

УДК 539.4+620.1

Грабовський А.П., к.т.н., доц., Бабієнко І.І., Бондарець О.А.
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м.Київ, Україна

КІНЕТИКА НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ПРИ ПОВТОРНО-ЗМІННОМУ ОСЬОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Grabovskij A., Babiyenko I., Bondarets O.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (mmi_2@ukr.net)

KINETIC OF DAMAGE ACCUMULATION IN REPEATED-VARIABLE THE AXIAL LOAD OF STRUCTURAL MATERIALS

В роботі розглядається заліковування мікропошкоджень при прямому – розтягування та зворотному – стиснення за м'якого та жорсткого режимів пружнопластичного навантаження. Отримані методики визначення коефіцієнта заліковування за прямого розтягування та зворотного стиснення та отримані експериментальні результати визначення коефіцієнта заліковування пошкоджень для ряду конструкційних матеріалів – Д16Т, сталь 30ХГСА, сталь 45, мідь, сталь 12Х18Н10Т. Установлено, що коефіцієнти заліковування являються майже постійними величинами для матеріалів на всьому етапі пружнопластичного навантаження до руйнування і залежить від їх пластичних властивостей. Слід відзначити, що для малопластичних матеріалів коефіцієнти заліковування менші в порівнянні з високопластичними матеріалами. При жорсткому режимі навантаження коефіцієнти заліковування менші в порівнянні з м'яким режимом навантаження. Пропонуються узагальнені криві для визначення коефіцієнта заліковування при пружнопластичному розтягуванні і зворотному стисненні для матеріалів з різними пластичними властивостями.

Ключові слова: коефіцієнт заліковування, прямий розтяг, зворотне стиснення, м'яке навантаження, жорстке навантаження.

Вступ. Одне із основних завдань сучасного машинобудування заключається в обґрунтуванні ресурсу обладнання і систем інженерних об'єктів на стадії їх проектування, оцінка виробленого і прогнозування залишкового ресурсу конструктивних вузлів в процесі експлуатації об'єктів, продовження терміну служби після відпрацювання об'єктами нормативного терміну.

За критерій оцінки несучої спроможності конструкційних матеріалів в умовах різних режимів експлуатації деталей і конструкцій приймається пошкоджуваність матеріалу. Вона характеризує зміну його первинної структури – зародження, розвиток і злиття пор, утворення мікротріщин і текстури, фізичну і хімічну флуктуації в матеріалі, що приводить до змін фізико-механічних властивостей матеріалів при напруженні (модуль пружності E та G , електропровідності, магнітної проникності, щільності і інших показників) [4, 5, 6].

Структурна інтерпретація кінетики деформування і руйнування твердих тіл дозволила виявити глибокий взаємозв'язок пластичної деформації матеріалу з характеристиками кінетики накопичення мікропошкоджень. Структурний аналіз процесу кінетичного деформування і накопичення мікропошкоджень в матеріалах показав, що всі елементарні акти процесів можна умовно розділити на дві стадії, які відрізняються кінетичними закономірностями.

Перша стадія, яка становить 80 ÷ 90 % ресурсу експлуатації обладнання пов'язана з зародженням і накопиченням різного роду мікроефектів, що обумовлюють накопичення в деформованих об'ємах прихованої енергії і контролюють процеси деформаційного зміцнення і кінетики накопичення об'ємної розсіяної пошкоджуваності матеріалу. Перша стадія не відображається на макроскопічній суцільності матеріалу. При досягненні на деякій ділянці критичної концентрації зародкових дефектів, проходить їх злиття, укріплення, що приводить до появи локальних макротріщин. Поява макротріщин приводить до другої стадії кінетичного деформування – розповсюдження тріщин [7].

Практикою встановлено, що при зворотних режимах пружнопластичного навантаження - «розтягування – стиснення», «реверсивне кручення» в структурах конструкційних матеріалів відбувається часткове заліковування дефектів, що приводить до поліпшення фізико-механічних властивостей - модуль пружності E та G , електропровідності токопровідних матеріалів і інших властивостей. Зміна фізико- механічних властивостей відбувається за рахунок геометричної переорієнтації мікропустот різної форми, зникнення

мікроскопічних дефектів на атомному рівні, переорієнтування вакансій і дислокацій в початкове положення і інших структурних змін в матеріалі.

Якщо розглядати утворення мікропошкоджень при пружнопластичному навантаженні, то можна виділити п'ять варіантів форми мікротріщин (мікропустот) представляючи форми найбільш ймовірних дефектів, які зустрічаються в конструкційних матеріалах [3], що показані на рис.1.

В процесі зворотнього навантаження форма дефектів міняється так, що вони стають менш небезпечними (другий ряд на рис.1) для зниження міцності. Як видно, найбільше напруження, яке визване кожним дефектом, повинне зменшитись після зміни його форми при зворотньому навантаженні. Тому при зворотніх навантаженнях спостерігається експериментальне збільшення модулів пружності і поліпшують інші фізико-механічні властивості.

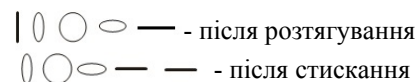


Рис. 1. Трансформація найбільш ймовірних форм дефектів при різних деформаціях

М'який режим повторно-змінного навантаження

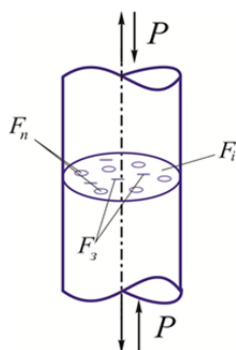


Рис. 2. Схема зміни розмірів істинної площі поперечного перерізу з врахуванням пошкоджуваності і її заліковування

При пружнопластичному розтягуванні ефективне напруження $\tilde{\sigma}_+$ дорівнює [1, 2]:

$$\sigma_+ = \frac{P_+}{F_i - F_n} = \frac{P_+}{F_i(1 - \frac{F_n}{F_i})} = \frac{\sigma_+}{1 - D_\sigma^+} = \frac{\sigma_+}{1 - D_\sigma} \quad (1)$$

де P_+ - осьова сила при розтягуванні

F_i - поточна площа поперечного перерізу

F_n - сумарна площа мікродефектів в перерізі

F_3 - площа залікованих мікропошкоджень при зворотньому навантаженні

$D_{\sigma^+} = \frac{F_n}{F}$ - параметр пошкоджуваності матеріалу при пружнопластичному осьовому розтягуванні

σ_+ - істинне напруження розтягу в матеріалі без врахування пошкодження

При пружнопластичному зворотньому стисканні ефективне напруження $\tilde{\sigma}_-$ дорівнює

$$\tilde{\sigma}_- = \frac{P_-}{F_i - F_n + F_3} = \frac{P_-}{[1 - \frac{F_n}{F_i}(1 - \frac{F_3}{F_n})]F_i} = \frac{\sigma_-}{1 - D_\sigma^- h_\sigma} \quad (2)$$

де $h_\sigma = \frac{F_n - F_3}{F_n}$ - параметр заліковування пошкоджень при зворотньому навантаженні

При м'якому режимі навантаженні істинні та ефективні напруження при розтягуванні $\sigma_+, \tilde{\sigma}_+$ дорівнюють істинним та ефективним напруженням при стисканні G_-, \tilde{G}_-

Із рівнянь (1) та (2), маємо:

$$D_\sigma^+ = h_\sigma D_\sigma$$

Звідки

$$h_\sigma = \frac{D_\sigma^-}{D_\sigma^+} \quad (3)$$

Враховуючи, що параметри кінетики накопичення пошкодження матеріалу при осьовому навантаженні виражаються через поточні модулі пружності при розтягуванні \tilde{E}_+ та стисканні \tilde{E}_- - відношеннями[8]:

$$D_\sigma^+ = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}_+}{E_0}} \quad \text{та} \quad D_\sigma^- = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}_-}{E_0}} \quad (4)$$

із відношення (3) з врахуванням рівнянь (4) параметр заліковування пошкоджень, дорівнює:

$$h_\sigma = \frac{\sqrt{E_0} - \sqrt{\tilde{E}_-}}{\sqrt{E_0} - \sqrt{\tilde{E}_+}} \quad (5)$$

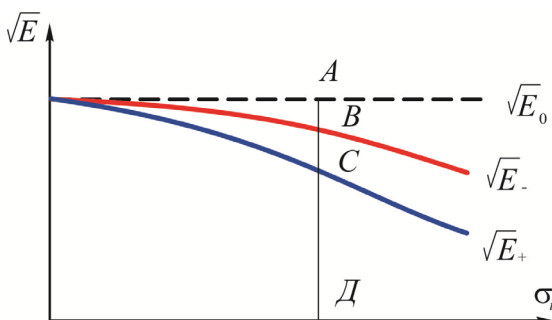


Рис. 3. Кінетика зміни модулів пружності при м'якому осьовому пружнопластичному повторно-змінному навантаженні

де E_0 – початковий модуль пружності матеріалу без врахування пошкоджень при пружнопластичному повторно-змінному деформуванні. Графічно величини модулів пружності при м'якому режимі пружнопластичного навантаження представлені в координатах $\sqrt{E} = f(\epsilon_i)$ на рис.3

Співвідношення (5) за результатами графічного зображення, при фіксованому напруженні, згідно рис.3 представляється відповідними відрізками:

$$h_\sigma = \frac{AD - BD}{AD - CD} = \frac{AB}{AC}; \quad (6)$$

Жорсткий режим повторно-змінного навантаження

При осьовому прямому розтягуванні і зворотньому пружнопластичному стисканні змінюється мікрооб'єм виділеного одиничного елемента (ВОЕ) з першопочаткової величини V_0 до поточної величини V_i^+ при розтягуванні і величини V_i^- - при стисканні.

Поточні величини зміни мікрооб'єму при розтягуванні та стисканні, відповідно дорівнюють

$$V_i^+ = V_0 + \Delta V_n$$

$$V_i^- = V_0 + \Delta V_n - \Delta V_3 \quad (7)$$

де ΔV_n - приріст мікрооб'єму V_0 на величину об'єму мікропошкоджень $-\Delta V_n$

ΔV_3 - об'єм залічених мікропошкоджень при зворотньому стисканні.

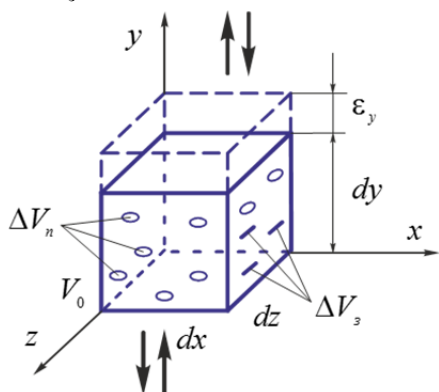


Рис. 4. Схема зміни об'єму ВОЕ з врахуванням пошкоджуваності і її заліковування при зворотньому навантаженні

Пошкодження при осьовому навантаженні, що виражаються через зміни мікрооб'ємів (7) характеризуються відношеннями :

при розтягуванні

$$D_\sigma^+ = \frac{V_i - V_0}{V_i^+} = 1 - \frac{V_0}{V_i^+} = 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_n}; \quad (8)$$

при стисканні

$$D_\sigma^- = \frac{V_i - V_0}{V_i^-} = 1 - \frac{V_0}{V_i^-} = 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_n - \Delta V_3}; \quad (9)$$

Кінетика накопичення пошкоджень при розтягуванні (8) та зворотньому стисканні (9) через відносні деформації при розтягуванні - ϵ_y^+ та при стисканні ϵ_y^- по осі y пружнопластичного деформування дорівнюють:

$$D_\sigma^+ = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\Delta V_n}{V_0}} = 1 - \frac{1}{1 + \epsilon_y^+}; \quad (10)$$

$$D_\sigma^- = 1 - \frac{1}{1 + \frac{\Delta V_n}{V_0} (1 - \frac{\Delta V_3}{\Delta V_n})} = 1 - \frac{1}{1 + \epsilon_y^- h_\sigma}; \quad (11)$$

де $h_\sigma = \frac{\Delta V_n - \Delta V_3}{\Delta V_n}$;

Відносні деформації ϵ_y^+ та ϵ_y^- з врахуванням відповідних мікропошкоджень D_σ^+ та D_σ^- при розтягуванні та зворотньому стисканні з рівнянь (10), (11) дорівнюють:

$$\epsilon_y^+ = \frac{D_\sigma^+}{1 - D_\sigma^+} = \frac{1}{1 - D_\sigma^+} - 1; \quad (12)$$

$$\epsilon_y^- = \frac{D_\sigma^-}{h_\sigma (1 - D_\sigma^-)} = \frac{1}{h_\sigma} \left(\frac{1}{1 - D_\sigma^-} - 1 \right); \quad (13)$$

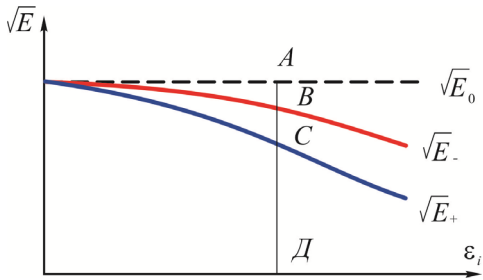


Рис. 5. Кінетика зміни модулів пружності при жорсткому осьовому пружнопластичному розтягуванні зворотньому стисканні

При жорсткому режимі осьового розтягування і зворотнього стискання ВОЕ $\epsilon_y^+ = \epsilon_y^-$. Поперечні деформації в напрямках $\epsilon_z = \epsilon_x = -\mu\epsilon_y$ взаємно компенсуються.

З виразів (12), (13) та з врахуванням співвідношень (4) коефіцієнт заліковування мікропошкоджень при прямому розтягуванні та зворотньому стисканні h_σ дорівнює

$$h_\sigma = \frac{D_{\sigma_-} (1 - D_{\sigma_+})}{D_{\sigma_+} (1 - D_{\sigma_-})} = \frac{\sqrt{\tilde{E}_+} (\sqrt{E_0} - \sqrt{\tilde{E}_-})}{\sqrt{\tilde{E}_-} (\sqrt{E_0} - \sqrt{\tilde{E}_+})} \quad (14)$$

Співвідношення (14) за результатами графічного зображення при фіксованих відносних деформаціях за жорсткого режиму пружнопластичного розтягування і зворотнього стискання згідно рис.5 для функціональної залежності $\sqrt{E} = f(\epsilon_i)$ представляється відповідними відрізками:

$$h_\sigma = \frac{CD(AD - BD)}{BD(AD - CD)} = \frac{CD \cdot AB}{BD \cdot AC} \quad (15)$$

Результати досліджень

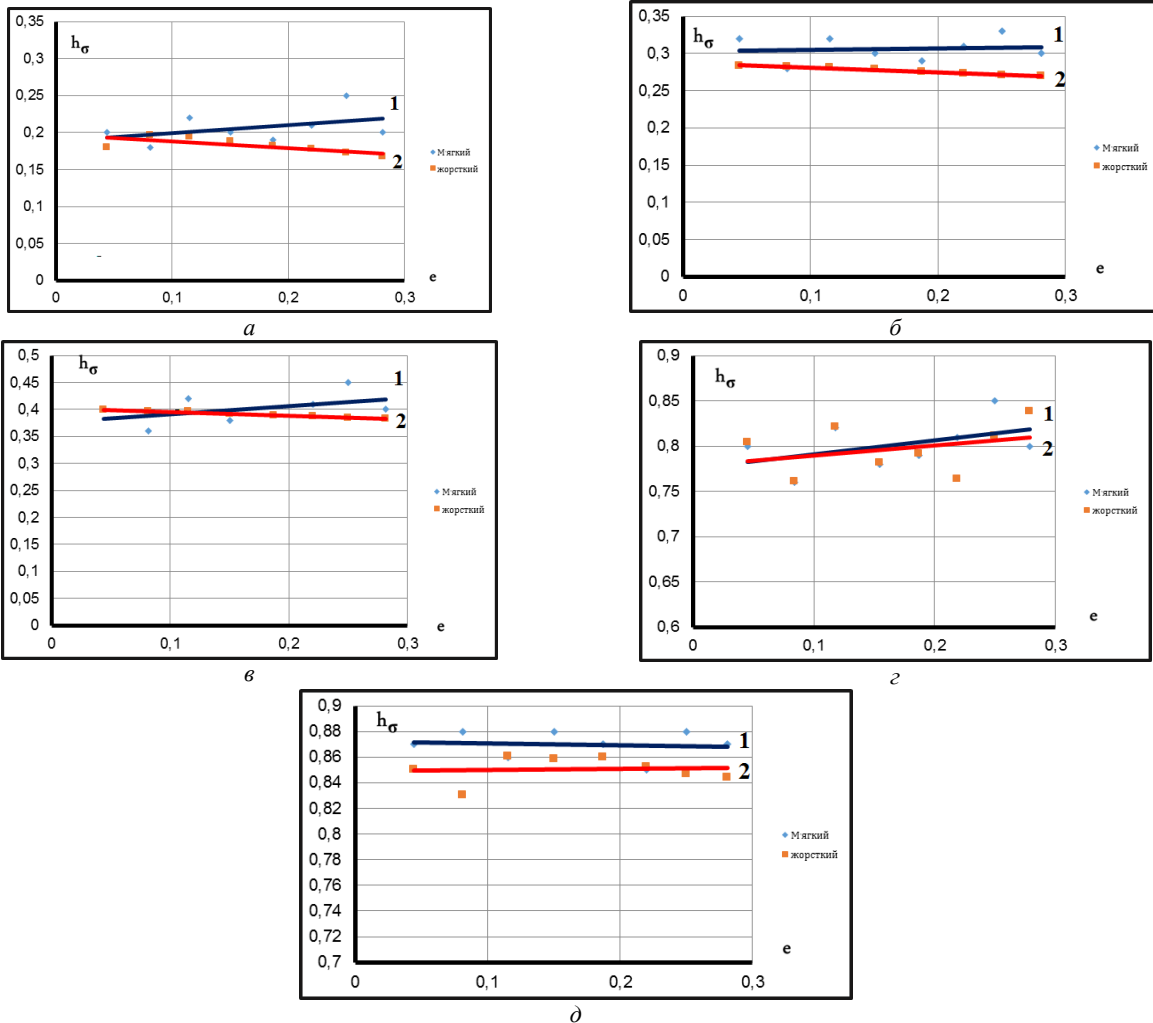


Рис. 6. Експериментальні результати дослідження коефіцієнта заліковування пошкоджень при розтягуванні та зворотньому стисканні для зразків Д16Т-а; сталі 30ХГСА- б; сталі 45 -в; міді - г; сталі 12Х18Н10Т - д; функції $h_\sigma = f(\epsilon_i)$ 1 – м'який , 2- жорсткий режими навантажень

Експериментальні дослідження кінетики заліковування мікропошкоджень при розтягуванні та зворотньому стисканні проводились для ряду матеріалів різної пластичності : сплав алюмінію Д16Т - $\delta = 13,5\%$ (рис. 6а), сталь 30ХГСА - $\delta = 20\%$ (рис. 6б), сталь 45 - $\delta = 26,6\%$ (рис. 6в), мідь - $\delta = 65\%$ (рис. 6г), сталь 12Х18Н10Т - $\delta = 70\%$ (рис. 6д), які побудовані в координатах $h_{\sigma} = f(\epsilon_i)$ для м'яких – криві (1) та жорстких – криві (2) режимів навантаження .

Аналізуючи криві пошкоджень матеріалів різних пластичних властивостей згідно рис.6 можна відмітити, що коефіцієнти заліковування мікропошкоджень можна представити постійними величинами від початку навантаження до руйнування для всіх матеріалів.

В таблиці 1 приведені усереднені експериментальні значення коефіцієнтів заліковування для конструкційних матеріалів, що мають різні величини пластичних властивостей для м'якого і жорсткого режимів пружно-пластичного деформування, які оброблені з ймовірністю 95%.

Таблиця 1

	М'який	Жорсткий	Відносне видовження %
Д16Т	0,2	0,18	13,5
Сталь 30ХГСА	0,3	0,28	20
Сталь 45	0,4	0,38	26,6
Мідь	0,8	0,78	65
12Х18Н10	0,87	0,85	70

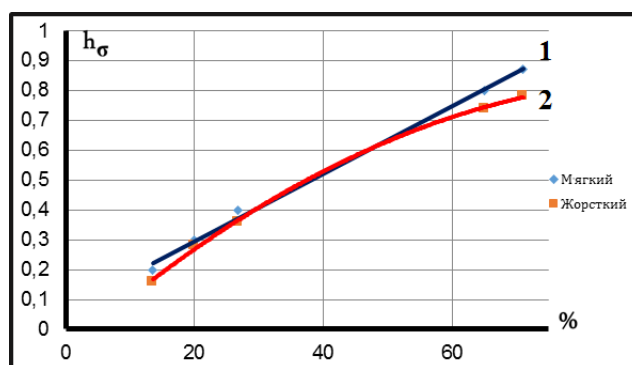


Рис. 7. Залежності коефіцієнта заліковування мікропошкоджень при м'якому (крива 1) та жорсткому (крива 2) режимах пружнопластичного деформування від пластичних властивостей конструкційних матеріалів

На рис.7 графічно представлені залежності коефіцієнтів заліковування пошкоджень від величини пластичних властивостей конструкційних матеріалів при м'якому режимі навантаження (крива 1) та жорсткому режимі (крива 2). Із аналізу рис.7 можна відмітити , що при м'якому режимі навантаження коефіцієнт заліковування лінійно залежить від пластичних властивостей матеріалів, тоді як при жорсткому режимі навантаження ця залежність нелінійна. Також слід відмітити, що коефіцієнт заліковування тим більше, чим пластичніший матеріал. Малопластичні матеріали мають менші тенденції до заліковування мікропошкоджень в порівнянні з високопластичними матеріалами.

Висновки

В роботі розглянуто ефект заліковування мікропошкоджень при повторно-змінному режимі осьового навантаження, за зміною модуля пружності конструкційних матеріалів з різними пластичними властивостями при м'якому і жорсткому режимах пружно-пластичного деформування. Встановлено, що коефіцієнт заліковування пошкоджень при прямому та зворотному режимах навантажень може характеризуватись, як постійна величина, на всій діаграмі деформування і залежить від величини пластичних властивостей конструкційних матеріалів. Приведені методики визначення коефіцієнтів заліковування при м'якому і жорсткому режимах пружно-пластичного повторно-змінних режимів осьових деформувань . Виявлено, що коефіцієнт заліковування мікропошкоджень при м'якому режимі деформування лінійно залежить від пластичних властивостей матеріалів, тоді як при жорстких режимах повторно-змінного режимів осьового деформування ця залежність – нелінійна. Експериментально визначені коефіцієнти заліковування для ряду конструкційних матеріалів - Д16Т, Сталь 30ХГСА, Сталь 45, Мідь, Сталь 12Х18Н10 з різними пластичними властивостями при пружно-пластичних і повторно-змінних режимах деформування.

Аннотация. В работе рассматривается заличивание микроповреждений при повторно – переменном осевом нагружении для мягкого и жесткого режимов приложения нагрузок. Разработаны методики определения коэффициента заличивания при прямом растяжении и обратном сжатии и получены экспериментальные результаты определения коэффициента заличивания повреждений для ряда конструкционных материалов с разными пластическими свойствами – D16T, сталь 30ХГСА, сталь 45, медь, сталь 12Х18Н10Т. Установлено, что коэффициенты заличивания представляются почти постоянными величинами для материалов на всем этапе пружнопластического деформирования до разрушения и зависят от их пластичных свойств. Следует отметить, что для малопластичных материалов коэффициенты заличивания меньше по сравнению с высокопластическими материалами. При жестком режиме деформирования коэффициенты заличивания меньше по сравнению с мягким режимом деформирования. Предлагаются обобщенные кривые для определения коэффициента заличивания при пружнопластическом растяжении и обратном сжатии для материалов с разными пластическими свойствами.

Ключевые слова: коэффициент заличивания, прямое розтяжение, обратное сжатие, мягкая нагрузка, жесткая нагрузка.

Abstract.

The paper presents a microdefects closure effect at the direct tension and feedback compression (stress control test and strain control test).

It should be noted that low-plasticity materials microdefects closure parameter rates less than the high-plastic materials.

The resulting method of determining the microdefects closure parameter at direct tension and feedback compression; obtained the experimental results of determining the microdefects closure parameter of structural materials - D16T, 30KhGSA steel, 45 steel, copper, steel 12X18N10T.

A generalization of the curves for the determination of the microdefects closure parameter for the elastic-plastic tensile and feedback compression to plastic materials with different properties.

Keywords: closure effect, direct tension, feedback compression, low-plasticity, microdefects, elastic-plastic tensile, feedback compression

Бібліографічний список використаної літератури

1. Качанов Л.М. Основы механики разрушения [текст] / Л.М. Качанов – М.: Наука, - 1974. – 312с.
2. Работнов Ю.Н. Введение в механику разрушения [текст] / Работнов Ю. Н. – М.: Наука, 1987 -80с.
3. Ужик Г.В. Сопротивление отрыву и прочность металлов [текст] / Г.В. Ужик – М.: Издательство «АН СССР», -1950, -255с.
4. Lemaitre J. A Course on Damage Mechanics, second ed., Springer, 1996
5. Бобир М.І. Моделі накопичення пошкоджень та руйнування при складному навантаженні [текст] / М.І. Бобир, А.П. Грабовський // Вестник НТУУ «КПІ», серія «Машиностроение»- 2003, -№44, - с.15-18.
6. Грабовський А. Основи кінетики пошкоджуваності матеріалів при пружнопластичному навантаженні [текст] / А. Грабовський, І. Бабієнко // Науковий журнал Вісник Тернопільського Національного технічного університету, Спецвипуск, ч.1,- 2011, с.54-62.
7. Волков И.А. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями [текст] / И.А. Волков, Ю.Г. Коротких –М.: Физмат лит, -2008, -422с.
8. Грабовський А.П. Деградація фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів при пружнопластичному розтягуванні та крученні [текст] / А.П. Грабовський // Вестник НТУУ «КПІ», серія «Машиностроение», - 2007, - №50, - с.15-18.

References

1. Kachanov L.M. Osnovy mehaniki razrusheniya [Bases of mechanics of destruction]. Moscow: Nauka, 1974. 312p.
2. Rabotnov Ju.N. Vvedenie v mehaniku razrusheniya [Introduction in destruction mechanics]. Moscow: Nauka, 1987 80p.
3. Uzhik G.V. Soprotivlenie otryvu i prochnost' metallov [Resistance to a separation and durability of metals]. Moscow: Izdatel'stvo «AN SSSR», 1950, 255p.
4. Lemaitre J. A Course on Damage Mechanics, second ed., Springer, 1996
5. Bobir M.I., Grabovs'kij A.P. Modeli nakopichennja poshkodzhen' ta rujnuvannja pri skladnomu navantazheni. Journal of Mechanical Engineering the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". 2003, No.44, pp.15-18.
6. Grabovs'kij A., Babienko I. Osnovi kinetiki poshkodzhovanosti materialiv pri pruzhnoplastichnomu navantazheni. Naukovij zhurnal Visnik Ternopil's'ogo Nacional'nogo tehcnichnogo universitetu, Specvipusk, ch.1, 2011, pp.54-62.
7. Volkov I.A., Korotkih Ju.G. Uravnenija sostojanija vjazkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdenijami [The state equations the vjazkouprugoplasticheskikh of environments with damages]. Moscow: Fizmat lit, 2008, 422p.
8. Grabovs'kij A.P. Degradacija fiziko-mehaničnih vlastivostej konstrukcijnih materialiv pri pruzhnoplastichnomu rozhtjaguvanni ta kruchenni. Journal of Mechanical Engineering the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 2007, No.50, pp.15-18.

Подана до редакції 05.11.2013