

О.В. Заболотний, аспір.  
Луцький державний технічний університет

## УТОЧНЕННЯ УМОВИ ПЛАСТИЧНОСТІ УЩІЛЬНЮВАЛЬНОГО ПОРОШКОВОГО СЕРЕДОВИЩА З ЧАСТИНКАМИ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

(Представлено к.т.н., проф. В.Д. Рудем)

*Наводяться результати теоретичних та експериментальних досліджень з уточнення моделі пластичності ущільнювального порошкового середовища з частинками складної форми, яка базується на умові текучості з поверхнею навантаження у вигляді центрального еліпсоїда. Запропонована умова пластичності дозволяє з достатньою точністю встановити зв'язок компонент тензора напружень з густиною, механічними і структурними характеристиками пресування, що дає змогу керувати властивостями порошкових проникних матеріалів і забезпечує більш високий рівень достовірності розрахунків енергосилових параметрів сухого радіально-ізостатичного пресування.*

Однією з важливих задач механіки матеріалів різноманітної природи і структури є формулювання критерію, що встановлює зв'язок між силовими та структурними параметрами при деформуванні матеріалів. Для пластичних матеріалів такий критерій відображає умову виникнення пластичної течії. Однак навіть поверхневий історичний екскурс нагадує про постійно існуючу в механіці проблему подвійного вибору:

1. Намагатись відобразити певне різноманіття характеристик явищ, які вивчаються (хоча б основних), що неминуче ускладнює майбутню теорію, особливо у випадку складних середовищ.

2. Залишаючись по можливості об'єктивним в аналізі явищ, які вивчаються, намагатись отримати рівняння стану не надто складної структури, що дозволить їх проінтегрувати і практично провести необхідні розрахунки.

В даний час використання теоретичних моделей, які включають в себе більше трьох експериментальних констант матеріалу, вважаються важкими. З іншого боку, сучасні вимоги до точності розрахунків на міцність технологічних процесів обробки матеріалів вважають обов'язковим наявність у рівняннях стану розрахункових констант, причому, наявність таких констант матеріалу забезпечує як задовільну точність розрахунків, так і можливість подальшого теоретичного аналізу процесів з урахуванням структури і особливостей матеріалу.

Модель пластичності у вигляді зсунутого еліпсоїда обертання має ширший діапазон застосування схем навантаження. Вона враховує відмінність в границях текучості порошкових матеріалів на стиск і розтяг. Разом з тим, модель пластичності у вигляді центрального еліпсоїда із врахуванням відсутності анізотропних властивостей брикетів в процесах ізостатичного пресування (ІІІ) більш краща, так як в основних рівняннях моделі відсутній достатньо складний параметр зміщення центра еліпсоїда вздовж гідростатичної осі. Слід також відмітити, що поверхні навантаження у вигляді еліпсоїдів мають тісний зв'язок із енергетичними концепціями, що лежать в основі встановлення областей граничних станів [1, 2].

Поверхня навантаження у вигляді еліпсоїда обертання має вигляд [3]:

$$\frac{3p^2}{\psi^2} + \frac{2T^2}{\varphi^2} = 1, \quad (1)$$

де  $p$  – гідростатичний тиск;

$T$  – інтенсивність дотичних напружень;

$\psi$  і  $\varphi$  – функції механічних характеристик ущільнювальних матеріалів.

В теорії пластичності компактних матеріалів визначають безпечні напруження для однорідних матеріалів при найпростіших випробуваннях (розтяг, стиск, чистий зсув). Це пояснюється не тільки простотою випробувань, а й умовами роботи деталей машин і конструкцій з компактних матеріалів. Ймовірно, подібний шлях можна визнати найбільш раціональним, якщо необхідно провести розрахунки на міцність пористих виробів. В технологічних процесах пресування деталей з порошків матеріали піддаються обробці тиском за траєкторіями навантаження, що лежать в діапазоні від схеми осадки до гідростатичного рівномірного стиску. Тому природним було бажання підвищити точність прийнятої інтерполяції критерію текучості за допомогою двох визначуваних напружень із такого технологічного діапазону схем навантаження. Як два шукані допустимі напруження можна вибрати опір деформуванню порошкових брикетів у двох крайніх схемах навантаження: осьове пресування в жорсткій матриці без зовнішнього тертя та гідростатичне навантаження (стиск).

Тоді явний вид еліпсоїдальної поверхні навантаження (1) визначимо за розрахунковими оцінками опору деформуванню порошкового пресування різної густини у вибраному діапазоні схем навантажень.

У випадку гідростатичного стиску:  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$  і  $T = 0$ , то із (1) одержуємо:

$$p = \frac{\psi}{\sqrt{3}} = \sigma_{zc}, \tag{2}$$

де  $\sigma_{zc}$  – опір порошкового проникного матеріалу (ППМ) гідростатичному стиску.

У випадку осьового пресування в закритій матриці при відсутності сил зовнішнього тертя отримаємо:

$$p = \frac{(1 + 2\xi)}{3} \sigma_{on}, \quad T = \frac{(1 - \xi)}{\sqrt{3}} \sigma_{on}, \tag{3}$$

де  $\sigma_{on}$  – опір деформуванню ППМ при осьовому пресуванні в закритій матриці при відсутності сил зовнішнього тертя;

$\xi$  – коефіцієнт бічного тиску, який залежить від густини і властивостей матеріалу порошку [4]:

$$\xi = \frac{\sigma_2}{\sigma_{on}}.$$

Одним з важливих питань є виявлення кількісної закономірності пористості (густина) пресування від тиску пресування при різних схемах ущільнення, так як вона є фізико-математичним відображенням динаміки пресування і нерозривно пов'язана зі здатністю до ущільнювання порошку. На даний час основні відомі рівняння мають ряд недоліків. Наприклад, основним недоліком рівнянь М.Ю. Бальшина, Г.М. Ждановича, О.В. Романа–А.П. Богданова є наявність параметра максимального критичного напруження  $p_{кр}$ , де  $p_{кр}$  – тиск витікання при відносній густині  $\nu = 1$ . Такого параметра в обробці металів тиском не існує. Він введений штучно, щоб спростити залежності. Не існує фізичних методів визначення  $p_{кр}$ , на відміну від визначення  $\sigma_T$ . Рівняння К.А. Конопицького-Торре більш краще, так як містить параметр границі текучості матеріалу частинок порошку ( $\sigma_T$ ). Крім того, при  $\nu = 1$   $p \rightarrow \infty$ , що відповідає дійсності. Однак воно не враховує зміцнення матеріалу частинок порошку в процесі пресування, яке залежить від ступеня ущільнення, тобто:

$$\sigma_T = \sigma_{T_0} \left( \frac{\nu}{\nu_0} \right)^k, \tag{4}$$

де  $\sigma_{T_0}$ ,  $\sigma_T$  – границі текучості матеріалу частинок порошку до і в процесі пресування, відповідно;

$\nu_0$ ,  $\nu$  – початкова та поточна відносна густина відповідно;

$k$  – показник зміцнення, що залежить від властивостей матеріалу порошку і схем пресування (визначається експериментально). Тому залежність густини пресування від тиску пресування прийме такий вигляд:

$$p = 2\sigma_{T_0} \left( \frac{\nu}{\nu_0} \right)^k \ln \frac{1 - \nu_0}{1 - \nu}. \tag{5}$$

При  $\nu = \nu_0$ ,  $p = 0$ ,  $\nu = 1$ ,  $p \rightarrow \infty$ , що відповідає дійсності.

Аналізуючи результати розрахунків і експериментів помічено, що запропоноване рівняння (5) дає більш високий ступінь точності, і разом з тим воно залишається достатньо простим для проведення розрахунків.

Тоді явний вид функцій механічних характеристик  $\psi$  і  $\varphi$ , що входять в умову пластичності (1), із врахуванням рівнянь (2), (3) і (5) запишеться так:

$$\psi = 2\sqrt{3}\sigma_{T_0} \left( \frac{\nu}{\nu_0} \right)^m \ln \frac{1 - \nu_0}{1 - \nu}, \tag{6}$$

$$\varphi = \frac{2\sqrt{6}\sigma_{t_0}(1-\xi)\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{m+l} \ln \frac{1-\nu_0}{1-\nu}}{\sqrt{9\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2m} - (1+2\xi)^2\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2l}}}. \quad (7)$$

Із врахуванням (6) і (7) умова пластичності (1) прийме вигляд:

$$p^2\left(\frac{\nu_0}{\nu}\right)^{2m} + \frac{T^2\left[9\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2m} - (1+2\xi)^2\left(\frac{\nu}{\nu_0}\right)^{2l}\right]\left(\frac{\nu_0}{\nu}\right)^{2(m+l)}}{3(1-\xi)^2} = 4\sigma_{t_0}^2\left(\ln \frac{1-\nu_0}{1-\nu}\right)^2, \quad (8)$$

де  $m$  і  $l$  – показники зміцнення, що залежать від властивостей матеріалу порошку і схеми пресування ( $\sigma_{ec}$ ,  $\sigma_{on}$ ).

Для визначення функцій механічних характеристик  $\psi$  і  $\varphi$ , які входять в умову пластичності (1), необхідно визначити коефіцієнт бічного тиску  $\xi$  при осьовому пресуванні в жорсткій матриці за відсутності сил зовнішнього тертя. Коефіцієнт бічного тиску, за даною схемою, залежить від густини, виду порошку, форми частинок, внутрішнього тертя, тобто він є у певному ступені параметром, що характеризує властивості ущільнювального порошкового середовища і дозволяє врахувати структурні зміни процесу пресування.

Основними параметрами, які впливають на коефіцієнт  $\xi$ , є густина і вид матеріалу. В меншій мірі впливають розміри і форма частинок, спосіб отримання порошку [4].

В даний час теорія пресування має в своєму розпорядженні єдину залежність Г.М. Ждановича, що враховує вплив густини, пружних і міцнісних параметрів, стан контактів на коефіцієнт бічного тиску [5], тобто:

$$\xi = \frac{\mu_p}{1 - \mu_p}, \quad (9)$$

де  $\mu_p$  – коефіцієнт Пуассона пресування визначеної густини ( $\rho$ ,  $\nu$ ). Величина  $\mu_p$  може бути виражена у вигляді простої функції густини:

$$\mu_p = \mu\nu^a, \quad (10)$$

де  $a$  – показник, що враховує вплив пружних, міцнісних властивостей і стан контакту ( $a = 1,05 \div 1,03$ );  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу частинок порошку.

Із рівнянь (9) і (10) отримаємо:

$$\xi = \frac{\xi_k \nu^a}{1 + \xi_k (1 - \nu^a)}, \quad (11)$$

де  $\xi_k$  – коефіцієнт бічного тиску пресування при відносній густині  $\nu = 1$ , рівний:

$$\xi_k = \frac{\mu}{1 - \mu}. \quad (12)$$

Використання залежності (11) в рівнянні пластичності (8) дозволяє встановити зв'язок компонент тензора напружень з густиною, пружними, міцнісними і структурними характеристиками ущільнювального порошкового середовища.

В технологічних процесах пресування деталей з порошків матеріали, що досліджуються, піддаються ущільненню за траєкторіями навантажень в діапазоні від схеми осадки до схеми гідростатичного рівномірного стиску. Для визначення явного виду еліпсоїдальної поверхні навантаження, крім коефіцієнта бічного тиску, необхідно мати розрахункові або емпіричні залежності за опором деформування у вибраних схемах навантаження ( $\sigma_{ec}$ ,  $\sigma_{on}$ ).

Визначення опору гідростатичному стиску  $\sigma_{sc}$  проводилось на гідростаті високого тиску (до 300 МПа). Пресування здійснювалось на гідравлічному пресі ПСУ-500. Зусилля контролювалось показами вимірювального пристрою пресу.

Опір деформуванню  $\sigma_{on}$  при осьовому пресуванні в жорсткій матриці визначався записом діаграм ущільнення на розривній машині марки ИР-5047. З ціллю значного зменшення зовнішнього тертя, внутрішня поверхня матриці змащувалась  $MoS_2$  і співвідношення висоти до діаметра преса складало 0,3.

Визначені основні параметри  $\xi$ ,  $\sigma_{sc}$ ,  $\sigma_{on}$ , що входять у рівняння пластичності (8) в діапазоні густини від початкових до  $\nu = 0,8$ , найбільш характерних для ППМ.

Таким чином, уточнена модель пластичності ущільнювальних порошкових середовищ, яка базується на умові текучості з поверхнею навантаження у вигляді центрального еліпсоїда і дозволяє встановити зв'язок компонент тензора напружень  $\sigma_{ij}$  з густиною, механічними і структурними характеристиками пресування (ППМ).

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Степаненко А.В., Исаевич Л.А., Харлан В.Е. Обработка давлением порошковых сред. – Мн.: Наука і тэхніка, 1993. – 167 с.
2. Штерн М.Б. Определяющие уравнения для уплотняемых пластичных пористых тел // Порошковая металлургия. – 1981. – № 4. – С. 17–23.
3. Штерн М.Б., Сердюк Г.Г., Максименко Л.А. и др. Феноменологические теории прессования порошков. – Киев: Наукова думка, 1982. – 140 с.
4. Реут О.П., Богинкий Л.С., Петюшик Е.Е. Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов. – Мн.: Дэбор, 1998. – 258 с.
5. Жданович Г.М. Теория прессования металлических порошков. – М.: Металлургия, 1969. – 260 с.

ЗАБОЛОТНИЙ Олег Васильович – аспірант кафедри сучасних технологій в машинобудуванні Луцького державного технічного університету.

Наукові інтереси:

– композиційні матеріали.

Тел.: (03322) 6-17-10, 6-25-19

Подано 25.12.2001