

УДК: 539.4-620.1

Пошкоджувальність інженерних об’єктів при повторно-статичних знакозмінних режимах навантажень

Грабовський А.П., Бондарець О.А., Бабієнко І.І.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Анотація. В роботі розглядається кінетика накопичення пошкоджень в інженерних об’єктах, які працюють при повторно-статичних знакозмінних режимах навантажень – деталі та елементи конструкції транспортних засобів (автомобілі, літаки, залізничний транспорт). При зміні напрямку зусилля навантаження в конструкційному матеріалі виникає явище зміни форми мікро дефектів, що приводить до їх «заліковування», тобто фактор пошкодження на відрив та зріз змінюється, який впливає на ефективні напруження і на ресурс роботи обладнання. Цей ефект заліковування дефектів розглядається експериментально для матеріалів з різними пластичними властивостями.

Ключові слова: пошкоджувальність, модель, кінетики накопичення, анізотропія.

Вступ

Багато деталей і вузлів інженерних об’єктів залізничного, автомобільного та авіаційного транспорту працюють в режимах повторно-статичних знакозмінних навантажень. Розрахункова оцінка довговічності, виробленого і залишкового ресурсу конструктивних елементів, які працюють в умовах знакозмінних нестационарних навантажень, вимагають аналізу процесів кінетики накопичення пошкоджень, так як історія деформування визначає темпи накопичення пошкоджень і від адекватності моделювання даних процесів залежить точність розрахункових оцінок довговічності. З цієї причини до теперішнього часу виконані багаточисельні експерименти по виявленню основних закономірностей процесів кінетики накопичення пошкоджень в конструкційних матеріалах при різних режимах термомеханічного навантаження (в основному в умовах руйнування матеріалу на відрив та зріз) [1–9].

Формулювання моделей процесів формування і їх верифікація проводились на базі аналізу результатів експериментальних досліджень процесів деформування лабораторних зразків, які відповідають експлуатаційним умовам роботи конструкційних матеріалів у складі конструктивних елементів [1–10].

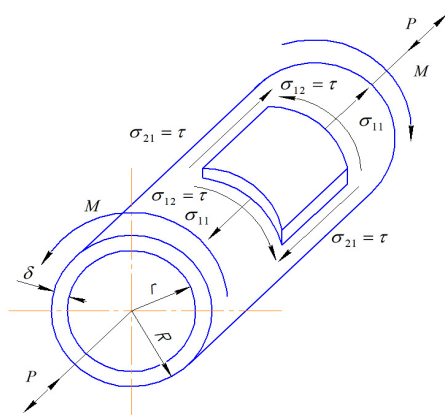


Рис. 1. Схема навантаження на повторно-статичні знакозмінні зусилля на відрив та зсув робочої зони зразка з відповідним розподіленням напружень на виділеній площадці

Механізми деградації фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів

В якості лабораторних зразків застосовувались циліндричні тонкостінні зразки (рис. 1), які навантажувались осьовою силою (розтяг-стискання) і крутним моментом (знакозмінне кручення).

В процесі експерименту вимірюють силу P , крутний момент M , зміну довжини Δl та зміну кута закручування – $\Delta\phi$.

При наявності однорідних полів напружень та деформацій в робочій зоні зразка компоненти тензора напружень та деформацій визначаються формулами:

$$\sigma_{11} = \frac{P}{F} = \frac{P}{2\pi r \delta}; \quad \tau = \sigma_{12} = \frac{M}{W_K}. \quad (1)$$

$$\epsilon_{11} = \frac{\Delta l}{l}; \quad \epsilon_{12} = \frac{1}{2} r \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}. \quad (2)$$

В експериментах задають закони зміни $P(t)$, $M(t)$ – м’який режим навантаження і заміряють згідно цього закону зміни $\Delta l(t)$ або $\Delta \varphi(t)$ або закони зміни $l(t)$ та $\varphi(t)$ - жорсткий режим навантаження і вимірюють відповідні зміни $P(t)$, $M(t)$. За формулами (1) та (2) отримують відповідні компоненти тензора напружень σ_{ij} та компоненти тензора деформацій ϵ_{ij} :

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ \sigma_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & 0 \\ \epsilon_{21} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Будь-яка модель процесу деформування установлює зв’язок між тензором напружень і деформацій або їх приростами. Оскільки в даному експерименті компоненти тензора напружень і тензора деформацій визначаються незалежно за результатами виміру осьової сили, крутного моменту, видовження, зміни радіуса, кута закручування, то цей тип експерименту служить для дослідження реальних фізичних зв’язків між напруженнями та деформаціями для даного конструкційного матеріалу і даних умов навантаження.

В роботі [1] автором пропонується вплив на міцність металів ультрамікроскопічних дефектів і тріщинок, які можуть бути найбільш ймовірно рівномірно розподілені в матеріалі при його виготовленні і умовно можуть бути розробити на п’ять варіантів форми тріщинок (пустот) представляючих форми найбільш ймовірних дефектів для металів [11]. Пропонується, що міцність під впливом кожного з цих дефектів знижується, а величина найбільшого напруження в основі кожного з них збільшується. В процесі деформування форма вказаних дефектів змінюється і деякі з них становляться або менш небезпечними, або навпаки більш небезпечними [11].

Вихідний стан	I 0 0 0 —
Після розтягування	I I 0 0 0
Після повторно-статичного знакозмінного стискання	0 0 0 0 —
Після зсуву правостороннього	((0 0 (((
Після повторно-статичного знакозмінного зсуву лівостороннього) 0 0)))

Рис. 2. Зміна найбільш ймовірних форм дефектів при різних деформаціях

При статичних навантаженнях ефективні напруження визначаються відношеннями:

Ефективне напруження при розтягуванні за м’якого режиму навантаження $\tilde{\sigma}_+$

$$\tilde{\sigma}_+ = \frac{P_+}{F - F_n} = \frac{P_+}{F(1 - \frac{F_n}{F})} = \frac{\sigma_+}{1 - D_{\sigma_+}} \quad (5)$$

де $D_{\sigma+} = \frac{F_n}{F}$, F – площа поперечного перерізу робочої зони зразка, F_n – площа дефектів в поперечному перетині, $D_{\sigma+}$ – пошкоджуваність матеріалу від різного роду дефектів при статичному розтягуванні, $\sigma_+ = \frac{P}{F}$ – істинне напруження в поперечному перетині.

При повторно-статичному знакозмінному режимі навантаження (режим стискання після попереднього розтягування) ефективні напруження визначаються відношенням:

$$\tilde{\sigma}_- = \frac{P_-}{F - F_n + F_3} = \frac{P_-}{\left[1 - \frac{F_n}{F} \left(1 - \frac{F_3}{F_n}\right)\right] F} = \frac{\sigma}{1 - D_{\sigma} h_{\sigma}} \quad (6)$$

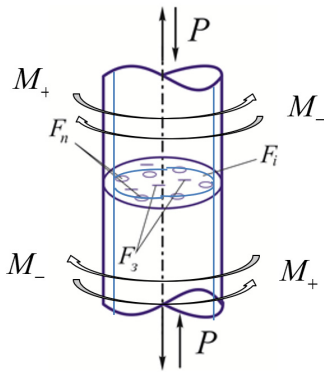


Рис. 3. Схема прямого та повторно-статичного знакозмінного режимів осевого навантаження та Кручення

де $h_{\sigma} = \frac{F_n - F_3}{F_n}$ – коефіцієнти заліковування мікропошкоджень при зміні режиму навантаження на протилежний $0 \leq h_{\sigma} \leq 1$.

Для м'якого режиму навантаження:

$$\tilde{\sigma}_+ = \tilde{\sigma}_-, \text{ тоді } 1 - D_{\sigma+} = 1 - h_{\sigma} D_{\sigma-} \text{ і } h_{\sigma} = \frac{D_{\sigma-}}{D_{\sigma+}} = \frac{\sqrt{E_0} - \sqrt{\tilde{E}_+}}{\sqrt{E_0} - \sqrt{\tilde{E}_-}}; \text{ де}$$

$D_{\sigma-}$ – пошкоджуваність матеріалу від різного роду дефектів при повторно-статичному стисканні; $E_0, \tilde{E}_+, \tilde{E}_-$ – модулі пружності матеріалу на початку випробувань та відповідно при розтягуванні та повторно-змінному стисканні.

По аналогії для зсуву (кручення) при статичному навантаженні ефективні напруження $\tilde{\tau}$ дорівнюють:

$$\tilde{\tau}_+ = \frac{M}{W_k - W_n} = \frac{M}{W_k (1 - W_n / W_k)} = \frac{\tau}{1 - D_{\tau}} \quad (8)$$

де $D_{\tau} = W_n / W_k$, W_n – момент опору поперечного перетину з дефектами різної форми і природи, W_k – момент опору поперечного перетину без дефектів.

При повторно статичному знакозмінному крученні (режим закручування в протилежному напрямі після закручування попередньо за годинниковою стрілкою) ефективні напруження визначаються відношенням:

$$\tilde{\tau}_- = \frac{M_-}{W_k - W_n + W_3} = \frac{M_-}{\left[1 - \frac{W_n}{W_k} \left(1 - \frac{W_3}{W_n}\right)\right] W_k} = \frac{\tau_{-1}}{1 - D_{\tau} h_{\tau}} \quad (9)$$

де $h_{\tau} = \frac{W_n - W_3}{W_n}$ – коефіцієнт заліковування мікропошкоджень при зміні режиму навантаження на протилежний.

Для м'якого режиму навантаження

$$\tilde{\tau}_+ = \tilde{\tau}_-, \text{ тоді } 1 - D_{\tau+} = 1 - h_{\tau} D_{\tau-} \text{ і } h_{\tau} = \frac{D_{\tau-}}{D_{\tau+}} = \frac{\sqrt{G_0} - \sqrt{\tilde{G}_+}}{\sqrt{G_0} - \sqrt{\tilde{G}_-}};$$

де $G_0, \tilde{G}_+, \tilde{G}_-$ – модулі пружності матеріалу на зсув на початку випробувань та відповідно при закручуванні зразка за годинниковою стрілкою і проти неї.

На рис.3 та рис.4 показано графоаналітичне визначення коефіцієнтів заліковування мікропошкоджень при випробуваннях на відрив та зріз за м'якого режиму навантаження:

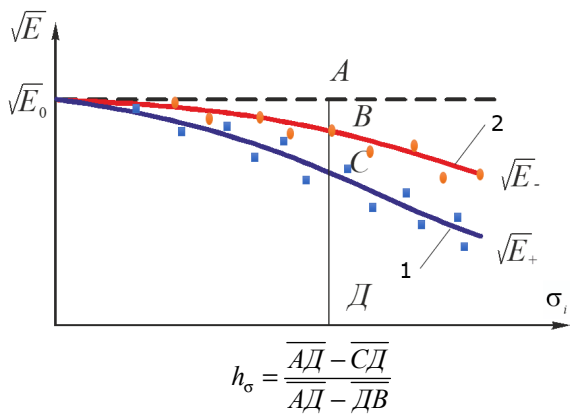


Рис. 4. Графоаналітичне визначення коефіцієнту заліковування при осьових навантаженнях на статичний розтяг (1) і знакозмінне статичне стискання (2)

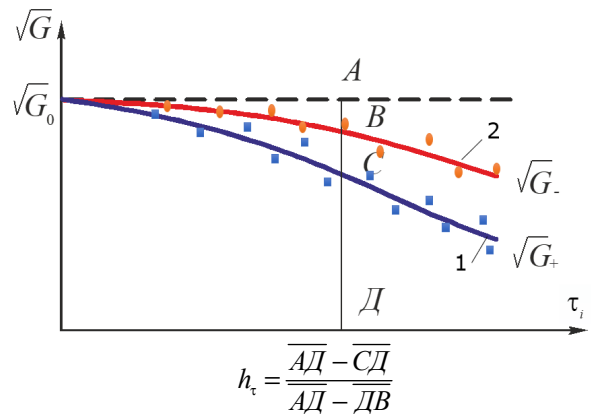
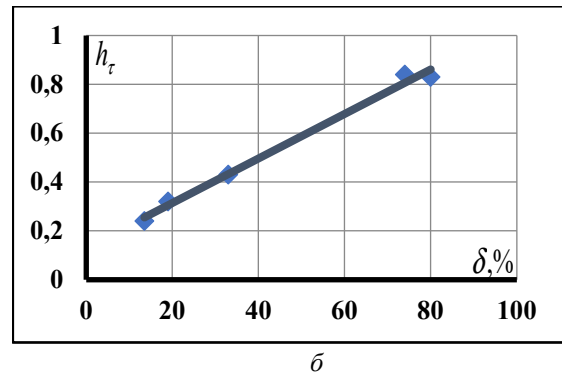
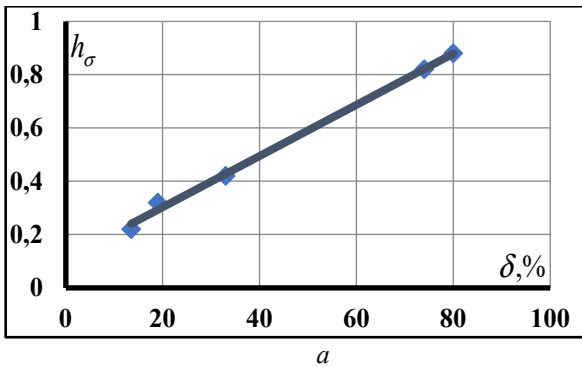


Рис. 5. Графоаналітичне визначення коефіцієнту заліковування при зсуві кручення за годинниковою стрілкою (1) та знакозмінному статичному крученні проти годинникової стрілки (2)

Закон зміни коефіцієнту заліковування при повторно-статичному знакозмінному режимі навантаження для осьового м'якого режиму: $\sigma_p = -\sigma_c$ $h_\sigma = 96 \cdot 10^{-4} \delta + 0.10$. При повторно-статичному знакозмінному зсуві $h_\tau = 91 \cdot 10^{-4} \delta + 0.13$.



$10 \leq \delta \leq 80$

Рис. 6. Залежність величини коефіцієнту заліковування пошкоджень від величини пластичних властивостей матеріалів при навантаженні на відрив - а) та зріз - б)

Таблиця 1. Коефіцієнти заліковування для матеріалів з різними пластичними властивостями

	Розтяг $\sigma_p = -\sigma_c$	Зсув $\tau_n = -\tau_n$	Відносне видовження %
Д16Т	0,22–0,26	0,24–0,28	13,5
Сталь 30ХГСА	0,3–0,32	0,26–0,32	19
Сталь 45	0,42–0,44	0,43–0,49	33
Мідь	0,74–0,78	0,69–0,93	68
12Х18Н10	0,56–0,6	0,66–0,84	69

Висновки

В роботі проведені експериментальні дослідження кінетики накопичення пошкоджень при навантаженні конструкційних матеріалів на відрив та зріз. Отримані графоаналітичні методи розрахунку коефіцієнтів заліковування мікропошкоджень при повторно-статичних

знакозмінних режимах навантажень на відрив та зріз. Приводяться залежності величин коефіцієнтів заліковування від пластичних властивостей матеріалів на відрив та зріз у вигляді функціональних залежностей $h_{\sigma} \leq f(\delta\%)$ та $h_{\tau} \leq f(\delta\%)$ та вигляді експериментальної таблиці (табл.1). Установлено, що величини коефіцієнтів заліковування h_{σ} , h_{τ} , майже лінійно залежать від пластичних властивостей – $\delta\%$.

Список літератури

1. Бобир М.І. Вплив пружно-пластичного деформування на фізикомеханічні характеристики матеріалів / Бобир М.І., Грабовський А.П., Халімон О.П., Тимошенко О.В. / Міжнародний збірник наукових праць Прогресивні технології і системи машинобудування, випуск №32, - 2006, с.9–13.
2. Бобир М.І. Кінетика розсіяного руйнування металевих конструкційних матеріалів при пружно-пластичному деформуванні / М. І. Бобир, А. П. Грабовський, О. П. Халімон, О. В. Тимошенко, О. М. Масло / Проблемы прочности, 2007. – № 3. с. 23–34.
3. Lemaître J. "Damage mechanics"/ The Bath Press, Great Britain, 1990. – 556p;
4. Новожилов В. В. Микронапряжения в конструкционных материалах / Новожилов Валентин Валентинович, Кадашевич Юлий Исаакович. – Л.: Машиностроение, 1990. – 223 с.
5. Новожилов В. В. О пластическом разрыхлении / В. В. Новожилов // ПММ, 1965. №4. С.681–689.
6. Новожилов В. В. Разрыхление и критерий разрушения в условиях ползучести / В. В. Новожилов, Ю. И. Кадашевич, О. Г. Рыбакина// Доклады АН СССР. Т. 270, № 4. С. 831–835.
7. Грабовский А.П., Бондарец А.А. Деформационные модели кинетики повреждаемости конструкционных материалов при упругопластическом деформировании - Вестник Гомельского государственного технического университета им. ПО Сухого, 1 (52) , 2013
8. Трошенко В. Т. Сопротивление материалов деформированию и разрушению: Справочное пособие: В 2-х ч. / В. Т. Трошенко, А. Я. Красовский. В. В. Покровский, Л. А. Сосновский, В. А. Стрижало – Киев: Наук. думка, 1993. – ч.1 – 243 с.; ч.2 – 704 с.,
9. Трошенко В.Т. Механическое поведение материалов при различных видах нагружения / А.А. Лебедев, В.А. Стрижало и др.– К.: Логос, 2000. – 570 с.
10. А. П. Грабовський Модель пошкоджувальності для розрахунку руйнування конструкційних матеріалів / А. П. Грабовський, О. А. Бондарець. І. І. Бабієнко / Mechanics and Advanced Technologies #3 (87), 2019. С.38-46.
11. Ужик Г.В. Сопротивление отрыву и прочность металлов. АН СССР институт машиноведения, изд. Москва, 1950, 255с.

Damage to engineering objects during re-static alternating load modes

Grabovskiy A.P., Bondarets O.A., Babiienko I.I.

Abstract. The paper considers the kinetics of damage accumulation in engineering facilities that operate under repeated static alternating load modes - parts and structural elements of vehicles (cars, airplanes, railways). When changing the direction of the load force in the structural material there is a phenomenon of changing the shape of micro defects, which leads to their "healing", ie the factor of damage to separation and shear changes, which affects the effective stresses and service life of equipment. This effect of defect healing is considered experimentally for materials with different plastic properties.

Keywords: damage, model, anisotropy.