

ВПЛИВ ВИХІДНОЇ ПОРИСТОСТІ НА ВЕЛИЧИНИ ГРАНИЧНИХ СТУПЕНІВ ДЕФОРМАЦІЇ МІДНИХ ПОРОШКОВИХ ЗАГОТОВОК

Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование влияния исходной пористости медных порошковых заготовок на величины предельных степеней деформации при одноосном растяжении, сжатии и кручении. Представлена методика определения предельных степеней деформации порошковых материалов по результатам испытаний на сжатие путем последовательного анализа пластического равновесия точек заготовок методом функций Ляпунова и их микроструктур после деформации. Результаты исследований использованы при разработке технологических процессов изготовления порошковых деталей.

The influence of initial porosity of copper powder billets on values of ultimate degrees of deformation at uniaxial tension, compression and torsion has been investigated theoretically and experimentally. The technique of determination of ultimate degrees of deformation for powder materials using results of compression test by sequential analysis of plastic equilibrium of billet's points with Lyapunov's functions method and their microstructures after deformations. The investigation results were implemented during development of production technologies of powder details.

Технології обробки тиском добре поєднуються з різними технологічними процесами, а в ряді випадків є єдино можливими при одержанні порошкових матеріалів із заданими властивостями для задоволення високих вимог сучасної науки і техніки до якості виробів з порошкових матеріалів. Широке впровадження ресурсозберігаючих технологій обробки тиском неможливо без оцінки деформуємість порошкових матеріалів, що залежить від багатьох факторів, що змінюються. При розробці нових матеріалів різного призначення важливе місце займають технології порошкової металургії, що дозволяють створювати матеріали із заданою структурою та властивостями для виробництва виробів машинобудування з мінімальною кількістю відходів і вирішувати проблеми охорони навколишнього середовища [1, 2].

Існує безліч методик визначення граничного ступеня деформації, серед яких найбільше поширення одержали феноменологічні теорії, засновані на залежності ймовірності руйнування від історії навантаження, що задається в просторі напружень або просторі деформацій. При цьому кількісним зв'язком між граничним ступенем деформації і показниками напруженого стану є діаграма пластичності, а спільним недоліком є необхідність побудови діаграм пластичності на основі експериментальних досліджень, що істотно обмежує їх практичне використання. Крім того, виготовлення зразків з малопластичних і пористих матеріалів для механічних випробувань на розтяг та кручення пов'язане з певними труднощами [1, 3, 4].

Відомо, що при вільному осаджуванні граничний ступень деформації спочатку досягається в поверхневих шарах матеріалу поблизу бічної поверхні по екватору заготовки, де матеріал працює в умовах, близьких до одноосового розтягу. При подальшому збільшенні ступеня деформації на границі осередку деформації та верхньої зони гальмування починається розпушення матеріалу, а її величина відповідає умовам чистого зсуву. При досягненні граничного ступеня деформації в умовах одноосового стиску починається розпушення між верхньою зоною гальмування і проміжною зоною з наступним утворенням макротріщин і руйнуванням заготовки [3-5]. Застосування зазначених умов забезпечує визначення граничних ступенів деформації при розтязі, стиску та крученні шляхом дослідження мікроструктури заготовок після вільного осаджування на різні ступені деформації, що особливо важливо для порошкових матеріалів з високою пористістю.

Метою роботи є теоретичне і експериментальне дослідження впливу вихідної пористості мідних порошкових заготовок на величину граничного ступеня деформації.

Теоретично граничні ступені деформації визначені на основі результатів скінченно-елементного моделювання вільного осаджування мідних пористих порошкових заготовок з використанням методу функцій Ляпунова відповідно до методики, представленої в роботах [4, 6].

За умови збереження цілісності оброблюваного матеріалу рух кожної точки на поверхні та усередині заготовки в процесі деформування характеризується функціоналом виду [4]:

$$\Phi = V \left[\sigma_x(\varepsilon_x), \sigma_y(\varepsilon_y), \sigma_z(\varepsilon_z), \tau_{xy}(\gamma_{xy}), \tau_{yz}(\gamma_{yz}), \tau_{xz}(\gamma_{xz}) \right] \quad (1)$$

де $\sigma_x(\varepsilon_x), \sigma_y(\varepsilon_y), \sigma_z(\varepsilon_z), \tau_{xy}(\gamma_{xy}), \tau_{yz}(\gamma_{yz}), \tau_{xz}(\gamma_{xz})$ - компоненти тензора напружень.

При цьому функціонал (1) буде безперервно диференційованим по всіх шести компонентах. Дотримання цієї умови для будь-якої точки в досліджуваній області означає стійкий рух зазначеної точки відповідно до закону деформування [4].

Виникає необхідність дослідження стійкості руху точок, з метою визначення умов досягнення граничного ступеня деформації і руйнування матеріалу, для чого застосовуємо метод функцій Ляпунова, що полягає в дослідженні стійкості спеціально підібраної функції Ляпунова [4].

У такому випадку функцією Ляпунова буде швидкість зміни інтенсивності напружень у досліджуваній області [4]:

$$F_i = \frac{\partial \sigma_i}{\partial \varepsilon_i} = \dot{\sigma}_i(\varepsilon_i) \quad (2)$$

При цьому задачу визначення граничного ступеня деформації при осаджуванні зведено до дослідження стійкості системи рівнянь рівноваги шляхом пошуку глобального екстремуму похідної функції (2), що характеризує залежність інтенсивності напружень від інтенсивності деформацій. Коректність запропонованого підходу підтверджується відомою залежністю $\sigma(\varepsilon)$. У міру наближення ступеня деформації до граничного збільшення інтенсивності напружень усе більше випереджає зростання інтенсивності деформацій. Отже, збільшується і швидкість зміни інтенсивності напружень стосовно інтенсивності деформацій [4, 6].

Скінченно-елементна модель пористої порошкової заготовки з позначенням зон деформації і контрольних областей показана на рис. 1. Величини граничних ступенів деформації, отримані в результаті моделювання, наведені в табл. 1.

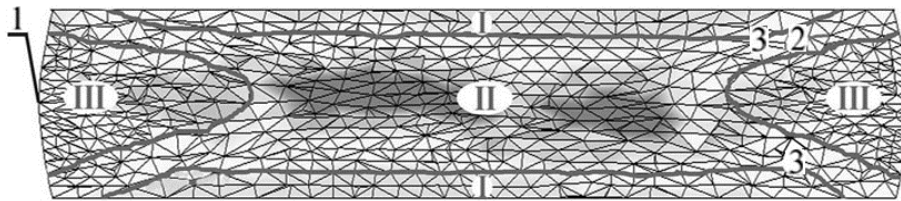


Рис. 1. Скінченно-елементна модель пористої порошкової заготовки:
I, II, III – зони деформації; 1, 2, 3 – контрольні області

Таблиця 1

Залежність граничних ступенів деформації від вихідної пористості, визначена методом функцій Ляпунова

Схема деформації	Вихідна пористість, %		
	15	20	25
	Граничні ступені деформації, %		
Розтяг	42	27	21
Стиск	58	38	32
Кручення	46	30	25

Для експериментальної перевірки отриманих залежностей заготовки циліндричної форми діаметром 4 мм, висотою 8 мм, вихідною пористістю 15%, 20% і 25% одержували з електролітичного мідного порошку марки ПМС-1 ГОСТ 4960-75 (табл. 2) двостороннім пресуванням на гідравлічному пресі моделі ПД 476 силою 1600 кН. Контроль геометричних розмірів заготовок здійснювали мікрометром МК-25-1 ГОСТ 6507-90 з точністю $\pm 0,01$ мм.

Таблиця 2

Гранулометричний склад мідного порошку ПМС-1 (ГОСТ 4960-75)

Номинальна величина частинок, мм	Прохідження через сито з сітками, %, не менше			Залишок на ситі номінальної величини, %, не більше
	01К	0071К	0045К	
0,1	99,5	90	65-80	0,5

Після пресування виконували спікання заготовок у шахтній лабораторній печі СШОЛ-11.6/12-М3 у середовищі синтез-газу (склад газу: 72% H_2 , 21% CO , 5,5% CO_2 , 1,5% H_2O) за ступінчастим режимом:

- нагрівання до 200°C, витримання 25 хвилин;
- нагрівання до 300°C, витримання 25 хвилин;
- нагрівання до 400°C, витримання 25 хвилин;
- нагрівання до 500°C, витримання 25 хвилин;
- нагрівання до 920°C, витримання 30 хвилин;
- охолодження до 800°C разом з піччю і далі на спокійному повітрі.

Вибір ступінчастого режиму спікання обумовлений тим, що він забезпечує послідовне проходження процесів, що приводять до формування контактів між частинками порошку, а ступінчасте підвищення температури приводить до поступового видалення газів. При нагріванні до 200°C із пористих заготовок видаляються адсорбована вода та інші летучі домішки. При температурі 300-500°C відбувається вигорання змачень і видалення домішок з температурами кипіння вище 300°C, а також починається відновлення оксидів. Заключна стадія спікання настає при 920°C, коли завершується відновлення оксидів, відбуваються процеси заростання і сфероїдизації пор, утворюються металеві контакти між частинками [7].

Деформування заготовок на задані граничні ступені деформації (табл. 1) здійснювали за схемою одноосового стиску при температурі 20°C відповідно до ГОСТ 25.505-97 на випробувальній машині ZD-4 (рис. 2). Швидкість

деформації становила $0,001 \text{ с}^{-1}$. В якості змащення застосовували графітно-масляну суспензію, коефіцієнт тертя $\mu = 0,15-0,20$.

Дослідження мікроструктури виконували на оптичному металографічному мікроскопі МИМ-8.

Підготовка зразків включала наступні операції: різання деформованих заготовок по осьовому перерізу, компаундування епоксидною смолою, шліфування, полірування водною суспензією оксид хрому, знежирення, травлення в реактиві на основі хлориду заліза (III), промивання і просушування.

Мікроструктури заготовок в областях 1, 2 і 3 наведені на рис. 3, рис. 4 і рис. 5. У міру того, як інтенсивність деформації досягає граничних величин (табл. 3), у характерних точках виникає розпушення деформуємого матеріалу (рис. 3, а, рис. 4, а, рис. 5, а) або мікротріщини (рис. 3, б, в, рис. 4, б, в, рис. 5, б, в).

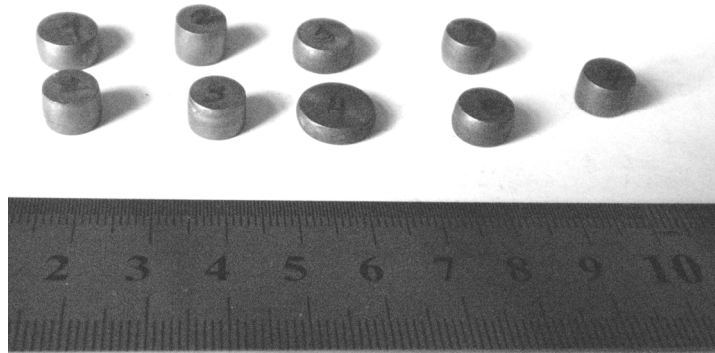


Рис. 2. Мідні порошкові заготовки після деформації

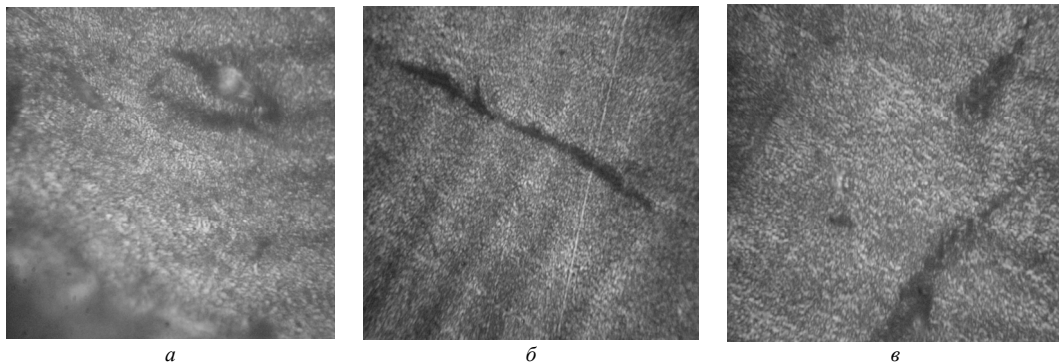


Рис. 3. Мікроструктури після деформації заготовок вихідною пористістю 15%:
а – розпушення в області 1; б, в – мікротріщини в областях 2 і 3; $\times 1440$

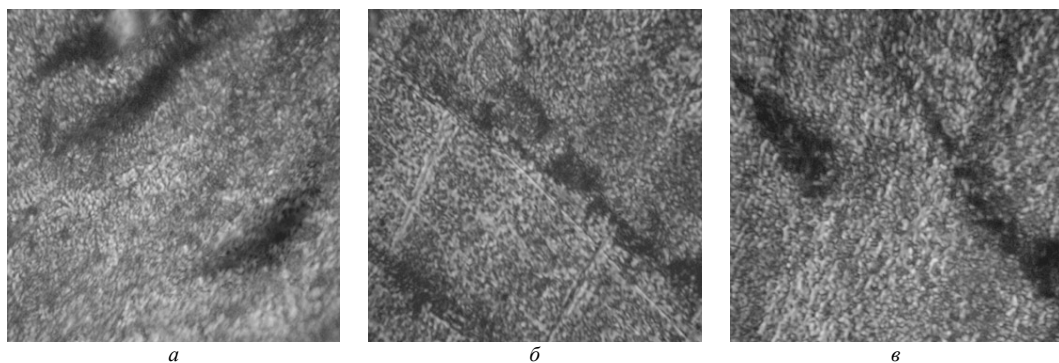


Рис. 4. Мікроструктури після деформації заготовок вихідною пористістю 20%:
а – розпушення в області 1; б, в – мікротріщини в областях 2 і 3; $\times 1440$

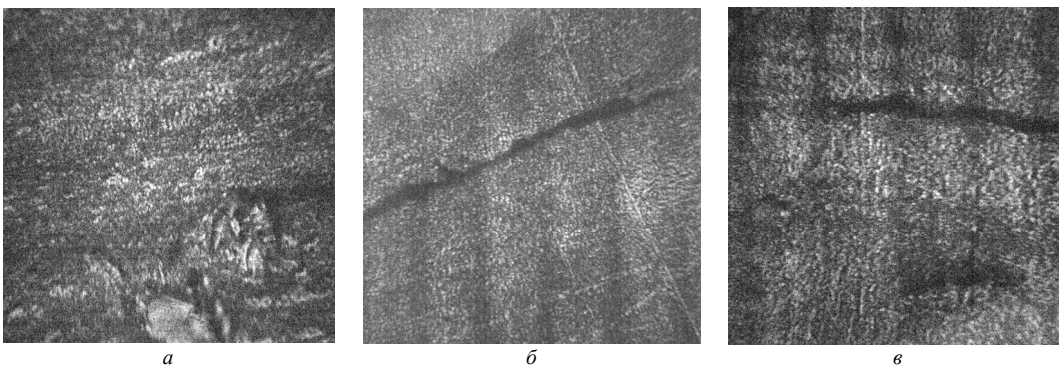


Рис. 5. Мікроструктури після деформації заготовок вихідною пористістю 25%:
а – розпушення в області 1; б, в – мікротріщини в областях 2 і 3; $\times 1440$

Залежність граничних ступенів деформацій від вихідної пористості, одержана експериментально

Схема деформації	Вихідна пористість, %		
	15	20	25
Граничні ступені деформації, %			
Розтяг	45	29	23
Стиск	62	40	35
Кручення	50	32	26

У результаті дослідження мікроструктур встановлено, що при збільшенні вихідної пористості з 15% до 20% граничні ступені деформації зменшуються на 16%, 22% та 18%, а при збільшенні вихідної пористості з 20% до 25%, на 4-6%, відповідно. Найменші величини граничних ступенів деформації одержані при розтязі, а найбільші - при стиску.

Обробка результатів теоретичного і експериментального дослідження методами математичної статистики підтвердила їх взаємну відповідність з відносною похибкою 7-10%.

Результати досліджень граничних ступенів деформації використані при розробці технологічних процесів виготовлення деталей "вкладиш підшипника ковзання", "сопло плазмотрона" та "втулка з буртом" з мідного порошкового матеріалу (рис. 6).

Розроблені технології включають наступні операції: пресування порошкової заготовки пористістю 15%, спікання по ступінчастому режиму, штампування пуансоном, що не заходить у порожнину матриці з граничним ступенем деформації 42%. Металографічними дослідженнями підтверджено відсутність зовнішніх і внутрішніх дефектів. Вимірювальний контроль показав, що одержані деталі відповідають вимогам креслень.

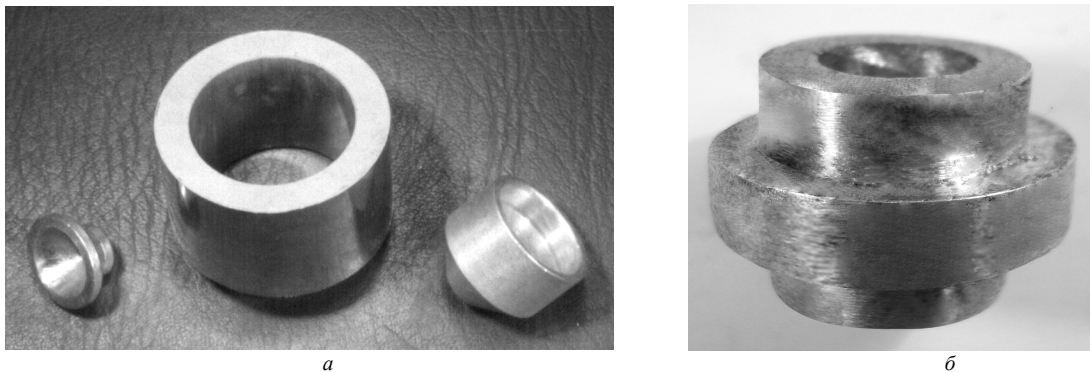


Рис. 6. Деталі з мідного порошкового матеріалу: а - вкладиш підшипника ковзання, сопла плазмотрона; б - втулка з буртом

Висновки.

Представлено методику визначення граничних ступенів деформації порошкових пористих заготовок при одноосьовому розтязі, стиску і крученні за результатами дослідження пластичної рівноваги методом функцій Ляпунова та експериментальним методом з використанням мікроструктур заготовок після деформування за схемою одноосьового стиску. Отримано експериментальні залежності граничних ступенів деформації від вихідної пористості для мідних пористих порошкових заготовок. Результати досліджень можуть бути використані для побудови діаграм пластичності порошкових матеріалів з різною пористістю, а також при оптимізації технологічних процесів обробки тиском порошкових пористих заготовок. Величина граничного ступеня деформації використана при розробці технологічних процесів виготовлення віссиметричних деталей з мідного порошкового матеріалу.

Список літератури

1. Мильман Ю.В. Механические свойства спеченых материалов. II. Влияние пористости на пластичность порошковых сплавов / Ю.В. Мильман, Р.К. Иващенко, Н.П. Захарова // Порошковая металлургия. – 1991. – № 3. – с. 93-100.
2. Рябичева Л.А. Развитие технологий изготовления изделий из порошковых материалов / Л.А. Рябичева // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. - Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2009. - с. 3-10.
3. Огородников В.А. Энергия. Деформации. Разрушение / В.А. Огородников, В.Б. Киселев, И.О. Сивак. - Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. - 204 с.
4. Рябичева Л.А. Компьютерное моделирование потери устойчивости при осадке / Л.А. Рябичева, Д.А. Усатюк // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні: Тематик. зб. наук. пр. – Краматорськ: ДДМА, 2006. – с. 138-144.
5. Потапов А.И. Об испытании проката на осадку / А.И. Потапов // Кузнечно-штамповочное производство. - 2005. - №6. - с. 45-48.
6. Ryabicheva L. Numerical Simulation and Forecasting of Mechanical Properties for Multi-Component Nonferrous Dispersion-Hardened Powder Materials / L. Ryabicheva, D. Usatyuk // Materials Science Forum. - 2007. - Vols. 534-536. - pp. 397-400.
7. Скороход В.В. Физико-металлургические основы спекания / В.В. Скороход, С.М. Солонин. – М.: Металлургия, 1984. – 158 с.