

ДЕФОРМУВАННЯ І КІНЕТИКА МІКРОПОШКОДЖУВАНOSTI КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

В работе получен тензор параметра эффективных площадей в трехмерном пространстве. Получен тензор эффективных напряжений при пропорциональном деформировании как частный случай тензора эффективных напряжений. Рассмотрена кинетика накопления поврежденности в образцах стали 07X16H6 при пропорциональном деформировании в сравнении тензора эффективных напряжений с экспериментальными результатами, полученными при измерении изменения электрического удельного сопротивления рабочей зоны деформируемого образца, и при вычислении интенсивности напряжений без учета поврежденности при осевом нагружении и сдвиге.

In this article the tensor of the effective areas parameter in three-dimensional space is obtained. It is also obtained the effective stresses tensor at proportional deforming as the particular case of effective stresses tensor. It is considered the damage accumulation kinetics in the 07X16H6 steel specimens at the proportional deforming using the comparison of the effective stresses tensor and experimental results, which are obtained by the change of specific electrical resistance of the specimens work zone, and calculating stresses intensity without damage parameters at tension and torsion.

Ціль роботи.

Запропонувати тензор пошкоджуваності для загального випадку складного напруженого стану. На базі нього отримати тензор ефективних напружень для складного напруженого стану. На базі експериментальних досліджень зразків сталі 07X16H6 при пропорційному деформуванні провести порівняння значень інтенсивностей ефективних напружень, розрахованих через запропонований тензор пошкоджуваності та з врахуванням значення пошкоджуваності за зміною питомого електричного опору.

Проблема дослідження.

При дослідженні механіки руйнування конструкційних матеріалів, таких як метали та сплави, полімери та композити, кераміка та бетон, можна відмітити, що матеріали, які мають різну фізичну структуру якісно схожі у механічній поведінці деформування та руйнування, яке здійснюється шляхом відриву та різіу. При деформуванні матеріалів в умовах постійного (або близького до нього) навантаження закономірною послідовністю для них є виникнення і розвиток деформаційних мікро- та макродефектів, які в подальшому перетворюються в мікропорожнини та мікротріщини. Інтенсивний розвиток мікропошкоджень призводить, в кінцевому результаті, до утворення магістральної тріщини, і стає причиною руйнування деталі чи конструкції. В механічному трактуванні накопичення пошкоджень при пружнопластичному деформуванні супроводжується зменшенням величин порогових напружень, модулів пружності матеріалу E та G , зміною коефіцієнта поперечної деформації, зменшенням щільності в результаті розпушення матеріалу, зміною електропровідності і магнітопроникності μ , в подальшому, приводить до зменшення ресурсу роботи елементів і вузлів конструкцій [1-5].

Основний матеріал.

Зміна об'єму і форми виділеного одиничного елемента (ВОЕ) матеріалу робочої зони зразка, який характеризує кінетику його пошкоджуваності в процесі термосилового навантаження – D_V (рис. 1) дорівнює:

$$D_V = \frac{V_i - V_0}{V_i} = 1 - \frac{V_0}{V_i}; \quad (1)$$

де V_0 та V_i - відповідно, початкова та поточна величини ВОЕ, який підлягає термосиловому навантаженню.

Поточна величина зміни об'єму ВОЕ, при навантаженні, дорівнює:

$$V_i = V_0 + \Delta V_V; \quad (2)$$

де ΔV_V - приріст об'єму ВОЕ за рахунок розпушення, викликаного кінетикою накопичення пошкоджень при термосиловому навантаженні.

Розв'язавши рівняння (1), (2) відносно ΔV_V , маємо:

$$\Delta V_V = V_0 \frac{D_V}{1 - D_V}; \quad (3)$$

Розглянемо кінетику накопичення пошкоджень при осьовому навантаженні, зсуві та об'ємному напруженому стані:

1. Осьове навантаження

Пошкоджуваність ВОЕ при осьовому навантаженні - D_σ дорівнює:

$$D_\sigma = \frac{V_i - V_0}{V_i} = 1 - \frac{V_0}{V_i}; \quad (4)$$

де V_i - поточний об'єм ВОЕ при осьовому термосиловому навантаженні.

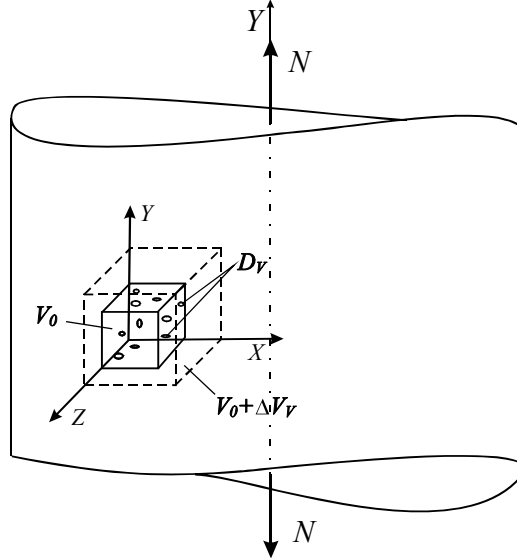


Рис. 1. Принципова схема кінетики накопичення пошкоджень ВОЕ при пружнопластичному складному термосиловому навантаженні

Поточна величина зміни об'єму ВОЕ при осьовому навантаженні, дорівнює:

$$V_i = V_0 + \Delta V_i; \quad (5)$$

де ΔV_i - зміна об'єму ВОЕ за рахунок розпушення, викликаного кінетикою накопичення пошкоджень при осьовому термосиловому деформуванні.

Розглянувши рівняння (4), (5) відносно ΔV_i , маємо:

$$\Delta V_i = V_0 \frac{D_i}{1 - D_i}; \quad (6)$$

2. Зсув

Пошкоджуваність ВОЕ при пружнопластичному зсуві - D_{ij} на площадці з нормаллю i в напрямку j , дорівнює:

$$D_{ij} = \frac{V_{ij} - V_0}{V_{ij}} = 1 - \frac{V_0}{V_{ij}}; \quad (7)$$

де V_{ij} - поточний об'єм ВОЕ при термосиловому зсуві на площадці з нормаллю i в напрямку j .

Поточна величина зміни об'єму ВОЕ при термосиловому зсуві, дорівнює:

$$V_{ij} = V_0 + \Delta V_{ij}; \quad (8)$$

де ΔV_{ij} - відповідно приріст об'єму ВОЕ за рахунок розпушення, викликаного кінетикою накопичення пошкоджень при термосиловому зсуві.

Розв'язавши рівняння (7), (8) відносно ΔV_{ij} , маємо:

$$\Delta V_{ij} = V_0 \frac{D_{ij}}{1 - D_{ij}}; \quad (9)$$

3. Об'ємний напружений стан

В загальному випадку термосилового навантаження конструкційних матеріалів при довільній орієнтації ВОЕ в межах точки навантаженого тіла (рис. 2.) на його гранях діють три незалежні компоненти тензора зміни об'єму, із-

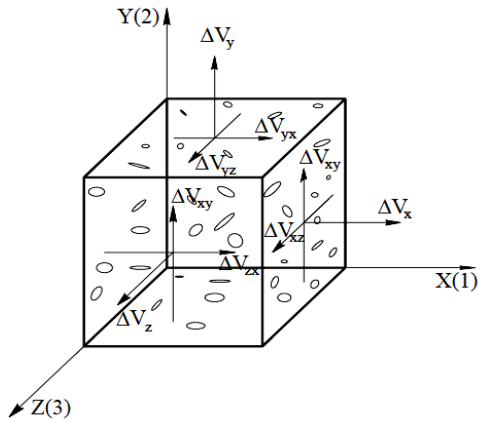


Рис. 2. Пошкоджуваність на гранях елементарного паралелепіпеда ВОЕ

за кінетики накопичення пошкоджень ΔV_x , ΔV_y , ΔV_z та шість компонент зміни форми ΔV_{xy} , ΔV_{xz} , ΔV_{yx} , ΔV_{yz} , ΔV_{zx} , ΔV_{zy} , які діють на площадках перпендикулярних осям координат x , y , z .

Отримані дев'ять компонент зміни об'єму повністю визначають рівень пошкоджуваності ВОЕ і утворюють тензор зміни об'єму із-за кінетики накопичення пошкоджень при пружнопластичному навантаженні, який можна представити в такому вигляді:

$$T(\Delta V_V) = \begin{vmatrix} \Delta V_x & \Delta V_{xy} & \Delta V_{xz} \\ \Delta V_{yx} & \Delta V_y & \Delta V_{yz} \\ \Delta V_{zx} & \Delta V_{zy} & \Delta V_z \end{vmatrix}; \quad (10)$$

В загальному випадку просторової зміни об'єму із-за розпушення ВОЕ при термосиловому навантаженні по всім трьом взаємно перпендикулярним площадкам, які проходять через точку, зміна об'єму, в якій досліджується зв'язок між складовими головних напрямків змін об'єму ВОЕ і зміною об'єму ВОЕ на будь-якій похилій площадці, що проходить через дану точку, описується слідуочим кубічним рівнянням:

$$\Delta V_V^3 - I_1 \Delta V_V^2 + I_2 \Delta V_V - I_3 = 0; \quad (11)$$

Коефіцієнти рівняння (11) I_1 , I_2 , I_3 , не залежать від вибору координатної системи, інакше кажучи, вони являються інваріантами тензора зміни об'єму і форми, викликаного кінетикою накопичення пошкоджень по відношенню до координатних осей.

Перший (або лінійний) інваріант представляє собою суму компонентів тензора зміни об'єму ВОЕ розташованих на головній діагоналі рівняння (10) і дорівнює:

$$I_1 = \Delta V_x + \Delta V_y + \Delta V_z; \quad (12)$$

Другий інваріант можна отримати, розклавши по головній діагоналі квадратичну матрицю тензора зміни об'єму і форми ВОЕ і представити її у вигляді суми мінорів

$$I_2 = \begin{vmatrix} \Delta V_x & \Delta V_{xy} \\ \Delta V_{yx} & \Delta V_y \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta V_x & \Delta V_{xz} \\ \Delta V_{zx} & \Delta V_z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta V_y & \Delta V_{yz} \\ \Delta V_{zy} & \Delta V_z \end{vmatrix}; \quad (13)$$

Третій інваріант розглядається як розвернутий в строчку визначник, складений із компонентів тензора зміни об'єму ВОЕ (10)

$$I_3 = \begin{vmatrix} \Delta V_x & \Delta V_{xy} & \Delta V_{xz} \\ \Delta V_{yx} & \Delta V_y & \Delta V_{yz} \\ \Delta V_{zx} & \Delta V_{zy} & \Delta V_z \end{vmatrix}; \quad (14)$$

Враховуючи те, що зміна об'єму ВОЕ, яка викликана кінетикою накопичення пошкоджень осьовою складовою описується відношеннями (6), то величини нормальних об'ємних деформацій тензора зміни об'єму при деформуванні паралелепіпеда ВОЕ, відповідно дорівнюють:

$$\Delta V_x = V_0 \frac{D_x}{1 - D_x}; \quad \Delta V_y = V_0 \frac{D_y}{1 - D_y}; \quad \Delta V_z = V_0 \frac{D_z}{1 - D_z}; \quad (15)$$

Величини об'ємних деформацій обумовлені зміною форми ВОЕ в точці, при пружнопластичному навантаженні, які діють на гранях паралелепіпеда перпендикулярно до напрямів декартових осей x , y , z будуть, відповідно, для грані перпендикулярній до осі x – ΔV_{xy} , ΔV_{xz} ; для грані перпендикулярній до осі y – ΔV_{yx} , ΔV_{yz} ; для грані перпендикулярній до осі z – ΔV_{zx} , ΔV_{zy} (див. Рис. 2). З урахуванням співвідношення (9) деформації зміни форми через відповідні параметри пошкоджуваності будуть дорівнювати:

$$\Delta V_{xy} = V_0 \frac{D_{xy}}{1 - D_{xy}}; \quad \Delta V_{xz} = V_0 \frac{D_{xz}}{1 - D_{xz}};$$

$$\Delta V_{yx} = V_0 \frac{D_{yx}}{1 - D_{yx}}; \quad \Delta V_{yz} = V_0 \frac{D_{yz}}{1 - D_{yz}}; \quad (16)$$

$$\Delta V_{zx} = V_0 \frac{D_{zx}}{1 - D_{zx}}; \quad \Delta V_{zy} = V_0 \frac{D_{zy}}{1 - D_{zy}}.$$

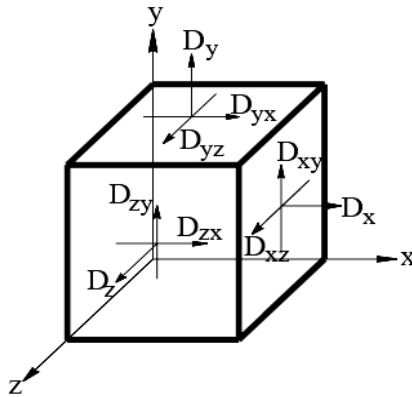


Рис. 3. Пошкоджуваність на гранях ВОЕ

Враховуючи співвідношення (3), (15), (16) тензор зміни об'єму і форми ВОЕ при пружнопластичному деформуванні (10), через відповідні складові пошкоджуваностей об'єму і форми, матиме вигляд:

$$\frac{D_V}{1 - D_V} = \begin{pmatrix} \frac{D_x}{1 - D_x} & \frac{D_{xy}}{1 - D_{xy}} & \frac{D_{xz}}{1 - D_{xz}} \\ \frac{D_{yx}}{1 - D_{yx}} & \frac{D_y}{1 - D_y} & \frac{D_{yz}}{1 - D_{yz}} \\ \frac{D_{zx}}{1 - D_{zx}} & \frac{D_{zy}}{1 - D_{zy}} & \frac{D_z}{1 - D_z} \end{pmatrix}; \quad (17)$$

На Рис. 3. приведений загальний випадок пошкодженого стану ВОЕ в точці при пружнопластичному навантаженні.

З іншої сторони зміни об'єму ВОЕ через величини відносних деформацій, що викликані пошкоджуваністю при пружнопластичному навантаженні в напрямках осей x, y, z виражаться відношеннями:

а) в напрямку осі x (Рис. 4.а):

$$\begin{aligned} D_x &= 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_x} = \{\Delta V_x = \Delta l_x \cdot dydz\} = \\ &= 1 - \frac{dx dy dz}{dx dy dz + \Delta l_x \cdot dy dz} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_x} \end{aligned}; \quad (18)$$

де $\varepsilon_x = \frac{\Delta l_x}{dx}$.

Із відношення (18) відносна деформація ε_x через параметр пошкоджуваності в напрямку осі x – D_x запишеться рівнянням:

$$\varepsilon_x = \frac{D_x}{1 - D_x}; \quad (19)$$

б) в напрямку осі y (Рис. 4.б):

$$\begin{aligned} D_y &= 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_y} = \{\Delta V_y = \Delta l_y \cdot dydz\} = \\ &= 1 - \frac{dx dy dz}{dx dy dz + \Delta l_y \cdot dy dz} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_y} \end{aligned}; \quad (20)$$

де $\varepsilon_y = \frac{\Delta l_y}{dy}$.

Із відношення (20) відносна деформація ε_y через параметр пошкоджуваності в напрямку осі y – D_y запишеться рівнянням:

$$\varepsilon_y = \frac{D_y}{1 - D_y}; \quad (21)$$

в) в напрямку осі z (Рис. 4.в):

$$\begin{aligned} D_z &= 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_z} = \{\Delta V_z = \Delta l_z \cdot dydz\} = \\ &= 1 - \frac{dx dy dz}{dx dy dz + \Delta l_z \cdot dy dz} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_z} \end{aligned}; \quad (22)$$

де $\varepsilon_z = \frac{\Delta l_z}{dz}$.

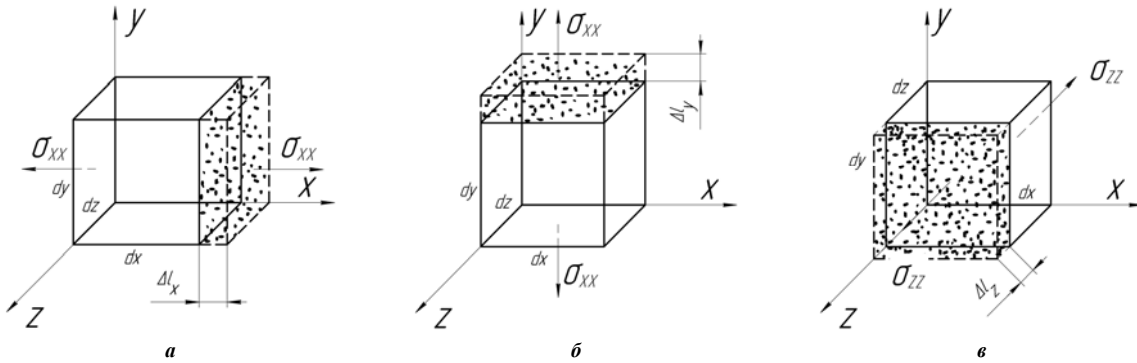


Рис. 4. Компоненти осьових деформацій в напрямках осі x (а), осі y (б) та осі z (в)

Із відношення (22) відносна деформація ε_z через параметр пошкоджуваності в напрямку осі z – D_z запишеться рівнянням:

$$\varepsilon_z = \frac{D_z}{1 - D_z}; \quad (23)$$

г) в площині y-x (Рис. 5.а):

$$\begin{aligned} D_{yx} &= 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_{yx}} = \left\{ \Delta V_{yx} = \frac{1}{2} \Delta l_{yx} \cdot dx dz \right\} = \\ &= 1 - \frac{dx dy dz}{dx dy dz + \frac{1}{2} \Delta l_{yx} \cdot dx dz} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \gamma_{yx}}; \end{aligned} \quad (24)$$

Так як грані ВОЕ рівні між собою $dx=dy=dz$ ($dx=dy$), то $\frac{1}{2} \gamma_{yx} = \frac{1}{2} \frac{\Delta l_{yx}}{dx} = \frac{1}{2} \frac{\Delta l_{yx}}{dy}$.

Із відношення (24) відносна деформація зсуву в площині x-y:

$$\frac{1}{2} \gamma_{xy} = \frac{D_{xy}}{1 - D_{xy}}; \quad (25)$$

д) в площині x-z (Рис. 5.б):

$$\begin{aligned} D_{xz} &= 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_{xz}} = \left\{ \Delta V_{xz} = \frac{1}{2} \Delta l_{xz} \cdot dx dy \right\} = \\ &= 1 - \frac{dx dy dz}{dx dy dz + \frac{1}{2} \Delta l_{xz} \cdot dx dy} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \gamma_{xz}}; \end{aligned} \quad (26)$$

Так як грані ВОЕ рівні між собою $dx=dy=dz$ ($dz=dx$), то $\frac{1}{2} \gamma_{xz} = \frac{1}{2} \frac{\Delta l_{xz}}{dz} = \frac{1}{2} \frac{\Delta l_{xz}}{dx}$.

Із відношення (26) відносна деформація зсуву в площині x-z:

$$\frac{1}{2} \gamma_{xz} = \frac{D_{xz}}{1 - D_{xz}}; \quad (27)$$

е) в площині z-y (Рис. 5.в):

$$\begin{aligned} D_{zy} &= 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_{zy}} = \left\{ \Delta V_{zy} = \frac{1}{2} \Delta l_{zy} \cdot dx dz \right\} = \\ &= 1 - \frac{dx dy dz}{dx dy dz + \frac{1}{2} \Delta l_{zy} \cdot dx dz} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \gamma_{zy}}; \end{aligned} \quad (28)$$

Так як грані ВОЕ рівні між собою $dx=dy=dz$ ($dz=dx$), то $\frac{1}{2}\gamma_{zy} = \frac{1}{2} \frac{\Delta l_{zy}}{dy} = \frac{1}{2} \frac{\Delta l_{zy}}{dz}$.

Із відношення (28) відносна деформація зсуву в площині x-z:

$$\frac{1}{2}\gamma_{zy} = \frac{D_{zy}}{1-D_{zy}}; \quad (29)$$

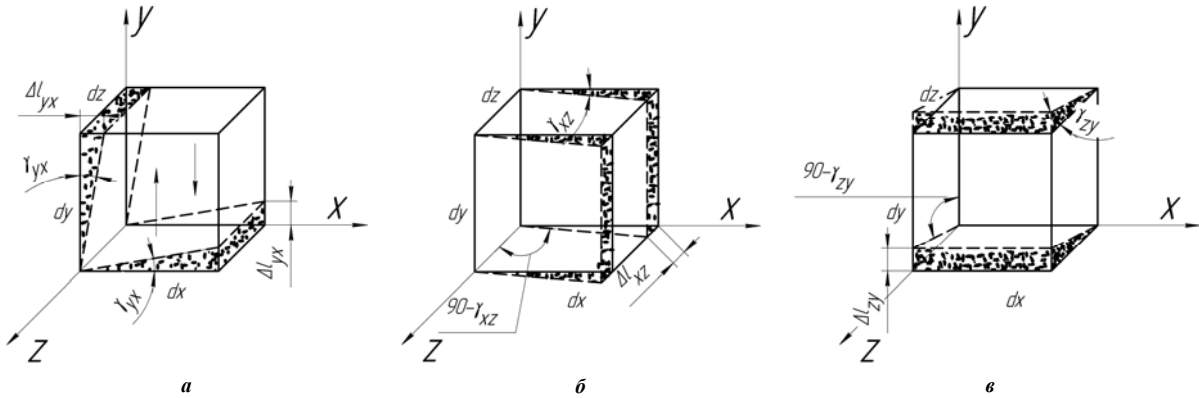


Рис. 5. Компоненти зсувних деформацій в площині y-x (а), площині x-z (б) та площині z-y (в)

Кути зсуву, які проєктуються на площину xy, позначимо γ_{xy} (або γ_{yx}) на площину yz – γ_{yz} (або γ_{zy}) та на площину zx – γ_{zx} (або γ_{xz}). Отримаємо, що при малих кутах зсуву, які реалізуються від пошкоджуваності при пружнопластичному деформуванні, об'єм ВОЕ не змінюється і ребра ВОЕ не змінюють своєї довжини. Якщо прийняти, що всі грані ВОЕ дорівнюють одиниці, то приріст об'єму викликаний пошкоджуваністю дорівнює:

$$\varepsilon_V = (1 + \varepsilon_x)(1 + \varepsilon_y)(1 + \varepsilon_z) - 1 = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z; \quad (30)$$

Тобто відносна зміна об'єму яка викликана пошкоджуваністю в точці, дорівнює сумі відносних видовжень по трьох взаємоперпендикулярних напрямках. Якщо прийняти:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{3}(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z); \quad (31)$$

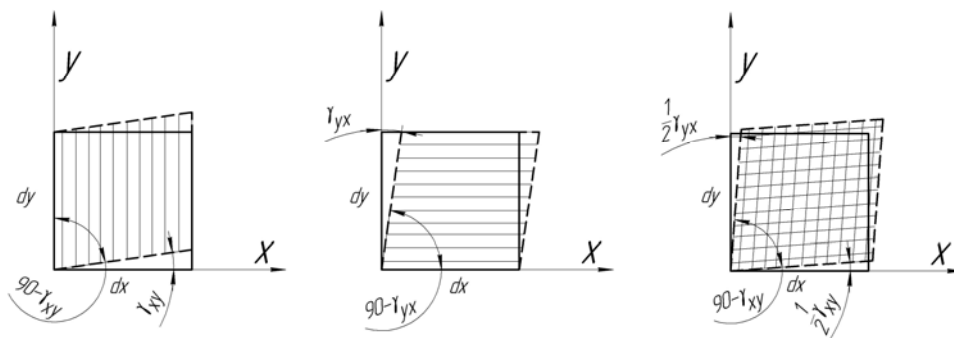


Рис. 6. Еквівалентні зсуви

Тоді вираз (30) буде мати вигляд:

$$\varepsilon_V = 3\varepsilon_0; \quad (32)$$

Один і той же зсув, тобто однакове викривлення граней ВОЕ, яке викликане пошкоджуваністю можна представити різними методами. Три можливих уявлення представлено на Рис. 6, із аналізу якого в площині xy випливає, що:

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx}; \quad (33)$$

Для інших площин yz і zx по аналогії з Рис. 5. можна отримати:

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy}; \quad \gamma_{zx} = \gamma_{xz}; \quad (34)$$

Отже тензор відношення пошкоджень до параметра ефективної площі відповідає тензору відносних деформацій у відповідних напрямках, тобто:

$$\begin{bmatrix} \frac{D_x}{1-D_x} & \frac{D_{xy}}{1-D_{xy}} & \frac{D_{xz}}{1-D_{xz}} \\ \frac{D_{yx}}{1-D_{yx}} & \frac{D_y}{1-D_y} & \frac{D_{yz}}{1-D_{yz}} \\ \frac{D_{zx}}{1-D_{zx}} & \frac{D_{zy}}{1-D_{zy}} & \frac{D_z}{1-D_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \frac{1}{2}\gamma_{zx} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{zy} \\ \frac{1}{2}\gamma_{xz} & \frac{1}{2}\gamma_{yz} & \varepsilon_z \end{bmatrix}; \quad (35)$$

Для отримання тензора параметра ефективних площ ВОЕ додаємо в ліву та праву частини рівняння (35) одиничну матрицю:

$$\begin{bmatrix} \frac{D_x}{1-D_x} \\ \frac{D_{yx}}{1-D_{yx}} \\ \frac{D_{zx}}{1-D_{zx}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{D_x}{1-D_x} + 1 & \frac{D_{xy}}{1-D_{xy}} + 1 & \frac{D_{xz}}{1-D_{xz}} + 1 \\ \frac{D_{yx}}{1-D_{yx}} + 1 & \frac{D_y}{1-D_y} + 1 & \frac{D_{yz}}{1-D_{yz}} + 1 \\ \frac{D_{zx}}{1-D_{zx}} + 1 & \frac{D_{zy}}{1-D_{zy}} + 1 & \frac{D_z}{1-D_z} + 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x + 1 & \frac{1}{2}\gamma_{yx} + 1 & \frac{1}{2}\gamma_{zx} + 1 \\ \frac{1}{2}\gamma_{xy} + 1 & \varepsilon_y + 1 & \frac{1}{2}\gamma_{zy} + 1 \\ \frac{1}{2}\gamma_{xz} + 1 & \frac{1}{2}\gamma_{yz} + 1 & \varepsilon_z + 1 \end{bmatrix}; \quad (36)$$

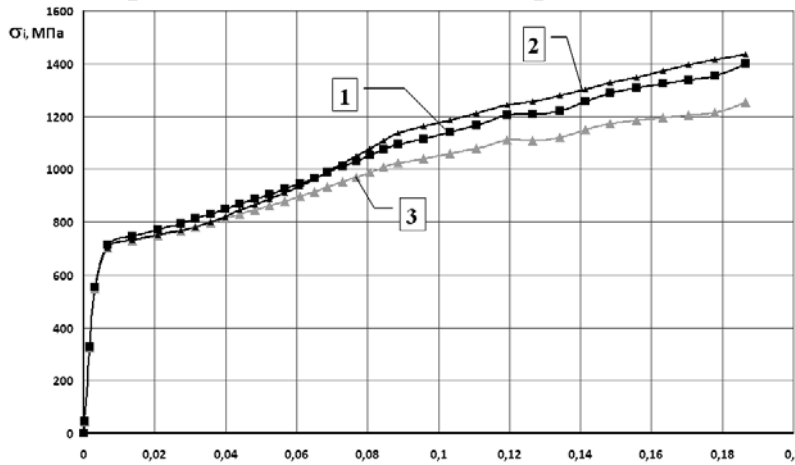


Рис. 7. Залежність інтенсивності напружень від величини інтенсивності деформацій при пропорційному деформуванні для зразків сталі 07X16H6

Після перетворення тензор параметра ефективних площ ВОЕ дорівнює:

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{1-D_x} \\ \frac{1}{1-D_{yx}} \\ \frac{1}{1-D_{zx}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-D_x} & \frac{1}{1-D_{xy}} & \frac{1}{1-D_{xz}} \\ \frac{1}{1-D_{yx}} & \frac{1}{1-D_y} & \frac{1}{1-D_{yz}} \\ \frac{1}{1-D_{zx}} & \frac{1}{1-D_{zy}} & \frac{1}{1-D_z} \end{bmatrix}; \quad (37)$$

або $T\left(\frac{1}{1-D_V}\right) = T\left(\frac{1}{1-D_{ij}}\right)$

Тензор ефективних напружень дорівнює:

$$(\tilde{\sigma}) = T_{\sigma} T\left(\frac{1}{1-D_V}\right) = T_{\sigma_{ij}} T\left(\frac{1}{1-D_{ij}}\right) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{1-D_x} & \frac{1}{1-D_{xy}} & \frac{1}{1-D_{xz}} \\ \frac{1}{1-D_{yx}} & \frac{1}{1-D_y} & \frac{1}{1-D_{yz}} \\ \frac{1}{1-D_{zx}} & \frac{1}{1-D_{zy}} & \frac{1}{1-D_z} \end{bmatrix}; \quad (38)$$

Використовуючи рівняння (38) тензор ефективних напружень при пропорційному деформуванні дорівнює:

$$(\tilde{\sigma}) = \begin{bmatrix} \frac{\tau_{xy}}{1-D_{yx}} & \tau_{xy} & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \frac{\tau_{yx}}{1-D_{xy}} & \tau_{yx} \\ \sigma_z & \sigma_z & \frac{\sigma_z}{1-D_z} \end{bmatrix}; \quad (39)$$

На Рис. 7. приведені порівняльні залежності інтенсивності напружень від величини інтенсивності деформації при пропорційному деформуванні зразків сталі 07X16H6. Крива 1 характеризує інтенсивність ефективних напружень, яка розрахована для сталі через компоненти тензора ефективних напружень (39). Крива 2 характеризує експериментальну величину інтенсивності напружень з урахуванням пошкоджуваності, яка отримана через зміну питомого електричного опору при пружнопластичному деформуванні зразків сталі 07X16H6 згідно формули

$$D = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_i},$$

де ρ_0 - початкове значення питомого електричного опору, а ρ_i - її поточне. На кривій 3 представлені результати інтенсивності істинних напружень при пропорційному деформуванні без врахування пошкоджуваності в

осьовому напрямі і при зсуві згідно формули $\sigma_i = \sqrt{\sigma_z^2 + 3\tau_{xy}^2}$. Аналізуючи криві деформування можна відмітити, що інтенсивність ефективних напружень за експериментальними (крива 2) і розрахованими (крива 1) результатами по характеру та величині близькі між собою, тоді як істинна інтенсивність напружень (крива 3) при пропорційному деформуванні в момент руйнування відрізняється на 14,3% в сторону недовантаження, що не враховується в розрахункових схемах, і може привести до передчасного руйнування конструкцій.

Висновки:

1. В процесі пружнопластичного навантаження в конструкційних матеріалах проходять незворотні фізико-хімічні процеси, що приводять до утворення мікропошкоджень спричиняючих погіршення їх фізико-механічних властивостей.
2. Запропонований тензор пошкоджуваності конструкційного матеріалу, який включає зміну об'єму і форми виділеного одиничного елемента (ВОЕ) в тривимірному просторі при пружнопластичному навантаженні.
3. Проведене порівняння результатів експериментальних досліджень пошкоджуваності при пружнопластичному пропорційному деформуванні до руйнування для сталі 07X16H6 з розрахунковими результатами із застосуванням запропонованого тензора.
4. Показано, що розрахована кінетика пошкоджуваності при пропорційному деформуванні для сталі 07X16H6 за запропонованим тензором близька до експериментальних результатів.

Список літератури.

1. Лебедев А.О., Чаусов М.Г., Недосека С.А., Богінч І.О., Модель накопичення пошкоджень в металевих матеріалах при статичному навантаженні// Проблемы прочности, 1995, №7, с. 31-34.
2. Лебедев А.О., Бобир М.І., Ламашевський В.П., Механіка матеріалів для інженерів. Навчальний посібник, Київ, НТУУ «КПІ», ВПІ ВПК, «Політехніка», 2006, 286 с.
3. 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», серія «Машиностроение», 2003, №44, с. 43-47.
4. Грабовський А.П., Деградація фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів при пружнопластичному розтягуванні та крученні// Вестник НТУУ «КПІ», серія «Машиностроение», 2007, К., №50, с. 155-161.
5. Lemaitre J. Damage mechanics – The Bath Press, Great Britain, - 1990. – 556 p.
6. Бобир М.І., Грабовський А.П., Марочко А.В. Спосіб визначення пошкоджуваності матеріалів за значеннями залишкових деформацій. Патент на корисну модель №56619, Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25.01.2011 р.
7. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц, М., Издательство «Наука», 1988, 548 с.