



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НІКОПОЛЬСЬКИЙ ТЕХНІКУМ
НАЦІОНАЛЬНОЇ МЕТАЛУРГІЙНОЇ АКАДЕМІЇ
УКРАЇНИ



НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

ПОРОШКОВА МЕТАЛУРГІЯ

НІКОПОЛЬ, НТ НМеТАУ

2004

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НІКОПОЛЬСЬКИЙ ТЕХНІКУМ
НАЦІОНАЛЬНОЇ МЕТАЛУРГІЙНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

з дисципліни: „Основи технології галузі”

за розділом:

„Порошкова металургія”

Укладачи

**Г.О. Козлов
О.О. Сірак**

**РЕКОМЕНДОВАНО
ПЦК металургійних дисциплін та
ПЦК інженерної механіки НТ
НМетАУ**

**НІКОПОЛЬ, НТ НМетАУ
2004**

ЗМІСТ

Вступ	4
Основні технології виробництва порошків	6
Властивості порошків	11
Виробництво матеріалів та виробів з порошків	13
Продукція порошкової металургії	15
Контрольні запитання	19
Література	20

ВСТУП

Порошкова металургія - це галузь техніки, а не металургії. За своєю сутністю порошкова металургія охоплює сукупність методів виробництва порошків металів, металоз'єднань та виробів з порошків або їхніх з'єднань (у тому числі і з неметалічними матеріалами — порошками) без розплаву основного компонента (але інші компоненти можуть бути і рідкими). Тобто порошкова металургія не лише виробляє порошок, кінцева ціль її напівфабрикати та вироби.

Порошкова металургія була відома з сивої давнини. Так, приблизно 5 тис. років тому вже одержували залізо в твердому вигляді без плавлення руди, відновлюючи її деревним вуглецем при горінні вогнищ. Проте після того як люди навчились плавити метал, металовиробнича порошкова металургія була забута і відновила лише в 1826 р. у Росії завдяки зусиллям П. Г. Соболевського та В. В. Любарського. У тому ж році методом порошкової металургії з природних розсипищ платини ($T_{пл} = 1777\text{ }^{\circ}\text{C}$) одержали вироби, які були продемонстровані на засіданні Санкт-Петербурзької Академії наук. Через три роки аналогічним методом, тобто послідовним чергуванням нагріву та обтиснення, платину одержав Волостан (Англія).

З кінця XIX ст. перед світовою наукою та технікою серйозно постала проблема тугоплавких металів з температурою плавлення вище $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{пл} = 3800\text{ }^{\circ}\text{C}$). Згодом виникла ще й проблема стосовно матеріалів, які б могли обробляти ці метали. В зв'язку з необхідністю вирішення цих проблем і одержав новий імпульс розвитку метод порошкової металургії.

Проте помітний черговий рубіж у розвитку цього напрямку можна віднести приблизно до 1950 р., коли в усьому світі методом порошкової металургії виробили близько 30 тис. т порошків і виробів. До 1982 р. виробили вже приблизно 1 млн 200 тис. т матеріалу та 600 тис. т виробів. У 1985 р. в усьому світі виробляли більше 1,5 млн т порошку, з яких тільки частка США становила більше 500 тис. т. У Радянському Союзі до 1990 р. виробництво порошку та виробів досягло 200 тис. т, з яких значна частина була вироблена в Україні. До 2000 р. на пострадянському просторі в розвитку цієї галузі намітився спад і зараз в Україні продукція порошкової металургії становить 20...25 тис. т за рік. У цілому ж у світі приріст у галузі порошкової металургії продовжує збільшуватись і вже перевищує 15 % за рік, що значно вище за інші галузі промисловості.

Використання виробів порошкової металургії в різноманітних галузях промисловості, науки і техніки, особливо космонавтики та авіації, зумовлено насамперед тим, що порошкова металургія фактично комплексно вирішує потрібну задачу, а саме:

- виробництво спечених матеріалів і виробів з високими й унікальними фізичними та механічними властивостями, котрі не можуть бути одержані іншими методами;
- виробництво деталей і виробів, властивості яких аналогічні тим, що одержані за інших методів, але завдяки методу порошкової металургії виробництво їх більш економічне;
- виробництво спечених матеріалів і виробів з них з тонкодисперсною структурою, формування якої забезпечує різке зростання властивостей матеріалів.

Це переконливо демонструється на прикладі спеченого композита вольфрам -- мідь. Процес спікання відбувається при температурі 1000°C, при якій розплавляється лише мідь. Такий композит може недовгий час працювати при температурі, що перевищує температуру плавлення вольфраму, оскільки в процесі експлуатації мідь випотіває і, випаровуючись, забирає тепло, а вольфрам якийсь час зберігає несучу здатність.

Економічність порошкової металургії пов'язана насамперед з економією металу (коефіцієнт використання металу (КВМ) при литті та прокатці може бути менше за 0,6, а для порошкової металургії він завжди більше 0,9). Крім того, виріб з порошку завжди шпаристий, що також дає економію металу, оскільки вага порошкової конструкції менша за суцільну і має таку саму несучу здатність.

Дисперсність в структурі порошкового матеріалу, коли розмір частинок менше за 0,2 мкм, забезпечує збільшення межі міцності та текучості порівняно з суцільними матеріалами в декілька разів.

На жаль, порошкова металургія має деякі специфічні недоліки, що стримує її розповсюдження та використання. Так, окремі порошки мають високу вартість, деталі малотоннажні, є обмеження в технологічних процесах виготовлення деталей за формами, розмірами тощо.

Основні етапи одержання виробів методом порошкової металургії:

- виробництво порошків;
- формування заготовок;
- нагрів (спікання) заготовок;
- додаткова обробка спечених виробів.

ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ПОРОШКІВ

При виробництві порошків розрізняють дві групи методів: механічні (що не викликають суттєвих змін за хімічним складом) та фізико-хімічні (які здатні до суттєвих фізико-хімічних перетворень).

До механічних методів відносять: операції переводу твердого матеріалу у порошок (різання, дрібнення, розмелення, диспергування ультразвуком) та операції переводу рідкого матеріалу в порошок (розпилення шляхом подрібнення розплавів механічно, відцентровими силами, або енергоносієм; сюди відносять і грануляцію).

До фізико-хімічних відносять: методи відновлення хімічних сполук (технологія залежить від типу відновлювача та перебігу процесу), електроліз металів (у водних або у сольових розчинах), термічний розклад хімічних сполук (наприклад, термічна дисоціація), міжкришталеву корозію, термодифузійне насичення, сублімацію та конденсацію (останню широко використовують при одержанні порошків Zn та Cd).

Проте найчастіше використовують комбіновані методи.

При одержанні порошку із магнієвого литого матеріалу часто використовують різання шляхом фрезерування. Подрібнення здійснюють за допомогою спеціальних дробарок, які забезпечують ступінь подрібнення від 3 до 6. Зазвичай подрібнення є підготовчою операцією. Розмел виконують у млинах різноманітних конструкцій, ступінь подрібнення в яких від 50 до 100. Найчастіше розмел здійснюють у кульових обертаючих млинах. Тіло, що розмелює, не обов'язково має бути кулькою, але лінійні розміри його повинні бути сумірні.

Для рівноваги кульки на стінці барабана в zenіті число обертів має досягати критичного значення

$$n_{кр} = \sqrt{D} \text{ , об/хв,}$$

де D — діаметр барабана, м.

Якщо $n < n_{кр}$, то кулька зірветься, а якщо $n > n_{кр}$, то залишиться.

У режимі ковзання шарове навантаження ніби проковзує при $n_c < 0,2n_{кр}$. У режимі перекочування при $n_n < 0,4...0,6 n_{кр}$ кульки починають рухатися, при цьому вся сумарна поверхня їх працює.

У режимі інтенсивного подрібнення при $n_{подр} \cong 0,75...0,85 n_{кр}$, коли кулька починає зриватися, до стирання додається ще й удар.

У режимі $n \approx n_{кр}$ подрібнення різко знижується і за своїм ефектом стає близьким до режиму ковзання.

Розглянуті режими є оптимальними для коефіцієнтів заповнення млина $\varphi = 0,4 \dots 0,5$. Маса сталевих кульок має бути в межах 1,7...1,9 кг на 1 л млина (для твердосплавних кульок значення інші).

Важливе значення мають також габаритні розміри барабана. У млині Группа для $D/l > 3 \dots 5$, де l — довжина барабана, посилюється подрібнююча дія.

Розмір куль також впливає на інтенсивність розмелу. Максимальний діаметр куль $d_{max} = (1/18 \dots 1/24)D$ де D — внутрішній діаметр барабана. Для твердосплавних куль $d_{min} = 4$ мм.

Маса куль зазвичай має бути в 2...3 рази більша за масу матеріалу, що подрібнюють, а при інтенсивному подрібненні - в 5...10 разів більше.

Важливим є також час подрібнення, тому бажано знати оптимум цього часу. Реально він становить години або десятки годин, але зазвичай не більше 100 год.

У кульових млинах одержують порошок у вигляді частинок неправильної форми розміром 0,1...3,0 мм. За наявності рідини (за рахунок зменшення тертя) частинки більш рухомі, а за рахунок електростатичних зарядів відбувається більш інтенсивне подрібнення. Проте при цьому є і незручності - порошок треба висушувати. Добра рідина - це вода, але застосовують її рідко через необхідність вакуумної сушки. В зв'язку з цим найчастіше використовують спиртові середовища (наприклад, 96 %-й етиловий спирт).

В останні 20 - 30 років для розмелу широко застосовують планетарні млини, або планетарно-відцентрові млини (ПВМ), у яких вал обертається в одному напрямі, а барабани - в іншому. Недоліком цих млинів є більш інтенсивне забруднення матеріалу.

У вібраційних млинах вібрає корпус апарата, але в них коефіцієнт заповнення $\varphi = 0,8$. Основними перевагами цих млинів є те, що їхня продуктивність вища, а забрудненість порошку нижча. Частота коливань барабана в таких млинах досягає 3000 за хвилину, а амплітуда коливань становить 2...3 мм.

Застосовують також вихрові млини з двома пропелерами, що обертаються в різних напрямках, та струминні млини, в яких відбувається самоподрібнення. У вихрових млинах оберти лопастей можуть досягати 3000 об/хв, а частинки порошку подрібнюються до 50...2000 мкм.

Коли рідкий матеріал перетворюється на порошок, відбуваються фізико-хімічні процеси. Справа в тому, що при будь-яких процесах розпилення рідкого матеріалу швидкість охолодження дуже висока — до 10 град/хв. При цьому тверде тіло (порошок) має аморфну, а не кристалічну структуру. При розпиленні енергоносієм — газом — необхідно, щоб швидкість його була не менша 100 м/хв. У США ще на

початку 80-х років ХХ ст. знаменита установка "Торнадо" забезпечувала швидкість газу до 1000 м/с, тобто дорівнювала трьом швидкостям звуку.

Якщо повітря використовують як енергоносіє, то склад його достатньо часто модифікують. Так, при одержанні спеченого алюмінієвого порошку (САП) повітря розбавляють за киснем у три рази, щоб навколо частинок порошку створювалась оксидна плівка, але не було займання порошку алюмінію, який використовують як тверде паливо.

При розпиленні водою необхідно використовувати високий тиск. Зараз є установки, в яких тиск вище 20 МПа (~ 200 атм). Вважають, що при водяному розпиленні порошок окислюється менше.

Форма частинок при розпиленні енергоносієм має бути сферичною, але для надання частинкам такої форми потрібен час, а його часто бракує. В промислових установках в основному одержують сферичний порошок з розміром частинок 0,05...0,35 мм. Частинки іншої форми одержують для надання кінцевому продукту унікальних та специфічних властивостей.

Для розбризування розплавленого металу застосовують й інші методи. В одному з них два валка, що виготовляють із матеріалів, теплопровідність яких низька (наприклад, з нітриду бору), обертаються навколо горизонтальних осей назустріч один одному з числом обертів (я) до 4 тис. за 1 хвилину. Зі спеціальної ємкості зверху в між-валковий простір надходить рідкий метал, а з зазору між валками, що обертаються, вниз вилітають краплі розплаву, які під час падіння перетворюються в порошок і висипаються в забірний пристрій. У другому методі над ємкістю з рідким металом обертається мідний диск (п ~ 4 тис. об/хв) і дотискується до розплаву, плівка якого тверднена приторцевій поверхні диска й у вигляді краплеподібних гранул порошку під дією відцентрових сил викидається в забірний пристрій. Замість гладкого іноді використовують диск з лопатками. В цьому випадку при формуванні порошку використовується енергія удару лопаток об поверхневий шар розплавленого металу. Одержані за цими методами частинки порошку також мають розмір 0,05... 0,35 мм.

Для розпилення порошків з твердого матеріалу використовують також методи з електродами, які обертаються і вібрують. Число обертів або коливань електродів може досягати 20 тис. за хвилину. Ці методики складні за конструкцією через необхідність вакуумування установки та додержання постійного розміру дуги.

Фізико-хімічні методи використовують тоді, коли початковий матеріал знаходиться у вигляді хімічної сполуки. Виробництво порошків із таких сполук, зазвичай, супроводжується зміною хімічного складу сировини або його агрегатного стану.

Одержання металічних порошків хімічним відновленням оксидів металів (Fe, Cu, Ni, Co, W, Mo) — поширений, високопродуктивний та економічний метод. Як відновлювач використовують твердий вуглець

(C), газоподібний водень (H_2) чи оксид вуглецю (CO). Сутність цього методу можна пояснити на класичних прикладах одержання порошку заліза. В першому випадку дрібнозернисту руду (або концентрат) розміщують на решітці, крізь яку подають водень чи інший відновлювач, наприклад CO, підтиском 15 МПа (близько 15 атм). У шарі, що утворюється (який називають киплячим), забезпечується інтенсивний контакт газу - відновлювача з частинами оксиду заліза. Для відновлення 1 т залізного порошку витрачається до 650 м^3 водню.

В другому випадку губчасте залізо одержують в карбідокремнієвих капсулах, які являють собою чергування декількох шарів відновлювача (подрібнене тверде паливо та вапняк) і відновлювальної, роздрібненої на малі частинки, руди. Такі капсули нагрівають, витримують при 1200°C в тунельних печах і охолоджують (до 100 год) доти, поки не завершиться процес відновлення заліза. Відновлене губчасте залізо має вигляд товстостінних труб, які чистять та подрібнюють. Одержаний у такий спосіб порошок може мати чистоту до 99 % Fe і 0,1 % C.

Методами електролітичного осадження (електроліз) водних розчинів солей одержують порошки Sn, Ag, Cu, Fe та інші, а безпосередньо електролізом розплавів — порошки Ti, Ta, Zr, Fe тощо.

У водних розчинах температура звичайно не перевищує 50°C . Будова електролізерів проста. В розплавах температура досягає $700\text{...}750^\circ\text{C}$ і тому для збереження солей від окислення необхідна герметизація електролізерів. При електролізі розплавів з "брудної" сировини, наприклад солей Fe або Ti, одержують чисті метали. Частинки цих металів у твердому стані безкисневі при виділенні їх на катоді (мінус на електроді), а газу, що виділяється на аноді (плюс на електроді), зазвичай фтор та хлор, стравлюються. При застосуванні цього методу іноді можливий від'ємний анодний ефект, коли газ біля анода віджимає розплав і в електролізері починається іскріння.

Розглянемо процес електролізу на прикладі одержання танталового порошку. Для цього в електролізер завантажують KCl (43...55%), KF(42...27,5%) та K_2TaF_7 (10...17,5%). Остання сполука забезпечує електропровідність. Проте процес електролізу відбувається лише тоді, коли додають п'ятиокис танталу Ta_2O_5 (2,5...7,0%), який покращує змочуваність та зменшує іскріння. Анод зазвичай графітовий; катодом є тигель, в якому знаходиться розплав. При нарощенні осаду Ta в тиглі графітовий анод піднімають і через стінки підкидають Ta_2O_5 . Після завершення процесу електроліт зберігають (шляхом його виплавляння з тигля) і в подальшому використовують знову. Танталовий осад має вигляд губки, шляхом дроблення (толчення) з нього одержують порошок. У такий самий спосіб, особливо при переробці відходів, одержують порошки інших металів.

Методом термічного розкладення карбонільних сполук типу $Me(CO)_c$. (де Me - один із металів) одержують також чисті металічні порошки.

Карбоніли - це адсорбційні сполуки, які утворюються не за хімічними законами валентності. Температури плавлення карбонілів низькі. Слід відзначити такі їхні властивості, як токсичність, летучість, здатність розкладатися з вибухом при дії світла.

Загальний вигляд реакції синтезу (створення) карбонілу і його термічної дисоціації (розкладання) можна записати у вигляді



де B - деякий баласт.

Реакція синтезу — створення $Me_a(CO)_c$ - можлива лише за наявності CO та високих тисків порядку 5...30 МПа (50...300 атм). Створювані при 100...200°C карбоніли легко сконденсують у холодильнику. В результаті термічної дисоціації ці карбоніли при 50...300°C легко розкладаються, виділяючи метал, і повертають у процес CO. За таким методом одержують карбонілоутворювальні метали: Cr, Ni, Fe, Co, платиноїди тощо. Порошки Fe, Ni, Co зазвичай одержують з карбонілів типу $Fe(CO)_4$, $Fe(CO)_5$, $Ni(CO)_4$, $Co(CO)_3$.

За однією з методик при одержанні Fe газовий потік карбонілу проходить по вертикальній трубі, на дні якої і збирається порошок. Частинки заліза у трубі завдовжки 3 м долають відстань до декількох кілометрів, при цьому вони зростають з формуванням шаруватої структури. В структурі частинок заліза може бути від 7 до 9 прошарувань, формування яких пов'язано з вторинними реакціями.

У Ni прошаркові структури не формуються.

Крім монокарбонільних порошків чистого металу можна одержувати і полікарбонільні.

Поділка чистого карбонільного порошку дуже висока (приблизно на порядок вище за поділки звичайного порошку), що пов'язано, зокрема, і з необхідністю відпалу полуфабриката у водні.

При одержанні порошків деяких рідкісних металів застосовують метод гідрогенізації, заснований на використанні явища окрихчення воднем. Метод може застосовуватися до тих металів, які при 300...800 °C активно поглинають водень і випадають в осад на дні реакторів у вигляді крихкої металічної губки. Подалі таку губку розмелюють і піддають дегідрогенізації (зневоднюють) у вакуумі при 800 °C. Одержані за такою технологією порошки мають, як правило, дуже низьку пластичність.

ВЛАСТИВОСТІ ПОРОШКІВ

У порошкоподібних матеріалів звичайно враховують три групи властивостей:

- хімічні;
- фізичні;
- технологічні.

Хімічні властивості - це газонасиченість, пірофорність (здатність до займання) та токсичність.

Фізичні властивості - це розміри (частинки за розмірами відрізняються на чотири порядки від часток мікрметра до 1 мм), форма, питома вага (яка не відповідає табличній щільності для компактного матеріалу), питома поверхня та мікротвердість.

Технологічні властивості - це насипна щільність (міра заповнення порошком у стані засипки), текучість (здатність витікати з отвору), пресовність, формовність (властивість зберігати форму), відсутність опору на розтяг, здатність передачі навантаження в усі сторони (подібно рідині).

Коротко про хімічні властивості. Зміст основного компонента в порошках, як правило, не менше 98 %, інші — домішки. Газові домішки специфічні для порошку і наявні в ньому завжди. Для 10 мкм порошку гарантується, як мінімум, 0,5 % газу, для 1 мкм порошку адсорбційного газу може бути до 5 % і так далі.

Пірофорність оцінюється по температурі займистості та нижній концентраційній межі вибуховості (НКМВ) у грамах на кубічний метр (г/м). Звичайно займання порошку можливе при 300...320 °С, а в цирконію (Zr) крупного воно відбувається приблизно при 180 °С, а у Zr дрібного (6 мкм) при 20 °С. Такий порошок зберігають у дистильованій воді. Для А1 НКМВ = 10 г/м³, для Fe НКМВ - 105 г/м.

Щодо токсичності, то слід пам'ятати, що всі порошки токсичні та шкідливі через їхнє накопичення в організмі та труднощі з їх виведенням. Токсичність оцінюють за значенням межі допустимої концентрації (МДК) у міліграмах на кубічний метр (мг/м³). Порошки берилію (Be) та оксиди ванадію (V₂O₅) дуже токсичні, — їхня (МДК) становить частки мг/м³, для оксиду ванадію МДК - 0,1 мг/м³.

Фізичні властивості. Форма частинок звичайно пов'язана з методом одержання порошку. Частинки порошку заліза мають п'ять-шість форм:

- округла, сферична правильна форма — для карбонільного методу;
- губчаста форма — при розпиленні;
- дендритна форма — при електролізі;

- осколочна форма — при застосуванні методів механічного подрібнення;
- тарільчата форма — при вихровому подрібненні.

Розмір частинок, як зазначалось, коливається від 0,1...0,2 мкм до 1 мм. Оцінюють набір частинок за вузьким розмірним діапазоном, тобто за так званим гранулометричним складом. Для цього використовують такі методи: ситовий (ґратчастий) аналіз за допомогою бронзових та латунних сіток дозволяє оцінювати мінімальний розмір частинок до 40 мкм; мікроскопічний оптичний аналіз - від 2 до 100 мкм, а електронний - менше 1 мкм. Застосовують також седиментаційний аналіз, пов'язаний з оцінкою властивості осаджування частинок залежно від швидкості, та кондуктометричний, заснований на оцінці провідності рідини, в яку потрапляють тверді частинки.

Питома поверхня оцінюється поверхнею всіх частинок, що складають одиницю маси, зазвичай це 1 г. За цим параметром порошки суттєво відрізняються від компактних матеріалів і можуть мати значення до 5 м² на 1 г. Площа поверхні вимірюється за допомогою оцінки кількості адсорбованого мономолекулярного шару азоту N₂, одна молекула якого займає 16,2 квадратних ангстрема (1 А = 10⁻⁷ мм).

Пікнометричну щільність порошку знаходять за формулою:

$$\gamma = \frac{P_2 - P_1}{V - \frac{P_3 - P_2}{\gamma_p}}$$

де V - тарировочна ємність рідинного пікнометра;

P_1 - маса сухого пікнометра;

P_2 - маса пікнометра з порошком;

P_3 - маса рідинного пікнометра з порошком;

γ_p - щільність рідини.

Як пікнометричну рідину дуже часто застосовують гас, який має малу молекулу й активну проникну здатність.

Для виміру щільності застосовують також, наприклад у Франції, і газові пікнометри.

Мікротвердість визначають за допомогою різного типу мікротвердомірів на мікрошліфах частинок, але готувати такі мікрошліфи, наносити на них, а потім і вимірювати відбитки вельми складно.

Технологічні властивості. Насамперед це насипна (відносна) щільність, під якою розуміють масу одиниці об'єму вільного насипного порошку в грамах на кубічний сантиметр (г/см³). Тобто фактично це концентрація порошку, щільність якого завжди менша за щільність компактного матеріалу. Насипка для такої оцінки повинна виконуватися

з нульовою швидкістю. Іноді оцінюють не щільність, а насипний об'єм у кубічних сантиметрах на грам ($\text{см}^3/\text{г}$).

Текучість — це здатність порошку витікати із отвору. Текучість вважається нормальною, якщо навіска (порція) порошку масою 50 г витікає з отвору діаметром 2,5 мм за 20 с.

Пресовність — це здатність порошку ущільнюватись під дією зовнішнього тиску.

Формовність — це здатність порошку зберігати форму після зняття навантаження.

ВИРОБНИЦТВО МАТЕРІАЛІВ ТА ВИРОБІВ З ПОРОШКІВ

При виробництві матеріалів, напівфабрикатів (брикетів) та виробів із металічних порошків або їхніх сумішей з неметалами у порошкову масу в деяких випадках додають різні технологічні наповнювачі, наприклад, розчин каучуку в бензині, парафін, віск, спирт, бензол та інші. Такі наповнювачі сприяють оптимізації процесів формування, пресування та прокатці порошкової маси.

На завершальній стадії технології порошкової металургії відбувається також процес спікання.

У рамках технології порошкової металургії коротко розглядаються основні процеси надання специфічному порошкоподібному матеріалу певної форми, розмірів, щільності та міцності, необхідних для подальших операцій виготовлення деталей.

Найбільше поширена технологія холодного пресування на пресах різних систем. Одностороннє пресування з одним пуансоном застосовують для виготовлення невисоких виробів простої конфігурації. При цьому щільність по перерізу деталі нерівномірна. Двостороннє пресування (з двома пуансонами, що рухаються назустріч одне одному) дає більш рівномірний розподіл щільності за перерізом виробів і дозволяє одержувати деталі з відношенням висоти до діаметру більшим двох. Тиск при холодному пресуванні знаходиться в межах 200...1000 МПа.

Вироби з більшим відношенням довжини до діаметра (прутки, труби, смуги) одержують методом мундштучного пресування. В цьому випадку матеріал, зазвичай, пластифікують парафіном. Швидкість витікання пластифікованого порошку досягає 10 мм/с. Щільність по перерізу деталі рівномірна. За цим способом можна виготовляти вироби не тільки простого, але й складного профілю.

Гідростатичне пресування застосовують для масивних виробів (до 100 кг). У цьому випадку металічний порошок вміщують в еластичну

(резинову, металічну) оболонку і піддають усесторонньому обтисковій рідиною в гідрокамерах високого тиску (до 3000 МПа). За цим методом можна одержувати вироби з непластичних матеріалів. За такого пресування деталі мають рівномірну щільність, але часто потребують додаткової механічної обробки.

Вельми перспективне застосування технології прокатки порошків. За цим методом одержують одно - та багат шарові пористі та компактні стрічки, смуги і листи завтовшки від 20 мкм до 3 мм із заліза, нікелю, нержавіючої сталі, титану та інших металів, а також із суміші порошків складних сполук. Швидкість прокатки металічних порошків завжди менша за швидкість прокатки литих металів. Величина її обмежується сипучістю порошку, тобто лінійна швидкість поверхні валків повинна бути меншою за швидкість переміщення порошку з бункера в зазор між валками.

Поряд з холодним застосовується також і гаряче пресування, тобто суміщення операцій пресування напівфабрикатів і їх спікання. Деталі, одержані гарячим пресуванням, мають високу міцність і щільність. За цим методом в основному виготовляють деталі типу тонких пластин та дисків твердих сплавів і спеціальних вогнетривких матеріалів. При температурах гарячого пресування $0,6...0,9 T_{пл}$ ефективно реалізується пластичність матеріалу. Нагрів же до таких температур часто виконують струмом високої частоти. Але тут виникає проблема для прес-форм, оскільки міцність графітових форм не перевищує 50 МПа.

Спікання, як самостійна операція, - це процес термообробки напівфабрикатів при температурі $0,4...0,9 T_{пл}$ основного металу багатоконпонентної суміші протягом 1...2 год. При спіканні відбуваються складні фізико-хімічні процеси (відновлення оксидів, адгезія, дифузія, рекристалізація і таке інше), які сприяють підвищенню щільності та міцності виробів, зніманню внутрішніх напруг тощо. В результаті спікання відбувається значна усадка матеріалу. В зв'язку з тим, що частинки порошку мають високу хімічну активність, операцію спікання часто проводять у вакуумі, захисній або відновлюваній атмосфері. Цю операцію можна інтенсифікувати за рахунок механічної, хімічної або фізичної активації процесу. Механічна активація відбувається при подрібненні порошку (чим дрібніші порошки, тим вони активніші). Хімічна активація відбувається, наприклад, при додаванні водню (або СО). Так, молібден спікають у зволоженому водні, що дозволяє знижувати температуру спікання, а це призводить до підвищення активності Мо. Стрибкоподібні зміни температури, зміна тиску, магнітне, лазерне та електронне опромінювання викликають фізичну активацію. Чим вище температура, тим активніше відбувається процес, але температуру можна підвищувати не завжди. Вплив часу подібен до впливу температури. Але процес спікання не повинен перевищувати

4...6 год, оскільки потім у матеріалі починаються процеси рекристалізації.

Нагрів при спіканні виконують не тільки струмами високої частоти, але й безпосередньо пропускаючи струм між контактами через штапик (заготовку, деталь). Для нагріву також використовують конвеєрні, рольгангові, муфельні та багато інших печей.

Розрізняють такі види спікання:

- твердофазні;
- рідкофазні;
- просочування.

При твердофазному температура спікання не перевищує $T_{пл}$ одного металу, або, якщо використовується суміш металів, температуру плавлення найбільш легкоплавкого. При рідко-фазному спіканні (за наявності рідкої фази) отримують щільніші вироби з пористістю 1...2 %. За такої технології поверхні твердої фази необхідно добре змочувати рідким металом. Просочування спресованого та спеченого каркасу з тугоплавкого металу здійснюється легкоплавким металом.

Після спікання для одержання кінцевої форми, розмірів і потрібних властивостей вироби з порошкових матеріалів іноді піддають додатковій обробці (різанню, допресовці, термо- і хіміко-термічній обробці тощо).

ПРОДУКЦІЯ ПОРОШКОВОЇ МЕТАЛУРГІЇ

Залежно від призначення продукцію порошкової металургії (матеріали та вироби з них) підрозділяють на:

- антифрикційні;
- фрикційні;
- конструкційні;
- фільтраційні;
- електротехнічні;
- твердосплавні.

Антифрикційні матеріали мають стабільний і малий коефіцієнт тертя (0,04...0,06). Пористість таких матеріалів становить від 15 до 35%. Пори заповнюються маслом, тефлоном або фторопластом. Частіш за все як основу використовують бронзовий або залізний порошок з добавками графіту та інших матеріалів. Бронзографіт за мікроструктурою являє собою зерна твердого розчину олова в міді з вкрапленнями графіту і пор, заповнених мастилом. Структура залізографіту може бути феритна, перлітна та цементитна. В залізографітах з міддю (Cu) або свинцем (Pb) графіту, звичайно, від I

до 7 %, Cu або Pb від 5 до 7 %, решту становить залізо. Пори, заповнені машинним маслом, у такому матеріалі займають до 20 % об'єму. Після просочування маслом у процесі виготовлення виробів проводять, як правило, калібрування, що зменшує поровий канал.

Антифрикційні матеріали використовують для виготовлення підшипникових втулок, вкладишів, які застосовуються в різноманітних галузях промисловості (автомобільній, верстатобудівній, авіаційній тощо). Такі матеріали можуть працювати при швидкостях тертя від 6 до 30 м/с. Підшипники, в матеріалі яких пори насичені фторопластом, можуть працювати в кислих і лужних середовищах при температурах до 280 °С. Підшипники газових та парових турбін, які працюють за ще більш високих температур, виготовляють з антифрикційних матеріалів, до складу яких входять порошки хромонікелевих сталей з домішками дисульфиду молібдену.

У фрикційних матеріалах максимальний коефіцієнт тертя стабільний у всьому діапазоні експлуатаційних температур. Фрикційні матеріали з порошків при роботі у маслі мають коефіцієнт тертя від 0,08 до 0,15, а при сухому терті — від 0,3 до 0,7. Пористість таких матеріалів коливається від 10 до 15 %. Основу фрикційних матеріалів становлять складні за хімічним складом композиції міді або заліза з іншими матеріалами. До складу фрикційних матеріалів входять компоненти, що являють собою мастило і запобігають зносу матеріалу (свинець, графіт, різноманітні сульфіді та сірчаноокислі солі), та компоненти, які надають матеріалу високих фрикційних властивостей (азбест, кварцовий пісок, різні оксиди та тугоплавкі з'єднання). Матеріали, одержані за допомогою порошкової металургії, можуть працювати при швидкостях тертя до 50 м/с і напруженнях до 450 МПа, тоді як традиційні матеріали працюють лише за напружень до 50...60 МПа.

Фрикційні матеріали застосовують в літако-, автомобіле- та екскаваторобудуванні, у гальмівних вузлах і вузлах зчеплення. Особливі вимоги пред'являють до відповідних деталей в літакобудуванні. У літаках у момент посадки на вузлах, які піддаються тертю, температура досягає 1100 °С, тому там часто використовують спечені фрикційні металокерамічні матеріали. Енергія тертя знижується за рахунок тепловідводу і високої змащованості, а тертя створюють неметали типу азбесту та кремнезему. Вельми ефективна для цього металокераміка типу МКВ-50, до складу якої входить від 8 до 10 % С (у вигляді графіту), 4 % ВС (карбід бору), 4 % SiO₂ (кремнезему) та інші добавки.

На цей час до 60 % продукції порошкової металургії становлять конструкційні матеріали, основу яких складає, як правило, залізний порошок з добавками графіту, міді та інших компонентів. Пористість таких матеріалів знаходиться в межах 5...13 %. З них виготовляють кулачки, храповики, шарові вставки, корпуси підшипників, зірочки розподільчих валів, деталі обчислювальної техніки (шестерні, привід

принтерів тощо). Особливо активно ці матеріали використовуються в автомобілебудуванні. У США при виготовленні одного серійного автомобіля середнього класу витрачається до 16 кг порошкоподібного матеріалу, з якого роблять гайки, фланці, з'єднання поршневих груп. При виготовленні ненавантажених та малонавантажених деталей застосовують подвійне пресування, а для високонавантажуваних деталей - динамічне.

Фільтруючі матеріали (фільтри) можна виготовляти з будь-яких порошкових матеріалів. Часто використовують порошки нікелю, срібла, титану, бронзи, нержавіючих сталей та інші матеріали. При спіканні таких порошків (з наповнювачем або при вільній засипці) поровий канал не повинен закриватися, а пористість кінцевого продукту має бути не нижча за 25...50 %.

Фільтри з порошкових матеріалів широко використовують в промисловості для фільтрації палива, різних мастил і смол, очистки газів та повітря від пилу, фільтрації розплавлених низькоплавких металів, кислот, лугів та інших продуктів хімічної промисловості. В особливих випадках використовують двошарові фільтри (внутрішня частина яких із мілких частинок порошку, а зовнішня - з більш крупних). Спеціальні фільтри можуть затримувати частинки розміром від 0,5 мкм і працювати в діапазоні температур від надзвичайно низьких (- 273°C) до вельми високих (700...900°C).

Переваги порошкових фільтрів порівняно з традиційними (тканинними, повстяними, картонними та іншими) у тому, що вони міцніші і після забруднення їх можна піддавати регенерації.

До електротехнічних матеріалів відносять електроконтактні та магнітні. Електроконтактні повинні мати низький контактний та перехідний опір, але високу міцність і твердість, тобто це можуть бути композити типу Cu - W та подібні до них. При замиканні таких контактів і виникненні дуги оксид кадмію або мідь випаровується і робить дугу такою, що проводить, внаслідок чого вона загасає. Для цього слід використовувати металокерамічні контакти типу А10М або А30. Застосовують їх для розривних та ковзаючих контактів, а також у динамо-машинах. Спечені розривні контакти забезпечують до 3 млн вмикань.

Магнітні матеріали вельми чутливі до наявності в них домішок, і в зв'язку з цим дія пористості негативна. Магнітом'які матеріали (з малою коерцитивною силою) готують з чистого залізного порошку або порошків на основі оксиду заліза, вони швидко намагнічуються і розмагнічуються. Магнітотверді матеріали (постійні магніти з високою коерцитивною силою) одержують із сумішей порошків Fe — Ni, Fe — Al та інших. На цей час створено такі магнітотверді матеріали, 1 г власної ваги яких може утримувати більше 1 кг навантаження.

З феритних порошків (оксидні з'єднання типу Fe_2O_3 — MeO) у композиції з 5...15 % ізоляційних матеріалів (фенольні смоли, силікати, каучук та інші) шляхом пресування і спікання одержують також магнітодіелектрики.

Твердосплавні інструментальні матеріали, які виготовляють з дисперсних порошків карбідів вольфраму, титану, танталу (WC , TiC , TaC) з добавками порошку кобальту (Co), а також мінералокерамічні матеріали на основі порошку оксиду алюмінію (Al_2O_3).

Тверді металокерамічні сплави мають високу твердість, стійкість проти спрацювання, міцність, теплостійкість близько 900...1000°C. Використовують їх для високопродуктивної обробки зі швидкістю різання до 800 м/хв. Тверді сплави виготовляють спіканням при 1500...1900 °C з дисперсних порошків карбідів (WC , TiC , TaC) і порошку кобальту. Тверді сплави поділяють на три групи: вольфрамові (ВК), титановольфрамові (ТК) і титанотанталовольфрамові (ТТК). Додаткові літери В і М у кінці марки сплаву вказують на дисперсність вихідного порошку відповідно 3...5 і 0,5— 1,5 мкм. Зі сплавів групи ВК виготовляють інструменти для обробки чавунів, кольорових металів і пластмас; групи ТК — для обробки сталей та інших в'язких матеріалів, зі сплавів групи ТТК — для чорнової обробки сталей. Для цього використовують і значно дешевші без-вольфрамові тверді сплави (БТТС) на основі карбідів і карбідо-нітридів титану з нікель-молібденовою зв'язуючою фазою.

Мінералокерамічні матеріали забезпечують інструменту ще більші різальні властивості, високу теплостійкість і швидкість різання. Основою мінералокерамічних матеріалів є порошок оксиду алюмінію Al_2O_3 , з якого шляхом пресування і наступного спікання виготовляють пластини потрібних розмірів і форми. Пластини ці закріплюють на держаках різального інструмента. Мінералокераміку використовують для чистової швидкісної обробки за умов відсутності ударних і згинаючих напружень. Добрі показники має мінералокераміка марки ЦМ-332.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому сутність порошкової металургії?
2. Які науково-технічні завдання вирішує порошкова металургія?
3. Які технологічні методи виробництва порошків відносять до групи механічних?
4. Які технологічні методи виробництва порошків відносять до групи фізико-хімічних?
5. На які три групи підрозділяють властивості порошків, чим вони характеризуються і як оцінюються?
6. Які технологічні процеси здійснюються під час виробництва матеріалів та виробів з порошків?
7. Як класифікується продукція порошкової металургії?
8. Які матеріали порошкової металургії відносять до антифрикційних, а які до фрикційних?
9. Які матеріали порошкової металургії відносять до фільтруючих?
10. Які властивості мають мати матеріали порошкової металургії, що відносяться до електротехнічних (електроконтактні та магнітні)?

ЛІТЕРАТУРА

1. Сологуб М. А., Рожнецький І. О., Нікоз О. І. та ін. Технологія конструкційних матеріалів. — Київ: Вища школа, 2002.
2. Терехов В. К. Металловедение и конструкционные материалы.- М.: Высшая школа, 1981.
3. Кузьмин Б. А., Абраменко Ю.Е., Ефремов В. К. и ф. Технология металлов и конструкционные материалы. — М.: Машиностроение, 1991.
4. Кондратюк С. Є., Кіндрачук М. В., Степаненко В. О., Москаленко Ю.Н. Матеріалознавство та обробка металів. - Київ: Вікторія, 2000.
5. Дальский А. М., Дубинин Н. П., Макаров Э. П., Попов Е. Л. Технология конструкционных материалов. - М.: Машиностроение, 1985.
6. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение.- М: Машиностроение, 1990.
7. Алаи С. И., Григорьев П. М., Ростовцев А. Н. Технология конструкционных материалов. — М.: Просвещение, 1980.
8. Кузьмин Б. А., Самохоцкий А. И. Металлургия, материаловедение и конструкционные материалы. — М.: Высшая школа, 1984.