

ОЦІНКА КІНЕТИКИ РУЙНУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

В статье рассмотрены особенности оценки кинетики накопления повреждений в деталях оборудования при упругопластическом нагружении через изменение объема выделенного объемного элемента, которое представлено изменением модуля упругости E , пластической деформации ϵ_i (при осевом нагружении), модуля упругости G и сдвиговой пластической деформации (при кручении) γ . Также представлены результаты кинетики накопления повреждений по изменению удельного электрического сопротивления для образцов стали 07X16H6 и сплава алюминия Д16Т при растяжении и кручении. Для образцов из стали 07X16H6 получены экспериментальные результаты при пропорциональном нагружении, которые позволили получить сравнение интенсивностей эффективных и действительных напряжений.

In this paper the features of damage accumulation kinetics estimation in equipment details at elasto-plastic loading due to the change of volume element, that is transformed by the change of elasticity modulus E , plastic strain ϵ_i (axial loading), elasticity modulus G , and shear plastic strain (at torsion) γ , are considered. Here are presented the results of material damage kinetics using the change of specific electrical resistance for the 07X16H6 steel and Д16Т aluminum alloy specimens at tension and torsion. For 07X16H6 steel specimens were obtained the experimental results of proportional loading, which allowed to get a comparison of the effective and real stresses intensities.

В умовах експлуатації елементи конструкцій та деталі машин сприймають складний комплекс зовнішніх впливів, що приводить до цілого ряду незворотних фізико-хімічних процесів, які протікають у матеріалі конструкції на мікро- та макрорівнях. Внаслідок цього відбувається зміна первинної структури матеріалу, зародження, розвиток і злиття пор, утворення мікротріщин, зменшення ефективного поперечного перерізу елемента конструкції і його подальше руйнування. Для аналітичного опису впливу великої кількості маленьких мікропошкоджень на напружено-деформований стан вводиться параметр пошкоджуваності, не зв'язаний безпосередньо з фізичною картиною діючих процесів [1, 2].

В залежності від величини пружнопластичної деформації при навантаженні конструктивного елемента сформульовані декілька класифікацій типів мікро- та макроруйнувань – крихке, квазікрихке та в'язке руйнування [3-5].

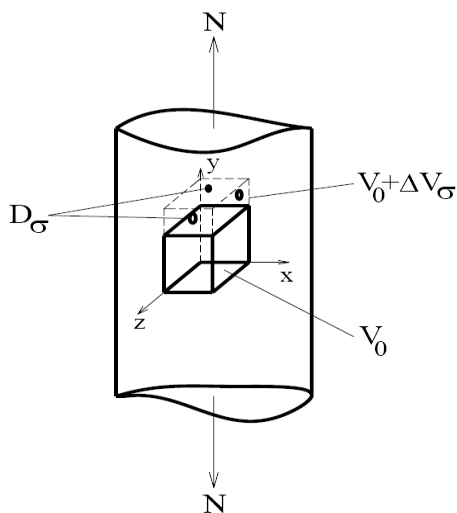


Рис. 1. Принципова схема кінетики накопичення пошкоджень ВОЕ при пружнопластичному осьовому навантаженні

Досить плідною для розвитку феноменологічних теорій міцності деталей є класифікація видів руйнувань, яка базується на визначенні впливу виду напруженого стану на характер руйнування. Згідно теорії М.М.Давиденкова, яка була розвинута в роботах Я.Б. Фрідмана [6-8], розрізняють руйнування деталей обладнання при пружнопластичному навантаженні шляхом відриву та зрізу. В першому випадку приймається, що порушення суцільності здійснюється під дією максимальних нормальних напружень, а в другому - під дією максимальних дотичних напружень.

Розглянемо особливості оцінки кінетики накопичення пошкоджень в деталях обладнання при пружнопластичному осьовому навантаженні, зсуві та пропорційному деформуванні.

Осьове навантаження.

Пошкоджуваність виділеного одиничного елемента (ВОЕ) матеріалу при пружнопластичному осьовому навантаженні $-D_\sigma$, дорівнює:

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

де $-V_0$ і $V_{i\sigma}$ – відповідно початковий та поточний

об'єми ВОЕ при осьовому термосиловому навантаженні.

Поточна величина зміни об'єму ВОЕ при осьовому навантаженні, дорівнює:

$$V_{i\sigma} = V_0 + \Delta V_\sigma \quad (2)$$

де ΔV_σ - зміна об'єму ВОЕ, яка викликана кінетикою накопичення пошкоджень при осьовому термосиловому деформуванні.

Розглянувши рівняння (1), (2) відносно ΔV_σ , маємо:

$$\Delta V_\sigma = V_0 \frac{D_\sigma}{1 - D_\sigma} \quad (3)$$

В роботі [9] розглядається співвідношення для оцінки кінетики накопичення пошкоджень при осьовому навантаженні одно параметричним рівнянням зміни модуля пружності при пружнопластичному деформуванні, яке виражається формулою:

$$D_i = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}_i}{E_y}} \quad (4)$$

$E_0(E_y)$ та \tilde{E}_i - відповідно початковий (усталений) та поточний модулі пружності матеріалу при осьовому навантаженні.

На рис. 2 (крива 1) приведена характерна крива зміни модуля пружності при пружнопластичному осьовому навантаженні-розвантаженні від величини поточної відносної пластичної деформації ϵ_i , яка описується рівнянням [10]:

$$\tilde{E}_i = E_0 \left[1 - \varphi_\sigma \left(\frac{\tilde{\epsilon}_i}{\epsilon_R} \right)^\alpha \right] \quad (5)$$

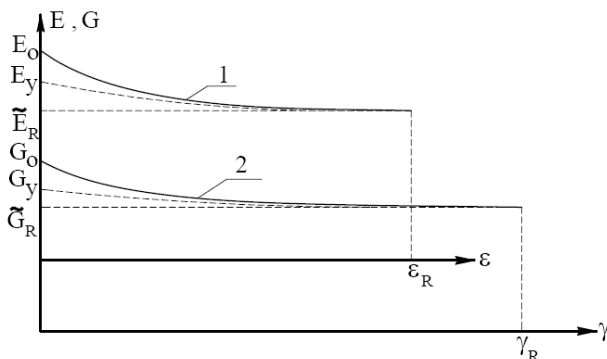


Рис. 2. Зміна модулів пружності \tilde{E}_i (крива 1) та \tilde{G}_i (крива 2), відповідно, від відносної величини деформації - ϵ_i при осьовому навантаженні, та від величини відносного кута - γ_i при крученні

де $\varphi_\sigma = \frac{E_0 - \tilde{E}_R}{E_0}$ параметр зміни модуля пружності E від початкового значення E_0 до кінцевої величини - \tilde{E}_R , яка визначається при пружнопластичному навантаженні на межі міцності конструкційного матеріалу.

ϵ_R - відносна величина пружнопластичної деформації на межі міцності матеріалу, яка відповідає модулю пружності \tilde{E}_R .

α - параметр, який характеризує пластичні властивості матеріалу при осьовому навантаженні.

Підставивши відношення (5) в (4) отримаємо рівняння кінетики накопичення пошкоджень при осьовому пружнопластичному навантаженні:

$$D_\sigma = 1 - \sqrt{1 - \varphi_\sigma \left(\frac{\tilde{\epsilon}_i}{\epsilon_R} \right)^\alpha} \quad (6)$$

Зсув (кручення).

Пошкоджуваність ВОЕ при пружнопластичному крученні (зсуві) - D_τ , дорівнює:

$$D_\tau = \frac{V_{it} - V_0}{V_{it}} = 1 - \frac{V_0}{V_{it}} \quad (7)$$

де V_{it} - поточна величина зміни форми ВОЕ викликана додатковою деформацією від пошкоджуваності при крученні (зсуві), яка дорівнює:

Поточна величина зміни об'єму ВОЕ при зсуві, дорівнює:

$$V_{it} = V_0 + \Delta V_{it} \quad (8)$$

де ΔV_{it} - абсолютна величина додаткової зміни форми ВОЕ за рахунок пошкоджень при пружнопластичному крученні (зсуві).

Розв'язавши рівняння (7), (8) відносно ΔV_{it} , маємо:

$$\Delta V_{it} = V_0 \frac{D_\tau}{1 - D_\tau} \quad (9)$$

З іншої сторони пошкоджуваність при зсуві через величину зміни модуля пружності при зсуві, виражається відношенням [9]:

$$D_{it} = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{G}_i}{G_y}} \quad (10)$$

$G_0 (G_y)$ та \tilde{G}_i – початковий (усталений) та поточний модулі пружності матеріалу при крученні (зсуві).

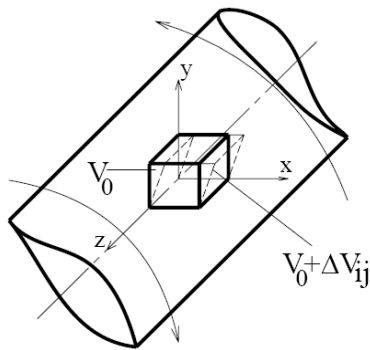


Рис. 3. Принципова схема кінетики накопичення пошкоджень ВОЕ при пружнопластичному крученні (зсуві)

властивості матеріалу при крученні (зсуві).

Підставивши відношення (11) в залежність (10) кінетика накопичення пошкоджень– D_τ при крученні (зсуві) визначається відношенням:

$$D_\tau = 1 - \sqrt[1 - \varphi_\tau \left(\frac{\tilde{\gamma}_i}{\gamma_R} \right)^\beta]}{\quad} \quad (12)$$

За кількісну характеристику кінетики пошкоджуваності при розтягуванні та крученні - D може використовуватись параметр зміни питомого електричного опору робочої зони зразка, який оцінюється відношенням [11]:

$$D = \frac{\rho_i - \rho_0}{\rho_0} \quad (13)$$

де $\rho_0 = \frac{U_0 \cdot S_0}{l_0 \cdot I_0}$ та $\rho_i = \frac{U_i \cdot S_i}{l_i \cdot I_i}$ - відповідно, початкова та поточна величина питомого електричного опору робочої зони зразка, які визначаються перед та під час деформування.

U_0, U_i, I_0, I_i - відповідно початкові і поточні величини електричної напруги і струму, що проходять через зразок при випробуваннях. l_0, l_i, S_0, S_i - початкові та поточні значення довжини і площі поперечного перерізу робочої зони зразка при випробуваннях.

Дослідження пошкоджуваності при осьовому навантаженні, крученні та пропорційному деформуванні.

В ході дослідження були проведені випробування на розтяг, кручення для високопластичної сталі 07X16H6 та малопластичного сплаву алюмінію Д16Т. Для сталі 07X16H6 були проведені випробування при пропорційному деформуванні. На Рис. 4, Рис. 5 показані залежності кінетики накопичення пошкоджуваності в залежності від значення накопиченої деформації при осьовому навантаженні та крученні, відповідно для сталі 07X16H6 та сплаву алюмінію Д16Т.

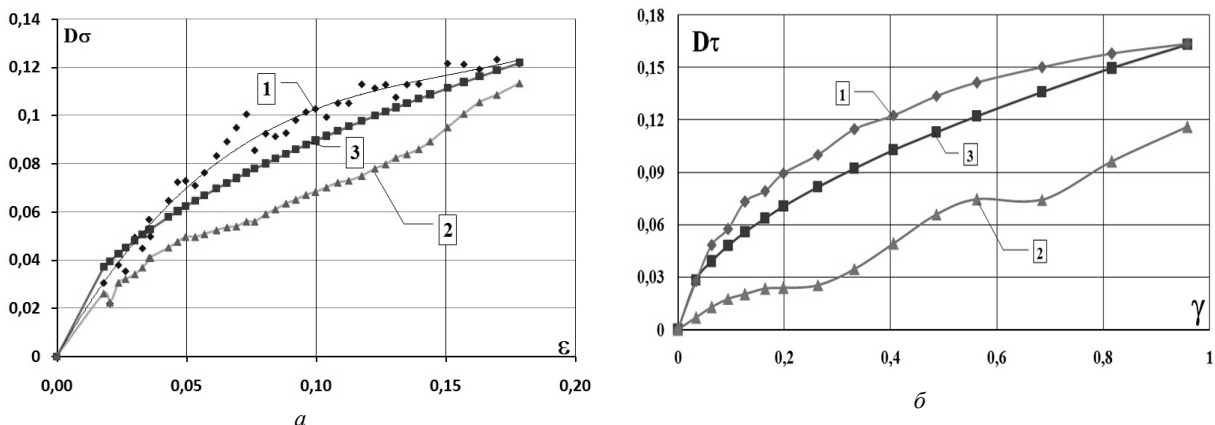


Рис. 4. Пошкоджуваність сталі 07X16H6: (а) при розтязі; (б) при крученні

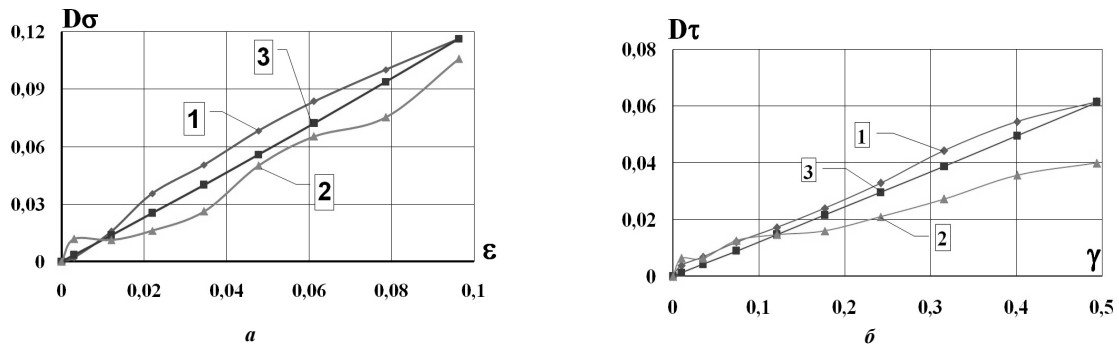


Рис. 5. Пошкоджуваність сплаву алюмінію Д16Т (а) при розтязі; (б) при крученні

Для сталі 07Х16Н6 (рис.4) та сплаву алюмінію Д16Т (рис.5), представлені порівняльні криві пошкоджуваності від величини пружно – пластичного деформування, які отримані за наступними показниками: по зміні модуля пружності при розтязі згідно формули (4) та при крученні згідно формули (10) – криві 1, по зміні питомого електроопору (формула 13) – криві 2 та по зміні відносної осьової деформації згідно формули (6) при розтязі та зміні відносної деформації зсуву згідно формули (12) при крученні – криві 3.

Аналізуючи криві пошкоджуваності для конструкційних матеріалів можна відмітити наступне: характер і величини пошкоджуваності, які отримані по зміні модулів пружності, зміні об’ємного питомого електроопору та визначені за відносними лінійними і кутовими пружнопластичними деформаціями згідно рівнянь (6) і (12) близькі між собою і кінетика пошкоджуваності активізується в матеріалі при появі пластичних деформацій; для пластичних матеріалів криві кінетики накопичення пошкоджуваності мають нелінійний характер, тоді як для малоеластичних матеріалів кінетика накопичення пошкоджень майже лінійна.

Інтенсивність істинних напружень та деформацій для складного напруженого стану визначається згідно рівняння [8]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (14)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + 6(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)} \quad (15)$$

Для пропорційного деформування, коли діє осьове навантаження по осі z і крутний момент в площині xy, інтенсивність істинних напружень та деформацій, згідно відношень (14), (15), дорівнює:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_{zz}^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad (16)$$

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_{zz}^2 + 3\gamma_{xy}^2} \quad (17)$$

Враховуючи параметри пошкоджуваності при осьовому навантаженні - D_σ та при крученні - D_τ , інтенсивність ефективних напружень - $\tilde{\sigma}_i$ згідно формули (16) дорівнює:

$$\tilde{\sigma}_i = \sqrt{\left[\frac{\sigma_{zz}}{1 - D_\sigma} \right]^2 + 3 \cdot \left[\frac{\tau_{xy}}{1 - D_\tau} \right]^2} \quad (18)$$

Згідно співвідношень (6), (12) та (18) інтенсивність ефективних напружень, яка враховує пластичні осьові деформації - $\tilde{\varepsilon}_i$ і зсувні деформації - $\tilde{\gamma}_i$, визначається відношенням:

$$\tilde{\sigma}_i = \sqrt{\left[\frac{\sigma_{zz}}{1 - \sqrt{1 - \varphi_\sigma \left(\frac{\tilde{\varepsilon}_i}{\varepsilon_R} \right)^\alpha}} \right]^2 + 3 \cdot \left[\frac{\tau_{xy}}{1 - \sqrt{1 - \varphi_\tau \left(\frac{\tilde{\gamma}_i}{\gamma_R} \right)^\beta}} \right]^2} \quad (19)$$

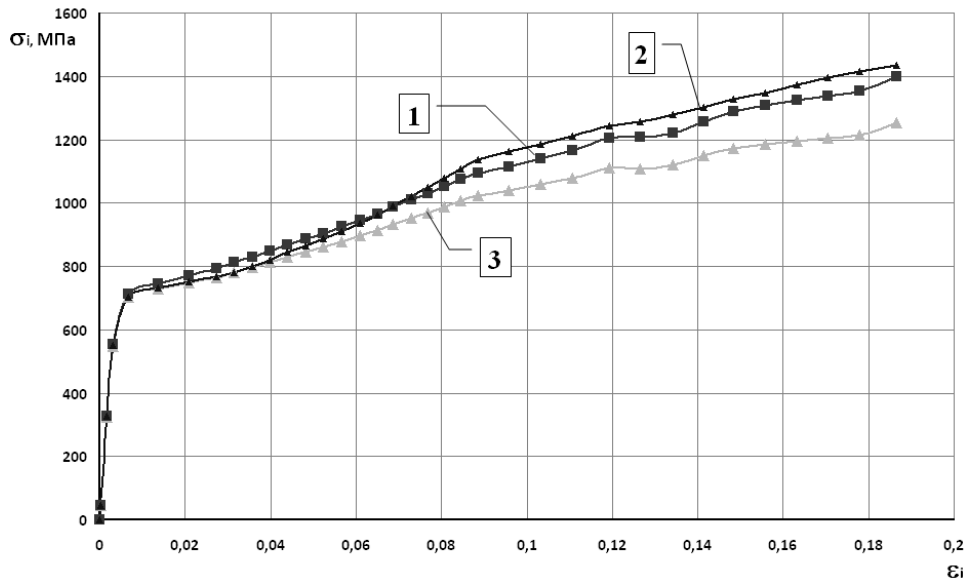


Рис. 6. Залежність інтенсивності напружень від величини інтенсивності деформації при пропорційному деформуванні для зразків сталі 07X16N6

На Рис. 6 приведені порівняльні залежності інтенсивності напружень від величини інтенсивності деформації при пропорційному деформуванні зразків сталі 07X16N6. Крива 1 характеризує інтенсивність ефективних напружень, які розраховані для сталі згідно співвідношення (19), яке враховує пошкоджуваність матеріалу через величину поточних пластичних деформацій від осового навантаження та кручення. Крива 2 характеризує експериментальну величину інтенсивності напружень з урахуванням пошкоджуваності, яка отримана через зміну питомого електричного опору при пружнопластичному деформуванні зразків сталі 07X16N6. На кривій 3 представлені результати інтенсивності істинних напружень, які розраховані для сталі згідно співвідношення (16) при пропорційному деформуванні. Аналізуючи криві деформування можна відмітити, що інтенсивність ефективних напружень за експериментальними (крива 2) і розрахованими (крива 1) результатами по характеру та величині близькі між собою, тоді як істинна інтенсивність напружень (крива 3) при пропорційному деформуванні в момент руйнування відрізняється на 14,3% в сторону перенапруження, що не враховується в розрахункових схемах, і може привести до передчасного руйнування конструкцій.

Висновки

На основі положень континуальної механіки руйнування розглянуто інженерний підхід до оцінки кінетики накопичення розсіяних пошкоджень в деталях обладнання, які підлягають осовому і зсувному пружнопластичному навантаженню та пропорційному деформуванню. Розглянуто методики визначення пошкодження за допомогою відносних осових і кутових пружнопластичних деформацій. Приведені порівняння кінетики накопичення пошкоджень по деградації модулів пружності E і G , зміні питомого електроопору матеріалу та за величиною відносних лінійних і кутових деформацій при розтязі і крученні для сталі 07X16N6 і сплаву алюмінію Д16Т. Також приведені порівняння інтенсивностей ефективних і розрахункових напружень при пропорційному деформуванні зразків сталі 07X16N6.

Список літератури

1. Качанов Л.М. Основи механіки руйнування. – М. «Наука», 1974. – 312 с.
2. Болотін В.В. Ресурс машин і конструкцій. – М. «Машиностроение», 1990, - 448с.
3. Голуб В.П. Нелинейная механика континуальной поврежденности и её приложение к задачам ползучести и усталости // Прикладная механика – 2000, 36, №3, с. 31-59.
4. Бобырь Н.И., Яхно Б.О., Грабовський А.П. Поврежденность конструкционных материалов при сложном малоцикловом нагружении // Проблемы прочности – 2007, №6, с. 25-34.
5. Новожилов В.В., Кадашевич Ю.И. Микронапряжение в конструкционных материалах – Л. «Машиностроение», 1990 – 223с.
6. Романов А.Н. Разрушение при малоцикловом нагружении – М. «Наука», 1988, 279с.
7. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г., Богинич И.О., Недосека С.А. Комплексная оценка поврежденности материала при пластическом деформировании // Проблемы прочности, 1996, №5, с. 23-30.
8. Трошенко В.Т., Лебедев А.А., Стрижало В.А. и др. Механическое поведение материалов при различных видах нагружений. – К. «Наукова думка», 2000, - 316с.
9. Castagne S., Nabraken A., Cescotto S., Application of Damage Model to an Aluminium Alloy// International Journal of Damage Mechanics – vol 12, January, 2003, p. 5-30.
10. Бобир М.І., Грабовський А.П., Марочко А.В. Спосіб визначення пошкоджуваності матеріалів за значеннями залишкових деформацій. Патент на корисну модель №56619, Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 25.01.2011 р.
11. Бобир М.І., Грабовський А.П., Тимошенко О.В. Спосіб визначення кінетики руйнування матеріалів в процесі їх пружнопластичного деформування. Деклараційний патент №65499А 7G01N3/08. – Опубл. 15.03.2004 р., Бюл. №3.