

УДК 539.4+620.1

Силовa і деформаційна концепція руйнування

Грабовський А.П., Бондарець О.А., Бабієнко І.І.
КІП ім. Ігоря Сікорського, м.Київ, Україна

Анотація. В роботі розглядається кінетика накопичення пошкоджень в конструкційних матеріалах згідно двох механізмів руйнування на відрив та зріз від початку навантаження до руйнування. Були отримані критерії степені пошкоджуваності матеріалу механізмів руйнування на відрив та зріз за зміною модулів пружності E та G , а також за ростом залишкових лінійних та кутових деформацій від початку навантаження до руйнування.

Ключові слова: пружнопластичне навантаження; конструкційні матеріали; руйнування на відрив та зріз, степінь пошкоджуваності, ефективні напруження.

Надійне прогнозування ресурсу конструктивних вузлів об'єктів на стадії проектування, оцінка виробленого і прогноз залишкового ресурсу на стадії експлуатації неможливі без розробки адекватних математичних моделей руйнування конструкційних матеріалів на основі континуальної механіки пошкоджуваності для індивідуальних умов експлуатації конкретних об'єктів. На стадіях накопичення розсіяних пошкоджень в конструкційному матеріалі такі моделі розробляються в рамках механіки пошкодженого середовища, яка об'єднує еволюційні рівняння процесів деформування матеріалу і процесів накопичення пошкоджень і утримуючий інтегральні параметри стану, що відображають процеси перетворення структури матеріалу на мезорівні, до утворення магістральної тріщини в ньому.

Процеси накопичення пошкоджень являються багатомасштабними і багатостадійними кінетичними процесами. Вони розвиваються одночасно на різних масштабних рівнях: атомних, дислокаційних, субструктурних і структурних, що означає необхідність суміщення мікроскопічних, мезоскопічних і макроскопічних моделей. Багатостадійність процесів означає, що розвиток пошкоджуваності проходить послідовно через декілька якісно відмінних стадій, кожна з яких характеризується своїми фізичними закономірностями і своєю енергетикою. В силу цього процеси накопичення пошкоджень являються нелінійними і залежать від історії процесу експлуатації інженерних об'єктів.

Ефективні напруження на відрив $\tilde{\sigma}$ та зріз $\tilde{\tau}$ з врахуванням кінетики накопичення пошкоджень на відрив D_σ та зріз D_τ визначаються відношеннями :

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D_\sigma}; \quad \tilde{\tau} = \frac{\tau}{1 - D_\tau}; \quad (1)$$

де σ , τ - відповідно істинні напруження на відрив та зріз; D_σ , D_τ - кінетика накопичення пошкоджень при відриві та зрізі; \tilde{E} , \tilde{G} - поточні модулі пружності при напрацюванні для осьового навантаження та зсуву, E_0, G_0 - початкові величини модулів пружності на відрив та зріз перед навантаженням.

Авторами [1–5] при проведенні досліджень встановлено, що основними домінуючими процесами вичерпання ресурсу матеріалу являються процеси накопичення пошкоджень, пов'язані з розпушенням матеріалу, що призводить до деградації його модулів пружності та інших фізико-механічних властивостей для двох видів руйнувань, на відрив $-E$ та зріз $-G$. Параметром оцінки деградації являється пошкоджуваність матеріалу при осьовому

навантаженні $-D_\sigma$ та при зсуві D_τ , які характеризують процес руйнування матеріалів при дії нормальних напружень $-\sigma$ та дотичних $-\tau$, оцінюються відношенням (1)

$$D_\sigma = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{E}_i}{E_0}}; \quad D_\tau = 1 - \sqrt{\frac{\tilde{G}_i}{G_0}} \quad (2)$$

В роботі розглядається зміна модулів пружності в залежності від величини пружно-пластичних деформацій до руйнування. На рис.1 представлені криві відносної зміни модулів пружності від зміни пружнопластичних відносних деформацій при осьовому навантаженні та при зсуві.

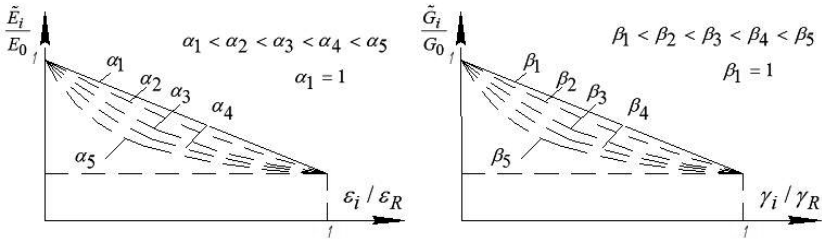


Рис. 1. Кінетика накопичення пошкоджень в відносних величинах на відрив - $\tilde{E}_i / E_0 = f(\epsilon_i / \epsilon_R)$, та зріз - $\tilde{G}_i / G_0 = f(\gamma_i / \gamma_R)$;

Авторами отримані відношення для оцінки кінетики накопичення пошкоджень (3):

$$D_\sigma = 1 - \sqrt{1 - \varphi_\sigma \left(\frac{\epsilon_i}{\epsilon_R}\right)^\alpha}; \quad D_\tau = 1 - \sqrt{1 - \varphi_\tau \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_R}\right)^\beta} \quad (3)$$

де $\varphi_\sigma = \frac{E_0 - \tilde{E}_R}{E_0}$, $\varphi_\tau = \frac{G_0 - \tilde{G}_R}{G_0}$ – глибини зміни модулів пружності при осьовому навантаженні та зсуві. \tilde{E}_R , \tilde{G}_R - модулі пружності на відрив та зсув при руйнуванні, ϵ_R , γ_R - відповідно залишкові лінійні та кутові деформації при руйнуванні.

На рис.2 представлені криві визначення показників степеней α та β в залежності від пластичних властивостей матеріалів $-\delta(\%)$.

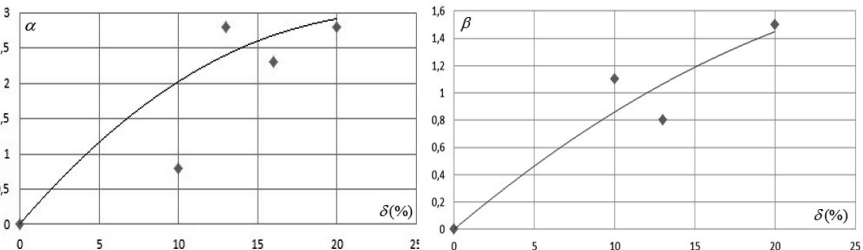


Рис.2. Криві залежностей показників степеней α та β від пластичних властивостей матеріалів $-\delta(\%)$

Криві графічних залежностей $\alpha = f(\delta\%)$, $\beta = f(\delta\%)$ (рис.2) описуються аналітичними функціями:

$$\alpha = 15,7 \cdot 10^{-2} \delta - 6 \cdot 10^{-4} \delta^2; \quad \beta = 10^{-2} \delta - 14 \cdot 10^{-4} \delta^2; \quad (4)$$

З рівнянь (2) та (3) поточні величини модулів пружності з врахуванням кінетики накопичення пошкоджень в конструкційних матеріалах за залишковими лінійними та кутовими деформаціями виражаються співвідношеннями:

$$\tilde{E}_i = E_0 - (E_0 - \tilde{E}_R) \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_R} \right)^\alpha; \quad \tilde{G}_i = G_0 - (G_0 - \tilde{G}_R) \left(\frac{\gamma_i}{\gamma_R} \right)^\beta; \quad (5)$$

На рис. 3 показано формальне пояснення впливу часу $T_{i\sigma}$ та $T_{i\tau}$ на критерії ступені пошкоджуваності $D_{\sigma_i}/D_{\sigma_R}$ та D_{τ_i}/D_{τ_R} при відповідному руйнуванні конструкційного матеріалу на відрив та зріз від кінетики накопичення в ньому пошкоджень до руйнування.

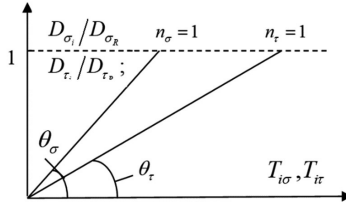


Рис. 3. Пояснення впливу часу $T_{i\sigma}$ та $T_{i\tau}$ на руйнування в рамках механічної концепції: при руйнуванні на відрив - n_{σ} та зріз - n_{τ}

На рис. 4 показані приклади визначення коефіцієнтів n_{σ} та n_{τ} для розрахунку функцій довговічності матеріалу з урахуванням кінетики накопичення пошкоджень до руйнування.

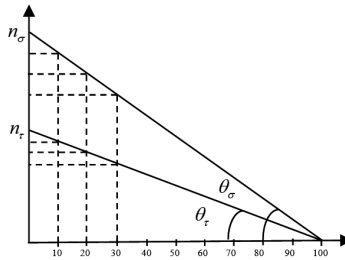


Рис. 4. Визначення коефіцієнтів n_{σ} та n_{τ} для конструкційних матеріалів різної пластичності при розрахунку функцій довговічності до руйнування.

Критерій ступені пошкоджуваності конструкційного матеріалу виражається відношеннями:

$$f(T_{\sigma})^n = \left(\frac{D_{\sigma_i}}{D_{\sigma_R}} \right)^n = \frac{1 - \sqrt{1 - \varphi_{\sigma} (\varepsilon_i / \varepsilon_R)^\alpha}}{1 - \sqrt{1 - \varphi_{\sigma}}}; \quad 0 \leq f(D_{\sigma}, t) < 1;$$

$$f(T_{\tau})^n = \left(\frac{D_{\tau_i}}{D_{\tau_R}} \right)^n = \frac{1 - \sqrt{1 - \varphi_{\tau} (\gamma_i / \gamma_R)^\beta}}{1 - \sqrt{1 - \varphi_{\tau}}}; \quad 0 \leq f(D_{\tau}, t) < 1. \quad (6)$$

Функція довговічності матеріалу:

$$f(T_{\sigma}) = \frac{T_{i\sigma}}{T_{R\sigma}} = \sqrt[n]{\frac{1 - \sqrt{1 - \varphi_{\sigma}(\varepsilon_i / \varepsilon_R)^{\alpha}}}{1 - \sqrt{1 - \varphi_{\sigma}}}}; \quad (7)$$

$$f(T_{\tau}) = \frac{T_{i\tau}}{T_{R\tau}} = \sqrt[n]{\frac{1 - \sqrt{1 - \varphi_{\tau}(\gamma_i / \gamma_R)^{\beta}}}{1 - \sqrt{1 - \varphi_{\tau}}}}$$



Рис. 5. Криві залежності функцій довговічності конструкційних матеріалів від величини залишкових деформацій до руйнування

Силовая и деформационная концепция разрушения

Грабовский А.П., Бондарец А.А., Бабієнко І.І.

Аннотация. В работе рассматривается кинетика накопления повреждений в конструкционных материалах согласно двух механизмов разрушения на разрыв и срез от начала нагрузки до разрушения. Полученные критерии степени повреждаемости материала механизмов разрушения на разрыв и срез за изменением модулей упругости E и G , а также за ростом остаточных линейных и угловых деформаций от начала нагрузки до разрушения.

Ключевые слова: упруго-пластичная нагрузка; конструкционные материалы; разрушения на разрыв и срез, степень повреждаемости, эффективные напряжения.

Force and deformation concept of destruction

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

Abstract. The work deals with the kinetics of damage accumulation in structural materials according to the two mechanisms of fracture destruction and the shear from the beginning of loading to failure. The criteria for the degree of damage to the material of the mechanisms of fracture and slice fracture were obtained by changing the elastic modulus E and G , as well as by the growth of residual linear and angular deformations from the beginning of loading to fracture.

Keywords: elastic-plastic load; construction materials; tear and shear fracture, degree of damage, effective stresses.

Список посилань

1. Lemaitre J. A Course on Damage Mechanics, second ed., Springer- Berlin Heidelberg, 1996. p.228
2. Леметр Ж. Континуальная модель повреждения [Текст] / Теоритические основы, т. 108 № 1-1985 с. 90-98
3. Голуб В.П. Нелинейная маханика континуальной поврежденности [Текст]/ Прикладная механика.-2000.- №3.-С.31-66.
4. Бобыр Н.И. Обобщенная модель повреждаемости [Текст] / Проблемы прочности - 2000, N5. - С.112-121.
5. Новожилов В.В. О пластическом разрыхлении // Прикладная математика и механика. – 1965. – 29, № 4. – ст. 681 – 689.