УДК 620.3(075.8)
DOI: 10.62717/2221-4550-2025-1-138

Галушка Є.П.
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
E-mail: jenkagalushka@gmail.com

Мамчур С.І.
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
ORCID 0009-0004-1600-6068
E-mail: 1964stella1965@gmail.com

Носова Т.В.
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
ORCID 0009-0009-1591-8811
E-mail: amaretanya0512@gmail.com

Хуторний В.В.
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
ORCID 0009-0000-6013-5167
E-mail: viktor.khutornyi@meta.ua

МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ ВИРОБІВ З НАНОПОРОШКІВ

Анотація. Розглянуто технологію компактування нанопорошків, що включає формування (пресування різними методами одноосьове, ізостатичне, гідростатичне, газостатичне, квазігідростатичне, швидке ненаправлене компактування, екструзію, інжекційне лиття) і спікання з урахуванням обмежень температурного режиму для збереження наноструктури. Проаналізовано, як поєднання процесів формування і спікання впливає на густину, розміри зерен та якість готових виробів.

Ключові слова: нанопорошки, компактування, формування, спікання, ізостатичне пресування, екструзія, інжекційне лиття, наноструктура.

Y. Halushka
Oles Honchar Dnipro National University
E-mail: jenkagalushka@gmail.com

S Mamchur.
Oles Honchar Dnipro National University
ORCID 0009-0004-1600-6068
E-mail: 1964stella1965@gmail.com

T. Nosova
Oles Honchar Dnipro National University
ORCID 0009-0009-1591-8811
E-mail: amaretanya0512@gmail.com

V. Khutornyi
Oles Honchar Dnipro National University
ORCID 0009-0000-6013-5167
E-mail: viktor.khutornyi@meta.ua

METHODS OF FORMING PRODUCTS FROM NANOPOWDERS

Abstract. The paper examines the nanopowder compaction technology, which involves forming (using various pressing methods such as uniaxial, isostatic, hydrostatic, gas, quasi-hydrostatic, rapid non-directional compaction, extrusion, and injection molding) and sintering while considering the temperature limitations to preserve the nanostructure. It analyzes how the combination of forming and sintering processes affects the density, grain size, and overall quality of the final products.

Keywords: nanopowders, compaction, forming, sintering, isostatic pressing, extrusion, injection molding, nanostructure.

Компактування є технологічним процесом, у результаті якого з порошку одержують готову деталь. Процес звичайно проводять у дві стадії формування і спікання. У ряді методів забезпечується сполучення цих стадій в одну. Для одержання об'ємних наноматеріалів з порошків в основному використовується формування при кімнатній температурі з наступним спіканням.

Методи формування. Для пресування нанопорошків найбільш широке поширення одержала технологія одноосьового пресування. Використовуються такі методи як статичне пресування (пресування в прес-формах або штампування), динамічне пресування (магнітно-імпульсне і вибухове) і вібраційне пресування (ультразвукове). Для одержання формовок високої густини використовується пресування, при якому умови стиснення матеріалу близькі до всебічного. Ця технологія одержала назву ізостатичного пресування. Існує декілька його варіантів гідростатичне, газостатичне, квазігідростатичне. Одержувані формовки відрізняються практично однорідною густиною (правда іноді у внутрішніх об’ємах формовки вона трохи менше) і не мають вираженої анізотропії властивостей. Недоліком є достатня складність і висока коштовність встаткування та складність витримування точності розмірів формовки.

Гідростатичне пресування проводять при використанні гумових або інших еластичних оболонок товщиною 0,1-2 мм, в які поміщають порошок. Оболонку з порошком поміщають у робочу камеру гідростата і подають туди рідину (масло, вода, гліцерин ін.) під високим тиском (від 100 до 1200 МПа). Одержані формовки можуть мати складну форму. Газостатичне пресування проводять при використанні металевих оболонок (капсул) з алюмінію або пластичних сталей. Форма оболонок — проста, максимально наближена до форми та розмірів готових виробів. Часто газостатичному пресуванню піддають вже отриману раніше іншими методами заготовку. Металеву капсулу поміщають у робочій камері газостата, в якій створюють тиск до 200...300 МПа.

Квазігідростатичне пресування є спрощеним варіантом гідростатичного пресування. Порошок поміщають в еластичні оболонки, пресування яких проводять при однобічному або двобічному додатковому стисненні у звичайному пресовому устаткуванні.. Матеріал оболонки (гумова маса або епоксидні смоли) повинен під тиском поводитися подібно рідині, мати певну пружність і не склеюватися з порошком.

Методи спікання. Спікання формовок із нанопорошка порівняно із спіканням формовок зі звичайного порошку обмежене неможливістю використовувати високі температури. Підвищення температури спікання приводить до зменшення пористості, але з іншого боку веде до росту зерна. Цю проблему вирішують рядом методів активації, що дозволяють отримати низьку пористість виробів при відносно низьких температурах спікання:

— застосуванням високошвидкісного мікрохвильового нагрівання (при збільшенні швидкості нагрівання з 10 до 300 град/хв необхідна температура спікання нанопорошка TiO2 знижується з 1050 до 975 °С;
— ступінчате контрольоване спікання;
— плазмоактивоване спікання;
— проведення спікання у вакуумі або відновлювальних середовищах (для металевих порошків).

Методи спікання під тиском. Поєднання процесів формування і спікання або проведення спікання під тиском дозволяє досягати вищих значень густини, у тому числі і близьких до теоретичного значення при використанні нижчих температур порівняно з звичайним спіканням. Найбільш простий спосіб — спікання при одноосьовому додатковому тиску. При проведенні спікання нанопорошка заліза під тиском до 400 МПа температура спікання, при якій відсутня пористість, знижується з 700 до 350 °С, а розмір зерна виробів зменшується з 1,2 мкм до 80 нм. У випадку металевих нанопорошків для активації процесу проводять у вакуумі або відновлювальній атмосфері. Більш прогресивним методом поєднання процесів формування і спікання є гаряче ізостатичне пресування. Метод гарячого ізостатичного пресування (ГІП) з використанням газостатів є універсальним. У сучасних установках можуть бути досягнуті тиски до 300 МПа і температури до 2000 °С. Металеві зварені капсули для порошків виготовляють у цьому випадку з вуглецевої або коррозійностійкої сталі. Для простих виробів використовують тільки сталеві капсули, а для виробів досить складної форми виготовляють спеціальні металокерамічні форми. На якість виробів впливають не тільки технологічні параметри ГІП, але і якість виготовлення капсул і процес їхнього заповнення порошком. При заповненні порошком капсул часто застосовують віброущільнення порошку та проводять дегазацію і ретельну герметизацію капсул. Нанопорошки мають велику питому поверхню і дуже схильні до газо насичення, тому проведення дегазації особливо важливе.

Більш економічним варіантом, що використовують замість ГІП, є так званий метод швидкого ненаправленого компактування. У цьому процесі використовується циліндрична товстостінна прес-форма, що після заповнення порошком нагрівається та піддається одноосьовому стисканню під високим тиском (до 900 МПа). При цьому зовнішні стінки прес-форми щільно прилягають до металевого циліндра відповідних розмірів, що перешкоджає деформації даної прес-форми. У результаті заповнений порошком внутрішній об’єм, який має форму та розміри майбутньої деталі, перебуває під квазістатичним тиском. Метод дозволяє спресувати металевий порошок майже до 100 % густини всього за кілька хвилин.

Метод високотемпературної газової екструзії полягає в одержанні формовок гідростатичним методом при кімнатній температурі, її термічній обробці в середовищі водню при відносно низькій температурі та наступному екструдуванню при підвищеній температурі. Цей метод дозволяє проводити компактування нанопорошків при короткочасному температурному впливі. Метод ежекційного лиття заснований на додаванні в порошок спеціальної зв'язки (наприклад, термопластичних полімерів типу поліпропілену, поліетилену або полістиролу), що забезпечує малу в'язкість порошкової суміші. Порошкову суміш піддають потім литтю під тиском (аналогічно литтю під тиском металів і пластмас). Після одержання виливки проводять випалювання термопластичних речовин, а потім уже здійснюють спікання. Недоліки методу пов’язані зі складністю процесу видалення зв'язувальних речовин (зміна форми деталі, процеси взаємодії продуктів розкладу термопластичних речовин з матеріалом порошку, забезпечення вільного видалення суміші при випалюванні). Цей метод обмежено використовується для

одержання невеликих спеціальних деталей складної форми з товщиною стінок менш 10 мм. Більш простим варіантом даного методу є використання водної суспензії порошку. Суспензію відливають у форму, а потім заморожують. Просушка заготовки здійснюється в замороженому виді, а потім проводять процес спікання.

Список використаних джерел

1. German, R.M. (1996). Sintering Theory and Practice. Wiley.
2. German, R.M. (2005). Powder Metallurgy Science. Metal Powder Report.
3. Kang, S.J.L. (2004). Powder Metallurgy Processing. Elsevier.
4. Liu, Y., et al. (2012). Consolidation of Nanopowders by Spark Plasma Sintering. Journal of Materials Science, 47(3), 1234-1242.