

УДК 621.762:539.3

Плескач В. М.

канд. техн. наук, доцент кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vmpayzp@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6182-4332

Акімов І. В.

канд. техн. наук, доцент кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: kafedra_t_met@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6076-0149

РУЙНУВАННЯ І ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ПОРОШКОВИХ ВИРОБІВ

Механізм руйнування порошкових тіл відрізняється від руйнування компактних тіл. Їх міцність суттєво залежить від отриманої при пресуванні і спіканні пористості. Знання і розуміння механізму руйнування пористих матеріалів дозволяє обрати для порошкового виробу той чи інший спосіб забезпечення міцності залежно від його схеми навантаження при експлуатації.

При навантаженні компактного металевого тіла спочатку виникає пластичне деформування. Внаслідок нього пластичність металу поступово зменшується, а зміцнення зростає. За рахунок зміцнення у певний момент у виробі виникають мікротріщини, які, розвиваючись, об'єднуються і утворюють так звану магістральну тріщину. Під подальшою дією навантаження магістральна тріщина призводить до остаточного руйнування тіла з утворенням принаймні двох нових поверхонь розділу (зламів).

Залежно від характеру пластичного деформування при руйнуванні розрізняють крихке і в'язке руйнування. При крихкому руйнуванні пластичне деформування відбувається у дуже малому об'ємі. Одночасно за рахунок накопиченої у тілі пружної деформації руйнування відбувається практично миттєво, і тому воно називається мікропластичним. При в'язкому руйнуванні перед вістрям щойно виниклої мікротріщини утворюється пластична зона, вона і процес руйнування розвиваються повільно, і таке руйнування називається макропластичним [1, 2].

На відміну від компактних металів у порошкових виробках під час формування створюється два типи меж: міжчастинкові - вільні межі частинок, які утворюють пори, і внутрішньочастинкові, пов'язані з внутрішніми дефектами самих частинок. Пори од самого початку виступають у ролі концентраторів напружень. Якщо виріб виготовляється із суміші неоднорідних частинок, структурна неоднорідність суттєво сприяє виникненню мікротріщин, а отже й руйнуванню при найменших навантаженнях. Крім того, наявність пор зменшує фактичний поперечний переріз виробу, що також зменшує опір навантаженню.

При деформуванні пористого тіла одночасно відбуваються два процеси: загальне ущільнення виробу і зміцнення металу частинок. Ущільнення виробів навіть при невеликих навантаженнях відбувається перш за все як міжчастинкове локальне макропластичне деформування за рахунок деформування окремих мікрооб'ємів виробу. У кожній окремій металевій частинці виробу процес зміцнення відбувається так же, як у компактному тілі. Але у різних мікрооб'ємах порошкового тіла через сильну неоднорідність напружень частинки знаходяться у різних структурних станах, і їх усереднене мікропластичне деформування не впливає на загальну деформацію тіла. При аналізі руйнування пористих тіл застосовують метод усереднення: їх розглядають як тіла, що складаються з двох фаз (частинок і пор), рівномірно розподілених по об'єму тіла. Причому пористість у процесі навантаження може збільшуватися. Оскільки пористість у порошковому тілі розподілена випадковим чином, руйнування відбувається по перерізу, максимально ослабленому порами.

На хід деформування і руйнування порошкових виробів впливає не лише загальна пористість, але й форма пор. Остання визначається розмірами і формою частинок порошку. Форма пор змінюється у процесі деформування. Дослідження показують [1], що при розтягу пори спочатку збільшуються у поздовжньому напрямку. Поступово змінюється їх поперечний розмір, починається процес так званого «шийкоутворення», з яким виникають умови пластичної нестійкості, яка у свою чергу веде до виникнення руйнівної мікротріщини. Чим більше пористість і чим ближче пори розташовані одна до одної, тим раніше може початися процес руйнування. Руйнування порошкового виробу може відбутися при тим меншій макропластичній деформації, чим більше пористість.

Сучасний підхід до оцінювання міцності пористих виробів ґрунтується на залежності її від пористості відповідного виробу. На підставі аналізу умов експлуатації порошкових виробів та впливу пористості на їх механічні властивості встановлено, що при пористості понад 25% границя міцності такого матеріалу становить 30...45% міцності компактного матеріалу відповідного хімічного складу. Такі матеріали вважаються мінімально допустимими для виготовлення навіть малонавантажених деталей. У зв'язку з цим сьогодні порошкові вироби за допустимою навантаженістю поділяються на такі чотири групи (табл. 1) [3, 4].

Таблиця 1 – Характеристика навантаженості порошкових виробів залежно від пористості

Група щільності	Характеристика навантаженості	Пористість матеріалу, %%	Відносні властивості пористих матеріалів (% від властивостей компактних)	
			Границя міцності	Пластичність і ударна в'язкість
1	Малонавантажені	25...16	30...45	15...30
2	Помірноювантажені	15...10	46...65	31...45
3	Середньонавантажені	9...2	66...90	46...85
4	Важконавантажені	< 2	91...100	86...100

Якщо за умов експлуатації, пористістю або технологією виготовлення виріб відноситься до перших двох груп, то міцність і жорсткість таких деталей не розраховують. Їх розміри обирають з конструктивних або технологічних міркувань. Такі вироби, як правило, все одно мають великий запас міцності, а отже й завищену масу. Тому при їх виготовленні використовуються стандартні достатньо дешеві порошки. Вироби, які належать до цих груп, звичайно не піддаються термообробленню.

Матеріали, які відносяться до третьої і четвертої груп, перед використанням вимагають отримання об'єктивних відомостей про їх механічні властивості. У зв'язку з цим їх границя міцності визначається випробуванням на розтяг зразків з матеріалу виробу. Зразки виготовляються згідно з ГОСТ 18227-98 [5] двобічним пресуванням і спіканням за тими ж умовами, як і готові вироби. Допускається виготовляти зразки для випробування механічним обробленням з готових виробів. При цьому діаметр їх робочої частини повинен бути не менше 4 мм.

Як відомо, міцність порошкових виробів суттєво залежить від форми і розмірів частинок, їх механічних властивостей, рівномірності розподілу пористості по об'єму виробу, а також від поточного тиску пресування. Як показав аналіз механізму руйнування, концентратором напружень і джерелом первинної тріщини є пори - провідний чинник руйнування. Їх кількість в об'ємі виробу (тобто пористість) залежить від тиску пресування. Підвищення міцності виробу можна досягти за рахунок збільшення тиску пресування, а отже й зменшення пористості. Тому у порошковій металургії виникла необхідність встановлення теоретичної залежності між міцністю і пористістю пресовки.

Першим таку залежність запропонував М.Ю. Бальшин [6, 7] у вигляді рівняння:

$$\sigma = \sigma_k(1 - P)n, \quad (1)$$

де σ і σ_k – границі міцності при розтягу пористого і компактного матеріалів однакового складу відповідно;

P – пористість виробу у частках одиниці;

n – константа, яка залежить від природи порошкового матеріалу ($n = 3 \dots 10$).

Точніша формула залежності границі міцності від пористості, яка враховує розмір і форму пор, неоднорідність їх розподілу по об'єму виробу, його габарити тощо, запропонована В.Т. Трошенком. Одне з найвдаліших рішень задачі математичного опису процесу ущільнення металевих порошків у усьому можливому діапазоні тисків запропоновано Г.М. Ждановичем [8]. На його думку частинки порошку – це відокремлені фізичні тіла, які підкоряються законам статистичної механіки. За допомогою цих законів Г.М. Жданович отримав низку залежностей пористості пресовок від тиску пресування у прес-формах. Е. Ришкевичем запропонована ще одна залежність, яка у межах пористості $0 \leq P \leq 0,3$ дає результат, що співпадає з результатом, отриманим за залежністю М. Ю. Бальшина [3].

На сьогодні існує значна кількість пропозицій встановити математичну залежність між міцністю і пористістю порошкового виробу. Всі вони носять емпіричний характер і отримані шляхом математичного оброблення результатів експериментів; деякі з них наведені у табл. 2.

Велика кількість залежностей міцності від пористості пояснюється з одного боку складністю проблеми, з іншого – труднощами достовірного порівняння дослідних даних для зразків з різною пористістю, оскільки форма пор, величина частинок, вміст домішок тощо, можуть істотно відрізнятися у різних експериментах. Проте наявність згаданих вище теоретичних залежностей дозволяє при проектуванні порошкового виробу із заданою міцністю і запланованою технологією його виготовлення передбачити з достатньою точністю необхідну пористість.

Для підвищення міцності виробу достатньо широко використовуються технології пресування, спрямовані на підвищення щільності, а отже й зменшення пористості сирих пресовок. Зокрема, однією з таких технологій є тепле пресування брикетів [9]. При цьому і порошок, і прес-форма попередньо нагріваються до температури 1500 °С. Нагрівання здійснюється за допомогою індукторів, мікрохвильових пристроїв тощо. Наступне пресування проходить при тиску до 700 МПа.

Для отримання практично безпористої пресовки застосовують імпульсне формування, при якому ущільнення здійснюється ударними хвилями в інтервалі часу, що не перевищує 1 с. За видом джерела енергії розрізняють вибухові, електрогідрравлічне, електромагнітне та пневмомеханічне імпульсне формування. Ударна хвиля, створюю-

чи надзвичайно великий тиск (до 1...3 ГПа), діє дуже короткий час. Тепло, яке виділяється за рахунок деформування і тертя частинок металу, не встигає поширитися назовні і сприяє значному ущільненню пресовки. Цим методом виготовляють брикети порівняно простої конфігурації.

Таблиця 2 – Аналітичні залежності міцності від пористості [8]

Автор	Вираз	Значення констант і застосовуваність виразу
Бальшин	$\sigma = \sigma_k (1 - \Pi)^m$	$m = 3 \dots 6$
Красовський	$\sigma = \sigma_k (1 - \Pi/\Pi_n)^m$	Π_n - пористість порошку у стані вільної насипки
Ришкевич	$\sigma = \sigma_k \exp(-b\Pi)$	$b = 4 \dots 7$
Щербань	$\sigma = \sigma_k (1 - \Pi^2) \exp(-b\Pi)$	b – показник Щербаня
Трошенко і Красовський	$\sigma = \sigma_k (1 - 1,5\Pi)/(1 + 1,5\beta\Pi)$	$\beta = 2$; $\Pi < 0,66$
Хейнес	$\sigma = \sigma_k (1 - \Pi)/(1 - b\Pi)$	$b = 5$ для сталі
Вейл	$\sigma = \sigma_k (1 - \Pi)/(1 + A\Pi)$	A – параметр Вейла
Харвей	$\sigma = \sigma_k (1 - k)^3/[k^3 + (1 - k)^3]$	$k = [3\Pi/(4\pi)]^{1/3}$
Герман	$\sigma = K (1 - \Pi)^m \sigma_k/D$	$m = 4 \dots 7$; $\Pi = 0,1 \dots 0,4$; $D = 4 \dots 6$ мкм; K – коефіцієнт Германа

Крім того, для виготовлення виробів з мінімальною пористістю використовують також гаряче пресування. Воно проводиться при температурі 0,5...0,9 від температури плавлення основного металу порошку. При гарячому пресуванні проходять одночасно два процеси: пресування і спікання. Оскільки температура при пресуванні може досягати 1000°C, виникає проблема матеріалу прес-форми і способу її нагрівання. До того ж, при таких температурах більшість порошкових матеріалів вимагає захисту від окиснення. Враховуючи все вище зазначене, треба зауважити, що цей метод підвищення міцності вимагає використання досить складного і коштовного обладнання.

Щоб запобігти впливу пор як концентраторів напружень на міцність порошкових виробів, використовують ще один метод оброблення пресовок – інфільтрацію. Суть її полягає у заповненні пор пресовок металом або сплавом, температура плавлення якого менше температури плавлення основного металу виробу [4]. Ущільнення порошкового виробу при інфільтрації аналогічне процесам при рідинофазному спіканні.

Швидкість інфільтрації становить близько 1 мм/с. Товщина інфільтрованого шару залежить від фізичних властивостей розплаву та тривалості заповнення пор. Час повної інфільтрації у свою чергу залежить від густини розплаву, первинного об'єму пор у пресовці та площі її поперечного перерізу.

Інфільтрацію проводять методом накладання і занурення. У першому випадку пресовку разом з накладеною на неї необхідною кількістю металу-заповнювача поміщають у нагрівач із захисною атмосферою і нагрівають до необхідної температури. Легкоплавкий метал плавиться і заповнює пори пресовки. За другим методом пресовку занурюють у попередньо розплавлений легкоплавкий компонент і витримують необхідний час.

Після інфільтрації виріб практично не має пор і за необхідністю легко піддається наступним видам оброблення, у тому числі й пластичному деформуванню.

Окрім пористості, значною мірою на механічні властивості порошкових виробів також впливає їх подальше термічне оброблення. Аналіз літературних джерел показує [1, 8–10], що найвивченішими матеріалами щодо впливу термічного оброблення на структуру та їх механічні властивості є вуглецеві порошкові сталі. Як і компактні, порошкові сталі піддаються всім видам термічного оброблення. При цьому найчастіше використовуються відпалювання, гартування з подальшим відпусканням, а також старіння. На відміну від компактних матеріалів при термообробленні порошкових матеріалів існує низка особливостей, викликаних наявністю у них пор.

Перш за все треба зазначити, що нагрівання порошкових виробів необхідно проводити у захисній атмосфері для запобігання окисненню частинок та зневуглецюванню їх поверхні, як це звичайно відбувається у вуглецевих порошкових сталях. З цієї причини, добре зарекомендувало себе нагрівання струмами високої частоти (СВЧ), яке призводить до швидкого нагрівання поверхні (зокрема, при поверхневому гартуванні), і процеси окиснення та зневуглецювання не встигають відбутися. По-друге, до особливостей термооброблення порошкових матеріалів треба віднести наявність пор та вільних поверхонь великої протяжності, високу дисперсність частинок порошку, велику нерівномірність розподілу хімічних складників (наприклад, вуглецю в сталях) – все це значно змінює термодинамічний стан порошкових матеріалів, підвищує їх вільну енергію, створює умови виникнення вторинних фаз на дефектних місцях структури та зменшує роботу їх утворення. Так, наприклад, за даними авторів [1] збільшення дисперсності частинок і пористості порошкових сталей призводить до зміщення точки A_{C1} до рівноважної точки A_1 (рис. 1). При цьому вони вказують на те, що наявність пор знижує теплопровідність та температуропровідність порошкових матеріалів, а отже й швидкості їх нагрівання та охолодження відрізняються від відповідних параметрів компактних матеріалів.

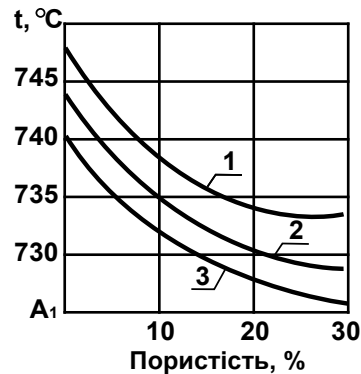


Рисунок 1. Залежності положення точки A_1 порошкової сталі, що містить 0,8%С, при нагріванні зі швидкістю, $^{\circ}\text{C}/\text{хв.}$:
1 – 60; 2 – 200; 3 – 400 [1]

Стосовно властивостей порошкових сталей при термообробленні багатьма авторами вказується [1, 10], що при їх гартуванні із збільшенням пористості твердість мартенситу зменшується і спостерігається значна її нерівномірність по глибині прогартованого шару. Так, наприклад, за даними [9, 10] твердість сталі з 0,8%С після гартування СВЧ з подальшим охолодження в маслі коливалася у межах 5000...8400 МПа. Крім того, багато дослідників зазначають, що різке охолодження порошкового виробу при термообробленні через наявність пор може привести до виникнення значних нерівномірно розподілених термічних та фазових напружень [1, 8, 10]. Таке явище відбивається на структурі виробу і призводить до утворення тріщин ще під час термічного оброблення.

Для порошкових сталей цікавим фактом є те, що міцність після гартування, на відміну від компактних сталей, підвищується незначно у порівнянні з міцністю після спікання або навіть зменшується. Це пов'язано з нерівномірним розподілом внутрішніх напружень у порошкових матеріалів, який, до того ж, може зменшувати й ударну в'язкість та спонукати до крихкого руйнування. Щодо міцності, то у загартованих порошкових сталях її суттєве збільшення відбувається після відпускання. Причому оптимальна температура відпускання коливається у межах 200...450 $^{\circ}\text{C}$ й так само залежить від пористості оброблюваної сталі: чим вона вище, тим вище має бути й температура відпускання [1, 9].

Список літератури

1. Формирование структуры и свойств порошковых материалов [Текст] / А. В. Цыркин, А. Н. Михайлов, М. Г. Петров, В. В. Головатинский. – Донецк : ДонНТУ, 2013. – 162 с.
2. Корнілов О. Опір матеріалів: підручник. [Текст] / О. Корнілов. – К. : Логос, 2002. – 562 с.
3. Радомысльский И. Д. . Конструкционные порошковые материалы. [Текст] / И. Д. Радомысльский, Г. Г. Сердюк, Н. И. Щербань. – К. : Техніка, 1985. – 152 с.
4. Либенсон Г. А. Процессы порошковой металлургии. В 2-х т. Т. 2. Формование и спекание [Текст]: учебник для вузов / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий. – М. : МИСИС, 2002. – 320 с.
5. ГОСТ 18227-98 (ISO 2740-86) Материалы металлические спеченные, исключая твёрдые сплавы. Образцы для испытания на растяжение [Текст] / [Дата введения 2001-07-01]. Минск : ИПК Изд. стандартов, 2001. – 7 с.
6. Кипарисов С. С. Порошковая металлургия [Текст] / С. С. Кипарисов., Г. А. Либенсон. – М. : Металлургия, 1991. – 432 с.
7. German R. M. Powder metallurgy Science. / German R. M. // Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1994. – 472 p.
8. Осокин Е. Н. Процессы порошковой металлургии. Версия 1.0 [Электронный ресурс] : курс лекций / Е. Н. Осокин, О. А. Артемьева. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/5227219/>
9. Гиршов В. Л. Современные технологии в порошковой металлургии: учеб. пособие. [Текст] / В. Л. Гиршов, С. А. Котов, В. Н. Цеменко. – СПб. : изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 385 с.
10. Ермаков С. С. Порошковые стали и изделия. [Текст] / С. С. Ермаков, Н. Ф. Вязников. – Л. : Машиностроение, 1990. – 320 с.

Одержано 03.08.2023

DESTRUCTION AND INCREASE OF STRENGTH OF POWDER PRODUCTS

- Pleskach V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Composite Materials, Chemistry and Technologies”, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: vmpayzp@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-6182-4332
- Akimov I. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Composite Materials, Chemistry and Technologies”, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: kafedra_t_met@zntu.edu.ua*, ORCID: 0000-0001-6076-014

References

1. Cyrkin A.V., Mikhaylov A.N., Peirov M.G., Golovyatinskiy V.V. (2013). Formirovanie struktury i svoystv poroshkovykh materialov [Formation of structure and properties of powder materials]. Donetsk, DonNTU, 162. [in Russian].
2. Kornilov O. (2002) Opir materialiv. [Strength of Materials]. Kyiv, Logos, 562. [in Ukrainian].
3. Radomyselskiy I.D., Serdyuk G.G., Shcherban' N.I. (1985). Konstruktsionnye poroshkovye materialy [Structural powder materials]. Kyiv, Tekhnika, 152. [in Russian].
4. Libenson G.A., Lopatin V.Yu., Komarnitskiy G.V. (2002). Protssy poroshkovoy metallurgii. T. 2. Formovanie i spekanie [Processes of powder metallurgy. Vol. 2. Molding and sintering]. Moskva, “MISIS”, 320. [in Russian].
5. GOST 18227-98 (ISO 2740-86) (2001). Materialy metallicheskie spechennye, isklyuchaya tverdye splavy. Obrasty dlya ispytaniya na rastyazhenie [Sintered metal materials, excluding hard alloys. Tensile test specimens]. Minsk, IPK isd. standartov, 7. [in Russian].
6. Kiparisov S.S., Libenson G.A. (1991). Poroshkovaya metallurgiya. [Powder metallurgy]. Moskva, Metallurgiya. 432. [in Russian].
7. German R. M. (1994). Powder metallurgy Science. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 472 p.
8. Osokin Ye.N., Artemyeva O.A. (2008) Protssy poroshkovoy metallurgii. [Processes of powder metallurgy]. Available at: <https://studfile.net/preview/5227219/> [in Russian].
9. Girshov V.L., Kotov S.A., Cemenko V.N. (2010). Soremennye protssy v poroshkovoy metallurgii. [Modern technologies in powder metallurgy]. Sankt-Peterburg, isd. Politechn. univ. 385. [in Russian].
10. Yermakov S.S., Vyasnikov N.F. (1990). Poroshkovye stali i izdeliya. [Powder steels and products]. Leningrad, Mashynostroyeniye, 320. [in Russian].