

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут"

Кафедра "Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології  
обробки тиском "

**Навчально-методичні матеріали до самостійної роботи**  
з дисципліни "Сучасні технології в прикладній механіці"  
для студентів освітньої програми  
«Прикладна механіка»  
денної і заочної форми навчання

Харків - 2021

## ЗМІСТ

1 Отримання металів з нано- і субмікроструктурою та їхні властивості .....	3
2 Методи отримання об'ємних субмікро- та нанокристалічних металів ..	3
3 Порошкова металургія наноматеріалів .....	4
4 Список джерел інформації.....	11

## **1 Отримання металів з нано- і субмікроструктурною структурою та їхні властивості**

На сьогодні особливу увагу привертають питання розробки нових матеріалів. Одним з найбільш перспективних наукових напрямів у галузі створення нових матеріалів з унікальними властивостями є розробка спеціальних технологій отримання матеріалів із субмікроструктурною та нанокристалічною структурою. Для формування в матеріалах нано- та субмікроструктурної структури використовують різні методи: кристалізація з розплаву, газова конденсація з подальшим компактуванням, кульове розмелювання з подальшою консолідацією, електроосадження та інтенсивна пластична деформація.

Відмінність традиційного (вихідного) стану металу і цього ж металу після інтенсивної пластичної деформації полягає в появі дрібнодисперсної структури. Структура, отримана методом інтенсивної пластичної деформації, має специфіку, яка характеризується високою концентрацією дефектів (точкових і лінійних) у границях зерен і поблизу них. Нано- та субмікроструктурні метали як термодинамічна система знаходяться в нерівноважному стані, порівняно з традиційними крупнокристалічними металами.

Процес виготовлення виробів з високими фізико-механічними і експлуатаційними властивостями з металів із субмікро- та нанокристалічною структурою потребує вивчення залежностей властивостей металів від їх структури і чинників, що на них впливають.

## **2 Методи отримання об'ємних субмікро- та нанокристалічних металів**

Посилений інтерес до полікристалічних металевих матеріалів викликаний їхніми особливими властивостями зі зменшенням розміру зерен у матеріалі до 1–10 мкм (мікроструктурні (МК) матеріали) або ще менше – до 10–100 нм

(нанокристалічні (ПК) матеріали). Проміжними є субмікростристалічні (СМК) матеріали з розміром кристалітів 0,1–1 мкм [1, 2].

До нанокристалічних належать матеріали, у яких розмір окремих кристалітів або фаз, що складають структурну основу, не перевищує 100 нм хоча б в одному напрямку [2]. Проте останнім часом існує тенденція вважати наноматеріалами системи, нові функції яких залежать від наноефектів їх компонентів. Нижня межа діапазону зумовлена критичним розміром нанокристалічного матеріалу як структурного елемента, що має упорядковану будову, тобто кристалічну решітку. А верхня межа діапазону зумовлена тим, що істотні зміни властивостей матеріалів починаються в наноструктурних елементах з розміром приблизно від 100 нм. Ця межа досить умовна.

На сьогодні розроблені різні ефективні методи отримання матеріалів з ультрадрібними зернами, як для дослідів, так і для промисловості [1–4].

### **3 Порошкова металургія наноматеріалів**

Одним з важливих чинників, які впливають на економічну доцільність вибору матеріалів, є врахування витрат на виготовлення деталей (врахування витрат матеріалу у стружку та вартості обробки). Прикладами вдалого вибору економічнішого способу виготовлення деталей у багатьох випадках є використання безвідходних технологій, наприклад, штампування замість різання і пресування деталей з порошкових матеріалів.

Для отримання наноматеріалів конструкційного призначення використовують різні методи, які можна поділити на чотири групи (табл. 1):

- порошкова металургія (компактування нанопорошків);
- кристалізація з аморфного стану;
- інтенсивна пластична деформація;
- різні методи нанесення наноструктурних покриттів.

Розмір зерен, морфологія і текстура можуть змінюватися залежно від технологічних параметрів процесу одержання наноматеріалів. Зі зменшенням розміру зерен об'ємна частина кордонів розділення меж зернами та потрійними

стиками значно збільшується, вони значно впливають на властивості наноматеріалів.

Таблиця 1 – Методи отримання нанокристалічних матеріалів конструкційного призначення

Метод	Способи	Матеріали
Компактування нанопорошків	Пресування та спікання. Спікання під тиском	Металеві матеріали, кераміка, кермети, композиційні матеріали, полімери
Кристалізація аморфних сплавів	Кристалізація аморфних сплавів. Консолідація аморфних порошків з подальшою кристалізацією	Аморфізувальні металеві матеріали
Інтенсивна пластична деформація	Рівноканальне кутове пресування. Деформація крученням з високими тисками. Усебічне кування	Металеві матеріали
Методи нанесення наноструктурних покриттів	Електролітичне осадження, хімічне та фізичне осадження з газової фази та ін.	Металеві матеріали, кераміка, композиційні матеріали

Об'ємна частина потрійних стиків значно збільшується, якщо розмір зерен менший за 10 нм. Особливості структури нанокристалічних матеріалів (розмір зерен, частина меж розділення та їхній стан, пористість і інші дефекти структури) визначаються методами отримання та істотно впливають на їхні властивості. Зі зменшенням розміру зерна підвищується міцність, у тому числі зі збереженням пластичності, виявляється ефект низькотемпературної та високошвидкісної надпластичності [3]. Методи порошкової металургії широко використовують для одержання нанопорошків і об'ємних наноматеріалів. Для цього використовують нанопорошки з розміром частинок, меншим за 100 нм, крупнозернисті порошки з нанокристалічною структурою, отримані методом

механічного легування, або аморфні порошки, які піддають контрольованій кристалізації у процесі консолідації.

На сьогодні розроблені різні методи одержання нанопорошків.

Загальним принципом отримання нанопорошків є поєднання високої швидкості утворення центрів формування частинок з малою швидкістю їх росту. Технічні та конструкційні рішення щодо створення необхідних для цього умов можуть бути різними. Розподіл частинок за розміром, їхня структура і властивості значною мірою визначаються умовами формування частинок і, отже, залежать від методів їх отримання. Основні вимоги до методів отримання нанопорошків полягають у можливості контролю і управління параметрами процесу, вузькому розподілі частинок за розмірами, відтворення, отримання порошків контрольованої дисперсності, хімічного та фазового складу.

Будь-який один метод не може бути застосований для отримання всіх класів нанопорошків. Наприклад, для отримання нанопорошків тугоплавких матеріалів кращий плазмохімічний метод, а для отримання нанопорошків чистих металів – метод випаровування – конденсації.

Висока вартість отримання нанопорошків, а, отже, і матеріалів на їх основі є головним стримувальним чинником широкого застосування їх у промисловості. Тому для більш широкого застосування нанопорошків необхідно розробляти методи з відносно низькою собівартістю їх виробництва [5].

Різноманіття методів консолідації, що використовуються в порошковій металургії, забезпечує досить широкі технологічні можливості для одержання високощільних і пористих матеріалів. На ущільнення дисперсних порошків значно впливають такі параметри, як середній розмір частинок, вміст домішок, стан поверхні, форма частинок і спосіб пресування. Для пресування нанопорошків досить поширене зональне пресування: статичне (прес-форми, штампування), динамічне (магнітно-імпульсне, вибухове) і вібраційне (ультразвукове) пресування [6–9]. Для одержання високощільних однорідних матеріалів використовують усебічне (ізостатичне) пресування: гідростатичне,

газостатичне, квазігідростатичне (у спеціальних прес-формах під високим тиском) [10, 11].

Для отримання об'ємних наноматеріалів з порошків переважно використовують методи пресування за кімнатної температури з можливим подальшим спіканням і спікання під тиском. Зі зменшенням розміру частинок тиск пресування, необхідний для досягнення заданої щільності компактів, збільшується. Із розміром зерна, меншим за деяке критичне значення, частинки є бездислокаційними, відповідно, значно підвищується тиск, необхідний для їх деформування. Наприклад, діаметр бездислокаційних частинок заліза та нікелю дорівнює, відповідно, 23 і 140 нм [12].

Із застосуванням квазігідростатичного пресування збільшується щільність кування, порівняно з одновісним пресуванням. З підвищенням тиску квазігідростатичного пресування від 1 до 10 ГПа відносна щільність компактів заліза збільшується приблизно в 1,5 раза [10]. Для нікелевих порошків з тиском пресування 1 ГПа застосування квазігідростатичного пресування дозволяє збільшити щільність кування приблизно в 1,2 раза [11]. Методом магнітно-імпульсного пресування досягають великої щільності компактів, порівняно зі статичним пресуванням [6]. Ультразвукове компактування дозволяє збільшити рівномірність густини пресування [7]. Перспективним видається компактування методами інтенсивної деформації. Компактування порошків міді із середнім розміром частинок 28 нм, отриманих механічним помелом у кульовому млині, крученням під високим тиском, отримують зразки діаметром 20 мм і товщиною 0,5 мм, що мають розмір зерна 75 нм з пористістю 2 % [13].

Зі зменшенням розміру частинок температура спікання порошків значно знижується. Спікання нанопорошків без тиску за порівняно низької температури не дозволяє отримати матеріал з малим розміром зерна без пор. За високої температури щільність зразків збільшується, але збільшується розмір зерна. Проблему деякою мірою можна розв'язати унаслідок мікрохвильового нагрівання з великою швидкістю, що збільшує усадку під час спікання порошків, наприклад, на основі оксиду алюмінію, і зменшити розмір зерна

спечених компактів з діоксиду титану [14]. Перспективним є метод контрольованого спікання, що дозволяє отримати наноструктуру за відсутності пор. У разі контрольованого ізотермічного спікання відсутність пористості пресувань з оксиду ітрію досягається зі зростанням зерна до 400 нм. Контрольоване двоступеневе спікання з перегріванням до 1250–1310 °С і подальшим спіканням за 1150 °С дозволяє досягти розміру зерна близько 100 нм за відсутності пористості в цих пресуваннях [15, 16].

Про переваги програми тиску під час ущільнення порошків відомо з винаходом технології гарячого одновісного пресування. Розробка методів гарячого ізостатичного пресування (ГП) і гарячої екструзії сприяла виробництву порошкових матеріалів і виробів з унікальними властивостями. Ці процеси, що дозволяють отримувати безпористі мікроструктури за мінімальної температури з мінімальними добавками активаторів спікання, добре описані в літературі. Безліч технологій псевдо- ГП або ізостатичного кування, які характеризуються використанням негазового середовища, що передає тиск від пуансона на заготовку. Незалежно від консолідованого матеріалу, методи консолідації можна класифікувати за потужністю, тривалістю і видом напруженого стану, які обумовлені способом прикладання тиску. Швидке всебічне компактування – процес квазі-ізостатичної консолідації, що використовується для ущільнення порошків. Метод передбачає використання кувального преса і закритої прес-форми для прикладання тиску до попередньо нагрітої конструкції, яку називають рідкою матрицею [17].

У табл. 2 наведено п'ять різних процесів. Характеристики процесу швидкого всебічного компактування (ШВК) або ізостатичного кування швидким усебічним компактуванням займають середнє положення серед інших процесів.

Процеси ізостатичного кування можна поділити на такі:

- 1) вид середовища, що передає тиск, і вид напруженого стану;
- 2) спосіб нагрівання, завантаження, середовище і вигляд виробів;
- 3) метод додатка тиску на середовище;



4) метод передачі тиску від середовища до виробу.

Таблиця 2 – Порівняння методів спікання порошків під тиском

Процес	Сила тиску, ГПа	Тривалість тиску, с	Спрямованість тиску
Гаряче пресування	0,01–0,03	$10^3 - 10^4$	Одновісне
ГП	0,1–0,3	$10^3 - 10^4$	Ізостатичне
Гаряча екструзія	0,1–1,0	$10^2 - 10^4$	Складне
ШВК	0,1–1,0	$10 - 10^2$	Ізостатичне
Вибух	10–100	$\sim 10^{-6}$	Складне

Процес ГП характеризується необхідністю застосування складної апаратури. Характерною особливістю ізостатичного кування є застосування кувального преса, пуансона та прес-форми із середовищем, що передає тиск. Як середовище, що передає тиск, використовували скло, метал і солі. Під дією температури пресування передавальне середовище розм'якшувалося, набувало пластичності або в'язко-пластичності і за малої швидкості деформування дозволяло створювати майже ізостатичний тиск. Після того, як процес ущільнення закінчувався, передавальне середовище видалялося механічно, хімічним розчиненням або виплавленням.

Як передавальне середовище доцільно використовувати суміш скляної крихти з вогнетривким литим керамічним порошком. Ця суміш скляних частинок, диспергованих у безперервній керамічній матриці, має тиксотропну дію за температури спікання. Зміна властивостей використовуваного середовища під тиском є основним чинником у процесі ШВК.

Найбільш перспективним способом одержання об'ємних наноматеріалів є спікання нанопорошків під тиском. Для отримання металевих наноматеріалів попередньо пресують заготовку з незначною щільністю (30–40 %), потім її нагрівають до температури відновлення оксидів з витримкою до повного їх відновлення і прикладають тиск пресування, необхідний для досягнення щільності, близької до теоретичної [18]. Наприклад, зі збільшенням тиску пресування нанопорошків заліза до 400 МПа температура спікання, за якої відсутня пористість, зменшується від 700 до 350 °С, розмір зерна спечених

компактів при цьому зменшується від 1,2 мкм до 80 нм, тобто більше, ніж на порядок [19].

Для отримання масивних рівнощільних компактів з гомогенною зерною структурою застосовують методи гарячого ізостатичного пресування і газової екструзії (ГЕ). Використовуючи метод ГП, слід ураховувати, що велика питома поверхня нанопорошків призводить до їх значної газової насиченості. Тому перед компактуванням порошки необхідно дегазувати [20–22].

Метод ГЕ полягає в отриманні пресуванням гідростатичним тиском за кімнатної температури, з попередньою термічною обробкою в середовищі водню за низької температури і екструдюванням за підвищеної температури, що дозволяє компактувати порошки у разі короткочасного температурного впливу та досить великих тисків. Розвиваються також методи плазмоактивованого спікання під тиском [23].

## Список джерел інформації

1. Воробьева Г. А. О структурных превращениях в металлах и сплавах под воздействием импульсной обработки / Г. А. Воробьева, А. Н. Иводитов, А. М. Сизов // Изв. АН СССР. Металлы. – 1991. – № 6. С. 131–137.
2. Дураченко А. М. Влияние импульсной обработки на релаксационные спектры аморфных сплавов на основе железа и никеля / А. М. Дураченко, Е. Я. Малиночка // Изв. АН СССР. Металлы. – 1985. – № 6. – с. 167–170.
3. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом / А. А. Дерибас. – Новосибирск : «Наука», 1972. – с. 190.
4. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А. Я. Багаутдинов, Е. А. Будовских, Ю. Ф. Иванов, В. Е. Громов – Новокузнецк : СибГИУ, 2007. – 301 с.
5. Высокоскоростная деформация металлов / В. И. Беляев, В. Н. Ковалевский, Г. В. Смирнов, В. А. Чекан. – Минск : Наука и техника, 1976. – 224 с.
6. Дидык Р. П. Теория и практика взрывной обработки материалов / Р. П. Дидык // Науковий вісник. – № 3. Днепропетровск. – 1999. С. 56–60.
7. Селиванов В. В. Взрывные технологии : учебник для вузов / под общей ред. В. В. Селиванова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 648 с.
8. Zukas E. G. Shock-wave strengthening // *Metalls Eng. Quart.* 1966. – 6, N 2. – P. 1–20.
9. Драгобецький В. В. Особливості оптимізації технології виробництва листових заготовок / В. В. Драгобецький, О. В. Пирогов. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. Вип. 9 – Луцьк, 2001. – стор. 146–161.
10. Импульсная обработка металлов давлением : сб. статей под. Ред. В. К. Борисевича. – М. : Машиностроение, 1977. – 144 с.
11. Рябов В. Р. Применение биметаллических армированных сталеалюминиевых соединений / В. Р. Рябов – М. : Металлургия, 1975. – 288 с.
12. Обработка металлов взрывом / А. В. Крупин, В. Я. Соловьев, Г. С. Попов, М. Р. Костев. – М. : Металлургия, 1991. – 495 с.

13. Прюммер Р. Обработка порошковых материалов взрывом / Р. Прюммер – М. : Мир, 1990. – 128 с.
14. Розен В. В. Цель – оптимальность – решение (математические модели принятия оптимальных решения) / В. В. Розен – М. : Радио и связь. 1982. – 168 с.
15. Ерохина Л. С. Методы прогнозирования развития конструкционных материалов / Л. С. Ерохина, К. В. Калугина, С. К. Михайлов – Л. : Машиностроение. Ленинградское отд-ние, 1980. – 256 с.
16. Упрочнение деталей лучом лазера / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головкин, Г. В. Меркулов, А. И. Стрижак ; под общ. ред. В. С. Коваленко – К. : Техніка. 1981. – 131 с.
17. Физика взрыва / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович и др. ; под ред. К. П. Станюковича. 2-е изд., перераб. – М. : Наука, 1975. – 704 с.
18. Захаренко И. Д. Сварка металлов взрывом / И. Д. Захаренко – Минск : Наука і техника, 1990. – 205 с.
19. Пат. 54717. Україна, МКІІ 7В23Р9(00) В. В. Драгобецкий, А. Д. Коноваленко (Украина). Спосіб зміцнення вибухом. – № 20002021149; Заявлено 12.02.02; Опубл. 17.03.03, Бюл. № 3. – 2 с. Ил.
20. Численное исследование закалки состояния вещества в волне СВЧ при протекании двухстадийной реакции / Б. М. Хусид, Б. Б. Хипа, Ву Зуй Куан, Е. А. Баштовая // Физика горения и взрыва. – 1992, № 4. – с. 76–82.
21. Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский ; под ред. В. М. Кудинова. – М. : Машиностроение, 1987. – 216 с.
22. Плакирование стали взрывом / А. С. Гельман, А. Т. Чудновский, Б. Д. Цемахович, Л. Х. Харина ; под ред. д-ра техн. наук. А. С. Гельмана. – М. : Машиностроение, 1978. – 191 с.
23. Степанов В. Г. Высокоэнергетические импульсные методы обработки металлов / В. Г. Степанов, И. А. Шавров – Л. : Машиностроение. 1975. – 280 с.