

Г.А. Баглюк<sup>1</sup>, д-р.техн.наук, ст.наук.спів., О.І. Хоменко<sup>2</sup>, канд.техн.наук, ст.наук.спів., А.О. Хоменко<sup>2</sup>, студ.  
1 – НТУ України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна  
2 - Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ УЩІЛЬНЮВАНOSTI МЕТАЛЕВИХ ПОРОШКІВ ПРИ ПРЕСУВАННІ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПЛЕКСУ "ТЕНЗОР"

*Розглянуто автоматизацію процесу дослідження ущільнюваності металевих порошків та їх сумішей за допомогою апаратно-програмного комплексу "ТЕНЗОР" на прикладі суміші порошків міді та хрому (Cr 30% мас.). Встановлено, що результати випробувань на ущільнення не протирічають розрахункам, які базуються на теорії пластичності, а дані, одержані при безперервному запису діаграми випробування, мають меншу розбіжність, ніж дані, отримані при дискретних значеннях навантаження.*

*This paper deals with metallic powders and their mixtures compactibility investigation using "TENSOR" hardware-software complex with an example of Cu - Cr (30 % mass) powders mixture. It was found that compactibility test results did not conflict with calculation based on plasticity theory and data obtained during test diagram continuous record had less spread that one derived from discrete load tests.*

Для створення порошкових матеріалів з заданими механічними властивостями важливо знати характеристики ущільнюваності порошків або їх сумішей. Дослідження ущільнюваності металевих порошків при пресуванні ускладнюється тим, що оцінку зміцнення матриці порошкового тіла можна знайти лише шляхом розрахунків, а не безпосередньо за експериментальними даними [1]. Методика випробувань на ущільнюваність, викладена у ГОСТ 25280-90, передбачає дослідження при п'яти фіксованих значеннях тиску. Оцінка ущільнюваності за невеликою кількістю дискретних даних призводить до їх розбіжності і не дозволяє у повній мірі спостерігати зміни у стані матеріалу заготовки під час пресування. Тому безперечну перевагу мають методи дослідження ущільнюваності при безперервній реєстрації зміни тиску та геометричних розмірів заготовки. Існуюча методика [2], що передбачає запис діаграми зміни осьового зусилля на самописець, має недоліки: необхідність оцифрування діаграми з паперового носія та припущення рівномірного руху плит пресу, а значить і пуансонів при пресуванні (паспортні дані пресів не гарантують стабільність швидкості руху плит, зокрема для випробувального пресу МС-1000 нерівномірність швидкості руху може досягати  $\pm 20\%$ ). Ці недоліки призводять до похибок у вихідних даних.

Використання безпосереднього та безперервного введення даних про ущільнюваність порошків до комп'ютеру виключає або мінімізує вплив цих недоліків на результат експерименту. Зокрема для такої реєстрації даних з подальшою їх обробкою може бути використаний апаратно-програмний комплекс "ТЕНЗОР" [3]. Цей комплекс, створений для механічних випробувань матеріалів, має усі необхідні вузли і для випробувань порошків на ущільнюваність. Він забезпечує безперервну реєстрацію осьового зусилля та переміщення плит пресу, тож зміна швидкості руху останніх може бути врахована. Маючи запис залежності пересування пуансону від осьового зусилля, а значить і прикладеного тиску, принципово можливо розрахувати усі інші показники ущільнюваності порошків. Щоб підтвердити це, автори використали наступну методику випробувань.

1. Визначили насипну густину досліджуваного порошку та розрахували його масу для одержання зразка потрібного розміру. За вказаним стандартом висота циліндричного зразка має приблизно дорівнювати його діаметру.

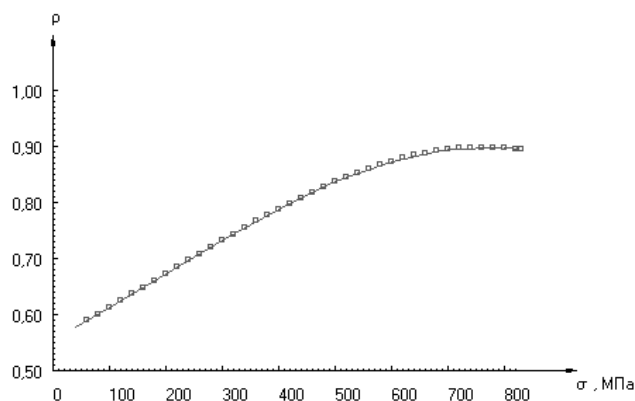


Рис. 1. Залежність відносної густини від тиску

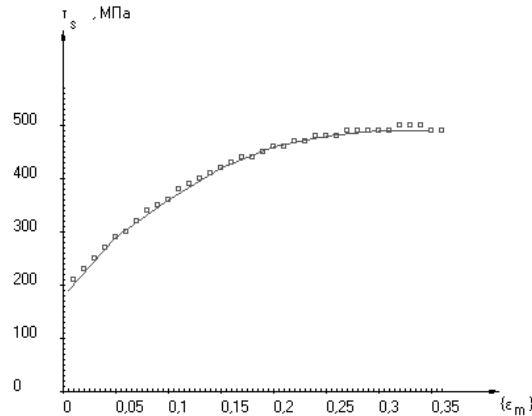


Рис. 2. Залежність зсувної напруги плинності матриці порошкового тіла від середньоквадратичної зсувної деформації

2. Виконали пресування суміші порошоків міді та хрому (Сг 30% мас.) відповідно до вказаного стандарту. Деякі відхилення у процесі не носили принципового характеру. Зокрема вказаний у стандарті внутрішній діаметр прес-форми 11,3 мм забезпечує площу перерізу 1 см<sup>2</sup>, що полегшує розрахунки. При користуванні комплексом "ТЕНЗОР" це не є суттєвим, тому використовували прес-форму з близьким внутрішнім діаметром 12 мм. Під час пресування вели безперервний запис діаграм зміни осьового тиску та переміщення рухомої плити пресу у часі. Осьове зусилля збільшували до суттєвого збільшення стрімкості діаграми випробувань.

3. Виконали виштовхування одержаного зразку. Зусилля виштовхування контролювали за динамометром пресу. В усіх експериментах воно не перевищувало 4 - 5 кН.

4. Виконали попередню обробку отриманої діаграми випробувань. Оскільки у часі як осьове зусилля, так і швидкість пересування пуансону змінюються нелінійно, виконали кусково-лінійну інтерполяцію результатів та отримали проміжну діаграму випробувань у координатах переміщення - осьове зусилля.

5. Виходячи з кінцевої висоти пресованого зразка та переміщення пуансону розраховували та побудували залежність відносної густини від тиску (рис. 1).

Зробивши припущення про однакову пружну післядію в усіх напрямках, приблизно вважали  $\rho = \rho_s \cdot (h_p / (h_p + \delta_{\max} - \delta))$ , де  $\rho$  - поточна відносна густина,  $\rho_s$  - відносна густина отриманого зразка,  $h_p$  - висота пресовки у прес-формі,  $\delta_{\max}$  і  $\delta$  - відповідно, кінцева і поточна позиції датчика переміщення. У свою чергу  $\rho_s = 4 \cdot m_s / (\pi \cdot d_s^2 \cdot h_s \cdot \gamma_k)$ , де  $\gamma_k$  - густина компактного матеріалу,  $d_s$  - діаметр отриманого зразка,  $m_s$  - маса отриманого зразка;  $h_p = h_s \cdot d_p / d_s$ , де  $d_p$  - внутрішній діаметр прес-форми.

Таблиця

σ, МПа	ρ			ρ <sub>ср</sub>
	1	2	3	
200	0,66	0,67	0,63	0,65
400	0,79	0,78	0,73	0,77
500	0,83	0,82	0,76	0,80
600	0,87	0,85	0,79	0,84
800	0,91	0,89	0,84	0,88

Для з'ясування придатності запропонованої методики для випробування на ущільнюваність та відповідності отриманих результатів стандартним ту ж саму суміш дослідили згідно ГОСТ 25280-90. Значення відносної густини трьох пресованих заготовок, виготовлених при кожній з фіксованих величин тиску, наведені у табл. Попри досить великі відхилення дискретних значень густини, залежність, отримана при безперервному запису діаграми випробувань, добре відповідає усередненим даним відносної густини при відповідних величинах тиску. Це надає можливість стверджувати відповідність результатів таким, отриманим за стандартною методикою.

Слід відмітити також, що, згідно з залежністю, наведеною на рис. 1, відносна густина заготовки після попереднього пресування (0,58) не сильно відрізняється від відносної насипної густини суміші після утрушування (0,47), що дає змогу стверджувати, що експериментальна залежність, отримана за запропонованою методикою, дає змогу спостерігати усі етапи ущільнювання дослідженої суміші.

Для з'ясування можливості перевірки експериментальним шляхом залежностей, виведених у роботі [1], виходячи з положень теорії пластичності, методику випробувань було розширено наступним чином. Застосували апроксимацію залежності відносної густини від тиску поліномом другого ступеню за методом найменших квадратів

(максимальна відносна похибка 4%) і розрахували проміжну залежність зсувного напруження плинності матриці порошкового тіла, від відносної густини. При цьому користувалися співвідношенням, наведеним у роботі [1]:

$$\tau_s = \sigma \sqrt{2 \cdot \left(1 - \rho^{2/\rho}\right) / \left(\rho^{2,5/\rho} \cdot (2 - \rho^{2/\rho})\right)},$$

де  $\tau_s$  - зсувне напруження плинності матриці порошкового тіла;

$\sigma$  - осьовий тиск.

Треба відмітити, що для порошків інших металів та їх сумішей квадратична апроксимація може виявитися неприйнятною і замість неї доведеться користуватися або складнішою поліноміальною апроксимацією, або кусочно-лінійною інтерполяцією.

Далі розрахували проміжну залежність середньоквадратичної деформації матриці порошкового тіла від відносної густини. При цьому користувалися співвідношенням, наведеним у [1]:

$$\langle \varepsilon_m \rangle = \int_{\rho_0}^{\rho} \rho^{(2,5-4\rho)/(2\rho)} \cdot \left( (2 - \rho^{2/\rho}) / (2 \cdot (1 - \rho^{2/\rho})) \right)^{1/2} d\rho,$$

де  $\langle \varepsilon_m \rangle$  - середньоквадратична деформація матриці порошкового тіла;

$\rho_0$  - початкова відносна густина заготовки.

Інтегрування виконували чисельно методом трапецій. Отриману залежність середньоквадратичної деформації матриці порошкового тіла від відносної густини апроксимували поліномом другого ступеню за методом найменших квадратів (максимальна відносна похибка апроксимації 5%). Для цього етапу обробки результатів експерименту справедливе те ж зауваження, що й для попереднього.

Нарешті, розрахували та побудували залежність зсувного напруження плинності матриці порошкового тіла від середньоквадратичної зсувної деформації (рис. 2). Якісно залежність зсувного напруження плинності матриці порошкового тіла від середньоквадратичної зсувної деформації виявилася такою ж самою, як наведена у роботі [1] для порошку міді, але відрізнялася більшими значеннями напруження. Можливо, це пояснюється, по-перше, наявністю у суміші хрому і, по-друге, використанням у досліджуваній суміші невідпаленої міді. Такий вибір порошків для випробування пояснюється в першу чергу практичною цінністю отриманих результатів для подальшого використання вказаних металевих порошків у стані поставки для електричних контактів вакуумних вимикачів. Розбіжність значень виявилася меншою за рахунок безперервного запису діаграми випробування одного і того ж зразка та відсутності її проміжного оцифрування.

#### Висновки

1. Запропонована методика дослідження ущільнюваності з застосуванням комп'ютеризованого комплексу і безперервним записом діаграми випробувань забезпечує результати, що не відрізняються від таких, отриманих за стандартною методикою, і тому є прийнятною.

2. Експериментальні результати, отримані в результаті дослідження ущільнюваності з безперервним записом діаграми, не протирічають залежностям, отриманим на базі теорії пластичності.

3. Завдяки користуванню спеціалізованим програмним забезпеченням комплексу "ТЕНЗОР" час розрахунку та побудови залежностей скорочується до одиниць хвилин, причому більша частина цього часу йде на введення початкових даних. Це вказує напрям удосконалення комплексу за рахунок попереднього введення довідкової інформації (наприклад густини деяких компактних матеріалів), яку потім можна обирати зі списку.

#### Список літератури

1. Ковальченко М.С. Деформационное упрочнение порошкового тела при прессовании [Текст] / М.С.Ковальченко // Порошковая металлургия. - 2009. - № 3-4 - С. 13-27.
2. Радченко А.К. Уплотняемость и деформационное упрочнение металлических порошков и их смесей при прессовании [Текст] / А.К.Радченко, М.С.Ковальченко, Д.Н.Бродниковский // Порошковая металлургия. - 2009. - № 5-6 - С. 27 - 35.
3. Баглюк Г. А. Апаратно-програмний комплекс для дослідження структурних змін деформованого матеріалу [Текст] / Г.А. Баглюк, О.І.Хоменко, Д.А.Гончарук // Наукові нотатки: Міжвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка"). - 2009. - Вип. 25, ч. II. - С. 9 -11.