

Кінетика пошкоджуваності матеріалів при різних режимах повторно-змінних навантажень

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

Received: 23 October 2021 / Accepted: 24 November 2021

Проблематика. Кінетика накопичення пошкоджень в інженерних об'єктах, які працюють при повторно-змінних м'якого та жорсткого режимів навантажень деталей та елементів конструкцій транспортних.

Мета. Визначення коефіцієнтів заліковування мікропошкоджень при випробуваннях на відрив та зріз за м'якого та жорсткого режиму навантаження для зразків сталі 12Х18Н10Т.

Методика реалізації. При зміні напрямку зусилля навантаження на протилежний в конструкційному матеріалі виникає явище зміни кінетики накопичення пошкоджень, тобто фактор пошкодження на відрив та зріз змінюється, що впливає на ефективні напруження і на ресурс роботи обладнання. Цей ефект фактора впливу повторно-змінних режимів на перерозподіл кінетики накопичення пошкоджень розглядається експериментально для матеріалів з різними пластичними властивостями.

Результати. Отримані результати експериментальних досліджень визначення коефіцієнтів заліковування мікропошкоджень при жорсткому і м'якому режимів повторно-змінного навантаження на відрив та зріз та залежності величин коефіцієнтів заліковування на відрив та зріз для матеріалів з різними пластичними властивостями.

Ключові слова: кінетика пошкодження; інженерні об'єкти; м'який та жорсткий режим навантаження; фактор пошкодження; ресурс роботи обладнання.

Вступ

Багато деталей і вузлів інженерних об'єктів залізничного, автомобільного та авіаційного транспорту працюють в режимах повторно-змінних навантажень. Розрахункова оцінка довговічності, виробленого і залишкового ресурсу конструктивних елементів, які працюють в умовах знакозмінних 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 [1–4]. З цієї причини до теперішнього часу виконані багаточисельні експерименти по виявленню основних закономірностей про-

цесів кінетики накопичення пошкоджень в конструкційних матеріалах при різних режимах термомеханічного навантаження [5–8].

Формулювання моделей процесів формування і їх верифікація проводились на базі аналізу результатів експериментальних досліджень процесів навантажень лабораторних зразків, які відповідають експлуатаційним умовам роботи конструкційних матеріалів у складі конструктивних елементів [9–12].

Деградація фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів при повторно-змінних навантаженнях

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 – $\Delta\varphi$ робочої зони зразка.

✉ І.І. Бабієнко
mmi_2@ukr.net

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

При наявності однорідних полів напружень та деформацій в робочій зоні зразка компоненти тензора напружень (1) та деформацій (2) визначаються формулами:

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

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

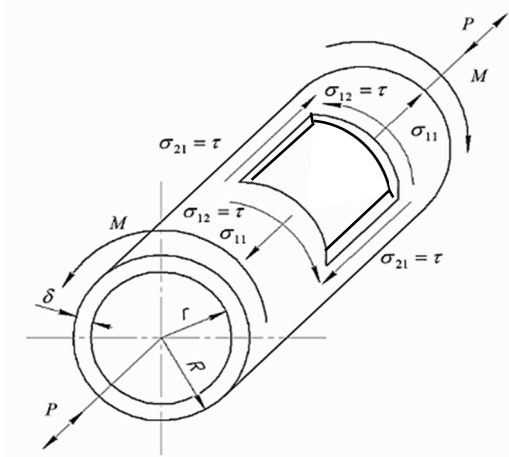


Рис. 1. Схема навантаження на повторно-змінні зусилля на відрив та зріз (кручення) робочої зони зразка з відповідним розподіленням напружень

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

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

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

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.

Пропонується вплив на міцність металів ультрамікроскопічних дефектів, які найбільш ймовірно рівномірно розподілені в матеріалі при його виготовленні [1]. В процесі деформування форма вказаних дефектів змінюється і з'являються структурні зміни та фізичні флуктуації в матеріалі.

М'який режим навантаження

Осьове навантаження $\sigma_{11} = \sigma_{33}$ та зсув (кручення) $\tau_{21} = \tau_{12}$ при м'якому режимі навантаженні. 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, $D_{\sigma+}$ – пошкодженість матеріалу від різного роду дефектів при статичному розтягуванні.

$$D_{\sigma+} = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}_+}{E_0}}, \quad D_{\sigma-} = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}_-}{E_0}}, \quad (6)$$

\tilde{E}_+ – поточна величина модуля пружності при розтягуванні зразка матеріалу;

E_0 – початковий модуль пружності матеріалу;

\tilde{E}_- – модуль пружності матеріалу при повторно-змінному стисканні;

$\sigma_+ = \frac{P}{F}$ – істинне напруження в поперечному перетині.

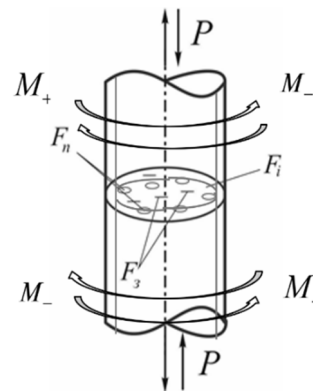


Рис. 2. Схема повторно-змінних режимів осьового навантаження та кручення

При повторно-змінному режимі стискання ефективні напруження визначаються відношенням:

$$\tilde{\sigma}_- = \frac{P_-}{F - F_n + F_3} = \frac{P_-}{\left[1 - \frac{F_n}{F} \left(1 - \frac{F_3}{F_n}\right)\right] F} = \frac{\sigma}{1 - D_\sigma h_\sigma}, \quad (7)$$

де $h_\sigma = \frac{F_n - F_3}{F_n}$ – коефіцієнти заліковування мікропошкоджень при зміні режиму навантаження на протилежний $0 \leq h_\sigma \leq 1$, F_3 – площа мікропошкоджень в результаті їх ймовірної зміни повторно-змінних навантажень.

Для м'якого режиму навантаження:

$$\tilde{\sigma}_+ = \tilde{\sigma}_-, \text{ тоді } 1 - D_{\sigma+} = 1 - h_\sigma D_{\sigma-} \text{ і}$$

$$h_\sigma = \frac{D_{\sigma-}}{D_{\sigma+}} = \frac{\sqrt{E_0} - \sqrt{\tilde{E}_+}}{\sqrt{E_0} - \sqrt{\tilde{E}_-}}, \quad (8)$$

де $D_{\sigma-}$ – пошкоджуваність матеріалу від різного роду дефектів при повторно-змінному стисканні;

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

$$\tilde{\tau}_+ = \frac{M}{W_k - W_n} = \frac{M}{W_k(1 - W_n/W_k)} = \frac{\tau}{1 - D_\tau}, \quad (9)$$

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-змінному крученні ефективні напруження визначаються відношенням:

$$\tilde{\tau}_- = \frac{M_-}{W_k - W_n + W_3} = \frac{M_-}{\left[1 - \frac{W_n}{W_k} \left(1 - \frac{W_3}{W_n}\right)\right]} = \frac{\tau_{-1}}{1 - D_\tau h_\tau}, \quad (10)$$

де $h_\tau = \frac{W_n - W_3}{W_n}$ – коефіцієнт заліковування мікропошкоджень при зміні режиму навантаження на протилежний, $0 \leq h_\tau \leq 1$, W_3 – момент опору поперечного перетину в результаті ймовірної зміни мікропошкоджень при повторно-змінних навантаженнях.

Для м'якого режиму навантаження

$$\tilde{\tau}_+ = \tilde{\tau}_-, \text{ тоді } 1 - D_{\tau+} = 1 - h_\tau D_{\tau-} \text{ і}$$

$$h_\tau = \frac{D_{\tau-}}{D_{\tau+}} = \frac{\sqrt{G_0} - \sqrt{\tilde{G}_+}}{\sqrt{G_0} - \sqrt{\tilde{G}_-}},$$

$$D_{\tau+} = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{G}_+}{G_0}}; D_{\tau-} = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{G}_-}{G_0}}, \quad (11)$$

де $D_{\tau-}$ і $D_{\tau+}$ – пошкоджуваність матеріалу при зсуві та повторно-змінному зсуві, $G_0, \tilde{G}_+, \tilde{G}_-$ – модулі пружності матеріалу на зсув на початку випробувань та відповідно при зсуві та повторно-змінному зсуві.

На рис. 3–4 показано графоаналітичне визначення коефіцієнтів заліковування мікропошкоджень при випробуваннях на відрив та зріз за м'якого режиму навантаження для зразків сталі 12X18H10T.

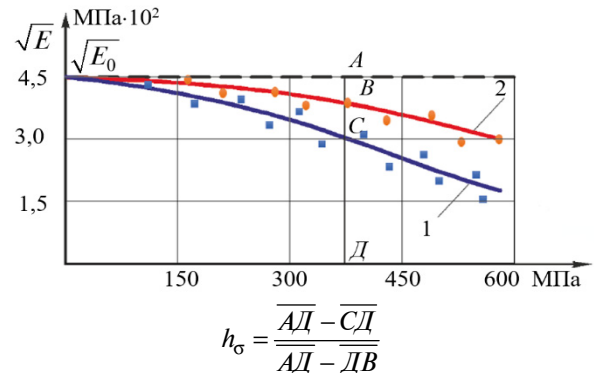


Рис. 3. Визначення коефіцієнту заліковування мікропошкоджень при умові м'якого повторно-змінного осьового навантаження: 1 – статичний розтяг ($\sqrt{E_+}$); 2 – повторно-змінне статичне стискання ($\sqrt{E_-}$) для зразків сталі 12X18H10T

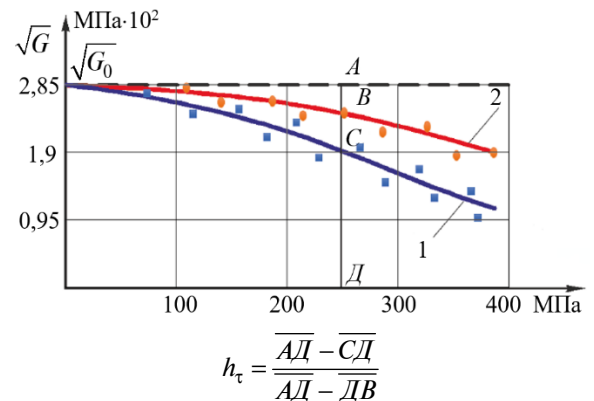


Рис. 4. Визначення коефіцієнта заліковування мікропошкоджень при умові м'якого повторно-змінного зсуву: 1 – статичний зсув (кручення) ($\sqrt{G_+}$); 2 – знакозмінний статичний зсув (кручення) ($\sqrt{G_-}$) для зразків сталі 12X18H10T

Жорсткий режим навантаження

Осьове навантаження $\epsilon_{11} = \epsilon_{33}$, зсув (кручення) $\epsilon_{21} = \epsilon_{12}$. Величина пошкоджуваності $D_{\sigma+}$ при розтягуванні визначається відношенням [4–6]:

$$D_{\sigma+} = \frac{V_i - V_0}{V_i} = 1 - \frac{V_0}{V_i} = 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_n} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_+}. \quad (12)$$

Звідки:

$$\varepsilon_+ = \frac{D_{\sigma+}}{1 - D_{\sigma+}}, \quad (13)$$

де V_0, V_i – об’єм репрезентативного елемента відповідно на початку випробувань та поточна його зміна при випробуваннях;

ΔV_n – зміна об’єму репрезентативного елемента за рахунок розпушення матеріалу, викликаного його пошкоджуваністю;

$$\varepsilon_+ = \frac{\Delta V_n}{V_0} - \text{відносна деформація за рахунок пошкоджень при розтягуванні; } V_i = V_0 + \Delta V_n.$$

При повторно-змінному стисканні величина пошкоджуваності $D_{\sigma-}$ визначається відношенням:

$$D_{\sigma-} = 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_n - \Delta V_3} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\Delta V_n}{V_0} \left(1 - \frac{\Delta V_3}{\Delta V_n}\right)} = 1 - \frac{1}{1 + \varepsilon_- h_\sigma}; \quad (14)$$

де $h_\sigma = \frac{\Delta V_n - \Delta V_3}{\Delta V_n}$ – коефіцієнт заліковування пошкоджень при повторно-змінному стисканні, ΔV_3 – зміна величини об’єму репрезентативного елемента розпушеного матеріалу за рахунок повторно-змінного навантаження, ε_- – величина деформації в матеріалі при повторно-статичному знакозмінному стисканні.

$$\varepsilon_- = \frac{D_{\sigma-}}{h_\sigma(1 - D_{\sigma-})}. \quad (15)$$

При умові жорсткого повторно-змінного режиму осевого навантаження $\varepsilon_+ = \varepsilon_-$ ($\varepsilon_{11} = \varepsilon_{33}$) коефіцієнт заліковування пошкоджень h_σ дорівнює:

$$h_\sigma = \frac{D_{\sigma-}(1 - D_{\sigma+})}{D_{\sigma+}(1 - D_{\sigma-})}. \quad (16)$$

З врахуванням співвідношень (6) отримаємо

$$h_\sigma = \frac{\sqrt{\tilde{E}_+}(\sqrt{E_0} - \sqrt{\tilde{E}_-})}{\sqrt{\tilde{E}_-}(\sqrt{E_0} - \sqrt{\tilde{E}_+})}; \quad 0 \leq h_\sigma < 1. \quad (17)$$

Деформація чистого зсуву репрезентативного елемента при зсуві (крученні) характеризується зміною його початкових прямих кутів при навантаженні

(рис. 5), що визначає відношення зміни об’єму репрезентованого елемента за рахунок пошкоджуваності при зсуві до його початкової величини $V_0 \frac{\gamma}{2} = \frac{\Delta V_n}{V_0}$.

Кут γ на який змінюється початковий прями кут характеризує відносний зсув $\gamma = \angle BAB_1$ з трикутника BAB_1 маємо $tg \gamma = \frac{\Delta S}{a} \approx \gamma$.

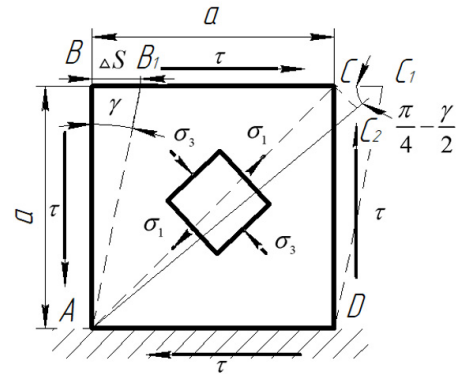


Рис. 5. Схема деформування репрезентативного елемента при зсуві (крученні)

Подовження діагоналі AC довжиною $l = a\sqrt{2}$

$$\Delta l = C_1C_2 = CC_1 \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\gamma}{2}\right) \approx CC_1 \cos 45^\circ = \Delta S / \sqrt{2},$$

тоді відносно видовження діагоналі AC :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta S}{\sqrt{2}a\sqrt{2}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta S}{a} \approx \frac{\gamma}{2}.$$

Пошкодження при зсуві (крученні) $D_{\tau+}$ характеризується переміщенням діагоналей AC та BD на величину $\Delta S = \varepsilon = \frac{\gamma}{2}$, визначається відношенням:

$$D_{\tau+} = \frac{V_i - V_0}{V_i} = 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_+} = 1 - \frac{V_0}{V_0 + \varepsilon_+} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\gamma_+}{2}}. \quad (18)$$

При повторно-змінному зсуві величина пошкоджуваності $D_{\tau-}$ визначається відношенням:

$$D_{\tau-} = 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_n - \Delta V_3} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\Delta V_n}{V_0} \left(1 - \frac{\Delta V_3}{\Delta V_n}\right)} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\Delta V_n}{V_0} h_\tau} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\gamma_-}{2} h_\tau} \quad (19)$$

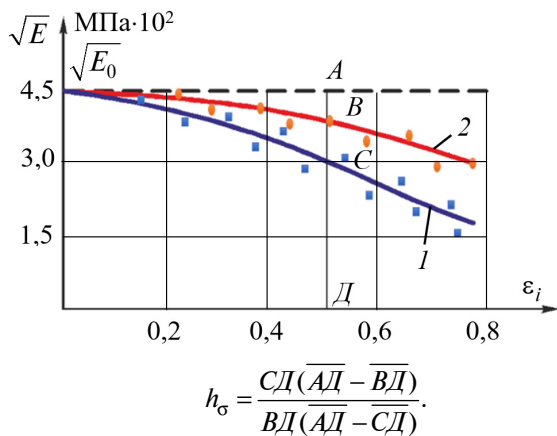


Рис. 6. Визначення коефіцієнту заліковування мікропошкоджень при умові жорсткого повторно-змінного осьового навантаження зразків сталі 12Х18Н10Т: 1 – статичний розтяг ($\sqrt{E_+}$); 2 – повторно-змінне статичне стискання ($\sqrt{E_-}$)

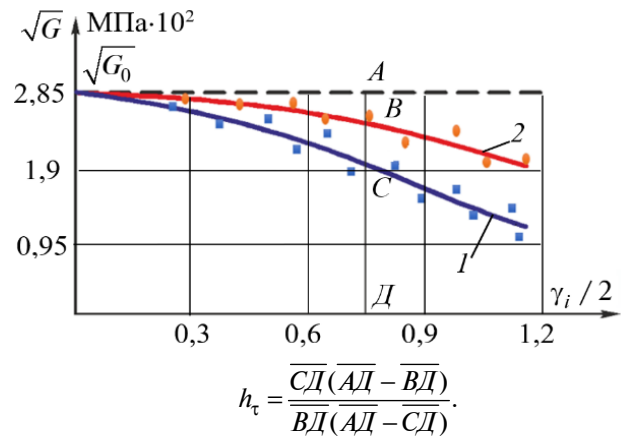


Рис. 7. Визначення коефіцієнту заліковування мікропошкоджень при умові жорсткого повторно-змінного зсуву (кручення) зразків сталі 12Х18Н10Т: 1 – статичний зсув (кручення) ($\sqrt{G_+}$); 2 – знакозмінний статичний зсув (кручення) ($\sqrt{G_-}$)

Таблиця 1. Коефіцієнти заліковування матеріалів з різними пластичними властивостями

| | Коефіцієнт заліковування h_σ | | Коефіцієнт заліковування h_τ | | Відносне видовження % |
|----------|-------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|------------------------|-----------------------|
| | $\sigma_p = -\sigma_c$ | $\epsilon_p = -\epsilon_c$ | $\tau_n = -\tau_d$ | $\gamma_n = -\gamma_d$ | |
| Д16Т | 0,22–0,26 | 0,28–0,32 | 0,24–0,28 | 0,21–0,27 | 13,5 |
| 30ХГСА | 0,3–0,32 | 0,23–0,27 | 0,26–0,32 | 0,24–0,29 | 19 |
| Сталь 45 | 0,42–0,44 | 0,35–0,39 | 0,43–0,49 | 0,36–0,41 | 33 |
| Мідь | 0,74–0,88 | 0,62–0,78 | 0,69–0,93 | 0,71–0,79 | 68 |
| 12Х18Н10 | 0,56–0,66 | 0,6–0,68 | 0,66–0,48 | 0,61–0,76 | 69 |

де $h_\tau = \frac{\Delta V_{n-} - \Delta V_3}{\Delta V_{n-}} = 1 - \frac{\Delta V_3}{\Delta V_{n-}}$ – коефіцієнт заліковування пошкоджень при повторно-змінному зсуві.

ΔV_{n+} – зміна об'єму репрезентативного елемента за рахунок пошкоджуваності при зсуві $\frac{\Delta V_{n+}}{V_0} = \frac{\gamma_+}{2}$.

ΔV_{n-} – зміна об'єму репрезентативного елемента за рахунок пошкоджуваності при повторно-змінному зсуві $\frac{\Delta V_{n-}}{V_0} = \frac{\gamma_-}{2}$.

За умови жорсткого повторно-змінного зсуву $\gamma_+ = \gamma_-(\epsilon_{12} = \epsilon_{21})$ коефіцієнт заліковування h_τ дорівнює:

$$h_\tau = \frac{D_{\tau-}(1 - D_{\tau+})}{D_{\tau+}(1 - D_{\tau-})} \quad (20)$$

З врахуванням співвідношень (11) отримаємо:

$$h_\tau = \frac{\sqrt{\tilde{G}_+}(\sqrt{G_0} - \sqrt{\tilde{G}_-})}{\sqrt{\tilde{G}_-}(\sqrt{G_0} - \sqrt{\tilde{G}_+})}; \quad 0 \leq h_\tau < 1. \quad (21)$$

На рис. 6–7 показано графоаналітичне визначення коефіцієнтів заліковування мікропошкоджень при випробуваннях зразків сталі 12Х18Н10Т на відрив та зріз за жорсткого режиму навантаження.

В таблиці 1 приведені експериментальні результати визначення коефіцієнтів заліковування мікропошкоджень на відрив та зріз для м'якого та жорсткого режимів повторно-змінних режимів навантаження для матеріалів з різними пластичними властивостями.

На рис. 8–9 показані криві залежності коефіцієнтів заліковування при повторно-змінних осьовому навантаженні та зсуві для м'якого (крива 1) та жорсткого (крива 2) режимів деформування від величини пластичних властивостей конструкційних матеріалів – $\delta(\%)$.

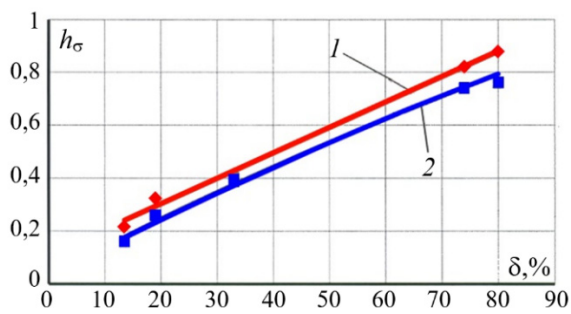


Рис. 8. Залежність коефіцієнту заліковування мікропошкоджень від пластичних властивостей матеріалів при осьовому повторно-змінному навантаженні: 1 – м'який режим навантаження, 2 – жорсткий режим навантаження

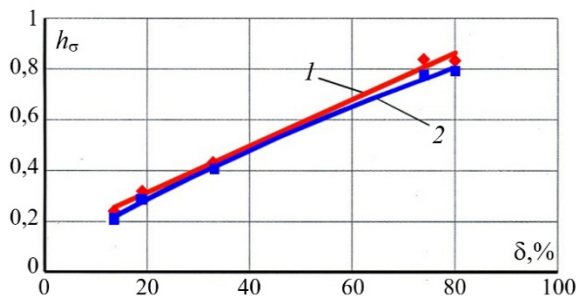


Рис. 9. Залежність коефіцієнту заліковування мікропошкоджень від пластичних властивостей матеріалів при повторно-змінному зсуві (крученні): 1 – м'який режим навантаження, 2 – жорсткий режим навантаження

Отримані залежності для визначення коефіцієнтів заліковування мікропошкоджень від пластичних властивостей матеріалів в діапазоні відносних деформацій $10\% \leq \delta \leq 80\%$ для м'якого режиму навантаження:

$$h_{\sigma} = 96 \cdot 10^{-4} \delta + 0,1; h_{\tau} = 91 \cdot 10^{-4} \delta + 0,13. \quad (24)$$

Для жорсткого режиму навантаження:

$$h_{\sigma} = 199 \cdot 10^{-4} \delta^{0,8} + 0,1; h_{\tau} = 313 \cdot 10^{-4} \delta^{0,7}. \quad (25)$$

Висновки

В роботі розглядається експериментальні дослідження визначення коефіцієнтів заліковування мікропошкоджень при жорсткому і м'якому режимів повторно-змінного навантаження на відрив та зріз для зразків сталі 12X18H10T. Приводяться результати експериментальних досліджень коефіцієнтів заліковування мікропошкоджень при м'якому та жорсткому режимах повторно-змінного навантаження на відрив та зріз для матеріалів з різними пластичними властивостями. Отримані залежності величин коефіцієнтів заліковування на відрив та зріз для матеріалів з різними пластичними властивостями у вигляді функціональних залежностей $h_{\sigma} \leq f(\delta\%)$ та $h_{\tau} \leq f(\delta\%)$. Установлено, що величини коефіцієнтів заліковування h_{σ} та h_{τ} , майже лінійно зростають з ростом пластичних властивостей конструктивних матеріалів.

References

- [1] M.I. Bobyr *et al.*, "Vplyv pruzhno-plastychnoho deformuvannya na fizykomekhanichni kharakterystyky materialiv", in *Proc. Mizhnarodnyi zbirnyk naukovykh prats Prohresyvi tehnologii i systemy mashynobuduvannya*, Vol. 32, 2006, pp. 9–13.
- [2] M.I. Bobyr *et al.*, "Kinetyka rozsiianoho ruinyuvannya metalevykh konstruksiiynykh materialiv pry pruzhno-plastychnomu deformuvanni", *Strength of Materials*, Vol. 3, 2007, pp. 23–34.
- [3] N.I. Bobyr' and V.V. Koval', "Damage Contribution to the Assessment of the Stress-Strain State of Structure Elements," *Strength of Materials*, 49 (3), 2017, pp. 361–368. doi: 10.1007/s11223-017-9876-2
- [4] J. Lemaitry, *Damage mechanics*, The Bath Press, Great Britain, 1990, 556p.
- [5] V.V. Novozhilov *et al.*, *Mikronapryazheniya v konstruksionnykh materialakh*, Leningrad: Mashinostroenie, 1990.
- [6] V.V. Novozhilov, "O plasticheskom razrykhlenii," *PMM*, Vol. 4, 1965, pp.681–689.
- [7] V.V. Novozhilov *et al.*, "Razrykhlenie i kriterii razrusheniya v usloviyakh polzuchesti," in *Doklady AN SSSR*. Vol. 270, No. 4. pp. 831-835.
- [8] A.P. Grabovskii and A.A. Bondarets, "Deformatsionnye modeli kinetiki povrezhdaemosti konstruksionnykh materialov pri uprugoplasticheskom deformirovanii," *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P.O. Sukhogo*, No. 1 (52), 2013.
- [9] A.P. Grabovskii *et al.*, "Damage to engineering objects during re-static alternating load modes," in *Proc. XXII International Scientific and Technical Conference "Progressive Engineering, Technology and Engineering Education"*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.20535/2409-7160.2021.XXII.240400>
- [10] V.T. Troshchenko *et al.*, *Soprotivlenie materialov deformirovaniyu i razrusheniyu: Spravochnoe posobie*, V 2-kh ch., Kiev: Nauk. dumka, 1993.
- [11] V.T. Troshchenko *et al.*, *Mekhanicheskoe povedenie materialov pri razlichnykh vidakh nagruzheniya*, Kyiv: Logos, 2000.
- [12] O. Bondarets *et al.*, "Damage model for calculating the failure of structural materials", *Mech. Adv. Technol.*, no. 3(87), 2019, pp. 38–46. DOI: 10.20535/2521-1943.2019.87.189812

Kinetics of Damage of Materials Under Various Regimes of Re-Changeable Loads

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

Background. Kinetics of accumulation of damages in engineering objects, which work at repeated-variable soft and hard modes of loading of details and elements of constructions of vehicles (cars, planes, railway transport, etc.).

Objective. Determination of the coefficients of healing of microdamages in tests for separation and shear under soft and hard load conditions for steel samples 12X18H10T.

Methods. When changing the direction of the load force to the opposite in the structural material there is a phenomenon of changing the kinetics of accumulation of damage, ie the factor of damage to tear and cut changes, which affects the effective stresses and service life of equipment. This effect of the factor of the influence of repeated variables on the redistribution of the kinetics of damage accumulation is considered experimentally for materials with different plastic properties.

Conclusions. The results of experimental studies to determine the healing coefficients of microdamages in hard and soft modes of re-alternating load on separation and shear and the dependence of the values of the healing coefficients on separation and shear for materials with different plastic properties.

Keywords: damage kinetics; engineering facilities; soft and hard load mode; damage factor; equipment life.

Кинетика поврежденности материалов при различных режимах повторно-переменных нагрузок

А.П. Грабовский, А.А. Бондарец, И.И. Бабиенко

Проблематика. Кинетика накопления повреждений в инженерных объектах, работающих при повторно-переменных режимах мягкого и жесткого режимов нагрузок деталей и элементов конструкций транспортных средств (автомобили, самолеты, железнодорожный транспорт и т.п.).

Цель. Определение коэффициентов заживления микрповреждений при испытаниях на отрыв и срез при мягком и жестком режиме нагрузки для образцов стали 12X18H10T.

Методика реализации. При изменении направления усилия нагрузки на противоположное конструкционному материалу возникает явление изменения кинетики накопления повреждений, то есть фактор повреждения на отрыв и срез изменяется, что влияет на эффективные напряжения и на ресурс работы оборудования. Этот эффект фактора влияния повторно-переменных режимов на перераспределение кинетики накопления повреждений рассматривается экспериментально для материалов с различными пластическими свойствами.

Выводы. Получены результаты экспериментальных исследований в определении коэффициентов заживления микрповреждений при жестком и мягком режимах повторно-переменной нагрузки на отрыв и срез. Получены зависимости величин коэффициентов заживления на отрыв и срез для материалов с различными пластическими свойствами.

Ключевые слова: кинетика повреждений; инженерные объекты; мягкий и жесткий режим нагрузки; фактор повреждения; ресурс работы оборудования.