



## ПРИКЛАДНЫЕ НАУЧНЫЕ РАЗРАБОТКИ

УДК 621.6.04: 621.9.048.7

### РОЗРОБКА ПРИЙОМІВ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГУВАННЯ І СТВОРЕННЯ КОАКСИАЛЬНОЇ ГОЛОВКИ ДЛЯ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ

**Шелягін Володимир Дмитрович**, кандидат технічних наук

Провідний науковий співробітник, відділ «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, вул. Боженко, 11, м. Київ, Україна, 03680

**Контактний тел.:** (044) 200-65-66

**E-mail:** laser-77@online.ua

**Хаскін Владислав Юрійович**, доктор технічних наук

Провідний науковий співробітник, відділ «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, вул. Боженко, 11, м. Київ, Україна, 03680

**Контактний тел.:** (044) 200-52-91

**E-mail:** Khaskin@ua.fm

**Шуба Іван Володимирович**

Молодший науковий співробітник, відділ «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, вул. Боженко, 11, м. Київ, Україна, 03680

**Контактний тел.:** (044) 205-24-84

**E-mail:** shubaivan@ukr.net

**Бернацький Артемій Володимирович**

Молодший науковий співробітник, відділ «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, вул. Боженко, 11, м. Київ, Україна, 03680

**Контактний тел.:** (044) 205-21-77

**E-mail:** bav69@yandex.ru

**Єремєєва Любов Тимофіївна**

Молодший науковий співробітник, відділ «Фізико-хімічних досліджень матеріалів», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, вул. Боженко, 11, м. Київ, Україна, 03680

**Контактний тел.:** (044) 205-21-77

**E-mail:** bav69@yandex.ru

**Федосєєва Ольга Вікторівна**

Провідний інженер, відділ «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання», Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, вул. Боженко, 11, м. Київ, Україна, 03680

**Контактний тел.:** (044) 205-22-28

**E-mail:** fedoseeva@ukr.net

*Представлено результати дослідження процесу лазерного легування конструкційних сталей сумішами порошкових матеріалів і розробки його базових технологічних прийомів, а також створення та випробування нової конструкції технологічної головки для реалізації цього процесу з коаксіальним, відносно сфокусованого лазерного випромінювання, введенням присаджувального порошкового матеріалу. Виконано моделювання траєкторій руху й швидкості часток металевої порошкової суміші.*

*Ключові слова:* лазер, легування, сталь, порошкова суміш, моделювання, коаксіальна головка, розробка, випробування.

*Представлены результаты исследования процесса лазерного легирования конструкционных сталей смесями порошковых материалов и разработки его базовых технологических приемов, а также создания и испытания новой конструкции технологической головки для реализации этого процесса с коаксиальным, относительно сфокусированного лазерного излучения, введением присадочного порошкового материала. Выполнено моделирование траекторий движения и скорости частиц металлической порошковой смеси.*

*Ключевые слова: лазер, легирование, сталь, порошковая смесь, моделирование, коаксиальная головка, разработка, испытания.*

## 1. Вступ

З ростом вимог до якості робочого шару, до показників економічної ефективності процесів, до підбору матеріалів залежно від властивостей поверхні виробів, а також внаслідок збільшення об'ємної частки складнолегованих сталей у процесі виробництва деталей і інструмента, стає актуальним застосування ресурсозберігаючих технологій для підвищення експлуатаційного ресурсу важконавантажених сталевих виробів, наприклад, поверхневого легування.

В основі більшості традиційних процесів поверхневого легування лежить дифузійне насичення елементами з газової або рідкої фази й хімічне осадження з газової фази (у поєднанні з термічною обробкою) [1]. Загальна назва цих методів — хіміко-термічна обробка (ХТО). ХТО підвищує твердість поверхні, зносостійкість, кавітаційну й корозійну стійкість, створює на поверхні сприятливі залишкові напружки стискання, збільшує надійність і довговічність деталей [2].

На машинобудівних заводах найбільш широко застосування знайшли цементація, азотування й нітроцементація з газових середовищ і дифузійне насичення металами з порошкових сумішей. Перераховані методи ХТО мають ряд істотних недоліків [3]. Зокрема, значна тривалість виробничого циклу, потреба в покращенні культури виробництва, важкі умови праці людини, шкідливість для навколишнього середовища тощо.

На сучасному етапі розвитку техніки й технології особливу увагу здобувають нові методи локального поверхневого легування, які дозволяють усунути вказані недоліки вищеназваних процесів. Серед таких нових методів одну з перспективних позицій займає лазерне легування, завдяки низці унікальних властивостей лазерного випромінювання як джерела нагріву.

## 2. Аналіз досліджень і публікацій та постановка проблеми

Лазерне легування з'явилося приблизно в середині 1970-х років. Вже перші експерименти [4–5] показали, що воно дозволяє підвищити якість та довговічність виробів за рахунок збільшення зносо-

стійкості, корозійної стійкості та твердості поверхнево нанесених шарів металу, які працюють в умовах тертя, абразивного зношення, хімічно активних середовищ, при підвищених температурах і тисках. Лазерне легування за своєю технологічною схемою є близьким до лазерного наплавлення [6]. Воно має низку переваг у порівнянні з іншими способами модифікування поверхневих шарів, які використовуються в промисловості [7–9]:

- ➔ дає можливість отримувати достатньо широкий діапазон товщини (0,1...2,0 мм) поверхневих шарів із заданими властивостями на металевих виробах;

- ➔ характеризується порівняно низькими залишковими деформаціями деталей після обробки;

- ➔ дає змогу застосовувати широкий спектр легуючих матеріалів — як металевих, так і неметалевих;

- ➔ забезпечує точні геометричні розміри і конфігурацію виробів після легування, що дозволяє лишати мінімальні припуски (до 0,5...1,0 мм) на фінішну механічну обробку.

Стрімкий розвиток у розробці лазерної техніки, що спостерігається в останнє десятиріччя [6–7], обумовлює необхідність створення та впровадження для різних технологічних процесів і нового обладнання, в яких лазерне випромінювання використовується в якості робочого інструменту і які дозволять одержувати вироби з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

## 3. Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою даної роботи є дослідження процесу лазерного легування конструкційних сталей сумішами порошкових матеріалів і розробка його базових технологічних прийомів, а також створення та випробування нової конструкції технологічної головки для реалізації цього процесу з коаксиальним відносно сфокусованого лазерного випромінювання введенням присаджувального порошкового матеріалу.

## 4. Виклад основного матеріалу

**Розробка технологічного оснащення для лазерного легування.** Запропонована власна розробка

лазерної головки для легування з можливістю коаксіальної до напрямку розповсюдження лазерного випромінювання примусової подачі присаджувального матеріалу у вигляді порошкової суміші. Головка складається із певної кількості основних елементів, до яких належать оптична система формування лазерного пучка; система формування газового струменю для транспортування присаджувального матеріалу у вигляді порошкової суміші; система корекції взаємного розташування елементів головки.

Центральний сопловий канал утворений поверхнею одного із елементів оптичної системи головки та внутрішніми елементами корпусу лазерної головки. Він має незмінну форму та постійний внутрішній об'єм. Периферійний сопловий канал розташований між поверхнями обертання, які утворюють стінки зовнішніх та внутрішніх



Рис. 1. Зовнішній вигляд головки для лазерного поверхневого легування

елементів конструкції головки. Конструкція головки дозволяє змінювати аксіальне положення стінки периферійного соплового каналу, за рахунок чого з'являється можливість змінювати зазор і відповідно регулювати швидкість газопорошкової суміші. Для рівномірного розподілу часток при подаванні порошку у об'єм периферійного соплового каналу у конструкції головки було передбачено використання певних елементів у вигляді спеціалізованих соплових насадок.

Зовнішній вигляд створеної головки для легування наведений на рис. 1.

**Моделювання процесу подачі порошкової суміші в головку для лазерного легування.** Широкий діапазон можливого регулювання параметрів подачі газу й порошкової суміші в процесі легування не дозволяв заздалегідь однозначно визначити для запропонованої конструкції лазерної головки оптимальне співвідношення тиску у центральному та периферійному соплових каналах, яке б забезпечило найбільш впорядкований і спрямований рух часток присаджувального матеріалу у області де розташована сфокусована частина лазерного пучка. Тому було запропоновано проведення обчислювальних експериментів для визначення впливу співвідношення тисків на зміну форми газопорошкового струменю при використанні розглянутої конструкції головки.

Метою проведення розрахунків був пошук таких режимів подачі газу й порошкової суміші, при яких досягається спрямований та упорядкований рух

порошкової суміші в області поширення сфокусованого лазерного випромінювання, а також визначення швидкості часток порошку на різних ділянках розрахункової області при різних співвідношеннях тиску у центральному й периферійному каналі.

Об'єктом дослідження при моделюванні процесу поширення порошкової суміші із лазерної головки, виступала соплова насадка, за допомогою якої здійснювалось формування газового струменю.

Для визначення траєкторій руху й швидкості часток металеві порошкової суміші, що вводиться через канали соплової насадки, була проведена серія розрахунків за допомогою пакета прикладних програм «ANSYS CFX» який призначений для моделювання та аналізу процесів руху рідин [10].

Програма «ANSYS CFX» вирішує задачі механіки рідини методом кінцевих об'ємів [11]. Сутність цього методу полягає у наступному. Замість того щоб знаходити розв'язок задачі у всіх точках безперервної області, її покривають розрахунковою сіткою і таким чином розбивають на кінцеву кількість об'ємів, положення яких у просторі відоме. Після цього для кожної точки такого об'єму записують систему рівнянь Нав'є-Стокса [12], формують сукупну систему рівнянь для усіх точок області і вирішуючи цю систему чисельними методами отримують шукані значення фізичних параметрів.

При цьому рівняння збереження маси має вигляд

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0. \quad (1)$$

Рівняння збереження імпульсу має вигляд:

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + (\rho U \cdot \nabla U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M, \quad (2)$$

де тензор напружень  $t$  пов'язаний із швидкістю деформацій співвідношенням

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3}\delta \nabla \cdot U, \quad (3)$$

а  $S_M$  — це джерело масових сил.

Рівняння збереження енергії має вигляд

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \\ = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $h_{tot}$  — повна ентальпія співвідноситься із статичною ентальпією  $h(T, p)$  наступним чином:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2}U^2, \quad (5)$$

де член рівняння  $\nabla \cdot (U \cdot t)$  являє собою роботу в'язкого напруження, а член рівняння  $U \cdot S_M$  являє собою роботу зовнішніх джерел імпульсу.

Крім того збереження імпульсу у системі «частка — рідина» відбувається завдяки балансу сил які діють на тверду частку і впливають на її прискорення. Ці сили можуть бути пов'язані із різницею

Таблица 1

швидкостей частки та рідини у якій вона рухається, а також безпосередньо із переміщенням рідкого об'єму, який охоплює частку. У програмі «ANSYS CFX» рівняння руху для частки, записується у наступному вигляді:

$$m_p \frac{\partial U_p}{\partial t} = F_D + F_B + F_R + F_{VM} + F_P, \quad (6)$$

де  $F_D$  – сила тертя, яка діє на частку;  $F_B$  – сила плавучості;  $F_R$  – сума відцентрової та коріолісової сили;  $F_{VM}$  – сила від віртуальної (приєднаної) маси;  $F_P$  – сила від градієнту тиску, який пов'язаний із прискоренням рідини, яка оточує частку.

Більш детальний опис методу та системи рівнянь, яка покладена у основу розрахункової моделі міститься у [13], а також у [14–16].

Для того щоб знайти швидкість газу та часток порошку за допомогою «ANSYS CFX» було зроблено наступне. Спочатку були змодельовані дві трьох-вимірні геометричні моделі, просторова форма яких співпадає із об'ємом проточної частини соплового каналу. Обидві моделі мали однакову форму, за винятком відстані між стінками периферійного каналу (рис. 2, поз. 3), через який порошкова суміш направлялась в зону обробки – відповідно 0,1 мм та 0,5 мм.

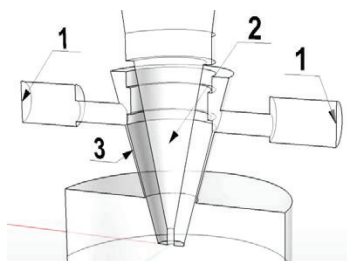


Рис. 2. Схема розрахункової області (поперечний переріз), побудованої по кресленнях конструкції пристрою:

- 1 — отвір для подачі порошкової суміші в периферійний канал;
- 2 — центральний канал подачі газу;
- 3 — периферійний канал для подачі газу

Після цього отримані геометричні моделі були перетворені на кінцеву сукупність об'ємів меншого розміру, поєднаних один із одним – тобто розрахункова область у обох випадках була покрита сіткою. Для врахування стрімкої зміни значення швидкості біля стінок об'єми розрахункової сітки у цих областях було зменшено. До отриманої розрахункової сітки були прикладені граничні та початкові умови і записані властивості газу та порошку (табл. 1).

Розрахунок проводили у стаціонарній постановці. У якості моделі турбулентності була обрана модель «SST» (Shear Stress Transport), яка більш адекватно описує турбулентність у прикордонних шарах газу в порівнянні зі стандартною  $k$ - $\epsilon$  моделлю.

Результати розрахунків

Граничні умови			Розрахункові значення основних параметрів	
Тиск у центральному каналі, $P_1$ (МПа)	Тиск у периферійному каналі, $P_2$ (МПа)	Масові витрати порошкової суміші, $Q_m$ (кг/с)	Максимальна швидкість газу, $V_1$ (м/с)	Максимальна швидкість порошкової суміші, $V_2$ (м/с)
для розрахункової області з відстанню між стінками периферійного каналу 0,5 мм				
0,02	0,05	0,005	240	35
0,3	0,05	0,005	602	35
0,3	0,01	0,001	596	41
для розрахункової області з відстанню між стінками периферійного каналу 0,1 мм				
0,05	0,1	0,002	236	49
0,05	0,2	0,002	290	62
0,05	0,3	0,002	349	73
0,01	0,05	0,002	172	35

У якості критерію збіжності розрахунку використовували нормалізовані середньоквадратичні відхилення нев'язки – величини різниці шуканих параметрів ( $V_x, V_y, V_z, P$ ) між ітераціями. У кожному випадку розрахунок проводили до досягнення значення критерію збіжності 0,0001.

Варіювання параметрів у різних розрахунках проводилися виходячи із припущення, що забезпечення спрямованого руху часток порошку може бути досягнуто одним із двох наступних способів формування газопорошкового струменю.

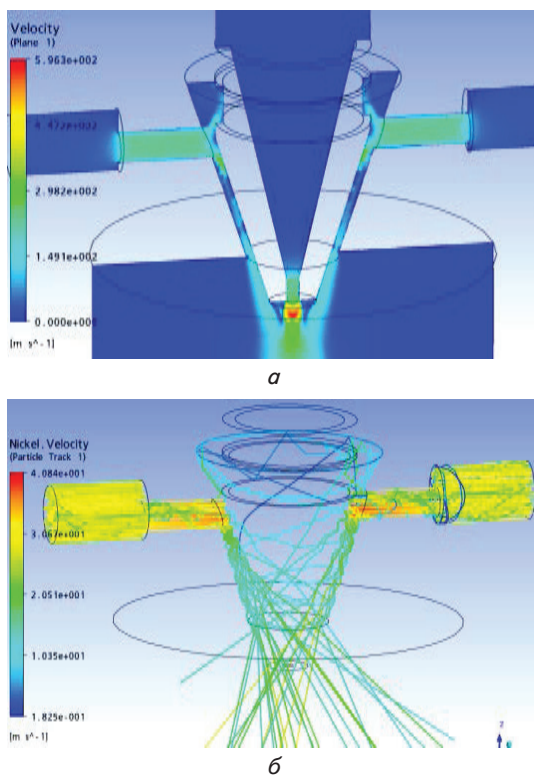
При першому способі забезпечувалось пряме введення суміші газу й порошку через периферійний канал під певним тиском. Передбачалося, що при такому способі формування струменю периферійний потік буде виконувати першочергове завдання – забезпечення спрямованого руху потоку часток із заданою швидкістю в потрібну область, а центральний потік буде виконувати другорядне завдання – захист лінзи від влучення часток і тому тиск у центральному каналі при цьому способі мав бути мінімальним і не перевищувати тиск у периферійному каналі.

При другому способі намагалися досягнути утворення ежекційного ефекту, при якому суміш порошку й газу з периферійного каналу буде захоплюватися в потік основного (центрального) струменя. Передбачалося, що при такому способі формування струменю периферійний потік буде

здійснювати другорядне завдання — дозовану подачу суміші в зону «засмокування», а центральний потік буде виконувати основну функцію — спрямоване переміщення часток порошку.

Таким чином, перевірка можливості реалізації двох зазначених способів спрямованої подачі порошкової суміші для кожної розрахункової області проводилися шляхом завдання таких умов, при яких в одному випадку тиск на вході був більшим в центральному каналі, у другому випадку — на вході в периферійний канал.

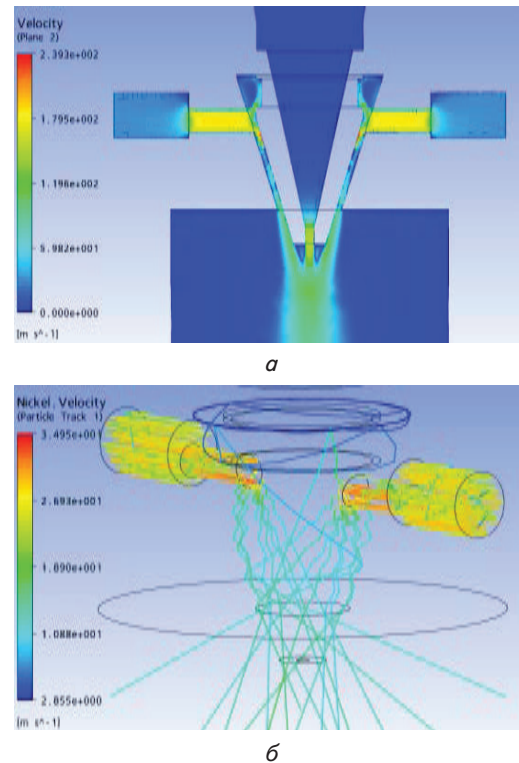
Основні розрахункові значення параметрів та граничні умови, які ним відповідають наведені в табл. 1. Результати розрахунків для області із зазором 0,5 мм наведені на рис. 3–4.



**Рис. 3.** Результати розрахунків для області із зазором 0,5 мм при тиску у центральному каналі  $P_1 = 0,3$  МПа та тиску в периферійному каналі  $P_2 = 0,01$  МПа: *а* — швидкість аргону у сопловій насадці; *б* — траєкторії руху й швидкість часток нікелевої порошкової суміші

За результатами розрахунків, для умов наведених на рис. 3–4, максимальна розрахункова швидкість газу спостерігається у першому випадку у центральному потоці, а у другому випадку усередині каналів, що подають порошкову суміш, та становить відповідно 596 м/с та 239 м/с. А максимальна швидкість часток порошкової суміші обох випадках  $V_2$  спостерігається усередині каналів, що подають порошкову суміш та становить відповідно 40 м/с та 35 м/с. За таких умов

відсутня спрямованість руху часток порошкової суміші та спостерігається їх хаотичний розліт.



**Рис. 4.** Результати розрахунків для області із зазором 0,5 мм при тиску у центральному каналі  $P_1 = 0,02$  МПа та тиску в периферійному каналі  $P_2 = 0,05$  МПа: *а* — швидкість аргону у сопловій насадці; *б* — траєкторії руху й швидкість часток нікелевої порошкової суміші

Аналіз результатів проведених розрахунків дозволив встановити наступні закономірності. При завданні початкових умов тиску на вході в центральний канал більш ніж 0,1 МПа, швидкість газу в центральному потоці перевищує швидкість поширення малих збурювань. При цьому формується тверда стійка структура ударних хвиль усередині струменя, за якою слідує ділянка потоку, що розширюється під значним кутом (рис. 3,*а*). Такий плин негативно позначається на впорядкованості руху часток порошкової суміші, які замість очікуваного ежекційного ефекту, хаотично розлітаються в радіальному напрямку (рис. 3,*б*).

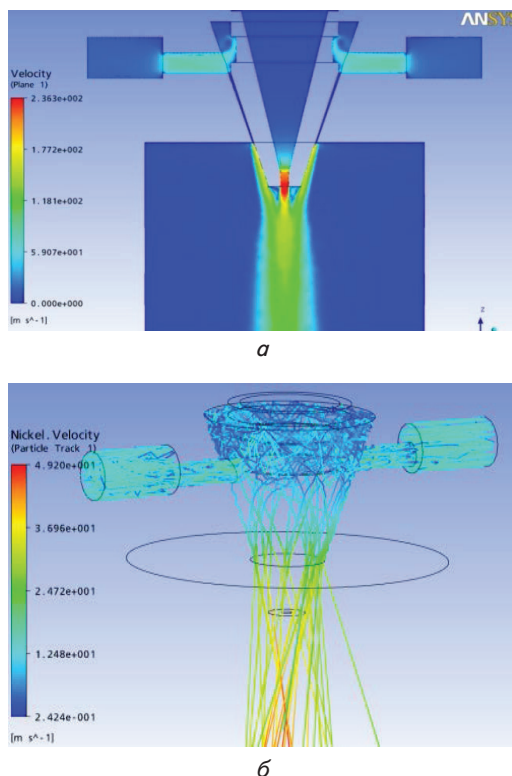
Зниження тиску в центральному й периферійному каналі при збереженні більш високого тиску усередині центрального каналу по відношенню до периферійного, приводить до виключення фактора розширення в центральному потоці й виключенню формування жорсткої ударної структури (рис. 4,*а*). Незважаючи на це ефект ежекції (засмокування суміші газу й порошку з периферійного потоку в центральний) не спостерігається (рис. 4,*б*).

Підвищення тиску в периферійному потоці стосовно центрального, позитивно позначається на

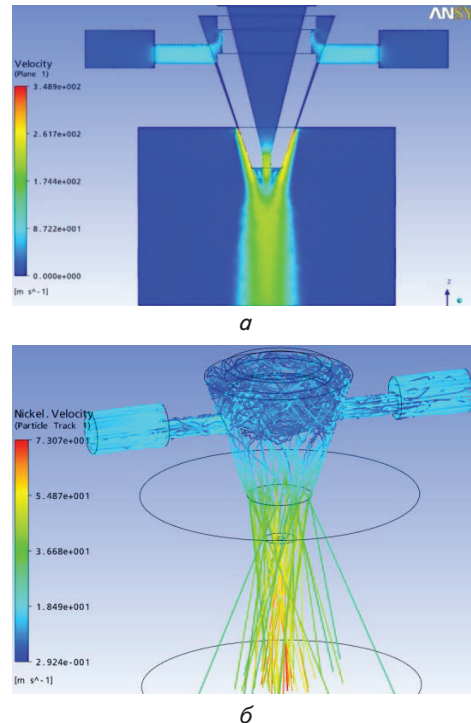
впорядкованості руху часток порошкової суміші у всіх випадках. Спрямованого впорядкованого руху часток порошкової суміші без значних втрат на розсіяння удалося досягти лише на режимах, для яких тиск у периферійному каналі був більшим, ніж у центральному.

Режим подачі порошкової суміші, що відповідає зазору між стінками периферійного каналу 0,1 мм і більшому тиску в периферійному каналі, відносно тиску у внутрішньому каналі, показав найкращі результати з погляду впорядкованості руху часток порошку, максимально досягнутої ними швидкості й мінімальних втрат на розсіяння, що продемонстровано на рис. 5–6.

За результатами розрахунків, для умов наведених на рис. 5–6, встановлено, що максимальна розрахункова швидкість газу спостерігається у першому випадку у центральному потоці, а у другому випадку усередині каналів, що подають порошкову суміш, та становить відповідно 236 м/с та 349 м/с. А максимальна швидкість часток порошкової суміші в обох випадках  $V_2$  спостерігається усередині каналів, що подають порошкову суміш та становить відповідно 49 м/с та 73 м/с. За таких умов формується спрямований, упорядкований рух часток порошкової суміші на виході із соплової насадки.

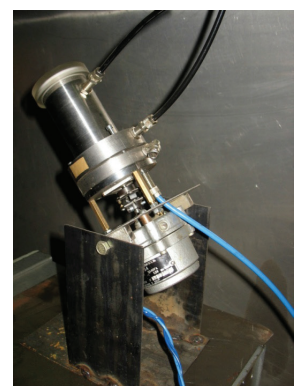


**Рис. 5.** Результати розрахунків для області із зазором 0,1 мм при тиску у центральному каналі  $P_1 = 0,05$  МПа та тиску в периферійному каналі  $P_2 = 0,1$  МПа: *a* — швидкість аргону у соплової насадці; *б* — траєкторії руху й швидкість часток нікелевої порошкової суміші



**Рис. 6.** Результати розрахунків для області із зазором 0,1 мм при тиску у центральному каналі  $P_1 = 0,05$  МПа та тиску в периферійному каналі  $P_2 = 0,3$  МПа: *a* — швидкість аргону у соплової насадці; *б* — траєкторії руху й швидкість часток нікелевої порошкової суміші

**Експериментальні дослідження.** Експериментальні дослідження з відпрацювання прийомів лазерного легування за допомогою розробленої технологічної головки проводили на циліндричних зразках діаметром 50 мм зі сталі 38ХНЗМФА ГОСТ 2590-2006. Обробку виконували на лабораторному стенді для обробки тіл обертання, створеному на базі токарного верстату та з використанням при обробці випромінювання  $CO_2$ -лазеру «TRIAGON» (довжина хвилі випромінювання  $\lambda = 10,6$  мкм, потужність 0,5...10,0 кВт). Для подачі присаджувального матеріалу (у вигляді порошкової суміші) у технологічну головку використовували дозатор власної розробки, показаний на рис. 7. Поверхневі шари сталевих зразків легувались порошковими сумішами (грануляцією від 20 до 100 мкм) системи Ni-Cr-B-Si по ТУ 322-19-004-96 (ПГ-10Н-01, ПГ-12Н-02, ПГ-10Н-04, ПГ-12Н-01), системи Fe-Cr-B-Si по ГОСТ 21448-75 (ПГ-С27, ПГ-АН1), а також хрому, реліту та сумішей на їх основі з добавками кремнію та алюмінію.



**Рис. 7.** Дозатор для подачі порошкової суміші

Технологічні параметри лазерного легування змінювали у широкому діапазоні значень: потужність лазерного випромінювання  $P$  змінювали в межах від 0,5 до 5,0 кВт; діаметр плями лазерного випромінювання на поверхні зразка  $d_{\text{пл}}$  від 0,5 до 5 мм; лінійну швидкість  $V_{\text{лег}}$  процесу легування від 3 до 50 мм/с; масові витрати присаджувального порошкової суміші  $Q_{\text{п}}$  від 0,1 до 5,0 г/с; тиск у периферійному  $P_2$  та центральному  $P_1$  каналах лазерної головки від 0,01 до 0,5 МПа; відстань між стінками периферійного каналу від 0,1 до 1,0 мм. Зона обробки являла собою як окремі доріжки так й доріжки з перекриттям (з коефіцієнтом перекриття 0,2...0,7). Глибина легованих шарів, залежно від параметрів технологічних режимів, змінювалась від 0,2 мм до 1,5 мм.

Мікроструктуру у площині обробки та поперечних перерізах доріжок легування вивчали за допомогою світлової мікроскопії (на мікроскопі «Versamet-2», виробник «Unitron», США), аналітичної растрової електронної мікроскопії («SEM-515», виробник «PHILIPS», Голландія), рентгеноструктурного аналізу («ДРОН-УМ1», виробник «Буревестник», Росія).

Встановлено, що в залежності від вмісту вуглецю в легованих доріжках відбувається часткове або повне утворення бейніту чи мартенситу в сукупності з його додатковим легуванням залежно від присаджувального матеріалу. Вміст легуючих елементів у поверхневому шарі тим вищий, чим довший час існування ванни розплаву. На рис. 8 показана типова структура оброблених доріжок після лазерного легування зразка зі сталі Ст3 порошковим сплавом ПГ-12Н-01. Легування виконувалось на циліндричному зразку  $\varnothing 50$  мм по спіралі з коефіцієнтом перекриття доріжок  $K_{\text{п}} = 0,2$  при потужності лазерного випромінювання  $P = 3,0$  кВт; швидкості обробки  $v_{\text{лег}} = 8,33$  мм/с; масових витратах присаджувального порошку  $Q_{\text{п}} = 0,3$  г/с; тиску у периферійному  $P_2$  та центральному  $P_1$  каналах лазерної головки 0,1 та 0,05 МПа, відповідно; відстані між стінками периферійного каналу 0,3 мм.

Через значну густину потужності випромінювання навколо доріжок легування в основному металі спостерігається ЗТВ, як видно на рис. 9. Її розмір прямо пропорційний глибині доріжок та залежить від густини потужності та швидкості переміщення зразка. На рис. 9 показана структура одиної доріжки (збільшення,  $\times 20$ ) після лазерного легування сталі 38ХНЗМФА механічною сумішшю порошоків хрому та реліту, проведеного на циліндричному зразку  $\varnothing 50$  мм при потужності лазерного випромінювання  $P = 3,0$  кВт; швидкості обробки  $v_{\text{лег}} = 8,33$  мм/с; масових витратах присаджувального порошку  $Q_{\text{п}} = 0,2$  г/с; тиску у периферійному  $P_2$  та центральному  $P_1$  каналах лазерної головки 0,1 та 0,02 МПа, відповідно; відстані між стінками периферійного каналу 0,3 мм.

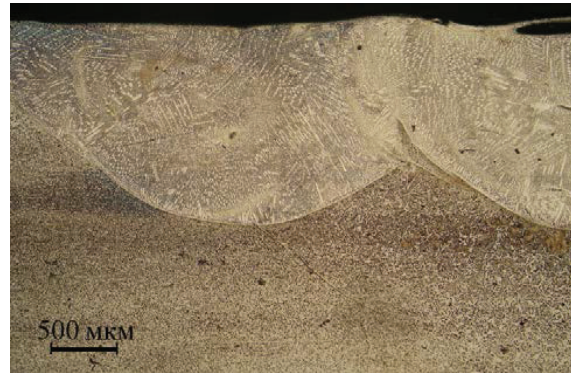


Рис. 8. Типова структура легованих доріжок (збільшення,  $\times 20$ )

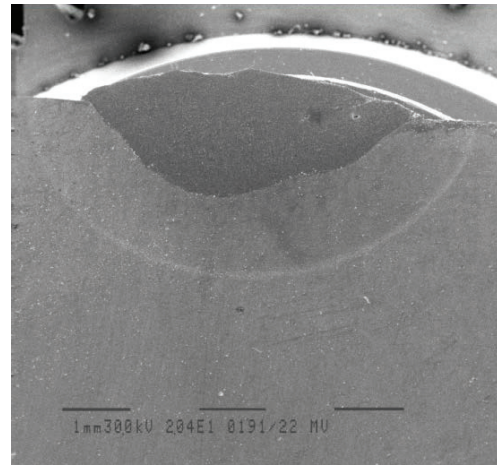


Рис. 9. Структура одиної доріжки (збільшення,  $\times 20$ ) після лазерного легування сталі 38ХНЗМФА механічною сумішшю порошоків хрому та реліту

Встановлено, що при обробці циліндричних зразків і веденні процесу по гвинтовій спіральній лінії, глибина легованих шарів прямо пропорційна кроку спіралі та коефіцієнту перекриття. При зменшенні цього коефіцієнту із 0,7 до 0,2, глибина легованого шару збільшується на 60 %. У верхній частині доріжок легування відбувається деяке знеміцнення (зниження твердості). Це явище пов'язане з перегрівом приповерхніх шарів. Однак, воно не є недоліком, оскільки при фінішній механічній обробці знеміцнений шар усувається.

## 5. Висновки

1. За допомогою математичного моделювання визначено такі режими введення транспортувального газу та порошкової суміші в робочу зону технологічної лазерної головки, які відповідають спрямованому й упорядкованому руху останньої в області розповсюдження випромінювання, а також встановлено швидкості дисперсної фази на окремих ділянках при різних співвідношеннях тиску у внутрішньому й периферійному каналі.

2. Показано, що при коаксіальному (відносно сфокусованого лазерного випромінювання) введен-

ні порошку підвищення тиску транспортуючого газу в периферійному потоці стосовно центрального захисного потоку, позитивно позначається на впорядкованості руху часток порошкової суміші. Спрямованого впорядкованого руху часток порошкової суміші без значних втрат на розсіяння вдається досягти лише на режимах, для яких тиск у периферійному каналі перевищує тиск у центральному.

3. Існування ванни розплаву глибиною 0,2...1,5 мм в сталях при використанні присаджувальних сплавів на основі заліза, хрому й нікелю на протязі часу від 0,01 до 0,5 с досягається завдяки зміні температурно-часових параметрів процесу при варіюван-

ні: величини густини потужності випромінювання у межах  $W_p = (0,5...5,0) \times 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>; швидкості процесу 5...25 мм/с; масових витрат присаджувального порошкового матеріалу  $Q_{\text{п}} = 0,1...0,3$  г/с; тиску  $P_2$  у периферійному каналі від 0,1 до 0,3 МПа; тиску  $P_1$  в центральному каналі від 0,01 до 0,1 МПа; відстані між стінками периферійного каналу від 0,1 до 0,5 мм.

4. Експериментальні дослідження показали, що у вищевказаному діапазоні параметрів режиму легування діаметр плями випромінювання  $d_{\text{п}}$  на легованій поверхні прямо пропорційний потужності й становить 1 мм на 1 кВт. Термічний вплив на виріб, що легується, при цьому мінімальний.

### Література

1. Wangping, W. Ir protective coatings for carbon structural materials [Текст] / Wu Wangping, Chen Zhaofeng // Journal of Wuhan University of Technology. — Mater. Sci. Ed. — 2012. — Volume 27, Issue 4. — pp. 652–656.
2. Лахтин, Ю. М. Материаловедение [Текст] : учебник для высших технических учебных заведений / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение. — 1990. — 528 с.
3. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 2006. — 664 с.
4. Anthony, T. R. Surface rippling induced by surface-tension gradients during laser surface melting and alloying [Текст] / T. R. Anthony, H. E. Cline // J. Appl. Phys. — 1977. — Vol. 48, Issue 9. — pp. 3888–3894.
5. Рыкалин, Н. Н. Лазерная обработка материалов [Текст] / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, А. Н. Кокора. — М. : Машиностроение, 1975. — 296 с.
6. Riabkina-Fishman, M. Laser alloying and cladding for improving surface properties and refurbishing worn machine parts [Текст] / M. Riabkina-Fishman, J. Zahavi // Lasers in Engineering. — 1996. — Vol. 5. — pp. 31–41.
7. Бернацкий, А. В. Лазерне поверхневе легування конструкційних сталей [Текст] / А. В. Бернацкий // Вісник ДДМА. — 2012. — № 3(28). — С. 41–46.
8. Shelyagin, V. D. Laser-arc and laser-plasma welding and coating technologies [Текст] / V. D. Shelyagin, I. V. Krivtsun, Yu. S. Borisov etc. // The Paton Welding journal. — 2005. — № 8. — P. 44–49.
9. Mazumder, J. Laser surface alloying and cladding for corrosion and wear [Текст] / J. Mazumder, J. Singh // High Temperature Materials and Processes. — 1984. — Volume 7, Issue 2–3. — pp. 101–106.
10. ANSYS – Simulation Driven Product Development [Електронний ресурс]. — Режим доступу: \www/URL: <http://www.ansys.com/>. — Назва з екрана.
11. Самарский, А. А. Математическое моделирование: идеи, методы, примеры [Текст] / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. — М. : Наука. — 1997. — 320 с.
12. Научная библиотека КиберЛенинка [Електронний ресурс] — Режим доступу: \www/URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/metod-konechnyh-obemov-dlya-resheniya-trehmerno-y-zadachi-elektrostatiki#ixzz2NKJZsR40>. — Назва з екрана.
13. Ландау, Л. Д. Гидродинамика [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — 5-е изд. — М. : Физматлит. — 2001. — 736 с.
14. ANSYS CFX – Solver Theory Guide [Електронний ресурс]. — Режим доступу: \www/URL: <http://www.yumpu.com/en/document/view/2092608/ansys-cfx-solver-theory-guide>. — Назва з екрана.
15. Lewis, R. W. Fundamentals of the Finite Element Methods in Heat and Fluid Flow [Текст] / R. W. Lewis, P. Nithiarasu, K. N. Seetharamu. — Wiley&Sons, Ltd. — 2004. — 356 p.
16. Ferziger, J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics [Текст] / J. H. Ferziger, M. Peric. — New York : Springer. — 2002. — 426 p.
17. Versteeg H. K. An introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method [Текст] / H. K. Versteeg, W. Malalasekera. — Pearson Education. — 1995. — 257 p.

*Abstract. The paper studies the process of laser alloying of structural steel by various mixtures of powder materials, and describes the development and testing of a new design of technological head for implementing this process with coaxial, with respect to the focused laser radiation, introduction of filler powder materials. Using mathematical modeling of a powder mixture motion in the nozzle with a coaxial introduction of laser radiation it has been shown that under such introduction of powder increased pressure of carrier gas in the peripheral stream with respect to the central stream positively affects the ordering of powder particles motion. Based on the calculation results a head for laser alloying has*



been designed. It has been found that under processing of cylindrical samples along the helical or spiral line the depth of the layer obtained is directly proportional to the coefficient of alloying paths overlap. When decreasing this coefficient from 0,7 to 0,2 the depth of alloyed layer is increased by 60 %. Softening (hardness reduction) takes place in the upper part of paths. This phenomenon is concerned with the overheating of near-surface layers, but it is not a drawback, since the softened layer is removed during the final machining.

*Keywords:* laser, alloying, steel, powder mixture, modeling, coaxial head, development, testing.

УДК 548.31

## СВОЙСТВА И ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ

**Артемьев Сергей Робленович**, кандидат технических наук, доцент

Кафедра охраны труда и техногенно-экологической безопасности, Национальный университет гражданской защиты Украины, ул. Чернышевского, 94, г. Харьков, Украина, 61000

**Контактный тел.:** 067-928-75-59

**E-mail:** sergey.artemev.1967@mail.ru

**Белан Сергей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент

Кафедра охраны труда и техногенно-экологической безопасности, Национальный университет гражданской защиты Украины, ул. Чернышевского, 94, г. Харьков, Украина, 61000

*Розвиток техніки сучасного виробництва висуває підвищені вимоги під час виготовлення електроізоляційних матеріалів і виробів з них, що працюють за високих температур та в хімічно агресивних середовищах. У матеріалі статті покладено початок літературного огляду в питаннях, які стосуються основних властивостей і способів видобування ниткоподібних кристалів.*

*Ключові слова:* ниткоподібні кристали, властивості кристалів, способи видобування, напрями використання.

*Развитие техники современного производства предъявляет повышенные требования при изготовлении электроизоляционных материалов и изделий из них, работающих при высоких температурах, в химически агрессивных средах. В материале статьи положено начало литературного обзора в вопросах, касающихся основных свойств и способов получения нитевидных кристаллов.*

*Ключевые слова:* нитевидные кристаллы, свойства кристаллов, способы получения, направления использования.

### 1. Введение

В условиях развития техники современного производства продолжают предъявляться повышенные требования при изготовлении электроизоляционных материалов и изделий из них, работающих при высоких температурах, в химически агрессивных средах. Современная индустрия наноматериалов предлагает вещества с уникальными механическими, электрическими и оптическими свойствами. Спектр применения наночастиц настоль широко, что перспективность нанотехнологий не вызывает сомнений [1–3].

В материале статьи положено начало литературного обзора в вопросах, касающихся основных свойств и способов получения нитевидных кристаллов.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В последние десятилетия наиболее перспективными и востребованными в микроэлектронике и приборостроении стали нитевидные кристаллы, обладающие уникальными физико-химическими свойствами.

Среди них особый научный и практический интерес вызывают различные группы нитевидных кристаллов. Специфика этих групп состоит в том, что при малых размерах и нитевидности они являются металлическими монокристаллами, имеют квазикристаллическую структуру, содержат дисклинации и при этом они одновременно обладают высокой прочностью, твердостью и упругостью. Такие кристаллы имеют необычную