

# Розробка систем подачі порошку для лазерного газопорошкового наплавлення

М.І. Анякін<sup>1</sup> • Джінхуа Яо<sup>2</sup> • Квінлі Занг<sup>2</sup> • Р.О. Жук<sup>2</sup> •  
Чжицзюнь Чен<sup>2</sup> • С.Ю. Вінтоняк<sup>1</sup> • Д.В. Купчак<sup>1</sup>

Received: 19 December 2023 / Revised 20 February 2024 / Accepted: 27 February 2024

**Анотація.** Разом з режимами обробки, властивостями матеріалу деталі та порошку та інш., від якості “фокусування” газопорошкового струменя (ГПС) в зону дії лазерного випромінювання цілком та повністю залежить продуктивність, якість та економічні показники лазерного газопорошкового наплавлення (ЛГПН), швидкого виготовлення виробів по технології направлено лазерного плавлення та легування поверхні виробів. На жаль, в літературі майже не висвітлено етапи та методи проектування систем подачі ГПС в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання, прості методи вимірювання його параметрів та контролю.

Розробка методик проектування та створення систем подачі ГПС в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання, які задіяні при реалізації процесів ЛГПН та простих методів контролю параметрів ГПС.

При досягненні поставленої мети (крім евристичних) використовуються чисельні методи векторної оптики, газової динаміки та методи обробки відеозображень.

Розроблені оригінальні системи для реалізації ЛГПН, що забезпечують підвищення продуктивності операції, яка виконується за рахунок зменшення масових витрат порошкового матеріалу.

Встановлено, що в просторі проектування, багатоканальні системи подачі ГПС в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання (в порівнянні з одноканальними або коаксіальними системами) забезпечують підвищення продуктивності операції, яка виконується (особливо при обробці поверхонь, які лежать під кутом до горизонту) та дозволяють подавати в зону обробки порошкові суміші різного хімічного складу.

**Ключові слова:** лазер, лазерне наплавлення, газопорошковий струмінь, сопло.

## Вступ

Одним з головних методів реставрації деталей, які вийшли з ладу, або придання окремим ділянкам їх поверхні нових властивостей (твердість, корозійна стійкість та інш.) є лазерна газопорошкова наплавка (ЛГПН). Загальним, для всіх лазерних систем (лазери на оптичному волокну, діодні лазери з транспортуванням випромінювання по оптичному волокну, CO<sub>2</sub> та діодні лазери), які задіяні в реалізації ЛГПН, для заданих теплофізичних властивостей матеріалу деталі та порошкового матеріалу, продуктивність (розміри наплавленого шару) та якість (наявність пор, мікротріщин, твердість та інш.) процесу, цілком і повністю визна-

чаються не тільки режимами обробки (потужність випромінювання  $P_m$ , площа плями фокусування  $S_w$ , швидкість переміщення деталі  $V_z$  та інш.) але й властивостями “сфокусованого” потоку газопорошкової суміші (ГПС), взаємним положенням системи ГПС – сфокусоване лазерне випромінювання – поверхня деталі, яка обробляється, витратами газу, який транспортує (ВГТ) порошок. Дана робота висвітлює головні етапи проектування систем подачі ГПС в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання, які забезпечують продуктивність та якість ЛГПН.

В роботі [1] наведено найбільш повний огляд робіт, які присвячені моделюванню процесу ЛГПН. Автор [1] зазначає, що розвиток комп’ютерної техніки, систем чисельного моделювання (і їх доступність) дозволяє об’єднувати зусилля наукової спільноти до досягнення більш повного розуміння процесу ЛГПН. Причому для його дослідження можуть використовуватися як класичне однопараметричне моделювання [1], [2] та

✉ С.Ю. Вінтоняк  
serhiivintoniak@gmail.com

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

обчислювальні експерименти [1]–[3], а також моделювання методом “чорного” ящика [4]–[8]. Відзначимо, що на процес ЛГПН впливає велика кількість технологічних факторів, які пов’язані з параметрами лазерного випромінювання, властивостями порошку і оброблюваної деталі, конструкцій систем дозування і фокусування ГПС, робочих газів та ін., що значно ускладнює процес досліджень. Використання чисельного моделювання процесу ЛГПН вимагає одночасного вирішення багатьох завдань [1], [3], великого обсягу коштів та часу на розрахунки і потребує експериментальної перевірки отриманих результатів.

Добре відомо, що лазерне випромінювання – потік електро-магнітної енергії, який умовно огинається каустичною поверхнею, є універсальним інструментом, який здатний виконувати різноманітні технологічні операції [2]. Так, наприклад, при мінімальному оснащенні лазерного робототехнічного комплексу у складі багатокоординатного робота, лазерного випромінювача з передачею випромінювання в зону обробки по оптичному волокну, системою його фокусування та необхідними газовими магістралями, можливо виконувати операції різання, зміцнення, зварювання та інші [2]. При додатковому оснащенні (система дозування порошку та його постачання (“фокусування”) в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання) даний комплекс здатен додатково виконувати операції легування, наплавлення та швидкого виготовлення виробів по технології направлено лазерного плавлення (“direct laser melting”). При дослідженні ЛГПН можуть використовуватися як класичне однопараметричне моделювання [1], [2] та обчислювальні експерименти [1]–[3], а також моделювання методом “чорного” ящика [4]–[10]. Відзначимо, що на процес ЛГПН впливає велика кількість технологічних факторів, які пов’язані з параметрами лазерного випромінювання, властивостями порошку і оброблюваної деталі, конструкцій систем дозування і фокусування ГПС, робочих газів та ін., що значно ускладнює процес досліджень. Використання чисельного моделювання процесу ЛГПН вимагає одночасного вирішення багатьох завдань [1], [3], великого обсягу коштів та часу на розрахунки і потребує експериментальної перевірки отриманих результатів.

Велика кількість досліджень [11]–[19] спрямована на порівняння результатів чисельного моделювання процесу формування ГПС соплами різних конструкцій та результатами ЛГПН, яке виконане за допомогою даних соплел. Результати досліджень дозволили авторам [11] знайти оригінальне технічне рішення, яке “покращує” властивості ГПС, який сформований багатоканальним щільним соплом зі змінним поперечним сеченням каналів [11], [12].

В роботах [13], [14] розглянуто процес та результати моделювання ГПС, які утворюються соплами різних конструкцій, в т.ч. з використанням наріжних струменів захисного газу. Причому, в роботі [13] встановлено, що коаксіальні сопла (на рис. 1 зображена мо-

дель внутрішньої утворюючої поверхні коаксіального сопла) подачі ГПС в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання не доцільно використовувати при обробці поверхонь, які лежать під кутом до горизонту. Вказане пов’язано зі втратою симетрії “сфокусованого” потоку ГПС яка відбувається при відхиленні осі системи фокусування випромінювання від вертикалі на кут понад 30°. Слід зазначити, що для більшості потужних лазерних систем (з передачею випромінювання в зону обробки по оптичному волокну, або з безпосереднім фокусуванням випромінювання на поверхню деталі) фокусування випромінювання під прямим кутом до поверхні деталі, яка обробляється, не є бажаним (з-за великої вірогідності потрапляння віддзеркаленого, від поверхні заготовки, що обробляється, лазерного випромінювання на елементи устаткування. Останнє може вивести їх з ладу).

Не дивлячись на великий обсяг робіт, присвячених дослідженню процесу ЛГПН [11], [13]–[22], в яких відмічається, що від якості “фокусування” ГПС в зону дії лазерного випромінювання залежить продуктивність, якість та економічні показники процесу, в літературі майже не висвітлено етапи та методи проектування систем подачі ГПС в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання.

Саме тому, враховуючи наведене вище, метою даної роботи є розробка методики проектування систем подачі ГПС в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання, які задіяні при реалізації процесів ЛГПН, лазерного легування поверхні та технології направлено лазерного плавлення.

### Методики проведення експериментів та устаткування, яке було використане

Безпосереднє дослідження процесу ЛГПН, відбувалось на устаткуванні, яке оснащене діодними лазерами LDF400-2000, SINSUN-700, Dlight-3000. Причому, випромінювання лазера LDF400–2000 (фокусна відстань  $F_2$  об’єктиву, який фокусує 400 мм,  $P_m = 2$  кВт) та лазера SINSUN-700 ( $F_2 = 50$  мм, 60 мм,  $P_m = 0.7$  кВт) транспортувалось в зону обробки по оптичному волокну, а система фокусування випромінювання розміщувалась в руці робота IRB 2400 ABB, яка і забезпечувала необхідні переміщення системи [23]. Випромінювання діодного лазера Dlight-3000 з  $P_m = 3$  кВт безпосередньо фокусувалась об’єктивом ( $F = 300$  мм) на поверхні заготовки (пляма фокусування випромінювання розміром 2.5×11.5 мм), а сам лазер (його головка) встановлювався в спеціальній 3-х координатній платформі, яка рухалась над поверхнею зі швидкістю  $V_z 1–5$  мм/с в площині, яка перпендикулярна великій осі плями фокусування лазерного променя [24]. Дозування та подачу порошкового матеріалу (ПМ) Stelite 6, FeCr12.5 (powder Stainless Steel - AISI 410 alloy), з масовими витратами порошку (МВП) 10–60 г/хв здійснювали за допомогою дозуючих пристроїв RAYCHEM RC-PGF-D-2

та Sulzer Metco 9MP з точністю дозування  $\pm 1\%$  та ВГТ 300–600 л/год [17], [18].

Зразки зі сталі 2Cr13 (розміром  $10 \times 80 \times 200$  мм) розміщувались в перетині лазерного променя, причому вісь потоку ГПС перехрещувалась з віссю сфокусованого променя на поверхні зразка, а відстань від зрізу сопла до плями фокусування складала 20 мм, (кут нахилу до осі променя складав  $20^\circ$ ). При використанні випромінювачів LDF400-2000, SINSUN-700 для реалізації процесу ЛГПН, відстань від зрізу сопла до плями фокусування могла змінюватись і складала 10–30 мм, причому, як і в попередньому випадку, ГПС постачалась в пляму фокусування лазерного випромінювання.

В подальшому зразки з наплавленими шарами розрізались на електроерозійному верстаті (в поперек наплавлених доріжок) і визначались висота (НОС), ширина (WCL) та площа (ACL) наплавлених доріжок.

Багаторічний досвід проектування та дослідження вказаних систем, аналіз літературних джерел [11], [13]–[24] дозволив розбити процес їх проектування на ряд головних етапів:

- попереднє дослідження теплового стану заготовки, який утворився під дією сфокусованого лазерного випромінювання;
- визначення параметрів каустичної поверхні, яка огинає сфокусований лазерний промінь, та (при необхідності) розрахунок та виготовлення нової системи фокусування лазерного випромінювання;
- створення параметричних моделей систем подачі ГПС;
- чисельне моделювання процесу формування потоків ГПС розробленими соплами;
- попереднє дослідження потоків ГПС, які сформовані пластиковими моделями сопел (виготовлених за допомогою STL –технології (рис. 1)) та перевірка адекватності розрахунків з вибором “найкращих” конструкцій [17]. Зазначимо, що швидкість виготовлення та вартість однієї моделі (в залежності від ваги) не перевищує 15 грн, що робить даний метод перевірки результатів розрахунків вельми привабливим;
- виготовлення реальних конструкцій спроектованих систем та дослідження властивостей реальних ГПС;

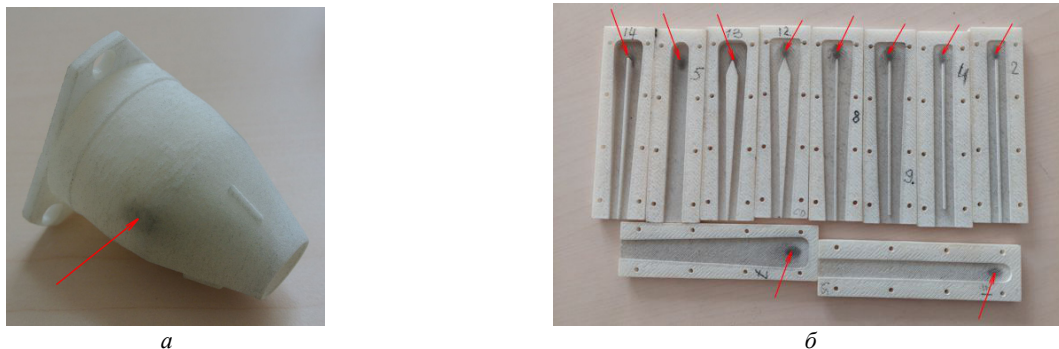
- проведення досліджень ЛГПН з використанням розроблених конструкцій.

Розглянемо головні етапи проектування систем подачі ГПС в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання більш докладно.

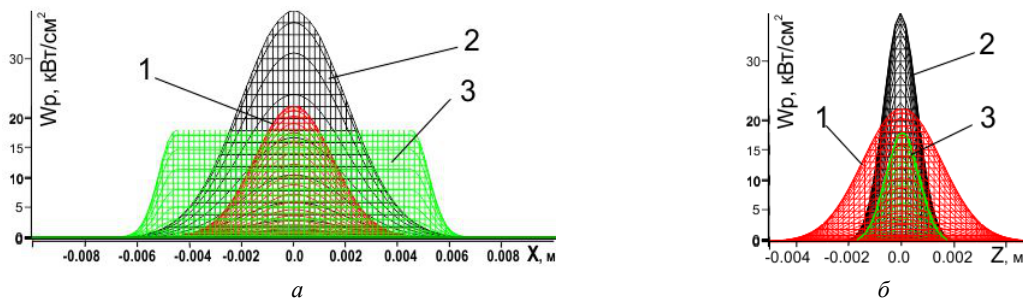
### Експериментальні результати та їх обговорення

Добре відомо [2], [25], що на результат лазерної обробки (зокрема лазерного зміцнення) впливає (з рядом багатьох інших технологічних факторів) розподіл густини потужності в плямі фокусування лазерного випромінювання  $W_P(x, z)$ , яке зосереджено на поверхні заготовки, яка обробляється. Саме тому слід відмітити певну різницю в реалізації процесу ЛГПН з використанням випромінювання діодних лазерів, випромінювання яких транспортується в зону обробки за допомогою оптичного волокна та наступним його фокусуванням спеціальною оптикою, або з безпосереднім фокусуванням випромінювання на поверхню заготовки. Останній випадок пов'язаний зі значним здешевленням конструкції джерела лазерного випромінювання: замість фокусування випромінювання багатьох потужних діодів в оптичне волокно (з наступним приєднанням його до системи фокусування) випромінювання безпосередньо фокусується на поверхню заготовки.

Зазвичай, в першому випадку, пляма фокусування має круглий поперечний переріз з майже Гауссовим розподілом  $W_P(x, z)$  (рис. 2, позиція 1), а в другому – пляма фокусування має “прямокутний” переріз з розподілом густини потужності у вигляді “стиснуто” Гауссового розподілу  $W_P(x, z)$  [26], (рис. 2, позиція 2), або майже “трапецеїдального” [27] (рис. 2, позиція 3). На рис. 2 зображено розподіл густини потужності лазерного випромінювання  $W_P(x, z)$  потужністю  $P_m = 3$  кВт в плямі фокусування площею  $S_w$ , яка дорівнює  $18.27 \text{ мм}^2$  (визначена на рівні  $e^2$ ) з різною формою плями фокусування (об'єм під поверхнями, які обмежені залежностями  $W_P(x, z)$  в усіх випадках рівний, і дорівнює  $P_m = 3$  кВт).



**Рис. 1.** Елементи пластикових моделей сопел для подачі ГПС в зону дії лазерного випромінювання, які виготовлені за допомогою STL технології (стрілками помічені місця з різкою зміною геометрії ГПС), де: а – внутрішня частина коаксіального сопла; б – “щілинні” сопла

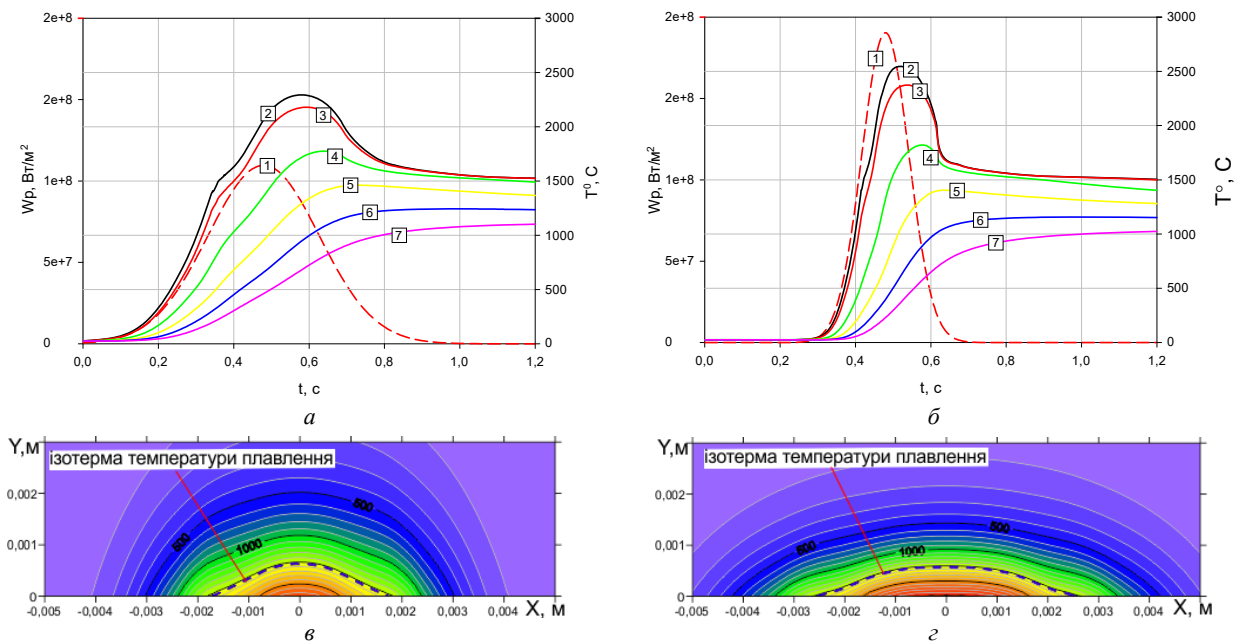


**Рис. 2.** Залежності густини потужності в плямі фокусування діодного лазера від просторових координат  $W_P(x, z)$ , які були прийняті в розрахунках (потужність випромінювання  $P_m = 3$  кВт,  $S_w = 18.27$  мм<sup>2</sup>), де: 1 – “Гауссовий” розподіл моди TEM<sub>00</sub> з радіусом плями фокусування 2.95 мм; 2 – “стиснутий” Гауссовий розподіл з плямою фокусування 11×2.5 мм; 3 – “трапецеїдальний” розподіл з плямою фокусування 11×2.5 мм

Слід зазначити, що використання додаткових оптичних гомонізуючих елементів, дозволяє створити в плямі фокусування (для двох типів діодних лазерів) будь-який розподіл  $W_P(x, y)$ , зокрема, майже “ідеальний” прямокутний розподіл  $W_P(x, z)$ .

Очевидно, що відносно малий переріз лазерного променя в площині  $W_P OZ$  (позиція 2, рис. 2 б) сфокусованого випромінювання діодного лазера, випромінювання якого безпосередньо фокусується на поверхню заготовки (за однакових умов опромінення: швидкості переміщення  $V_z$ ,  $P_m$ ,  $S_w$  та інш.) позначиться на “тепловій” історії зони термічного впливу (ЗТВ), розмірах та формі рідкої ванни, які утворюються в тілі

заготовки. Так, на рис. 3 наведено залежності (отримані в результаті рішення багатомірного нелінійного нестационарного рівняння теплопровідності, з врахуванням фазових перетворень) які описують теплову історію ЗТВ (рис. 3 а, б) та її поперечний переріз (рис. 3 в, г), в момент часу, коли поверхня зразка має максимальну температуру і які виникають в зразку зі сталі 2Cr13, при його обробці сфокусованим лазерним променем з  $P_m = 1500$  Вт,  $V_z = 10$  мм/с,  $S_w = 18.27$  мм<sup>2</sup> та різною формою плями фокусування (кругла та прямокутна) з Гауссовим  $W_P(x, z)$  (рис. 2, позиція 1) та “стисненим” Гауссовим розподілом  $W_P(x, z)$  (рис. 2, позиція 2).



**Рис. 3.** Розраховані залежності  $W_P(t)$ , температури  $T(y, t)$  від часу  $t$  (а, б) та розподіл температур в площині  $XOY$  в момент часу, коли температура поверхні максимальна (в, г) і які виникають при обробці сталі 2Cr13 (розміром 10×80×200 мм) сфокусованим лазерним променем з  $P_m = 1.5$  кВт в пляму з Гауссовим розподілом (а, в) радіусом 2.41 мм та “прямокутну” пляму фокусування розміром 2.5×11 мм (б, г), який рухається зі швидкістю  $V_z = 10$  мм/с де: 1 – залежність  $W_P(t)$  від часу  $t$ ; 2 – залежність  $T(y, t)$  від часу  $t$  на поверхні зразка ( $y = 0$ ); 3 – залежність  $T(y, t)$  від часу  $t$  на глибині  $y = 0.1$  мм; 4 – залежність  $T(y, t)$  від часу  $t$  на глибині  $y = 0.5$  мм; 5 –  $T(y, t)$ ,  $y = 0.9$  мм; 6 –  $T(y, t)$ ,  $y = 1.3$  мм; 7 –  $T(y, t)$ ,  $y = 1.7$  мм

Аналізуючи залежності, які наведені на рис. 3, відмітимо, що для даних однакових умов обробки, час існування та ширина та глибина рідкої ванни, яка утворилась в заготовці під дією сфокусованого лазерного випромінювання (з різною формою плями фокусування) різні. Так, обробка “стиснутим” Гауссовим променем (в порівнянні зі звичайним Гауссовим) дозволяє отримати в заготовці рідку ванну більшої ширини (5.2 мм проти 3.7 мм), майже однакової глибини (0.76 мм проти 0.79 мм) та меншим часом існування (0.4 с проти 0.62 с). Більша ширина рідкої ванни (яка утворилась під дією сфокусованого лазерного випромінювання на поверхні зразка) дозволяє використовувати щілинні системи подачі ГПС в зону дії лазерного випромінювання [9]–[12], [24], змінювати (при необхідності):

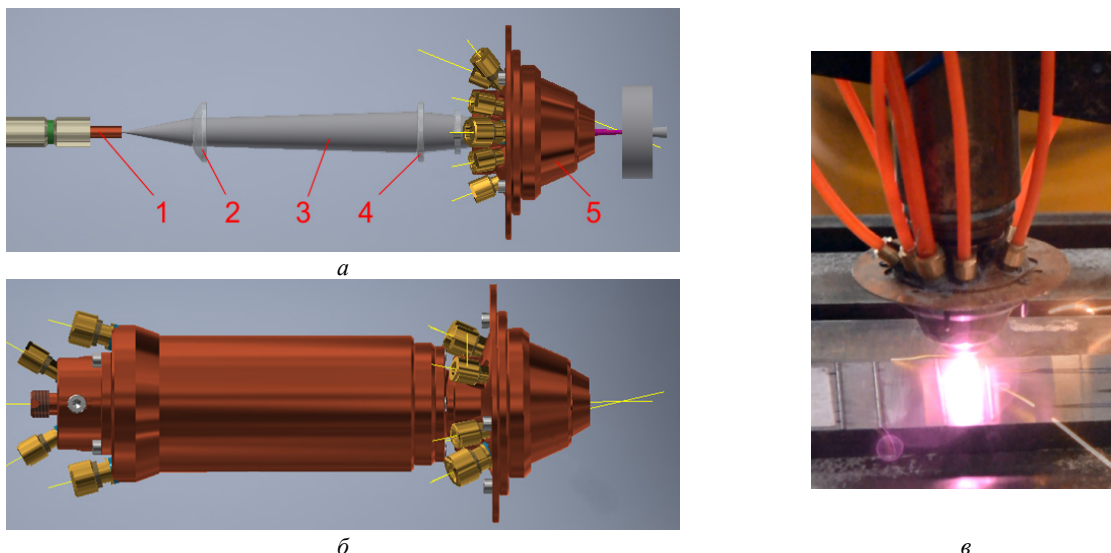
- ширину ГПС (впливаючи на розмір наплавленого валка);
- положення осі ГПС відносно осі лазерного променя (впливаючи тим самим на форму поперечного перерізу наплавленого валка), а малий (порівняно) час існування рідкої ванни накладає вимоги на поперечний розмір струменю ГПС вздовж осі  $OZ$ , який повинен повністю поміститись у рідку ванну.

Зазначимо, що одним з дієвих шляхів збільшення концентрації порошкового матеріалу в плямі фокусування лазерного випромінювання є створення навколо потоку ГПС додаткового, коаксіального потоку газу [14]. В процесі досліджень були розроблені та досліджені (виключно за допомогою розрахункових експериментів) дані системи, але виходячи з економічних показників виробництва (різке зростання витрат інертних газів), було прийняте рішення відмовитись від їх наступного використання [23].

Важливим етапом проектування систем подачі ГПС в зону дії сфокусованого випромінювання є визначення параметрів каустичної поверхні (її січення вздовж осі є залежність радіусу променя  $w_d$  від відстані  $u$  від головної площини об'єктиву, який фокусує), яка огинає сфокусований лазерний промінь (рис. 4, рис. 5). Її знання дозволяють визначити (з метою унеможливлення екранізації лазерного променя елементами конструкції) обмеження на розміри системи подачі ГПС, кути нахилу утворюючих поверхонь, які формують струмінь ГПС. Головними похідними даними для її розрахунку є діаметр оптичного волокна  $d_{fiber}$ , його числова апертура  $NA$ , довжини хвилі випромінювання діодів  $\lambda$  (для врахування хроматичної аберрації), параметри та розміри лінз, які утворюють систему фокусування та інше (вказані дані містяться у супроводжувальній документації на лазер).

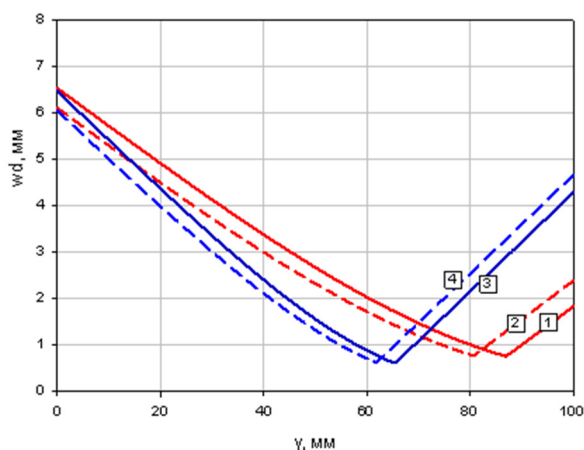
Зазначимо, що у випадку проектування нової системи фокусування (рис. 4), з'являється можливість встановити додаткові переміщення не тільки сопла подачі ГПС вздовж осі “фіксованого” сфокусованого лазерного променя, а також встановити додаткове переміщення вузла виведення лазерного випромінювання з гнучкого світловоду відносно лінзи, яка колімує лазерне випромінювання. Вказане регулювання дозволяє перемішувати перетин каустики вздовж осі лазерного променя.

Так, наприклад, на рис. 5 наведено розраховані каустичні поверхні які сформовані системою лінз з  $F1 = 30$  мм, та  $F2 = 50$  мм та  $F2 = 60$  мм (матеріал плавний кварц) при фокусуванні випромінювання діодного лазера, яке вийшло з оптичного волокна діаметром 400 мкм з  $NA = 200$  для різних відстаней  $dz$  ( $dz = 0.0$  мм та



**Рис. 4.** Хід лазерного променя в спроектованій системі фокусування випромінювання та подачі ГПС для лазера = 700 Вт та її застосування, де: *a* – хід променя в системі фокусування випромінювання; *б* – модель системи фокусування та подачі порошку; *в* – ЛГПН з використанням розробленої системи; 1 – ферула системи виведення випромінювання з гнучкого світловоду; 2 – лінза, яка колімує випромінювання фокусною відстанню  $F1$ ; 3 – лазерний промінь; 4 – лінза, яка фокусує випромінювання з фокусною відстанню  $F2$ ; 5 – система подачі ГПС

$dz = 1.0$  мм) лінзи, яка колімує, випромінювання до торцю оптичного волокна. При проведенні розрахунків використовували розроблений пакет програм, який використовував закони геометричної оптики (представлені у векторній формі), причому випромінювання, яке вийшло з світловоду уявляли у вигляді простого усіченого конусу та променевого пакету – гіперболоїда. В цьому випадку радіусом перетину гіперболоїда є радіус оптичного волокна, а асимптотами – його числова апертура.



**Рис. 5.** Розраховані каустичні поверхні які утворюються при фокусуванні випромінювання діодного лазера лінзами різною фокусною відстанню  $F2$  для різної відстані  $dz$  лінзи, яка колімує, від торцю оптичного волокна ( $d_{fiber} = 400$  мкм,  $NA = 200$ ,  $F1 = 30$  мм), де: 1 – каустична поверхня утворена при  $F2 = 60$  мм,  $dz = 22$  мм; 2 – залежність  $w_d(y)$  для  $F2 = 60$  мм,  $dz = 23$  мм; 3 –  $w_d(y)$  для  $F2 = 50$  мм,  $dz = 23$  мм; 4 –  $w_d(y)$  для  $F2 = 50$  мм,  $dz = 22$  мм

Як видно з наведених залежностей, зміна відстані  $dz$  від торцю оптичного волокна до лінзи, яка колімує лазерне випромінювання на 1 мм, дозволяє переміщувати перетин каустики сфокусованого випромінювання лінзою з  $F2 = 50$  мм майже на 3.5 мм, а лінзою з  $F2 = 60$  мм майже на 6.5 мм (рис. 5). Як і зазвичай, збільшення фокусної відстані  $F2$  лінзи, яка фокусує лазерне випромінювання (рис. 5), веде до утворення більш пологої каустики з більшим розміром перетину (в порівнянні з використанням більш короткофокусної лінзи, для фокусування лазерного випромінювання).

Як відмічалось раніше, отримані залежності дають можливість визначити параметри внутрішньої частини системи подачі ГПС, а саме тієї частини, яка забезпечує безперешкодну подачу лазерного випромінювання та захисного газу. Для даного випадку, кут нахилу утворюючої внутрішньої кінчної поверхні сопла повинен бути більшим ніж  $5^\circ$ , а отвір (для виходу променю та подачі захисного газу) з діаметром, величина якого повинна бути не менша ніж 4 мм (прогнозована відстань від торцю сопла до заготовки не більше 15 мм).

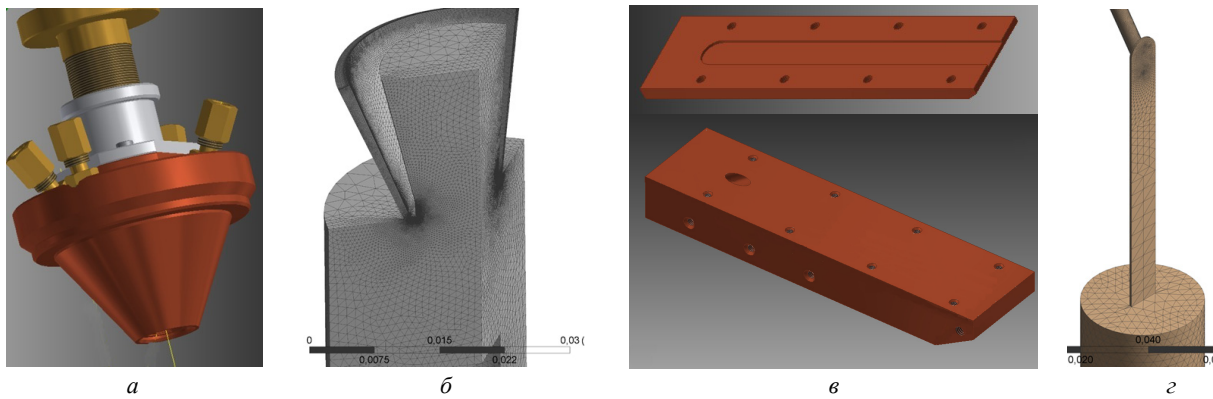
Наступним кроком, після визначення параметрів каустики сфокусованого лазерного випромінювання, і (відповідно) визначення геометричних обмежень на систему подачі ГПС, яка розробляється, є її проектування та безпосереднє дослідження (за допомогою розрахункових експериментів та з перевіркою отриманих результатів) процесу формування потоків ГПС розробленими системами їх подачі.

У зв'язку з тим, що при реалізації ЛГПН використовуються порошкові матеріали з дрібнодисперсними фракціями порошку (діаметр частинок менше 40 мкм), що дозволяє розглядати середовище з такими частинками як безперервне. Це пов'язано з тим, що при зменшенні розмірів частинки її маса прагне до нуля. Останнє дозволяє використовувати Ейлерову модель багатофазного потоку як модель процесу транспортування та фокусування ГПС. Дана модель і використовувалася в обчислювальних експериментах (у середовищі програмного комплексу COMSOL та Ansys CFX [28]). Першим етапом даних розрахункових експериментів є задання краєвих умов розрахунку та створення, для розроблених (з виконанням встановлених вимог на обмеження конструкції) розрахункової сітки кінцевих елементів (СКМ) внутрішньої порожнини системи (на рис. 6 показані приклади розрахункової сітки, для сопел, різних конструкцій) і прилеглої до неї відкритої області. Після цього можливо здійснити безпосередній розрахунок траєкторії руху потоку порошку і провести аналіз отриманих результатів. Крок за кроком, змінюючи параметри конструкції (в рамках визначених обмежень), ВГТ та газу, який захищає оптику, ми можемо прийти до бажаних результатів: отримати максимальну концентрацію порошку в потоці ГПС заданого поперечного перерізу на заданій відстані.

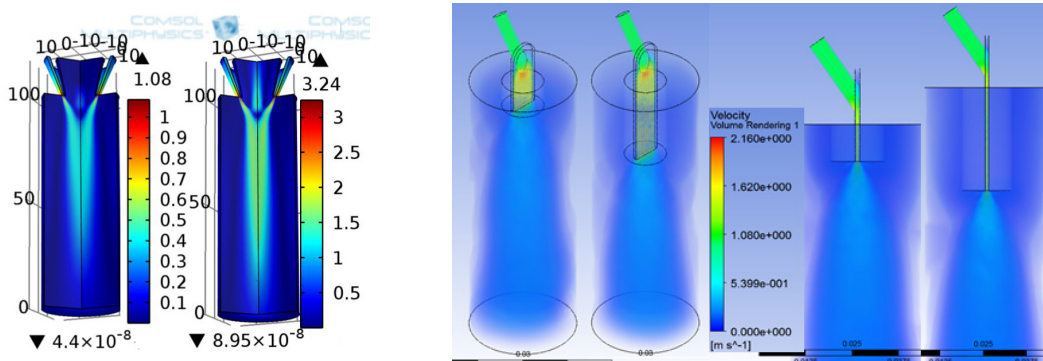
Так, на рис. 7 наведені деякі результати чисельних експериментів, які присвячені дослідженню процесу формування потоків ГПС соплами різних конструкцій.

Аналізуючи залежності, які наведені на рис. 7 відмітимо:

- зростання ВГТ подовжує струмінь ГПС та робить його поперечний переріз меншого розміру (рис. 7 а);
- при проектуванні систем подачі ГПС в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання, слід звертати увагу на відстань від зрізу сопла до місця, де відбувається різка зміна напрямку та розміру потоку ГПС (рис. 7 б). Такими типовими місцями є місця безпосереднього приєднання магістралей, які подають ГПС в систему їх “фокусування”. Дані місця добре помітні на рис. 1, де вони позначені стрілками. Згідно з методикою досліджень, наступним, доцільним, кроком розробки систем подачі ГПС є простий, попередній, аналіз трас порошків в ГПС, які сформовані моделями сопел (рис. 1). Даний простий експрес-метод дозволяє якісно перевірити результати розрахунків та працездатність висунутих та реалізованих конструкторських рішень.



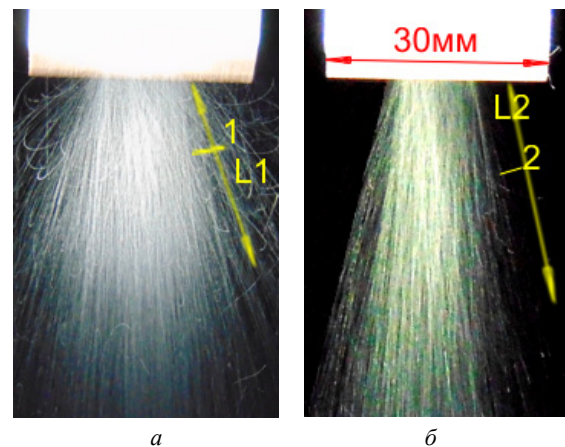
**Рис. 6.** Моделі та СКМ внутрішньої їх порожнини звичайних коаксіальних та щілинних систем подачі ГПС в зону дії сфокусованого випромінювання, де: *a, б* – коаксіальна модель системи подачі ГПС та СКМ її внутрішньої порожнини відповідно; *в* – кришка з каналом та корпус одноканального щілинного сопла подачі ГПС; *г* – СКМ внутрішньої порожнини щілинного сопла



**Рис. 7.** Швидкість потоку ГПС на виході коаксіального (*a*) та щілинного (*б*) сопла для різних умов формування ГПС, 1 – витрати газу, який транспортує 0,055 м/с, 2 – ВГТ 0,165 м/с, 3, 5 – ВГТ = 000, довжина робочої частини щілинного сопла з (переріз 0.8×8 мм) 40 мм; 4, 6 – 3, 5 – ВГТ = 600 л/год, довжина робочої частини щілинного сопла з (переріз 0.8×8 мм) 80 мм

Так, на рис. 8 наведені зображення потоків ГПС щілинними соплами (переріз 0.8×8 мм) з різною довжиною робочої частини. Слід відмітити, що науковці [11], [18], [19] пропонують використовувати зображення потоку ГПС для визначення швидкості руху порошків в потоці ТГ [11], [18], [19]. При цьому, по відомим розмірам (наприклад, в нашому випадку, ширини сопла, рис. 8), часу відкриття затвору фотокамери (міститься в описі файлу цифрового зображення і, для зображень на рис. 8, складає 0.25 с), та довжини траси (позиції 1, 2 рис. 8) ми можемо визначити швидкість руху порошків. Так, для порошинки, траса якої зображена на рис. 8 *a*, позиція 1, швидкість руху складає 0.13 м/с, а для порошинки, траса якої зображена на рис. 8 *б*, позиція 2, швидкість руху складає 0.18 м/с.

Як видно з зображень трас порошків (рис. 8), збільшення довжини робочої частини каналу формування ГПС веде до зменшення “розбрикування” порошку і більш ефективного його постачання в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання (що повністю співпадає з результатами розрахунків (рис. 7)).

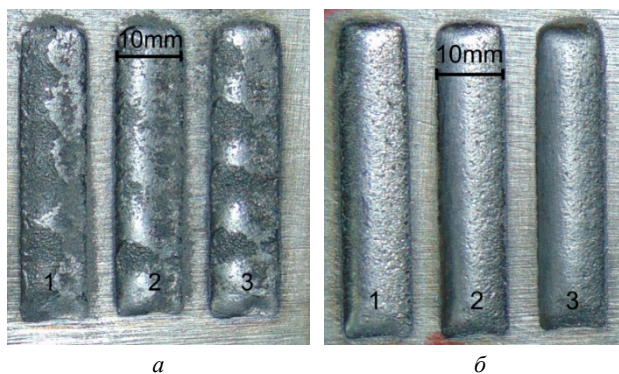


**Рис. 8.** Потоки ГПС (МВП = 25 г/хв, ВГТ = = 400 л/год) сформовані пластиковими моделями щілинних сопел поперечним перерізом 0.8×8 мм та різною довжиною каналів, де: *a* – канал довжиною 40 мм; *б* – канал довжиною 80 мм 1, 2 – траси порошків

Саме тому, очевидні 2 прості рішення зменшення площі поперечного перерізу ГПС (шляхом зменшення площі каналу, який його формує), або зростання ВГТ не гарантують отримання позитивного результату. Так, зменшення площі поперечного перерізу каналу (для даних ВГТ, які забезпечують транспортування ПМ по магістралі) веде до зростання вірогідності зіткнення порошинок в газовому струмені, та (найголовніше) різкого зростання швидкості руху ГПС. Останнє, з одного боку, веде до постачання ГПС “вузьким” струменем на більшу відстань, а з другого (що найголовніше) – до зростання кінетичної енергії порошинок, які згодом взаємодіють з розплавом, який утворюється в зоні дії сфокусованого лазерного променя на поверхні деталі. Саме велика швидкість (кінетична енергія) ГПС, яка взаємодіє з розплавом, тисне на нього, пояснюється те, що в подальшому (за певних умов обробки), при застиганні, форма наплавленого валку має “хвилястий” вигляд (рис. 9 а). Також, очевидно, що зменшення тиску ГПС на розплав можливе:

- за умов збільшення відстані від зрізу сопла до поверхні деталі;
- збільшенню кількості каналів (з малою площею поперечного перерізу).

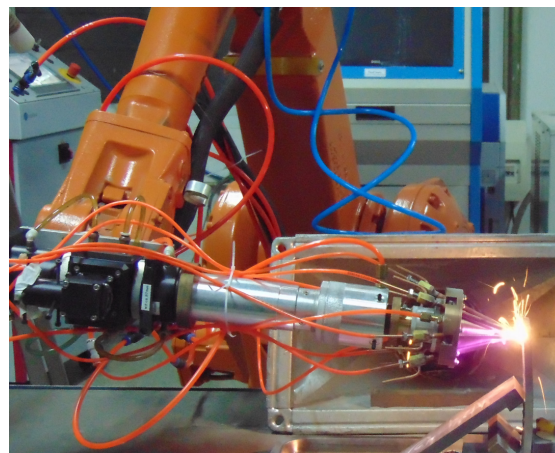
Другий шлях формування ГПС в зоні обробки більш перспективний (рис. 9 б), бо в першому випадку, із-за наявності куту розпилення ГПС [17], [18], зі зростанням відстані від зрізу сопла до поверхні деталі, яка обробляється, знову зростає площа поперечного перерізу ГПС (може перевищувати розміри рідкої ванни, яка утворюється в зоні обробки).



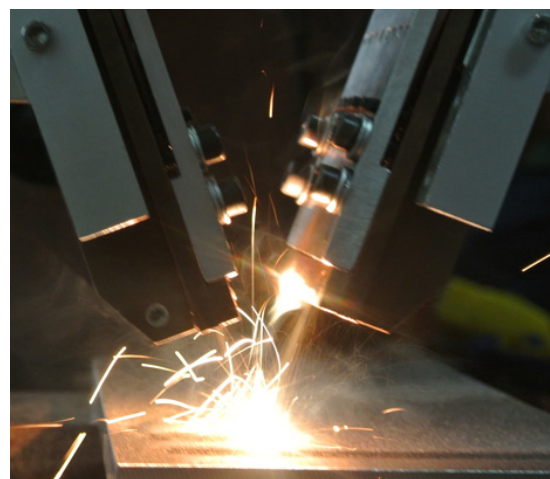
**Рис. 9.** Зовнішній вигляд наплавлених валків отриманих за умов лазерної обробки ( $P_m = 3$  кВт,  $V_x = 3$  мм/с, пляма фокусування лазерного випромінювання розміром  $1.5 \times 12.5$  мм) сталі 2Cr13 при фокусуванні ГПС (ВГТ 600 л/год) 1 соплом з шириною 2 мм та площею  $1.85$  мм<sup>2</sup> (а) та двома однаковими соплами аналогічного розміру, де: 1 – МВП = 10 г/хв; 2 – МВП = 20 г/хв; 3 – МВП = 30 г/хв

Саме тому, найбільш перспективним є розробка та використання багатоканальних систем подачі ГПС в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання для реалізації технологій ЛГПН та швидкого виготовлення

деталей методом направлено лазерного плавлення (direct laser melting- DLM). Так, на рис. 10 зображено процес ЛГПН деякими розробленими системами.



а



б

**Рис. 10.** ЛГПН з використанням багатоканальних систем подачі ГПС в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання, де: а) діодний лазер LDF400-2000 з  $P_m = 2$  кВт, обробка зразка встановленого під кутом  $90^\circ$  до горизонту; б) діодний лазер Dlight-3000 з  $P_m = 3$  кВт, сопло з регульованими кутами нахилу каналів

Наступним кроком, після виготовлення реальних систем подачі ГПС відбувається ретельна перевірка працездатності створених конструкцій шляхом дослідження потоків ГПС (куту розпилення, розподілу масової концентрації порошинок (РКП) в площинах, які перпендикулярні осі ГПС (або лежать під заданим кутом до неї) та встановлені на різній відстані від зрізу сопла, ВГТ, МВП і т.д.).

Найбільш працездатна методика визначення даних параметрів запропонована авторами [18], [19]. Дана методика використовує обробку “уявного” дзеркального сумарного фотозображення віддзеркаленого від порошинок (в потоці ГПС) випромінювання допоміжного лазера. Випромінювання допоміжного лазера



переміщується у вказаних площинах (зі швидкістю  $V_{YL}$ ), які перпендикулярні осі ГПС, а його “свічення” фіксується фотокамерою, яка “відкрита” на час руху допоміжного лазера. Даний метод зручний, дозволяє уникнути потрапляння порошкового матеріалу на оптичні та рухомі елементи фотокамери, які вийдуть з ладу під дією все проникаючих дрібнодисперсних абразивних частинок. Недоліком даного метода є необхідність використання дзеркала з наріжним напиленням (для уникнення подвійного зображення) і неможливість його використання безпосередньо при реалізації ЛГПН. Зазначимо, науковці [20], [21] також розробили систему визначення параметрів сфокусованого ГПС, яка виконує поставлене завдання з “прецизійною” точністю. Недоліком даної системи та методу вимірювань є необхідність використання спеціального устаткування – лазера (формуючого “плоский” промінь працюючого в імпульсному режимі) та надшвидкої кінокамери, яка встановлена безпосередньо над соплом, яке формує ГПС. Причому надшвидка кінокамера встановлена на оптичній осі системи фокусування випромінювання та ГПС. Тобто, як і при використанні методики [18], [19], даний метод [20] неможливо застосувати безпосередньо на технологічному устаткуванні під час (або перед) реалізації ЛГПН.

При проведенні досліджень потоків ГПС, які вийшли з сопла, аналізували відеозображення “свічення” порошків в випромінюванні допоміжного лазера. При чому, відеофіксація “свічення” відбувається при переміщенні сопла в площині, яка паралельна осі допоміжного лазера, за умов перетину ГПС його осі (рис. 11, рис. 12). В даному випадку, обробка отриманих зображень (в порівнянні з методикою, яка наведена в [12], [13], [20]) дещо ускладнюється [24]. Проте, з’являється можливість проводити вимірювання РКП на різній відстані від зрізу сопла безпосередньо на технологічному устаткуванні та проводити перевірку працездатності системи постачання ГПС безпосередньо перед виконанням технологічної операції. Обробка результатів відеофіксації потоку ГПС ведеться в наступній послідовності:

- Розбиття відеофрагменту на окремі зображення, кількість яких визначається частотою кадрів відео  $f_{DC}$ ; формування 3-х мірного масиву координат площини вимірювань у натуральному масштабі  $Area(X, Y, Colour)$ , причому в усіх точках  $Colour = 0$ ;

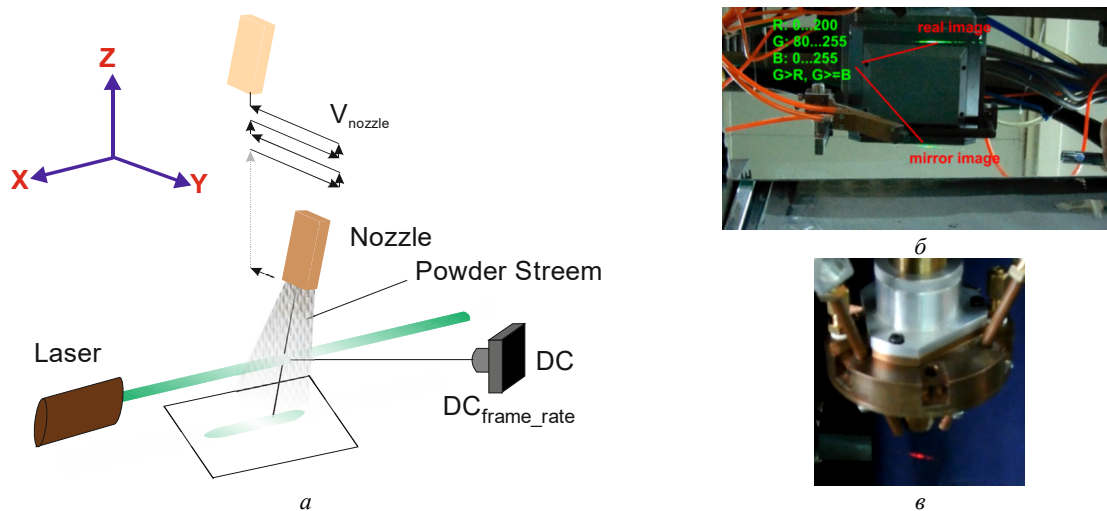
- Провести читання кожного окремого зображення (відеокадра) та провести пошук, з метою вибору фрагменту зображення з даним кольором. Зазначимо, що при відеофіксації (в затемненому приміщенні) свічення потоку ГПС в промені лазера, достатньо шукати пікселі заданого кольору. Так (палітра RGB), при використанні лазера з зеленим кольором променя, достатньо шукати пікселі з  $R = 0...200$ ,  $G = 80...255$ ,  $B = 0...255$ , причому  $G > R$ ,  $R \geq B$ , при використанні лазера з червоним кольором променя, пікселі повинні бути з  $R = 30...255$ ,  $G = 0...100$ ,  $B = 0...100$ , причому  $R > G$ ,  $R > B$ ;

- У випадку, коли бажаного фрагменту не знайдено, відбувається обробка наступного відеокадру. В зворотному випадку, відбувається запис координат пікселів зображення з їх кольором в натуральному масштабі в масив  $Area(X, Y, Colour)$ . Крім того, обов’язково фіксується час  $t_{ST}$  появи першого зображення, відзеркаленого від порошку випромінювання. Після обробки зображення, в наступному, відбувається перехід на наступний кадр, причому (в двох випадках) наступний запис кольору пікселів в масив  $Area(X, Y, Colour)$  відбувається зсувом по координаті  $OY$  (рис. 11) на величину  $ScaleImage * V_{YL} / f_{DC}$  з фіксацією часу зображення  $t_{CUR}$ .

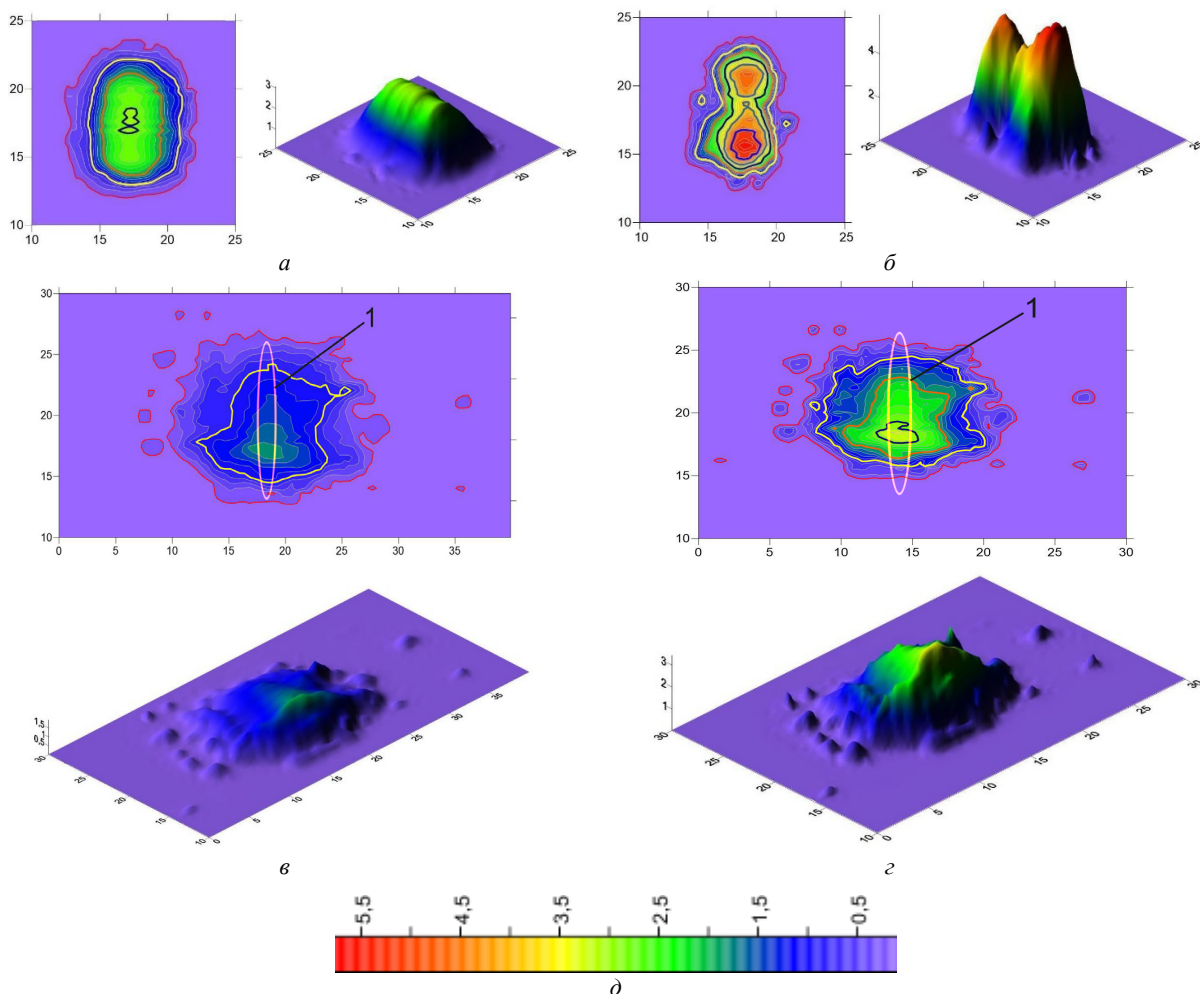
Після обробки всіх зображень, визначається загальна вага порошку, який потрапив в випромінювання допоміжного лазера при його скануванні. Вага порошку дорівнює  $m_{POWD} = PFR * (t_{CUR} - t_{ST})$ . Після розрахунку об’єму  $V_{colour}$ , який знаходиться під отриманою залежністю  $Colour(X, Y)$ , і прирівнявши його до  $m_{POWD}$  ми побудуємо залежність, яка описує РКП від просторових координат в площині, яка лежить на заданій відстані від зрізу сопла:  $m_{POWD}(x, y) = Colour * m_{POWD} / V_{colour}(x, y)$ .

Так, на рис. 12 наведено результати порівняння РКП, який створює стандартне щілинне сопло перерізом  $6 \times 1$  мм з РКП, яке створює спеціальне універсальне сопло (дозволяє змінювати кут  $\alpha$  між каналами подачі порошку) [24], [29] з двома каналами шириною 3,4 мм (рис. 13) в площинах  $XOY$ , що перетинають потік ГПС з  $MVP=20$  гр/хв (спрямований під кутом  $70^\circ$  до горизонту) на різних відстанях від зрізу сопла. Дані залежності отримані при обробці відеозображень (методика розрахунків наведена вище) “свічення” порошків потоку ГПС в випромінюванні “зеленого” лазера, причому на (рис. 12 а, в) потік ГПС сформований одноканальним стандартним соплом з поперечним січенням каналу  $6 \times 1$  мм, а на (рис. 12 б, з) потік ГПС сформований розробленим (рис. 13 а) 2-х каналним соплом (ширина 1 каналу 3,4 мм, площа поперечного січення 2-х каналів  $7.2 \text{ мм}^2$ , кут збігання каналів  $12^\circ$ ).

Як видно з наведених залежностей, на відстані 5 мм від зрізу сопла (рис. 12 а, б) ГПС мають “щільний” характер і майже однаковий поперечний розмір, проте, РКП має різний вигляд. Так, одноканальне сопло створює майже “прямокутний” РКП з деяким максимумом на осі потоку (рис. 12 а), а 2-х каналне сопло – “2-х горбий” РКП (рис. 12 б). Останнє легко пояснюється тим, що розрахована (на відстані 5 мм від зрізу сопла) відстань між осями ГПС складає біля 5 мм, що й спостерігається на залежностях, які наведені на рис. 12 б. На відстані 20 мм, від зрізу сопла (завдяки тому, що осі каналів збігаються під кутом  $12^\circ$ ), відстань між осями каналів складе лише 0.5 мм, що дозволить повністю “перемішати” два незалежні струмені ГПС та створити РКП, який забезпечує потрапляння більшої кількості порошку в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання (рис. 12 з). Що стосується РКП в зоні дії

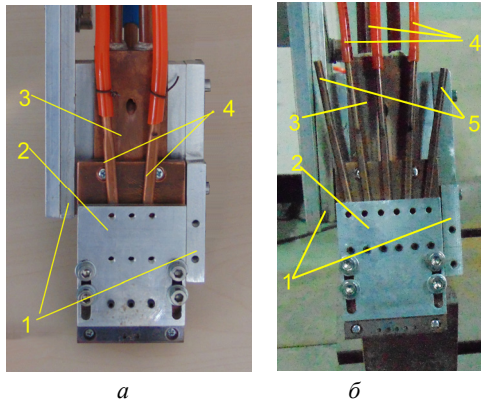


**Рис. 11.** Схема вимірювання параметрів потоку ГПС і фрагменти відеокадрів з зображенням віддзеркаленого випромінювання допоміжного діодного лазера, де: *a* – схема експерименту; *б* – “свічення” порошків ГПС (в випромінюванні “зеленого” лазера) сформованого щілинним багатоканальним соплом; *в* – “свічення” порошків ГПС сформованого 3-х канальним коаксіальним соплом (в випромінюванні “червоного” лазера)



**Рис. 12.** РКП потоку ГПС в площині  $XOY$  (лежить під кутом  $70^\circ$  до осі ГПС) на різній відстані від зрізу сопла (МВП = 20 г/хв), де: *a, б* – відстань від зрізу сопла 5 мм; *в, з* – відстань від зрізу сопла 20 мм; *a, в* – щілинне сопло з поперечним перерізом  $6 \times 1$  мм; *б, з* – сопло зі збігаючими каналами (ширина 1 каналу 3,4 мм, площа поперечного січення 2-х каналів  $7.2 \text{ mm}^2$ ), *д* – масштаб; *1* – пляма фокусування лазерного випромінювання

сфокусованого лазерного випромінювання, який виникає при подачі ГПС одноканальним соплом (рис. 12 *в*) – РКП має “рівномірний” характер, а його площа перевищує площу, яка створена багатоканальним соплом.



**Рис. 13.** Зовнішній вигляд 2-х (*а*) та 5-ти (*б*) каналного сопла з регульованим кутом  $\alpha$  збігання подачі ГПС [22], де: 1 – механізми юстування; 2 – рухома платформа; 3 – водо охолоджуваний корпус; 4 – канали подачі ГПС; 5 – не підключені канали

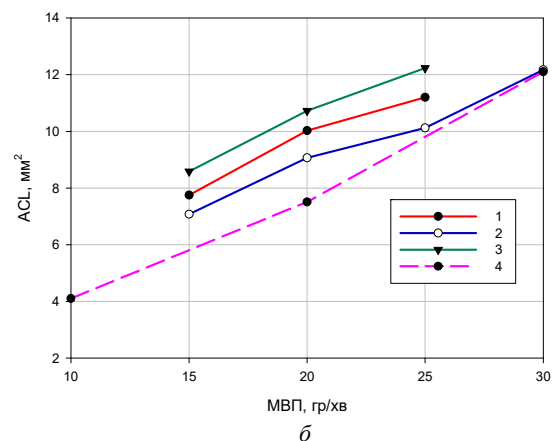
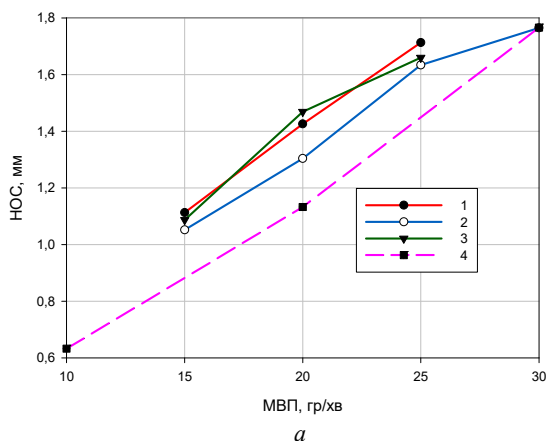
Очевидно, що розмір наплавленого валка залежить від кількості порошку, який попаде в розплав та буде приймати участь в створенні наплавленого валка. Порівнюючи залежності, які описують розподіл РКП в зоні фокусування лазерного випромінювання (рис. 12), та залежності, які описують залежності розмірів наплавленого валка від МВП (рис. 14), які отримані при використанні розглянутих вище систем бачимо їх повну відповідність: розроблена багатоканальна система забезпечує продуктивність реалізації ЛГПН з меншими витратами порошкового матеріалу.

Аналізуючи отримані залежності, відмітимо, що максимальна ефективність процесу ЛГПН (для даних умов обробки) спостерігається при використанні багатоканальних систем подачі ГПС в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання з кутом збігання каналів  $\alpha = 14^\circ$ .

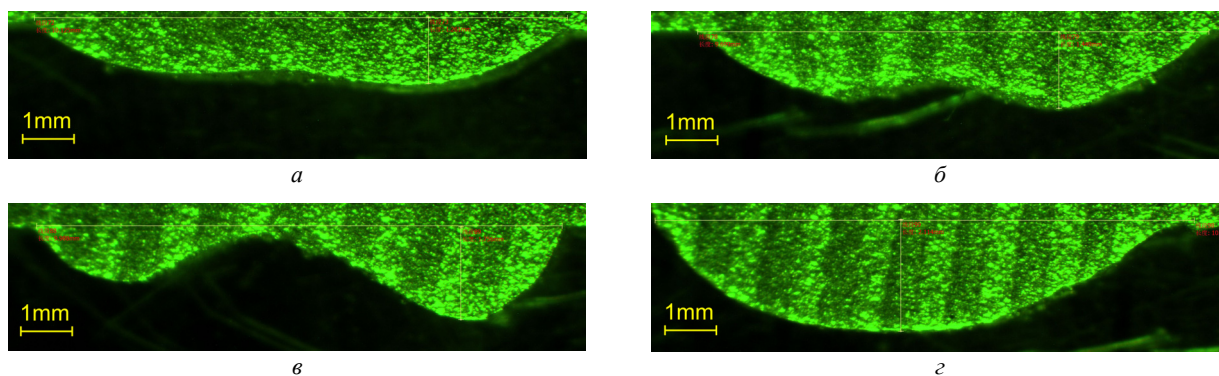
Безумовною перевагою багатоканальних систем подачі ГПС в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання є можливість одночасної подачі в неї різних порошкових сумішей, програмовано змінюючи ВПМ, створюючи тим самим градієнтні матеріали (рис. 15).

Змінюючи (в процесі обробки) кут нахилу каналів подачі ГПС  $\alpha$ , ми можемо впливати на форму поперечного перерізу наплавленого валка. Так, на (рис. 15 *а, б*) наведено поперечні січення наплавлених валків, які сформовані 2-х каналною сопловою системою при подачі різних порошкових сумішей (порошок FeCr12.5, рис. 14 *а* та порошок Stellite 6, рис. 15 *б*). В обох випадках відбувалася симетрична подача порошкового матеріалу з кутом між осями каналів  $3^\circ$  (ВТГ 600 л/год, МВП = 15 г/хв,  $V_x = 3$  мм/с).

Завдяки наявності в порошку Stellite 6 великого проценту важких елементів (W, Co), при рівних умовах (концентрації атмосфери, яка оточує, маси) даний порошок має значно менший об'єм, ніж порошок FeCr12.5. Таким чином, завдяки останньому, за однакових умов обробки, наплавлений шар, який сформований переплавленням порошку Stellite 6 буде мати менші розміри, ніж у валка, який сформований переплавленням порошку FeCr12.5. Вказане підтверджується зображеннями поперечних січень наплавлених валків, які отримані при однакових умовах обробки. Так, наплавлений шар, сформований за рахунок переплавлення порошку FeCr12.5 (рис. 15 *б*) має помітно більші розміри, ніж наплавлений шар сформований за рахунок переплавлення порошку Stellite 6 (рис. 15 *а*).



**Рис. 14.** Залежності НОС (*а*) та ACL (*б*) наплавлених доріжок, які сформовані 2-х каналним соплом, з каналами, що сходяться (ширина 1 каналу 3,4 мм, площа поперечного січення 2-х каналів 7.2 мм<sup>2</sup>), та стандартним одноканальним соплом з поперечним січенням 6×1 мм від МВП, отримані при обробці сталі 2Cr13 сфокусованим лазерним випромінюванням ( $P = 3$  кВт, пляма фокусування лазерного випромінювання розміром 1.5×12.5 мм,  $V_z = 3$  мм/с, ВТГ 600 л/год), для різних кутів між осями каналів  $\alpha$ , де: 1 –  $\alpha = 7^\circ$ ; 2 –  $\alpha = 12^\circ$ ; 3 –  $\alpha = 14^\circ$ ; 4 – одноканальне сопло

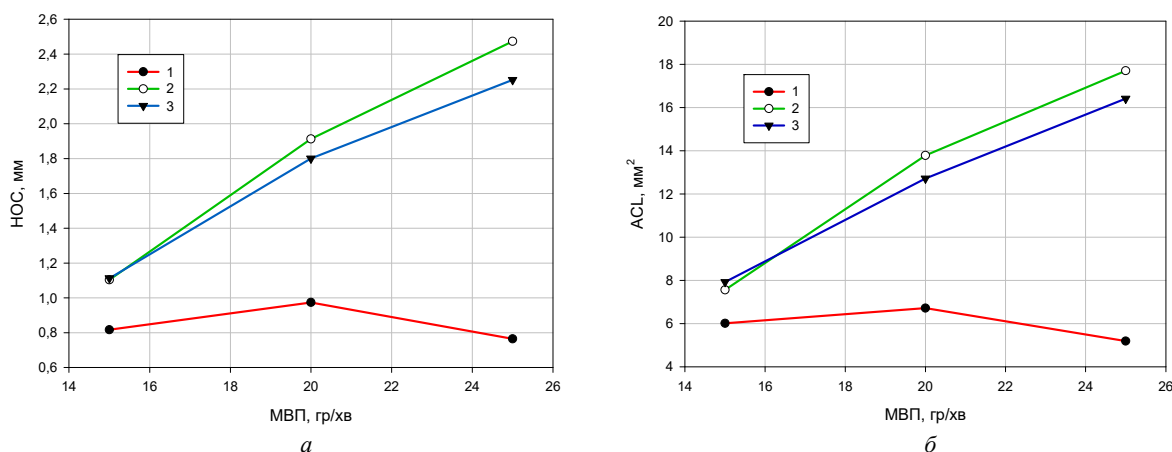


**Рис. 15.** Поперечні січення наплавлених валків ( $P = 3$  кВт, пляма фокусування лазерного випромінювання розміром  $1.5 \times 12.5$  мм, ВТГ 600 л/год, МВП = 400 г/хв,  $V_{\text{х}} = 3$  мм/с), які сформовані за допомогою 2-х каналного сопла, де: а) МВП = 15 г/хв, порошок FeCr12.5,  $\alpha = 3^\circ$ ; б) МВП = 15 г/хв, порошок Stellite 6,  $\alpha = 3^\circ$ ; в) МВП = 7 г/хв, порошок FeCr12.5 (лівий канал), МВП = 7 г/хв, порошок Stellite 6 (правий канал)  $\alpha = 3^\circ$ ; г) МВП = 15 г/хв, порошок FeCr12.5 (правий канал), МВП = 15 г/хв, порошок Stellite 6 (лівий канал)  $\alpha = 14^\circ$

Зберігаючи попередні умови обробки (кут між осями каналів подачі ГПС) та подаючи дані суміші в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання одночасно, по окремим каналам, ми отримуємо більш виражений “верблюдоподібний горб” (рис. 15 в) який повністю усувається при збільшенні куту  $\alpha$  між каналами до  $14^\circ$  (рис. 15 г).

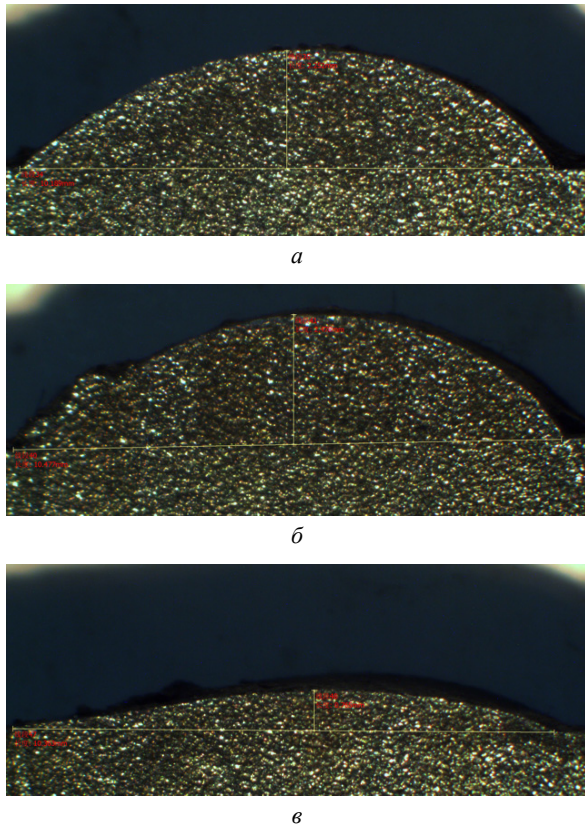
Збільшення кількості каналів дозволяє зменшити площу перерізу окремого каналу, зі збереженням загальної їх площі (з метою уникнути значного тиску на переплавлений (з основою) порошковий матеріал, який знаходиться у рідкому стані). Так, на рис. 13 б зображено 5-ти каналне сопло (1 канал шириною 2,0 мм та площею поперечного січення  $1.7 \text{ мм}^2$ ) з регульованим кутом збігання каналів.

Використання 5-ти каналного сопла забезпечує безліч можливостей впливу на форму потоку ГПС в зоні дії сфокусованого лазерного випромінювання (розподіл швидкостей ГПС, концентрації порошку та інш.) і, відповідно, на розміри та форму наплавленого валка. Так, наприклад, на рис. 16 наведені залежності НОС (а) та ACL (б) наплавлених доріжок які сформовані 5-ти каналним соплом (рис. 13 б), з підключеним 1 центральним каналом (залежність 1, рис. 16), та одночасно двома або трьома каналами (залежність 2 і 3, рис. 16 відповідно). Дані залежності отримані за умов симетричного, відносно осі центрального сопла, розташування кутів нахилу прилягаючих каналів ( $\alpha = 6^\circ$ ) (рис. 16 б). В даному випадку, для даної конструкції сопла, відстань між осями ГПС на поверхні заготовки складатиме приблизно 1 мм.



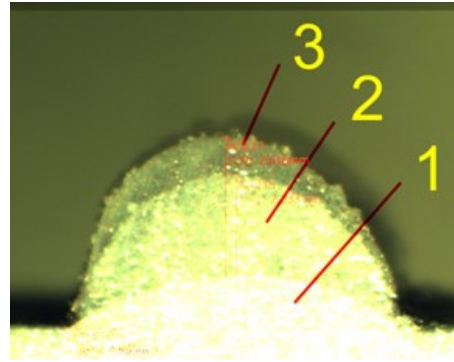
**Рис. 16.** Залежності НОС (а) та ACL (б) наплавлених доріжок, які сформовані 5-ти каналним соплом, з каналами, що сходяться під кутом  $\alpha = 6^\circ$  (1 канал шириною 2,0 мм та площею поперечного січення  $1.7 \text{ мм}^2$ ), від PFR, отримані при обробці сталі 2Cr13 сфокусованим лазерним випромінюванням ( $P = 3$  кВт, пляма фокусування лазерного випромінювання розміром  $1.5 \times 12.5$  мм,  $V_{\text{х}} = 3$  мм/с, ВТГ 600 л/год), де: 1 – подача ГПС по 1 центральному каналу; 2 – подача ГПС по 2 боковим, прилеглих до центрального каналу; 3 – подача ГПС по 2 боковим та центральному каналу одночасно

На рис. 17 наведені перерізи наплавлених валків, які сформовані при використанні розробленої (рис. 13 б) системи. Також, на рис. 18 наведено порівняння перерізів наплавлених валків, які сформовані за допомогою діодного лазера LDF400-2000 з  $P_m = 2$  кВт з передачею випромінювання в зону обробки за допомогою оптичного волокна, при використанні стандартної коаксіальної системи та розробленими багатоканальними системами подачі ГПС (рис. 10 а).



**Рис. 17.** Поперечні січення наплавлених валків ( $P = 3$  кВт, пляма фокусування лазерного випромінювання розміром  $1.5 \times 12.5$  мм, ВТГ 600 л/год, МВП = 25 г/хв,  $V_x = 3$  мм/с), які сформовані за допомогою сопла, яке розроблено за умов підключення 3-х каналів (а), 2-х каналів (б) та 1-го каналу (в)

Як видно з наведеного вище (рис. 14, рис. 16 та рис. 18), для однакових умов обробки продуктивність та якість процесу ЛГПН повністю визначається параметрами ГПС, яка подається в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання. Причому продуктивність ЛГПН, яка виконується за допомогою багатоканальних систем (рис. 14, рис. 16, рис. 18) перевищує продуктивність операції, яка виконується звичайними (одноканальними) соплами (рис. 14, рис. 16). Вказане можна пояснити більш раціональним використанням багатоканальними системами порошкового матеріалу, який створює наплавлений шар.



**Рис. 18.** Зовнішній вигляд поперечного перерізу наплавленого валка соплами різної конструкції за умов нахилу заготовки до горизонту Alpha  $50^\circ$  ( $P_m = 2$  кВт,  $V_z = 3$  мм/с,  $F_2 = 410$  мм) де: 1 – коаксіальне сопло МВП = 30 гр/хв, 2 – 3-х канальне сопло МВП = 10 гр/хв, 3 – 3-х канальне сопло МВП = 20 гр/хв

## Висновки

В роботі детально розглянута методика проектування та перевірки працездатності систем (використовуються при реалізації технологій лазерного газопорошкового легування, наплавлення та швидкого виготовлення виробів по технології направленного лазерного плавлення) подачі газопорошкової суміші в місце дії сфокусованого лазерного випромінювання, яка дозволяє їх розробку та виготовлення з мінімальними затратами часу та коштів.

При проведенні досліджень (межі масових витрати порошкового матеріалу 5–40 гр/хв, межі масових витрат газу, який транспортує 200–600 л/год) встановлено, що при реалізації ЛГПН багатоканальні системи подачі ГПС в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання, в порівнянні з одноканальними або коаксіальними системами:

- забезпечують підвищення продуктивності операції, яка виконується (особливо при обробці поверхонь, які лежать під кутом до горизонту);
- забезпечують менші витрати порошкового матеріалу;
- дозволяють подавати в зону обробки порошкові суміші різного хімічного складу.

Запропоновано оригінальний спосіб визначення розподілу концентрації маси порошку в потоці ГПС, який використовує аналіз відеозображення відзеркаленого (від порошинок, які знаходяться в потоці ГПС) випромінювання допоміжного лазера. При цьому, випромінювання допоміжного лазера сканує (переміщується) в площині, яка є перпендикулярною (чи лежить під кутом) до осі ГПС. Реалізація даного способу можлива, безпосередньо, на промисловому устаткуванні і не потребує додаткового спеціального оснащення.

В процесі досліджень розроблена оригінальна (захищена патентом України) багатоканальна система

подачі ГПС в зону дії сфокусованого лазерного випромінювання, яка дозволяє змінювати:

- кут між осями каналів;
- кількість підключених до пристрою, який дозує порошок, каналів;
- склад порошкового матеріалу, який подається по окремим каналам (за наявності кількох дозаторів).

• та впливати на продуктивність та якість операції, яка виконується.

**Подяка.** Дослідження, результати яких відображені вище, виконувались під керівництвом проф. Володимира Коваленко, світлій пам'яті якого присвячена дана стаття.

## References

- [1] A.J. Pinkerton “Advances in the modeling of laser direct metal deposition”. *J. Laser Appl.*, Vol. 27, S15001, 2015, doi: 10.2351/1.4815992.
- [2] J. Ready, LIA Handbook on Laser Materials Processing, LIA, Magnolia Publishing, Inc.: 2001. 715 p.
- [3] M. Yang et. al., “Influence of heat source model on the behavior of laser cladding pool”, *Journal of Laser Applications*, Vol. 35, 022006, 2023, doi: 10.2351/7.0000963.
- [4] J. Yao et. al., “Modeling of laser cladding with diode laser robotized system”, *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, Vol. 46, pp. 266–270, 2010, doi: 10.3103/S1068375510030130.
- [5] Q. Zhang et. al., “Application of Regression Designs for Simulation of Laser Cladding”, *Physics Procedia*, Vol. 39, pp. 921–927, 2012, doi: 10.1016/j.phpro.2012.10.117.
- [6] V. Kovalenko et. al., “Influence of the interaction of focused laser beam and gas-powder stream on the quality of laser processing”, *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp. 498–503, 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.03.062.
- [7] K. Qi, et. al., “The Relevance of Process Parameter Optimization and Geometric Figure for Direct Laser Deposition of Inconel 738 Alloy and Its Theoretical Modeling”, *Coatings*, 13, 1926, 2023, doi: 10.3390/coatings13111926.
- [8] S. Mondal, B. Tudu, A. Bandyopadhyay and P.K. Pal, “Process Optimization for Laser Cladding Operation of Alloy Steel using Genetic Algorithm and Artificial Neural Network”, *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, Vol. 2, Issue No.1, Jan-Feb 2012.
- [9] S. Liu and R. Kovacevic, “Statistical analysis and optimization of processing parameters in high-power direct diode laser cladding,” *Int J Adv Manuf Technol.*, Vol. 74, pp. 867–878, 2014, doi: 10.1007/s00170-014-6041-y.
- [10] P. Farahmand and R. Kovacevic, “Parametric Study and Multi-Criteria Optimization in Laser Cladding by a High Power Direct Diode Laser”, *Lasers Manuf. Mater. Process.*, Vol. 1, pp. 1–20, 2014, doi: 10.1007/s40516-014-0001-0.
- [11] S. Liu, Y. Zhang and R. Kovacevic, “Numerical Simulation and Experimental Study of Powder Flow Distribution in High Power Direct Diode Laser Cladding Process”, *Lasers Manuf. Mater. Process.*, Vol. 2, pp. 199–218, 2015, doi: 10.1007/s40516-015-0015-2.
- [12] US Patent Application Publication, No.US 0199564 A1, publ., date Aug. 9, 2012.
- [13] J.I. Arrizubieta, I. Taberner, J. Exequie Ruiz, A. Lamikiz and S. Martinez, “Continuous coaxial nozzle design for LMD based on numerical simulation,” *Physics Procedia*, Vol. 56, pp. 429–438, 2014, doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.146.
- [14] A. Guner, P. Bidare, A. Jiménez, S. Dimov and K. Essa, “Nozzle Designs in Powder-Based Direct Laser Deposition: A Review”, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 23, pp. 1077–1094, 2022, doi: 10.1007/s12541-022-00688-1.
- [15] N. Jayanth and K. Ravi, “Modeling of laser based direct metal deposition process,” *International Journal On Engineering Technology and Sciences*, Vol. 2, Issue 4, pp. 95–101, April -2015.
- [16] J. Ibarra-Medina and A.J. Pinkerton, “A numerical investigation of powder heating in coaxial laser metal deposition”, Paper No: 1754 – 36th MATADOR Conference.
- [17] S. Morville et al., “Numerical Modeling of Powder Flow during Coaxial Laser Direct Metal Deposition – Comparison between Ti-6Al-4V Alloy and Stainless Steel 316L”, Excerpt from the Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Milan
- [18] S. Zekovic, R. Dwivedi and R. Kovacevic, “Numerical simulation experimental investigation of gas-powder flow from radially symmetrical nozzles in laser-based direct metal deposition,” *Int J Mach Tools Manuf.*, Vol. 47, pp. 112–123, 2007, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.02.004.
- [19] P. Balu, P. Leggett and R. Kovacevic, “Parametric study on a coaxial multi-material powder flow in laser-based powder deposition process,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp. 1598–1610, 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.020.
- [20] C. Zhong et al., “The Influence of the Powder Stream on High-Deposition-Rate Laser Metal Deposition with Inconel 718”, *Metals*, Vol. 7, 2017, doi: 10.3390/met7100443.
- [21] T. Schopphoven et al., “Statistical/Numerical Model of the Powder-Gas Jet for Extreme High-Speed Laser Material Deposition”, *Coatings*, Vol. 10(4), 416, 2020, doi: 10.3390/coatings10040416.
- [22] C. Guo et al., “Analysis of the Agglomeration of Powder in a Coaxial Powder Feeding Nozzle Used for Laser Energy Deposition”, *Fluid Dynamics & Materials Processing*, Vol. 17(2), pp. 349–370, 2021: doi: 10.32604/fdmp.2021.013535.

- [23] V. Kovalenko et al., “Development of Multichannel Gas-powder Feeding System Coaxial with Laser Beam”, *Procedia CIRP*, Vol. 42, pp. 96–100, 2016, doi:10.1016/j.procir.2016.02.197.
- [24] R. Zhuk et al., “Gas-powder laser cladding with slot nozzles”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 108, pp. 1163–1171, 2020, doi: 10.1007/s00170-019-04600-6.
- [25] R. Jimbou, M. Inagaki and T. Tamamura, “A method for laser alloying and transformation hardening using a uniform intensity rectangular beam,” Proceeding of the first International Laser Processing Conference, November 16–17, 1981, Anaheim, CA, USA. LIA, 1981, pp. 97–117.
- [26] H. Pantsar, “Productivity issues in diode laser transformation hardening,” Paper No. 905, ICALEO, 2005 Congress Proceedings, Miami, Florida, October 31–November 3 Hyatt Regency Miami, doi: 10.2351/1.5060523.
- [27] U.S. Patent Application Publication No. US 8,602,592 B2, publ, date Dec. 10 2013.
- [28] Ansys CFX User Guide, Ansoft.
- [29] “Prystrij dlja lazernogo naplavlennja kerovanyh rozpodilom gazoporoshkovo sumishi,” Patent Ukrainy No. 112387 V23K 26/744(2014.01) V23K 26/342 (2014.01) V23K 26/70 (2014.01).

## Development of powder delivery nozzles for laser gas-powder cladding

Mykola Anyakin<sup>1</sup> • Jianhua Yao<sup>2</sup> • Qunli Zhang<sup>2</sup> • Ruslan Zhuk<sup>2</sup> • Zhijun Chen<sup>2</sup>  
• Sergiy Vintoniak<sup>1</sup> • Denis Kupchak<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Zhejiang University of Technology Hangzhou, P.R. China

**Abstract.** Along with processing parameters, material properties of the workpiece and the powder, the quality of focusing of gas-powder stream is the key parameter that can influence the productivity, quality and costs of laser gas-powder cladding, rapid prototyping by selective laser sintering and surface modifications. Unfortunately, there is almost no information on the methodology for the design of gas-powder streams delivery and simple methods for the control and measurement of gas-powder stream characteristics.

Development of the methodology for the design gas-powder streams delivery nozzles that are used in laser gas-powder cladding and simple methods for the control of gas-powder stream characteristics.

Numerical methods of vector optics, gas dynamics and image analysis were used.

Original systems for the implementation of laser gas-powder cladding with increased productivity and low rate of powder waste were designed, manufactured and verified experimentally.

It was established that the use of multi-channel nozzles for the delivery of gas-powder stream into laser beam processing zone increase the productivity of technological processes of laser cladding (especially for the cases when workpiece is not positioned perpendicularly to the laser beam) if compared with traditional coaxial and one-channel nozzle. Another benefit of multi-channel nozzles is that it is possible to introduce simultaneously two or more different powder mixtures into the processing zone.

**Keywords:** laser beam, laser cladding, gas-powder stream, nozzle.