УДК 621.73.011.001.5

Р. Сивак
М. Колісник

ОЦІНКА ДЕФОРМОВНОСТІ ПОРИСТИХ ТІЛ ПРИ НЕМОНОТОННІЙ ПЛАСТИЧНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Запропоновано метод оцінки використаного ресурсу пластичності пористих матеріалів при великих пластичних деформаціях, який може бути використаний для дослідження пластичності матеріалів з різною початковою пористістю при холодному видавлюванні. Процес накопичення пошкоджень при пластичній деформації пористих тіл досліджено недостатньо. Для оцінки використаного ресурсу пластичності пористої спеченої заготовки використана теорія деформовності, яка позитивно зарекомендувала себе при дослідженнях пластичності суцільних матеріалів. У цій теорії основою уявлень про вичерпання запасу пластичності металів покладено модель накопичення пошкоджень у процесі пластичної формозміни. З цієї точки зору процес руйнування є кінетичним процесом розвитку, накопичення та злиття мікропор та мікротріщин.

Ключові слова: деформовність, холодна пластична деформація, схема напруженого стану, ресурс пластичності, пошкодження.

Abstract

A method for estimating the used plasticity resource of porous materials at large plastic deformations is proposed, which can be used to study the plasticity of materials with different initial porosity during cold extrusion. The process of damage accumulation during plastic deformation of porous bodies has not been studied sufficiently. To estimate the used plasticity resource of a porous sintered workpiece, the deformability theory was used, which has proven itself positively in studies of the plasticity of solid materials. In this theory, the basis of the ideas about the depletion of the plasticity reserve of metals is the model of damage accumulation during plastic deformation. From this point of view, the fracture process is a kinetic process of development, accumulation and merging of micropores and microcracks.

Keywords: deformability, cold plastic deformation, stress state diagram, plasticity life, damage.

Проблема деформовності пористих матеріалів супроводжує майже всі процеси обробки тиском. При холодній пластичній деформації ймовірність появи макротріщин в об'ємі заготовки суттєво залежить від напруженого стану і закону його зміни. Для кількісної оцінки впливу напруженого стану і історії його зміни на пластичність процес навантаження будемо задавати траєкторією $\Gamma_0(\eta_0,\mu_\sigma)$ або шляхами деформування $\eta_0(\Gamma_0)$, $\mu_\sigma(\Gamma_0)$. Залежність пластичності матеріалу від схеми напруженого стану виразимо поверхнею граничної пластичності $\Gamma_{op}(\eta_0,\mu_\sigma)$. Тоді для траєкторії малої кривизни ресурс пластичності ψ будемо розраховувати по формулі [1]

$$\psi = \int_0^{\Gamma_0} \frac{d\Gamma_0^*}{\Gamma_{op}(\eta_0, \mu_\sigma)}, \tag{1}$$

де $\psi=0$ в початковому стані і $\psi=1$ при появі макротріщини.

Формула (1) отримана на основі гіпотези про лінійний закон накопичення пошкоджень [2, 3] і задовільно описує експериментальні результати, якщо $\Delta\eta_0$ і $\Delta\mu_\sigma$ не міняють знак.

Для траєкторій середньої кривизни без зломів, а також при зміненні знаків $\Delta\eta$ і $\Delta\mu_\sigma$, оцінку використаного ресурсу пластичності будемо вести по критерію, основаному на нелінійному законі накопичення пошкоджень

$$\psi = \int_0^{\Gamma_0} n \frac{\Gamma_0^{*n-1}}{\Gamma_{op}(\eta_0, \mu_\sigma)^n} d\Gamma_0^*, \tag{2}$$

де $n = 1 + a\frac{d\eta_0}{d\Gamma_0} - b\frac{d\mu_\sigma}{d\Gamma_0}$, a і b - емпіричні коефіцієнти, які вважаються постійними для даного матеріалу.

При отримані підінтегрального виразу в (2) виходили з припущення, що закон накопичення пошкоджень в процесі пластичної деформації близький до закону зміцнення, тобто

$$\psi = \mathrm{A}\Gamma_0^m,$$

тоді

$$d\psi = \mathrm{A}m\Gamma_0^{m-1}, \tag{3}$$

якщо замість постійної А вибрати величину

$$\mathrm{A} = \frac{1}{\Gamma_{op}(\eta_0, \mu_\sigma)^n},$$

то з урахуванням (3) получимо підінтегральний вираз (2).

Для оцінки деформовності при немонотонному навантаженні введемо тензор пошкоджень [4]

$$\psi_{ij}^0 = \psi_{ij} + \psi\delta_{ij}, \tag{4}$$

де ψ - скалярна складова, ψ_{ij} - компоненти девіатора тензора пошкоджень

Необхідно відмітити, що вплив об'ємної деформації на величину ψ в явному виді враховано в критерії [5].

Значення dψ для деформуємого в холодному стані пористого тіла запишемо в вигляді

$$d\psi = \psi c\eta_0 d\Gamma_0 / |\eta_0|\Gamma_{op}(\eta_0, \mu_\sigma), \tag{5}$$

тоді для ψ получимо формулу

$$\psi = 3\psi_0^2 \exp\left(2c\int_0^{\Gamma_0}\eta_0 d\Gamma_0^* / |\eta_0|\Gamma_{0p}(\eta_0, \mu_\sigma)\right) + \sqrt{\psi_{ij}\psi_{ij}}, \tag{6}$$

де ψ_0 - залежить від початкової пористості і визначається наступним шляхом

$$\psi_0 = \frac{\Gamma_{0p} - \Gamma_{0p}^*}{\Gamma_{0p}},$$

де Γ_{po} - гранична деформація при розтягу зразка з початковою пористістю θ_0=0...0.03; Γ_{0p}^* - гранична деформація при розтягу зразка з даною початковою пористістю

Приймаючи умову руйнування в вигляді [4]

$$\psi_{ij}^0\psi_{ij}^0 = 1$$

отримаємо критерій руйнування пористих тіл при немонотонній пластичній деформації

$$3\psi_0^2 \exp\left(2c\int_0^{\Gamma_0}\eta_0 d\Gamma_0^* \Big/ |\eta_0|\Gamma_{op}\right) + \psi_{ij}\psi_{ij} = 1, \tag{7}$$

де $\psi_{ij} = \int_0^{\Gamma_0}\left(1 - a + 2a\frac{\Gamma_0^*}{\Gamma_{op}(\eta_0, \mu_\sigma)}\right)\beta_{ij}\frac{d\Gamma_0^*}{\Gamma_{op}(\eta_0, \mu_\sigma)}$, $\beta_{ij} = \frac{de_{ij}}{d\Gamma_0}$

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Shishkina Y. O. Structure, phase composition, mechanical and corrosion properties of aluminum-based composites / Y. O. Shishkina, G. A. Bagliuk, Y. S. Kyryliuk, S. F. Kyryliuk, O. V. Tolochyna, V. M. Talash // Materials Science. – 2024. – 59, № 6. – P. 679–685. DOI: 10.1007/s11003-024-00828-0.
2. Husarova I. O. Ceramics based on reaction-bonded boron carbide for heat protection coatings of space aircraft / I. O. Husarova, Y. V. Solodkyi, T. A. Manko, P. I. Loboda // Materials Science. – 2023. – 58, № 6. – P. 740–747. DOI: 10.1007/s11003-023-00724-z.
3. Teslia S. Y. Induction zone sintering of WC–8Co hard alloy / S. Y. Teslia, O. S. Kucher, I. I. Bogomol, P. I. Loboda, I. V. Solodkyi // Materials Science. – 2024. – 59, № 5. – P. 638–643. DOI: 10.1007/s11003-024-00821-7.
4. Sivak R. Determination of porosity functions in the pressure treatment of iron-based powder materials in agricultural engineering / R. Sivak, V. Kulykivskyi, V. Savchenko, S. Minenko, V. Borovskyi // Scientific Horizons. – 2023. - 26(3). - P. 124–134. DOI:10.48077/scihor3.2023.124.

5. Shtern M. B. Generalized Continuum Model of Plasticity of Powder and Porous Materials / M. B. Shtern, O. V. Mikhailov, A. O. Mikhailov // Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis. – 2021. – 60 (1-2). - P. 20–34. DOI:10.1007/s11106-021-00211-7.
6. Skorokhod V. V. Rheological Model of Sintering and Viscous Flow of Porous Materials with 2D Defects / V. V. Skorokhod, M. B. Shtern // Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis. – 2019. – 58 (7-8). - P. 399–405. DOI:10.1007/s11106-019-00089-6.
7. Kuzmov A. V. The Effect of Additional Shear Strains Induced by Die Rotation on the Radial Pressing of Metal Powder Billets / A. V. Kuzmov, M. B. Shtern, O. G. Kirkova // Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis. – 2020. - 59(3-4). - P. 127–133. DOI:10.1007/s11106-020-00145-6.
8. Rud V. D. Vibrational Molding of Filtering Materials Using Stainless Steel and Saponite Powders / V. D. Rud, N. A. Khrystynets, N. T. Rud // Powder Metallurgy and Metal Ceramicsthis. – 2020. - 58 (11-12). - P. 623–630. DOI:10.1007/s11106-020-00118-9.
9. Zvirko O. Assessment of Hydrogen Assisted Degradation of Stacker Conveyor Boom Steel / O. Zvirko, O. Tsyrulnyk, L. Polishchuk // Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. – 2023. - Part F1379. - P. 200–207. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25863-3_19.
10. Zinkovskii A. Finite element model for analysis of characteristics of shrouded rotor blade vibrations Informatyka / A. Zinkovskii, K. Savchenko, Y. Onyshchenko and etc. // Automatyka, Pomiary w Gospodarce i Ochronie Srodowiska. – 2022 – 12 (4). - P. 11–16. DOI:10.35784/iapgos.3264.

Сивак Роман Іванович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, sivak_r_i@ukr.net.
Колісник Максим, студент групи 1ГМ-23б, факультету машинобудування та транспорту.

Sivak Roman, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, sivak_r_i@ukr.net.
Kolisnyk Maksym, student of group 1ГМ-23б, Faculty of Mechanical Engineering and Transport.