

## ВПЛИВ ВИДУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ НА КРИТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ПОШКОДЖУВАНОСТІ ДЛЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ

*Проведен комплекс экспериментальных исследований различных металлических конструкционных материалов. Выполнена модернизация методики измерения удельного электросопротивления для экспериментального стенда УМЕ-10ТМ. Получены значения предельных величин поврежденности для разных видов нагружения. Рассмотрена зависимость критических значений поврежденности от вида напряженного состояния и характеристик пластичности металлических материалов. Приведены кривые накопления поврежденности для сталей 18ХН4ВА и 15ХСНД.*

*The complex of experimental researches of various metal constructional materials has been made. Modernization of methodic of resistivity measurement for experimental stand UME-10TM was done. The values of maximum sizes of damage for the different types of loading are received. Dependence of critical values of damage on the type of the stress state and plasticity characteristics of metallic materials is considered. The curves of damage accumulations for steels 18XH4BA and 15XCHD are presented.*

**Вступ.** Деформація матеріалів безперервно супроводжується появою, зростанням і об'єднанням мікродфектів з подальшим виникненням макротріщини, яка приводить до втрати несучої здатності конструкцій і подальшого їх руйнування. Процес кінетики накопичення мікродфектів зручно розглядати ввівши поняття пошкодженості матеріалу, як функції величини його деформації. У першому наближенні, пошкодженість може бути представлена у вигляді скаляра і визначена, як величина деградації макропоказників матеріалу [1;2]. Для оцінки граничного стану матеріалу, вводиться поняття величини критичної пошкодженості, при якій відбувається руйнування конструкції [1;3]. Знаючи критичну величину пошкодженості можна, з високою імовірністю, оцінити залишковий ресурс елемента конструкції на стадії його експлуатації або точніше визначити його повний ресурс на стадії проектування.

Більшість досліджень за оцінкою кінетики накопичення пошкодженості приведена для умов простого розтягу. При цьому напружено-деформований стан матеріалу залишається практично незмінним. Проте, зміна виду напруженого стану приводить також до зміни процесу перетворення мікродфектів, а отже і до зміни інтенсивності накопичення мікропошкоджень в конструкціях. Отже, критичне значення пошкодженості, при якому відбувається руйнування в умовах простого розтягування, і величина критичної пошкодженості для складного напруженого стану відрізнятимуться.

Безпосереднє визначення граничного значення пошкодженості є достатньо трудомістким завданням і вимагає наявності сучасного устаткування і достовірної методики. Тому особливо актуальним є завдання розробки інженерного методу оцінки цієї величини.

**Мета роботи.** Метою роботи є визначення критичного значення пошкодженості металевих конструкційних матеріалів в залежності від виду напруженого стану та характеристик пластичності.

**Викладення основного матеріалу.** Для оцінки кінетики накопичення пошкоджень в конструкційних

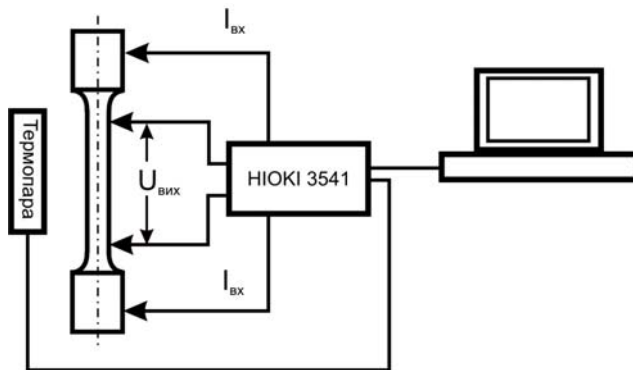


Рис. 1. Принципова блок-схема вимірювання питомого електроопору робочої зони зразка

матеріалах були використані підходи, в основі яких лежить дослідження деградації модуля пружності матеріалу [4; 5] і зміни його питомого електроопору [7; 6; 8]. З урахуванням того, що після границі витривалості із-за утворення шийки в зразку має місце складний напружений стан, критичне значення пошкодженості, яке відповідає моменту руйнування зразка, визначалося тільки з використанням методу оцінки зміни питомого електроопору оскільки даний метод дозволяє оцінити інтегральне значення пошкодженості для будь-якого виду напруженого стану.

Зразки випробовувалися в умовах простого розтягу, кручення і в умовах пропорційного навантаження.

Випробування матеріалів проводилися на модернізованому експериментальному стенді УМЕ-10ТМ. В порівнянні з [9] на стенді була змінена система виміру зміни електроопору при деформації зразка. Принципова блок-схема вимірювання питомого електроопору робочої

зони зразка представлена на рис.1. При цьому принцип вимірювання залишився аналогічним. Подача струму і знімання поточної напруги здійснюється за допомогою мікрометра HIOKI 3541 (Японія), який дозволяє вимірювати електроопір в діапазоні від  $0,1\mu\Omega$  до  $110\text{ M}\Omega$ : На зразок по каналу “SOURCE” мікрометра через ізоляційні захвати подається струм, а з робочої зони зразка по каналу “SENSE” зчитується величина напруги.

Залежно від вибраного діапазону роботи і режиму знімання даних (від грубого до високоточного) мікрометр видає поточне значення електроопору, який через USB інтерфейс фіксується на комп'ютері. При вимірюваннях електроопору може бути врахований вплив зміни температури в діапазоні від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+99,9^{\circ}\text{C}$ , для чого до мікрометра під'єднується спеціальна термопара. При цьому поправка на температуру може бути задана за допомогою коректирувальної функції для кожного матеріалу індивідуально.

Деформування зразків до границі міцності проводилось з ділянками розвантаження, на яких визначалась зміна модуля пружності (рис. 2, 3) [10].

На рис. 4 представлено залежність деградації модуля пружності  $E$  при розтягу та модуля пружності другого роду  $G$  при крученні від пружнопластичної деформації для сталі 15XCHД, при  $T=293\text{K}$ .

Визначення пошкоджуваності проводилось через зміну питомого електроопору  $\rho$  та модулів пружності  $E$  та  $G$  за формулами:

$$D = 1 - \sqrt{\frac{E}{E_0}}; \quad D = 1 - \sqrt{\frac{G}{G_0}}; \quad D = \frac{|\Delta\rho|}{\rho_0}.$$

Результати кінетики накопичення пошкоджень при пружнопластичному деформуванні зразків сталі 15XCHД та 18XН4ВА представлено на рис. 5, 6, 7.

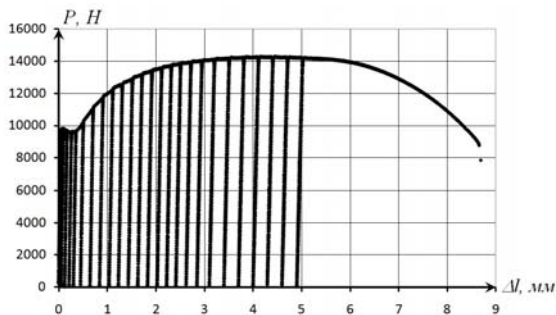


Рис. 2. Діаграма деформування при розтязі (при  $T=293\text{K}$ )

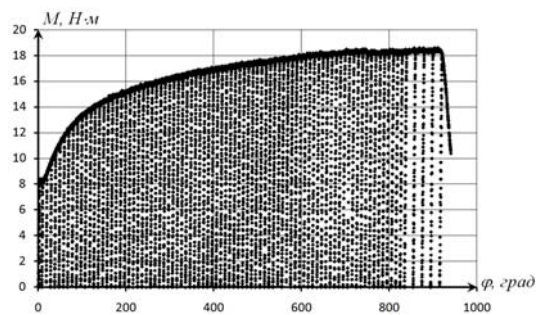


Рис. 3. Діаграма деформування при крученні (при  $T=293\text{K}$ )

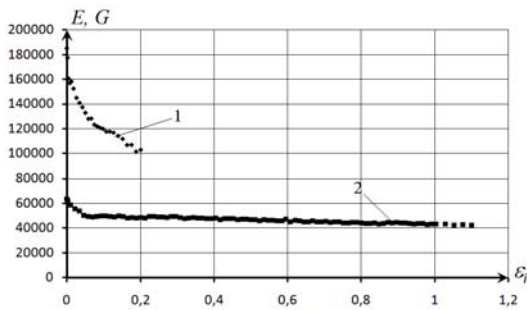


Рис. 4. Зміна модулів пружності (при  $T=293\text{K}$ ):  
1 – при розтязі, 2 – при крученні

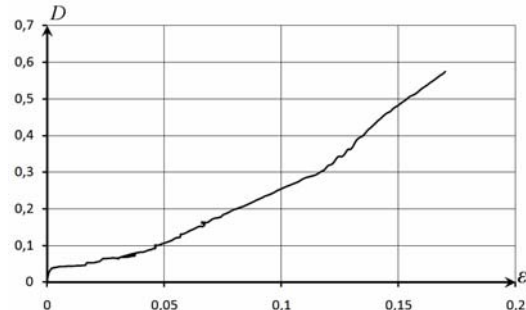


Рис. 5. Кінетика накопичення пошкоджуваності від рівня інтенсивності пластичних деформацій при розтязі через зміну питомого електроопору для сталі 18XН4ВА (при  $T=293\text{K}$ )

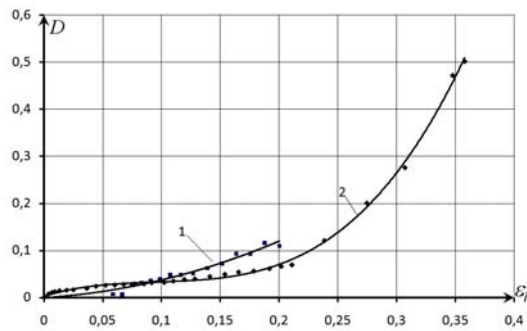


Рис. 6. Кінетика накопичення пошкоджуваності від рівня інтенсивності пластичних деформацій при розтязі (при  $T=293\text{K}$ ): 1 – через зміну модуля пружності, 2 – через зміну питомого електроопору

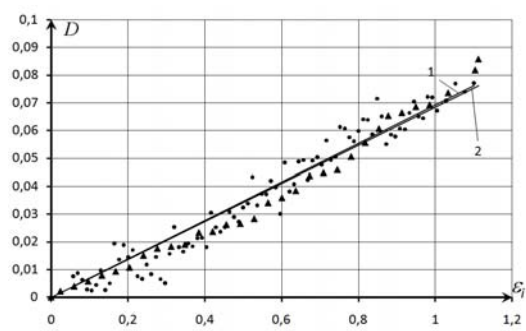


Рис. 7. Кінетика накопичення пошкоджуваності від рівня інтенсивності пластичних деформацій при крученні (при  $T=293\text{K}$ ): 1 – через зміну модуля пружності ( $\bullet$ ), 2 – через зміну питомого електроопору ( $\blacktriangle$ )

Всі отримані результати досліджень граничних значень пошкоджуваності  $D_R$  від виду пружно-деформованого стану та результати отримані іншими авторами зведено в таблицю 1.

Таблиця 1

Критичні значення пошкоджуваності від виду деформації (при  $T=293\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Розтяг							
№	$E, *10^5$ Mna	$\sigma_T$ Mna	$\sigma_B$ Mna	$\varepsilon_D, \%$	$\varepsilon_R, \%$	$D_R$	$\Psi, \%$
12X18H10T	1,84	180	644	0,20	88,0	0,48	61,4
30XГСА	2,08	365	653	0,20	24,0	0,31	49,3
Д16Т	0,7	402	547,7	0,60	12,0	0,10	12,7
BT22	1,06	1300	1417,9	1,80	6,20	0,09	8,4
сталь 45	2,0	380	709,2	0,30	28,0	0,28	47,7
сталь 20		300	580		30,5	0,16	50,0
сталь E24				50,0	88,0	0,37	
спл. INCO718				2,0	29,0	0,24	
сталь 30 CD4				2,0	37,0	0,24	
мідь				25,0	107,0	0,85	
ал. Спл. АН4G1				2,0	25,0	0,23	
сталь ХС38	2,11	540	685	0	56,0	0,22	
сталь 15ХСНД	1,85	330	510	0,18	35,5	0,5	60,9
18X2H4BA	1,76	1027	1504	0,8	17	0,57	67
Кручення							
№	$G$ МПа	$\tau_T$ МПа	$\tau_B$ МПа	$\varepsilon_{iR}, \%$	$D_R$		
12X18H10T	62075	204,52	834,87	106	0,069		
30XГСА	81255	270,72	702,83	75	0,05		
Д16Т	27301	94,08	383,42	22	0,047		
15ХСНД	63600	215	475	113	0,12		
Пропорційне							
		$\varepsilon_{iR}$		$D_R$			
12X18H10T		58		0,4			
сталь 15ХСНД		62		0,26			

Закономірність впливу значення границі текучості на рівень критичних значень пошкоджуваності для ряду металічних конструкційних матеріалів при розтязі показано на рис. 8. З нього можна зробити висновок, що зі збільшенням значення границі текучості металу, критичне значення пошкоджуваності  $D_R$  зменшується не лінійно.

Крива залежності логарифму критичного значення пошкоджуваності  $D_R$  від величини відносного звуження  $\psi$  (рис. 9) для металевих конструкційних матеріалів носить лінійний характер.

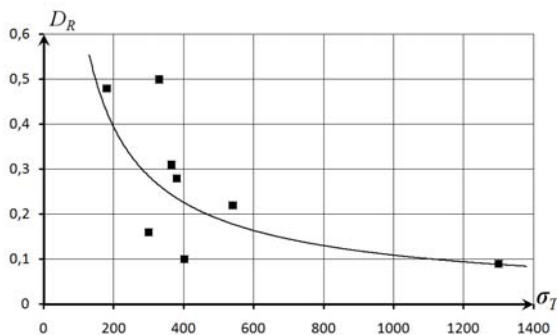


Рис. 8. Залежність критичних значень пошкоджуваності при розтягуванні від границі текучості для матеріалів: сплави BT22, Д16Т; сталь 45, 12X18H10T, 30XГСА, 15ХСНД (при  $T=293\text{K}$ )

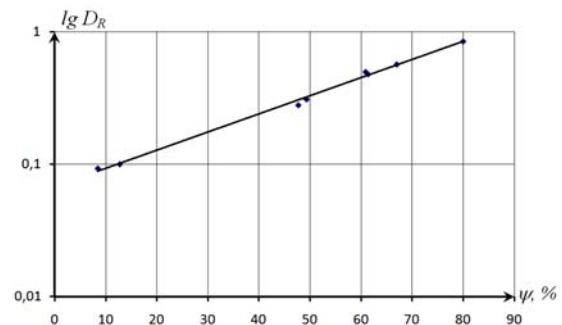


Рис. 9. Залежність критичного значення пошкоджуваності від величини відносного звуження для металевих конструкційних матеріалів за умов одновісного розтягу (при  $T=293\text{K}$ )

Для дослідження закономірностей пошкоджуваності та пластичності матеріалу розраховані залежності рівня ступеню деформації зсуву [11], яка визначалась за формулою

$$\Lambda = \sqrt{3}\varepsilon_i, \quad (1)$$

та параметру жорсткості напруженого стану

$$K = \frac{\sigma_0}{\sigma_i} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\sigma_i} \quad (2)$$

де,  $\sigma_0$  – середнє напруження;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – напруження на головних площадках.

$\sigma_i$  та  $\varepsilon_i$  – інтенсивність напружень та деформацій, визначалась згідно рівнянь:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (3)$$

$$\varepsilon_i = \sqrt{\varepsilon^2 + \frac{\gamma^2}{3}} \quad (4)$$

де  $\varepsilon$ ,  $\gamma$  – відносна деформація при розтягу та крученні.

Залежність  $\Lambda$  від  $K$  для досліджувальних матеріалів при розтязі, крученні та пропорційному деформуванні, яка показана на рис. 10. При  $K=0$  величина пластичності матеріалу відповідає крученню. Із проведених досліджень можна зробити висновок, що ступінь деформації при пропорційному навантаженні лежить на прямій, яка поєднує ступінь деформації при крученні та ступінь деформації при розтязі.

За отриманими результатами експериментальних досліджень критичних значень пошкоджуваності для сталі 45, 12Х18Н10Т, 30ХГСА, 15ХСНД, сплавів Д16Т та ВТ22 при розтязі та крученні та літературними даними для ряду металічних конструкційних матеріалів на рис. 11 побудовані залежності  $D_R = f(\Lambda)$  для розтягування (крива 1) та кручення (крива 2). Вони у першому наближенні носять лінійний характер.

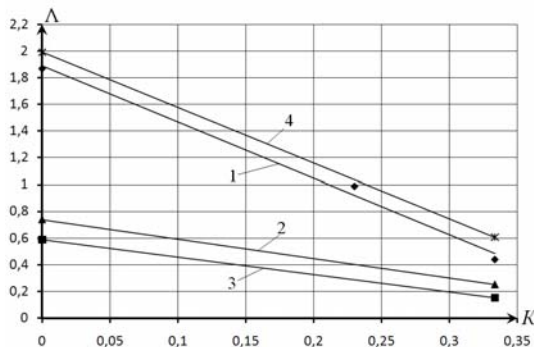


Рис. 10. Діаграма пластичності матеріалів (при  $T=293K$ ): 1 – нержавіючої сталі 12Х18Н10Т; 2 – сталі 30ХГСА; 3 – алюмінієвого сплаву Д16Т, 4 – сталі 15ХСНД

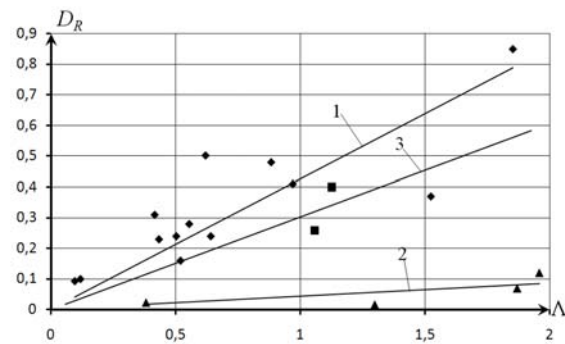


Рис. 11. Залежність критичного значення пошкоджуваності  $D_R$  від деформації зсуву  $\Lambda$  для металічних конструкційних матеріалів при пружно-пластичному деформуванні (при  $T=293K$ ): 1  $\blacklozenge$  – розтяг; 2  $\blacktriangle$  – кручення; 3  $\blacksquare$  – пропорційне навантаження

Аналіз отриманих результатів показав, що критичне значення пошкоджуваності для металевих конструкційних матеріалів  $D_R < 1$ . Таким чином застосування гіпотези про критичне значення пошкоджуваності для конструкційних матеріалів  $D_R = 1$  є неприйнятним, так як розрахунки при цьому виконуються не в запас міцності.

**Висновки.** Проведено модернізацію експериментального стенду УМЕ-10ТМ по дослідженню кінетики накопичення пошкоджуваності металевих конструкційних матеріалів через зміну питомого електричного опору при пружнопластичному деформуванні.

Отримано криві кінетики накопичення пошкоджуваності для різних видів навантаження сталей 18ХН4ВА та 15ХСНД. Розглянуто залежність критичних значень пошкоджуваності від виду напруженого стану та характеристик пластичності металевих матеріалів  $\psi$  та  $\Lambda$ , яку в першому наближенні можна прийняти лінійною, що на стадії проектування дає можливість визначити граничний стан елементів конструкцій з урахуванням пошкоджуваності.

#### Список літератури.

1. Lemaitre J. A Course on Damage Mechanics. Springer – Verlag, 1992, 210 p.
2. Lemaitre J, Dufailly J. Damage measurements. Engineering Fracture Mechanics 1987, 28 (5/6) : 643-661.
3. Леметр Ж. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластичных материалов // Теоретические основы, т. 108, №1. – 1985. – с. 90 – 98.
4. Бобир М.І., Грабовський А.П., Тимошенко О.В. Спосіб визначення кінетики руйнування матеріалів в процесі їх пружно-пластичного деформування. Патент України №65499А Бюл. №3, 15.03.2004.
5. Hansen N.R., Schreyer H.L., A thermodynamically consistent framework for theories of elastoplasticity coupled with damage // Int. J. Solids Structures, vol. 31, No.3, 1994. – P. 359-389.
6. Грабовський А. П., Тимошенко О. В., Масло О. М., Халімон О. П. Дослідження кінетики пошкоджуваності в конструкційних матеріалах при складному напруженому стані. – Вісник НТУУ «КПІ», Машинобудування, 2003, №44, с.43-47.
7. Грабовський А. П., Пономаренко Т. Б., Тимошенко О. В. Експериментальне дослідження накопичення пошкоджень при пружнопластичному деформуванні конструкційних матеріалів. – Вісник НТУУ «КПІ», Машинобудування, 2001, №40, с.128-133.
8. Application of Damage Model to an Aluminum Alloy. International Journal of Damage Mechanics, Vol. 12–January 2003, pp.5-30.
9. Бобир М.І., Грабовський А.П., Тимошенко О.В., Халімон О.П., Масло О.М. Кінетика розсіяного руйнування металевих конструкційних матеріалів при пружно-пластичному деформуванні. // Проблеми прочності. – 2007. – №3. – С.23-34.
10. Грабовський А. П., Тимошенко О. В., Халімон О. П. Кінетика розсіяного руйнування конструкційних матеріалів при крученні // Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения», вып. 33, Донецк, 2007 г., с. 213-217.
11. Русинко К. Н. Особенности неупругой деформации твердых тел. – Львов.: Вища школа., 1986. – 152 с.