

OBTAINING AND TREATMENT OF MICRO- AND NANODISPERSED MATERIALS WITH INDUCTIVE HEATING

L. Tsybulsky, A. Kuzmichev

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

T. Misyura

National University of Food Technologies

Key words:

Induction heating

Induction evaporation

Microdispersed materials

Nanodispersed materials

Nanotechnology

Article history:

Received 08.08.2015

Received in revised form
21.08.2015

Accepted 29.08.2015

Corresponding author:

T. Misyura

E-mail:

npnuht@ukr.net

ABSTRACT

A survey of the use of induction heating in the technology of preparation and modification of micro- and nano-dispersed materials is presented. The goal of this work is to analyze scientific and technical decisions and to illustrate the potential of induction heating for obtaining new materials for machine engineering, energetics, medicine, food technology, chemistry, etc. The induction heating is a quite versatile and promising method; it allows creating strongly nonequilibrium conditions in the processing chamber and can be applied both for laboratory and industrial production. The technology enables to implement processes in vacuum and controlled gas atmosphere of both low and atmospheric pressure. The physical principles of the induction heating device operation and their parameters are also considered in the article.

ОТРИМАННЯ І ОБРОБКА МІКРО- І НАНОРОЗМІРНИХ МАТЕРІАЛІВ ІНДУКЦІЙНИМ НАГРІВОМ

Л.Ю. Цибульський, А.І. Кузьмичев

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

Т.Г. Мисюра

Національний університет харчових технологій

У статті представлено огляд застосування індукційного нагріву в технології отримання та модифікації мікро- і нанодисперсних матеріалів. Здійснено аналіз науково-технічних рішень, що ілюструють потенціал технології індукційного нагріву для отримання нових матеріалів у техніці, енергетиці, медицині, харчовому приладобудуванні, хімії тощо. Зазначено, що індукційний нагрів є досить універсальним і перспективним методом, який дозволяє створювати сильно нерівноважні умови в робочій камері і може застосовуватися як у лабораторній практиці, так і в промисловому виробництві.

Також розглянуто фізичні принципи дії пристроїв з індукційним нагрівом і параметри, що їх характеризують.

Ключові слова: індукційний нагрів, індукційне випаровування, мікродисперсні матеріали, нанодисперсні матеріали, нанотехнології.

Постановка проблеми. Технологіям отримання й обробки дисперсних (порошкових) матеріалів з частинками мікронного і нанометрового розміру в останні десятиліття приділяється велика увага. Такі матеріали необхідні як для наукових цілей, так і для багатьох галузей техніки, насамперед для машино- та приладобудування, електроніки, інформатики, вакуумної техніки, енергетики й каталізу. Оскільки вимоги до матеріалів весь час підвищуються, доводиться постійно вдосконалювати існуючі технології і створювати нові. У цьому плані великі можливості має електротермія, включаючи індукційний нагрів. Основна тенденція розвитку сучасної технології — перехід від об'єктів мікронного розміру до наноб'єктів з розмірами від 1 до 100 нм, тобто перехід від мікротехнології до нанотехнології [1—3]. Виявилось, що індукційний нагрів є досить універсальним технологічним методом, який застосовують для отримання й обробки дисперсних матеріалів в усьому зазначеному діапазоні розмірів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У літературі подібний огляд раніше не публікувався, здійснено тільки описи окремого індукційного устаткування. Розгляд обмежено фізичними методами, близькими до методів PVD, з вихідним матеріалом у вигляді твердої речовини.

Метою дослідження є систематизація науково-технічних рішень, що ілюструють потенціал технології індукційного нагріву в галузі виробництва та модифікації мікро- та нанорозмірних частинок і нанодисперсних матеріалів.

Виклад основного матеріалу. Індукційний нагрів заснований на безконтактному підведенні енергії до речовини за допомогою електромагнітного поля і має певні переваги:

- можливий нагрів у широкому діапазоні температур; максимальна температура обмежена в основному матеріалом тигля і його взаємодією з речовиною, що нагрівається;

- можна розміщувати у вакуумі як індуктор, так і речовину, що нагрівається;

- індуктор може перебувати поза робочою камерою і забезпечувати нагрів через діелектричну оболонку, а також через непровідне середовище у вигляді газу, рідини або твердої речовини;

- індуктор може працювати при відносно низьких напругах, що виключає електричний розряд навколо індуктора при його переміщенні в газове середовище в широкому діапазоні тисків (від вакууму — до атмосферного);

- не є проблемою екранування індуктора для запобігання запалювання газового розряду при розміщенні індуктора в газі, коли електрична напруга на ньому відносно велика;

- останні дві особливості дозволяють без особливих проблем нагрівати і випаровувати речовину не тільки у вакуумі, а й у газовому середовищі;

- індуктор може перебувати при низькій температурі, навіть у рідкому азоті; холодний індуктор добре екранує навколишній простір від теплового випромінювання і дозволяє створювати великі градієнти температури в газі навколо об'єктів, що нагріваються;

- за певної конфігурації магнітного поля можливо реалізувати ефект левітації і підтримувати твердий або рідкий метал в підвішеному стані;

- існує можливість витягати стовп рідкого металу масою до 50 кг з відносно холодного тигля так, що стовп буде знаходитися в напівзваженому стані; при цьому інтенсивно нагрівається тільки верхня частина стовпа.

1. *Термовакuumне індукційне випаровування для нанесення покриттів на порошки.* При виробництві дисперсних матеріалів часто потрібно нанести на готовий порошок будь-яке покриття, що модифікує його електричні й оптичні характеристики (наприклад, поліпшує поглинальну і випромінювальну здатність), надає йому нові хімічні, зокрема каталітичні, властивості, підвищує здатність до гетерування та сорбції. У технології отримання тонерів, чорнил, лаків і фарб потрібно змінювати колір порошку шляхом осадження на нього кольорового покриття. Також покриття наноситься на абразивний порошок для покращення його механічних характеристик.

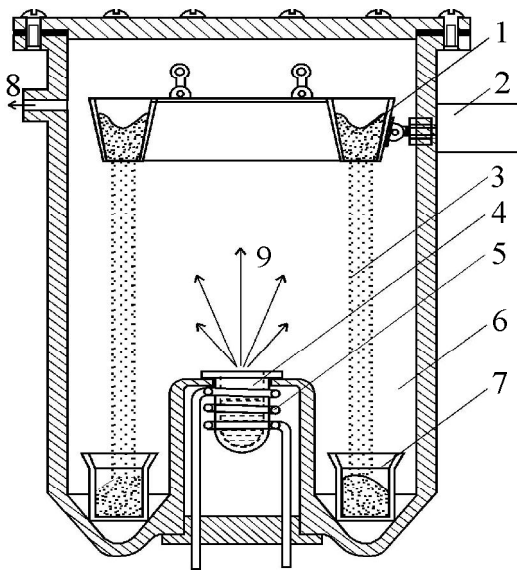


Рис. 1. Пристрій для осадження покриттів на порошковий матеріал:

1 — бункер з необробленим порошком; 2 — вібратор; 3 — потік порошкового матеріалу; 4 — тигель з матеріалом, що випаровується; 5 — індуктор; 6 — робоча камера; 7 — бункер з необробленим порошком; 8 — відкачування; 9 — паровий потік

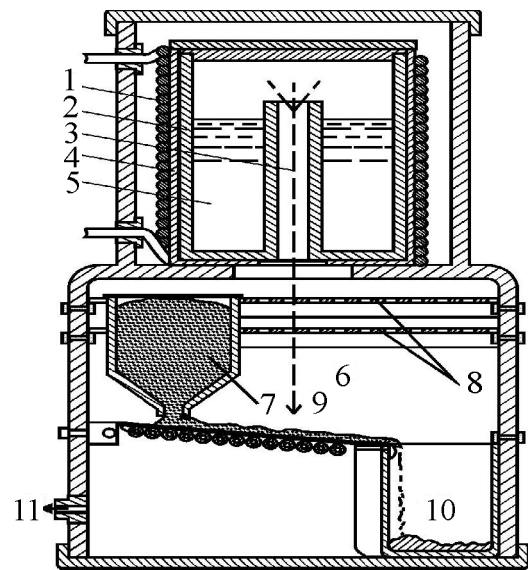


Рис. 2. Пристрій для осадження покриттів на порошковий матеріал:

1 — індуктор; 2 — тигель; 3 — паропровід; 4 — теплова ізоляція; 5 — розплавлений матеріал покриття; 6 — камера осадження покриття; 7 — бункер з необробленим порошком; 8 — коліматор для частинок пари; 9 — паровий потік; 10 — бункер з обробленим порошком; 11 — відкачування

Найбільш простий спосіб нанесення покриття заснований на випаровуванні у вакуумі, наприклад, як це показано на рис. 1 [4]. Переваги індукційного нагріву в даному випадку проявляються у можливості роботи випарника в незадовільних вакуумних умовах, які виникають через те, що порошки сильно виділяють газ. З іншого боку, наявність газу в робочій камері сприяє розсіюванню

парових частинок і покриттю всієї поверхні частинок порошку, тому в камеру можуть додавати робочий газ (або інертний, або реакційний). Реакційний газ додається у разі осадження складного покриття, наприклад, з окисованого металу. Інший варіант виконання індукційного випарника представлений на рис. 2 [5]. На порошок, який рухається по нахиленій поверхні, направляється зверху потік пари речовини, що осаджується.

Тигель 2 переважно виготовляють з провідникового матеріалу (графіту, молібдену, танталу). Розігрів здійснюється індуктором 1 на частоті 15 кГц. Тигель оточений шаром теплової ізоляції 4 з оксиду алюмінію. Труба паропроводу 3 спільно з коліматором 8 формує спрямовану вниз на столик паровий струмінь 9. Оскільки температура стінок паропроводу 3 дорівнює температурі випаровування рідкого металу 5, то останній не конденсується на стінках і не утворює краплі. Даний апарат застосовується для осадження покриттів з відносно легкоплавких металів, зокрема для капсулювання частинок ракетного палива.

2. *Метод випаровування-конденсації (метод індукційного "газового випаровування") для одержання дисперсних матеріалів.* Суть методу полягає у випаровуванні матеріалу в газовому середовищі з подальшим об'єднанням частинок, що випарувались, у більші аерозольні частинки, кластери і наночастинки безпосередньо в об'ємі над поверхнею випаровування. Потім частинки осідають на стінках (колекторі) технологічної камери. В цьому методі превалює об'ємна конденсація парових частинок над поверхневою [6]. Зазвичай процес проводять у камері, заповненій інертним газом (гелієм або аргоном) після високовакуумного відкачування, але може використовуватися повітря або добавка кисню для отримання оксидно-металевих порошоків. Отримувані цим методом частинки мають цілком визначений розмір з досить вузьким відхиленням.

У [6] наведено огляд різних модельних уявлень про формування наночастинок у таких умовах. Механізм цього процесу можна представити таким чином: зародження і зростання часток відбувається в зоні конденсації у відносно холодному газі-носії, тобто на певному віддаленні від нагрітої поверхні випаровування, де молекули газу здатні сприймати і розсіювати теплоту конденсації. На ранній стадії утворення комплексів відбуваються потрібні зіткнення атомів пари за участю газової молекули з передачею останній частини коливальної енергії; в результаті утворюються димери. До них може приєднатися третій атом з подальшим зростанням агрегацій (комплексів, нанокластерів) до того часу, поки не буде досягнута форма метастабільного ізомеру. Потім їхній ріст сповільнюється, що призводить до того, що середній розмір кластерів майже не залежить від швидкості випаровування речовини. Після того, як окремі атоми пари будуть поглинені зростаючими агрегаціями, відбувається їх коагуляція. Коагуляція закінчується на зовнішній межі зони об'ємної газової конденсації, де нанокластери втратили свою енергію і вже не можуть об'єднуватися один з одним. Частинки досягають граничного розміру і повільно дифундують або несуться потоком газу на стінки.

Для отримання ефекту об'ємної конденсації необхідні підвищені тиски газу, при яких середня довжина пробігу атомів пари буде набагато менша за

відстань між поверхнями випаровування й осадження. Вплив стінки слабшає при $pd > 2 \text{ Па} \cdot \text{м}$, де p — тиск газу, d — відстань від поверхні випаровування до стінки. При тисках порядку сотень паскалів утворення високодисперсних частинок завершується в конвективних потоках газу поблизу випарника. Так, наприклад, вимірювання, виконані на нижче описаному левітаційно-струменевому аерозольному генераторі, показали, що при атмосферному тиску газу зона об'ємної конденсації має ширину близько 1 мм і віддалена від поверхні випаровування приблизно на 1 мм. При однаковому тиску газу перехід до більш важкого газу призводить до збільшення розмірів часток у кілька разів. Змінюючи тиск і природу газу, можна регулювати час перебування зростаючих наночастинок у газовому середовищі і їх середній розмір. При знижених тисках можна отримувати на колекторі суміш осаду окремих атомів пари і нанокластерів. Швидке охолодження парогазової суміші зі швидкістю близько 10^4 — 10^7 град/с шляхом продувки охолодженого газу над поверхнею випаровування сприяє загартуванню нерівноважних структур аерозольних нанокластерів, навіть таких, які неможливо отримати в масивному твердому тілі.

Результати досліджень наночастинок, отриманих методом випаровування-конденсації, описані, зокрема, у [2, 3]. У лабораторній практиці зазвичай застосовують резистивні випарники.

2.1. Апарат безперервної дії з індукційним нагрівом тигельного випарника. Схема апарата показана на рис. 3 [7—9]. Тигель 2 з металом розміщений у герметичній камері, яку відкачують вакуумними насосами 5 і заповнюють інертним газом (аргоном або гелієм) до тиску 6—70 Па при діаметрі камери порядку 50 см. За допомогою індуктора тигель 2 нагрівається до 1200—

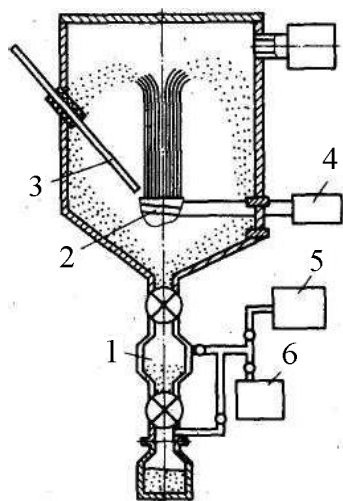


Рис. 3. Апарат для одержання порошків конденсацією в газовому середовищі:

1 — бункер з порошком; 2 — тигель з металом, оточений індуктором; 3 — металевий стержень для підживлення тигля; 4 — ВЧ генератор; 5 — вакуумні насоси; 6 — ємність з нейтральним газом

насіпну щільність $0,08 \text{ г/см}^3$, чорний колір і високу пірофорність. На цій установці можна отримувати також порошки Mn, Ca, Be, Cu, B, Si, Fe, Ni, Zn, Ti, Au, Mg, Sn, Sb та їх сплави. Чинником, що обмежує номенклатуру матеріа-

1500 °С. Метал, що випаровується, осідає на холодних стінках камери у вигляді порошку, звідки він зсипається у бункер 1, розташований у нижній частині апарата. Безперервне проведення процесу можливе завдяки безперервній подачі в тигель металу у вигляді стержня 3, який уводиться з певною швидкістю через вакуумне ущільнення. Періодично бункер відсікають від апарата, поповнюють нейтральним газом і заливають рідиною, інертною до порошку, разом з якою порошок видаляється з бункера.

Нанопорошок, що отримують випаровуванням, наприклад, алюмінію, містить частинки високої чистоти діаметром $\sim 30 \text{ нм}$, має

лів, є їх взаємодія в розплавленому вигляді з матеріалом тигля, яка призводить до його руйнування.

У США в промисловому масштабі цим методом виробляють ультратонкі алюмінієві порошки, які використовують як ракетне паливо. Розмір частинок порошків 15—200 нм, питома поверхня 20—30 м²/г, вміст Al > 99 % [10]. У промисловому масштабі цей спосіб застосовується також у Японії фірмами «Nippon Soda Co.» і «ULVAC» [9] для отримання алюмінієвого порошку розміром 20—30 нм. Установа безперервної дії забезпечує отримання металевих порошків в кількості більше 100 кг на місяць.

2.2. *Двотигельна установка з індукційним нагрівом.* Для отримання надвисокої продуктивності застосовується установка безперервної дії з роздільними тиглями великої ємності: окремо для плавки вихідного матеріалу і його випаровування [9]. Схема установки показана на рис. 4. Для спрощення на схемі не показані вакуумна і газова системи.

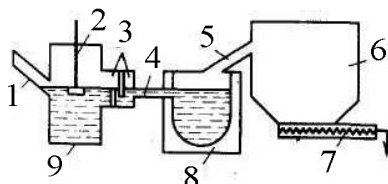


Рис. 4. Двотигельна установка для отримання ультрадисперсних порошків алюмінію методом випаровування-конденсації: 1 — отвір для подачі вихідного матеріалу; 2 — рівнемір; 3 — затвор; 4 — канал для подачі розплаву в тигель для випаровування; 5 — паропровід; 6 — камера для конденсації; 7 — шнек вивантаження готового порошку; 8 — тигель індукційного випарника; 9 — тигель індукційної плавки

У цій установці використовується здатність індукційних систем нагрівати дуже великі об'єми матеріалів. Застосування окремого тигля 9 для розплавлення матеріалу дозволяє підготувати його до випаровування (видалити летючі домішки та газу) і дозувати подачу металу в другий тигель 8, що запобігає розбризкуванню металу під час випаровування. Застосування шнекового пристрою 7 забезпечує вивантаження готового порошку.

2.3. *Левітаційно-струминний генератор.* В апараті використовують електричний струм і механічну дію змінного магнітного поля. Другий ефект забезпечує безтигельне (електромагнітне) утримання розплавленої краплі металу, яка нагрівається до температури випаровування, перебуваючи в підвішеному (левітаційному) стані [11, 12]. Для отримання ефекту левітації необхідна особлива “пробкова” конфігурація магнітного поля, яка створюється двома секціями індуктора з протилежним навіванням. Нижня секція створює поле з силовими лініями у вигляді воронки, які виштовхують краплю вгору до слабого поля. Верхня секція створює поле за формою перевернутої воронки, що штовхає краплю вниз. У результаті крапля витає в області рівноваги механічних сил.

Застосування левітації дозволяє вирішити проблему тигля, особливо важливу в разі випаровування хімічно-активних металів, і досягти високої чистоти процесу. Для забезпечення тривалої безперервної роботи застосовується підживлення краплі за рахунок постійної подачі дроту з матеріалу, який випаровується, як це зроблено в генераторі, показаному на рис. 5 [11, 12]. Крапля 2 висить на кінчику дроту приблизно посередині між секціями індуктора 3.

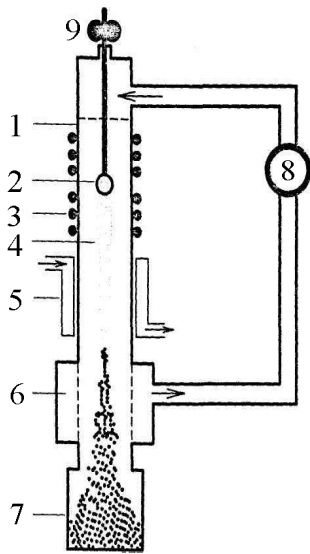


Рис. 5. Левітаційно-струминний генератор: 1 — камера з діелектрика; 2 — крапля металу, що випаровується; 3 — індуктор; 4 — область утворення аерозолу; 5 — холодильник; 6 — фільтр; 7 — контейнер; 8 — насос; 9 — механізм подачі дроту

При обраних режимах нагрівання та швидкості подачі дроту встановлюється такий діаметр краплі, при якому швидкість випаровування краплі дорівнює швидкості її підживлення.

Краплю оточує ламінарний потік інертного газу, що відносить вниз до холодильника 5, а потім до фільтра 6, спочатку пару, а потім і аерозоль металу. Аерозоль утворюється внаслідок конденсації атомів пари в потоці газу в області 4. Відфільтрований газ насосом 8 знову подається в камеру, а затримані фільтром 6 частки аерозолу збираються в контейнері 7. Робочий тиск газу вибирається порядку атмосферного для зниження вимог до герметичності апарата. Ламінарний газовий потік забезпечує захист стінок камери від запылення металом і сталість напруженості магнітного поля в робочій області камери. Збільшення

швидкості газового потоку в робочому діапазоні 20—90 см/с зменшує середній розмір часток і змушує їх розподіл за розміром. За допомогою апарата даного типу отримують високодисперсні порошки різних металів і сплавів, у яких розмір часток становить 5—200 нм [11, 12].

2.4. Установка з використанням зрідженого газу. На рис. 6 представлена установка [13], у якій досягнута висока швидкість виробництва металевго нанопорошку (60 г/год) при високому відсотку використання вихідного матеріалу (75 %). Ефект забезпечується використанням газового середовища, яке отримують при випаровуванні скрапленого при криогенних температурах інертного газу (Ar). Безперервність процесу забезпечується постійною подачею металевго стрижня в зону випаровування.

Індуктор 2 (рис. 6) нагріває кінчик металевго (Al) стрижня 1 до температури випаровування. Крапля 8 не встигає падати вниз, бо швидко випаровується і, крім того, її підтримує потік газу, що випаровується з поверхні рідкого аргону. Частинки, що випарувалися, потрапляють у потік дуже холодного газу, в якому пара виходить сильно перенасиченою. Градієнт температури надто великий: 2200 К на поверхні краплі і 77 К на поверхні рідкого аргону. Виникають зародки об'ємної конденсації, відбувається їх ріст і коалесценція з утворенням наночастинок алюмінію. Потік газу забирає наночастинок в зону III, де вони збираються газовим фільтром 5. Аргон застосовують для запобігання окислення металу й утворення AlN. При отриманні наночастинок міді та заліза застосовують зріджений азот. Розмір часток Al — менше 70 нм, часток Cu — близько 25 нм.

Здійсненню описаного процесу сприяє використання безконтактного індукційного нагріву і випаровування металу поблизу поверхні зрідженого газу.

Холодний індуктор не нагріває газ, але одночасно створює локальний високо-температурний перегрів металу, який випаровується.

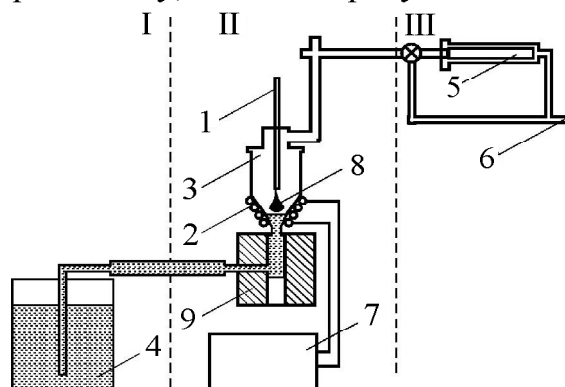


Рис. 6. Пристрій одержання нанопорошків Al з використанням зрідженого газу:

I — зона скрапленого газу, II — зона виробництва нанопорошку, III — зона збору нанопорошку; 1 — стрижень Al; 2 — індуктор; 3 — область конденсації наночастинок Al в потоці Ar; 4 — зріджений Ar; 5 — газовий фільтр для збору нанопорошку; 6 — вихід газу; 7 — ВЧ генератор; 8 — крапля рідкого Al; 9 — система підведення рідкого газу

2.5. *Отримання наночастинок за допомогою плазми.* Для отримання наночастинок за допомогою плазми метал у вигляді порошку або електрода вводиться в зону термічної плазми і випаровується. Плазма генерується індукційним плазмотроном, де утворюється пара з температурою в кілька тисяч кельвінів. На виході з плазмотрона швидкість охолодження пари може досягати 10^6 град/с, а при використанні сопел Лавалля — 10^8 град/с. При зазначених умовах отримують порошки алюмінію з розміром частинок 5—500 нм і питомою поверхнею 30—70 м²/г [9]. Плазмові процеси можна здійснювати як у газовій захисній атмосфері, так і у вакуумі.

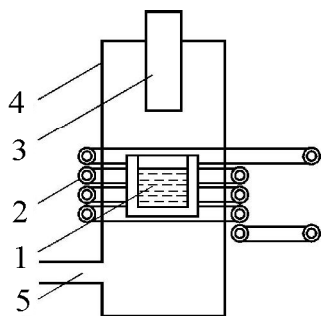


Рис. 7. Схема установки для отримання наночастинок за допомогою плазми, яка розігрівається ВЧ магнітним полем:

1 — тигель з завантаженням; 2 — індуктор; 3 — охолоджуваний колектор частинок; 4 — вакуумна камера з діелектричною оболонкою; 5 — напуск гелію

Рис. 7 ілюструє подібний метод отримання наночастинок за допомогою плазми, створюваної ВЧ індуктором [14]. Останній також використовується для розплавлення матеріалу завантаження, яке поміщається в тигель. Матеріал може бути і у вигляді стержня, який безперервно подається в зону генерації плазми.

Спочатку метал знаходиться в тиглі 1 у вакуумній камері 4 і розігрівається вище точки випаровування індуктором 2. Потім у систему напускається гелій 5, що призводить до утворення в області індуктора 2 високотемпературної плазми. Атоми гелію виступають як зародки конденсації для атомів металу, а кластери, що утворюються, переносяться за рахунок дифузії і конвекції до колектора 3, який охолоджують до низьких температур, наприклад, за допомогою рідкого азоту. Охолоджений колектор створює великий градієнт температури в газі, що сприяє утворенню наночастинок. Частинки осідають на колекторі, з якого вони

видаляються за допомогою скрубера. За необхідності частинки пасивують введенням певного газу, наприклад, кисню. У випадку наночастинок алюмінію кисень формує на них шар оксиду алюмінію.

3. *Фізико-механічні методи одержання дисперсних матеріалів.* Фізико-механічні методи використовують індукційний нагрів для розплавлення вихідного матеріалу та процес розпорошення розплаву струменем газу або рідини [8, 9, 14]. Оскільки температура плавлення металів ($\approx 600\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$) нижче за температуру випаровування ($\approx 1500\text{ }^\circ\text{C}$), полегшується вирішення проблем, пов'язаних зі стійкістю деталей технологічних апаратів до рідких металів, розігрітих до дуже високих температур. Ці методи дозволяють отримувати порошки з розміром частинок від часток мікрона до міліметра. У разі отримання наночастинок метод називають газовою атомізацією, яка полягає в дуже тонкому розпиленні (диспергуванні) й охолодженні розплавленої речовини за допомогою високошвидкісного потоку інертного газу. Завдяки високій швидкості охолодження частинок (до 10^7 град/с) можна заморожувати їх у сильно нерівноважну структуру. Використання індукційного нагріву в цих методах обумовлено його чистотою, конструктивною зручністю і екологічністю.

3.1. *Установки з розпорошенням розплаву металу струменем газу або рідини.* Розпорошення газового струменя металу, розплавленого за допомогою індукційного нагріву, безперервно подається дротом. Варто зазначити, що розпорошення застосовувалося в ручних металізаторах пістолетного типу [15]. Більш високу продуктивність забезпечують стаціонарні установки.

На рис. 8 наведена схема високопродуктивної установки для одержання порошку легкоплавких металів типу олова і цинку [8]. Метал плавиться в індукційній печі 1, надходить в металоприймач 2, звідки відбувається розпорошення розплаву повітрям через форсунку 4 у вигляді горизонтального струменя в камері 5. Сконденсований порошок накопичується в бункерах 7, звідки періодично витягується. Продуктивність установки до 1300 тонн порошку на рік.

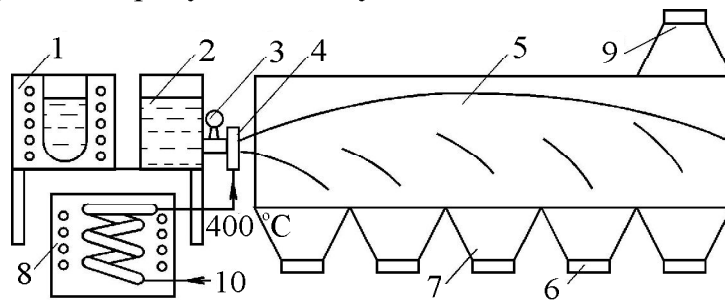


Рис. 8. Установка для одержання порошку з індукційним плавленням металу і розпорошенням розплаву газом: 1 — піч; 2 — металоприймач; 3 — вентиль; 4 — форсунка; 5 — камера розпорошення; 6 — затвор; 7 — бункер; 8 — піч для підігріву повітря; 9 — вихід повітря; 10 — подача повітря

Удосконалена конструкція апарата застосовується для отримання порошку алюмінію (рис. 9) [8]. Нагрітий ВЧ індуктором в тиглі 5 до $1100\text{--}1120\text{ }^\circ\text{C}$ розплав алюмінію розпорошується горизонтальною тугоплавкою форсункою 3. Нагрітий до $300\text{ }^\circ\text{C}$ екзотермічний газ подається в трубу 1, що охоплює сопло форсунки 3. Газова труба і форсунка підігріваються індуктором 4. Розпорошення ведеться в горизонтально розташовану циліндричну камеру 2 діаметром 25 см і

довжиною близько 2,5 м. Формується вузький струмінь пари, спрямований строго по осі камери. Розпорошений метал конденсується в потоці інертного газу.

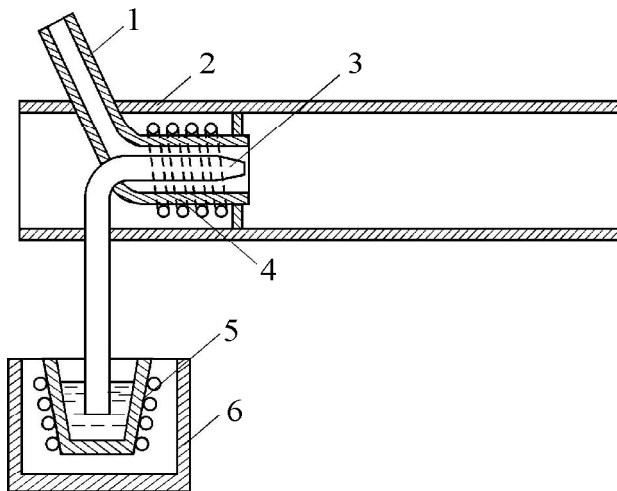


Рис. 9. Установка горизонтального розпорошення алюмінію: 1 — труба подачі газу; 2 — камера розпорошення; 3 — форсунка; 4 — індуктор; 5 — тигель з індукційним нагрівом; 6 — тепловий екран

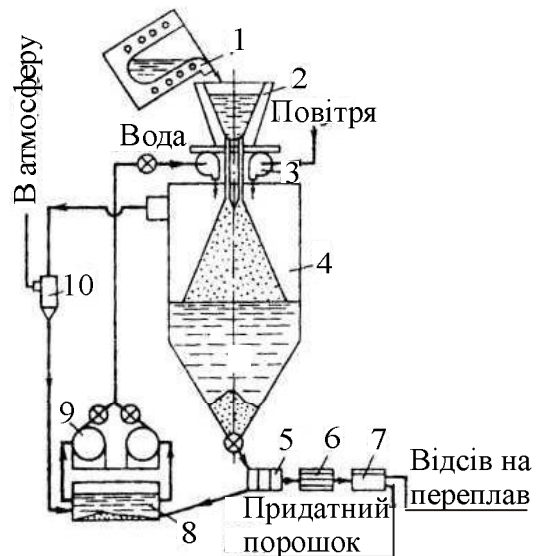


Рис. 10. Установка розпорошення розплаву повітрям і водою у воду: 1 — індукційна піч; 2 — приймач металу; 3 — форсунка; 4 — камера розпорошення; 5 — гідроциклон; 6 — центрифуга; 7 — сушарка; 8 — відстійник; 9 — насос високого тиску; 10 — циклон

Виробництво порошків сплавів на основі міді та заліза часто здійснюється на основі розпорошення розплавів повітрям або водою у воду. Такі установки близькі за конструкцією, але відрізняються системою подачі агента розпорошення (рис. 10) [8]. Зліва на рис. 10 зображені елементи системи розпорошення розплаву водою. Тиск у струмені води становить близько 10 МПа.

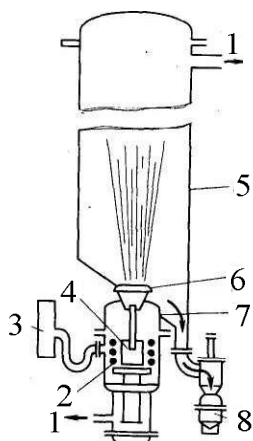


Рис. 11. Схема установки для вакуумного розпорошення розплавлених металів: 1 — відвід до вакуумному насоса; 2 — індуктор; 3 — генератор для живлення індуктора; 4 — тигель з розплавом алюмінію; 5 — камера розпорошення; 6 — затвор; 7 — камера плавлення; 8 — контейнер для порошку

У [8, 9] описано й інші установки з індукційним плавленням металів і розпорошенням розплавів струменем газу, а також розглянуті конструкції форсунок. Також описані установки для гранулювання металів шляхом вливання струменя рідкого металу у воду.

3.2. *Установка вакуумного розпорошення розплавленого металу.* Вакуумне розпорошення (або вибухове розбрикування) розплаву металу вперше було застосовано в промислових масштабах фірмою «Homogeneous Metals» (США) [16]. Схема установки для розпорошення алюмінію представлена на рис. 11. Камера складається з камери розпорошення 5 і камери плавлення 7 з тиглем 4. Індукційний нагрів використовується в установці через можливіс-

ть роботи індуктора в середовищі стисненого водню і його сумісності з рештою конструкції установки.

У нижній плавильній камері 7 метал в тиглі 4 розплавляється за допомогою ВЧ індуктора 2 у вакуумі, потім в камеру 7 нагнітають водень під тиском до 707 кПа. Молекулярний водень розчиняється в розплаві, при цьому він дисоціює на атоми і підвищує внутрішню енергію розплаву. Розчинність водню в алюмінії збільшується із зростанням температури і тиску.

У верхній камері 5 створюють вакуум. Після відкриття затвора 6, що з'єднує камери, водень, що міститься в розплаві, виділяється з величезною швидкістю. Розплавлений метал закипає і розпорошується в камері 5. Процес рекомбінації атомів водню призводить до значного виділенню теплової енергії, внаслідок чого метал розігривається до кількох тисяч кельвінів. При цих умовах він розпорошується з утворенням порошку в широкому інтервалі за розмірами частинок. Отримані порошки мають кращі властивості порівняно з порошками, отриманими при розпиленні струменем газу або води. Але використання водню під тиском і при високих температурах підвищує пожежо- і вибухонебезпечність.

Аналогічний процес був розроблений фірмою «Spesimen» (Франція), де газ розчинявся в розплавленому металі під високим тиском, а вибухове розпорошення розплаву відбувалося при потраплянні в зону атмосферного тиску [17].

4. Отримання наноструктурних матеріалів. Наноструктурні матеріали характеризуються наявністю нанорозмірних зерен та інших структурних елементів.

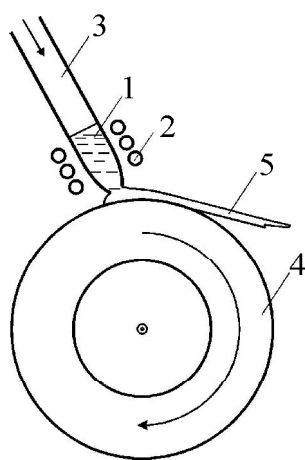


Рис. 12. Пристрій для одержання наноструктурного матеріалу при швидкому охолодженні розплаву методом спінінгування: 1 — розплавлений матеріал; 2 — індуктор; 3 — потік газу; 4 — охолоджуваний барабан; 5 — стрічка наноструктурованого матеріалу

Відомі різні способи їх отримання [2, 3, 14]. Індукційний нагрів найчастіше застосовують для розплавлення матеріалу. У пристрої [14], який показано на рис. 12, метал 1 розплавляється за допомогою ВЧ індуктора 2 і видавлюється через форсунку на охолоджуваний барабан 4 за допомогою газового потоку 3. Барабан обертається в атмосфері інертного газу. У такому процесі, що отримав назву спінінгування, утворюються смуги або стрічки 5 наноструктурного матеріалу товщиною від 10 до 100 мікрон. Наноструктура отримується за рахунок швидкого застигання рідкого металу, розділеного на нанорозмірні частинки потоком газу.

Таким способом були отримані сплави, що складаються з 85—94% алюмінію і добавок інших металів, наприклад, Y, Ni і Fe. Отриманий спінінгуванням сплав Al-Y-Ni-Fe, що складається з частинок алюмінію розміром 10—30 нм, убудованих в аморфну матрицю, може мати напругу на розрив, що перевищує 1,2 ГПа [14]. Таке високе значення пояснюється наявністю бездефектних наночастинок алюмінію.

Висновки

Аналіз різних джерел показує, що індукційний нагрів вельми зручний для різноманітних технологій отримання й обробки мікро- і нанодисперсних матеріалів. Спосіб уже знайшов реальне застосування в лабораторній практиці і промисловості для виробництва прийнятних кількостей готового продукту.

Основні переваги індукційних пристроїв полягають у безконтактності нагріву через діелектричне середовище, можливості роботи в газовому середовищі в широкому діапазоні тисків, їх низькі робочі температури, що полегшує створення великих температурних градієнтів в зоні формування аерозолів і наночастинок і сприяє загартуванню сильно нерівноважних структур.

Апаратура індукційного нагріву відносно недорога, зручна в конструктивному відношенні і в експлуатації, її нескладно адаптувати до різних технічних умов, вона легко автоматизується. Важливо й те, що технологія індукційного нагріву є екологічно чистою.

Література

1. *Самойлович М.И.* Глобальная технологическая революция или нанотехнологическая инициатива (Аналитический обзор) / [Электронный ресурс]. — М.И. Самойлович // Режим доступа: <http://www.nanostructure.narod.ru/obrazec.htm>.
2. *Гусев А.И.* Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев — М.: Физматлит, 2005. — 416 с.
3. *Tjong S.C.* Nanocrystalline materials and coatings / S.C. Tjong, Haydn Chen // *Mat. Sci. Eng.* — 2004. — V. R 45. — P. 1—88.
4. *Пат. 2398517* США. МКІ С23С 14/22. Apparatus for plating finely divided material / Пристрій для нанесення покриття тонко подрібненим матеріалом / W.W. Castor. — Оpubл. 16.04.1946, <http://patft.uspto.gov/netahtml/PTO/srchnum.htm>.
5. *Пат. 3260235* США. МКІ С23С 14/24; С23С 14/22. Apparatus for coating material with metal / Апарат для матеріалу покриття з металом / S. Witz. — Оpubл. 12.07.1966, 16.04.1946, <http://patft.uspto.gov/netahtml/PTO/srchnum.htm>.
6. *Петров В.И.* О некоторых особенностях приготовления ультрамалых частиц неорганических соединений методом “газового испарения” / В.И. Петров, Э.А. Шафрановский // *Изв. АН. Сер. Физическая.* — 2000. — Т. 64. — № 8. — С. 1548—1557.
7. *Грибовский С.В.* Газофазный метод получения порошков / С.В. Грибовский, Л.И. Кватер, Б.П. Кузьмин, И.В. Фришберг. — М.: Наука, 1978. — 224 с.
8. *Либенсон Г.А.* Оборудование цехов порошковой металлургии / Г.А. Либенсон, В.С. Панов. — М.: Металлургия, 1983. — 264 с.
9. *Гопиенко В.Г.* Спечённые материалы из алюминиевых порошков / В.Г. Гопиенко, М.Е. Смагоринский, А.А. Григорьев, А.Д. Белавин // Под ред. М.Е. Смагоринского. — М.: Металлургия, 1993. — 320 с.
10. *Алюминий: свойства и физическое металловедение: Пер. с англ.* / Под ред. Дж. Е. Хетча. — М.: Металлургия, 1989. — 422 с.
11. *А.с. СССР 814432.* Способ получения аэрозолей металлов / М.Я. Ген, А.В. Миллер. — Заявл. 19.06.1961. Оpubл. 23.03.1981, Бюл. № 11, 1981.
12. *Ген М.Я.* Левитационный метод получения ультрадисперсных порошков металлов / М.Я. Ген, А.В. Миллер // *Поверхность. Физика, химия, механика.* — 1983. — № 2. — С. 150—154.
13. *Ссылки [80—82] в [3].*
14. *Оуэнс Ф.* Нанотехнологии / Ф. Оуэнс, Ч. Пул. — М.: Техносфера, 2005. — 336 с.
15. *Власов А.П.* Высокочастотная металлизация / А.П. Власов, К.П. Савинков. — М.: Гос. научн.-техн. изд-во машиностр. лит-ры, 1960. — 127 с.

16. *Wentzell J.M.* Metal powder production by vacuum atomization / Wentzell J.M. // *J. Vac. Sci. Technol.* — 1974. — V. 11. — № 6. — P. 1035—1037.

17. *I.L. Mersie.* The explosive powder for propellant / I.L. Mersie // *La technique moderne.* — 1986. — V. 78. — № 5—6. — P. 90.

ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА МИКРО- И НАНОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ

Л.Ю. Цыбульский, А.И. Кузьмичёв

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»*

Т.Г. Мисюра

Национальный университет пищевых технологий

В статье представлен обзор применения индукционного нагрева в технологии получения и модификации микро- и нанодисперсных материалов. Выполнен анализ научно-технических решений, иллюстрирующих потенциал технологии индукционного нагрева для получения новых материалов в технике, энергетике, медицине, в пищевом приборостроении, химии и пр. Доказано, что индукционный нагрев является достаточно универсальным и перспективным методом, который предоставляет возможность создавать сильно неравновесные условия в рабочей камере и может применяться как в лабораторной практике, так и в промышленном производстве. Также рассмотрены физические принципы действия устройств с индукционным нагревом и характеризующие их параметры.

Ключевые слова: *индукционный нагрев, индукционное испарение, микродисперсные материалы, нанодисперсные материалы, нанотехнологии.*