

УДК 621.73.011

Р. І. Сивак, к. т. н.;

О. В. Карватко, асп.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРЯМОГО ВИДАВЛЮВАННЯ ПОРИСТОЇ ЗАГОТОВКИ

Досліджений процес видавлювання спеченої пористої заготовки з мідного порошку ПМС-1. Установлено, що при прямому видавлюванні має місце немонотонність навантаження. Запропонована методика оцінки використаного ресурсу пластичності пористих тіл при немонотонній деформації.

В технологічних процесах отримання заготовок і виробів з порошкових матеріалів особливе місце займають процеси холодної пластичної деформації спечених матеріалів. Процеси холодного формозмінення дозволяють отримати вироби необхідної форми і розмірів, а також значно зменшити вихідну пористість матеріалу. В даній роботі описуються результати досліджень процесу прямого видавлювання спечених пористих заготовок з мідного порошку ПМС-1, які пропонується використовувати в подальшому для отримання заготовок з потовщеннями в процесі радіального видавлювання з контурною осадкою. Тому ставилася задача отримати максимальну щільність і звести до мінімуму величину використаного ресурсу пластичності в тих обсягах, в яких у процесі подальшого формозмінення інтенсивність накопичення пошкоджень буде максимальною.

Кінетика процесів ущільнення та енергосилові параметри процесу прямого видавлювання досліджувались в роботах [1, 2]. Г. Л. Петросян [1] та Б. А. Друянов [2] зазначають, що процес прямого видавлювання спечених порошкових матеріалів є одним із ефективних процесів формозмінення, який дозволяє отримувати практично безпористу структуру виробів. Однак в цих роботах не розглядалися питання деформовності.

При прямому видавлюванні має місце всебічне нерівномірне стискання, яке накладається на доволі великі зсуви. Така схема деформування сприяє зменшенню пористості вихідної заготовки й покращенню її фізико-механічних властивостей. На співвідношення стискувальних і дотичних напружень і на нерівномірність їх розподілу в основному впливає величина кута α конічного каналу матриці. Найбільша нерівномірність напружень має місце для кута $\alpha = 90^\circ$. Зі зменшенням кута α нерівномірність розподілу деформацій зменшується тільки до деяких значень. Для малих кутів $\alpha < 30^\circ$, у зв'язку із збільшенням поверхні контакту, нерівномірність деформацій знову збільшується. В даному випадку значний вплив мають сили тертя, причому чим ці сили більші, тим більша нерівномірність. Це свідчить про існування оптимального кута α , для якого нерівномірність деформацій мінімальна. На основі аналізу результатів роботи [1] нами прийнято кут $\alpha = 60^\circ$ і ступінь обтиснення 43 %.

Для дослідження кінематики течії пористого матеріалу на стадії усталеного видавлювання використовували метод координатних сіток [2]. Експериментальні дослідження прямого видавлювання виконували на зразках спеченого пористого матеріалу з мідного порошку ПМС-1. Вихідні заготовки мали початкову пористість $\theta_0 = 0,2$ і розміри $h_0 = 60$ мм, $d_0 = 20$ мм. Зразки розрізалися на дві половини і на меридіональний переріз однієї із них наносили сітку з кроком 0,7 мм на фрезерному верстаті з ЧПК. видавлювання виконували на пресі ПММ-125 за допомогою спеціально сконструйованого пристрою, що має комплект змінних матриць. Зовнішній діаметр заготовки, тобто діаметр після розпресовки в контейнері, складає $d_0 = 20$ мм, а зовнішній діаметр пресованого прутка дорівнює $d = 15,08$ мм.

Координати вузлів вихідної сітки z_0 , r_0 заміряли на інструментальному мікроскопі, потім половинки складали і зразок видавлювали. На стадії усталеного видавлювання визначали величину

сили P і швидкість пуансона v_0 , потім деформування припиняли і зразок випресовували з матриці. Координати вузлів деформованої сітки z, r знову вимірювали на інструментальному мікроскопі. Таким чином у вузлах сітки були отримані експериментальні функції ейлерових координат від лагранжевих $z = z(z_0, r_0)$, $r = r(z_0, r_0)$ та лагранжевих координат від ейлерових $z_0 = z_0(z, r)$, $r_0 = r_0(z, r)$. Швидкості переміщення частинок матеріалу v_z, v_r в процесі стаціонарної деформації розраховували за співвідношеннями приведеними в [3]. Компоненти тензора швидкостей деформацій \dot{e}_{ij} визначали за відомими формулами

$$\dot{e}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right); \dot{\gamma} = \sqrt{\left(\dot{e}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{e} \delta_{ij} \right) \left(\dot{e}_{ij} - \frac{1}{3} \dot{e} \delta_{ij} \right)}, \quad (1)$$

де δ_{ij} — символ Кренекера, $\dot{\gamma}$ — інтенсивність швидкості деформацій в пористому тілі.

Інтенсивність швидкостей деформацій в матеріалі основи $\dot{\gamma}_0$ обчислювали за формулою [4, 5]

$$\dot{\gamma}_0^2 = \frac{\psi(\theta) \dot{e}^2}{1 - \theta} + \frac{\varphi(\theta) \dot{\gamma}^2}{1 - \theta}, \quad (2)$$

де θ — пористість.

При цьому, згідно з [4] функції пористості $\varphi(\theta)$ та $\psi(\theta)$ такі

$$\varphi(\theta) = (1 - \theta)^{4,7}, \quad \psi(\theta) = 0,64 \frac{(1 - \theta)^{5,67}}{\theta^{0,97}}. \quad (3)$$

Для розрахунку розподілення пористості використовували співвідношення [4]

$$\theta = 1 - (1 - \theta_0) \frac{r_0}{r} \left(\frac{\partial r_0}{\partial r} \frac{\partial z_0}{\partial z} - \frac{\partial r_0}{\partial z} \frac{\partial z_0}{\partial r} \right), \quad (4)$$

де $\theta_0(z_0(z, r), r_0(z, r))$ – вихідна пористість зразка, $z_0(z, r), r_0(z, r)$ – функції вихідних (лагранжевих) змінних від ейлерових.

Накопичену деформацію матеріалу основи Γ_0 обчислювали за формулою

$$\Gamma_0(z, r) = \int_0^t \dot{\gamma}_0 dt \quad (5)$$

вздовж траєкторії переміщення частинок матеріалу (вздовж лінії координатної сітки). Визначаючи час деформування t , враховували, що довільна частинка переміщується в сусіднє положення координатної сітки за той самий проміжок часу

$$\Delta t = \Delta z_0 / v_0, \quad (6)$$

де Δz_0 — крок координатної сітки в недеформованій зоні.

Компоненти тензора напружень знаходили використовуючи рівняння рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0, \quad (7)$$

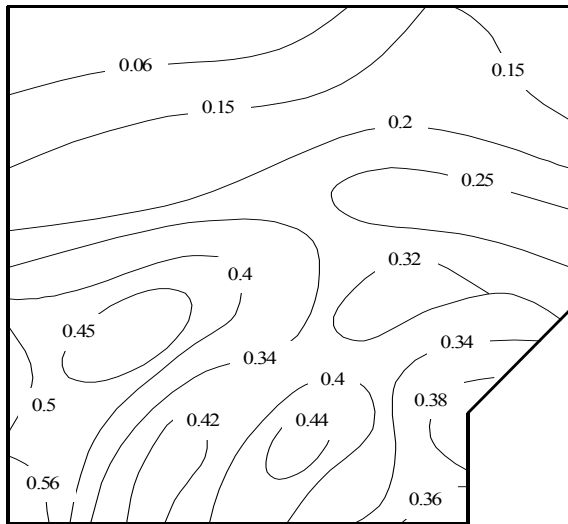
де $\sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_z$ — відповідно радіальне, тангенціальне та осьове нормальні напруження, τ_{rz} — дотичне напруження.

Граничні умови, які для процесу видавлювання приймали в інтегральному вигляді на границі пружної і пластичної зон на вході G_1 і G_2 на виході із матриці

$$P_n = 2\pi \int_{G_n} r(\sigma_z v_z + \tau_{1z} v_z) dG, \quad (8)$$

де $P_n (n = 1, 2)$ – зусилля на межі G_n, v_z, v_r — компоненти вектора зовнішньої нормалі до G_n .

Компоненти девіатора напружень визначали зі співвідношення теорії течії. При цьому також використовували співвідношення зв'язку кінематичних і статичних величин.



Розподіл використаного ресурсу пластичності ψ по меридіональному перерізу пористої заготовки за умови прямого видавлювання

$$\tau = \tau_0 \varphi(\theta) \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0}; \quad p = \tau_0$$

де $\dot{\epsilon} = e_{ij} \delta_{ij}$ — швидкість об'ємної деформації, τ_0 — інтенсивність девіатора напружень в матеріалі основи.

Показник жорсткості напруженого стану матеріалу основи η_0 і параметр Надаї-Лоде μ_σ розраховували за формулами

$$\eta_0 = \eta \sqrt{\frac{\varphi(\theta)}{(1-\theta) \left(\frac{1}{6} \frac{\varphi(\theta)}{\psi(\theta)} \right)}}$$

де $\eta = \sqrt{6} \frac{p}{\tau}$, $p = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$ — середнє напруження в пористому тілі, τ — інтенсивність девіатора напружень.

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — головні напруження.

Використаний ресурс пластичності визначали за критерієм [6]:

$$\psi = 3\psi_0^2 \exp \left(2c \int_0^{\Gamma_0} \frac{\eta_0 d\Gamma_0^*}{|\eta_0| \Gamma_{op}(\eta_0, \mu_\sigma)} \right) + \sqrt{\psi_{ij} \psi_{ij}}, \quad (12)$$

де компоненти девіатора тензора пошкоджень

$$\psi_{ij} = \int_0^{\Gamma_0} \left(1 - a + 2a \frac{\Gamma_0^*(\eta_0, \mu_\sigma)}{\Gamma_{op}(\eta_0, \mu_\sigma)} \right) \beta_{ij} \frac{d\Gamma_0}{\Gamma_{op}(\eta_0, \mu_\sigma)}, \quad (13)$$

де a, c — константи, $\beta_{ij} = \frac{de_{ij}}{d\Gamma_0}$ — компоненти напрямного тензора приросту деформацій, ψ_0 —

залежить від початкової пористості і визначається за формулою

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

Γ_{op} — гранична деформація розтягування зразка з початковою пористістю $\theta_0 = 0 \dots 0,03$, Γ_{op}^* — гранична деформація розтягування зразка з даною пористістю.

У випадку $\theta_0 = 0,2$ для ψ_0 отримали значення $\psi_0 = 0,08$. Константу c прийняли рівною $c = 0,5$, а константу $a = 0,1$.

Трасекторії навантаження $\Gamma_0(\eta_0, \mu_\sigma)$ кожної частинки пластичної зони визначали за результатами розрахунків напружено-деформованого стану і значень накопиченої деформації матеріалу основи Γ_0 , показника жорсткості напруженого стану матеріалу основи η_0 і параметра Надаї—Лоде μ_σ . Для поверхні граничної пластичності $\Gamma_{op}(\eta_0, \mu_\sigma)$ використовували апроксимацію [7].

Результати розрахунків використаного ресурсу пластичності після прямого видавлювання показані на рис. Найбільші значення ψ приймає на осі заготовки ($\psi = 0,56$) і зменшується з ростом радіуса r . В місці контакту $\psi = 0,36$. Таким чином нерівномірність розподілу використаного ресурсу пластичності по радіусу на виході з матриці складає $\Delta\psi/\Delta r = 0,03 \text{ мм}^{-1}$. Отриманий розподіл можна вважати оптимальним, оскільки зразки після прямого видавлювання будуть піддаватися

радіальному видавлюванню з контурною осадкою, а за радіального видавлювання в несприятливіших умовах знаходяться зовнішні шари здеформованої заготовки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Петросян Г. Л. Пластическое деформирование порошковых материалов. — М.: Металлургия, 1988. — 225 с.
2. Друянов Б. А. Прикладная теория пластичности пористых тел. — М.: Машиностроение, 1989. — 168 с.
3. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением — К.: Вища школа, 1983. — 175 с.
4. Sivack I. O., Sakharov D. V., Babjuck T. I., Sivack R. I. The Determination of Prouisity Functions for Sintering Powder Materials // Optimum Technologies, Technologic Systems and Materials in the Machines Building Field. — 1998, TSTM-4. — P. 170—175.
5. Штерн М. Б., Сердюк Г. Г., Максименко Л. А., Трухан Ю. В., Шуляков Ю. М. Феноменологические теории пресования порошков. — Киев: Наукова думка, 1982. — 140 с.
6. Сивак І. О. Оцінка деформуємості пористих тіл // Матеріали міжнародного семінару «Реологічні моделі та процеси деформування пористих і композиційних матеріалів». — Луцьк. — 1999. — С. 37—40.
7. Сивак Р. И. Поверхность предельных деформаций материала основы для пористого спечённого материала на основе меди // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении. — Краматорск: Донбасская государственная машиностроительная академия. — 2002. — Вып. № 4. — С. 205—208.

Рекомендована кафедрою технології та автоматизації машинобудування

Надійшла до редакції 12.10.04
Рекомендована до друку 08.12.04

Сивак Роман Іванович — доцент кафедри автоматизації та комплексної механізації технологічних процесів.
Вінницький державний аграрний університет;
Карватко Ольга Валентинівна — аспірантка кафедри технології та автоматизації машинобудування.
Вінницький національний технічний університет