

УДК 621.791.92

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.16>**М. В. СОКОЛОВСЬКИЙ**

провідний інженер відділу спеціалізованої високовольтної техніки
та лазерного зварювання
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона
Національної академії наук України
ORCID: 0000-0003-3243-5060

О. В. СІОРА

науковий співробітник відділу спеціалізованої високовольтної техніки
та лазерного зварювання
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона
Національної академії наук України
ORCID: 0000-0003-1927-790X

Ю. В. ЮРЧЕНКО

провідний інженер відділу спеціалізованої високовольтної техніки
та лазерного зварювання
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона
Національної академії наук України
ORCID: 0000-0001-9253-009X

В. А. ЛУКАШЕНКО

кандидат технічних наук,
науковий співробітник відділу спеціалізованої високовольтної техніки
та лазерного зварювання
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона
Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-9685-4654

А. В. БЕРНАЦЬКИЙ

кандидат технічних наук, старший дослідник,
завідувач відділу спеціалізованої високовольтної техніки
та лазерного зварювання
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона
Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-8050-5580

ВСТАНОВЛЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ НА ФОРМОУТВОРЕННЯ НАПЛАВЛЕНОГО ШАРУ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ НАПЛАВЛЕННІ НА ТОНКОСТІННУ ОСНОВУ

Тонкостінні деталі широко використовуються в авіапромисловості, двигунобудуванні, а також в інших сферах промисловості. Такі деталі часто потребують виготовлення конструктивних елементів, які можна отримати за допомогою багатьох технологій, включаючи лазерне наплавлення. При використанні технологій наплавлення конструктивних елементів на тонкостінну основу, деталі постійно проходять через циклічну термообробку. Зміна градієнта температури протягом тривалого часу сприяє можливому утворенню додаткових внутрішніх напружень, що може призвести до утворення тріщин та деформацій на тонкостінних деталях. Крім того, під впливом різних факторів, що впливають на деталь під час її кінцевої механічної обробки, тонкостінні деталі можуть деформуватися, що може знизити точність виробництва, а також можуть призвести до утворення додаткових напружень в матеріалі. У даний час основними проблемами, що є актуальними під час вивчення даного технологічного процесу є аналіз впливу параметрів обробки та швидкого змінного температурного циклу на мікроструктуру і геометричні характеристики треків наплавленого матеріалу, а також контроль накопичення теплого і залишкового напруження. Завданням даної роботи є вивчення ступеню впливу характеристик робочих циклів лазерного випромінювання на геометричні параметри наплавлених об'ємних елементів на тонкостінних деталях відповідальних конструкцій. Після проведення ряду експериментальних робіт та аналізу їх результатів було визначено певні залежності впливу характеристик робочих режимів лазерного технологічного комплексу на формоутворення та геометричні характеристики наплавленого шару при лазер-

ному наплавленні на тонкостінну основу, а також обрано оптимальні характеристики для робочого режиму. Даний робочий режим було використано для подальшої роботи з створення технологічних рекомендацій для лазерного наплавлення на тонкостінну основу.

Ключові слова: лазерне наплавлення, тонкостінна основа, високолеговані сталі, технологічні режими.

M. V. SOKOLOVSKYI

Lead Engineer at the Department of Specialised High-Voltage Equipment
and Laser Welding
E. O. Paton Electric Welding Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0003-3243-5060

O. V. SIORA

Researcher at the Department of Specialised High-Voltage Equipment
and Laser Welding
E. O. Paton Electric Welding Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0003-1927-790X

YU. V. YURCHENKO

Lead Engineer at the Department of Specialised High-Voltage Equipment
and Laser Welding
E. O. Paton Electric Welding Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0001-9253-009X

V. A. LUKASHENKO

Candidate of Technical Sciences,
Researcher at the Department of Specialised High-Voltage Equipment
and Laser Welding
E. O. Paton Electric Welding Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0002-9685-4654

A.

V. BERNATSKYI

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Head of the Department of Specialised High-Voltage Equipment
and Laser Welding
E. O. Paton Electric Welding Institute
of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0002-8050-5580

DETERMINING THE INFLUENCE OF THE TECHNOLOGICAL MODE VARIABLES ON THE FORMATION OF THE DEPOSITED LAYER DURING LASER CLADDING ON A THIN-WALLED BASE

Thin-walled parts are widely used in the aircraft industry, engine building, and other industries. Such parts often require the manufacture of additional structural elements that can be produced using many technologies, including laser cladding. When using the cladding technology to build structural elements on a thin-walled base, the parts are constantly subjected to cyclic heat treatment. Changes in the temperature gradient over a long period of time contribute to the possible formation of additional internal tension, which can lead to formation of cracks and deformations in thin-walled parts. In addition, under the influence of various factors affecting the part during its final machining, thin-walled parts can be deformed, which can reduce production accuracy and may also lead to the formation of additional stresses in the material. Currently, the main problems that are relevant in the study of this technological process are the analysis of the effect of machining parameters as well as a rapid alternating temperature cycle on the microstructure and geometric characteristics of the deposited material tracks, along with the control of thermal and residual stress accumulation. The purpose of this study is to determine the influence of the laser radiation working mode variables on the geometric parameters of deposited three-dimensional elements on thin-walled parts of critical structures. After conducting a series of experimental works and analyzing their results, certain dependencies of the influence of the characteristics of the laser technological complex operating modes on the formation and geometric characteristics of the deposited layer during laser surfacing on a thin-walled base were determined, and the optimal characteristics for the operating mode were

obtained. This operating mode was used for further work on the development of technical recommendations for laser surfacing on a thin-walled base.

Key words: laser cladding, thin-walled base, high-alloy steel, technological modes.

Постановка проблеми

Різноманітні вироби можуть включати різні типи тонкостінних деталей, головною характеристикою яких є відсутність жорсткості та високий кінцевий коефіцієнт тонкості, який визначається як відношення їх висоти до товщини. Такі деталі широко використовуються в двигунобудуванні, хімічній, медичній, авіабудівній та інших галузях промисловості. Конструкція таких деталей часто потребує виготовлення елементів, які можна отримати за допомогою багатьох технологій наплавлення, зокрема лазерного [1, 2].

При використанні технологій наплавлення конструктивних елементів на тонкостінну основу, деталі постійно проходять через циклічну термообробку. Зміна градієнта температури протягом тривалого часу сприяє можливому утворенню додаткових внутрішніх напружень, що може призвести до утворення тріщин та деформацій на тонкостінних деталях. Крім того, під впливом різних факторів, що впливають на деталь під час її кінцевої механічної обробки, тонкостінні деталі можуть деформуватися, що може знизити точність виробництва, а також може призвести до утворення додаткових напружень в матеріалі. У даний час основними проблемами, що є актуальними під час вивчення даного технологічного процесу є аналіз впливу параметрів обробки та швидкого змінного температурного циклу, на мікроструктуру і геометричні характеристики треків наплавленого матеріалу, а також контроль накопичення теплового і залишкового напруження.

Виходячи з наведених міркувань та даних, отриманих під час аналізу оглянутих праць, було вирішено, що процеси лазерного наплавлення, має гарні виробничі перспективи через свою відносну простоту та більш глибоку ступінь вивчення. У зв'язку з цим, постає актуальне завдання створення наукових основ, розроблення та створення обладнання і технологічних прийомів лазерного наплавлення для формоутворення об'ємних елементів з наперед заданими експлуатаційними характеристиками на тонкостінних деталях відповідальних конструкцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботах, що вивчають вплив енергетичної складової процесів лазерного наплавлення на його результат [3, 4], розглядалися поодинокі випадки аналізу процесу лазерного наплавлення для виконання певних завдань.

З аналізу досліджень виробництва деталей шляхом наплавлення ряду широко використовуваних металів, було виявлено, що існує багато експериментальних досліджень, що досліджують кінцеву мікроструктуру [5, 6] та механічні властивості [7, 8] деталей, виготовлених за допомогою лазерного наплавлення. При цьому, існує недостатньо досліджень, зосереджених на вивченні впливу параметрів лазерного випромінювання (ЛВ) на кінцеву мікроструктуру та механічні властивості деталей. Також можна зазначити певну закономірність: контроль над процесами лазерного наплавлення розглядається у формі спеціальних індивідуальних до кожного технічного завдання режимів обробки. Однак, отриманих в результаті попередніх досліджень даних недостатньо для того, щоб сформулювати повноцінні закономірності щодо впливу окремих характеристик лазерного випромінювання на мікроструктуру деталей, виготовлених за допомогою лазерного наплавлення.

Роботи, що вивчали методи удосконалення технологічних процесів для покращення мікроструктури зразків [9–11], отриманих шляхом лазерного наплавлення, концентрувались на двох напрямках. А саме, контролю процесу утворення мікроструктури через знаходження оптимальної стратегії сканування та схеми подачі порошку, а також недопущення утворення небажаних домішок у структурі зразка, побудованого шляхом лазерного наплавлення. Роботи, що звертали увагу на знаходження більш ефективного шляху сканування та подачі порошку показали достатньо велику проблематику даної складової. Оскільки схема переміщення головки лазерного технологічного комплексу в даному процесі грає велику роль як у мікроструктурі, так і у подальших характеристиках деталі. Так, на великій кількості деталей, що були вивчені у роботі [12], було помічено явища точкової корозії та пігінгу, які негативно впливають на експлуатаційні характеристики деталі. І хоча інші роботи [13] показують, що в певних випадках деталі, виготовлені різними методиками лазерного наплавлення, демонструють кращу корозійну стійкість, ніж деталі з кованою структурою металу, питання механічної міцності деталей, виготовлених методами лазерного наплавлення, залишається досить актуальним.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є вивчення ступеню впливу складових технологічних режимів лазерного наплавлення на геометричні параметри наплавлених об'ємних елементів на тонкостінних деталях відповідальних конструкцій.

Викладення основного матеріалу дослідження

При розробці технічних пропозицій щодо технологічних заходів лазерного наплавлення, основну увагу було звернено на методику подачі металевого порошку та захисного газу, оскільки саме ці чинники найкраще піддаються впливу за допомогою технологічних заходів.

Для покращення механічних якостей лазерного наплавлення, необхідно було правильно підібрати характеристики робочого режиму лазерного технологічного комплексу, а саме – величину потужності лазерного

випромінювання, часовий проміжок між індивідуальними треками та шарами, розподіл та витрати порошку тощо. Ці характеристики не є універсальними і повинні підбиратись індивідуально, в залежності від енергетичних характеристик лазерного випромінювання, матеріалів обробки, конструктивних особливостей деталей тощо. Особлива увага повинна бути зосереджена на першому шарі наплавлення, що наноситься на матеріал основи.

Також, при нанесенні шарів матеріалу, що наплавляється, необхідно було врахувати термічний вплив лазерного випромінювання на поверхню тонкостінної деталі. Для запобігання небажаних змін в тонкостінному матеріалі деталі було розглянуто необхідність застосування таких технологічних заходів, як використання тепловідвідних підкладок та нагрівальних елементів. Їх використання для типових конструктивних елементів наплавлення (таких як бобишки, приливи, функціональні площадки, бандажні пояси тощо).

Для зменшення вірогідності утворення високого рівня небажаних деформацій та структурних змін, запропоновано контролювати енергетичну складову процесу лазерного плавлення. В процесі розробки технологічних заходів було обрано два найбільш перспективні. Варіювання величини потужності лазерного випромінювання у граничних точках (або на контурі об'єкту, що формується) дає можливість зменшити розміри зони термічного впливу, а також запобігти випадковому проплаву тонкостінної базової деталі. Застосування імпульсного (імпульсно-періодичного) режиму генерації лазерного випромінювання при наплавленні дозволяє більш контролювано передавати теплову енергію, але при цьому різко падає швидкість, а звідси – і технологічність процесу. До того ж, розробка технологій обробки вимагає контролю за траєкторією та робочими режимами лазерного наплавлення для запобігання шкідливого явища перекриття плям обробки.

Для вивчення процесів, що відбуваються при наплавленні, та визначення максимально допустимих характеристик режимів обробки постала потреба до експериментального наплавлення ряду треків на тонкостінну основу. Експериментальне наплавлення металевого порошку було проведено з допомогою твердотільного Nd:YAG-лазера ROFIN-SINAR DY-044. Значення режимів обробки наведені у таблиці 1.

Загальні для всіх режимів обробки значення:

- витрати захисного газу аргону (Ar) $Q_r = 30$ л/хв;
- витрати порошку $Q_p = 20$ г/хв;
- температура зовнішнього середовища $T = 20$ °С.

Тонкостінною основою виступала пластина зі сталі AISI 321 (12X18H10T) з розмірами 150×100×1,2 мм, а порошком – Castolin EuTroLoу 16316 (AISI 316L/03X17H14M3) з фракцією 53–150 мкм. Режими обробки варіювались у величині потужності ЛВ (Р) з різницею у 250 Вт. При наплавленні було зафіксовано незначний прогин базових пластин, у декількох випадках відбувся повний провар деталі. Усі наплавлені елементи експериментальних зразків мають валикоподібну гомогенну форму. Наплавлення проводилось на спеціальному стенді з системою захисту оптики «cross jet», зображеному на рис. 1.

Таблиця 1

Режими обробки, що використовувались у експериментах

№ зразка	Р, кВт	V, м/хв	Q, г/с	№ зразка	Р, кВт	V, м/хв	Q, г/с
1502.1	2	2	0	1504.1	3	2	35
1502.2	2	2	35	1504.2	3,5	2	35
1502.3	1,5	2	35	1504.3	2	1,25	35
1502.4	1,75	2	35	1504.4	2	1	35
1502.5	2,25	2	35	1504.5	2	0,75	35
1502.6	2,5	2	35	1504.6	2	2	55
1502.7	2	1,5	35	1504.7	2	2	60
1502.8	2	1,75	35	1504.8	2	2	75
1502.9	2	2,25	35	1504.9	2	2	112
1502.10	2,5	2,5	35				
1502.11	2	2	30				
1502.12	2	2	40				
1502.13	2	2	45				
1502.14	2	2	50				

Для вимірювання розмірів наплавлених доріжок, а також глибини проплаву, з експериментальних зразків було вирізано зразки розміром 8×8 мм, після чого було проведено електролітне травлення даних зразків. Самі вимірювання виконувались на мікроскопі МІМ-7 з лінзою ОЕ-23 (F=23,2 мм; A=0,17; 8,5x) та цифровою камерою SIGETA LP614000A. Отримані розміри наведено у табл. 2.

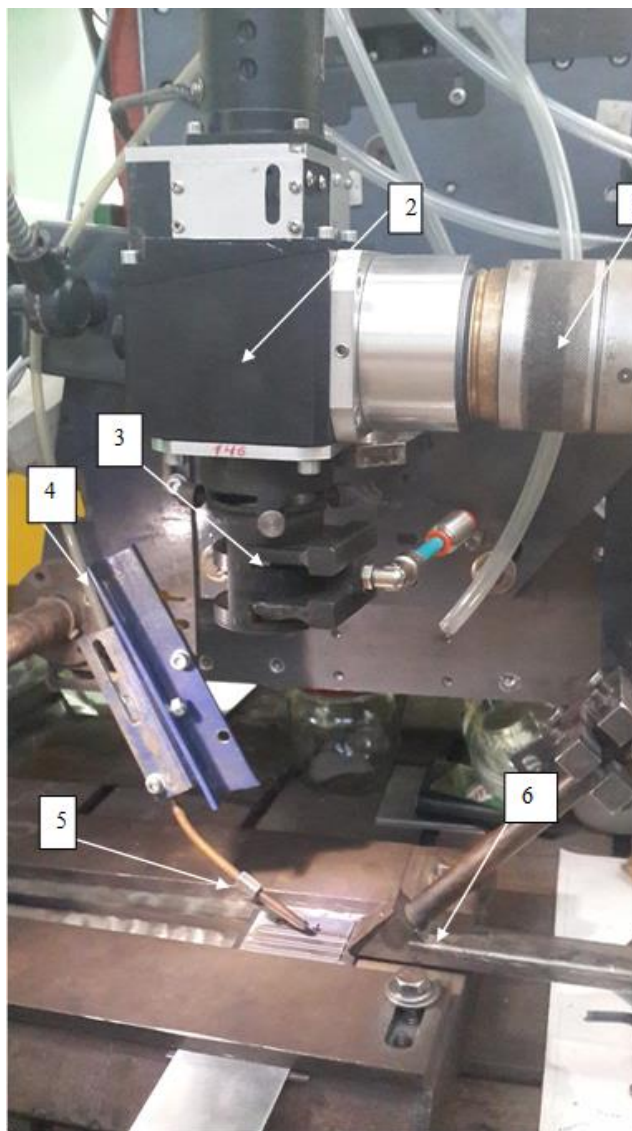


Рис. 1. Стенд для лазерного наплавлення: 1 – лазерна головка; 2 – блок поворотного дзеркала; 3 – «cross jet» – система захисту оптики; 4 – канал по якому транспортується порошок; 5 – формуюче сопло; 6 – система газового захисту напавленого металу

При комбінаціях потужностей та швидкості переміщення ЛВ у 3,5 кВт – 2 м/хв та 2 кВт – 0,75 м/хв було зафіксовано повний провар тонкостінної основи, що визначає ці значення як такі, що не можуть використовуватися при лазерному напавленні на тонкостінну основу (товщиною 1,2 мм).

Дані, отримані в результаті цього експерименту, були представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 2 та рис. 3.

Аналіз даних представлених на рис. 2, дозволив встановити певні залежності геометричних характеристик напавлених елементів від величини потужності ЛВ:

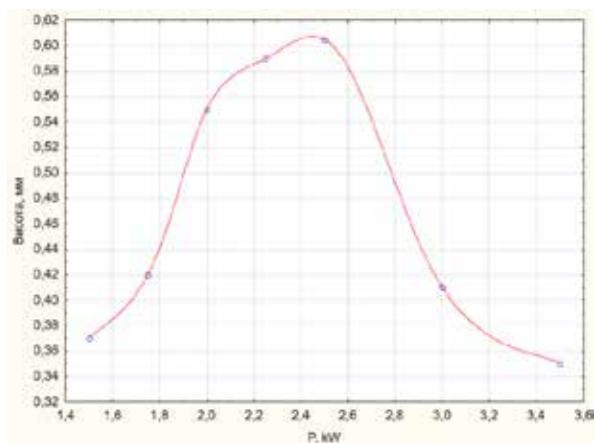
- висота напавленого елемента відносно площини тонкостінної основи має пікову величину у 0,58–0,62 мм при обробці лазерним випромінюванням з потужністю у 2–2,5 квт. при подальшому підвищенні потужності лазерного випромінювання висота напавленого шару зменшується, що можна пов'язати з постійним гіперболічним зростанням величини глибини провару/проникнення напавленого матеріалу вглиб тонкостінної основи. ця теорія підтверджується завдяки графіку загальної висоти напавленого елемента;

- ширина напавленого елемента має тенденцію на зростання до величини потужності лазерного випромінювання у 2,25 квт, при подальшому збільшенні потужності величина стабілізується і тримається на рівні 2,8–2,95 мм.

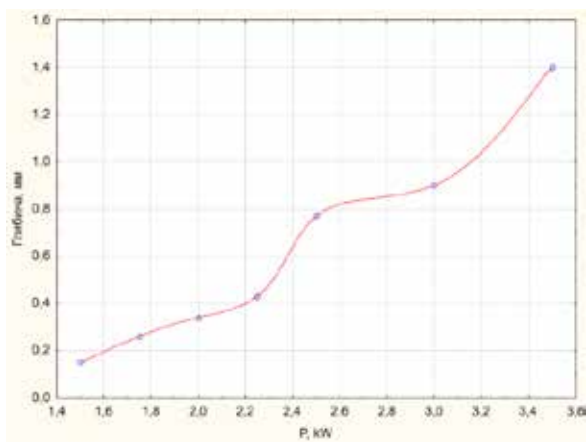
Таблиця 2

Геометричні характеристики наплавлених доріжок

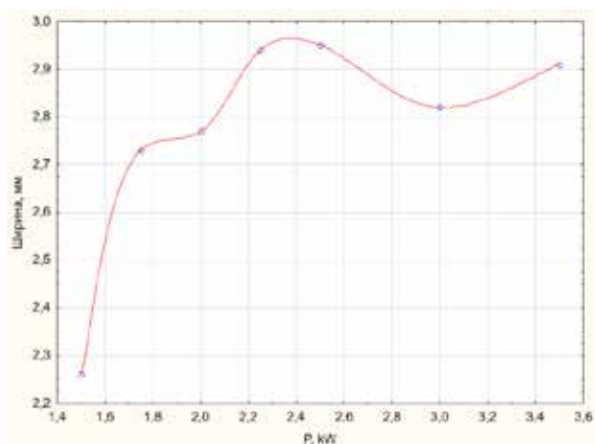
№ зразка	Ширина, мм	Висота, мм	Провар, мм	№ зразка	Ширина, мм	Висота, мм	Провар, мм
1502.1	2,58	0	0,44	1504.1	2,82	0,41	0,9
1502.2	2,77	0,55	0,34	1504.2	2,91	0,35	1,4
1502.3	2,26	0,37	0,15	1504.3	3,15	0,41	0,66
1502.4	2,73	0,42	0,26	1504.4	2,91	0,52	0,98
1502.5	2,94	0,59	0,43	1504.5	3,15	0,67	1,42
1502.6	2,95	0,605	0,77	1504.6	2,5	0,28	0,48
1502.7	2,94	0,62	0,23	1504.7	2,6	0,41	0,38
1502.8	2,88	0,47	0,26	1504.8	2,62	0,4	0,21
1502.9	2,79	0,39	0,19	1504.9	2,58	0,66	0,15
1502.10	2,55	0,32	0,2				
1502.11	2,86	0,46	0,16				
1502.12	2,6	0,49	0,1				
1502.13	2,63	0,52	0,13				
1502.14	2,62	0,51	0,12				



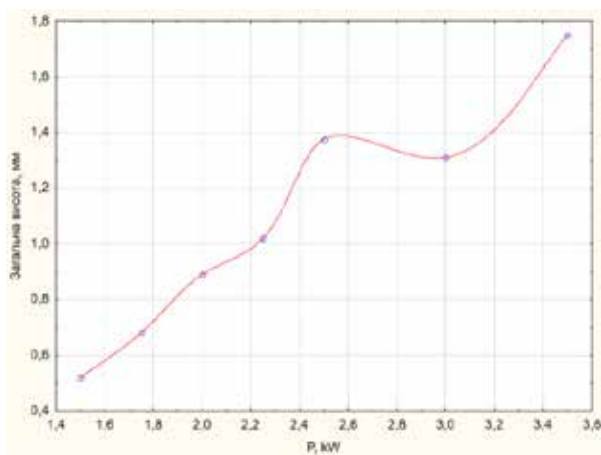
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Графічні залежності розмірних характеристик наплавленого елемента від потужності лазерного випромінювання: а) висоти наплавленого елемента відносно площини тонкостінної основи, б) глибини провару матеріалу основи та заповнення даної порожнини сумішшю розплаву та наплавленого матеріалу, в) ширини наплавленого елемента відносно площини тонкостінної основи, г) загальної висоти наплавленого елемента

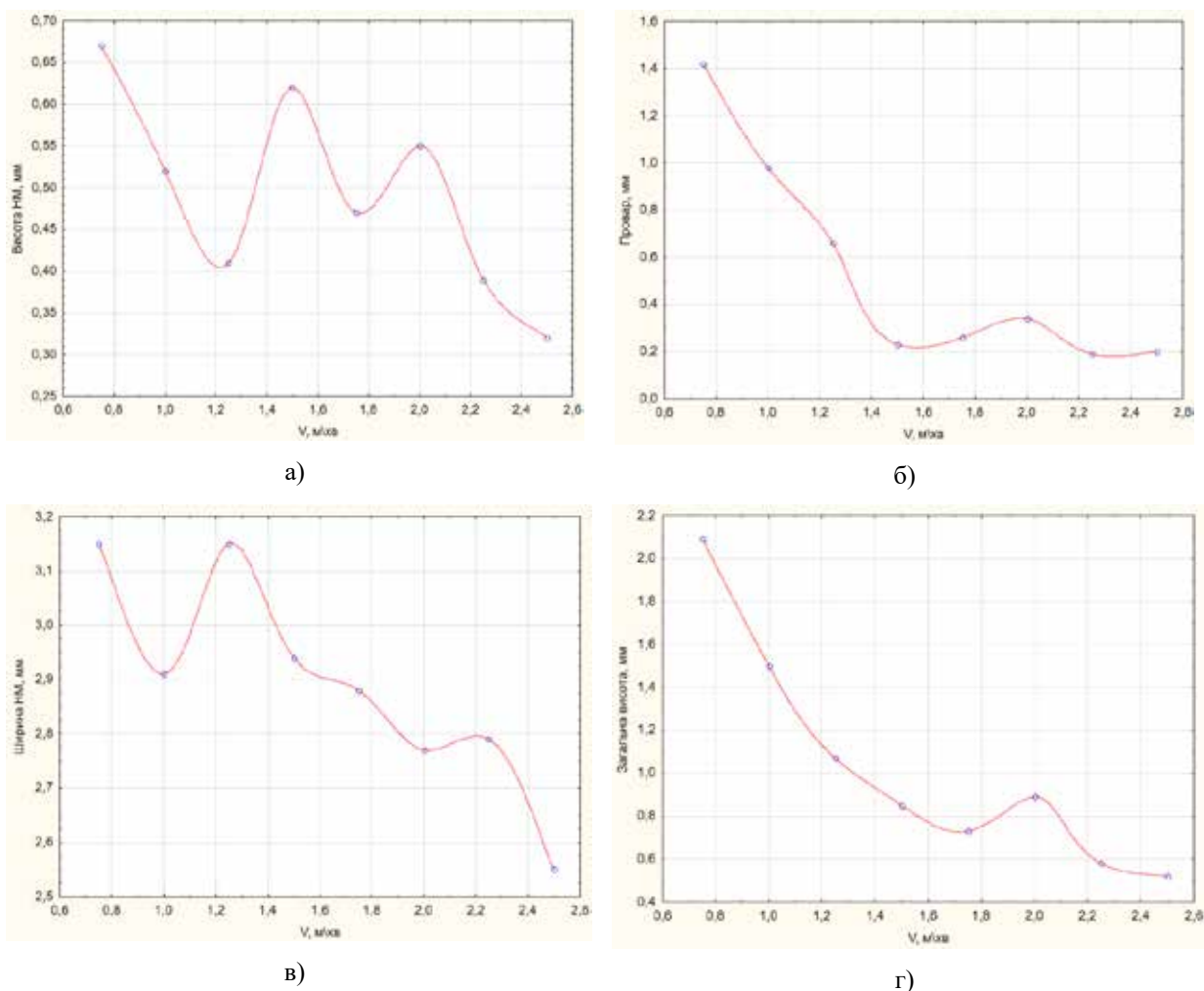


Рис. 3. Графіки залежності розмірних характеристик наплавленого елемента від швидкості переміщення лазерного променя: а) висоти наплавленого елемента відносно площини тонкостінної основи, б) глибини проникнення наплавленого матеріалу, в) ширини наплавленого елемента відносно площини тонкостінної основи, г) загальної висоти наплавленого елемента

Для розробки технології лазерного наплавлення на тонкостінну основу необхідно було підібрати такі величини характеристик робочого режиму, котрі б забезпечували якомога швидке нарощування матеріалу. Для цього потрібно, щоб дані величини забезпечували баланс максимального практичного значення висоти наплавленого матеріалу відносно площини тонкостінної основи та достатньо малої глибини проплаву для запобігання прожогу матеріалу основи. Через це, можна заявити, що при витримці всіх інших параметрів на рівнях, вказаних при плануванні експерименту, оптимальним значенням потужності лазерного випромінювання для наплавлення даних матеріалів є величина у $2 \text{ кВт} \pm 250 \text{ Вт}$.

У цьому випадку, побудувати прямі залежності розмірів наплавлених елементів від швидкості переміщення лазерного променя складно, оскільки:

- висота наплавленого елемента відносно площини тонкостінної основи має тенденцію на зниження, однак ця тенденція нестабільна, з рядом піків при швидкостях у 1,5 та 2 м/хв;
- схоже можна зазначити і про величину провару, однак тут падіння величини стабільне;
- ширина наплавлення при цьому швидко знижується, за винятком аномальної точки при швидкості у 1 м/хв та зони стабілізації при швидкостях у 2–2,25 м/хв;
- при всьому цьому можна помітити, що графік величини загальної висоти має параболічну форму, за винятком пікової точки при швидкості у 2 м/хв.

Згідно з критеріями вибору величин характеристик технологічних режимів, наведених вище, можна зробити висновок, що зразки, виготовлені при швидкості переміщення лазерного променя 2 м/хв, мають кращі геометричні характеристики наплавлених елементів, ніж зразки виготовлені при інших швидкостях. Через це саме дана швидкість обирається як оптимальна.

Висновки

Завдяки аналізу експериментальних даних, було виведено, що оптимальними параметрами обробки для наплавлення сталевго порошку з матеріалу AISI 316L (03X17H14M3) на пластину зі сталі AISI 321 (12X18H10T) товщиною 1,2 мм, є потужність лазерного випромінювання у 2 кВт та швидкість переміщення лазерного променя у 2 м/хв. Ці дані були використані для оформлення технологічних рекомендацій з лазерного наплавлення на тонкостінну основу.

Список використаної літератури

1. Del Sol I., Rivero A., López de Lacalle L. N., Gamez A. J. Thin-wall machining of light alloys: A review of models and industrial approaches. *Materials*. 2019. Vol. 12, No. 12. P. 2012. URL: <https://doi.org/10.3390/ma12122012>
2. Sokolovskiy M., Bernatskiy, A. Developmental review of metal additive manufacturing processes. *History of Science and Technology*. 2023. Vol. 13, No. 2. P. 334-356. URL: <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2023-13-2-334-356>
3. Zheng M., Wei L., Chen J., Zhang Q., Zhang G., Lin X., Huang W. On the role of energy input in the surface morphology and microstructure during selective laser melting of Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 11. P. 392-403. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.024>
4. Jiang H., Li Z., Feng T., Wu P., Chen Q., Feng Y., Chen L., Hou J., Xu H. Effect of process parameters on defects, melt pool shape, microstructure, and tensile behavior of 316L stainless steel produced by selective laser melting. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2020. Vol. 34, No. 4. P. 495-510. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s40195-020-01143-8>
5. Zheng M., Wei L., Chen J., Zhang Q., Zhong C., Lin X., Huang, W. A novel method for the molten pool and porosity formation modelling in selective laser melting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 140. P. 1091-1105. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.038>
6. Zheng M., Wei L., Chen J., Zhang Q., Li J., Sui S., Wang G., Huang W. Surface morphology evolution during pulsed selective laser melting: Numerical and experimental investigations. *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 496. P. 143649. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143649>
7. Safdar A., He H., Wei L., Snis A., Chavez de Paz, L. Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V. *Rapid Prototyping Journal*. 2012. Vol. 18. No. 5. P. 401-408. URL: <http://dx.doi.org/10.1108/13552541211250391>
8. Wang L., Wei Q., Shi Y., Liu J., He W. Experimental Investigation into the Single-Track of Selective Laser Melting of IN625. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 233-235. P. 2844-2848. URL: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.233-235.2844>
9. Trelewicz J., Halada G., Donaldson O., Manogharan G. Microstructure and corrosion resistance of laser additively manufactured 316L stainless steel. *JOM*. 2016. Vol. 68. No. 3. P. 850-859. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-016-1822-4>
10. AlMangour B., Grzesiak D., Yang J. Scanning strategies for texture and anisotropy tailoring during selective laser melting of TiC/316L stainless steel nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 728. P. 424-435. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.022>
11. Zhao C., Bai Y., Zhang Y., Wang X., Xue J., Wang H. Influence of scanning strategy and building direction on microstructure and corrosion behaviour of selective laser melted 316L stainless steel. *Materials & Design*. 2021. Vol. 209. P. 109999. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109999>
12. Ji H., Gupta M., Song Q., Cai W., Zheng T., Zhao Y., Liu Z., Pimenov D. Microstructure and machinability evaluation in micro milling of selective laser melted Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 14. P. 348-362. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.081>
13. Sander G., Thomas S., Cruz V., Jurg M., Birbilis N., Gao X., Brameld M., Hutchinson C. On the corrosion and metastable pitting characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting. *Journal of the Electrochemical Society*. 2017. Vol. 164. No. 6. P. C250-C257. URL: <http://dx.doi.org/10.1149/2.0551706jes>

References

1. Del Sol, I., Rivero, A., López de Lacalle, L. N., & Gamez, A. J. (2019). Thin-wall machining of Light Alloys: A review of models and industrial approaches. *Materials*, 12(12), 2012. <https://doi.org/10.3390/ma12122012>
2. Sokolovskiy, M., & Bernatskiy, A. (2023). Developmental review of metal additive manufacturing processes. *History of Science and Technology*, 13(2), 334-356. <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2023-13-2-334-356>
3. Zheng, M., Wei, L., Chen, J., Zhang, Q., Zhang, G., Lin, X. and Huang, W., (2021). On the role of energy input in the surface morphology and microstructure during selective laser melting of Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 392-403. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.024>

4. Jiang, H., Li, Z., Feng, T., Wu, P., Chen, Q., Feng, Y., Chen, L., Hou, J. and Xu, H. (2020). Effect of process parameters on defects, melt pool shape, microstructure, and tensile behavior of 316L stainless steel produced by selective laser melting. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 34(4), 495-510. <http://dx.doi.org/10.1007/s40195-020-01143-8>
5. Zheng, M., Wei, L., Chen, J., Zhang, Q., Zhong, C., Lin, X. and Huang, W. (2019). A novel method for the molten pool and porosity formation modelling in selective laser melting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140, 1091-1105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.038>
6. Zheng, M., Wei, L., Chen, J., Zhang, Q., Li, J., Sui, S., Wang, G., & Huang, W. (2019). Surface morphology evolution during pulsed selective laser melting: Numerical and experimental investigations. *Applied Surface Science*, 496, 143649. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143649>
7. Safdar, A., He, H., Wei, L., Snis, A., & Chavez de Paz, L., (2012). Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V. *Rapid Prototyping Journal*, 18(5), 401-408. <http://dx.doi.org/10.1108/13552541211250391>
8. Wang, L., Wei, Q., Shi, Y., Liu, J., & He, W. (2011). Experimental investigation into the single-track of selective laser melting of IN625. *Advanced Materials Research*, 233-235, 2844-2848. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.233-235.2844>
9. Trelewicz, J., Halada, G., Donaldson, O., & Manogharan, G. (2016). Microstructure and corrosion resistance of laser additively manufactured 316L stainless steel. *JOM*, 68(3), 850-859. <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-016-1822-4>
10. AlMangour, B., Grzesiak, D., & Yang, J. (2017). Scanning strategies for texture and anisotropy tailoring during selective laser melting of TiC/316L stainless steel nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*, 728, 424-435. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.022>
11. Zhao, C., Bai, Y., Zhang, Y., Wang, X., Xue, J., & Wang, H. (2021). Influence of scanning strategy and building direction on microstructure and corrosion behaviour of selective laser melted 316L stainless steel. *Materials & Design*, 209, 109999. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109999>
12. Ji, H., Gupta, M., Song, Q., Cai, W., Zheng, T., Zhao, Y., Liu, Z., & Pimenov, D. (2021). Microstructure and machinability evaluation in micro milling of selective laser melted Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 348-362. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.081>
13. Sander, G., Thomas, S., Cruz, V., Jurg, M., Birbilis, N., Gao, X., Brameld, M., & Hutchinson, C. (2017). On the corrosion and metastable pitting characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(6), C250-C257. <http://dx.doi.org/10.1149/2.0551706jes>