

АНАЛІЗ МЕХАНІЗМУ РУЙНУВАННЯ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ

Досліджено вплив комбінованого навантаження, яке складається з осьового тиску і вібрацій, на механічні характеристики заготовок з металевих порошків. Показано, що міцність матеріалів визначається не тільки пористістю, але і характером зв'язаності структурних елементів.

Основною технологічною операцією при виготовленні виробів методом порошкової металургії є формування заготовки. В даний час для отримання з металевих та керамічних порошків великогабаритних деталей складної форми використовують віброформування [1, 2, 3]. Відомо, що процес ущільнення заготовки із порошків складається з двох етапів: структурного (геометричного) ущільнення та фізичного, які супроводжуються пластичними деформаціями часток порошку [4]. Більшість досліджень впливу вібрацій на процес ущільнення порошків було присвячено першому етапу, тобто досліджувався вплив параметрів вібрації (амплітуди, частоти коливань, віброприскорення) на процес віброукладення часток. Було показано позитивний вплив вібрацій на процес ущільнення при однокомпонентному (вібрації прикладаються вздовж однієї осі деталі) і, особливо, при багатоконфінентному вібронанвантаженні (вібрації прикладаються вздовж двох або трьох координатних осей деталі). Для інтенсифікації процесу ущільнення рекомендується в деяких випадках використовувати пригруз або незначні осьові зусилля, які передаються через пуансон і направлені вздовж вертикальної осі заготовки [5].

Вплив вібрації на ущільнення порошкових матеріалів для другого етапу формування заготовок, коли зменшення пористості відбувається за рахунок пластичної деформації часток, не досліджувався. В той же час показано позитивний вплив вібрації на процес пластичного деформування компактних матеріалів: зростає однорідність структури матеріалу, підвищуються його фізико-механічні характеристики, зменшуються енергосилові параметри процесу [6].

Метою даної роботи є дослідження міцності пористих об'єктів у залежності від методу їх ущільнення та аналіз механізму руйнування пористих матеріалів.

Об'єкт дослідження – стандартні металеві порошки заліза ПЖР-3, міді ПМС-1, латуні ПЛ80 в стані поставки та порошки сталі ШХ15, що отримані в результаті утилізації шліфувальних шламів ВАТ ЛПЗ (м. Луцьк). Експерименти проводились на вібростенді [7], який дозволяє реалізовувати осьове навантаження зразків через пуансон з одночасним коливанням матриці. Коливання матриці здійснювали за двома схемами: осьові коливання та просторові (спіральні), коли на осьові коливання накладалися крутні коливання навколо вертикальної осі заготовки. Частоту коливань ω змінювали в межах від 30 до 50 Гц, а амплітуду коливань A від 0,7 до 1,1 мм. Величину питомого осьового навантаження змінювали від 250 до 1000 МПа. Для порівняння проводили пресування заготовок статичним методом при тих же питомих тисках. Досліджували вплив різних режимів формування на об'ємну пористість і міцність заготовок. Пористість визначали ваговим методом, міцність спечених і неспечених пористих зразків за стандартними методиками в дослідах на розтяг, осьову та радіальну осадку. Навантаження на зразок проводили до появи перших тріщин на випробувальній машині ИР-50.

В технологічних розрахунках часто використовують залежність міцності від пористості. Авторами [8] така залежність подана у вигляді:

$$\sigma = \sigma_s * (1 - \theta^2)^2 * \exp(-B * \theta), \quad (1)$$

де σ_s – межа міцності матеріалу основи, що визначається для кожного конкретного порошку при умові доведення зразка до компактного стану; θ – пористість; B – коефіцієнт, що визначається експериментально.

На рисунку 1 проілюстровані дослідні дані для порошків заліза ПЖР-3, які показують зв'язок міцності і пористості при різних схемах формування заготовок. Помітно, що характер навантаження впливає на механічні характеристики виробу. У використаному діапазоні зусиль пресування, міцність зразків для умов віброформування вища. Найбільше результати відрізняються при використанні просторових коливань. Порівняння дослідних даних і результатів розрахунку за залежністю (1) показує, що в області високих пористостей відзначається адекватний опис міцності від пористості для умов статичного пресування. При малих пористостях використання залежності (1) призводить до значних помилок. У випадку застосування вібрацій рівняння (1) непридатне.

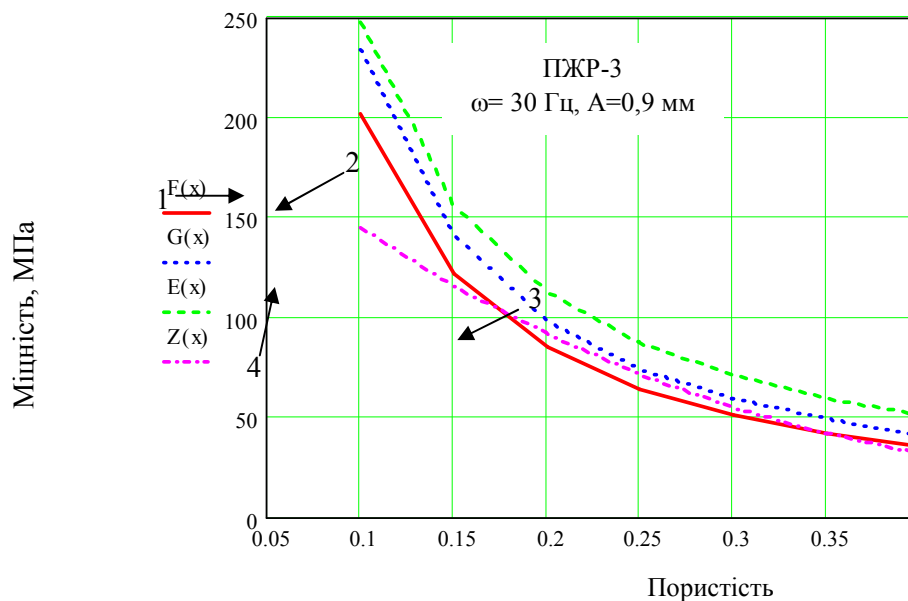


Рис. 1. Вплив схеми ущільнення на міцність зразків: 1. – статичне однібочне пресування; 2. – осьові коливання матриці; 3. – просторові коливання матриці; 4. – міцність зразків за формулою (1) [8]

Апроксимація дослідних даних приводить до виразу:

$$\sigma_s = \exp(A * \ln(\theta) + B), \quad (2)$$

де θ – пористість; A , B – параметри, що визначаються експериментально і залежать від властивостей порошків.

Аналогічні результати отримані для всіх порошків, що досліджувались. Наведені експериментальні дані свідчать про неможливість визначення міцності в залежності від одного параметра – пористості.

Будь-який процес деформації при досягненні високих напружень закінчується руйнуванням. Процес руйнування починається із утворення тріщин субмікроскопічних розмірів та закінчується розподілом зразка на окремі частки. Стискуючі напруження не можуть призвести до руйнування. Руйнування завжди здійснюються під дією розтягуючих або зсувних напружень [9,10]. В макроскопічних теоріях міцності [11] розрізняють два типи руйнування: 1) відрив як дія розтягуючих напружень та 2) зріз під дією напружень зсуву.

Як правило, названі схеми руйнування можуть бути реалізовані лише тоді, коли схема напруженого стану є незмінною від початку випробування до остаточного руйнування. Для компактних матеріалів такі умови деформування не мають місця в

силу того, що на певному етапі процесу деформування порушується однорідність напружено-деформованого стану (наприклад, при утворенні шийки в зразку, що розтягується). Для пористих матеріалів однорідність напружено-деформованого стану зберігається протягом всього процесу деформування. В першу чергу, це обумовлено незначними граничними деформаціями цих матеріалів.

Вважається, що відрив може мати місце без попередньої пластичної деформації, в той час як руйнування шляхом зрізання завжди супроводжується попередньою пластичною деформацією [9,10]. Тому відрив завжди відповідає крихкому, зріз – в'язкому (пластичному) руйнуванню. Крихке та в'язке руйнування відрізняються, в першу чергу, величиною пластичної деформації перед руйнуванням і визначаються візуально кутом нахилу напрямку магістральної тріщини відносно нормальної складової тензора напружень [9, табл. 4.2, стор. 203]. Зрозуміло, що при такому методі визначити кількісну міру пластичної деформації неможливо. В той же час, за зовнішнім виглядом зразків, які зруйнувалися при навантаженні по певній траєкторії, можливо встановити якісний механізм деформування, що є передумовою процесу руйнування.

На рис. 2 наведені приклади руйнування спечених зразків із порошків міді ПМС-1 та сталі ШХ15, які отримані в дослідях на одновісний розтяг. Видно, що для досліджених порошків із відносно незначною пористістю ($\theta_0=0,16$), при переважаючих напруженнях розтягу, маємо «чистий» відрив, який характеризується мінімальною пластичною деформацією (рис. 2а, б, в). При зсувних напруженнях відмічається наявність пластичних деформацій. Кут нахилу магістральної тріщини відрізняється від 45° і складає близько $35-40^\circ$ відносно напрямку дії нормальних напружень (рис. 2г, д). Характерно, що при складному навантаженні механізм руйнування має ознаки «чистого» відриву та «чистого» зрізу (рис. 2д). Видно, що магістральна тріщина включає в себе механізм руйнування, обумовлений дією навантаження внутрішнім тиском (рис. 2в), та механізм руйнування, обумовлений дією крутного моменту (рис. 2г). Основним типом руйнування у всіх наведених прикладах є відрив (крихкий характер руйнування), який, згідно з класифікацією [11], визначається дією нормальних напружень і супроводжується мінімальною пластичною деформацією.



а)



б)



в)



г)



д)

Рис. 2. Характер руйнування спечених пористих зразків в залежності від виду навантаження ($\theta_0 = 0,16$):

- а) – навантаження зразків осьовою силою (порошок міді ПМС 1); б) – навантаження зразків осьовою силою (порошок сталі ШХ15); в) – навантаження зразків внутрішнім тиском (порошок сталі ШХ15); г) – навантаження зразків крутним моментом (порошок сталі ШХ15); д) – навантаження зразків крутним моментом і внутрішнім тиском (порошок сталі ШХ15).

На рис. 3 наведені приклади руйнування зразків, що отримані в дослідях на одновісне стискання. Видно, що характер руйнування залежить як від рівня початкової пористості, так і від фізико-технологічних властивостей порошків. На рис. 3а показано тип руйнування для спечених зразків сталі ШХ15 різної початкової пористості: ліве фото – пористість $\theta_0 = 0,16$; праве - $\theta_0 = 0,3$. При пористості $\theta_0 = 0,16$ спостерігається механізм руйнування, близький до зрізу (в'язке руйнування), який супроводжується пластичними деформаціями. В той же час, при значній початковій пористості ($\theta_0 = 0,3$) механізм руйнування близький до відриву (крихке руйнування). Пластичні деформації практично відсутні. На характер руйнування значний вплив здійснює і матричний матеріал. Так, при деформуванні пористої спеченої міді ПМС-1 ($\theta_0 = 0,16$) візуально руйнування не спостерігалось. При значній пластичній деформації відбувалася втрата стійкості зразка (рис. 3б).

Аналогічна закономірність була помічена і для неспечених зразків. На рис. 3в показано характерний приклад руйнування пористих зразків із порошків сталі ШХ15, які отримані методом однобічного пресування. Видно, що при пористості $\theta_0 = 0,16$ (верхнє положення рис.3 в) руйнування наближається до зрізу (в'язке руйнування). При значній пористості ($\theta_0 = 0,3$ – нижнє положення рис. 3в) однозначно визначити характер руйнування не можливо. В поперечному перетині зразків під пуансоном спостерігаються ознаки руйнування відривом, по довжині – зрізу.



а)



б)

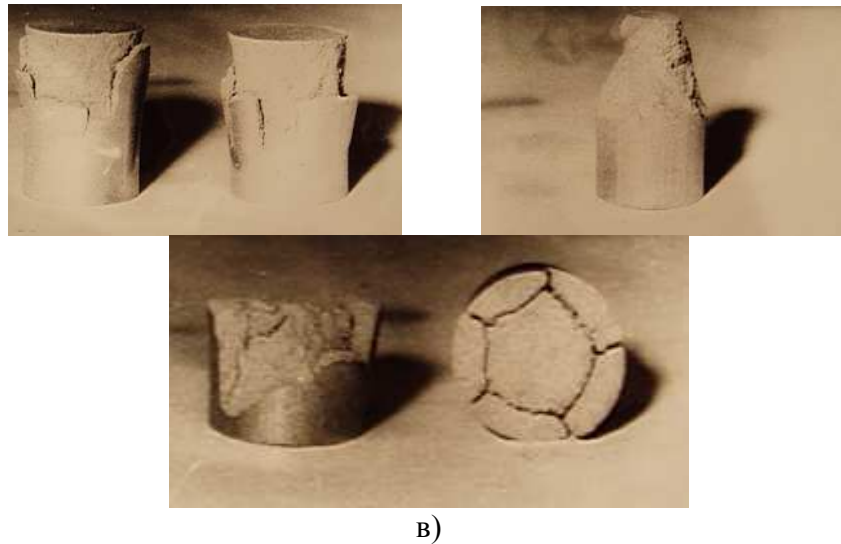


Рис. 3. Характер руйнування зразків в дослідях на стиск: а) – спечені пористі зразки сталі ШХ15; б) – спечені пористі зразки міді ПМС 1; в) – неспечені зразки сталі ШХ15

Використання вібрацій при ущільненні порошків веде до появи певних пластичних властивостей матеріалу. На рис. 4 наведено характерний приклад руйнування зразків, що отримані з використанням вібрацій. Руйнування має чітко означені ознаки зрізу. З рис. 5а чітко видно, що вібропресування пластичних матеріалів при певних режимах призводить до утворення на бічній поверхні зразків деякого шару матеріалу з підвищеними пластичними та механічними характеристиками. Постійні знакозмінні навантаження призводять до пружно-пластичного передеформування приконтатної зони, в результаті утворюється малопориста структура, а підвищена температура в цих шарах активізує процеси схоплювання в контактних ділянках.

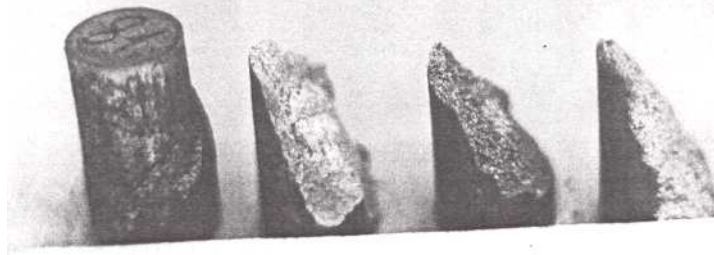


Рис. 4. Характер руйнування пористих зразків заліза ПЖР- 315.3, що отримані віброформуванням (просторові коливання - $a = 0,9\text{мм}$, $w = 35\text{ Гц}$)

При радіальному стисканні всі досліджувані зразки мали однаковий характер руйнування (рис. 5 б). Матеріали руйнувались після незначної деформації миттєво. Повне руйнування цих зразків дозволило виявити, що в зонах контакту матеріалу з опорними плитами навантажуючого пристрою утворюються клиновидні фрагменти з поперечним січенням, близьким до прямокутного трикутника. При цьому кут нахилу гіпотенузи є близьким до 45° , до напрямку осьового навантаження. Один катет є паралельним площині опорної плити, інший - визначає напрямок розвитку тріщини, яка призводить до остаточного руйнування зразка.

Таким чином, можна зробити висновок про появу в неспеченому пористому матеріалі певних пластичних властивостей, що свідчать про значний вплив і помітну ефективність вібропресування.

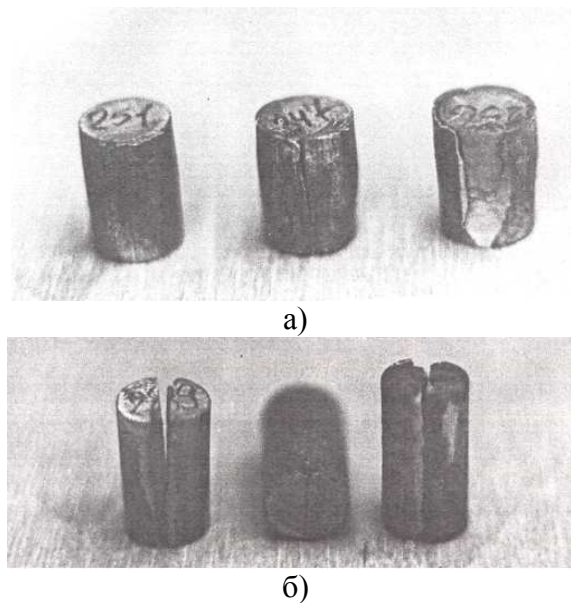


Рис. 5. Вплив вібраційного поля на характер руйнування зразків: а) – зразки зі зміцненим поверхневим шаром; б) – зразки, зруйновані методом радіального стискання

Explored influence of multifunction load, which consists with axial pressure and vibrations, on mechanical features of stocking up with metallic powder. It is shown that toughness of material is defined not only porosity, but also nature of relationship of structured elements.

Література

1. Шаталова И.Г., Горбунов Н.Г., Лихтман В.И. Физико-химические основы вибрационного уплотнения порошковых металлов. – М.: Наука, 1969. – 162 с.
2. Ткачук Ю.Я., Кузьмин В.А., Рудь В.Д. К вибрационному формированию порошковых материалов. // Физика и механика порошковых материалов: Сб. науч. тр. АН Украины. Институт пробл. материаловедения им. И.Н. Францевича. – К., 1993. – С. 99-114.
3. Искович-Лотоцкий Р.Д., Матвеев И.Б. Вибрационные процессы: Обзор. – М.: НИИМаш, 1979. – 50 с.
4. Скороход В.В., Мартынова И.Ф. Особенность необратимой деформации спеченного пористого тела из упрочняющегося пластичного металла // Порошковая металлургия. – 1977. - № 4, С. 70-73.
5. Иващенко В.В. Влияние инерционного нагружения на процесс вибрационного уплотнения порошковых материалов // Порошковая металлургия – 1972. - № 5. - С. 18-21.
6. Клименко В.М., Шаповал В.Н. Вибрационная обработка металлов давлением. – К.: Техніка, 1977. – 128 с.
7. А.с. UA 18095 А. Пристрій для вібраційного пресування виробів з металічних порошків. / Ткачук Ю.Я., Кузьмін В.О., Рудь В.Д., Сергеев О.О. Бюл. № 5. – 1997.
8. Радомысельский И.Д., Сердюк Г.Г., Щербань Н.И. Конструкционные порошковые материалы. – К.: Техніка, 1985. - 152 с.
9. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. / В двух частях. Часть первая. Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
10. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. / В двух частях. Часть вторая. Механические испытания. Конструкционная прочность. – М.: Машиностроение, 1974. – 368 с.
11. Гольденблат И.И., Копнов В.А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 1968. – 192 с.

Одержано 03.03.2005 р.