочко А.В. – К.: Вісник НТУУ «КПІ» серія «Машинобудування», 2011, №63, – сс. 273-280.
8. Писаренко Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии / Писаренко Г.С., Лебедев А.А. – К.: Изд –во «Наукова думка», 1976, – 415 с.
9. Бобир М.І. Спосіб визначення кінетики руйнування матеріалів в процесі їх пружнопластичного деформування / Бобир М.І., Грабовський А.П., Тимошенко О.В. деклараційний патент UA65499A20031211737, Бюл.№3, 2004

REFERENCES

1. Lebedev A.A., Chausov N.G., Nedoseka S.A., Boninich I.A. Model nakopleniya povrezhdenij v metallicheskih materialah pri staticheskom nagruzenii [Model povrezhdenyuy accumulation in a metal material in statycheskom nahruzhenyy]. Kyiv: Problemy prochnosti, 1995, no.7 pp.31-37.
2. Lebedev A.O., Bobir M.I., Lamashevs'kij V.P. Mehanika materialiv dlja inzheneriv (Mechanics of Materials for Engineers.). Navchal'nij posibnik. Kyiv: NTUU «KPI», VPI VPK «Politehnika», 2006, 286 p.
3. Grabovskij A.P., Timoshenko O.V., Maslo O.M., Halimon O.P. Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, 2003, no.4, pp. 43-47.
4. Grabovskij A.P. Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, 2007, no.50. pp.155-161.
5. Lemaitre J. Damage mechanics. The Bath Press, Great Bratain. 1990, 556p.
6. Castagne S., Habraken A., Cescotto S. Application of Damage Model to an Aluminium Alloy. International Journal of Damage Mechanics . vol 12-Januar, 2003, p.5-30.
7. Grabovskij A.P., Marochko A.V. Journal of Mechanical Engineering of the National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”. Kyiv. 2011, no.63, pp. 273-280.
8. Pisarenko G.S., Lebedev A.A. Deformirovanie i prochnost materialov pri slozhnom napryazhennom sostojanii (Deformyrovanye and Strength of materials at slozhnom napryazhennom condition. Kyiv: Izd –vo «Naukova dumka», 1976, 415 p.
9. Bobir M.I., Grabovskij A.P., Timoshenko O.V. Sposib viznachennja kinetiki rujnuvannja materialiv v procesi ih pruzhnoplastichnogo deformuvannja [Method of determining the kinetics of destruction of materials in the process of elastoplastic deformation]. Deklaracijnij patent UA65499A20031211737, Bjul. no. 3, 2004