

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

### MODELING OF PROCESSES IN METALLURGY AND MECHANICAL ENGINEERING

УДК 620.3+ 544.558

- Петров С. В. д-р техн. наук, с.н.с, провідний науковий співробітник Інституту газу Національної академії наук України, м. Київ, Україна, e-mail: vizana.sp@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0373-8003
- Коржик В. М. д-р техн. наук, професор, чл.-кор. НАН України, зав. відділом Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, м. Київ, Україна, e-mail: vnkorzhyk@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9106-8593
- Бондаренко С. Г. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: s\_g\_bondarenko@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9590-4747
- Строгонов Д. В. доктор філософії (матеріалознавство), науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, e-mail: strogonovd94@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4194-764X

### ДО ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО СИНТЕЗУ АЛЮМІНІЄВИХ НАНО- ЧАСТОК В ПЛАЗМОВІЙ СТРУМІНІ ПРИ АТМОСФЕРНОМУ ТИСКУ

**Мета роботи.** Метою даного дослідження є вивчення високопродуктивного випаровування мікронного алюмінієвого порошку в плазмовому струмені атмосферного тиску для синтезу наноалюмінія. Використовуючи спеціальну плазмову техніку, наночастинки можна отримати шляхом швидкого плавлення і випаровування початкових мікрометричних частинок та їх подальшої повторної нуклеації.

**Методи дослідження.** Використані методи математичного та комп'ютерного моделювання дозвукових турбулентних плазмових струменів при атмосферному тиску та експериментальні дослідження двофазних процесів при термічній плазмовій обробці з використанням дугового плазмотрону.

**Отримані результати.** На основі комп'ютерного моделювання спроектована і розроблена спеціальна реакторна система, що включає до свого складу плазмово-струменевий реактор з електродуговим плазмотроном для синтезу наночастинок алюмінію. Чисельне моделювання надає можливість визначити положення точки плавлення, випаровування і дроблення розплавленої частинки, еволюцію фракційного складу дисперсної фази, знайти швидкість і температуру частинки на ділянці від точки її плавлення до точки дроблення. Проведена експериментальна перевірка роботи реакторної системи при використанні дугових плазмотронів потужністю 30 та 150 кВт. Показано, що інтенсифікація дроблення дисперсної сировини в плазмовому струмені може бути корисною в технологіях отримання наноматеріалів. Наслідком процесу дроблення є перерозподіл фракційного складу порошку вздовж плазмового струменя і супутні зміни динаміки руху, нагрівання та випаровування частинок. Визначено, що коли температура найбільших частинок алюмінію досягає 2500 °С, загальна кількість випарованої маси теоретично дорівнює 100 %. Основними параметрами, що впливають на поведінку частинок у плазмовому струмені, є діаметр частинок, швидкість впорскування порошку, швидкість потоку, температура і склад плазмового газу. Урахування цих параметрів дозволить вести процес на підвищеній продуктивності.

**Наукова новизна.** Отримано математичний опис процесу дроблення полідисперсного порошку, заснований на континуальному підході, що надає змогу визначити положення точки дроблення розплавленої частинки, фракційний склад дисперсної фази, знайти швидкість і температуру частинки на ділянці від точки її плавлення до точки дроблення і випаровування. Вперше показано, що можна вести процес коли повне випаровування розплавленої краплі здійснюється за рахунок високої ентальпії плазми до закінчення перемішування з паром.

**Практична цінність.** Спроектована і розроблена спеціальна реакторна система, що включає до свого складу плазмово-струменевий реактор з електродуговим плазмотроном для синтезу наночастинок алюмінію. Визначені параметри роботи реакторної системи, що дозволить проводити процес синтезу наночастинок алюмінію з високою продуктивністю.

**Ключові слова:** нанопорошки, наночастинки алюмінію, плазма, плазмовий реактор, плазмовий струмінь, математичне моделювання.

## Вступ

Наночастинки алюмінію є одними з найважливіших наночастинок, використання яких стрімко зростає в нанорозмірній науці та інженерії. Вони мають безліч застосувань, які включають: піротехніку, пропеленти, вибухові речовини, ракетне паливо, запальвальні пристрої, димові шашки, трасери, деталі порошкової металургії для автомобілів і літаків, теплозахисні і антикорозійні покриття, світловідбивні фарби, струмопровідні та декоративні вироби, термічне зварювання.

## Аналіз досліджень та публікацій

Існують різні методи синтезу наночастинок взагалі [1–3]. Для отримання наноалюмінієвих часток використовують високотемпературні і низькотемпературні технологічні процеси. Високотемпературні включають випаровування газу [4, 5], плазмохімічний синтез [6–11], лазерна абляція [12], дуговий розряд [13–15], електровибух [16–19] та іонна імплантація [20], тоді як низькотемпературні включають методи розчинення [21–27] та механічне стирання (кульове подрібнення) [28–29]. Однак промислове виробництво наноалюмінію залишається технічною проблемою. Серед існуючих технологічних процесів термічна плазма має такі невід’ємні переваги, як висока швидкість виробництва і контроль розміру частинок (монодисперсність). Проте, високочисті порошки і нанопорошки активних металів, таких як алюміній, не так просто синтезувати, оскільки їхнє швидке окиснення відбувається легко. Малі розміри наночастинок алюмінію роблять їх особливо сприйнятливими до надмірного окиснення під час зберігання до використання.

В останні роки все більше наноалюмінієві частинки привертають велику увагу фахівців у галузі горіння; їхні фізико-хімічні властивості дуже сприятливі порівняно з їхніми аналогами мікронного розміру [30]. Сьогодні нанорозмірні компоненти становлять інтерес для досягнення високої продуктивності в ракетному паливі та піротехніці. Наноалюміній є прикладом такого матеріалу. Очікується, що порівняно з частинками мікронного розміру, нанорозмірний алюмінієвий порошок збільшить швидкість горіння і значно зменшить агломерацію, підвищуючи питомий імпульс твердого ракетного палива [31].

Таким чином, існує потреба в більш дешевому і високопродуктивному процесі для виробництва наноалюмінію. Наступна проблема полягає в методі наносинтезу.

## Мета роботи

Метою даного дослідження є вивчення можливості синтезу наночастинок алюмінію випаровуванням мікронного алюмінієвого порошку за допомогою спеціальної техніки розпилення в атмосферній плазмі. Використовуючи таку техніку, синтез наночастинок

досягається шляхом швидкого плавлення і випаровування початкових мікрометричних частинок та їх подальшої повторної нуклеації.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Виконати моделювання поведінки дисперсної фази в дозвукових турбулентних плазмових струменях при атмосферному тиску та її комп’ютерний розрахунок.

2. Розробити та реалізувати спеціальну реакторну систему з електродуговим плазмово-струменевим реактором та потужною системою електроживлення електричного розряду для плазмового синтезу наночастинок.

3. Дослідити ефективність випаровування дисперсної фази при синтезі наночастинок алюмінію.

## Матеріал і методика досліджень

При проектуванні і розробці плазмово-струменевого реактора з електродуговим плазмотроном для синтезу наночастинок алюмінію використані методи математичного та комп’ютерного моделювання дозвукових турбулентних плазмових струменів при атмосферному тиску. Програмне забезпечення CASPSP, що використане авторами, призначене для комп’ютерного моделювання плазмових процесів. CASPSP є пакетом прикладних програм, що використовуються при розрахунках характеристик турбулентних плазмових струменів і для моделювання процесів нагрівання і руху частинок в плазмі.

Розроблені реакторні системи для синтезу наночастинок алюмінію, що включають до свого складу плазмово-струменеві реактори з електродуговими плазмотронами, які забезпечені системами охолодження, джерелами живлення, системами подачі вихідного матеріалу (порошку), подачі плазмоутворюючих газів та пристроєм загартування. Застосовувалась суміш аргону і водню з можливістю використання гелію. Система подачі плазмоутворюючих газів здатна їх змішувати в різних співвідношеннях. Система подачі матеріалу забезпечує подачу алюмінієвого порошку з живильника дозатора до реактору. Загартувальний пристрій є пристроєм циліндричного типу, куди подається аргон.

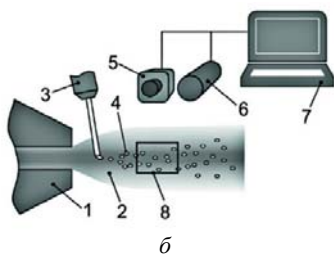
Дослідна перевірка ефективності роботи плазмово-струменевого реактора виконана з використанням електродугових плазмотронів потужністю 30 та 150 кВт і експериментального комплексу для досліджень процесів руху, нагріву, диспергування та випаровування матеріалу в процесі розпилення, що включає в себе оригінальну систему відеофіксації та аналізу отриманих зображень (рис. 1) [32].

Камера і прийомний об’єктив спектрометра фіксувалися на платформі, так що їх взаємне розташування залишалось незмінним (рис. 1а), а плазмовий струмінь перебував в фокусній площині обох оптич-

них систем. Область візування камери охоплювала ділянку струменя (вимірювальний об'єм), розміри якого варіювалися від 29×24 мм<sup>2</sup> до 68×56 мм<sup>2</sup>.



*a*



*б*



*в*

**Рисунок 1.** Загальний вигляд плазмової установки (*a*), схема (*б*) та зовнішній вигляд (*в*) діагностичного комплексу для дослідження процесів руху, нагріву та випаровування часток у плазмовому струмені: 1 – плазмотрон; 2 – запилений плазмовий струмінь; 3 – пристрій для подачі порошку; 4 – дрібнодисперсні частки; 5 – камера; 6 – фотоспектрометр; 7 – комп'ютер; 8 – вимірювальний об'єм

Початковою областю зйомки було місце вводу порошку у плазмовий струмінь, де відбувалась реєстрація процесів нагріву, руху, дроблення та випаровування дисперсних часток.

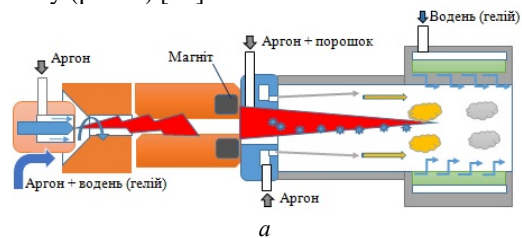
Далі платформа з камерою і об'єктивом спектрометра переміщувалась уздовж плазмового струменя, забезпечуючи перекриття послідовних областей вимірювання температури і швидкості частинок.

В системі відеофіксації використано інноваційний тепловізійний модуль, в якому застосовано новий підхід з інтеграції обробки інформації від високошвидкісної камери HD1-1312-1082-G2 (Photon-Focus, Швейцарія) і цифрового спектрометра LR1-T (ASEQ Instruments, Канада) (рис. 1в). Для інтеграції даного

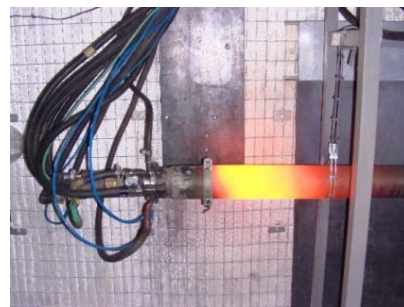
модуля в середовищі MATLAB розроблено M-клас об'єктів aSpectr, які представляють його у вигляді віртуального приладу з широким набором функціональних можливостей при часу експозиції спектрометра 10...100 мс. Апаратно-програмні засоби дослідної установки дозволяють здійснювати автоматичну реєстрацію та обробку даних параметрів процесу, в тому числі таких, як струм дуги, напруга на дузі, тиск та витрата плазмоутворюючого газу, швидкість подачі порошку у плазмовий струмінь, тощо. В якості дослідного матеріалу використовували сферичний порошок алюмінію АСД-1 фракції -15 – 45 мкм.

### Результати досліджень

Спеціальна реакторна система була спроектована і розроблена [33] з урахуванням попереднього відповідного спрощеного моделювання CASPSP – пакету комп'ютерних програм для моделювання дозвукових турбулентних плазмових струменів при атмосферному тиску [34]. Система дозволяє уникнути будь-якого окиснення металу під час плазмового розпилення, а також забезпечує швидке загартування газифікованого металу (рис. 2) [35].



*a*



*б*



*в*

**Рисунок 2.** Плазмово-струменевий реактор: *a* – схема, *б* – реактор в роботі, *в* – запиленна плазмова струмина

Утворені частинки збирали за допомогою кварцового фільтра за потоком плазмового струменя.

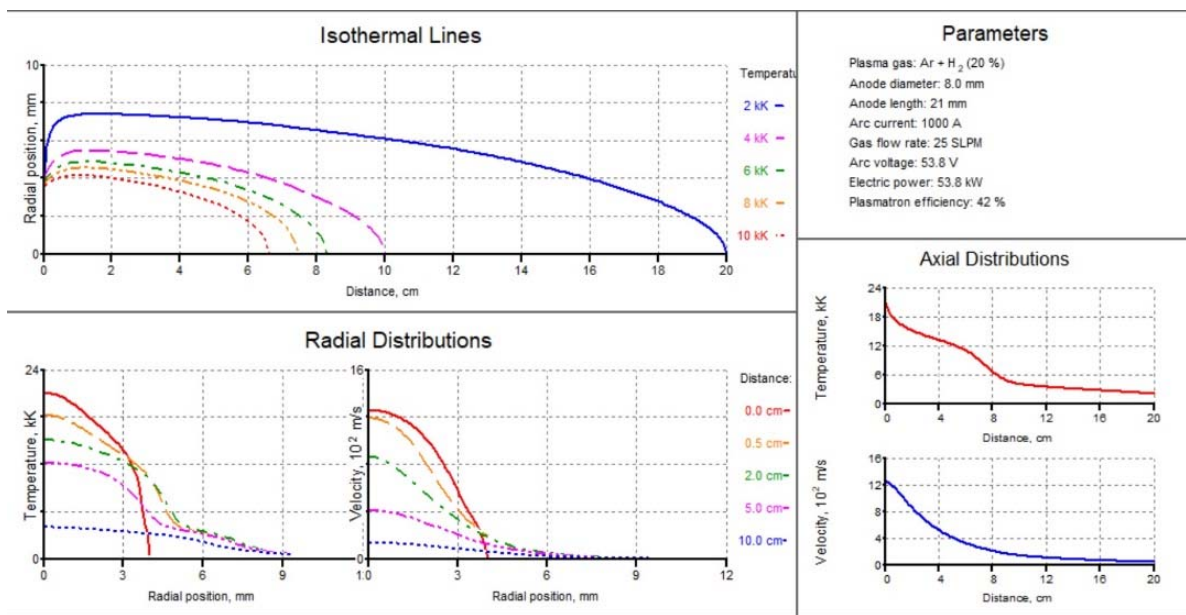
Процес починається з випаровування матеріалів-прекурсорів за рахунок високої ентальпії плазми, а згодом пара матеріалу переноситься до хвоста або

периферії плазми, де температура різко знижується. Цей температурний градієнт дозволяє формувати високонересичену пару, що призводить до швидкого утворення наночастинок шляхом гомогенної нуклеації, гетерогенної конденсації та коалесценції.

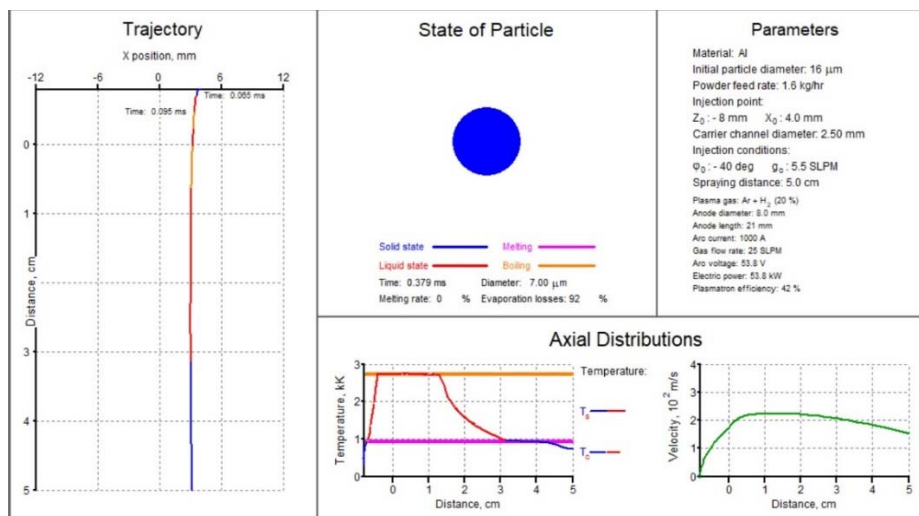
Ефективне випаровування вихідного матеріалу в польоті є необхідною і достатньою умовою для однорідного зародження наночастинок і росту нанопорошків однакового розміру Розглянемо це детальніше.

Перша стадія процесу – це повне випаровування вихідного порошку в плазмовому струмені досить точно моделюється. Математична модель фізичних процесів, що протікають у плазмовому струмені, а також під час його взаємодії з частинками порошкового матеріалу, дає змогу за допомогою пакета прикладних програм CASPSP реалізувати комп'ютерне моделювання нагріву та руху частинок у плазмовому

струмені й оцінити технологічні параметри процесу їх випаровування. Аналіз результатів моделювання плазмових процесів в електродуговому плазмотроні показує, що найсприятливіші умови для випаровування дрібнодисперсного порошку в плазмовому струмені (низька швидкість плазми при високій температурі) створюються в певному режимі роботи, і вся система масштабується. Основною зоною обробки алюмінієвого порошку в плазмовому струмені є високотемпературна зона (3000–15000 °C), довжина якої не перевищує 3–4 калібрів. З вжиттям спеціальних заходів ця довжина може бути збільшена в 1,5–2 рази. На рис. 3 наведено розподіл розрахункових параметрів плазмового струменя (а) і відповідних станів матеріалу частинок (б) для реактора, що наведений на рис. 1.



а



б

**Рисунок 3.** Розподіл параметрів плазмового струменя: а – і відповідних станів матеріалу частинок; б – для реактора (рис. 1). Частинки можуть випаровуватися через кілька міліметрів траєкторії залежно від властивостей частинок і плазми. Що стосується технологічних особливостей плазми, то в роботі [36] з використанням обчислюва-

льного методу виконано 3D моделювання залежно від часу плазмового струменя. Показано, що при накладанні однорідного магнітного поля за рахунок сил Лоренца та Джоулевого нагріву відбувається ламінаризація потоку, подовження плазмового струменя та температурний профіль стає більш заповненим. Це призводить до більш ефективного прогріву частинок порошку та придушення турбулентної дифузії парів та наночастинок вихорами, що в свою чергу впливає на їх формування. Експериментальна перевірка ефективності теоретично описаного явища з використанням дугового плазмотрона потужністю 30 та 150 кВт виконана в [33]. Визначальну роль у плазмово-струменевих процесах, пов'язаних з обробкою дисперсних матеріалів, відіграють швидкість і температура плазми та частинок порошку, його фракційний склад.

У реальних умовах дисперсна фаза, що транспортується плазмою, за фракційним складом може істотно відрізнитися від вихідного порошку [37]. Така відмінність є, в основному, результатом аеродинамічного дроблення розплавлених частинок (рис. 4).



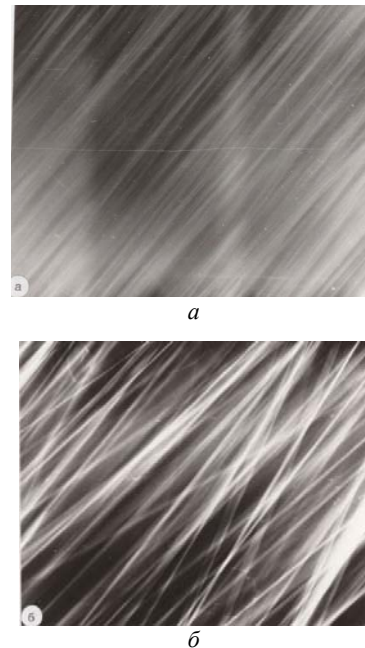
**Рисунок 4.** Дроблення часток алюмінію в плазмовій струмині: *а* – ділення розплавленої частинки, *б* – здування розплаву з поверхні частинки, *в* – утворення на поверхні подрібнених частинок

Дроблення може мати значний вплив на кінцевий результат процесу. Зокрема, під час плазмового синтезу наночастинок кероване дроблення може бути корисним. До позитивних результатів призводить поділ великих частинок на 2–3 дрібніші. При цьому функція розподілу частинок за розмірами зміщується в бік зменшення їхнього середнього діаметра ( $d_s$ ), середньоквадратичне значення відхилення  $(\Delta d_s)^2$  також зменшується.

Пов'язане з дробленням зменшення інерційності частинок обумовлює збільшення їх середньої швидкості, а зниження середньоквадратичного відхилення від середнього діаметра призводить до зменшення розкиду за швидкостями. Усе це забезпечує більш щільне і рівномірне пакування частинок у струмині (рис. 5). Частинки, що рухаються в потоці плазми, залишають на відеокадрі треки, що світяться, довжина яких пропорційна часу експозиції.

Інтенсифікація дроблення дисперсної сировини в плазмовому струмені доцільна в технологіях отримання наноматеріалів. Це пов'язано з тим, що повнота перетворення дисперсної сировини в цільовий продукт визначається ступенем її випаровування, а дроблення крапель розплаву прискорює їх кипіння. Зміну

фракційного складу дисперсної фази під час розплення можна розглядати як результат розплавлення або часткового оплавлення частинок і подальшого їх дроблення аеродинамічним впливом струменя.



**Рисунок 5.** Фотографії треків частинок алюмінію, що світяться, у плазмовому струмені: *а* – у результаті дроблення, *б* – за відсутності дроблення

Розглянемо одновимірну модель руху, нагрівання і дроблення розплавленої (спочатку) одиночної частинки стаціонарним потоком плазми [38, 39]. Оцінимо залежність відстані, пройдені розплавленою часткою до моменту дроблення, від швидкості й температури струменя, які прийняті постійними (останнє допущення виправдовується отриманими результатами розрахунків, що свідчать про малість цієї відстані). Модель базується на даних про дроблення крапель потоком, а також на нових результатах, отриманих в експериментах над водогліцериновими краплями в потоці повітря.

Стійкість і руйнування крапель під впливом аеродинамічних сил характеризують такими безрозмірними параметрами, як числа Вебера  $We$ , Лапласа  $Lp$ , Маха  $M$ , Бонда  $Bo$ , Рейнольдса  $Re$  та іншими, причому ступінь їхнього впливу на умови руйнування краплі різна. Найбільш важливим є число Вебера:

$$We = |\vec{V}_r - \vec{V}_s| \cdot \rho_r \cdot d_s / \sigma_{\text{пн}},$$

де  $\vec{V}_r$ ,  $\vec{V}_s$  – швидкості газу і краплі;  $d_s$ ,  $\sigma_{\text{пн}}$  – діаметр і поверхневий натяг краплі;  $\rho_r$  – густина газу.

Вплив числа Лапласа:

$$Lp = d_s \cdot \rho_s \cdot \sigma_{\text{пн}} / \eta_s,$$

де  $\eta_s$ ,  $\rho_s$  – коефіцієнт динамічної в'язкості та густини краплі відповідно має істотні значення лише для в'язких рідин (за  $Lp \leq 10$ ). Дані про вплив інших безрозмірних параметрів уривчасті та неповні.

Характер дроблення краплі буває різним в залежності від інтенсивності та часової зміни навантаження. Зазвичай розглядають три типи часової залежності навантаження краплі: а) різке збільшення відносної швидкості й потім плавне зменшення до моменту дроблення; б) плавне збільшення; в) плавне зростання і потім плавне зменшення навантаження. Кількісною характеристикою швидкості навантаження є безрозмірний параметр  $G$ :

$$G = \frac{d_s}{d_s \cdot \tau^*} We; \tau^* = \frac{\tau}{\tau_k}; \tau_k = 0,83(\rho_s \cdot d_s^3 / \sigma_{\text{пн}})^{0,5},$$

де  $\tau$  – поточний час,  $\tau_k$  – період власних коливань краплі.

Крапля руйнується при виконанні умови

$$We = We^*,$$

де  $We^*$  – критичне число Вебера, що дорівнює мінімальному числу Вебера, після досягнення якого крапля з деякою затримкою  $\tau_{\text{інд}}$ , яка називається часом індукції, обов'язково зруйнується. Для типів навантаження б), в) з приблизно лінійним законом наростання навантаження в часі обробка результатів експерименту показала, що за  $G = 3 - 97, L_p = (3,5 - 5,3) \cdot 10^5$  залежність числа  $We^*$  від параметрів  $G, L_p$  виражається інтерполяційною формулою:

$$We^* = 13,5 - 0,44a - (9,5 - 0,44a)e^{(0,005a - 0,25)G},$$

де  $a = \ln(L_p)$ .

Число  $G$  обчислюється на ділянці наростання числа Вебера за формулою:

$$G = [We(\tau^*) - We(\tau_0)] / (\tau^* - \tau_0)$$

де  $\tau_0, \tau^*$  – безрозмірні початковий момент часу і момент часу при виконанні умови  $We = We^*$ .

Для часу індукції  $\tau_{\text{інд}}$  отримано залежність:

$$\tau_{\text{інд}} = \tau_{\text{кр}} A e^{(8,4 \cdot 10^{-4} Re - 3,44)(We_{\text{max}} - We^*) / We^*},$$

$$A = 4,32 - 8,5 \cdot 10^{-4} Re \cdot (-0,15 - 4 \cdot 10^{-5} Re) \ln(L_p),$$

де  $We_{\text{max}} \geq We^*$  – максимальне значення числа Вебера після моменту часу  $\tau > \tau_{\text{кр}}$ ; число  $Re$  береться в момент часу  $\tau_{\text{кр}}$ .

Цю залежність встановлено для діапазонів  $Re = 2790 - 3620, L_p = (5,2 - 3,92) \cdot 10^5$ . У нашому випадку критерій  $Re$  значно менший унаслідок низької густини та високої в'язкості плазми. Однак через відсутність більш достовірних літературних даних в оціночних розрахунках використано зазначені залежності. У моделі для величин  $We^*$  та  $\tau_{\text{інд}}$ , бралися наведені залежності, причому вважалося  $G = \infty$ . Останнє пов'язано з тим, що під час плавлення частинки її поверхневий натяг зменшується практично стрибкоподібно, через що число  $We$  частинки спочатку різко зростає до деякого максимального значення і далі монотонно зменшується, що відповідає часовій залежності навантаження типу а).

Рівняння руху частинок має вигляд:

$$\frac{du_s}{dx} = 18 \cdot C_R \cdot \left( \frac{\eta_r}{\rho_s \cdot d_s^2 \cdot u_s} \right) \cdot (u_r - u_s),$$

де  $u_s$  – швидкість частинки,  $\eta_r$  – динамічна в'язкість газу,  $u_r$  – швидкість газу,  $C_R$  – коефіцієнт динамічного опору,  $x$  – шлях.

Нагрівання частинок описано співвідношенням:

$$\frac{dT_s}{dx} = 6 \cdot \left( \frac{Nu \cdot \chi_r}{C_p \cdot \rho_s \cdot d_s^2 \cdot u_s} \right) \cdot (T_r - T_s),$$

де  $T_s$  – температура частинки,  $T_r$  – температура частинки,  $\chi_r$  – коефіцієнт теплопередачі;  $C_p$  – теплоємність матеріалу частинки,  $Nu$  – критерій Нусельта.

Аналіз результатів розрахунку координати точки дроблення  $x_{\text{др}}$  і часу індукції  $\tau_{\text{інд}}$  показує, що для всіх вихідних параметрів частинок, що розглядалися, та в усіх режимах їхнього руху й нагрівання відзначаються наступні особливості:

- а) за фіксованих значень  $u_r, T_r$  величини мають тенденцію до спадання:  $x_{\text{др}}(d_s) \downarrow$  та:  $\tau_{\text{інд}}(d_s) \downarrow$ ;
  - б) за фіксованих  $u_r, d_s$  величини мають тенденцію до зростання:  $x_{\text{др}}(T_r) \uparrow$  та:  $\tau_{\text{інд}}(T_r) \uparrow$ ;
  - в) за фіксованих  $d_s, T_r$  величини мають тенденцію до спадання:  $x_{\text{др}}(u_r) \downarrow$  та:  $\tau_{\text{інд}}(u_r) \downarrow$ ,
- де через  $f(x) \uparrow, f(x) \downarrow$  позначено зростаючу й спадаючу функції.

Основний висновок, що впливає з проведеного аналізу, полягає в тому, що в плазмовоструменевих процесах, пов'язаних з обробленням порошків, можуть реалізуватися умови дроблення частинок різних матеріалів, а час, необхідний для руйнування частинки після досягнення критичних параметрів, на кілька порядків менший за характерних часів розгону і розігріву частинок до температури плавлення. Наслідком процесу дроблення є перерозподіл фракційного складу порошку вздовж плазмового струменя і супутні зміни динаміки та нагрівання частинок. Слід зазначити, що в потоці відбувається і коагуляція крапель. Однак досвід свідчить про те, що в умовах плазмового розпилення переважає дроблення.

Загальна математична модель руху, нагрівання, дроблення та коагуляції полідисперсних розплавлених крапель у потоці надзвичайно складна. В даний час прийнятне для практики рішення може бути отримано лише в окремих випадках. Модель дроблення полідисперсного порошку заснована на континуальному підході (нагадаємо, що при континуальному описі кожна частинка фракції ніби визначає всю фракцію і розпад частинки еквівалентний розпаду всіх частинок її фракції). Ця модель дає змогу встановити положення точки дроблення розплавленої частинки:  $x_{\text{др}}$ , фракційний склад уламків, знайти швидкість і температуру частинки на ділянці від точки її плавлення  $x_{\text{пл}}$  до  $x_{\text{др}}$ . Залежність стану дисперсного пото-

ку, що рухається з великим ковзанням у плазмі, від розмірів розплавлених крапель наведено на рис. 6.

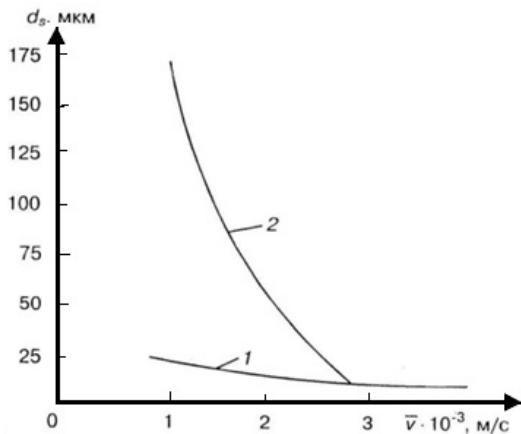


Рисунок 6. Стан дисперсної фази в потоці плазми при випаровуванні –1 і дробленні –2

Пульсації несучого потоку плазми можуть інтенсифікувати дроблення розплавлених частинок порошку. Дроблення крапель стимулюється при резонансних коливаннях середовища і самої краплі. Оцінки показують, що на режимах, що реалізуються в плазмотронах із самоустановлювальною дугою, внаслідок пульсацій параметрів дроблення крапель відбувається за меншого значення критичного числа Вебера, ніж у стаціонарному потоці. Взагалі дрібні частинки розміром до 50 мкм не розпадаються, а мелені, неправильної форми, стають сферичними. Для частинок розміром понад 60 мкм із матеріалів із низькою теплопровідністю дроблення відбувається за рахунок зриву високошвидкісним потоком плазми прикордонного шару розплаву (рис. 4б). Винесення маси рідини з периферійного прикордонного шару визначається швидкістю ковзання, температурою розплаву і розміром частинки. Розпад частинок з високою теплопровідністю відбувається за рахунок як їхньої деформації і поділу на дві або більше частинок, так і зриву прикордонного шару (рис. 4а, в). В умовах плазмового розпилення інтенсивністю дроблення дисперсних частинок можна також керувати шляхом модуляції параметрів плазмової дуги. Плазмотрон при цьому стає джерелом ударних хвиль, які взаємодіють з частинкою під час її польоту. Задаючи частоту проходження імпульсів струму, шпаруватість, полярність і амплітуду, можна отримати різний ступінь дроблення частинок.

У загальному випадку оброблюваний порошковий матеріал має велику дисперсію розмірів частинок і зазвичай вводиться у високотемпературну частину плазмового струменя по нормалі до її осі. Частинки різного діаметра мають різні траєкторії руху і різні часи перебування у високотемпературній частині струменя. Це призводить до різних часових і температурних історій частинок, на яких відбуваються такі стадії: нагрівання твердої фази, плавлення, нагрівання рідкої фази і часткове або повне випаровування. Ці

стадії можна вважати послідовними для матеріалів з високою теплопровідністю (для алюмінію 236 Вт/м К). Швидкість теплопередачі через прикордонний шар пропорційна площі поверхні частинки, тоді як кількість матеріалу, що нагрівається, пропорційна його об'єму. Тому тривалість кожної з цих чотирьох стадій пропорційна діаметру частинок. Оскільки умови роботи плазмотрону, як правило, встановлюються для середнього діапазону розміру частинок, дрібні частинки, що потрапили в потік, можуть випаровуватися через кілька міліметрів подорожі. Змішування пари з плазмовим газом може змінити нагрівання інших частинок. Коли температура найбільших частинок алюмінію досягає 2500 °С, розрахункова загальна кількість випарованої маси дорівнює 100%. Молекули пари повинні дифундувати через прикордонний шар що оточує розплавлену сферу рис. 7а [40].

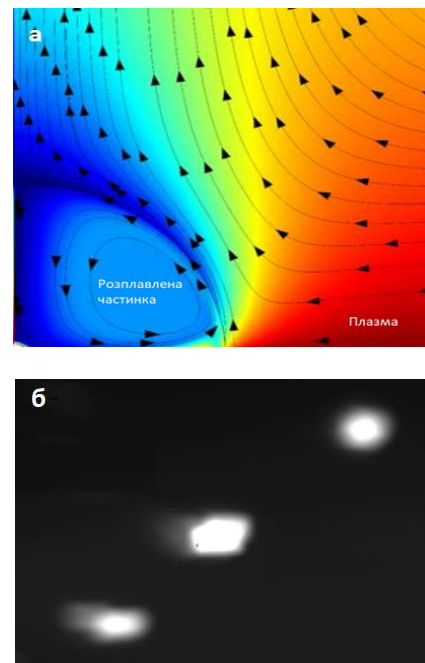
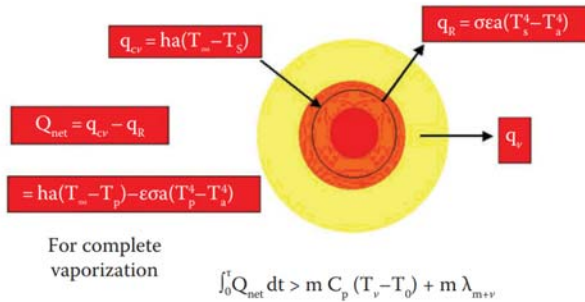


Рисунок 7. Випаровування частинки в плазмовому струмені: а – моделювання температурних полів та ліній течії газу в області біля поверхні краплі в потоці плазми; б – здування пари з поверхні розплавленої краплі в польоті

В інертному газі тиск парів металу навколо кулі зростає і швидкість випаровування, якщо ослаблена дифузія, зменшується. Поведінку хмари парів навколо частинки в плазмовому струмені (рис. 7б) досліджували експериментально методом емісійної спектроскопії за випромінюванням збуджених атомів металу і чисельним моделюванням [41–43]. Струміння плазми з пиловими частинками досліджено за допомогою мультигідродинамічної моделі, яка враховує вплив електричного поля на динаміку частинок пилу [44]. Досліджено просторові розподіли частинок пилу та їхніх швидкостей у плазмовому струмені при різних ступенях іонізації плазми, густинах плазми на вході та розмірах пилових частинок. Показано, що при великому ступені іонізації плазми ( $\alpha > 0,001$ ) швидкість

частинок пилу суттєво зменшується порівняно з випадком слабкоіонізованого плазмового потоку внаслідок їхнього гальмування електричним полем.

Для того, щоби забезпечити випаровування частинки, повна чиста енергія, яку вона поглинає повинна бути більшою, ніж сума енергії, необхідної для нагрівання до температури випаровування, та її прихованої енергії плавлення і випаровування. Рисунок 8 ілюструє такий аналіз енергетичного балансу для плазмового випаровування частинки в польоті.



**Рисунок 8.** Аналіз теплового балансу при плазмовому випаровуванні порошків в польоті, що подаються в плазмову струмину [45]

В реальному процесі просторові розподіли параметрів плазми та частинок, отримані в різні моменти часу після інжекції металевих частинок в плазмовий струмінь до повного випаровування значно відрізняються. Для вдосконалення системи плазмового синтезу наночастинок дуже важливо параметрично уточнити характеристики дисперсної фази у польоті. Основними параметрами, що впливають на поведінку частинок, є діаметр частинок, швидкість впорскування порошку, швидкість потоку, температура і склад плазмового газу. На останньому етапі, коли починається випаровування, частинки транспортуються у суміші змінного складу з плазмової атмосфери і пари. Коли відбувається випаровування (рис. 7б), перенесення маси від поверхні частинок до плазмового газу зменшує ефективну тепловіддачу: ентальпія, спрямована до поверхні використовується для забезпечення прихованої теплоти випаровування і для нагрівання пари в приміжовому шарі. Дифузія пари змінює газовий склад плазми і, отже, її транспортні властивості. Потік випаровування зростає з 19.7 до 35.5 кг/м<sup>2</sup>, коли температура газу зростає з 5500 до 7500 К [41]. Еволюція температури вздовж хмари пари навколо частинки на різних відстанях від точки інжекції наступна. У ядрі плазмового струменя температура не змінюється і різко зменшується за її межами. Визначення радіуса хмари пари, що оточує окрему частинку (складає декілька міліметрів) не дозволяє вважати можливість повного випаровування в оточенні плазми. Температура в зоні дифузії майже однорідна, близька до температури плазмового потоку, а товщина дифузійної зони може перевищувати радіуси частинок у десятки разів [46]. Реалізація оптимальної ситуації, коли нагрів і випаровування випереджають змішування пари з плазмою, дозволить вести процес на підвищеній продуктивності.

## Обговорення

Стосовно продуктивності отримання наноалюмінію на теперішній час ситуація виглядає наступним чином. Термічна дугова плазма прямої дії з випаровуванням алюмінієвої пари в реакторі (TAPR) (виробник: TEKNA Inc. Canada) [47] при оптимальній потужності 22 кВт дозволяє отримувати 50 г/год наноалюмінію з розміром часток 50–250 нм.

В установці Thermal Plasma Nanopowder Synthesis System TP 40020NPS японської компанії JEOL Ltd [48] використовується струменева термічна плазма на основі аргону з додавкою інших газів, таких як кисень, азот і водень. У струмінь плазми вводять сировинні матеріали у вигляді дрібних частинок з розміром десятки мікрон. У плазмі відбувається їхнє плавлення, випаровування і хімічні реакції. Перетворення на кінцевий продукт відбувається миттєво. Максимальна потужність установки 6 кВт. Продуктивність – 0,1 – 1 г/хв залежно від властивостей матеріалу.

Нинішні методи виробництва нанопорошків дорогоартісні і становлять 30 000 доларів США за 1 кг. Найбільш потужна установка (до 200 кВт) Teknapo-200 Plasma Nanopowder Synthesis канадської компанії «Tekna» на основі індукційної плазмової технології з робочими газами (Ar, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, He і т. п.) забезпечує продуктивність до кількох кг/год наноматеріалів залежно від їх властивостей [49]. Накопичений досвід авторів став основою для проектування ефективних промислових виробництв порошків з використанням плазмових реакторів на базі електродугового плазмотрона з виготовленням плазмохімічних установок синтезу нанопорошків продуктивністю 17 кг/год при потужності плазмотрона 250 кВт [35].

## Висновки

Алюмінієвий матеріал має хороші властивості для застосування, особливо якщо він виготовлений у вигляді наночастинок. Існує потреба в більш дешевому процесі для виробництва наноалюмінію.

Очікується, що термічна плазмова обробка зробить значний внесок у процеси отримання і широкомасштабного застосування наночастинок. Високопродуктивний синтез функціональних наночастинок можна реалізувати за допомогою термічної плазмової обробки вихідного матеріалу оскільки температура синтезу наночастинок набагато вища ніж у інших методів.

Ключовою проблемою для підвищення продуктивності є швидкість випаровування частинок і пов'язаний з нею енергетичний баланс. Результати аналізу показують, що енергія, яка втрачається на об'ємне випромінювання хмари плазми/пари металу, є найважливішою енергетичною потребою процесу, і яка .

Наступні зусилля необхідно присвятити розвитку повної плазмової системи виробництва наноалюмінієвого пилу, які можуть забезпечити щільний розподіл за розмірами та забезпечити високу продуктивність.



### Список літератури

1. Ghorbani, H.R. A Review of Methods for Synthesis of Al Nanoparticles [Text] / H.R. Ghorbani // *Oriental Journal of Chemistry*. – 2014. – Vol. 30, Iss. 4. – P. 1941–1949. doi.org/10.13005/ojc/300456
2. Kolahalam, L. A. Review on nanomaterials: Synthesis and applications [Text] / L. A. Kolahalam, I. V. Kasi Viswanath, B. S. Diwakar, B. Govindh, V. Reddy, Y. L. N. Murthy // *Materials Today: Proceedings*. – 2019. – Vol. 18, Iss. 6. – P. 2182–2190. doi:10.1016/j.matpr.2019.07.371
3. Salem, S. S. A Comprehensive Review of Nanomaterials: Types, Synthesis, Characterization, and Applications [Text] / S. S. Salem, E. N. Hammad, A. A. Mohamed, W. El-DougDoug // *Biointerface Research in Applied Chemistry*. – 2023. – Vol. 13, Iss. 1, 41. doi: doi.org/10.33263/BRIAC131.041
4. Puszynski, J.A. Formation, Characterization and Reactivity of Nanoenergetic Materials [Text] : Proceedings of the 29th International Pyrotechnic Conference / J. A. Puszynski // Westminster, CO, USA, 2002. – P. 191–202.
5. Groza, J. R. Sintering of Nanocrystalline Powders [Text] / J. R. Groza // *International Journal of Powder Metallurgy*. – 1999. – Iss. 35(7). – P. 59–66.
6. Hull, M. Tetronics: Plasma Processing Holds Key to Consistent Nanopowders [Text] / M. Hull // *Powder Metall.* – 2002. – Vol. 45, Iss. 1. – P. 8–9. doi: 10.1179/pom.2002.45.1.8
7. Paskalov, G., Plasma Processing of Aluminium Nano-fuel. Retrieved from: <https://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc20/3.pdf>
8. Settumba, N. Modeling and Simulation of Nano-aluminium Synthesis in a Plasma Reactor [Text] / N. Settumba, S. C. Garrick // *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. – 2007. – Vol. 6, Iss. 5. – P. 651–663. doi: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v6.i5.70
9. Jiayin, G. Development of Nanopowder Synthesis Using Induction Plasma [Text] / G. Jiayin, F. Xiaobao, R. Dolbec, X. Siwen, J. Jurewicz, M. Boulos // *Plasma Science and Technology*. – 2010. – Vol. 12, Iss. 2. – P. 188–199. doi: 10.1088/1009-0630/12/2/12
10. Kearns, M. Development and Applications of Ultrafine Aluminium Powders [Text] / M. Kearns // *Materials Science and Engineering A*. – 2004. – Vol. 375, Iss. 1. – P. 120–126. doi: 10.1016/j.msea.2003.10.160
11. Seo, J.-Ho Thermal Plasma Synthesis of Nano-Sized Powders [Text] / J.-Ho Seo, B.-G. Hong // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2012. – Vol. 44, Iss. 1. – P. 9–20. doi: 10.5516/NET.77.2012.002
12. Yamamoto N., Nishiyama T., Nagayama K., Process Controlled Synthesis of Aluminum Nanoparticles as a Next Generation Propellant; <http://www.aero.kyushu-u.ac.jp/aml/laser/Al%20nano.pdf>.
13. Radial Pulse Arc Discharge Gun for Synthesizing Nanopowders [Text] / Schroder K.A., Jackson D.K. – Patent US 2005/0000950 A1, 2005.
14. Yanik, B. Synthesis and Characterization of Aluminium Nanoparticles by Electric Arc Technique [Text] / B. Yanik, H Agustos. Y. Ipek, A. Koyun, D. Uzunsoy // *Arabian Journal for Science and Engineering*. – 2013. – Vol.39, Is. 12. – P. 3587–3592. doi: 10.1007/s13369-013-0621-2
15. Faraji, M. The Effect Of Surfactant on Colloidal Stability, Oxidation and Optical Properties of Aluminium Nanoparticles via DC Arc Discharge in Water [Text] / M. Faraji, R. Poursalehi, A. Fkhazraei // *Procedia Materials Science*. – 2015. – Iss. 11. – P. 684–688. doi: 10.1016/j.mspro.2015.11.029
16. Физика и химия горения нанопорошков металлов в азотсодержащих газовых средах [Текст] / под ред. А.А. Громова. – Томск: Издательство Томского университета, 2007. – 332 с.
17. Kwon, Y.-S. Ultrafine Powder by Wire Explosion Method [Text] / Y.-S. Kwon, J.-H. Jung, N.A. Yavorovsky, A. P. Illyn, J.-S. Kim // *Scripta Materialia*. – 2001. – Vol. 344, Iss. 8. – P. 2247–2251. doi: 10.1016/S1359-6462(01)00757-6
18. Sarathi, R. Generation of Nano Aluminium Powder Through Wire Explosion Process and its Characterisation [Text] / R. Sarathi, T.K Sindhu., S.R. Chakravarthy // *Materials Characterization*. – 2007. – Vol. 58, Iss. 2. – P. 148–155. doi: 10.1016/j.matchar.2006.04.014
19. Tepper, F. Nanosize Powders Produced by Electro-explosion of Wire and Their Potential Applications [Text] / F. Tepper // *Powder Metallurgy*. – 2000. – Vol. 43, Iss. 4. – P. 320–322.
20. Li, H. Templated Synthesis of Aluminium Nanoparticles-A New Route to Stable Energetic Materials [Text] / H. Li, M.J. Meziani, F. Lu, C.E. Bunker, E.A. Gulians, Ya-P. Sun // *The Journal of Physical Chemistry C*. – 2009. – Vol. 113, Iss. 48. – P. 20539–20542. doi: 10.1021/jp908681p
21. Chung, S.W. Capping and Passivation of Aluminium Nanoparticles Using Alkyl Substituted Epoxides [Text] / S.W. Chung, E.A. Gulians, C.E. Bunker, D.W. Hammerstroem, Y. Deng, M.A. Burgers, P.A. Jelliss, S.W. Buckner // *Langmuir*. – 2009. – Vol.s25, Iss. 16. – P. 8883–8887. doi: 10.1021/la901822h
22. Foley, T.J. Inhibitions of Oxide Formation on Aluminium Nanoparticles by Transition Metal Coating [Text] / T.J. Foley, C.E. Johnson, K.T. Higa // *Chemistry of Materials*. – 2005. – Vol.17, Iss. 16. – P. 4086–4091. doi: 10.1021/cm047931k
23. Haber, J.A. Kinetic Instability of Nanocrystalline Aluminium Prepared by Chemical Synthesis; Facile Room-temperature Grain Growth [Text] / J.A. Haber, W.E. Buhro // *American Chemical Society*. – 1998. – Vol. 120, Iss. 42. – P. 10847–10855. doi: doi.org/10.1021/ja981972y
24. Jouet, R.J. Surface Passivation of Bare Aluminium Nanoparticles Using Perfluoroalkyl Carboxylic Acids [Text] / R.J. Jouet R.J., A.D. Warren, D.M. Rosenberg, V.J. Bellitto, K. Park, M.R. Zachariah // *American Chemical Society*. – 2005. – Vol.s17, Iss. 11. – P. 2987–2996. doi: 10.1021/cm048264y

25. Ghanta, S.R. Chemical Synthesis of Aluminium Nanoparticles [Text] / S.R. Ghanta, K. Muralidharan // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2013. – Vol. 15, Iss. 6. – P. 1–10. doi: 10.1007/s11051-013-1715-1
26. Gottapu, S. Poly(vinylpyrrolidone) Stabilized Aluminium Nanoparticles Obtained by the Reaction of SiCl<sub>4</sub> with LiAlH<sub>4</sub> [Text] / S. Gottapu, S.K. Padhi, M.G. Krishna M.G., K. Muralidharan // *New Journal of Chemistry*. – 2015. – Vol. 39, Is. 7. – P. 5203–5207. doi: 10.1039/C5NJ00438A
27. Lui, Y. Synthesis of Size Controlled and Discrete Core Shell Aluminium Nanoparticles with a Wet Chemical Process [Text] / Y. Lui, S. Zhao, D. Tao, Z. Liang, D. Huang, Z. Xu // *Materials Letters*. – 2014. – Vol. 121, – P. 54–57. doi: 10.1016/j.matlet.2014.01.122
28. Eom, N. Synthesis and Characterization of Agglomerated Coarse Al Powders Comprising Nanoparticles by Low Energy Ball Milling Process [Text] / N. Eom, M.H. Bhuiyan, T.-S. Kim, S.-J. Hong // *Materials Transactions*. – 2011. – Vol. 52, Iss. 8. – P. 1674–1678. doi: 10.2320/matertrans.M2011059
29. Abdoli H. Thermal Stability of Nanostructured Aluminum Powder Synthesized by High-energy Milling [Text] / H. Abdoli, M. Ghanbari, S. Baghshahi // *Materials Science and Engineering: A*. – 2011. – Vol. 528, Iss. 22–23. – P. 54–57. doi: 10.1016/j.matlet.2014.01.122
30. Sundaram, D. S. Combustion of Nano Aluminum Particles (Review) [Text] / D. S. Sundaram, V. Yanga, V. E. Zarkob // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2015. – Vol. 51, Iss. 2. – P. 173–196. doi: 10.1134/S0010508215020045
31. Пивкина, А. Наноалюминиевые порошки, синтезированные в плазме. Структура, термические свойства и поведение при горении [Текст] / А. Пивкина, Д. Иванов, Ю. Фролов, С. Мудрецова, А. Никольская, Дж. Шунман // *Журнал термического анализа и калориметрии*. – 2004. – № 2. – С. 11–16.
32. Gulyaev, I. Arc-plasma wire spraying: an optical study of process phenomenology [Text] / I. Gulyaev, A. Dolmatov, M. Kharlamov, I. Krivtsun, V. Korzhyk // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2015. – Vol. 24. – P. 1566–1573. doi: 10.1007/s11666-015-0356-6
33. Petrov, S. Consideration of the possibility of large-scale plasma-chemical production of nanosilicon for lithium-ion batteries [Text] / S. Petrov, S. Bondarenko, S. Koichi // *Technology audit and production reserves*. – 2022. – № 3/3(65). – P. 6–14. doi: 10.15587/2706-5448.2022.259066
34. CASPSP [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://www.plasma.kiev.ua/results/caspsp3.html>
35. Петров, С.В. Инновационные плазменно-струйные технологии [Текст] / С. В. Петров. – LAMBERT Academic Publishing. 2021. – 104 с.
36. Shigeta, M. Numerical study of axial magnetic effects on a turbulent thermal plasma jet for nanopowder production using 3D time-dependent simulation [Text] / M. Shigeta // *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*. – 2018. – Vol. 6, Iss. 2. – P. 107–123. doi: 10.4236/jfcmv.2018.62010
37. Петров, С.В. Плазменное газоздушное напыление [Текст] / С. В. Петров, И. Н. Карп. – К. : Наука, 1993. – 495 с.
38. Kharlamov, M. Simulation of motion, heating and breakup of molten metal droplets in the plasma jet at plasma-arc spraying / M. Kharlamov, I. Krivtsun, V. Korzhyk, O. Demyanov // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2015. – Vol. 24. – P. 659–670. doi: 10.1007/s11666-015-0216-4
39. Kharlamov, M. Dynamic model of the wire dispersion process in plasma-arc spraying / M. Kharlamov, I. Krivtsun, V. Korzhyk // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2014. – Vol. 23. – P. 420–430. doi: 10.1007/s11666-013-0027-4
40. Akkus, Y. The effect of stefan flow on the models of droplet evaporation [Text] / Y. Akkus // *Journal of Thermal Science and Technology*. – 2020. – Vol. 40, Iss. 2. – P. 309–318. doi: doi.org/10.47480/isibted.817053
41. Vardelle, M. Coating generation: Vaporization of particles in plasma spraying and splat formation [Text] / M. Vardelle, A. Vardelle, K.-I. Li, P. Fauchais // *Pure and Applied Chemistry*. – 1996. – Vol. 68, Iss. 5. – P. 1093–1099.
42. Wan, Y.P. Modeling and experimental observation of evaporation from oxidizing molybdenum particles entrained in a thermal plasma jet [Text] / Y.P. Wan, J.R. Fincke, S. Sampath, V. Prasad, H. Herman // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2002. – Vol. 45, Iss. 5. – P. 1007–1015. doi: doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00214-9
43. Onda, K. Numerical study on the evaporation process of feedstock powder under transient states in pulse-modulated induction thermal plasmas for nanoparticle synthesis [Text] / K. Onda, Y. Tanaka, K. Akashi, R. Furukawa, Y. Nakano, T. Ishijima, Y. Uesugi, S. Sueyasu, S. Watanabe, K. Nakamura // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2020. – Vol. 53, Iss. 32. – P. 325201. doi: doi.org/10.1088/1361-6463/ab8419
44. Kravchenko, O.Yu. Dynamics of dust particles in a plasma jet [Text] / O.Yu. Kravchenko, I.S. Maruschak // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2017. – № 1. – С. 159–162.
45. Leblanc, D. Silicon nanopowder synthesis by inductively-coupled plasma as anode for high-energy Li-ion batteries [Text] / D. Leblanc, R. Dolbec, A. Guerfi, J. Guo, P. Hovington, M. Boulos, K. Zaghbi // *In book: Silicon Nanomaterials Sourcebook*. – 2017. – P. 463–484. doi: 10.1201/9781315153551-24
46. M. Vardelle, M. Experimental and numerical investigation of powder vaporization under thermal plasma conditions [Текст] / M. Vardelle, A. Vardelle, P. Fauchais, C. Trassy P. Proulx // *Journal de Physique Colloques*. – 1990. – Iss. 2. P. C5–171–C5-180. doi: 10.1051/jphyscol:1990521
47. Pant, A. Preparation of Nano Aluminium Powder (NAP) using a Thermal Plasma: Process Development and Characterization [Text] / A. Pant, T. Seth, V. Raut, V. Prakash, S. Pralhad, A. K. Nandi,

H. Prasanth, R. K. Pandey // Central European Journal of Energetic Materials. – 2016. – Vol. 13, Iss. 1. – P. 53–71. doi: 10.22211/cejem/64964

48. Jeol. Products. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.jeol.com/products/>

49. Tekna plasmasonic product line. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.tekna.com/plasmasonic>

Одержано 05.03.2024

## TO HIGHLY PRODUCTIVE SYNTHESIS OF ALUMINUM NANOPARTICLES IN PLASMA FLOW AT ATMOSPHERIC PRESSURE

- Petrov S. Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, *e-mail*: [vizana.sp@gmail.com](mailto:vizana.sp@gmail.com), ORCID: 0000-0003-0373-8003
- Korzhyk V. Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Head of Department of Electrothermal Material Processing of The Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, *e-mail*: [vnkorzhyk@gmail.com](mailto:vnkorzhyk@gmail.com), ORCID: 0000-0001-9106-8593
- Bondarenko S. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technology of Inorganic Substances, Water Treatment and General Chemical Technology of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine, *e-mail*: [s\\_g\\_bondarenko@ukr.net](mailto:s_g_bondarenko@ukr.net), ORCID: 0000-0001-9590-4747
- Strohonov D. PhD (Materials Science), Researcher, Department of Electrothermal Material Processing of the Paton Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, *e-mail*: [strogonovd94@gmail.com](mailto:strogonovd94@gmail.com), ORCID: 0000-0003-4194-764X

**Purpose.** To study the highly productive evaporation of aluminum micron powder in an atmospheric pressure plasma jet for the synthesis of nanoaluminum. Using special plasma technology, nanoparticles can be produced by rapid melting and evaporation of the initial micrometer particles and their subsequent re-nucleation.

**Research methods.** Methods of mathematical and computer modeling of subsonic plasma turbulent jets at atmospheric pressure and experimental studies of two-phase processes during thermal plasma treatment using an arc plasma torch.

**Results.** Based on computer modeling, a special reactor system was designed and developed, which includes a plasma-jet reactor with an electric arc plasma torch for the synthesis of aluminum nanoparticles. Numerical modeling makes it possible to determine the position of the melting point, evaporation and crushing of a molten particle, the evolution of the fractional composition of the dispersed phase, and find the speed and temperature of the particle in the area from its melting point to the crushing point. An experimental test of the operation of the reactor system was carried out using arc plasma torches with a power of 30 and 150 kW. It has been shown that intensifying the fragmentation of dispersed raw materials in a plasma jet can be useful in technologies for producing nanomaterials. The consequence of the fragmentation process is the redistribution of the fractional composition of the powder along the plasma jet and the accompanying changes in the dynamics of movement, heating and evaporation of particles. It has been determined that when the temperature of the largest aluminum particles reaches 2500 C, the total amount of evaporated mass is theoretically equal to 100%. The main parameters influencing the behavior of particles in a plasma jet are particle diameter, powder injection rate, flow rate, temperature and composition of the plasma gas. Taking these parameters into account will allow the process to operate at increased productivity.

**Scientific novelty.** A mathematical description of the process of fragmentation a polydisperse powder, based on a continuum approach, has been obtained, which makes it possible to determine the position of the crushing point of a molten particle, the fractional composition of the dispersed phase, and find the speed and temperature of the particle in the area from its melting point to the point of crushing and evaporation. It was shown for the first time that it is possible to carry out a process in which complete evaporation of a molten drop is achieved due to the high enthalpy of the plasma before the end of mixing with steam.

**Practical value.** A special reactor system has been designed and developed, which includes a plasma-jet reactor with an electric arc plasmatron for the synthesis of aluminum nanoparticles. The operating parameters of the reactor system have been determined, which will allow the synthesis of aluminum nanoparticles to be carried out with high productivity.

**Key words:** nanopowders, aluminum nanoparticles, plasma, plasma reactor, plasma jet, mathematical modeling.

## References

1. Ghorbani, H.R. (2014). A Review of Methods for Synthesis of Al Nanoparticles. *Oriental Journal of Chemistry*, 30, 4, 1941-1949. doi: doi.org/10.13005/ojc/300456
2. Kolahalam, L. A., Kasi Viswanath, I. V., Diwakar, B. S., Govindh, B., Reddy, V., & Murthy, Y. L. N. (2019). Review on nanomaterials: Synthesis and applications. *Materials Today: Proceedings*, 18, 6, 2182–2190. doi:10.1016/j.matpr.2019.07.371
3. Salem, S. S., Hammad, E. N., Mohamed, A. A., El-Dougdoug W. (2023). Comprehensive Review of Nanomaterials: Types, Synthesis, Characterization, and Applications. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13, 1, 41. doi: doi.org/10.33263/BRIAC131.041
4. Puszynski, J.A. (2002). Characterization and Reactivity of Nanoenergetic Materials. *Proceedings of the 29th International Pyrotechnic Conference*, Westminster, CO, USA, 191–202.
5. Groza, J. R. (1999). Sintering of Nanocrystalline Powders. *Int. J. Powder Metallurgy*, 35(7), 59–66.
6. Hull, M. (2002). Tetronics: Plasma Processing Holds Key to Consistent Nanopowders. *Powder Metall*, 45(1), 8–9. doi: 10.1179/pom.2002.45.1.8
7. Paskalov, G., Plasma Processing of Aluminium Nano-fuel. Retrieved from: <https://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc20/3.pdf>
8. Settumba, N., Garrick, S.C. (2007). Modeling and Simulation of Nano-aluminium Synthesis in a Plasma Reactor. in: *Advancement in Energetic Materials and Chemical Propulsion*. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 6, 5, 651–663. doi: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v6.i5.70
9. Jiayin, G., Xiaobao F., Dolbec R., Siwen X, Jurawicz J., Boulos M. (2010). Development of Nanopowder Synthesis Using Induction Plasma. *Plasma Science and Technology*, 12, 2, 188–199. doi: 10.1088/1009-0630/12/2/12
10. Kearns, M. (2004). Development and Applications of Ultrafine Aluminium Powders. *Materials Science and Engineering A*, 375, 1, 120–126. doi: 10.1016/j.msea.2003.10.160
11. Seo, J.-Ho, Hong, B.-G. (2012). Thermal Plasma Synthesis of Nano-Sized Powders. *Nuclear Engineering and Technology*, 44, 1, 9–20. doi: 10.5516/NET.77.2012.002
12. Yamamoto N., Nishiyama T., Nagayama K., Process Controlled Synthesis of Aluminum Nanoparticles as a Next Generation Propellant; <http://www.aero.kyushu-u.ac.jp/aml/laser/Al%20nano.pdf>.
13. Schroder, K.A., Jackson, D.K. (2005) Radial Pulse Arc Discharge Gun for Synthesizing Nanopowders, Patent US 2005/0000950 A1.
14. Yanik, B. Agustos, H., Ipek, Y., Koyun, A., Uzunsoy, D. (2013). Synthesis and Characterization of Aluminium Nanoparticles by Electric Arc Technique. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 12, 3587–3592. doi: 10.1007/s13369-013-0621-2
15. Faraji, M., Poursalehi, R., Fkhazraei, A. (2015). The Effect Of Surfactant on Colloidal Stability, Oxidation and Optical Properties of Aluminium Nanoparticles via DC Arc Discharge in Water. *Procedia Materials Science*. 11, 684–688. doi: 10.1016/j.mspro.2015.11.029
16. Gromov, A.A ed. (2007). *Fizika i khimiya goreniya nanoporoshkov metallov v azotsoderzhashchikh gazovikh sredakh* [Physics and chemistry of combustion of metal nanopowders in nitrogen-containing gaseous media]. Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo universitetata, 332. [in Russian].
17. Kwon, Y.-S., Jung, J.-H., Yavorovsky, N.A., Illyn, A.P., Kim, J.-S. (2001). Ultrafine Powder by Wire Explosion Method. *Scripta Materialia*, 44, 8, 2247–2251. doi: 10.1016/S1359-6462(01)00757-6
18. Sarathi, R., Sindhu, T.K., Chakravarthy, S.R. (2007). Generation of Nano Aluminium Powder Through Wire Explosion Process and its Characterisation. *Materials Characterization*, 58, 2, 148–155. doi: 10.1016/j.matchar.2006.04.014
19. Tepper, F. (2000). Nanosize Powders Produced by Electro-explosion of Wire and Their Potential Applications. *Powder Metallurgy*, 43, 4, 320–322.
20. Li, H., Meziani, M.J., Lu, F., Bunker, C.E., Guliants, E.A., Sun, Ya-P.(2009). Templated Synthesis of Aluminium Nanoparticles-A New Route to Stable Energetic Materials, *The Journal of Physical Chemistry C*, 113, 48, 20539–20542. doi: 10.1021/jp908681p
21. Chung, S.W., Guliants. E.A., Bunker, C.E., Hammerstroem, D.W., Deng, Y., Burgers, M.A., Jelliss, P.A., Buckner, S.W. (2009). Capping and Passivation of Aluminium Nanoparticles Using Alkyl Substituted Epoxides. *Langmuir*, 25, 16, 8883–8887. doi: 10.1021/la901822h
22. Foley, T.J., Johnson, C.E., Higa, K.T. (2005). Inhibitions of Oxide Formation on Aluminium Nanoparticles by Transition Metal Coating. *Chemistry of Materials*, 17, 16, 4086–4091. doi: 10.1021/cm047931k
23. Haber, J.A., Buhro, W.E. (1998) Kinetic Instability of Nanocrystalline Aluminium Prepared by Chemical Synthesis; Facile Room-temperature Grain Growth. *American Chemical Society*, 120, 42, 10847–10855. doi.org/10.1021/ja981972y
24. Jouet, R.J., Warren, A.D., Rosenberg, D.M., Bellitto, V.J., Park, K., Zachariah, M.R. (2005) Surface Passivation of Bare Aluminium Nanoparticles Using Perfluoroalkyl Carboxylic Acids. *American Chemical Society*, 17, 11, 2987–2996. doi: 10.1021/cm048264y
25. Ghanta, S.R., Muralidharan, K. (2013) Chemical Synthesis of Aluminium Nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, 15, 6, 1–10. doi: 10.1007/s11051-013-1715-1
26. Gottapu, S., Padhi, S.K., Krishna, M.G., Muralidharan K. (2015). Poly(vinylpyrrolidone) Stabilized Aluminium Nanoparticles Obtained by the Reaction of SiCl<sub>4</sub> with LiAlH<sub>4</sub>. *New Journal of Chemistry*, 39, 7, 5203–5207. doi: 10.1039/C5NJ00438A

27. Lui, Y., Zhao, S., Tao, D., Liang, Z., Huang, D., Xu, Z. (2014). Synthesis of Size Controlled and Discrete Core Shell Aluminium Nanoparticles with a Wet Chemical Process. *Materials Letters*, 121, 54–57. doi: 10.1016/j.matlet.2014.01.122
28. Eom, N., Bhuiyan, M.H., Kim, T.-S., Hong, S.-J. (2011). Synthesis and Characterization of Agglomerated Coarse Al Powders Comprising Nanoparticles by Low Energy Ball Milling Process. *Materials Transactions*, 52, 8, 1674–1678. doi: 10.2320/matertrans.M2011059
29. Abdoli, H., Ghanbari, M., Baghshahi, S. (2011). Thermal Stability of Nanostructured Aluminum Powder Synthesized by High-energy Milling. *Materials Science and Engineering: A*, 528, 22–23, 6702–6707. doi: 10.1016/j.matlet.2014.01.122
30. Sundaram, D. S., Yanga, V., Zarkob, V. E. (2015). Combustion of Nano Aluminum Particles (Review). *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 51, 2, 173–196. doi: 10.1134/S0010508215020045
31. Pivkina, A., Ivanov, D., Frolov, Yu., Mudretsova, S., Nikolskaya, A., Shunman, Dzh. (2006). Nanoaluminium-vie poroshki, sintezirovannii v plazme. *Struktura, termicheskie svoistva i povedenie pri gorenii* [Nanoaluminum powders synthesized in plasma. Structure, thermal properties and combustion behavior]. *Zhurnal termicheskogo analiza i kalorimetrii*, 86, 3, 733–738.
32. Gulyaev, I., Dolmatov, A., Kharlamov, M., Krivtsun, I., Korzhyk V. (2015). Arc-plasma wire spraying: an optical study of process phenomenology. *Journal of Thermal Spray Technology*, 24, 1566–1573. doi: 10.1007/s11666-015-0356-6
33. Petrov, S., Bondarenko, S., Koichi, S. (2022). Consideration of the possibility of large-scale plasma-chemical production of nanosilicon for lithium-ion batteries. *Technology audit and production reserves*, 3/3(65), 6–14. doi: 10.15587/2706-5448.2022.259066
34. CASPSP. Available at : <http://www.plasma.kiev.ua/results/caspsp3.html>
35. Petrov S.V. *Innovatsionnie plazmenno-struiniie tekhnologii* [Innovative plasma jet technologies]. LAMBERT Academic Publishing. 2021. – 104.
36. Shigeta, M. (2018) Numerical Study of Axial Magnetic Effects on a Turbulent Thermal Plasma Jet for Nanopowder Production Using 3D Time-Dependent Simulation. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, 6, 2 107–123. doi: 10.4236/jfcmv.2018.62010.
37. Petrov, S.V., Karp, I.N. (1993). *Plazmennoe gazo-vozdushnoe napilenie* [Plasma gas-air spraying]. Kiev: Naukova dumka, 495.
38. Kharlamov M., Krivtsun, I., Korzhyk, V., Demyanov O. (2015). Simulation of motion, heating and breakup of molten metal droplets in the plasma jet at plasma-arc spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 24, P. 659–670. doi: 10.1007/s11666-015-0216-4
39. Kharlamov, M., Krivtsun, I., Korzhyk, V. (2014). Dynamic model of the wire dispersion process in plasma-arc spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 23, 420430. doi: 10.1007/s11666-013-0027-4
40. Akkus. Y. (2020). The effect of stefan flow on the models of droplet evaporation. *Journal of Thermal Science and Technology*, 40, 2, 309–318. doi: doi.org/10.47480/isibted.817053
41. Vardelle, M., Vardelle, A., Li, K.-I., Fauchais, P. (1996). Coating generation: Vaporization of particles in plasma spraying and splat formation. *Pure and Applied Chemistry*, 68, 5, 1093–1099.
42. Wan, Y.P., Fincke, J.R., Sampath, S., Prasad, V., Herman, H. (2002). Modeling and experimental observation of evaporation from oxidizing molybdenum particles entrained in a thermal plasma jet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 5, 1007–1015. doi: doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00214-9
43. Onda, K., Tanaka, Y., Akashi, K., Furukawa, R., Nakano, Y., Ishijima, T., Uesugi, Y., Sueyasu, S., Watanabe, S., Nakamura, K. (2020). Numerical study on the evaporation process of feedstock powder under transient states in pulse-modulated induction thermal plasmas for nanoparticle synthesis. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53, 32, 325201. doi: doi.org/10.1088/1361-6463/ab8419
44. Kravchenko, O.Yu., Maruschak I.S. (2017). Dynamics of dust particles in a plasma jet. *Voprosi atomnoi nauki i tekhniki*, 1, 159–162.
45. Leblanc, D., Dolbec, R., Guerfi, A., Guo, J., Hovington, P., Boulos, M., Zaghbi, K. (2017). Silicon nanopowder synthesis by inductively-coupled plasma as anode for high-energy Li-ion batteries. In book: *Silicon Nanomaterials Sourcebook*, 463–484. doi: 10.1201/9781315153551-24
46. Vardelle, M., Vardelle, A., Fauchais, P., Trassy, C., Proulx, P. (1990). Experimental and numerical investigation of powder vaporization under thermal plasma conditions. *Journal de Physique Colloques*, 2, C5-171–C5-180. doi: 10.1051/jphyscol:1990521
47. Pant, A., Seth, T., Raut, V., Prakash, V., Pralhad, S., Nandi, A. K., Prasanth, H., Pandey R. K. (2016). Preparation of Nano Aluminium Powder (NAP) using a Thermal Plasma: Process Development and Characterization. *Central European Journal of Energetic Materials*, 13, 1, 53–71. doi: 10.22211/cejem/64964
48. Jeol. Products. Retrieved from: <https://www.jeol.com/products/>
49. Tekna plasmasonic product line. Retrieved from: <https://www.tekna.com/plasmasonic>