

УДК 620.17

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ДЕФОРМУВАННІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Борис Карпінос

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

karpinos@ipp.kiev.ua

Наведено критерії подібності термодинамічних станів матеріалів, а також критерії гомохронності, зносостійкості (втрати маси), фізико-хімічних перетворень, які використовуються при аналізі результатів експериментальних досліджень механічних властивостей матеріалів. Розробка критеріїв базувалася на засадах теорій подібності і аналізу розмірності.

Зворотний процес пружного деформування характеризується одним переважаючим механізмом. Перехід матеріалу з одного стану в інший відбувається одним шляхом. Це дозволяє інваріанти механічного стану \mathbf{Me}_σ , \mathbf{Me}_τ

$$\mathbf{Me}_\sigma = \varepsilon_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{E}, \quad \mathbf{Me}_\tau = \gamma_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{E},$$

вважати необхідними, а інваріанти теплового стану \mathbf{Tt} та гомохронності \mathbf{Ht} :

$$\mathbf{Tt} = \alpha T, \quad \mathbf{Ht} = t\omega_{зв} = t^3 \sqrt{2\alpha E / k} \sqrt{E / \rho}$$

– достатніми критеріями подібності, де σ_{ij} , τ_{ij} , ε_{ij} , γ_{ij} – відповідно компоненти нормальних та дотичних напружень та деформацій, E , G – модулі пружності та зсуву, T – абсолютна температура, t – час, α – коефіцієнт лінійного розширення, ρ – густина, $\omega_{зв}$ – частота звукових коливань, k – стала Больцмана. Подібність станів матеріалу в досліді досягається за умов $\{\mathbf{Me}_\sigma, \mathbf{Me}_\tau, \mathbf{Tt}, \mathbf{Ht}\} = \text{idem}$. Для подібності термопружних станів додатковою умовою є $\mathbf{Td} = c_p \rho / (E\alpha) = \text{idem}$, де c_p – теплоємність.

При пластичному деформуванні спостерігається декілька механізмів. Перехід матеріалу з одного в інший стан може відбуватися різними шляхами, які характеризують особливості незворотності процесу деформування. Для їх врахування запропоновано інваріанти поточної \mathbf{Me}_ξ та загальної \mathbf{Me}_ζ пошкоджуваності

$$\mathbf{Me}_\xi = 1 - \mathbf{Me}_i = 1 - \frac{\sigma_{p(i)}}{\varepsilon_{p(i)} E}, \quad \mathbf{Me}_\zeta = \frac{W_{p(i)}}{W_{пр}} = \frac{2 \int_0^\varepsilon \sigma_{(i)} d\varepsilon_{(i)}}{E \varepsilon_{p(i)}^2} - \left(\frac{\sigma_{пр}}{E \varepsilon_{p(i)}} \right)^2,$$

де $\sigma_{p(i)}$, $\varepsilon_{p(i)}$ – відповідно поточні значення пластичних напружень і деформацій, $W_{p(i)} = \int_0^{p(i)} \sigma_{(i)} d\varepsilon_{(i)}$ – робота пластичного деформування до деформації $\varepsilon_{p(i)}$, $W_{пр} = E\varepsilon_{p(i)}^2 / 2$ – робота пружного деформування до деформації $\varepsilon_{p(i)}$. Інваріанти \mathbf{Me}_ξ , \mathbf{Me}_ζ успішно використовуються при аналізі одно-разового та багаторазового циклічного навантажень.

Для аналізу процесів тертя та зносу залучено такі інваріанти

$$\mathbf{M}_{fr1} = \Delta m N_A / A, \quad \mathbf{M}_{fr2} = 2\Delta m E \alpha / \rho k = \Delta V / V_0,$$

$$\mathbf{M}_{fr3} = \Delta m E / (\rho^2 a^3) \sqrt{E / \rho} = \Delta m c_p^3 \rho E / \lambda^3 \sqrt{E / \rho} = \Delta m / (\rho \tilde{l}_f^3) = \Delta V / \tilde{V}',$$

де Δm , ΔV – маса та об'єм зносу, N_A – число Авогадра, A – атомна маса елемента, λ – теплопровідність, a – температуропровідність матеріалу, \tilde{l}_f – довжина вільного пробігу фонуна.

При опису структурних перетворень, процесів дифузії, хімічних реакцій використано два інваріанти. Перший, що враховує енергетичні витрати

$$\mathbf{M}_{st1} = \Delta Q / (T_{st} C_p),$$

де ΔQ , T_{st} – відповідно енергія та температура перетворення або хімічної реакції. Другий, що враховує зміну об'ємів продуктів при фізичних перетвореннях та хімічних реакціях:

$$\mathbf{M}_{st2} = \rho_{st} / \rho_0 = V_0 / V_{st} \approx (\alpha E)_0 / (\alpha E)_{st},$$

де ρ_0 , ρ_{st} , V_0 , V_{st} , $(\alpha E)_0$, $(\alpha E)_{st}$ – відповідно густина, питомий об'єм та характеристики основного матеріалу і продуктів хімічних реакцій та фізичних перетворень. При $\mathbf{M}_{st2} < 1$ – механічні характеристики продуктів перетворень кращі за такі основного матеріалу, при $\mathbf{M}_{st2} > 1$ – навпаки, гірші.

При дослідженні процесу поширення тріщин в матеріалі запропоновано інваріанти

$$\mathbf{L}_1 = \sigma / a \sqrt{F / (E\rho)} = \sigma c_p / a \sqrt{F / (E\rho)}, \quad \mathbf{L}_2 = \sigma / D_d \sqrt{F / (E\rho)},$$

де F – поверхня тріщини, D_d – коефіцієнт дифузії.

Наведені інваріанти засвідчують зв'язок між різними механічними та фізичними характеристиками матеріалів і окреслюють шляхи досягнення умов подібності станів.

FEATURES OF MODELING PHYSICAL AND MECHANICAL PROCESSES OF DEFORMATION OF STRUCTURAL MATERIALS

The invariants of material states and criteria for similarity of physical and mechanical processes of deformation of structural materials are presented. The relationship between different mechanical and physical characteristics of materials is shown when the conditions of similarity of states are met.