

А. Грабовський

Доцент, канд. техн. наук,
Національний технічний
університет України
«Київський політехнічний
інститут»,
м. Київ

УДК 539.4+620.1

КОМПЛЕКСНЕ ОЦІНЮВАННЯ ПОШКОДЖУВАНOSTI МАТЕРІАЛУ ПРИ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОМУ ДЕФОРМУВАННІ

Досліджено кінетику накопичення пошкоджень конструкційних матеріалів при пружно-пластичному навантаженні розтягом, крученням і пропорційному деформуванні методом деградації модулів пружності E і G та за деградацією питомого електроопору робочої зони зразка. Наведені результати експериментального дослідження пошкоджуваності при розтягу, крученні й пропорційному деформуванні на зразках високопластичної сталі 12X18H10T і малопластичного алюмінієвого сплаву Д16Т.

пошкоджуваність, кінетика, пропорційне деформування

Інженерні розрахунки деталей машин на міцність враховують властивості матеріалу, які характеризують сили міжатомних зв'язків і не враховують дефекти структури, які виникають при деформуванні, що завжди існує в реальних конструкційних матеріалах. Для більшості деталей машин потрібно використовувати критерії оцінювання конструктивної міцності, які б характеризували працездатність матеріалу в умовах експлуатації, і за критерій оцінювання конструкційної міцності матеріалу потрібно приймати опір руйнування, тобто його пошкоджуваність в умовах експлуатації.

Більшість досліджень з проблеми руйнування матеріалів стосується аналізу завершальної стадії, яка схематизована в моделях Гріфітса — Орована, що покладені в основу методів оцінювання живучості конструкцій [6, 8]. Для опису процесу руйнування на початковій стадії характерний високий рівень схематизації, а моделі, отримані з позицій теорії пошкоджуваності, мають обмежене експериментальне обґрунтування [1, 4, 9].

Нижче розглянуті результати досліджень кінетики накопичення пошкоджень у різних конструкційних матеріалах через розпушення матеріалів, яка пов'язана з

накопиченням розсіяних пошкоджень різної природи (утворення розривів у субмікро- та мікрооб'ємах, виділення нових фаз, фізичні й хімічні флуктуації, утворення текстури і т.д.), що приводить до зміни фізико-механічних властивостей матеріалу: щільності, електропровідності, магнітних властивостей, модуля пружності при осьовому навантаженні E та при зсуві G інших фізико-механічних властивостей матеріалу.

Як відомо [1, 2], руйнування матеріалів здійснюється відривом і зрізом. Розглянемо кінетику накопичення пошкоджень при осьових пружно-пластичних навантаженнях, які призводять до руйнування відривом, при крученні, що призводить до руйнування при зрізі й при пропорційному деформуванні, коли одночасно діє і відрив і зріз.

Кінетика накопичень пошкоджень при осьовому навантаженні. Кінетика накопичення пошкоджуваності в конструкційних матеріалах при пружно-пластичному навантаженні через зміну об'єму оцінюється співвідношенням

$$D_{\sigma} = 1 - \frac{V_0}{V_i}, \quad (1)$$

де V_0 — початкова величина об'єму робочої зони зразка матеріалу; $V_i = V_0 + \Delta V$ — поточна величина об'єму робочої зони зразка матеріалу при пружно-пластичному деформуванні; ΔV — зміна об'єму матеріалу при пружно-пластичному деформуванні, яка викликана кінетикою накопичення пошкоджень. Зміна об'єму матеріалу при пружно-пластичному деформуванні з рівняння (1) запишеться у вигляді:

$$\Delta V = V_0 \frac{D_\sigma}{1 - D_\sigma} \quad (2)$$

Із закону Гука при осьовому навантаженні [7] маємо:

$$F = \frac{Nl}{\Delta l E}, \text{ де } F \text{ — площа поперечного перерізу зразка; } N$$

— осьове навантаження; l — довжина робочої зони зразка; Δl — деформація робочої зони зразка при навантаженні. Враховуючи, що пошкоджуваність $D_\sigma = 1 - \epsilon_0/\epsilon_i$ [5], отримуємо величину пошкоджуваності при пружно-пластичному осьовому навантаженні

$$D_\sigma = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}}{E_0}} \sqrt{\frac{l_0 N_0}{l_i N_i}}, \quad (3)$$

де $\epsilon_0 = \Delta l_0/l_0$; $\epsilon_i = \Delta l_i/l_i$ — відносні величини осьової деформації на початку навантаження і при поточних навантаженнях на пружних участках діаграм сідчастого навантаження і розвантаження (рис. 1, рис. 2). \tilde{E} — ефективний поточний модуль пружності матеріалу при пружно-пластичному розтягуванні (рис. 3).

На початковому етапі пружно-пластичного навантаження $E_0 = E_y$, де E_y — усталена величина модуля пружності, яка визначається апроксимацією залежності зміни модуля пружності від величини пружно-пластичної деформації на перших етапах пружно-пластичного осьового навантаження (рис. 3). N_0 , N_i — відповідно початкова і поточна осьові сили при навантаженні, які визначаються на поточних участках діаграм сідчастого навантаження і розвантаження (рис. 1, рис. 2).

При пружно-пластичному деформуванні через розпушення змінюється структура матеріалу [1, 4] і змінюється його електричний опір [5].

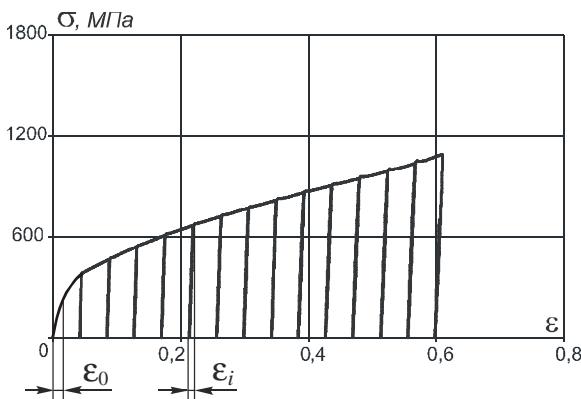


Рис. 1. Діаграма сідчастого навантаження і розвантаження при розтягуванні зразка зі сталі 12X18H10T

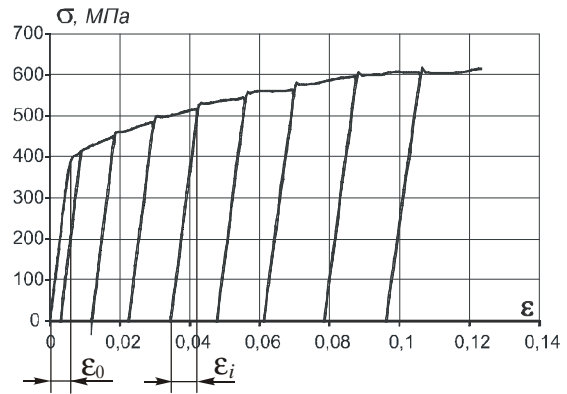


Рис. 2. Діаграма сідчастого навантаження і розвантаження при розтягуванні зразка з алюмінієвого сплаву Д16Т

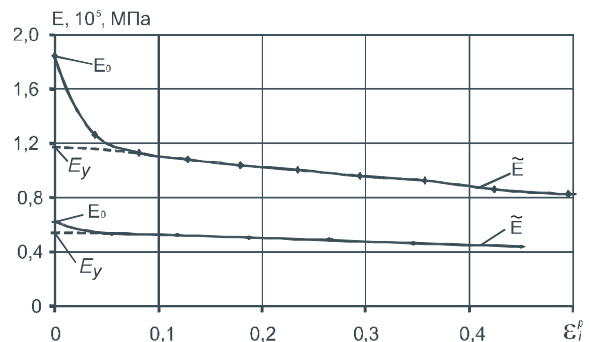


Рис. 3. Зміна ефективного модуля пружності \tilde{E} при осьовому навантаженні зразка зі сталі 12X18H10T (крива 1) та сплаву алюмінію Д16Т (крива 2)

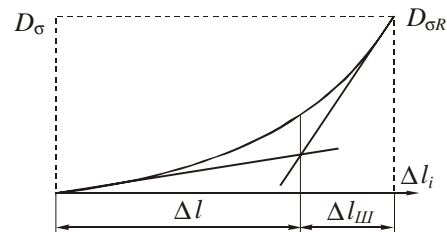


Рис. 4. Визначення меж кінетики загальної і локальної (в шийці) пошкоджуваності при пружно-пластичному деформуванні конструкційного матеріалу

Згідно з [3] електричний опір провідника при проходженні через нього електричного струму

$$R = \rho \frac{l}{F} = \rho \frac{l^2}{V}, \quad (4)$$

де ρ — питомий об'ємний електричний опір (об'ємна щільність розподілу заряду); l , F — довжина і площа робочої зони провідника (зразка матеріалу); V — об'єм робочої зони провідника.

Зі співвідношення (4) отримуємо

$$V = \frac{\rho l^2}{R} = \frac{\rho l^2 I}{U}, \quad (5)$$

де I, U — величина струму й напруги в провіднику.

Для циліндричної форми зразка при його пружно-пластичному деформуванні початковий V_{0u} і поточний V_{iu} об'єми через показники електричного струму можна подати такими залежностями:

$$V_{0u} = \frac{\rho_{0u} I_{0u}^2 I_0}{U_0}, \quad (6)$$

$$V_{iu} = \frac{\rho_{iu} I_{iu}^2 I_i}{U_i}, \quad (7)$$

де ρ_{0u} і ρ_{iu} — величини початкового і поточного електричного опору циліндричної робочої зони зразка перед і під час деформування; I_{0u} і I_{iu} — початкова й поточна довжини робочої зони зразка; I_0, U_0, I_i, U_i — початкові й поточні величини електричного струму і напруги в робочій зоні зразка при напрацюванні.

Для матеріалів, які при пружно-пластичному деформуванні утворюють місцеве звуження (шийку), величини кінетики пошкоджуваності дорівнюють:

$$D_{\sigma} = 1 - \frac{V_{0u}}{V_{iu}} - \frac{V_{iuk}}{V_{iu}}, \quad (8)$$

де V_{iuk} — об'єм циліндричної частини робочої зони зразка перед утворенням місцевого звуження при напрацюванні; $V_{iu} \approx 2V_{ik}$ — об'єм зразка в зоні місцевого звуження (в першому наближенні дорівнює двом змінним об'ємам конічної форми V_{ik}).

Об'єм шийки зразка

$$V_{iu} = \frac{2l_{iu} F_{iu}}{2 \cdot 3}, \quad (9)$$

де F_{iu} — площа зрізаного конуса в зоні шийки, $F_{iu} = 2\pi(R_{iuk}^2 + r_{iu}^2 + R_{iuk}r_{iu})$; R_{iuk} — кінцевий радіус циліндричної зони зразка при навантаженні перед утворенням місцевого звуження; r_{iu} — поточний радіус конічної найтоншої зони зразка при деформуванні; l_{iu} — видовження зразка в зоні деформування шийки.

З урахуванням співвідношення (5) зміна об'єму шийки через питомий електричний опір

$$V_{iu} = \frac{\rho_{iu} I_{iu}^2 I_{iu}}{U_{iu}}, \quad (10)$$

де ρ_{iu} — поточна величина питомого електроопору при деформуванні зразка в зоні місцевого звуження; U_{iu} і I_{iu} — величини електричної напруги і струму в шийці зразка при пружно-пластичному деформуванні.

З урахуванням залежностей (6), (7), (8), (10) за умови постійності струму, що проходить через зразок у процесі пружно-пластичного навантаження до руйнування $I_0 = I_{iu} = I_{iu} = const$, пошкоджуваність при пружно-пластичному деформуванні до руйнування дорівнює:

$$D_{\sigma} = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_{iu}} \left(\frac{I_{0u}^2 U_{iu}}{I_{iu}^2 U_0} \right) - \frac{\rho_{iuk}}{\rho_{iu}} \left(\frac{I_{iuk}^2 U_{iu}}{I_{iu}^2 U_{iuk}} \right), \quad (11)$$

де ρ_{iuk} — питомий електричний опір зразка перед утворенням шийки; l_{iuk} — довжина робочої зони зразка перед утворенням шийки; U_{iuk} — електрична напруга в зразку перед утворенням шийки.

На рис. 3 наведені результати експериментальних досліджень зміни модуля пружності E при пружно-пластичному східчастому деформуванні, відповідно, для сталі 12X18H10T (крива 1) та алюмінієвого сплаву Д16Т (крива 2), які пов'язані з кінетикою накопичення пошкоджень у матеріалі до руйнування.

На рис. 4 подана крива залежності пошкоджуваності D_{σ} від величини видовження зразка до руйнування Δl_i , за якою можна визначити межу деформації циліндричного участка Δl_y і деформацію зразка в шийці Δl_{iu} до руйнування. Складові в дужках формули (11) характеризують вплив зміни геометричних розмірів зразка на величину електроопору при його пружно-пластичному деформуванні.

Для сталі 12X18H10T (рис. 5) і сплаву алюмінію Д16Т (рис. 6) показані порівняльні криві пошкоджуваності від величини пружно-пластичного деформування, які отримані за зміною питомого електроопору згідно із залежністю (11) — крива 1 та за зміною модуля пружності при розтягу згідно із залежністю (3) — крива 2.

Аналізуючи криві пошкоджуваності для конструкційних матеріалів, можна бачити, що характер і величини пошкоджуваності, отримані за зміною модулів пружності і об'ємного питомого електроопору, подібні за характером і близькі між собою. З аналізу кривих можна зробити висновок, що пошкоджуваність виникає в матеріалі при появі пластичних деформацій і майже лінійно накопи-

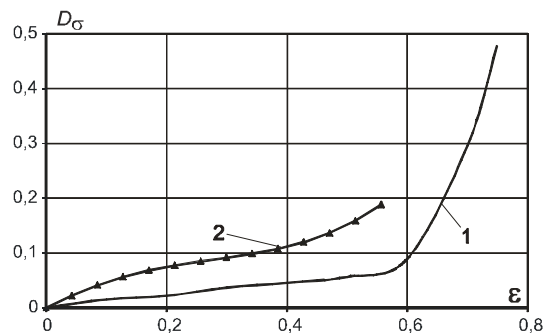


Рис. 5. Пошкоджуваність сталі 12X18H10T при розтягу: 1 — за залежністю (11); 2 — за залежністю (3)

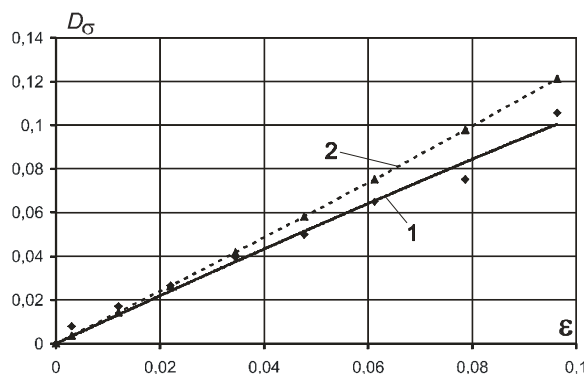


Рис. 6. Пошкоджуваність алюмінієвого сплаву Д16Т при розтягу: 1 — за залежністю (11); 2 — за залежністю (3)

чується для малопластичних матеріалів, і явно нелінійно накопичується для високопластичних матеріалів. Висока ефективність накопичення пошкоджуваності спостерігається в шийці.

Пошкоджуваність при крученні. Пошкоджуваність при крученні круглого зразка

$$D_\tau = 1 - \frac{V_0}{V_i}, \quad (12)$$

де V_i — поточна величина об'єму робочої зони при пружно-пластичному крученні $V_i = V_0 + \Delta V_\tau$; ΔV_τ — зміна об'єму, викликана пошкоджуваністю від кручення.

Зміна об'єму матеріалу при пружно-пластичному крученні з рівняння (12) дорівнює

$$\Delta V_\tau = V_0 \frac{D_\tau}{1 - D_\tau}, \quad (13)$$

де $V_0 = \pi d_0^2 l_0 / 4$ — початковий об'єм робочої зони зразка до деформування; $V_i = \pi d_i^2 l_i / 4$ — поточний об'єм робочої зони зразка при напрацюванні; d_0 та d_i — діаметри, а l_0 , l_i — довжини робочої зони зразків, відповідно, до навантаження і їх зміна в процесі пружно-пластичного навантаження крученням.

Як відомо [7], абсолютний кут закручування робочої зони зразка циліндричної форми φ , діаметра d і довжини l крутним моментом $M_{кр}$ дорівнює

$$\varphi = \frac{M_{кр} l 32}{G \pi d^4} = \frac{M_{кр} 2 \pi l^3}{G V^2}, \quad (14)$$

де G — модуль зсуву; $V = \pi d^2 l / 4$ — об'єм робочої зони зразка.

Зі співвідношення (14) маємо

$$V = \sqrt{\frac{M_{кр} 2 \pi l^3}{G \varphi}} = \sqrt{\frac{M_{кр} \pi l^2 d}{G \gamma}}, \quad (15)$$

де $\gamma = \frac{\varphi d}{2l}$ — відносний кут закручування.

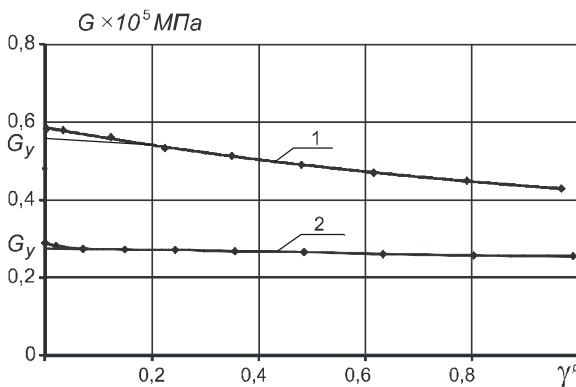


Рис. 7. Зміна модулів пружності G при крученні зразків зі сталі 12X18H10T (крива 1) і зразків з алюмінієвого сплаву Д16Т (крива 2)

На початковій стадії закручування об'єм робочої зони

$$V_0 = \sqrt{\frac{M_{кр0} \pi l_0^2 d_0}{G_y \gamma_0}}, \quad (16)$$

де $M_{кр0}$ — крутний момент на початкових стадіях навантаження; G_y — усталена величина модуля пружності при зсуві, яка визначається апроксимацією кривої зміни модуля пружності від поточної величини кута закручування зразка на перших етапах деформування.

Поточна зміна об'єму робочої зони при закручуванні

$$V_i = \sqrt{\frac{M_{кри} \pi l_i^2 d_i}{\tilde{G}_y \gamma_i}}, \quad (17)$$

де $M_{кри}$ — крутний момент на проміжних стадіях навантаження; \tilde{G} — ефективна величина модуля пружності при зсуві, яка враховує його деградацію і визначається на проміжних етапах закручування зразка на величину відносного кута закручування $\gamma_i = \frac{\varphi_i d_i}{2l_i}$; φ_i — поточний кут закручування на проміжних етапах.

Враховуючи співвідношення (16) і (17), пошкоджуваність при крученні D_τ з (12) має вигляд

$$D_\tau = 1 - \sqrt{\frac{M_{кр0} l_0^2 d_0 \tilde{G}_y \gamma_i}{M_{кри} l_i^2 d_i G_y \gamma_0}} = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{G}_y}{G_y}} \sqrt{\frac{M_{кр0} l_0^2 d_0 \gamma_i}{M_{кри} l_i^2 d_i \gamma_0}}. \quad (18)$$

Усталені величини модулів зсуву G_y на початкових і поточних пружно-пластичних навантаженнях для круглих зразків зі сталі 12X18H10T (крива 1) і алюмінієвого сплаву Д16Т (крива 2) та зміна їх при напрацюванні \tilde{G} подана на рис. 7.

На рис. 8 і рис. 9 наведені криві визначення зміни модуля пружності при крученні відповідно зразків сталі 12X18H10T та алюмінієвого сплаву Д16Т, викликаного кінетикою накопичення пошкоджень. Про зменшення модуля пружності \tilde{G} свідчить постійне зменшення кута γ_i при кожному наступному навантаженні — розвантаженні при пружно-пластичному крученні.

У зв'язку з тим, що при крученні форма робочої зони зразка залишається циліндричною, тобто в ній відсутнє

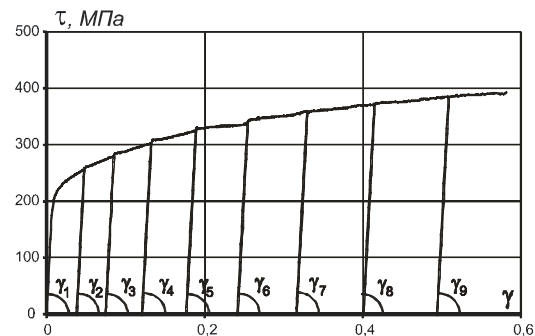


Рис. 9. Діаграма східчастого навантажування і розвантажування при розтягуванні зразка з алюмінієвого сплаву Д16Т

місцеве звуження, то кінетику накопичення пошкоджень при напрацюванні за допомогою зміни питомого електроопору доцільно визначити першою складовою з (11):

$$D_{\tau} = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_i} \left(\frac{l_0^2 U_i}{l_i^2 U_0} \right), \quad (19)$$

де ρ_0, ρ_i — початкова й поточна величини питомого електроопору при напрацюванні; l_0, l_i — початкова й поточна довжина робочої зони зразка при крученні; U_0, U_i — початкова й поточна величини електричної напруги в робочій зоні зразка при крученні.

На рис. 10 і рис. 11 подані порівняльні криві кінетики накопичення пошкоджуваності від величини пружно-пластичного кручення в зразках сталі 12X18H10T і алюмінієвого сплаву Д16Т, визначені за зміною питомого електричного опору згідно з рівнянням (19) — крива 1 і за зміною поточного модуля пружності \tilde{G} при напрацюванні, згідно з формулою (18) — крива 2. Аналізуючи криві на рис. 10 і рис. 11, можна зазначити, що характер і величини пошкоджуваності, отримані за зміною модуля пружності і зміною питомого електроопору, близькі між собою за характером і за величинами. Для малопластичного сплаву алюмінію Д16Т залежність пошкоджуваності від пластичної деформації майже лінійна, тоді як для високопластичної сталі 12X18H10T ця залежність має явно нелінійний характер.

Пошкоджуваність при пропорційному деформуванні. Зміна об'єму в результаті накопичення пошкоджень при пружно-пластичному пропорційному деформуванні $\Delta V_{\sigma\tau}$, яке враховує осьове ΔV_{σ} і крутне деформування ΔV_{τ} , дорівнює

$$\Delta V_{st} = \Delta V_{\sigma} Y_{st} + \Delta V_{\tau}, \quad (20)$$

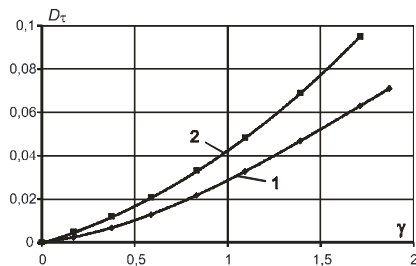


Рис. 10. Пошкоджуваність сталі 12X18H10T при крученні: 1 — за зміною питомого об'ємного електричного опору; 2 — за зміною модуля пружності G

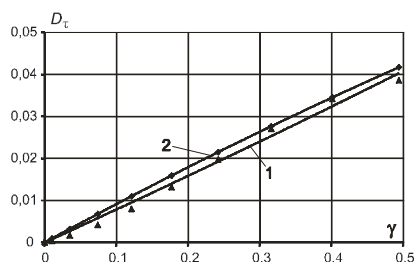


Рис. 11. Пошкоджуваність сплаву алюмінію Д16Т при крученні: 1 — за зміною питомого об'ємного електричного опору; 2 — за зміною модуля пружності G

де $\Psi_{\sigma\tau}$ — параметр напруженого стану, аналогічно з τ_{max}/σ_{max} показує вплив на величину пошкоджуваності при осьовому навантаженні ΔV_{σ} величини пошкоджуваності при крутному деформуванні ΔV_{τ} , який визначається з таких міркувань.

При крученні на головних площадках робочої зони зразка діють від кручення нормальні напруження $-\sigma'_1$, які викликають на них розтяг і стиск відповідними напруженнями $+\sigma'_1$ і $-\sigma'_3$, які мають максимальні величини на зовнішній поверхні робочої зони зразка і, відповідно,

дорівнюють [6]: $\sigma'_{1max} = -\sigma'_{3min} = \frac{M_{kpi}}{W_p} = \tau$, де M_{kpi} —

поточна величина крутного моменту; W_p — полярний момент опору робочої зони зразка.

На рис. 12,а показана схема розподілу головних напружень у зразку при крученні, а на рис. 12,б — схема розподілу нормальних напружень у зразку з врахуванням головних напружень від кручення $+\sigma'_1$ і $-\sigma'_3$ та коефіцієнта закриття мікропошкоджень при зміні напрямку нормального напруження h від дії напруження $-\sigma'_3$ при східчастому пружно-пластичному пропорційному навантаженні.

Параметр напруженого стану від нормального напруження при осьовому навантаженні $-\sigma_1$ і що діють на головних площадках від кручення σ'_1 та $-\sigma'_3$

$$\begin{aligned} \Psi_{\sigma\tau} &= \frac{\sigma_{екв}}{\sigma_1} + \frac{\sigma'_{1max} \cos 45^\circ}{\sigma_1} - h \frac{\sigma'_{3min} \cos 45^\circ}{\sigma_1} = \\ &= 1 + \frac{\sigma_{\tau} \sqrt{2}}{2\sigma_1} (1-h) = 1 + \frac{\tau_{imax} \sqrt{2}}{2\sigma_1} (1-h), \quad (21) \end{aligned}$$

де h — коефіцієнт закриття мікропошкоджень при зміні напрямку нормального напруження.

Аналізуючи формулу (22), зміну об'єму від пропорційного деформування виразимо співвідношенням

$$D_{st} = 1 - \frac{V_0}{V_0 + \Delta V_{st}} \rightarrow \Delta V_{st} = V_0 \frac{D_{st}}{1 - D_{st}}. \quad (23)$$

З іншого боку, зміна об'єму при пропорційному деформуванні з урахуванням (2), (13), (20), (23) дорівнює

$$\begin{aligned} \Delta V_{\sigma\tau} &= V_0 \frac{D_{\sigma\tau}}{1 - D_{\sigma\tau}} = \Psi_{\sigma\tau} \Delta V_{\sigma} + \Delta V_{\tau} = \\ &= \Psi_{\sigma\tau} \frac{D_{\sigma}}{1 - D_{\sigma}} V_0 + \frac{D_{\tau}}{1 - D_{\tau}} V_0. \quad (24) \end{aligned}$$

Розв'язуючи рівняння (24) відносно пошкоджуваності при пропорційному деформуванні, отримаємо

$$D_{\sigma\tau} = \frac{D_{\sigma} \Psi_{\sigma\tau} (1 - D_{\tau}) + D_{\tau} (1 - D_{\sigma})}{D_{\sigma} \Psi_{\sigma\tau} (1 - D_{\tau}) + (1 - D_{\sigma})}. \quad (25)$$

Враховуючи співвідношення (3), (18) і (21), рівняння визначення пошкоджуваності при пропорційному деформуванні (25) можна подати так:

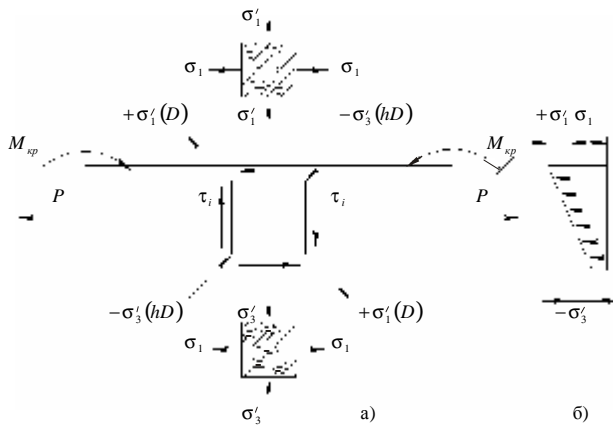


Рис. 12. Площинки дії і максимальні осьові 1 дотичні напруження для елемента на поверхні зразка, підданого розтягу і крученню

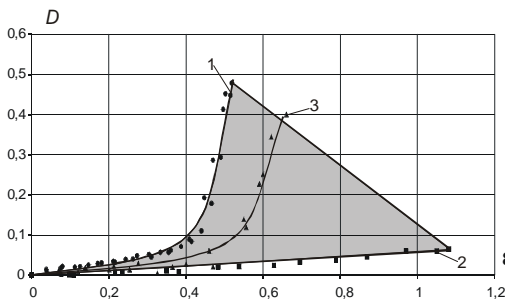


Рис. 13. Залежності кінетики накопичення пошкоджень від рівня пластичної деформації ϵ_i^p для сталі 12X18H10T; 1 — розтяг; 2 — кручення; 3 — пропорційне деформування

$$D_{\text{ст}} = 1 - \frac{\sqrt{\frac{G_0}{G_y}} \sqrt{\frac{M_{kp0} l_0^2 d_0 \gamma_i}{M_{kp_i} l_i^2 d_i \gamma_0}} \sqrt{\frac{E_0}{E_y}} \sqrt{\frac{N_0 l_0}{N_i l_i}}}{\left\{ \left[1 - \sqrt{\frac{E_0}{E_y}} \sqrt{\frac{N_0 l_0}{N_i l_i}} \right] \left[1 + \frac{\tau_{\max} \sqrt{2}}{2\sigma_1} (1-h) \right] \right\}} R$$

$$R = \sqrt{\frac{G_0}{G_y}} \sqrt{\frac{M_{kp0} l_0^2 d_0 \gamma_i}{M_{kp_i} l_i^2 d_i \gamma_0}} + \sqrt{\frac{E_0}{E_y}} \sqrt{\frac{N_0 l_0}{N_i l_i}} \quad (26)$$

За допомогою зміни питомого електроопору робочої зони зразків згідно з рівнянням (11) визначається кінетика накопичення пошкоджень у конструкційному матеріалі при пропорційному деформуванні.

На рис. 13 подані криві кінетики накопичення пошкоджень у зразках сталі 12X18H10T при пружно-пластичному деформуванні осьовому (крива 1), крученні (крива 2) і пропорційному (крива 3), які отримані відповідно до рівнянь (3), (18) і (26) — суцільні лінії і за допомогою зміни питомого електроопору в зразку згідно з формулами (11) і (19) — окремі крапки різної форми.

Аналіз кривих пошкоджуваності показує, що пошкоджуваність при пропорційному деформуванні знаходиться в межах між пошкоджуваністю при осьовому пружно-пластичному навантаженні і пошкоджуваністю при крученні.

Аналіз сукупності отриманих даних дає підстави зробити такі висновки: розроблені методики дослідження пошкоджуваності в конструкційному матеріалі за зміною модулів пружності E та G і питомого електричного опору при пружно-пластичному осьовому, крутному і пропорційному деформуванні; експериментально для сталі 12X18H10T та алюмінієвого сплаву Д16Т встановлено, що пружно-пластичне осьове, крутне та пропорційне деформування призводить до деградації модулів пружності E та G , електричних властивостей через розпушення матеріалу. Експериментально встановлено, що кінетика накопичення пошкоджень при пропорційному деформуванні знаходиться в межах між кінетикою накопичення пошкоджень при осьовому навантажуванні та кінетикою накопичення пошкоджень при пружно-пластичному крученні. Експериментально встановлено, що при пружно-пластичному деформуванні кінетика накопичення пошкоджень нелінійна для високопластичних матеріалів (наприклад, сталь 12X18H10T) і майже лінійна для малопластичних матеріалів (наприклад, сплав алюмінію Д16Т).

Література

1. Голуб В.П., Кобзарь Ю.М., Фернати П.В. Особенности нелинейной ползучести линейно- и нелинейно упругих материалов при осевом нагружении // Вестник НТУУ «КПИ», серия «Мишиностроение». — Київ, 2003. — №44. — С. 35—37.
2. Дехтяр И.Я., Литовченко С.Г., Федченко Р.Г. Изучения влияния пластической деформации на электрические свойства сплавов системы Fe-Al // Вопросы физики металлов и металловедения. — 1960. — №11. — С. 121—128 с.
3. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики. Справочник. — К.: Наук. думка, 1989. — 862 с.
4. Лебедев А.О., Бобир М.И., Ламашевський В.П. Механіка матеріалів для інженерів. Навч. посіб., Київ, НТУУ «КПІ», ВПК «Політехніка», 2006, 286с.
5. Леметр Ж. Континуальная модель повреждения, используемая для расчета разрушения пластических материалов // Теоретические основы. — 1985. — Т. 108, №1. — С. 90—98.
6. Механика разрушения и прочности материалов: Справочное пособие: в 4 т. / Под общ. ред. Панасюка В.В. — К.: Наук. думка, 1988.
7. Писаренко Г.С., Квітка О.Л., Уманський Е.С. Опір матеріалів. — К.: Вища шк., 1993. — 654 с.
8. Разрушение: в 7-ми т. / Под ред. Г. Либовица. — М.: Мир, 1976.
9. Тамуж В.П., Куксенко В.С. Микромеханика разрушения полимерных материалов. — Рига: Знание, 1978. — 167 с.

Отримана 01.05.09

A. Grabovsky

Complex estimation of damageability of material at elasto-plastic deformation

National Technical University of Ukraine "KhPI", Kyiv

The research of kinematics of damage accumulation in constructional materials under elastic – plastic strain loading and torsion loading and proportional deformations till failure by the methods of degradation of the modulus of elasticity E (axial loading), G (torsion) and the resistivity of working area of a sample has been considered. The results of the experimental investigation of damage under strain loading and tozion loading and proportional deformations of samples made of high – ductility steel 12X18H10T and low – ductility aluminum alloy D16T have been adduced.