

УДК 620.192.4

А.П. Грабовський, І.І. Бабієнко

(НТУУ «КПІ», м. Київ, Україна)

Тел./Факс +38(044) 4549102; E-mail: mmi_2@ukr.net

МІЦНІСТНИЙ АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З УРАХУВАННЯМ ПОШКОДЖУВАНOSTІ ПРИ ПРУЖНОПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ

В даний час велика увага приділяється обґрунтуванню ресурсу роботи устаткування і систем інженерних об'єктів на стадії їх проектування, оцінці виробленого і прогнозу залишкового ресурсу конструктивних вузлів у процесі експлуатації об'єктів, продовження терміну служби після відпрацювання мотивованого терміну.

Тензор накопичення пошкоджень розглянуто в процесі зміни обсягу виділеного одиничного елемента під дією пружнопластичних навантажень. Інтенсивність накопичення пошкоджень при пропорційному навантаженні були зіставлені з експериментальними даними, отриманими для Сталі 45, 12X18H10T і 07X16H6 сталей. Закономірності кінетики інтенсивності накопичення пошкоджень були отримані методом зміни електричного опору. Представлений метод передбачення ресурсу для структурних елементів матеріалів при складному напруженому стані з пошкодженнями.

Ключові слова: пошкодження тензора, інтенсивність пошкоджуваності, пружно-пластичні деформації, зміни форми, зміна обсягу.

Однією з основних задач сучасного машинобудування являється 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 пошкоджуваність 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 напружуванні (модуль пружності E та G , електропровідність, магнітної проникності, щільності [1-6] та інших показників).

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, хімічні та фізичні флуктуації і т.п. При пружнопластичному деформуванні розпушення матеріалу, в залежності від напрямку дії напружень, призводить до додаткової зміни об'єму і форми виділеного одинарного елемента (ВОЕ) конструкційного матеріалу, що характеризує кінетику накопичення пошкоджень в ньому – D .

Осьова деформація БОЕ – ε може бути представлена сумою деформацій в пружній зоні – ε_{np} , деформацією в пластичній зоні – ε_{nl} і додатковою деформацією від пошкоджуваності – ε_D , як складовою розпушення матеріалу

$$\varepsilon = \varepsilon_{np} + \varepsilon_{nl} + \varepsilon_D.$$

Зсувні деформації БОЕ – γ також представляються трьома складовими – деформація зсуву в пружній зоні – γ_{np} , деформацією зсуву в пластичній зоні – γ_{nl} і додатковою деформацією зсуву від пошкоджуваності – γ_D

$$\gamma = \gamma_{np} + \gamma_{nl} + \gamma_D.$$

В роботі розглядаються складові ε_D і γ_D , які мають три лінійних складових деформацій БОЕ – $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ і шість кутових (зсувних) складових деформацій БОЕ – $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}, \gamma_{yx}, \gamma_{zy}, \gamma_{xz}$ в декартовій системі координат для складного напруженого стану.

На рис.1 представлені напруження на гранях довільно виділеного елементарного паралелепіпеда конструкційного матеріалу (БОЕ) – а, які викликають в ньому додаткову зміну об'єму (складові $\Delta V_{xx}, \Delta V_{yy}, \Delta V_{zz}$) та додаткову зміну форми (складові $\Delta V_{xy}, \Delta V_{xz}, \Delta V_{yx}, \Delta V_{yz}, \Delta V_{zx}, \Delta V_{zy}$) – б, 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 – в.

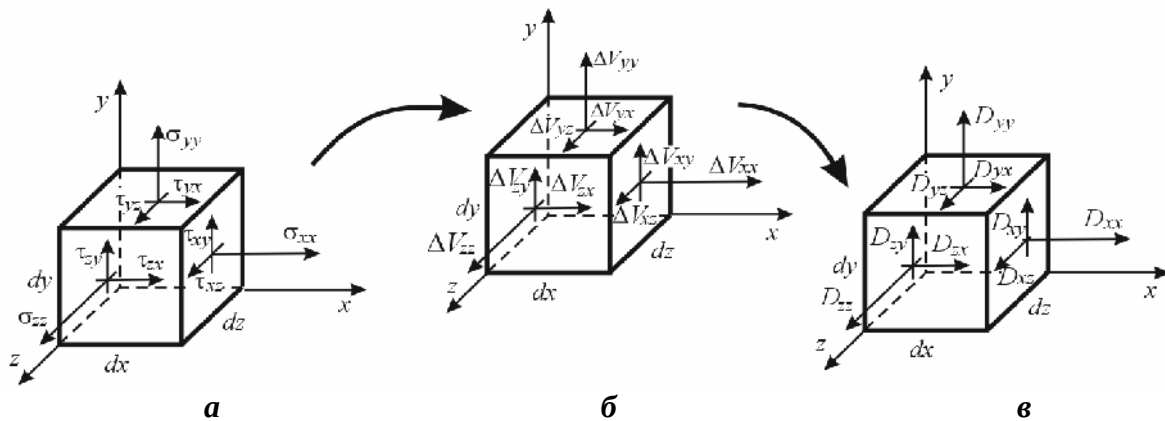


Рис. 1. Компоненти напружень – а, зміни об'єму і форми – б та пошкоджуваності – в, БОЕ конструкційного матеріалу при пружнопластичному деформуванні

Згідно робіт [6, 7] залежність загальної пошкоджуваності, що викликає додаткову зміну форми і об'єму БОЕ – D від величини об'ємної деформації – ε_V виражається відношенням:

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

де V_0 – початковий об'єм БОЕ конструкційного матеріалу до пружнопластичного деформування;

$V_i = V_0 + \Delta V_i$ - поточний об'єм БОЕ 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 БОЕ.

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

в напрямку осі – x :

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

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

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

ε_{xx} - відносна величина додаткової зміни об'єму БОЕ від пошкоджуваності в напрямку осі – x ;

в напрямку осі – y

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

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

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

ε_{yy} - відносна величина додаткової зміни об'єму БОЕ від пошкоджуваності в напрямку осі – y ;

в напрямку осі – z

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

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

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

ε_{zz} - Відносна величина додаткової зміни об'єму БОЕ 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 xy - yx , yz - zy , zx - xz виражається відношеннями:

на гранях в напрямках осей xy - yx :

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

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

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

$\frac{1}{2} \gamma_{xy} - \frac{1}{2} \gamma_{yx}$ - відносні величини додаткової зміни форми БОЕ від пошкоджуваності відповідних площадок в напрямках xy - yx ;

на гранях в напрямках осей yx - yz :

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

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

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

$\frac{1}{2} \gamma_{zy} - \frac{1}{2} \gamma_{yz}$ - відносні величини додаткової зміни форми БОЕ від пошкоджуваності відповідних площадок в напрямках yz - zy .

на гранях в напрямках осей zx - xz :

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

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

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

$\frac{1}{2}\gamma_{zx} - \frac{1}{2}\gamma_{xz}$ - відносні величини додаткової зміни форми ВОЕ від пошкоджуваності відповідних площадок в напрямках xz - zx .

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

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

Інтенсивність пошкоджуваності - D_i через інтенсивність відносних деформацій - ε_i при довільному напрямі координатних осей відповідно дорівнює:

$$D_i = 1 - \frac{V_0}{V_{ii}} = 1 - \frac{V_{0i}}{V_{0i} + \Delta V_{ii}} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_i} = \frac{\varepsilon_i}{1 + \varepsilon_i}; \quad (9)$$

де V_{ii} - поточна інтенсивність додаткової зміни об'єму і форми ВОЕ зразка конструкційного матеріалу при пружнопластичному деформуванні.

ΔV_{ii} - приріст інтенсивності додаткової зміни об'єму і форми ВОЕ при пружнопластичному деформуванні.

Згідно [8] інтенсивність деформацій - ε_i та інтенсивність пошкодження (9) через величину інтенсивності деформацій при довільному напрямі координатних осей виразиться відношенням:

$$D_i = \frac{\sqrt{2} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}\gamma_{yx} + \gamma_{yz}\gamma_{zy} + \gamma_{zx}\gamma_{xz})}}{3 + \sqrt{2} \sqrt{((\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}\gamma_{yx} + \gamma_{yz}\gamma_{zy} + \gamma_{zx}\gamma_{xz}))}}; \quad (10)$$

При пропорційному деформуванні (осьове навантаження по осі x - кручення в площині осей y - z) з використанням закону парності дотичних напружень при зсуві інтенсивності пошкоджуваності - D_i з виразу (10) виражається відношенням:

$$D_i = \frac{2\sqrt{3\varepsilon_{xx}^2 + \gamma_{yz}^2}}{\sqrt{3} \cdot 3 + 2\sqrt{3\varepsilon_{xx}^2 + \gamma_{yz}^2}}. \quad (11)$$

На рис. 2. - 4 приведені криві кінетики накопичення інтенсивності пошкоджень при пропорційному деформуванні для зразків сталі 12X18H10T (рис.2) зразків сталі 07X16H6 (рис.3) та Сталі 45 (рис.4), які побудовані в координатах залежності інтенсивності пошкоджень - D_i від інтенсивності деформацій - ε_i . Криві 1,2 рис 2 крива 2 рис. 3, та крива 1 рис.4 побудовані згідно розрахунків за формулою (11), де показники осьової деформації - ε_{xx} і кутових деформацій зсуву γ_{yz} - отримані із експериментальних результатів пропорційного деформування відповідних зразків.

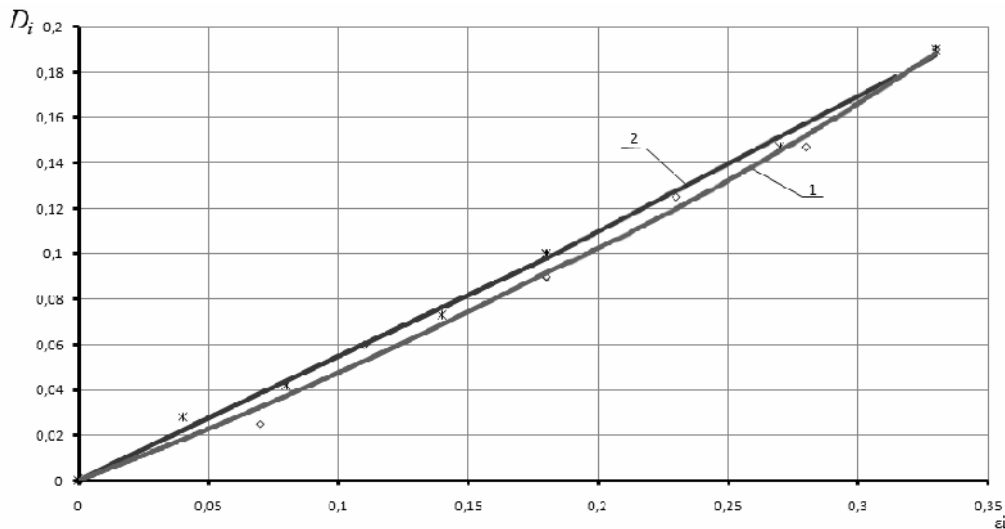


Рис. 2. Інтенсивність накопичення пошкоджень в зразках сталі 12X18N10T від величини інтенсивності деформацій при пропорційному деформуванні

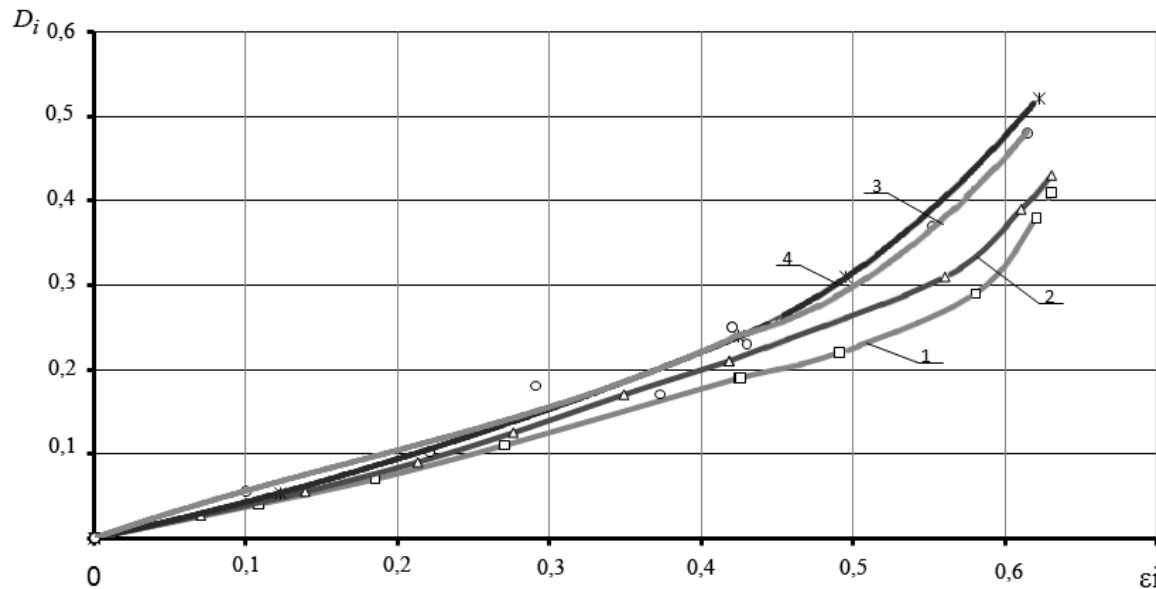


Рис. 3. Інтенсивність накопичення пошкоджень в зразках сталі 07X16N6 від величини інтенсивності деформацій при пропорційному деформуванні

Криві 3, 4 рис. 2 та крива 1 рис.3 характеризують кінетику накопичення пошкоджень в зразках отримані 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.

Аналізуючи криві рис.2, рис.3 та рис.4 можна зробити висновок, що за формою і величиною показників залежності $D_i = f(\varepsilon_i)$ близькі між собою.

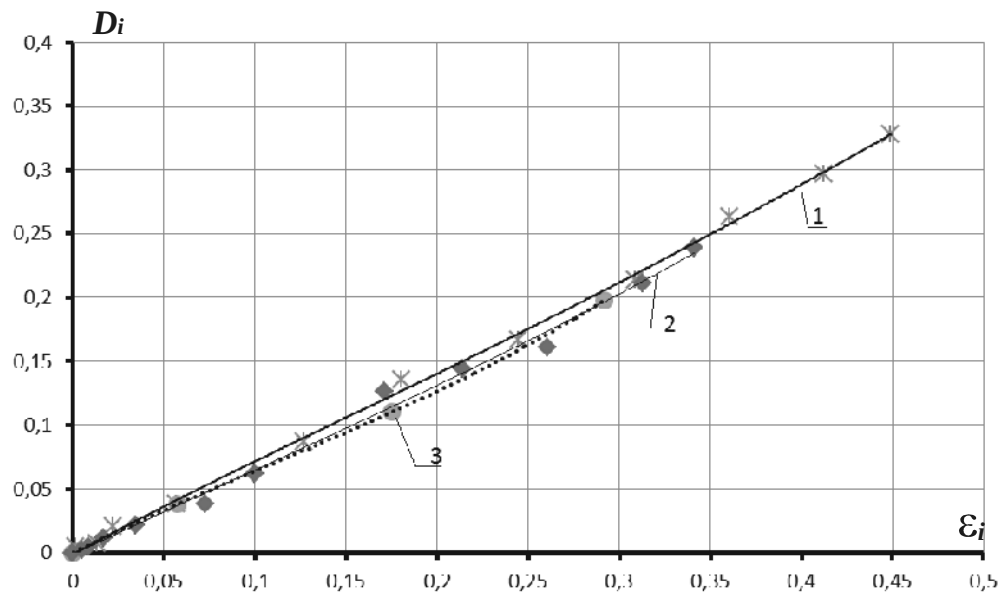


Рис. 4. Інтенсивність накопичення пошкоджень в зразках сталі 45 від величини інтенсивності деформацій при пропорційному деформуванні

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, 07X16H6 та сталі 45 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.

Список літератури:

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. Lemaître 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 мікропошкожуваності 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.

Надійшла до редколегії 15.05.2012 р.

A. Grabowski, I. Babienko
STRENGTH ANALYSIS CONSTRUCTION
MATERIALS WITH REGARD TO THE
DAMAGEABILITY ELASTOPLASTIC
DEFORMATION

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.

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.

Scattered damage accumulation under proportional loading were compared with the experimental data obtained for steels 45, 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.

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.

А.П. Грабовский, И.И. Бабиенко
ПРОЧНОСТНОЙ АНАЛИЗ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С
УЧЕТОМ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ПРИ
УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ
ДЕФОРМИРОВАНИИ

В настоящее время большое внимание уделяется обоснованию ресурса работы оборудования и систем инженерных объектов на стадии их проектирования, оценке произведенного и прогнозу остаточного ресурса конструктивных узлов в процессе эксплуатации объектов, продлению срока службы после отработки мотивированного срока.

Тензор накопления повреждений рассмотрен в процессе изменения объема выделенного единичного элемента под действием упругопластических нагрузок. Интенсивность накопления повреждений при пропорциональной нагрузке были сопоставлены с экспериментальными данными, полученными для Сталей 45, 12Х18Н10Т и 07Х16Н6 сталей. Закономерности кинетики рассеянного накопления повреждений были получены методом изменения электрического сопротивления. Представлен метод предсказания ресурса для структурных элементов материалов при сложном напряженном состоянии с повреждением.

Ключевые слова: повреждение тензора, интенсивность повреждаемости, упругопластические деформации, изменения формы, изменение объема.