

УДК 621.9.048

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2521-1943.2017.79.87429>

Дослідження впливу геометрії кутів утворюючих коаксіального сопла на продуктивність процесу лазерного сплавлення порошкової композиції

П.В. Кондрашев

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 22 December 2016 / Accepted: 02 March 2017

Анотація. Основною метою наукових та експериментальних досліджень, відображених в цій роботі, є пошук рішень та підходів спрямованих на підвищення продуктивності процесу лазерного сплавлення порошкової композиції ПГСП-3 сфокусованим лазерним випромінюванням.

Аналіз апріорної інформації показав складність протікання процесу лазерного сплавлення порошкової композиції з фізичної точки зору з великою кількістю технологічних факторів впливу. Тому в даній роботі було використано метод планування експерименту, який дає можливість отримати більш достовірні результати експериментальних досліджень в порівнянні з іншими методами досліджень. На підставі проведеного експериментального відсіювання були виділені найбільш вагомі технологічні фактори впливу. Це: масова витрата порошку, геометрична конфігурація засобу доставки порошкової композиції в зону лазерної обробки, швидкість переміщення підкладки.

Для дослідження продуктивності процесу лазерного сплавлення порошкової композиції були застосовані методи математичної статистики, а саме, був обраний симетричний квазі - D - оптимальний план Пісочинського для 3-х технологічних факторів впливу, що має хороші статистичні характеристики та реалізується рівнянням регресії другого порядку. В результаті проведених заходів було отримано математичну модель процесу лазерного сплавлення порошку сфокусованим лазерним випромінюванням у вигляді поліному другого порядку.

Розроблена методика показала можливість підвищення продуктивності процесу лазерного сплавлення порошку сфокусованим лазерним випромінюванням за рахунок використання отриманої математичної моделі процесу.

Ключові слова: продуктивність, математична модель, порошкова композиція, лазерне сплавлення.

Вступ

Технологія лазерного прототипування, яка базується на процесі лазерного сплавлення порошкової композиції, в сучасному світі отримала широке застосування в різноманітних галузях промисловості. Це пов'язано рядом переваг цієї технології в порівнянні з традиційними технологічними процесами. Перш за все використання в якості інструменту сфокусованого лазерного проміння дає можливість створювати вироби не тільки з металевих, а й з керамічних матеріалів, також в значній мірі економиться витрата машинного часу на виготовлення виробу, відсутні механічні напруження які присутні при використанні різальних інструментів та інші фактори. Тому, незважаючи на разючі успіхи в області розвитку сучасних технологічних процесів швидкого виготовлення деталей з застосуванням лазерної технології, перед розробниками стоять питання підвищення продуктивності та якості виробів, виготовлених за допомогою швидкого прототипування.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Технологія лазерного сплавлення порошкової композиції з фізичної точки зору достатньо складний процес з великою кількістю технологічних факторів впливу. Тому в даній роботі було використано метод планування експерименту, який дає можливість отримати більш достовірні результати експериментальних досліджень в порівнянні з іншими методами досліджень. Аналіз апріорної інформації [1-4] показав наявність великої кількості технологічних факторів з різним ступенем статистичної значимості кожного з них на процес лазерного сплавлення порошкової композиції. Серед основних технологічних факторів найбільш суттєвий вплив на процес лазерного сплавлення порошкової композиції є: масова витрата порошку, геометрична конфігурація засобу доставки порошкової композиції в зону лазерної обробки, швидкість переміщення підкладки. З урахуванням термодинамічних властивостей порошкової композиції, зокрема температури плавлення та відповідно потужності лазерного обладнання для подальших досліджень було обрано найбільш

поширену порошкову композицію ПГСП-3, базова складова якої є нікель (температура плавлення 1453°C [5]). Також слід відзначити суттєвий вплив на процес сплавлення порошку тип транспортуючого газу, а саме як зазначено у роботах [6, 7], транспортування дисперсної фази бажано проводити і інертному середовищі (аргон, гелій), це сприяє більш ефективному сплавленню порошкової композиції, за рахунок відсутності процесів окислення та утворення жаростійких оксидів. Але з урахуванням економічної доцільності експеримент проводився з використанням стислого повітря. Одним з головних факторів впливу на продуктивність і якість сплавлення порошкової композиції є геометрична конфігурація засобу доставки порошкової композиції у зону сфокусованого лазерного випромінювання (сопла різних конструкцій) [8-11]. Як свідчить аналіз апріорної інформації, та результати проведених попередньо наукових досліджень в цьому напрямку, основні технологічні фактори, що впливають на продуктивність процесу лазерного сплавлення порошкової композиції доцільно розділити на дві групи. Перша група технологічних факторів, це фактори які необхідно зафіксувати в стабільному стані, до них відносяться довжина хвилі та потужність лазерного випромінювання, тип порошкової композиції, геометричні властивості порошку, тип транспортуючого газу. Друга група це фактори, яким необхідно задати певний інтервал варіювання це конфігурація пристрою подачі та масова витрата порошкового матеріалу, швидкість переміщення підкладки.

Мета роботи

Метою даної роботи є пошук рішень, спрямованих на підвищення продуктивності процесу лазерного сплавлення порошкової композиції ПГСП-3.

Результати проведених досліджень

Для дослідження продуктивності процесу лазерного сплавлення порошкової композиції ПГСП-3 був обраний симетричний квазі- D -оптимальний план Пісочинського для 3-х технологічних факторів, що має хороші статистичні характеристики та реалізується рівнянням регресії другого порядку [12].

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

де k -кількість технологічних факторів;

b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} -коефіцієнти рівняння регресії;

i, j -індекси.

В якості функції відгуку була використана продуктивність процесу лазерного сплавлення порошкової композиції (T). В якості технологічних факторів впливу на продуктивність процесу лазерного сплавлення порошку (визначених раніше), за умови стабілізації факторів діаметра лазерного променя, щільності та потужності лазерного випромінювання були використані масова витрата порошку (x_1), швидкість переміщення підкладки (x_2), геометрія кутів утворюючих сопла (x_3). Коефіцієнти рівняння регресії b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} -моделі (1) розраховувалися за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення з використанням математичного апарату лінійної алгебри [12], залежність (2). Формування матриці умов експерименту X для 3-х незалежних змінних (x_1, x_2, x_3), проводилося з використанням так званих множин повно факторного експерименту 2^2 [12]. Варіювання технологічних факторів проводилося на трьох рівнях (мінімум, центр, максимум). Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії, побудова математичної моделі продуктивності процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу та перевірка адекватності рівняння регресії проводилися за наступним алгоритмом.

Однорідність ряду строкових дисперсій було перевірено за критерієм Кохрена залежність (2) [12].

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

де $G^{розр.}$ -розрахункове значення критерію Кохрена;

$S_{y_{MAX}}^2$ -максимальне значення функції відгуку в строчці;

S_y^2 -значення строкової дисперсії;

N -кількість дослідів.

Дисперсію дослідів визначали за формулою (3) [12].

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^N S_{y_u}^2}{N}, \quad (3)$$

Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії проводився за формулою (4) [12].

$$B = (X^T X)^{-1} (X^T Y), \quad (4)$$

де X -матриця умов експерименту;

Y-функція відгуку.

Розрахунок дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії залежність (5).

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{u=1}^N x_{i_u}^2}, \quad (5)$$

Розрахунок інтервалів довіряння проводився за формулою (6).

$$\Delta_{b_i} = t S_{b_i}, \quad (6)$$

де t -критерій Ст'юдента [12].

Перевірка гіпотези стосовно адекватності отриманої математичної моделі продуктивності процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу, проводилася з використанням критерію Фішера F [12]. Достовірність результатів експерименту за даним критерієм відповідає 5%-й похибці (7).

$$F^{розр.} \leq F^{табл.}, \quad (7)$$

де $F^{розр.}$ -розрахункове значення критерію Фішера [12];

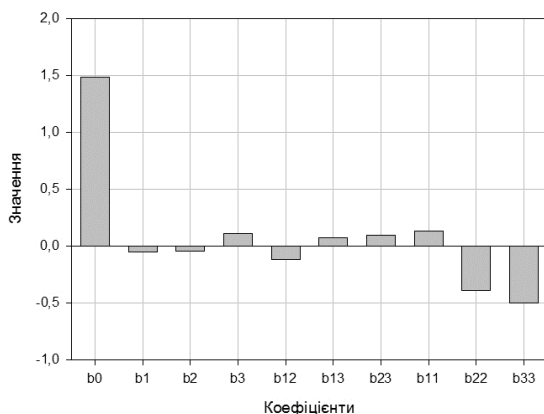
$F^{табл.}$ -табличне значення критерію Фішера [12].

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

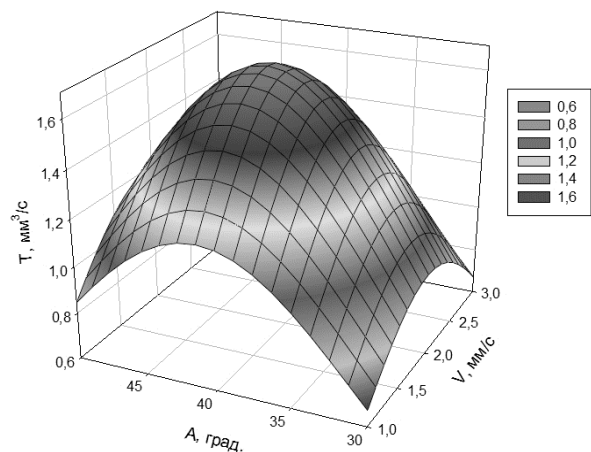
Рівні варіювання технологічних факторів

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

Проведена статистична обробка результатів експериментальних досліджень показала, що абсолютні значення коефіцієнтів $b_1, b_2, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ менше їхніх інтервалів довіряння, отже ці коефіцієнти слід визнати статистично не значимими. Причому вилучення цих коефіцієнтів з математичної моделі не потребує перерахунку решти коефіцієнтів рівняння регресії, оскільки b_i, b_{ij} не мають кореляції з іншими коефіцієнтами рівняння. Перевірка адекватності моделі продуктивності процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу (T) показала, що статистична гіпотеза про адекватність підтвердилася, рівняння регресії адекватне т.я., виконується умова (7). Для детального аналізу ступеню статистичної значимості кожного з технологічних факторів на продуктивність процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу ПГСП-3 була побудована рангова діаграма (рис. 1, а).



а



б

Рис. 1. Рангова діаграма статистичної значимості технологічних факторів на функцію відгуку (T) (а) та залежність продуктивності сплавленого компонента (T) від геометрії кутів утворюючих сопла (A) для різних значень швидкості переміщення підкладки (V) з масовою витратою порошку 0,2 г/с

Адекватність проведених теоретичних розрахунків і отриманої математичної моделі процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу ПГСП-3, була перевірена серією експериментальних досліджень. Як видно з рис. 1, а) найбільш суттєвий лінійний вплив на функцію відгуку має геометрія утворюючих сопла, швидкість переміщення підкладки, фактори x_2, x_3 , коефіцієнти b_2, b_3 , відповідно. Також слід зазначити суттєвий

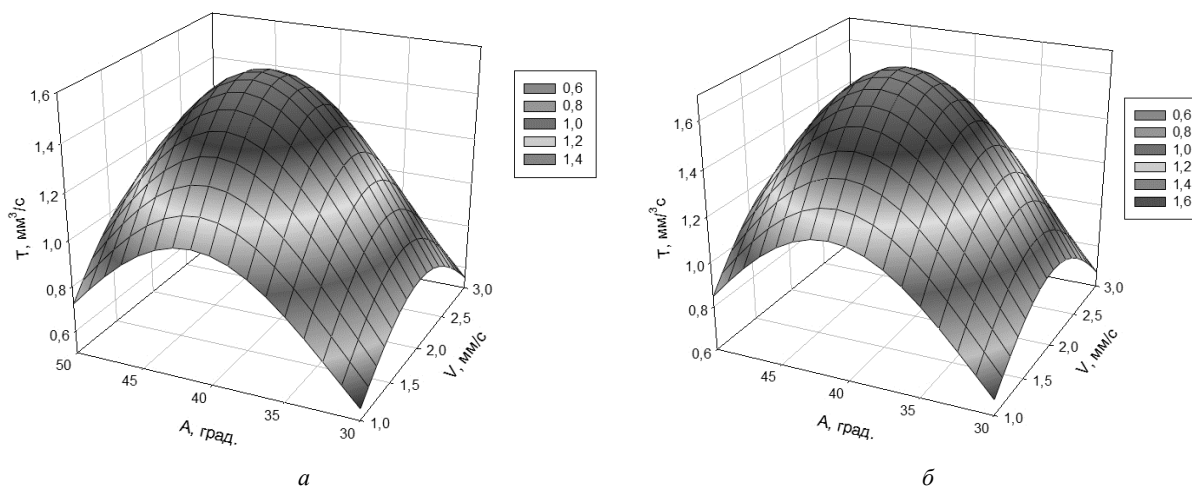


Рис. 2. Залежність продуктивності (T) від геометрії кутів утворюючих сопла (A) для різних значень швидкості переміщення підкладки (V): а)-масова витрата порошку 0,3 г/с, б)-масова витрата порошку 0,4 г/с

квадратичний вплив на відгук мають фактори x_2, x_3 , коефіцієнти b_{22}, b_{33} . Більш детальну картину зміни функції відгуку можна спостерігати, керуючись графічними залежностями, представленими на рис. 1, б) і 2, а), б). Зменшення продуктивності (T) у загальному випадку до показника 0,6...0,8 мм³/с (рис. 1, б) і рис. 2, а), б) відбувається за рахунок геометрії кутів утворюючих засобу доставки порошкової композиції, так сопла з кутами 30° і 50° формують великі за розмірами площі поперечного перерізу газопорошкового струменя з низькими показниками дисперсної фази в зоні впливу лазерного випромінювання (рис. 1, б) і рис. 2, а), б). Збільшення продуктивності, діапазон 1,2...1,6 мм³/с відбувається головним чином за рахунок використання сопла з геометрією кутів утворюючих 40° (рис. 1, б) і рис. 2, а), б), в результаті чого в зоні лазерної обробки формується газопорошковий струмінь з високим вмістом дисперсної фази. Також слід зазначити, що максимальний показник продуктивності (T) 1,6 мм³/с (рис. 1, б) та (рис. 2 а), б) спостерігається при наступних значеннях незалежних змінних, геометрія кутів утворюють сопел 40°, масова витрата порошкового матеріалу 0,4 г/с, це пояснюється великим вмістом дисперсної фази в зоні сфокусованого лазерного випромінювання. Мінімальний показник продуктивності (T) 0,2 мм³/с (рис. 1, б) отриманий при наступних показниках технологічних факторів геометрія кутів утворюють сопел 30°, масова витрата порошкового матеріалу 0,2 г/с, це пояснюється головним чином низькими показниками дисперсної фази в зоні лазерної обробки. На рис. 3, а)-в) як приклад представлені фотографії морфологічної структури сплавлених компонентів порошкового матеріалу для різної геометрії кутів утворюють сопла.

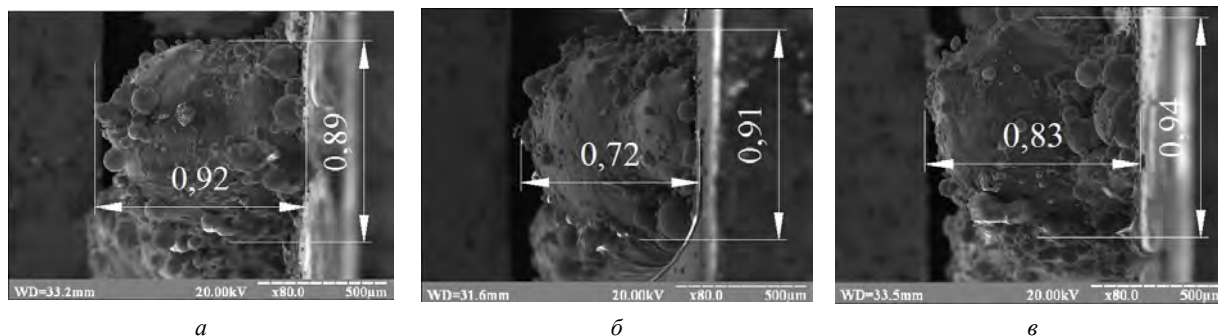


Рис. 3. Морфологічна структура сплавлених компонентів з реальними розмірами висоти і ширини при восьмидесятикратному оптичному збільшенні: а)-геометрія кутів утворюючих сопла 30°, масова витрата порошку 0,2 г/с, б)-геометрія кутів утворюють сопла 40°, масова витрата порошку 0,3 г/с, в)-геометрія кутів утворюючих сопла 50°, масова витрата порошку 0,4 г/с

Висновки

1. Отримано математичну модель продуктивності процесу лазерного сплавлення порошкової композиції ПГСП-3, яка в подальшому може використовуватися в якості розрахунку керованих впливів спрямованих на підвищення продуктивності процесу лазерного сплавлення порошку.

2. Підтверджено адекватність теоретичних розрахунків і можливість використання математичних моделей процесу лазерного сплавлення порошкового матеріалу при реалізації технології швидкого виготовлення виробів.

Исследование влияния геометрии углов образующих коаксиального сопла на производительность процесса лазерного сплавления порошковой композиции

П.В. Кондрашев

***Аннотация.** Основной целью научных и экспериментальных исследований, отраженных в данной работе, является анализ и поиск решений направленных на повышение производительности процесса лазерного сплавления порошка ПГСП-3 сфокусированным лазерным излучением.*

Анализ априорной информации, а также опыт проведенных ранее экспериментальных исследований показали сложность протекания процесса лазерного сплавления порошкового материала с большим количеством технологических факторов влияния. Поэтому в данной работе была использована активная стратегия проведения эксперимента, которая дает возможность получить более достоверные результаты экспериментальных исследований, чем пассивная. На основании проведенного экспериментального отсеивания были выделены наиболее значимые технологические факторы влияния. Это: массовый расход порошка, геометрическая конфигурация средства доставки порошковой композиции в зону лазерной обработки, скорость перемещения подкладки.

Для исследования производительности процесса лазерного сплавления порошка были использованы методы математической статистики. А именно, был выбран симметричный квази-D-оптимальный план Песочинского для 3-х технологических факторов влияния с хорошими статистическими характеристиками. В результате проведенных мероприятий была получена математическая модель процесса лазерного сплавления порошка сфокусированным лазерным излучением в виде полинома второго порядка.

Разработанная методика показала возможность повышения производительности процесса лазерного сплавления порошка сфокусированным лазерным излучением за счет использования полученной математической модели процесса.

Ключевые слова: производительность; математическая модель; порошковая композиция; лазерное сплавление

Study of geometry angles forming a coaxial nozzle to performance of laser fusion powder composition

P. Kondrashev

***Abstract.** The main purpose of scientific and experimental research, as reflected in this work is the search for solutions and approaches aimed at improving process performance laser alloying powder composition focused laser radiation.*

Priori information analysis showed the complexity of the process of laser powder fusion tracks from the physical point of view with a lot of technological impacts. Therefore, in this paper we used the method of experimental design, which will allow a more accurate experimental results compared with other methods of research. Based on the experimental screening were identified most significant technological factors influence. These are: powder mass flow, the geometric configuration of the delivery means of powder composition in the area of laser processing, the speed of movement of the substrate.

To study the process performance laser alloying powder compositions were applied methods of mathematical statistics, namely, was elected symmetric quasi-D-optimal plan Pischynskoho for 3 technological factors influence that has good statistical properties and sold regression equation of second order. As a result of the measures was received mathematical model of laser powder fusion focused laser radiation in a second order polynomial.

The technique demonstrated the productivity of the process of laser powder fusion focused laser radiation, obtained by using a mathematical model of the process.

Keywords: performance; mathematical model; powder formulation; laser alloying

References

1. Alimardani, M. (2006), "On the 3D modeling of geometrical formation in laser solid freeform fabrication process", Proceedings of International Congress "ICALEO'2006", Scottsdale, USA, Oct. 2006, LIA, 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM), System. vymohy, Pentium, 32 Mb RAM, Windows 95, 98, 2000, XP, Nazva z konteinerera.
2. Azer, Magdi (2007), "Laser net shape manufacturing using an adaptive toolpath deposition method", Proceedings of International Congress "ICALEO'2007", Orlando, USA, Oct. 2007, LIA, 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM), System. vymohy, Pentium, 32 Mb RAM, Windows 95, 98, 2000, XP, Nazva z konteinerera.
3. Lusquicos, F. (2007), "Rapid fabrication of electrical discharge machining (EDM) electrodes by laser surface cladding", Proceedings of International Congress "ICALEO'2007", Orlando, USA, Oct. 2007, LIA, 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM), System. vymohy, Pentium, 32 Mb RAM, Windows 95, 98, 2000, XP, Nazva z konteinerera.
4. Alimardani, M. (2007), "A coupled time-dependent numerical simulation on temperature and stress fields in laser solid freeform fabrication process", Proceedings of International Congress "ICALEO'2007", Orlando, USA, Oct. 2007, LIA, 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM), System. vymohy, Pentium, 32 Mb RAM, Windows 95, 98, 2000, XP, Nazva z konteinerera.
5. Samsonov, G.V. (1965), *Fiziko-khimicheskiie svoistva elementov*, Samsonov, G.V., Burykina, A.L., Goriachev Yu.M. and dr., Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
6. Pinkerton, A.J. (2002), "A Comparative Study of Multiple Layer Laser Deposition using Water and Gas Atomised 316L Stainless Steel Powders", Proceedings of International Congress "ICALEO'2002", Scottsdale, USA, Oct. 2002, LIA, 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM), System. vymohy, Pentium, 32 Mb RAM, Windows 95, 98, 2000, XP, Nazva z konteinerera.
7. Kutsuna, M. (2004), "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, LIA, 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM), System. vymohy, Pentium, 32 Mb RAM, Windows 95, 98, 2000, XP, Nazva z konteinerera.
8. Mei, J (2003), "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, LIA, 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM), System. vymohy, Pentium, 32 Mb RAM, Windows 95, 98, 2000, XP, Nazva z konteinerera.
9. Pinkerton, A.J. (2007), "A verified model of laser direct metal deposition using an analytical enthalpy balance method", Proceedings of International Congress "ICALEO'2007", Orlando, USA, Oct. 2007, LIA, 1 elektron. opt. dysk (CD-ROM), System. vymohy, Pentium, 32 Mb RAM, Windows 95, 98, 2000, XP, Nazva z konteinerera.
10. Kondrashev, P.V. (2013), Modelirovanie gazodinamiki poroshkovoi strui pri realizatsii tekhnologii "RAPID prototyping", *Vostochno-Evropeskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, no 5/7 (65), pp. 4-10.
11. Kondrashev, P.V. (2013), Doslidzhennia produktyvnosti protsu lazernogo splavlennia poroshkovogo materialu metodom matematychnoi statystyky, Zbirnyk naukovykh prats "*Tekhnologii i tekhnika drukarstva*", no 3 (41), pp. 52-61.
12. Novik, F.S. and Arsov, Ya.B. (1980), *Optimizatsiia protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniia eksperimentov*, Nauka, Moscow, Russia.