

современных CAD/CAE/CAM системах.

3. Улучшение материально-технической базы действующих лабораторий.
4. Актуализация системы и программы обучения.
5. Подготовку и издания учебных пособий на болгарском языке.

Список литературы

1. [1] Приложение на съвременни CAD/CAE системи в научните изследвания и обучението, отчет по договор № П -14/2003 г., ТУ-Габрово.
2. [2] Факултетна концепция за автоматизирано проектиране в машиностроенето и уредостроенето. Габрово, ТУ-Габрово, 1995 г.
3. [3] Донков, Д., CAD/CAM системи в машиностроенето. Част 1: Основи на автоматизираното проектиране. Габрово, Университетско издателство "В.Априлов", 1998.
4. [4] Джонов Ц., Числени методи за инженерен анализ (лекции). ТУ-Габрово, 1999.
5. [5] Джонов, Ц., М. Петров, Методично ръководство за решаване на задачи по метода на крайните елементи (Cosmos/M 1.71). Габрово, АЛМА МАТЕР Интернационал, 1999.
6. [6] Донков, Д., CAD/CAM системи в машиностроенето, част II: Параметрично моделиране с Mechanical Desktop, УИ "В.Априлов" – Габрово, 2001.
7. [7] Неделчева П., Компютърно моделиране и техническо документиране, ЕКС-ПРЕС, Габрово, 2007.

УДК 539.4+620.1

А.П.Грабовський, канд.техн.наук, доц.

НТУ України "Київський політехнічний інститут", м.Київ, Україна

РОЗПУШЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ОСЬОВОМУ ПРУЖНОПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ – ОСНОВА КІНЕТИКИ ПОШКОДЖУВАНОСТІ

Приведены результаты исследования кинетики накопления повреждений в конструкционных материалах при упругопластическом деформировании растяжением до разрушения, через разрыхление, которое приводит к изменению физико механических свойств: плотности, модуля упругости E, электрического сопротивления магнитной проницаемости и т.д. Приведены результаты экспериментального исследования изменения модуля упругости E и электрического сопротивления на образцах высокопластической стали 12X18H10T и малопластического алюминиевого сплава Д16Т через параметр разрыхления.

The results of the research of the damage accumulation kinetics in constructional materials under elasto-plastic deformation by tension till failure by loosening, that leads to changing physical-mechanical properties, density, the Young's modulus E, electrical resistance, magnetic conductivity etc. are given. The results of the experimental research of the Young's modulus E and electrical resistance changing on the specimens made of steel 12X18H10T and low-ductility aluminium alloy Д16Т through the changing of the loosening parameter are given.

Більшість досліджень з проблеми руйнування матеріалів стосується вивчення заключної стадії, яка схематизована в моделях Гріффітса – Орована, що покладені в основу методів оцінки живучості конструкцій [1, 2]. Для опису процесу руйнування на початковій стадії характерний високий рівень схематизації, а моделі, що отримані з позицій теорії пошкоджуваності мають обмежене експериментальне обґрунтування [3, 4, 5].

В роботі розглядаються результати досліджень кінетики накопичення пошкоджень в різних конструкційних матеріалах через розпушення матеріалів, яка пов'язана з накопиченням розсіяних пошкоджень різної природи (утворення розривів в субмікро – та мікрооб'ємах, виділення нових фаз, фізичні та хімічні флуктуації, утворення текстури і т.д.), що приводить до зміни фізико – механічних властивостей матеріалу – щільності, електропровідності, магнітних властивостей, модуля пружності при осьовому навантаженні – E та та інших властивостей.

Кінетика накопичення пошкоджуваності в конструкційних матеріалах – D_σ при пружнопластичному навантаженні через зміну об'єму оцінюється співвідношенням:

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

де V_0 – початкова величина об'єму робочої зони зразка матеріалу; $V_i = V_0 + \Delta V$ – поточна величина об'єму робочої зони зразка матеріалу при пружнопластичному деформуванні; ΔV – зміна об'єму матеріалу при пружнопластичному деформуванні. Зміна об'єму матеріалу при пружнопластичному деформуванні з рівняння (1) запишеться у вигляді:

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

Із закону Гука при осьовому навантаженні витікає [6] $F = \frac{N \cdot l}{\Delta l E}$

де F – площа поперечного перерізу зразка; N – осьове навантаження; l – довжина робочої зони зразка;

Δl – деформація робочої зони зразка при навантаженні. Враховуючи, що пошкоджуваність $D_\sigma = 1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_i}$, отримаємо величину пошкоджуваності при пружнопластичному осьовому навантаженні

$$D_\sigma = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}}{E_0}} \cdot \sqrt{\frac{l_0 N_0}{l_i N_i}} \quad (3)$$

де $\varepsilon_0 = \frac{\Delta l_0}{l_i}$; $\varepsilon_i = \frac{\Delta l_i}{l_i}$ – відносні величини осьової деформації на початку навантаження і при поточних навантаженнях на пружних участках діаграм ступінчатого навантаження і розвантаження (рис.1, рис.2).

\tilde{E} – ефективний поточний модуль пружності матеріалу при пружнопластичному розтягуванні (рис.3). На початковому етапі пружнопластичного навантаження $E_0 = E_y$, де E_y – усталена величина модуля пружності, яка визначається на перших етапах пружнопластичного осьового навантаження (рис.3). N_0 N_i – відповідно, початкова і поточна осьова сила при навантаженні, яка визначається на поточних участках діаграмах ступінчатого навантаження і розвантаження (рис.1, рис.2).

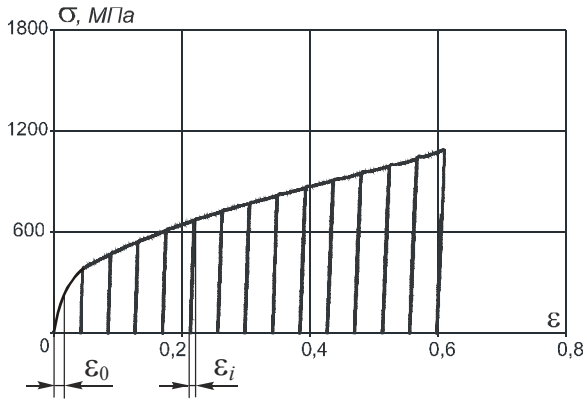


Рис.1. Діаграма ступінчатого навантаження і розвантаження при розтягуванні зразка із сталі 12X18H10T

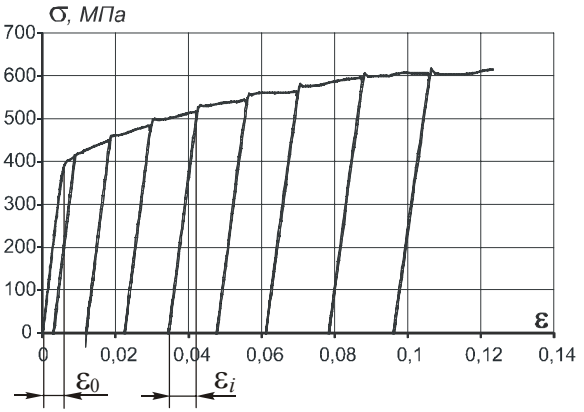


Рис.2. Діаграма ступінчатого навантаження і розвантаження при розтягуванні зразка із алюмінієвого сплаву Д16Т

При пружнопластичному деформуванні внаслідок розпушення змінюється структура матеріалу [4, 5] і змінюється його електричний опір [7].

Згідно [8] електричний опір провідника при проходженні через нього електричного струму дорівнює:

$$R = \rho \frac{l}{F} = \rho \frac{l^2}{V}, \quad (4)$$

де ρ - питомий об'ємний електричний опір (об'ємна щільність розподілення заряду);

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

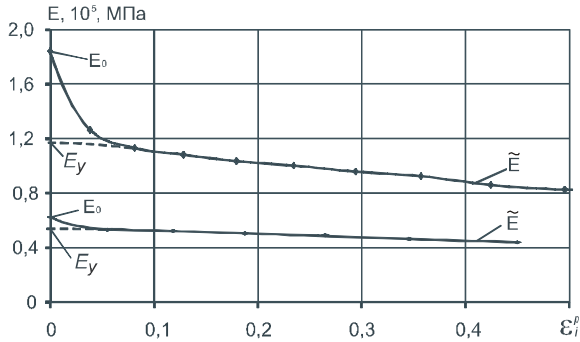


Рис.3 Зміна ефективного модуля пружності \tilde{E} при осьовому навантаженні зразка із сталі 12X18H10T (крива 1) та сплаву алюмінію Д16Т (крива 2)

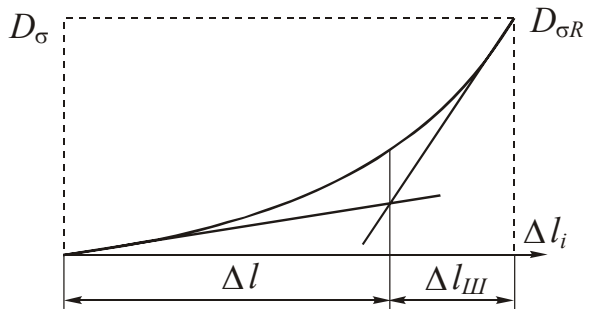


Рис.4 Визначення границі кінетики загальної та локальної (в шийці) пошкоджуваності при пружнопластичному деформуванні конструкційного матеріалу

Із співвідношення (4) отримаємо:

$$V = \frac{\rho l^2}{R} = \frac{\rho l^2 I}{U}, \quad (5)$$

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

Для циліндричної форми зразка при його пружнопластичному деформуванні початковий $V_{0ц}$ і поточний $V_{iц}$ об'єм через показники електричного струму представляються відповідними залежностями:

$$V_{0ц} = \frac{\rho_{0ц} \cdot l_{0ц}^2 \cdot I_0}{U_0}, \quad (6)$$

$$V_{iц} = \frac{\rho_{iц} \cdot l_{iц}^2 \cdot I_i}{U_i}, \quad (7)$$

де $\rho_{0ц}$ і $\rho_{iц}$ – величини початкового і поточного електричного опору циліндричної робочої зони зразка перед і під час деформування;

$l_{0ц}$ і $l_{iц}$ – початкова і поточна довжини робочої зони зразка;

I_0 , U_0 , I_i , U_i – початкові і поточні величини електричного струму і напруження в робочій зоні зразка при напруженні.

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

$$D_{\sigma} = 1 - \frac{V_{0ц}}{V_{iц}} - \frac{V_{iцк}}{V_{iцн}}, \quad (8)$$

де $V_{iцн} \approx 2V_{iцк}$ – об'єм зразка в зоні місцевого звуження (в першому наближенні дорівнює двом змінним об'ємам конічної форми $V_{iцк}$).

Для любого конуса об'єм визначається [9]:

$$V = \frac{h \cdot F}{3}, \quad (9)$$

де h – висота конуса; F – площа перерізу конуса.

Площа перерізу зрізаного конуса – $F = \pi(R^2 + r^2 + Rr)$, де R та r – відповідні радіуси зрізаного конуса

Об'єм шийки зразка

$$V_{iцн} = \frac{l_{iцн} \cdot F_{iцн}}{2 \cdot 3}, \quad (9)$$

де $F_{iцн}$ – площа зрізаного конуса в зоні шийки; $F_{iцн} = 2\pi(R_{iцн}^2 + r_{iцн}^2 + R_{iцн}r_{iцн})$;

$R_{iцн}$ – поточний радіус циліндричної зони зразка при навантаженні; $r_{iцн}$ – поточний радіус конічної найбільш утоненої зони зразка при деформуванні;

$l_{iцн}$ – видовження зразка в зоні деформування шийки.

З урахуванням співвідношення (5) зміна об'єму шийки через питомий електричний опір дорівнює:

$$V_{iцн} = \frac{\rho_{iцн} \cdot l_{iцн}^2 \cdot I_{iцн}}{U_{iцн}}, \quad (10)$$

де $\rho_{i_{uu}}$ – величина поточного електроопору при деформуванні зразка в зоні місцевого звуження; $U_{i_{uu}}$ і $I_{i_{uu}}$ – величини напруження струму в шийці зразка при пружнопластичному деформуванні.

При умові постійності струму, що проходить через зразок в процесі пружнопластичного навантаження до руйнування $I_0 = I_{i_{u}} = I_{i_{uu}} = const$.

Пошкоджуваність при пружнопластичному деформуванні до руйнування дорівнює:

$$D_{\sigma} = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_{i_{u}}} \left(\frac{l_{0u}^2 \cdot U_{i_{u}}}{l_{i_{u}}^2 \cdot U_0} \right) - \frac{\rho_{i_{ku}}}{\rho_{i_{uu}}} \left(\frac{l_{iku}^2 \cdot U_{i_{uu}}}{l_{i_{uu}}^2 \cdot U_{iku}} \right), \quad (11)$$

де $\rho_{i_{ku}}$ – питомий електричний опір зразка перед утворенням шийки; l_{iku} – довжина робочої зони зразка перед утворенням шийки; U_{iku} – електричне напруження в зразка перед утворенням шийки.

На рис. 4 представлена крива залежності пошкоджуваності D_{σ} від величини видовження зразка до руйнування Δl_i , по якій можна визначити границю деформації циліндричного участка Δl_y і деформацію зразка в шийці Δl_{uu} до руйнування. Складові в дужках формули (11) характеризують вплив зміни геометричних розмірів зразка на величину електроопору при його пружнопластичному деформуванні.

На рис.3 приведені результати експериментальних досліджень зміни модуля пружності E при пружно-пластичному ступінчатому деформуванні, відповідно, для сталі 12X18H10T (крива 1) та алюмінієвого сплаву Д16Т (крива 2), які пов'язані з кінетикою накопичення пошкоджень в матеріалі до руйнування.

Для сталі 12X18H10T (рис.5) та сплаву алюмінію Д16Т (рис.6), показані порівняльні криві пошкоджуваності від величини пружнопластичного деформування, які отримані по зміні питомого електроопору згідно залежності (11)– крива 1 та по зміні модуля пружності при розтягуванні згідно залежності (3)– крива 2.

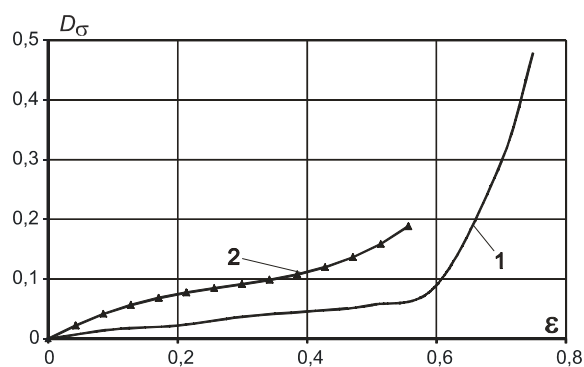


Рис. 5. Пошкоджуваність сталі 12X18H10T при розтягуванні: крива 1 згідно залежності (11); крива 2 згідно залежності (3)

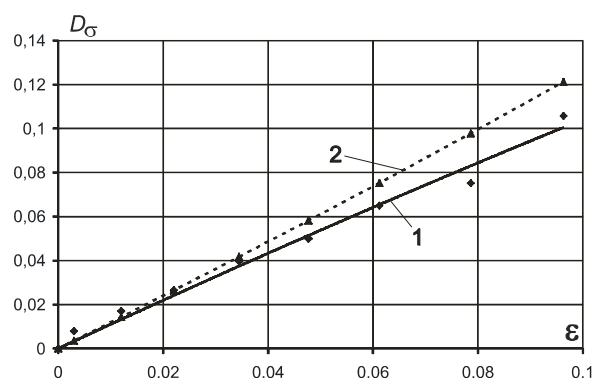


Рис. 6. Пошкоджуваність алюмінієвого сплаву Д16Т при розтягуванні: крива 1 згідно залежності (11); крива 2 – згідно залежності (3)

Аналізуючи криві пошкоджуваності для конструкційних матеріалів, можна визначити, що характер і величини пошкоджуваності, які отримані по зміні модулів

пружності і зміні об'ємного питомого електроопору подібні по характеру і близькі між собою. Із аналізу кривих можна зробити висновок, що пошкоджуваність виникає в матеріалі при появі пластичних деформацій і майже лінійно накопичується для малопластичних матеріалів і явно нелінійно накопчується для високопластичних матеріалів. Висока ефективність накопичення пошкоджуваності спостерігається в шийці.

Критерій міри пошкоджуваності матеріалу при пружно-пластичному деформуванні характеризується параметром ψ , який в неявній формі в часі - t може бути записаний при дії осьового навантаження

$$\psi_{\sigma}[D_{\sigma}, t] = \frac{D_{\sigma}}{D_{\sigma R}}(t) \quad (12)$$

і є функцією параметрично залежної величини від пошкоджуваності D_{σ} , та часу t , де $D_{\sigma R}$ - критичне значення пошкоджуваності при осьовому навантаженні в матеріалі при якому настає руйнування. Параметр міри пошкоджуваності елементів конструкцій змінюється в межах $0 \leq \psi \leq 1$; дорівнює 0 для непошкодженого матеріалу та дорівнює 1 в момент руйнування.

На рис. 7 і рис. 8 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, які отримані, згідно залежностей (2) і (12). Аналіз кривих показує, що високопластичні матеріали (12X18H10T) мають нелінійну величину розпушення і пошкоджуваності матеріалу від величини пружнопластичного деформування, тоді як меншпластичні матеріали розпушуються і пошкоджуються майже лінійно від величини пружнопластичного навантаження.

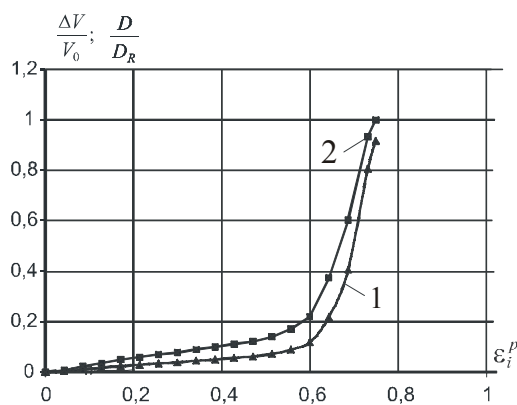


Рис. 7. Характеристики міри пошкоджуваності (крива 1) та розпушення (крива 2) при пружнопластичному розтягуванні сталі 12X18H10T

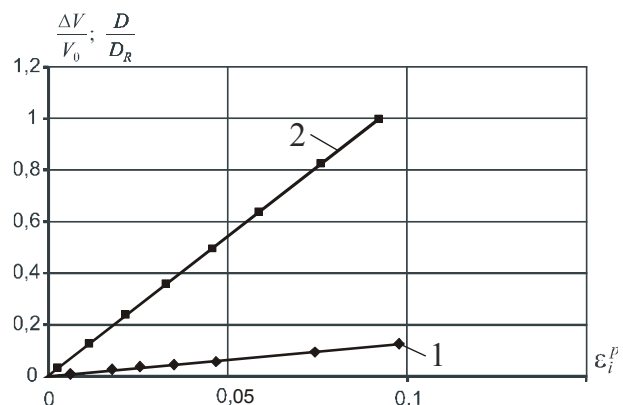


Рис. 8. Характеристики міри пошкоджуваності (крива 1) та розпушення (крива 2) при пружнопластичному розтягуванні алюмінієвого сплаву Д16Т

Аналіз сукупності отриманих даних дозволяє зробити такі висновки:

- розроблена методика дослідження пошкоджуваності в матеріалі по зміні модуля пружності і питомого електричного опору при пружнопластичному осьовому навантаженні до руйнування;
- експериментально для сталі 12Х18Н10Т та алюмінієвого сплаву Д16Т встановлено, що пружнопластичне осьве навантаження приводить до кількісної зміни модуля пружності E , електричних властивостей внаслідок розпушення матеріалу;
- для оцінки придатності використання конструкційного матеріалу в процесі напрацювання запропоновані критерії визначення міри пошкоджуваності від величини осьового пружнопластичного деформування;
- проведена оцінка міри пошкоджуваності і величини розпушення для сталі 12Х18Н10Т та алюмінієвого сплаву Д16Т від величини пружнопластичного деформування розтягуванням до руйнування.

Список літератури

1. Разрушение: в 7-ми томах / Под ред. Г.Либовица: Мир, 1976
2. Механика разрушения и прочности материалов: Справочное пособие: в 4 томах под общ. ред.Панасюка В.В. – Киев, "Наукова думка", 1988
3. Тамуж В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов: Рига "Знание", 1978, с.167
4. Голуб В.П., Кобзарь Ю.М., Фернати П.В. Особенности нелинейной ползучести линейно – и нелинейноупругих материалов при осевом нагружении // Вестник НТУУ "КПИ", серия "Мишиностроение", К, 2003, №44. .35-37
5. Лебедев А.О., Бобир М.І., Ламашевський В.П. Механіка матеріалів для інженерів. Навчальний посібник, Київ, НТУУ «КПІ», ВПІ ВПК «Політехніка», 2006, 286с.
6. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів, Київ, «Вища школа», 1993, 654с.
7. Дехтяр И.Я., Литовченко С.Г., Федченко Р.Г. Изучения влияния пластической деформации на электрические свойства сплавов системы Fe-Al // Вопросы физики металлов и металловедение, 1960, №11, 121-128с.
8. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики, Киев, "Наукова думка", 1989, Справочник, 862с.
9. Бронштейн И.Н, Семендяев К.А. Справочник по математике (для инженеров и учащихся втузов), М., "Наука", 1981, 718 с.