

І.Л.Гайдукевич інж., А.П.Грабовський д-р техн.наук,
НТУ України „Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна

КІНЕТИКА НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ В МАТЕРІАЛІ ПРИ ОСЬОВОМУ ПРУЖНОПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ ЧЕРЕЗ ЗМІНУ ОБ'ЄМУ

Розглянуто дослідження кінетики накопичення пошкоджень в конструкційних матеріалах при осьовому пружнопластичному навантаженні розтягом до руйнування методами деградації модуля пружності E (осьове навантаження), по зміні питомого електроопору робочої зони зразка, зміні параметра відносної деформації, та по зміні об'єму робочої зони зразка в результаті розпушення матеріалу. Наведені результати експериментального пошкодження при розтязі на зразках високопластичної сталі 12Х18Н10Т и малопластичного алюмінієвого сплаву Д16Т. Запропоновано дослідження кінетики накопичення пошкоджень при пружнопластичному навантаженні через зміну об'єму, яку описано показниковою функцією.

Research of kinetics of accumulation of damages to constructional materials is considered at axial is elastic plastic weighting a stretching before destruction by methods of degradation of models of elasticity E (axial weighting) and on degradation electric-resistance of a work area of a sample. Results of experimental damage are reduced at a stretching on samples highly plastic steel 12X18H10T and not enough a plastic aluminum alloy Д16Т. It is offered kinetics of accumulation of damages at it is elastic-plastic weighting through change of volume which it is circumscribed by an exponential function.

В процесі напруцювання в матеріалі відбувається інтенсивний ріст макродефектів, які призводять до руйнування окремих елементів, і як наслідок, до втрати працездатності всієї конструкції. Розглядаючи стадії структурних змін в матеріалі потрібно зазначити, що численні технічні матеріали початково містять велику кількість несучих елементів різних розмірів, в тому числі макропори, значно перевищуючі розміри елементів структури матеріалу. Причиною початкової неоднорідності матеріалу може бути вміст виробничо-технологічних дефектів, котрі виникають при відливанні чи обробці виробу. В процесі експлуатації відбуваються незворотні зміни форми і розмірів більшості елементів конструкції. Наряду з ними в результаті деформування змінюється і структура матеріалу, виникають пошкодження на макро і мікрорівнях, крапкові і лінійні мікродефекти, які в подальшому трансформуються в тріщину.

Виникнення мікродефектів, розмір яких складає від 0,2 до 1000 мкм, призводить, перш за все, до погіршення роботоздатності і вичерпання ресурсу пластичності матеріалу. Деформуючись в результаті зовнішніх температурно-силових взаємодій, матеріал розпушується (змінюється об'єм), при цьому відбувається зародження внутрішньозернових пошкоджень, які надалі трансформуються в локальні дефекти типу тріщин [1-3]. Руйнування в цьому випадку відбувається по тілу зерен і субзерен. Більш крупні дефекти локалізуються на границях зерен і субзерен, а руйнування носить між-зерновий характер. Явище накопичення розсіяних пошкоджень можна описати силовим і деформаційним шляхами.

Явище розпушення матеріалу призводить до деградації фізико-механічних властивостей матеріалу – щільності, електропровідності, магнітних властивостей,

питомої ваги, модулів пружності при крученні і осьовому навантаженні, а також до зміни об'єму матеріалу, який характеризує кінетику його пошкоджуваності в процесі пружнопластичного навантаження - D , що експериментально оцінюється співвідношенням:

$$D = 1 - \frac{V_0}{V_i}, \quad (1)$$

де V_0 та V_i - відповідно, початкова та поточна величини об'єму робочої зони зразка матеріалу, який підлягає пружнопластичному навантаженню.

Визначення пошкоджуваності при осьовому навантаженні за допомогою зміни об'єму ΔV_σ

Розглянемо методику дослідження пошкоджуваності в конструкційних матеріалах при їх пружнопластичному деформуванні до руйнування на основі зміни об'єму робочої зони зразка, яка приводить до зміни питомого об'ємного електричного опору матеріалу, модуля пружності матеріалу, деформативних властивостей.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі визначення кінетики накопичення пошкоджень до руйнування матеріалів в процесі їх пружнопластичного деформування включено вимірювання поздовжньої і поперечної деформації зразка і як кількісну характеристику кінетики руйнування зміну його фізико – механічних властивостей.

Згідно формули (1) величину пошкоджуваності при осьовому навантаженні D_σ можна виразити залежністю:

$$D_\sigma = 1 - \frac{V_0}{V_i} = 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_\sigma} \quad (2)$$

де F_0 і F_i - величини площі перерізів зразків на початковому і поточному етапах пружнопластичного деформування до руйнування;

l_0 і l_i - відповідно, довжини робочих зон зразків на початкових і поточних етапах пружнопластичного деформування до руйнування.

V_0 – початкова величина об'єму робочої зони зразка матеріалу до навантаження;

V_i - поточна величина об'єму робочої зони зразка матеріалу при пружнопластичному деформуванні;

ΔV_σ - зміна об'єму матеріалу при пружнопластичному деформуванні

Із формули (2) величина зміни об'єму при осьовому навантаженні - ΔV_σ через величину пошкоджуваності матеріалу - D_σ , дорівнює:

$$\Delta V_\sigma = V_0 \frac{D_\sigma}{1 - D_\sigma} \quad (3)$$

Залежність величини пошкоджуваності- D_σ через початковий об'єм і його приріст при деформуванні - ΔV_σ із співвідношення (3), дорівнює:

$$D_\sigma = \frac{\Delta V_\sigma}{V_0 + \Delta V_\sigma} \quad (4)$$

Визначення пошкоджуваності при осьовому навантаженні за допомогою зміни модуля пружності E і параметра поточної деформації ε_i

Враховуючи закон Гука [4] при осьовому навантаженні $F = \frac{Nl}{\Delta l \cdot E}$, і формулу (1) отримаємо:

$$D_\sigma = 1 - \frac{\tilde{E}_i \cdot \varepsilon_i \cdot l_0 \cdot N_0}{E_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot l_i \cdot N_i} \quad (5)$$

$$F_0 = \frac{N_0}{E_0 \cdot \varepsilon_0}, \quad F_i = \frac{N_i}{\tilde{E}_i \cdot \varepsilon_i}, \quad \varepsilon_0 = \frac{\Delta l_0}{l_0}, \quad \varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_i}$$

F_0 - початкова площа перерізу на перших етапах ступінчатого навантаження;

F_i - поточна площа перерізу на поточних етапах ступінчатого навантаження;

ε_0 - відносне видовження на перших етапах навантаження ;

ε_i - відносне видовження на поточних етапах навантаження.

Кінетика накопичення пошкоджень D_σ через зміну відносних видовжень на початку навантаження - ε_0 і в процесі пружнопластичного деформування - ε_i , дорівнює [5]:

$$D_\sigma = 1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_i} \quad (6)$$

Враховавши співвідношення (5) та (6) величина кінетики накопичення пошкоджень виразиться залежністю:

$$D_\sigma = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E} \cdot l_0 \cdot N_0}{E_0 \cdot l_i \cdot N_i}} = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}}{E_0}} \sqrt{\frac{l_0 \cdot N_0}{l_i \cdot N_i}} \quad (7)$$

На початковому етапі пружнопластичного навантаження $E_0 = E_y$, E_y - усталена величина модуля пружності, яка визначається на перших етапах пружнопластичного осьового навантаження (рис.1.), \tilde{E} - ефективний модуль пружності матеріалу при розтягуванні. N_0 і N_i - відповідно, початкова і поточна осьова сила при навантаженні.

l_0 і l_i - початкова і поточна довжини зразка при пружнопластичному навантаженні. $l_i = l_0 + \Delta l_i$;

Δl_i - довжина зразка до і-го значення ступінчатого навантаження.

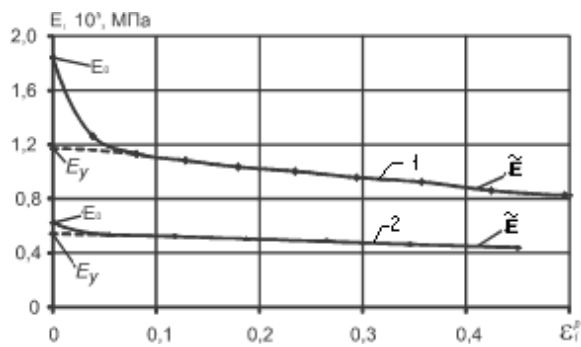


Рис.1 Зміна модуля пружності \tilde{E} при осьовому навантаженні зразка із сталі 12X18H10T (крива 1) та сплаву алюмінію Д16Т(крива 2)

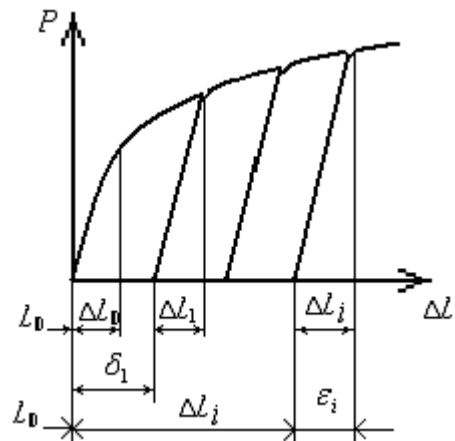


Рис.2 Схема визначення відносної поточної деформації ε_i при пружнопластичному ступінчатому навантаженні-розвантаженні конструкційного матеріалу

За характеристику кінетики пошкоджуваності при розтягуванні - D_σ може бути використаний параметр відносної деформації ε , який оцінюється відношенням (6):

Δl_0 , та Δl_i беруться з діаграми ступінчатого навантаження-розвантаження зразка конструкційного матеріалу $P = f(\Delta l)$ (Рис.2) Величина зміни відносного видовження при ступінчатому навантаженні і розвантаженні для зразків сталі 12X18H10T і алюмінію сплаву Д16Т, відповідно приведена на рис.3 і рис.4.

Визначення пошкоджуваності при осьовому навантаженні за допомогою зміни питомого електричного опору ρ

При пружнопластичному деформуванні внаслідок розпушення змінюється структура матеріалу [6, 7, 8] і змінюється його електричний опір [6].

Згідно [9, 10] електричний опір провідника при проходженні через нього електричного струму дорівнює:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{F} = \rho \cdot \frac{l^2}{V}, \quad (8)$$

де ρ - питомий об'ємний електричний опір (об'ємна щільність розподілення електричного струму в зразку);

l та F - довжина та площа робочої зони провідника (зразка матеріалу).

Із співвідношення (8) отримаємо величину об'єму провідника через який проходить електричний струм, що виражається залежністю:

$$V = \frac{\rho \cdot l^2}{R} = \frac{\rho \cdot l^2 \cdot I}{U}, \quad (9)$$

де I, U - величина струму і напруги в провіднику.

Для циліндричної форми зразка при його пружнопластичному деформуванні початковий $V_{0ц}$ і поточний $V_{з\epsilon\sigma} = F_{з\epsilon\sigma} \cdot l_{з\epsilon}$ об'єм через показання електричного струму представляються відповідними залежностями:

$$V_{0ц} = \frac{\rho_{0ц} \cdot l_{0ц} \cdot I_0}{U_0}, \quad (10)$$

$$V_{іц} = \frac{\rho_{іц} \cdot l_{іц} \cdot I_i}{U_i}, \quad (11)$$

де $\rho_{0ц}$ і $\rho_{іц}$ - величини початкового і поточного електричного опору циліндричної робочої зони зразка перед і під час деформування; $l_{0ц}$ і $l_{іц}$ - початкова і поточна довжини робочої зони зразка; I_0, U_0, I_i, U_i - початкові і поточні величини електричного струму і напруги в робочій зоні зразка при напрацюванні.

Для матеріалів, які при пружнопластичному деформуванні утворюють місцеве звуження (шийку) величини кінетики пошкоджуваності в зоні місцевого звуження дорівнюють:

$$D_\sigma = 1 - \frac{V_{0ц}}{V_{іц}} - \frac{V_{ікц}}{V_{іиц}} \quad (12)$$

де $V_{іиц} \approx 2V_{ік}$ - об'єм зразка в зоні місцевого звуження (в першому наближенні дорівнює двом змінним об'ємам конічної форми $V_{ік}$)

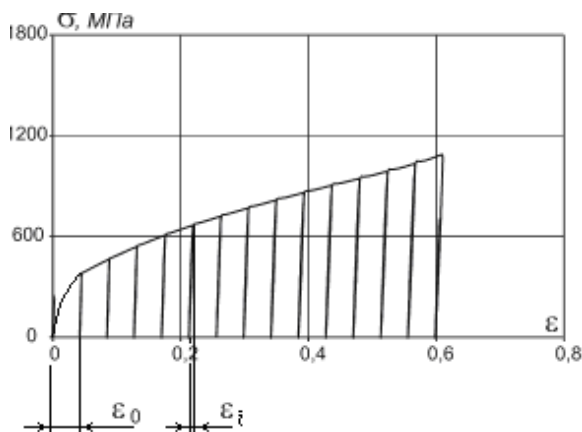


Рис.3 Діаграма ступінчатого навантаження і розвантаження при розтягуванні зразка із сталі 12X18H10T

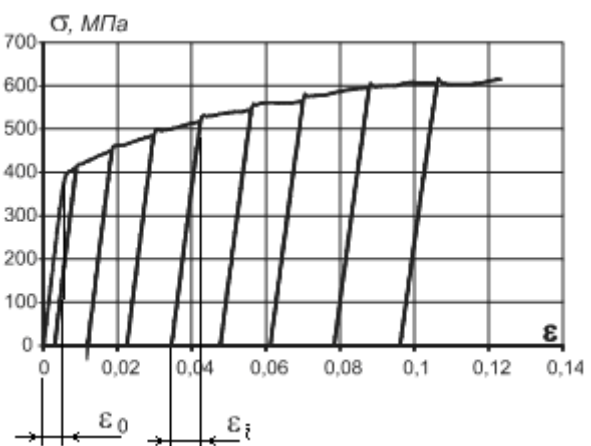


Рис.4 Діаграма ступінчатого навантаження і розвантаження при розтягуванні зразка із алюмінієвого сплаву Д16Т

Для будь-якого конуса об'єм визначається [11]:

$$V = \frac{h \cdot F}{3} \quad (13)$$

де h - висота конуса;
 F - площа перерізу конуса.
 Об'єм шийки зразка

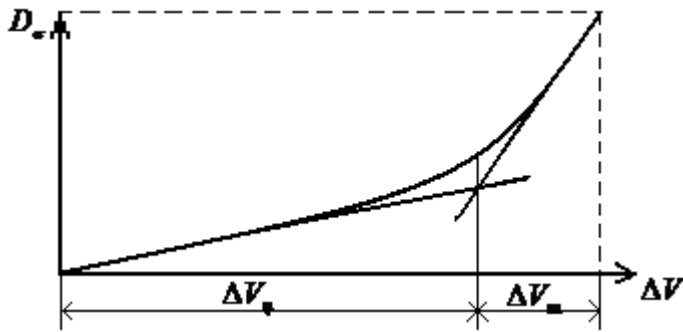


Рис. 5. Визначення границі кінетики загальної та локальної (в шийці) пошкоджуваності при пружнопластичному деформуванні конструкційного матеріалу

$$V_{iuv} = \frac{l_{iuv} \cdot F_{iuv}}{2 \cdot 3} \quad (14)$$

де F_{iu} - площа перерізу зрізаного конуса в зоні шийки;
 $F_{iu} = \pi \cdot (R_{iu}^2 + r_{iuv}^2 + R_{iu} \cdot r_{iuv})$;
 R_{iu} - поточний радіус циліндричної зони зразка при навантаженні; r_{iuv} - поточний радіус конічної найбільш утоненої зони зразка при деформуванні; l_{iuv} - видовження зразка в зоні

деформування шийки.

З урахуванням співвідношення (10) зміна об'єму шийки через питомий електричний опір дорівнює:

$$V_{iuv} = \frac{\rho_{iuv} \cdot l_{iuv} \cdot I_{iuv}}{U_{iuv}}, \quad (15)$$

де ρ_{iuv} - величина поточного електроопору при деформуванні зразка в зоні місцевого звуження; U_{iuv} і I_{iuv} - величини електричної напруги і струму в шийці зразка при пружнопластичному деформуванні.

При умові проходження постійного струму, через зразок в процесі пружнопластичного навантаження до руйнування, пошкоджуваність:

$$D_{\sigma} = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_i} \left(\frac{l_0^2 U_{iu}}{l_{iu}^2 U_0} \right) - \frac{\rho_{iku}}{\rho_{iuv}} \left(\frac{l_{iku}^2 U_{iuv}}{l_{iuv}^2 U_{iku}} \right), \quad (16)$$

де l_{iuv} - видовження зразка в зоні деформування шийки; l_{iku} - довжина робочої зони зразка перед утворенням шийки; ρ_{iuv} - величина питомого поточного електроопору при деформуванні зразка в зоні місцевого звуження; ρ_{iku} - питомий електричний опір зразка перед утворенням шийки; U_0 і U_i - початкова і поточна величини напруження в робочій зоні при напрацюванні; U_{iuv} - величина напруги електричного струму в шийці зразка при пружнопластичному деформуванні U_{iku} - електрична напруга в зразку перед утворенням шийки.

Складові в дужках формули (16) характеризують зміну питомого електроопору в залежності від зміни геометричних розмірів циліндричної і в шийці робочої зони зразка при його деформуванні.

В зразках, які руйнуються без утворення шийки, пошкодженість через зміну питомого електроопору оцінюється першою складовою формули (16).

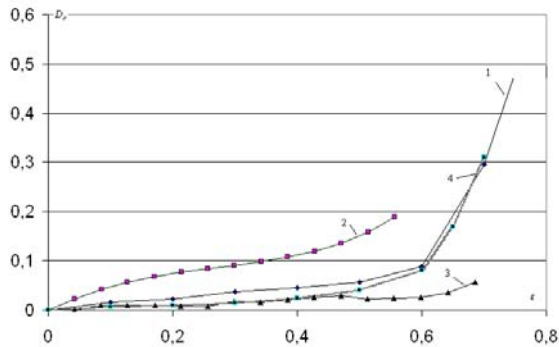


Рис. 6 Пошкодженість сталі 12X18H10T при розтягуванні: крива 1 по зміні модуля пружності \tilde{E} , крива 2 по зміні об'єму ΔV_{σ} , крива 3 по зміні параметра відносної деформації ε , крива 4 по зміні питомого об'ємного електричного опору ρ

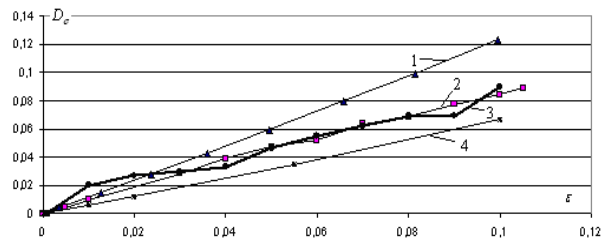


Рис. 7. Пошкодженість алюмінієвого сплаву Д16Т при розтягуванні: крива 1 по зміні модуля пружності \tilde{E} , крива 2 по зміні об'єму ΔV_{σ} , крива 3 по зміні питомого об'ємного електричного опору ρ , крива 4 по зміні параметра відносної деформації ε .

Аналізуючи криві пошкодженості для конструкційних матеріалів можна відмітити, що характер і величини пошкодженості, які отримані по зміні модулів пружності, зміні питомого електроопору, зміні параметра відносної деформації, а також об'єму зразка близькі між собою і пошкодженість виникає в матеріалі при появі пластичних деформацій

Визначення критерію міри пошкодженості матеріалу при осьовому навантаженні

Критерій міри пошкодженості матеріалу при пружнопластичному деформуванні характеризується параметром Ψ , який в неявній формі в часі - t може бути записаний при дії осьового навантаження

$$\Psi_{\sigma}[D_{\sigma}, t] = \frac{D_{\sigma}}{D_{\sigma R}}(t) \quad (17)$$

і являється функцією параметрично залежної величини від пошкодженості D_{σ} , та часу t , де $D_{\sigma R}$ - критичне значення пошкодженості при осьовому навантаженні в матеріалі при якому настає руйнування. Параметр міри пошкодженості елементів конструкцій змінюється в межах $0 \leq \Psi \leq 1$; дорівнює 0 перед пружнопластичним навантаженням і дорівнює 1 в момент руйнування.

Відносна величина зміни об'єму (характеристика розпушення матеріалу) при деформуванні через величину пошкоджуваності оцінюється відношеннями (3) при розтягуванні, із якого величина пошкоджуваності - D_σ дорівнює (4):

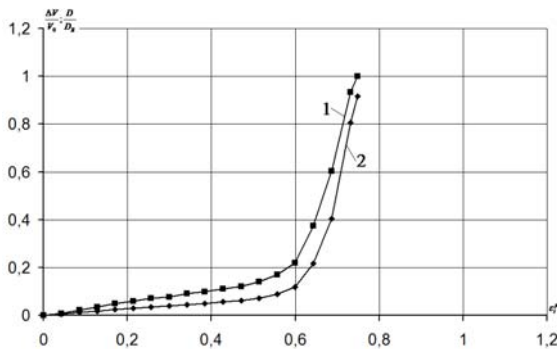


Рис. 8. Характеристика міри пошкоджуваності (крива 1) та розпушення (крива 2) при пружнопластичному розтягуванні зразка сталі 12X18H10T

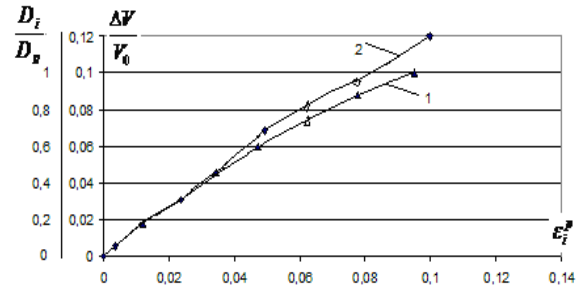


Рис. 9. Характеристика міри пошкоджуваності (крива 1) та розпушення (крива 2) при пружнопластичному розтягуванні зразка алюмінієвого сплаву Д16Т

На рис.8 і рис.9 представлені графічні залежності відносного розпушення $\frac{\Delta V}{V_0}$ для сталі 12X18H10T та алюмінієвого сплаву Д16Т (криві 1) і міри пошкоджуваності відповідно для 12X18H10T та Д16Т (криві 2) від величини пружнопластичного деформування розтягуванням. Аналіз кривих показує, що пластичні матеріали (12X18H10T) мають нелінійну величину розпушення і міри пошкоджуваності матеріалу від величини пружнопластичного деформування, тоді як менш пластичні матеріали розпушуються і пошкоджуються майже лінійно від величини пружнопластичного навантаження.

Зміну об'єму, як кінетику накопичення пошкоджень при пружнопластичному навантаженні можна описати показниковою функцією (18), і (19), графічно зображено на рис. 10 і рис.11.

Загальний вигляд залежності з утворенням шийки описується відношеннями:

для нержавіючої сталі 12X18H10T:

$$\Delta V = A \cdot \varepsilon^{1+\beta_1} \cdot e^{(0,75+\beta_2)\varepsilon} \quad (18)$$

де β_1, β_2 - коефіцієнти матеріалу враховуючі геометрію деформацій

$$A = 0,107; \beta_1 = 1,75; \beta_2 = 2,5;$$

для алюмінієвого сплаву Д16Т:

$$\Delta V = A \cdot \varepsilon \cdot e^{0,75 \cdot \varepsilon}; \quad (19)$$

де $A = 1,13$.

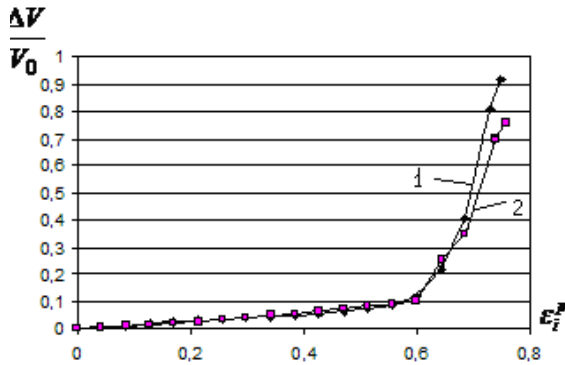


Рис. 10. Кінетика накопичення пошкоджень при пружнопластичному навантаженні зразка сталі 12X18H10T: крива 1 відношенню міри розпушення до початкового об'єму при пружнопластичному розтягуванні зразка, крива 2 описана рівнянням (18)

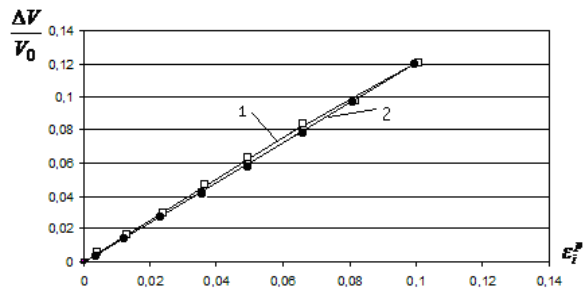


Рис. 11. Кінетика накопичення пошкоджень при пружнопластичному навантаженні зразка алюмінієвого сплаву Д16Т: крива 1 відношенню міри розпушення до початкового об'єму при пружнопластичному розтягуванні зразка, крива 2 описана рівнянням (19)

Враховуючи співвідношення (18) та (19) – отримані функції, які описують кінетику накопичення пошкоджень в матеріалі при пружнопластичному деформуванні до руйнування:

для сталі 12X18H10T:

$$D_{\sigma} = \frac{A \cdot \varepsilon^{1+\beta_1} \cdot e^{(0,75+\beta_2) \cdot \varepsilon \cdot x}}{V_0 + A \cdot \varepsilon^{1+\beta_1} \cdot e^{(0,75+\beta_2) \cdot \varepsilon \cdot x}} \quad (20)$$

для алюмінієвого сплаву Д16Т :

$$D_{\sigma} = \frac{A \cdot \varepsilon \cdot e^{0,75 \cdot \varepsilon \cdot x}}{V_0 + A \cdot \varepsilon \cdot e^{0,75 \cdot \varepsilon \cdot x}} \quad (21)$$

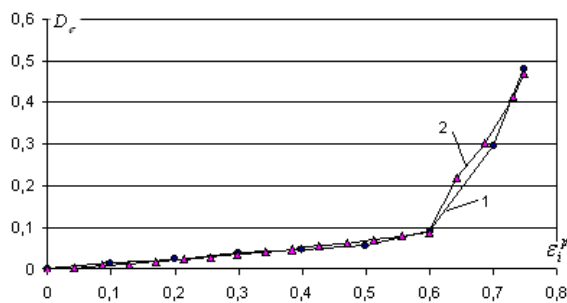


Рис. 12. Кінетика накопичення пошкоджень при пружнопластичному навантаженні зразка сталі 12X18H10T: крива 1 – по зміні питомого електричного опору ρ , 2 – по зміні об'єму робочої зони зразка ΔV за рівнянням (20)

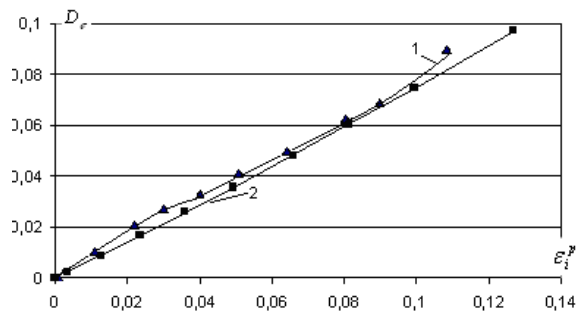


Рис. 13. Кінетика накопичення пошкоджень при пружнопластичному навантаженні зразка алюмінієвого сплаву Д16Т: крива 1 – по зміні питомого електричного опору ρ , 2 – по зміні об'єму робочої зони зразка ΔV за рівнянням (21)

Аналіз кривих рис. 12 та рис.13 показує, що завдяки отриманим залежностям (20), (21) можливо теоретично знайти характеристику міри розпушення при пружнопластичному розтягуванні зразка, як кінетику накопичення пошкоджень, знаючи параметричні коефіцієнти матеріалу (які враховують геометрію деформацій).

Функції, які описують кінетику накопичення пошкоджень в матеріалі при пружнопластичному деформуванні до руйнування, (20), (21), із аналізу кривих (крива 2 рис (12) та рис.(13)), майже співпадають з кривими (крива 1 рис (12) та рис. (13)), що отримані експериментально по зміні питомого електроопору згідно формули (16).

Аналіз сукупності отриманих даних дозволяє зробити наступні висновки:

- розроблені методики дослідження пошкоджуваності в матеріалі по зміні модуля пружності, питомого електричного опору деформативних характеристик матеріалу, об'єму зразка при пружнопластичному осьовому навантаженні до руйнування;
- експериментально для сталі 12X18H10T та алюмінієвого сплаву Д16Т встановлено, що пружнопластичне осьове навантаження приводить до деградації модуля пружності E , електричних властивостей внаслідок розпушення матеріалу;
- запропоновано критерій оцінки міри пошкоджуваності при пружнопластичному навантаженні конструкційного матеріалу до руйнування.
- проведена оцінка кінетики пошкоджуваності і величини розпушення для сталі 12X18H10T та алюмінієвого сплаву Д16Т від величини пружнопластичного деформування розтягуванням до руйнування по зміні модуля пружності E , питомого електроопору, деформативних характеристик матеріалу та по зміні об'єму робочої зони зразка при навантаженні.
- запропоновано критерій визначення кінетики накопичення пошкоджуваності для конструкційної сталі 12X18H10T і алюмінієвого сплаву Д16Т при пружнопластичному деформуванні матеріалу до руйнування, який описується показниковими функціями враховуючи властивості і геометрію деформацій при навантаженні.

Список літератури

1. Лебедев А.О., Чаусов М.Г., Недосека С.А., Богиніч І.О. Модель накопичення пошкоджень в металевих матеріалах при статичному навантаженні // Проблеми міцності, 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, 286с.
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. К. 2003, №44, с. 43-47.
4. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів, Київ, “Вища школа” 1993, 654 с.
5. Леметр Ж. Континуальна модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластических материалов // Теоретические основы, 1985, т.107, №1, с.90-97.
6. Баренблатт Г.И., Ботвина Л.Р. Методы подобия в механике и физике разрушения // Физико-хим. механика материалов. – 1986. - №1.-с.57-62.
7. Махутов Н.А., Кокшаров И.И., Лепихин А.М. Применение численных методов расчета показателей надежности элементов конструкций с повреждениями // Пробл.прочности.- 1991.-№5.-с.3-8.
8. Ярема С.А. Стадийность усталостного разрушения и ее следствия. \ \ Физико - химическая механика материалов. 1973, - № 6, -с. 66-72.
9. Дехтяр И.Я., Литовченко С.Г., Федченко Р.Г. Изучение влияния пластической деформации на электрические свойства сплавов системы Fe – Al // Вопросы физики металлов и металловедение, 1960, №11, 121-128
10. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики, Киев «Наукова думка» 1989, Справочник, 862 с.
11. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике (для инженеров и учащихся втузов), М., «Наука», 1981, 718 с.