

УДК 621.9.048

Кондрашев П.В., к.т.н., доц.

НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОЇ МІКРОСТРУКТУРИ СПЛАВЛЕНИХ ФРАГМЕНТІВ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ «RAPID PROTOTYPING»

Kondrashev P.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute», Kiev, Ukraine, (kondrashev@ukr.net)

STUDY INTERNAL MICROSTRUCTURE BY FUSING FRAGMENTS FOR IMPLEMENTATION OF TECHNOLOGY RAPID PROTOTYPING

Розроблена методика підвищення якісних показників внутрішньої мікроструктури сплавлених компонентів при реалізації технології «Rapid Prototyping». Сутність даної методики полягає в покращенні показників суцільності внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів, які мають примітивну геометричну конфігурацію. Розрахунок проводився з використанням методів математичної статистики, а саме була побудована математична модель суцільності другого порядку з подальшою оптимізацією функції відгуку. Розроблений в статті метод дозволяє керувати якісними показниками процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу.

Ключові слова: суцільність, геометрична конфігурація, внутрішня мікроструктура, сплавлені фрагменти.

Вступ

В сучасному світі стрімкого розвитку науково-інноваційних технологій неможливо уявити жодну галузь індустрії ведучих країн світу без застосування лазерної технології. Такий універсальний інструмент, як лазер може виконувати безліч технологічних операцій, та застосовуватися багатьма сучасними технологіями, однією з таких є технологія «Rapid Prototyping», яка використовує у якості інструменту сфокусований лазерний промінь та широко застосовується високорозвиненими країнами у всьому світі, для безпосереднього виготовлення (наприклад, штампів, пресформ та ін.). Не зважаючи на разючі успіхи лазерної техніки та технології, перед розробниками стоять питання підвищення якісних показників формоутворення виробів з порошкових матеріалів, створення систем контролю та ін. Тому, розробка ефективних лазерних технологій спрямованих на підвищення якісних показників майбутніх виробів, виготовлених за допомогою швидкого прототипування, безумовно є актуальною задачею.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Враховуючи високу складність протікання фізичних процесів, пов'язаних з реалізацією технології «Rapid Prototyping» добре зарекомендувала себе активна стратегія проведення експерименту, яка дає можливість отримати більш точні результати експериментальних досліджень в порівнянні з пасивною стратегією. Аналіз літературних джерел дозволив встановити технологічні фактори, які безпосередньо впливають на якісні показники сплавлених фрагментів [1-5]. Зміна положення підкладки відносно пристрою подачі порошкового матеріалу впливає на такі показники сплавленого компонента як, морфологічні властивості, внутрішня мікроструктура (порожні фрагменти, раковини, мікротріщини). Масова витрата порошкового матеріалу безпосередньо впливає на внутрішню мікроструктуру сплавлених фрагментів, але має кореляцію з фактором потужності лазерного випромінювання. Термодинамічні властивості порошкового матеріалу, такі як температура плавлення, залежать від потужності лазерного випромінювання, чим вище температура плавлення порошкового матеріалу, тим більша потужність необхідна для його сплавлення. Серед базових, порошкових матеріалів, які використовуються для технології лазерного сплавлення порошкової композиції, широке застосування отримали порошки на основі нікелю, титану, кобальту [6]. Найбільш поширений з цієї групи порошок ПГСП-3 базовою складовою якого є нікель, який має найменшу температуру плавлення 1453° С [7], в порівнянні з титаном і кобальтом. Одним з головних факторів впливу на якісні показники сплавлених фрагментів є конфігурація пристрою подачі порошкового матеріалу (сопла різних конструкцій) [8, 9].

Дослідження внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів методом математичної статистики

Аналіз літературних джерел показав, що покращення якісних показників виробів отриманих за допомогою технології «Rapid Prototyping» є одним з пріоритетних напрямків наукових досліджень. Для реалізації даної задачі була обрана методика повно факторного експерименту з використанням не композиційного плану Бокса-Бенкена [10], якій повністю відповідає вимогам експерименту, та має вигляд рівняння регресії другого порядку (1), для 4-х факторів впливу, з трьома рівнями варіювання для кожної незалежної змінної.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{i=k} b_i x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ i \leq j}}^{i=k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{ii=1}^{i=k} b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

де k -кількість технологічних факторів; b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} -коефіцієнти рівняння регресії; i, j -індекси.

Трансформування технологічних факторів впливу на процес лазерного сплавлення порошкової композиції ПГСП-3 з натурального масштабу X_i до кодованого здійснювали за допомогою залежностей (2), (3).

де X_{i0} -центр експерименту i -го технологічного фактора впливу в натуральному масштабі;

X_i - i -ий технологічний фактор впливу в натуральному масштабі.

$$X_i = X_{i0} + \Delta X_i x_i, \quad (2)$$

де ΔX_i -інтервал варіювання для i -го фактора впливу;

x_i - i -ий фактор впливу.

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}. \quad (3)$$

Для оцінки дисперсії дослідів S_y^2 при моделюванні процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу ПГСП-3, проводили рівномірне повторення дослідів $n_u=3$. Однорідність ряду строкових дисперсій перевіряли за критерієм Кохрена [11], генеральну дисперсію експериментальних досліджень, визначали за формулами (4)-(8).

$$\hat{y}_u = \frac{\sum_{g=1}^{n_u} y_{g_u}}{n_u}, \quad (4)$$

$$S_{y_u}^2 = \frac{\sum_{g=1}^{n_u} (y_{g_u} - \hat{y}_u)^2}{f_1}, \quad (5)$$

$$G^{розр.} = \frac{S_{y_{uMAX}}^2}{\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2}, \quad (6)$$

$$G^{розр.} < G^{табл.}, \quad (7)$$

$$S_y^2 = \frac{\sum_{g=1}^N S_{y_u}^2}{N}, \quad (8)$$

де \hat{y}_u -результат g -го повторення u -го дослідів в кожній точці плану;

f_1 -число ступенів вільності;

$G^{розр.}$ -розрахунковий критерій Кохрена;

$S_{y_{uMAX}}^2$ -максимальне значення дисперсії в ряді;

$G^{табл.}$ -табличний критерій Кохрена [11].

Для аналізу внутрішньої мікроструктури сплавленого фрагмента в якості функції відгуку була використана суцільність (загальна кількість пустих фрагментів, раковин, мікротріщин виражених у відсотковій формі) (W). Коефіцієнти рівняння регресії b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} -моделі (1) розраховувались за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення з використанням математичного апарату лінійної алгебри [12, 13]. Формування матриці умов експерименту X відбувалось з використанням збалансованої блок-схеми для 4-ох незалежних змінних (x_1, x_2, x_3, x_4), яка складається з 6-ти блоків (повно факторний експеримент 2^2) [14], варіювання факторів впливу на процес лазерного сплавлення порошкової композиції проводилось на трьох рівнях (мінімум, центр, максимум). Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії (1) не композиційного плану другого порядку Бокса-Бенкена [11] для 4-ох технологічних факторів впливу на процес лазерного сплавлення порошкового матеріалу ПГСП-3 з рівномірним повторенням дослідів, проводився за загальною методикою [11]

формула (9). Розрахунок дисперсії оцінок коефіцієнтів рівняння регресії за використанням залежності (10). Розрахунок інтервалів довіряння за допомогою рівняння (11).

$$B = (X^T X)^{-1} (X^T Y), \quad (9)$$

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}, \quad (10)$$

$$\Delta b_i = t_{\alpha; f_1} S_{b_i}, \quad (11)$$

де Δb_i - інтервал довіряння для коефіцієнтів рівняння регресії.

Визначення статистичної значимості коефіцієнтів регресії (1) за умови рівномірного повторення дослідів експерименту, проводилось за формулою (12).

$$\Delta b_i = t_{\alpha; f_1} S_{b_i}; |b_i| \geq t_{\alpha; f_1} S_{b_i}, \quad (12)$$

де t -табличний критерій Ст'юдента [11];

$$f_1 = N(n-1);$$

α -рівень значимості.

Перевірка гіпотези стосовно адекватності отриманих математичних моделей процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу проводилася за використанням методики [11] критерія Фішера F , яка дозволяє отримати достовірність результатів експерименту з мінімальною похибкою у межах 5% (13).

$$F^{\text{розрах.}} \leq F^{\text{табл.}}, \quad (13)$$

де $F^{\text{розрах.}}$ - розрахункове значення критерія Фішера визначаються за допомогою залежності (14);

$F^{\text{табл.}}$ - табличне значення критерія Фішера [11].

$$F_{f_2; f_1}^{\text{розрах.}} = \frac{S_{\text{неад.}}^2}{S_y^2}, \quad (14)$$

де $S_{\text{неад.}}^2$ - дисперсія неадекватності визначається за формулою (15).

$$S_{\text{неад.}}^2 = \frac{SS_{\text{неад.}}}{f_2}, \quad (15)$$

де $SS_{\text{неад.}}$ - показник, який розраховується за формулою з урахуванням рівномірного повторення всіх дослідів (16) f_2 -число ступенів вільності визначається за формулою (17).

$$SS_{\text{неад.}} = n \sum_{u=1}^N (y_{u_{\text{розрах.}}} - \overline{y_{u_{\text{експ.}}}})^2, \quad (16)$$

де $y_{u_{\text{розрах.}}}$ - розрахункові значення функції відгуку;

$\overline{y_{u_{\text{експ.}}}}$ - середні значення повторів функції відгуку;

n -кількість повторень кожного дослідів.

$$f_2 = N - k', \quad (17)$$

де N -число дослідів в плані;

k' - число залишених коефіцієнтів рівняння регресії (1).

Для подальшого аналізу моделі другого порядку та пошуку оптимальних показників суцільності внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів, було застосовано розрахункову процедуру, яка має назву «рідж-аналіз» [11]. Дана обчислювальна процедура базується на методі невизначених множників Лагранжа та може застосовуватися без канонічного перетворення. Для реалізації цього метода попередньо було зроблено канонічне перетворення моделі, з метою отримання початкового значення множника Лагранжа, в даному випадку для пошуку мінімуму рекомендовано брати значення множника Лагранжа меншим за мінімальний від'ємний канонічний коефіцієнт [11]. Канонічне перетворення отриманої математичної моделі суцільності внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів рівняння (18).

$$y - y_s = B_{11} \tilde{X}_1^2 + B_{22} \tilde{X}_2^2 + \dots + B_{kk} \tilde{X}_k^2, \quad (18)$$

де y_s -вільний член канонічного рівняння;

B_{ii} -коефіцієнти рівняння в канонічній формі;

\tilde{X}_i - нові осі координат повернуті на деякий кут відносно старих осей x_i .

Характеристичне рівняння в даному випадку 4-ий порядок (19) корені якого є величини канонічних коефіцієнтів B_{ii} .

$$f(B) = \begin{vmatrix} (b_{11} - B) & 0,5b_{12} \dots 0,5b_{1i} & \dots 0,5b_{1k} \\ 0,5b_{21} & (b_{22} - B) \dots 0,5b_{2i} & \dots 0,5b_{2k} \\ \dots & \dots & \dots \\ 0,5b_{i1} & 0,5b_{i2} \dots (b_{ii} - B) & \dots 0,5b_{ik} \\ \dots & \dots & \dots \\ 0,5b_{k1} & 0,5b_{k2} \dots 0,5b_{ki} & \dots (b_{kk} - B) \end{vmatrix} = 0, \quad (19)$$

де $b_{ij}=b_{ji}$.

Перевірка правильності розрахунків проводилась за формулою (20), сума коефіцієнтів рівняння регресії повинна дорівнюватиме сумі канонічних коефіцієнтів.

$$\sum_{i=1}^k B_{ii} = \sum_{i=1}^k b_{ii}, \quad (20)$$

Як було зазначено вище розрахункова процедура «рідж-аналізу» базується на методі невизначених множників Лагранжа. В даному випадку (з урахуванням кількості факторів впливу на процес лазерного сплавлення порошкової суміші) складається система рівнянь (21).

$$\begin{cases} (b_{11} - \gamma)x_1 + 0,5b_{12}x_2 + \dots + 0,5b_{1k}x_k + 0,5b_1 = 0; \\ 0,5b_{21}x_1 + (b_{22} - \gamma)x_2 + \dots + 0,5b_{2k}x_k + 0,5b_2 = 0; \\ \dots \\ 0,5b_{k1}x_1 + 0,5b_{k2}x_2 + \dots + (b_{kk} - \gamma)x_k + 0,5b_k = 0; \end{cases}, \quad (21)$$

де γ -невизначений множник Лагранжа; $b_{ij}=b_{ji}$.

Для вирішення системи рівнянь (21) необхідно задати значення γ , вибір якого визначається умовами поставленої задачі, а саме для визначення максимуму, значення γ повинно бути більшим за значення максимального канонічного коефіцієнта і навпаки при визначенні мінімуму, γ повинно бути меншим мінімального канонічного коефіцієнта, як зазначено вище. Далі визначають умовний екстремум на сфері, яка описана навколо центру експерименту з радіусом R , який визначається за формулою (22).

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^k x_i^2}, \quad (22)$$

Рівні варіювання технологічних факторів (x_i) були визначені експериментально (табл. 1).

Таблиця 1

Рівні варіювання технологічних факторів

Рівні варіювання та інтервали змінення технологічних факторів	Незалежні змінні			
	x_1	x_2	x_3	x_4
Розмірність	град.	г/с	мм/с	мм
Основний рівень	40	0,3	2,0	5
Інтервал варіювання	10	0,1	1,0	2
Верхній рівень	50	0,4	3,0	7
Нижній рівень	30	0,2	1,0	3

Розраховані дисперсії оцінок коефіцієнтів рівняння регресії, інтервали довір'яння (з урахуванням критерію Стюдента $t_{0,05}=1,96$ [11]) представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Інтервали довір'яння коефіцієнтів рівняння регресії

Відгук	Δb_0	Δb_i	Δb_{ij}	Δb_{ii}
W	0,000969	0,002018	0,006054	0,002018

Генеральні дисперсії дослідів, розрахунковий, табличний критерії Кохрена та ступеня вільності наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Статистична обробка результатів експерименту

Функція відгуку	Дисперсія дослідів, S_y^2	Розрахунковий критерій Кохрена, $G^{розр.}$	Табличний критерій Кохрена, $G^{табл.}$	Ступені вільності, f_1
$W, \%$	0,037067	0,101	0,235	50

Проведена статистична обробка результатів експериментальних досліджень показала, що всі коефіцієнти рівняння регресії виявилися статистично значимі, завдяки виконанню умови (12). За допомогою отриманої моделі суцільності внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів були визначені розрахункові значення функції відгуку (W). Результати статистичного аналізу моделі суцільності для функції відгуку (W), параметри $S^2_{неад.}$, k' , $F_{f_2:f_1}^{розр.}$, $F_{f_2:f_1}^{табл.}$, f_2/f_1 представлені в табл. 4.

Таблиця 4

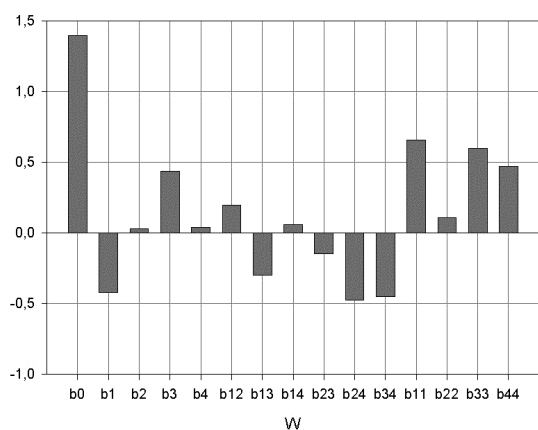
Статистичний аналіз моделі суцільності

Відгук	Дисперсія неадекватності ($S^2_{неад.}$)	Розрахунковий критерій Фішера ($F_{f_2:f_1}^{розр.}$)	Табличний критерій Фішера ($F_{f_2:f_1}^{табл.}$)	Ступені вільності (f_2/f_1)
W	1,485991	0,055081	2,02	10/50

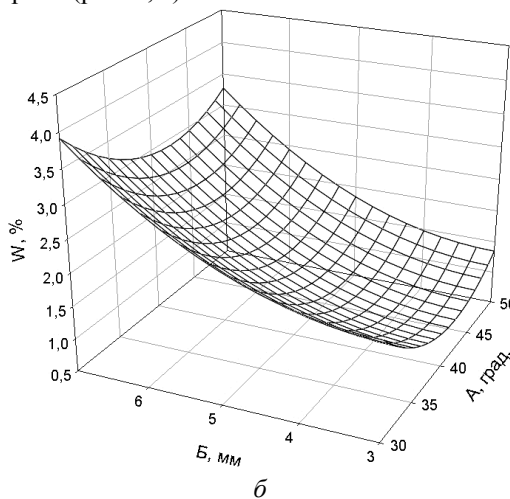
На підставі отриманих результатів експерименту, слід зазначити наступне, для отриманої математичної моделі суцільності внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів (W) статистична гіпотеза про адекватність підтвердилася, строкова дисперсія однорідна, т. я., виконуються умови (7), (13).

Аналіз статистичної значимості технологічних факторів на модель суцільності внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів

Для більш детального уявлення про ступінь статистичної значимості кожного з технологічних факторів на функцію відгуку суцільності (W) була побудована рангова діаграма (рис. 1, а).

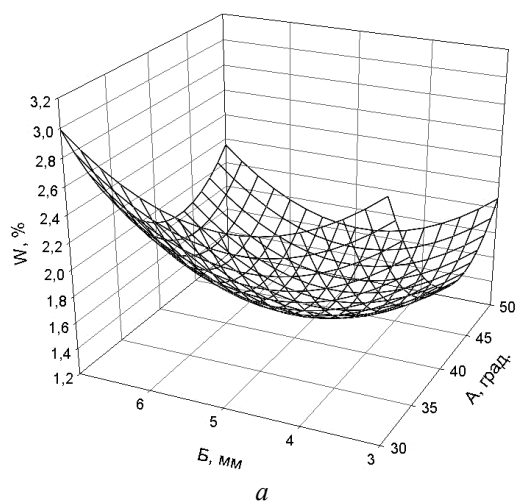


а

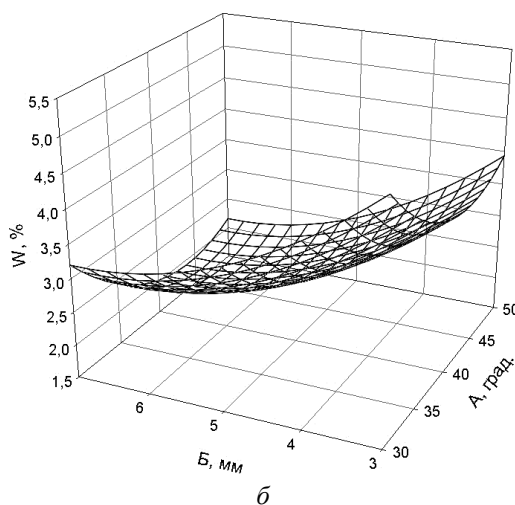


б

Рис. 1. Рангова діаграма ступеню статистичної значимості технологічних факторів на функцію відгуку (W) (а) та залежність суцільності сплавленого фрагмента (W) від геометрії кутів утворюючих сопла (A) для різних положень підкладки (B) з масовою витратою порошкової композиції 0,2 г/с та швидкістю переміщення підкладки 1 мм/с.



а



б

Рис. 2. Залежність суцільності (W) від геометрії кутів утворюючих сопла (A) для різних положень підкладки (B):

а)-масова витрата порошкової композиції 0,3 г/с, швидкість переміщення підкладки 2 мм/с, б)- масова витрата порошкової композиції 0,4 г/с, швидкість переміщення підкладки 3 мм/с

Найкращі показники суцільності близько 1,2% спостерігаються при кутах геометрії утворюючих 40° для швидкості переміщення підкладки 2 мм/с, масової витрати порошкового матеріалу 0,3 г/с, та відстані від зрізу сопла 5 мм (рис. 2, б), головний чинник формоутворення фрагментів з близькою до ідеальної мікроструктури сплавленого фрагмента є збігання положення підкладки з положенням «фокусу» газопорошкового струменя, за рахунок чого вплив лазерного випромінювання відбувається у ділянці з максимальною поперечною концентрацією дисперсної фази у потоці газу, внаслідок чого формується щільний газопорошковий струмінь з високим змістом дисперсної фази у зоні обробки, саме ці умови призводять до формоутворення фрагментів з щільною суцільною мікроструктурою. Аналогічні показники суцільності приблизно 4% (рис. 2, б), такі як у випадку (рис. 1, б) спостерігаються для кутів геометрії 30° , швидкості переміщення підкладки 3 мм/с, масової витрати порошкового матеріалу 0,4 г/с, та положенні підкладки від зрізу сопла 3 мм вище за положення «фокусу» газопорошкового струменя, та високим показником швидкості переміщення підкладки 3 мм/с, що призводить до формування газопорошкового струменя з великою площею поперечного перерізу та низькою концентрацією дисперсної фази у потоці газу, за рахунок чого формуються фрагменти сплавленої порошкової композиції з достатньо великим змістом пустих ділянок. На рис. 3, а)-в) в якості прикладу, представлені фотографії поверхні мікрошліфів сплавлених фрагментів для трьох кутів геометрії утворюючих коаксіального сопла 30° , 40° та 50° , з позначенням загальної кількості пустих фрагментів, оптичне збільшення 2000 крат (рис. 3, а)-в), площа досліджуваної поверхні мікрошліфа складає, ширина 1 мм висота 0,75 мм (обумовлена технічними можливостями електронного растрового мікроскопу РЕМ106-И).

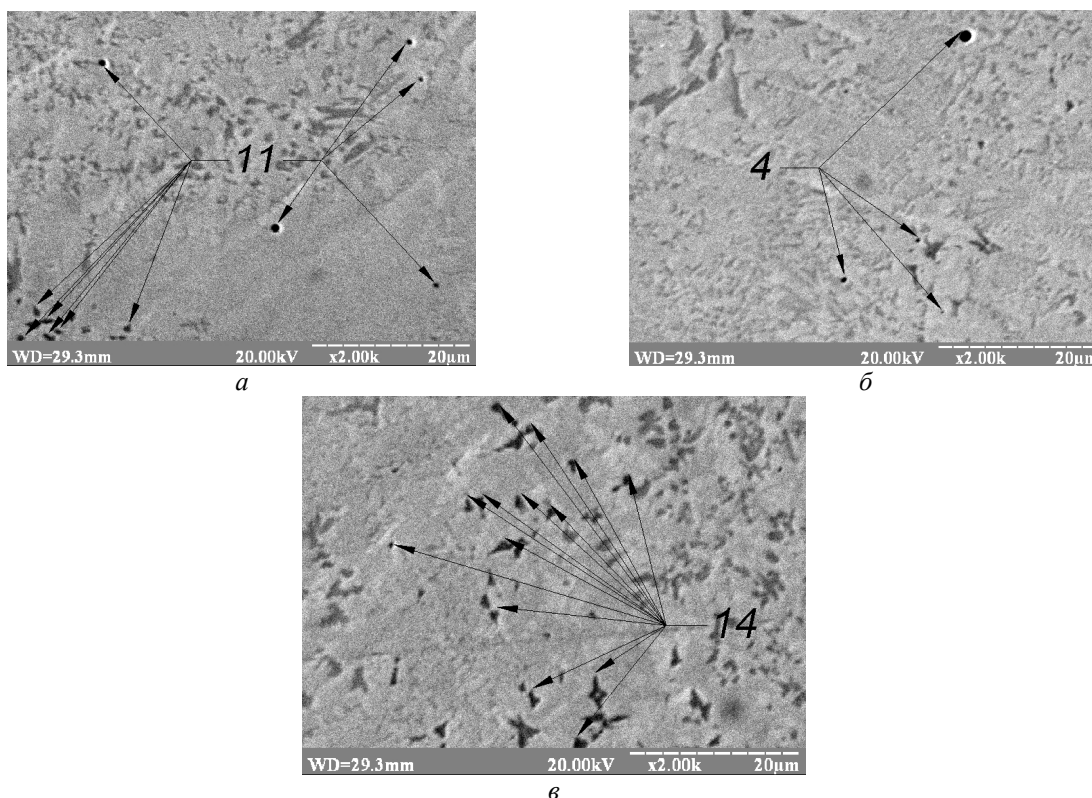


Рис. 3. Загальний вигляд мікрошліфів внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів з загальною кількістю пустих ділянок: а)-кути геометрії утворюючих сопла 30° ; б)-кути геометрії утворюючих сопла 40° ; в)-кути геометрії утворюючих сопла 50°

Як видно з фотографічного матеріалу (рис. 3, а)-в), зміна кутів геометрії утворюючих сопла впливає на кількісні показники суцільності внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів, а саме максимальні кількісні показники суцільності внутрішньої мікроструктури валків спостерігаються при застосуванні коаксіального сопла з геометрією кутів утворюючих 30° та 50° (рис. 3, а, в) 11, 14 шт. відповідно) мінімальний показник відповідає соплу з кутами геометрії утворюючих 40° (рис. 3, б) 4 шт.).

Оптимізація функції відгуку суцільності внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів

Для визначення максимальних показників суцільності внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів, було застосовано обчислювальну процедуру «рідж-аналізу» (загальна методика описана вище). Результати розрахунків наведені у табл. 5.

**Оптимальні режими процесу лазерного сплавлення
порошкового матеріалу**

γ	R	x_1	x_2	x_3	x_4	X_1	X_2	X_3	X_4	$W, \%$
1,5	0,2	0,1	0	-0,1	0	40,7	0,3	1,9	5	1,3

де γ -невизначений множник Лагранжа;

R -радіус сфери навколо центру експерименту.

Для підтвердження адекватності теоретичних розрахунків була проведена додаткова серія (3 повторення) експерименту (рис. 4, а)-в) на визначених оптимальних режимах.

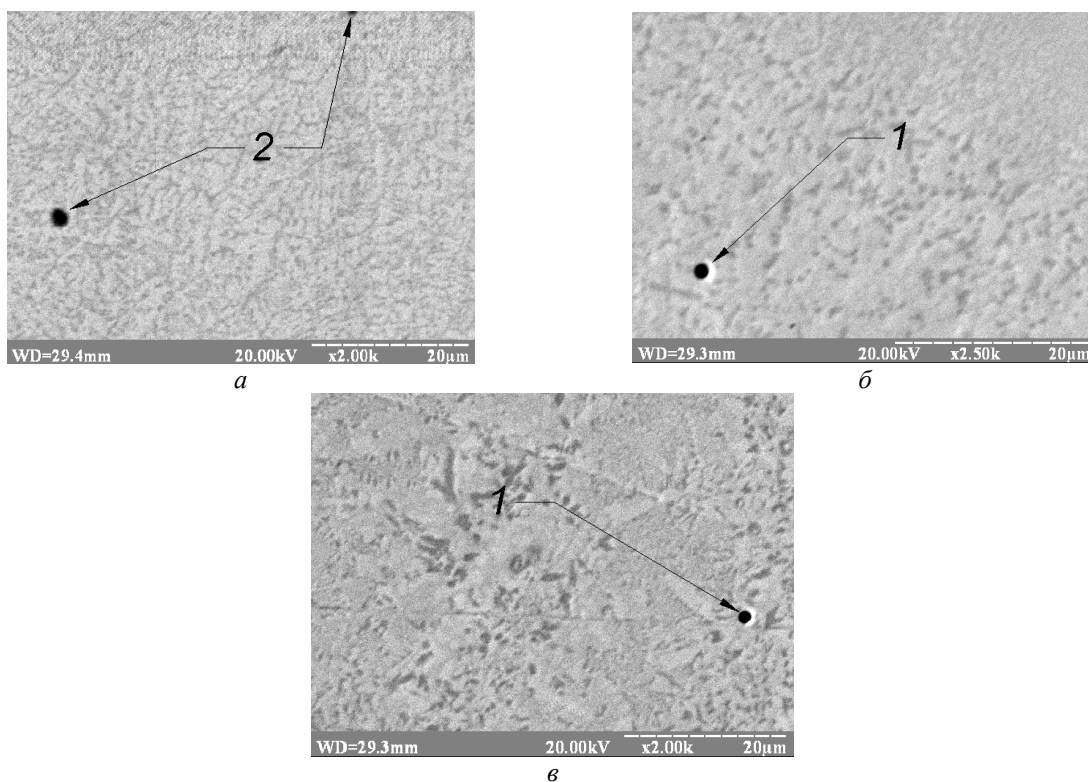


Рис. 4. Загальний вигляд мікросліфів внутрішньої мікроструктури сплавлених валків з позначенням загальної кількості пустих фрагментів кути геометрії утворюючих сопла-40°, масова витрата порошкового матеріалу-0,3г/с, швидкість переміщення підкладки 1,9 мм/с, відстань від зрізу сопла 5 мм:
а)-кількість пустих фрагментів-2 шт.; б)-1 шт.; в)-1 шт.

Проведена додаткова серія експерименту підтвердила адекватність теоретичних розрахунків оптимальних режимів лазерного сплавлення порошкового матеріалу ПГСП-3. Середній з трьох повторів показник суцільності (W) має значення 0,13%, розрахункове значення суцільності внутрішньої мікроструктури сплавлених примітивів складає (W) 1,3% (табл. 5), також слід відзначити, що дана розбіжність розрахункового та експериментального значення суцільності (W) відповідає обраній при розрахунках похибці у межах 5%.

Висновки

1. Встановлені оптимальні режими процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу ПГСП-3, які забезпечують максимальну суцільність внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів $W=0,13\%$ (відсоткове значення пустих фрагментів, раковин, мікротріщин).

2. Отримана математична модель суцільності внутрішньої мікроструктури сплавлених фрагментів, яка в подальшому може бути використана в якості розрахунку керованих впливів спрямованих на підтримку постійного рівня якості майбутніх виробів.

3. Підтверджена адекватність теоретичних розрахунків о можливості використання математичних моделей процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу для подальшого використання їх при реалізації технології «Rapid Prototyping».

Аннотация. Разработана методика повышения качественных показателей внутренней микроструктуры сплавленных компонентов при реализации технологии «Rapid Prototyping». Сущность данной методики направлена на улучшение показателей сплошности внутренней микроструктуры сплавленных фрагментов, которые имеют примитивную геометрическую конфигурацию. Расчет проводился с использованием методов математической статистики.
Ключевые слова: сплошность, геометрическая конфигурация, внутренняя микроструктура, сплавленные фрагменты.

Abstract. Purpose. The widespread use of technology «Rapid Prototyping», which is the basic component of the process of laser alloying powder composition is due to rise in price of raw materials, energy, minimizing the time spent on the introduction of new products. The possibilities of this technology through the use of laser technology as a tool to significantly expand the range of materials used, as well as to obtain products with complex geometric configurations. So the developers are issues of productivity and quality of items formed from powder materials.

Design/Methodology/approach. In this work shows the author's method aimed at improving the performance of products kochestvennyh derived technology of laser fusion of the powder material. The task was implemented metalograficheskim analysis conducted followed by the results of experimental data using statistical techniques, namely the construction of a mathematical model of continuity of the second order with the subsequent optimization of the response function.

Findings. Developed in the paper, the method allows to control quality parameters of the process of laser fusion of the powder material. Thus, the results of the studies cited in this article are of both scientific and practical interest.

Originality/value. The author shows the possibility of applying statistical techniques to control the quality parameters of the process of laser fusion of the powder material.

Keywords: continuity, geometric configuration, the internal microstructure, fused fragments.

Бібліографічний список використаної літератури

1. *Lugan A.* The Effects of Steel Composition on the Laser Cut Edge Quality of Carbon and C-Mn Steels / A. Lugan, P.A. Hilton and D.W. Taylor.-Proceedings of International Congress "ICALEO'2002", Scottsdale, USA, Oct. 2002.-[Електронний ресурс]: LIA; 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.-Систем. вимоги: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Назва з контейнера.
2. *C.P. Paul.* REPAIR OF CEMENTED CARBIDE TOOLS USING LASER CLADDING / Christ P Paul, Hamidreza Alemohammad, Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour, Stephen Corbin.-Proceedings of International Congress "ICALEO'2006", Scottsdale, USA, Oct. 2006.-[Електронний ресурс]: LIA; 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.-Систем. вимоги: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Назва з контейнера.
3. *F. Lusquicos.* RAPID FABRICATION OF ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (EDM) ELECTRODES BY LASER SURFACE CLADDING / F. Lusquicos, R. Comesaca, A. Riveiro, F. Quintero, J. del Val, J. Pou.-Proceedings of International Congress "ICALEO'2007", Orlando, USA, Oct. 2007.-[Електронний ресурс]: LIA; 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.-Систем. вимоги: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Назва з контейнера.
4. *Castello A.* Optimization of Laser Powder Deposition for 316 L Stainless Steel / A.Castello, J.Sears.-Proceedings of International Congress "ICALEO'2003", Jacksonville, USA, Oct. 2003.-[Електронний ресурс]: LIA; 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.-Систем. вимоги: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Назва з контейнера.
5. *M. KUTSUNA.* CLACK BEHAVIOR AND MICROSTRUCTURE OF CLAD LAYER IN LASER CLADDING OF STELLITE 6 AND WC POWDER / Munaharu KUTSUNA.-Proceedings of International Congress "ICALEO'2004", Oct. 4-7, 2004, San Francisco, California, USA.-[Електронний ресурс]: LIA; 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.-Систем. вимоги: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Назва з контейнера.
6. *Powell J.* Laser Cladding With Preplaced Powder. Analysis of thermal cycling and dilutions effects / J.Powell.-Surface Engineering.-1988.-Vol. 4-N. 2-P. pp. 141-149.
7. *Г.В. Самсонов.* Физико-химические свойства элементов [Текст] / Г.В. Самсонов, А.Л. Бурькина, Ю.М. Горячев и др.-Изд-во Наукова думка, К., 1965.-806 с.
8. *J Mei.* Finite Element Analysis of the Thermal Behaviour and Its Implications to the Microstructure of Direct Laser Fabricated Samples (905) / J Mei, L Qian, [at al.]-Proceedings of International Congress "ICALEO'2003", Jacksonville, USA, Oct. 2003.-[Електронний ресурс]: LIA; 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.-Систем. вимоги: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Назва з контейнера.
9. *A.J. Pinkerton.* A VERIFIED MODEL OF LASER DIRECT METAL DEPOSITION USING AN ANALYTICAL ENTHALPY BALANCE METHOD / A.J. Pinkerton, Richard Moat, Kamran Shah, Lin Li, Michael Preuss, P.J. Withers.-Proceedings of International Congress "ICALEO'2007", Orlando, USA, Oct. 2007.-[Електронний ресурс]: LIA; 1 електрон. опт. диск (CD-ROM); 12 см.-Систем. вимоги: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Назва з контейнера.
10. *Vox G.* Some new three level designs for study of quantitative variables / Vox G., Benken D.-Technometrics, 1960, v. 2, N. 4, pp. 455-475.
11. *Новик Ф.С.* Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов [Текст] / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов.-М.: Наука, 1980.-304 с.
12. *Бахвалов Н.С.* Численные методы [Текст] / Н.С. Бахвалов.-М.: Наука, 1975.-360 с.
13. *Корн Г.* Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн.-М.: Наука, 1984.-833 с.
14. *Маркова Е.В.* Неполноблочные планы [Текст] / Е.В. Маркова.-Препринт №15, М.: Изд-во МГУ, 1970.-318 с.

Referenses

1. *Lugan A., P.A. Hilton, D.W. Taylor.* The Effects of Steel Composition on the Laser Cut Edge Quality of Carbon and C-Mn Steels. Proceedings of International Congress "ICALEO'2002", Scottsdale, USA, Oct. 2002.-[Elektronnyi resurs]: LIA; 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM); 12 sm.-System. vymogy: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Nazva z konteinerera.
2. *C.P. Paul, Hamidreza Alemohammad, Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour, Stephen Corbin.* REPAIR OF CEMENTED CARBIDE TOOLS USING LASER CLADDING. Proceedings of International Congress "ICALEO'2006", Scottsdale, USA, Oct. 2006.-[Elektronnyi resurs]: LIA; 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM); 12 sm.-System. vymogy: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Nazva z konteinerera.
3. *F. Lusquicos, R. Comesaca, A. Riveiro, F. Quintero, J. del Val, J. Pou.* RAPID FABRICATION OF ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (EDM) ELECTRODES BY LASER SURFACE CLADDING. Proceedings of International Congress "ICALEO'2007", Orlando, USA, Oct. 2007.-[Elektronnyi resurs]: LIA; 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM); 12 sm.-System. vymogy: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Nazva z konteinerera.
4. *A.Castello, J.Sears.* Optimization of Laser Powder Deposition for 316 L Stainless Steel. Proceedings of International Congress "ICALEO'2003", Jacksonville, USA, Oct. 2003.-[Elektronnyi resurs]: LIA; 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM); 12 sm.-System. vymogy: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Nazva z konteinerera.
5. *M. KUTSUNA.* CLACK BEHAVIOR AND MICROSTRUCTURE OF CLAD LAYER IN LASER CLADDING OF STELLITE 6 AND WC POWDER. Proceedings of International Congress "ICALEO'2004", Oct. 4-7, 2004, San Francisco, California, USA.-[Elektronnyi resurs]: LIA; 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM); 12 sm.-System. vymogy: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Nazva z konteinerera.
6. *Powell J.* Laser Cladding With Preplaced Powder. Analysis of thermal cycling and dilutions effects. Surface Engineering. 1988. Vol. 4-N. 2-P. pp. 141-149.
7. *H.V. Samsonov, A.L. Burykina, Yu.M. Horiachiev i dr.* Fiziko-khimicheskie svoistva elementov [Tekst] / -Izd-vo Naukova dumka, Kiev, 1965.-806 p.
8. *J Mei, L Qian, [at al.].* Finite Element Analysis of the Thermal Behaviour and Its Implications to the Microstructure of Direct Laser Fabricated Samples (905). Proceedings of International Congress "ICALEO'2003", Jacksonville, USA, Oct. 2003.-[Elektronnyi resurs]: LIA; 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM); 12 sm.-System. vymogy: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Nazva z konteinerera.
9. *A.J. Pinkerton, Richard Moat, Kamran Shah, Lin Li, Michael Preuss, P.J. Withers.* A VERIFIED MODEL OF LASER DIRECT METAL DEPOSITION USING AN ANALYTICAL ENTHALPY BALANCE METHOD. Proceedings of International Congress "ICALEO'2007", Orlando, USA, Oct. 2007.-[Elektronnyi resurs]: LIA; 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM); 12 sm.-System. vymogy: Pentium; 32 Mb RAM; Windows 95, 98, 2000, XP.-Nazva z konteinerera.
10. *Box G., Benken D.* Some new three level designs for study of quantitative variables. Technometrics, 1960, v. 2, N. 4, pp. 455-475.
11. *F.S. Novik, Ya. Arsov.* Optimizatsiya protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniia ekspierimentov [Tekst]. Moscow: Nauka, 1980. 304 p.
12. *N.S. Bakhvalov.* Chislennyye metody [Tekst]. Moscow: Nauka, 1975.-360 p.
13. *H. Korn, T. Korn.* Spravochnik po matematikie dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Tekst]. Moscow: Nauka, 1984. 833 p.
14. *Markova Ye.V.* Nepolnoblachnyie plany [Tekst]. Preprint №15, Moscow: Izd-vo MHU, 1970. 318 p.

Подана до редакції 21.11.2013