

УДК 621.9.06-529:004.925.8:621.745.5

doi: 10.32620/aktt.2024.sup2.17

С. В. АДЖАМСЬКИЙ^{1,2}, Г. А. КОНОНЕНКО^{1,3},
Р. В. ПОДОЛЬСЬКИЙ^{1,3}, С. І. БАДЮК¹

¹ ТОВ «Адитивні лазерні технології України», Дніпро, Україна

² Інститут транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна

³ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна

ВПЛИВ ЗМІНИ КОМБІНАЦІЙ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ СЛП ЕЛЕМЕНТІВ ОСНОВНЕ ТІЛО - ПОСТ-КОРДОН – КОРДОН НА СУЦІЛЬНІСТЬ ТА ШОРСТКІСТЬ ЗРАЗКІВ

Останнім часом виробництво металевих виробів стало більш адаптивним і швидким завдяки використанню 3-D технологій, що базуються на пошаровому виготовленні. Якість виробів, виготовлених за допомогою селективного лазерного плавлення (СЛП-технології) залежить від багатьох факторів, які можна розділити на основні групи: обладнання, матеріал, процес, деталь, фінішна обробка. Для забезпечення високої якості виробів необхідне використання системного підходу. **Предмет досліджень.** Закономірності впливу зміни комбінацій комплексів основних параметрів процесу виготовлення (стратегія сканування, відстань між треками, питома потужність процесу, швидкість сканування, потужність) різних елементів (основне тіло, кордон, пост-кордон) виробів, виготовлених за технологією СЛП на їх якість (суцільність та шорсткість поверхні). **Мета.** Розробка рекомендацій щодо режимів друку кордонів та пост-кордонів для нержавіючої сталі 316L з товщиною шару 30 мкм при різних відстанях між треками та зі зміною швидкостей сканування лазерного променя. **Методи.** Для проведення досліджень були виготовлені зразки 10×10×5 мм за технологією СЛП з порошку сталі аустенітного класу AISI 316L. Основне тіло дослідних зразків було виготовлено при постійних параметрах: товщина шару 30 мкм, потужність 100 Вт, швидкість сканування 1700 мм/с, відстань між треками 0,05 мм, розрахована питома щільність енергії складає 39,21 Дж/мм³, суцільність ~ 99,9 %. Дослідні зразки групи А, В та С відрізнялись стратегією сканування (OutIn або In2Out) та відстанню між треками кордонів. Дослідні зразки групи D, E, F були виготовлені з постійними параметрами потужності 100 Вт та відстанню між треками кордонів 0,05 мм та зі змінними параметрами швидкості сканування для групи D – 2,6...1,75 м/с; для групи E – 2,6...1,55 м/с; для групи F – 3,0...1,55 м/с. Друк зразків проводився на 3D принтері Alfa-150 виробництва компанії ТОВ «АЛТ Україна». Травлення структури проводилось у розчині Каллінга, аналіз мікроструктури проводився зі застосуванням оптичного мікроскопу AxioVert 200M Mat. Контроль шорсткості проводився за допомогою BioBase 220R з постійною зоною контролю 1,25 мм. **Результати.** Встановлено, що кордони зразків групи А та С надрукованих в діапазоні питомої щільності енергії ~ 27-33 Дж/мм³ мають тонку межу, що не виступає та не має видимих відхилень. Контроль шорсткості показав, що дослідні зразки A3, A4, C4, D5, E1, E2, F6 мають шорсткість в діапазоні 9,7...11,2 мкм. При порівнянні отриманих даних з параметрами виготовлення та аналізу мікроструктури встановлено, що для досягнення високої суцільності з мінімальною шорсткістю в готових виробах на поверхні необхідно застосовувати параметри таким чином, щоб параметри виготовлення пост-контуру енергетично коливались в діапазоні ± 4 Дж/мм³ від питомої щільності енергії основного тіла.

Ключові слова: селективне лазерне плавлення; AISI 316L; основне тіло; пост-кордон; кордон; шорсткість.

Вступ

Необхідність системного підходу до управління якістю продукції випливає з різноманіття і взаємозв'язку зовнішніх і внутрішніх факторів, що впливають на якість, з безперервності її формування та забезпечення. Якість виробів, виготовлених за допомогою СЛП-технології залежить від багатьох факторів, які можна розділити на основні групи: обладнання, матеріал, процес, деталь, фінішна обробка [1].

Обладнання включає такі фактори як калібрування, періодичність обслуговування і ремонтів, потужність лазера, точність і швидкодія скануючої системи, система нанесення порошку, система подачі, розподілу і очищення захисного газу, система забезпечення герметичності камери, допоміжне обладнання (установка для просіювання відпрацьованого порошку перед повторним використанням), позиціонування платформи.

Деталь – необхідно задавати параметри друку з урахуванням особливостей геометрії виробу – поверхні, що нависають, потребують допоміжних конструкцій – підтримок, в залежності від кута нахилу поверхні і товщини стінки можуть відрізнятися оптимальні режими процесу. При наявності гострих країв, виступів, отворів або вирізів малого радіусу необхідно коригувати траєкторію руху лазера в залежності від заданої точності.

Розміри і форма ванни розплаву залежать від наступних факторів: хімічний та гранулометричний склад металевих порошків, питомої енергії лазерного випромінювання (співвідношення потужності і швидкості переміщення лазерного променя), товщини шару металевих порошків, стану поверхні підкладки, розподілу інтенсивності випромінювання по діаметру лазерного променя, температури металевих порошків і підкладки, виду використовуваного захисного газу, його тиску і швидкості руху його потоків.

Питома енергія визначає кількість теплоти, що підводиться до кожної точки лазерного треку і, відповідно глибину, ширину проплавлення і час існування металу в розплавленому вигляді [2-6]. Також зі збільшенням питомої енергії посилюється гідродинамічна нестабільність ванни розплаву.

Товщина шару металевих порошків визначає обсяг металевих порошків, який необхідно розплавити, а також можливість достатнього, для забезпечення задовільного змочування, розплавленого металу і поверхні, проплавлення підкладки [4, 7].

Стан поверхні підкладки впливає на геометричні параметри ванни розплаву через забезпечення змочування розплавленого металу і поверхні [2, 8], а також забезпечує подачу порошків в ванну розплаву [8-10]. Чим більше шорсткість поверхні підкладки, тим більше порошків буде втягуватися в ванну розплаву.

Розподіл інтенсивності випромінювання по діаметру лазерного променя впливає на геометричні характеристики ванни розплаву через зміну температурного поля за обсягом ванни розплаву і як, наслідок, зміну її гідродинаміки [10].

Температура металевих порошків і підкладки впливає на геометричні характеристики ванни розплаву через вплив на необхідну кількість теплоти, що підводиться, і впливу на змочуваність поверхні [10, 11].

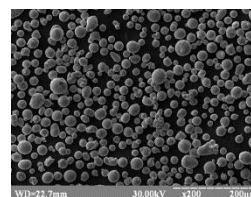
Мета роботи

Розробка рекомендацій щодо режимів друку за СЛП-технологією кордонів та пост-кордонів для нержавіючої сталі 316L з товщиною шару 30 мкм при різних відстанях між треками та зі зміною швидкості сканування лазерного променя.

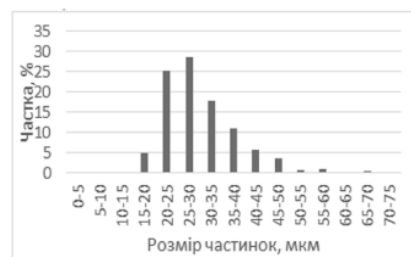
Матеріал і методика досліджень

Вихідним матеріалом був металевий порошок нержавіючої сталі 316L з розміром частинок від 10 до 45 мкм. Хімічний склад порошку 316L, % ваг.: Cr=17,79; Ni=12,63; Mo=2,35; Mn=0,78; Si=0,64; C=0,016. Вихідний матеріал був досліджений за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-106 (рис. 1, а) для визначення форми і розмірів частинок. На рис. 1, б наведено результати аналізу. Були виготовлені 6 груп (А, В, С, D, E, F) зразків за технологією СЛП з порошку сталі аустенітного класу AISI 316L, що мають форму паралелепіпеду з основою 10 мм, висотою 10 мм та товщиною 5 мм. Основне тіло дослідних зразків було виготовлено при постійних параметрах процесу: товщина шару 30 мкм, потужність 100 Вт, швидкість сканування 1700 мм/с з відстанню між треками 0,05 мм, розрахована питома щільність енергії складала 39,21 Дж/мм³, суцільність ~ 99,9% (рис. 2). Дослідні зразки групи А, В та С відрізнялись стратегією сканування та відстанню між треками кордонів, а саме: група А та С стратегія сканування Out2In (кордон – пост-кордон – основне тіло) та In2Out (основне тіло – пост-кордон – кордон) відповідно та група А та В – відстань між треками 0,05 та 0,06 мм відповідно (рис. 3). Змінні параметри кордону та пост-кордону представлені в таблиці 1. Друк зразків проводився на 3D принтері Alfa-150 виробництва компанії ТОВ «АЛТ Україна» [10].

Травлення структури проводилось у розчині Каллінга (100 мл хлорна кислота, 100 мл спирт, 20 г хлориду міді), аналіз мікроструктури проводився із застосуванням оптичного мікроскопу AxioVert 200M Mat. Контроль шорсткості проводився за допомогою ВіоBase 220R з постійною зоною контролю 1,25 мм.



а



б

Рис. 1. Частинки вихідного матеріалу 316L при збільшенні 200 (а) та результати гранулометричного аналізу (б)



Рис. 2. Мікроструктура основного тіла дослідних зразків

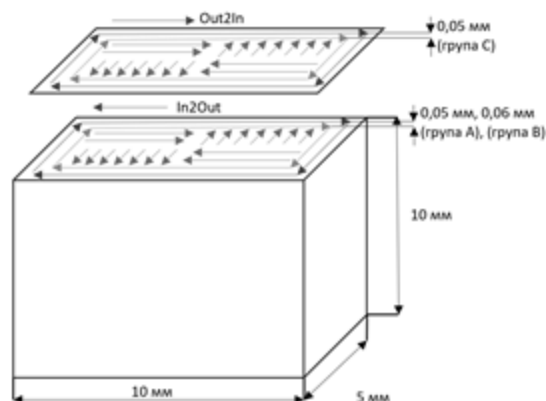


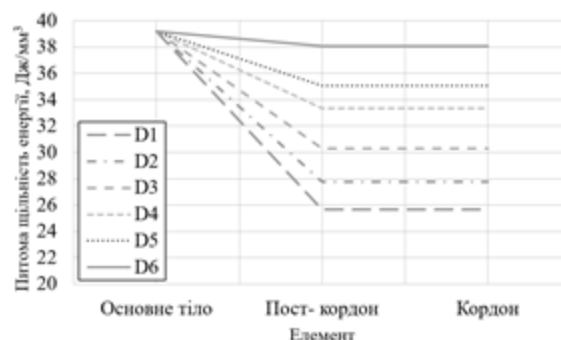
Рис. 3. Геометрія та схема сканування дослідних зразків групи А-С: зовнішні траєкторії – кордон, траєкторії між зовнішнім та шаховим порядком – пост-кордон, траєкторії в шаховому порядку – основне тіло, In2Out, Out2In – напрямлення сканування

Таблиця 1

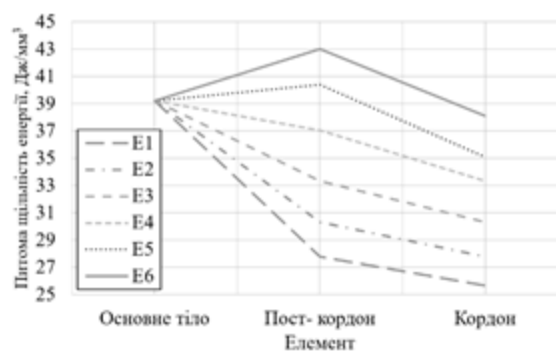
Змінні параметри виготовлення дослідних зразків групи А, В, С (S_f та S – відстань між треками пост-кордонів та кордонів, мм; V – швидкість сканування, м/с;)

Група	№ зразка	Стратегія сканування	S_f	V	S	V
А	1	In2Out	0,05	2,0	0,05	2,6
	2			1,85		2,4
	3			1,75		2,2
	4			1,7		2,0
	5			1,65		1,9
	6			1,6		1,75
В	1	In2Out	0,06	1,65	0,06	2,2
	2			1,53		2,0
	3			1,45		1,8
	4			1,4		1,65
	5			1,37		1,55
	6			1,33		1,45
С	1	Out2In	0,05	2,0	0,05	2,6
	2			1,85		2,4
	3			1,75		2,2
	4			1,7		2,0
	5			1,65		1,9
	6			1,6		1,75

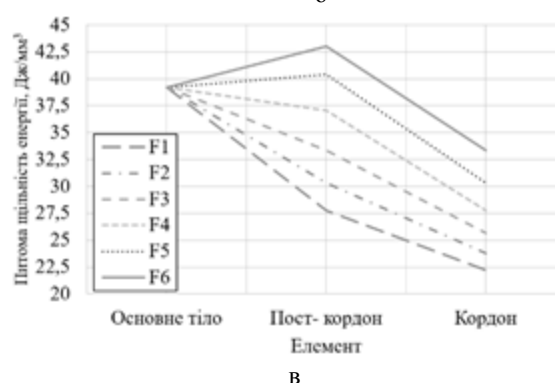
Дослідні зразки групи D, E, F були виготовлені з постійними параметрами потужності 100 Вт та відстанню між треками кордонів 0,05 мм та зі змінними параметрами швидкості сканування для групи D – 2,6...1,75 м/с; для групи E – 2,6...1,55 м/с; для групи F – 3,0...1,55 м/с. В результаті встановлених параметрів було отримано залежності зміни питомої щільності енергії в основному тілі- пост-кордоні та кордоні (рис. 4, а, б та в)



а



б



в

Рис. 4. Схема зміни питомої щільності енергії дослідних зразків групи D (а), E (б), F (в) (основне тіло – пост-кордон – кордон)

За результатами візуально-оптичного контролю (далі-ВОК) встановлено, що всі зразки в групі А 1-6 (In2Out) при порівнянні зі зразками групи С 1-6 (Out2In) не мають видимих відхилень. Слід зазначити, що при ВОК області кордонів, а саме рівномірності друку кордонів та пост-кордонів (переривчастість, спікання, прилипання порошку) зразки групи А та С № 4

не мають даних дефектів (рис. 5, а). Виходячи з отриманих даних, можна зробити висновок, що кордони зразків групи А та С, надрукованих в діапазоні питомої щільності енергії $\approx 27\text{--}33 \text{ Дж/мм}^3$ мають тонку межу, що не виступає та не має видимих відхилень.

З мікроструктурних досліджень (рис. 5, б) зразку №4 групи С (Out2In) було виявлено розшарування в області пост-кордон.

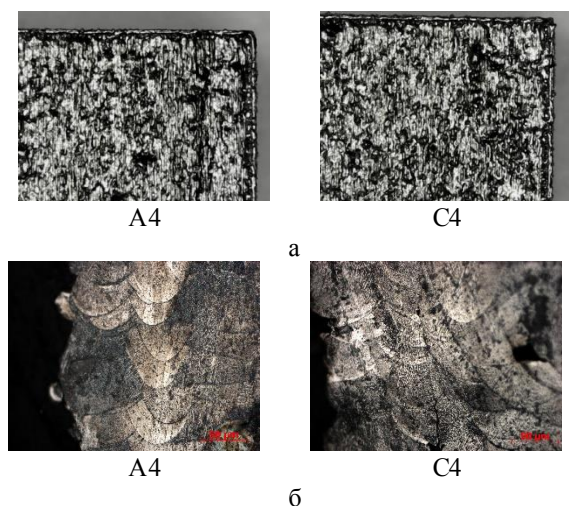


Рис. 5. ВОК та мікроструктура дослідних зразків А та С №4 в області кордонів

Зразки групи В з відстанню між треками кордонів 0,06 мм мають видиму виступаючу частину в області кордонів, що є незначним відхиленням від вихідної САД-моделі (рис. 6, а). З мікроструктурних досліджень зразків групи В встановлено, що структура області пост-кордону має несущільності, що вказує на подальше розшарування кордонів від основного тіла по області пост-кордонів.

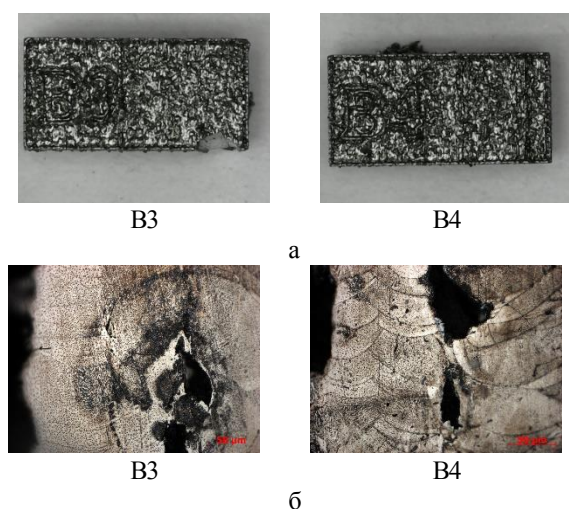


Рис. 6. ВОК (а) та мікроструктура (б) дослідних зразків групи В №3 та №4 з відстанню між треками кордонів 0,06 мм

При мікроструктурних дослідженнях зразків з груп D (рис. 7), E (рис. 8), F (рис. 9), а саме зразків що виготовленні з різними комбінаціями виготовлення мають несущільності чи поодинокі пори в залежності від параметрів.

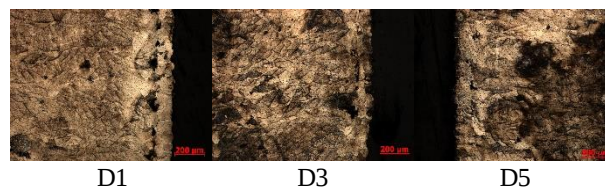


Рис. 7. Область кордонів дослідних зразків групи D

З результатів дослідження зразків групи D встановлено, що дефекти в області пост-кордонів є результатом недостатньої питомої щільності енергії (зразок D1 та D3) в комбінації зміни параметрів виготовлення елементів основне тіло - пост-кордон - кордон. Показано, що зразок D5, що виготовлений при комбінації питомої щільності енергії $39,21 - 35,0 - 38,0 \text{ Дж/мм}^3$ (рис. 4, а) відповідно було досягнуто суцільність 96,2% від загального об'єму.



Рис. 8. Область кордонів дослідних зразків групи E

З результатів дослідження зразків групи E встановлено, що дефект, а саме поодинока пора замкнутого типу [1] в області пост-кордонів є результатом високої питомої щільності енергії (зразок E5) в комбінації зміни параметрів виготовлення елементів основне тіло - пост-кордон - кордон. Показано, що зразок E1, що виготовлений при комбінації питомої щільності енергії $39,21 - 27,7 - 25,6 \text{ Дж/мм}^3$ (рис. 4, б) відповідно було досягнуто суцільність 99,6% від загального об'єму.

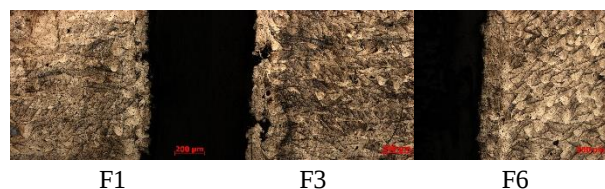


Рис. 9. Область кордонів дослідних зразків групи F

З результатів дослідження зразків групи F встановлено, що дефект, а саме несущільність по області кордону є результатом недостатньої питомої щільності енергії.

сті енергії (зразки F1 та F3) в комбінації зміни параметрів виготовлення елементів основне тіло - пост-кордон - кордон. Показано, що зразок F6, що виготовлений при комбінації питомої щільності енергії 39,21 – 43,0 – 33,3 Дж/мм³ (рис. 4, в) відповідно було досягнуто суцільності 99,1% від загального об'єму. Таким чином в результаті проведених досліджень було встановлено, що суцільність в діапазоні 99,1...99,6% по області поверхні зразків була досягнута при комбінаціях параметрів виготовлення елементів основного тіла – пост-кордон – кордон за яких питома щільність енергії складала: 39,21 – 27,7...43,0 – 25,6...33,3 Дж/мм³ відповідно.

Контроль шорсткості показав, що дослідні зразки A3, A4, C4, D5, E1, E2, F6 мають шорсткість в діапазоні 9,7...11,2 мкм (рис. 10). Слід зазначити, що зразки групи В мають шорсткість 11,3...18,2 мкм з мінімальним значенням шорсткості зразка В4. При порівнянні зразків з параметрами відстані між треками кордонів 0,05 мм та 0,06 мм мають розбіжність по мінімальній шорсткості (зразок А4 – 9,7мкм та В4 – 11,3 мкм) ~ 14,1%. Це свідчить—про те, що зразки, надруковані з відстанню між треками кордонів 0,06 мм, мають несучільності в кордонах та пост-кордонах таким чином встановлено, що параметр відстані між треками кордонів відіграє роль у шорсткості готового виробу.

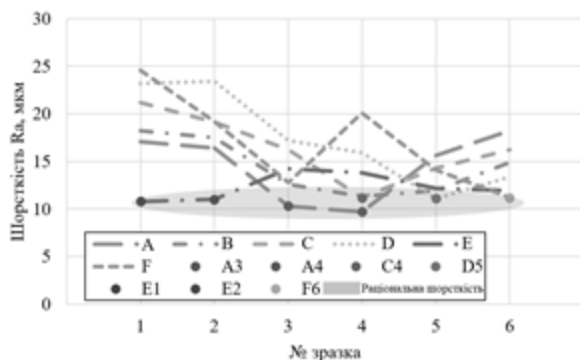


Рис. 10. Результати шорсткості дослідних зразків

При дослідженні шорсткості зразків, що були виготовлені зі зміною параметрів сканування, а саме In2Out зразок А4 (9,7мкм) та Out2In зразок С4 (11,2 мкм) різниця мінімальних значень складала ~ 13,5%. Відповідно до досліджень [11] ця розбіжність може вказувати на вплив внутрішніх залишкових напружень по перерізу дослідного зразка.

При дослідженні групи D, E, F встановлено, що шорсткість дослідних зразків D5, E1, E2, F6 складає 11,1; 10,8; 11; 11,2 мкм відповідно. При порівнянні отриманих даних з параметрами виготовлення та аналізу мікроструктури встановлено, що для досягнення високої суцільності з мінімальною шорсткістю в готових виробах на поверхні необхідно застосовувати

параметри таким чином, щоб параметри виготовлення пост- контуру енергетично коливались в діапазоні ± 4 Дж/мм³ від питомої щільності енергії основного тіла. Також слід зазначити, що при застосуванні даної рекомендації елемент кордонів готових виробів повинен виготовлятися при рівних параметрах чи нижче енергетичного рівня питомої щільності енергії основного тіла на ~11%.

Висновки

1. Встановлено, що зразки виготовленні при постійних режимах із зміною швидкості руху лазера та стратегії сканування треків кордонів (in2out, out2in) ідентичні, не мають видимих відхилень, не мають уривчастості треків та виступів над основним тілом. Показано, ґрунтуючись на результатах БОК, що оптимальним діапазоном друку при цих параметрах є зразки А4 і С4 питома енергія яких складала 27-33 Дж/см³.

2. Зразки групи В мають тонку межу, переривчастість, і велику відстань між треками основного тіла і треками виготовлення кордону, в даній області, можлива висока ймовірність утворення пор через малу питому щільність енергії і велику відстань між треками кордонів та треками основного тіла.

3. Показано, що зразки D5, E1, F6, що виготовлені при комбінації питомої щільності енергії 39,21 – 35,0 – 38,0 Дж/мм³, 39,21 – 27,7 – 25,6 Дж/мм³, 39,21 – 43,0 – 33,3 Дж/мм³ було досягнуто суцільності 96,2%, 99,6%, 99,1% відповідно від загального об'єму.

4. Контроль шорсткості показав, що дослідні зразки A3, A4, C4, D5, E1, E2, F6 мають шорсткість в діапазоні 9,7...11,2 мкм. При дослідженні групи D, E, F встановлено, що шорсткість дослідних зразків D5, E1, E2, F6 складає 11,1; 10,8; 11; 11,2 мкм відповідно.

5. Встановлено, що для досягнення високої суцільності з мінімальною шорсткістю в готових виробах на поверхні необхідно застосовувати параметри таким чином, щоб параметри виготовлення пост- контуру енергетично коливались в діапазоні ± 4 Дж/мм³ від питомої щільності енергії основного тіла.

Внесок авторів: формування проблеми – Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський; огляд та аналіз інформаційних джерел – С. В. Аджамський, Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський; розробка дослідницького стенду – С. В. Аджамський; виготовлення дослідних зразків – С. В. Аджамський, С. І. Бадюк; проведення випробувань – Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський; аналіз отриманих результатів – Г. А. Кононенко, Р. В. Подольський.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис не має супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

Подяка

Автори висловлюють подяку співробітникам ТОВ «Адитивні лазерні технології України» Дерягіну Антону Ігоревич, ІЧМ НАНУ Шпак Олені Адольфівні, Сафроновій Олені Анатоліївні та Швець Людмилі Іванівні.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису

Література

1. Реалізація технології селективного лазерного плавлення в Україні [Текст] / С. Аджамський [та інші]. – К. : Наук. думка, 2022. – 116 с. DOI: 10.15407/978-966-00-1856-3.
2. Khairallah, S. A. Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel [Text] / S. A. Khairallah, A. T. Anderson, // Powder. J. Mate. Process. Technol. – 2014. – № 214. – P. 2627–2636.
3. On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties [Text] / T. Nesma, I. Aboulkhairab, C. Maskerya [et all.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2016. – Vol. 230. – P. 88-98.
4. Zhang, B. The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder [Text] / B. Zhang, L. Dembinski, & C. Coddet // Materials Science and Engineering: A. – 2013. – Vol. 584 (1). – P. 21-31.
5. Factor analysis of selective laser melting process parameters with normalised quantities and Taguchi method [Text] / J. Hua-Zhen, L. Zheng-Yang, T. Feng

Peng-Yue [et all.] // Optics & Laser Technology. – 2019. – Vol. 119. – Article No. 105592.

6. Laser powder bed fusion in high-pressure atmospheres [Text] / P. Bidare, I. Bitharas, R. M. Ward [et all.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 99. – P. 543–555.

7. Modulating laser intensity profile ellipticity for microstructural control during metal additive manufacturing [Text] / T. T. Roehling, S. S. Q. Wu, S. A. Khairallah [et all.] // Acta Materialia. – 2017. – Vol. 128. – P. 197-206. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.02.025

8. Savalani, M. M. Effect of preheat and layer thickness on selective laser melting (SLM) of magnesium [Text] / M. M. Savalani, & J. M. Pizarro // Rapid Prototyping Journal. – 2016/ – Vol. 22 (1). – P. 115-122. DOI: 10.1108/RPJ-07-2013-0076.

9. Application of base plate preheating during selective laser melting [Text] / R. Mertens, S. Dadbakhsh, J. V. Humbeeck, & J.-P. Kruth // Procedia CIRP. – 2018. – Vol. 74. – P. 5-11. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.002.

10. Дослідження ефективності електрохімічного полірування зразків змінного перерізу з різною шорсткістю зі сталі AISI 316L, виготовлених за технологією SLM [Текст] / С. Аджамський, Г. Кононенко, Р. Подольський, & С. Бадюк // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2021. – № 2 (170). – С. 66-73. DOI: 10.32620/aktt.2021.2.08.

11. Внутрішні залишкові напруження в адитивному виробництві (Огляд) [Text] / Г. А. Кононенко, С. В. Аджамський, Р. В. Подольський [та інші] // Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії. – 2023. – Вип. 37. – С. 434-446. DOI: 10.52150/2522-9117-2023-37-434-446.

References

1. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R., & Badyuk, S. Realizacij tehnologii selektivnogo lazernogo plavlennja v Ukraini [Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine]. Kyiv, Naukova Dumka, 2022. 116 p. DOI: 10.15407/978-966-00-1856-3.
2. Khairallah, S. A., & Anderson, A. T. Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel. Powder. J. Mate. Process. Technol, 2014, no. 214, pp. 2627–2636.
3. Nesma, T., Aboulkhairab, I., Maskerya, C., Tucka, I., & Ashcroft, N. On the formation of AlSi10Mg single tracks and layers in selective laser melting: Microstructure and nano-mechanical properties. Journal of Materials Processing Technology, 2016, vol. 230, pp. 88-98.
4. Zhang, B., Dembinski, L., & Coddet, C. The study of the laser parameters and environment variables effect on mechanical properties of high compact parts elaborated by selective laser melting 316L powder.

Materials Science and Engineering: A, 2013, vol. 584 (1), pp. 21-31.

5. Hua-Zhen, J., Zheng-Yang, L., Fengc Peng-Yue, T., Qi-Sheng, W., Yun-Long, C., Shi-Wen, F., Huan, L., & He-Jian, G. X. Factor analysis of selective laser melting process parameters with normalised quantities and Taguchi method. *Optics & Laser Technology*, 2019, vol. 119, article no. 105592.

6. Bidare, P., Bitharas, I., Ward, R. M., Attallah, M. M., & Moore, A. J. Laser powder bed fusion in high-pressure atmospheres. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 99, pp. 543–555.

7. Roehling, T. T., Wu, S. S. Q., Khairallah, S. A., Roehling, J. D., Soezeri, S. S., Crumb, M. F., & Matthews, M. J. Modulating laser intensity profile ellipticity for microstructural control during metal additive manufacturing. *Acta Materialia*, 2017, vol. 128, pp. 197-206. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.02.025.

8. Savalani, M. M., & Pizarro, J. M. Effect of preheat and layer thickness on selective laser melting (SLM) of magnesium. *Rapid Prototyping Journal*, 2016, vol. 22 (1), pp. 115-122. DOI: 10.1108/rpj-07-2013-0076.

9. Mertens, R., Dadbakhsh, S., Humbeeck, J. V., & Kruth, J.-P. Application of base plate preheating during selective laser melting. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 74, pp. 5-11. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.002.

10. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskiy, R., & Badyuk, S. Doslidzhennja efektyvnosti elektrohimichnogo poliruvannja zrazkiv zminnogo pererizu z riznoju shorstkistju zi stali AISI 316L, vigotovlenih za tehnologiiu SLM [Research efficiency electrochemical polishing variable section samples with different roughness of steel AISI 316L, manufactured by technology of selective laser melting]. *Aviacijno-kosmichna texnika i texnologiya - Aerospace Technic and Technology*, 2021, no. 2 (170), pp. 66-73. DOI: 10.32620/aktt.2021.2.08.

11. Kononenko, G. A., Adzhamskij, S. V., Podolskij, R. V., Safronova, O. A., Shpak, E. A., & Deryagin, A. I. Vnutrishni zalishkovi napruzheniya v aditivnomu virobnictvi (Oglyad) [Internal residual stresses in additive manufacturing (Overview)]. *Fundamentalni ta prikladni problemi chornoyi metalurgiyi – Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 2023, no. 37, pp. 434-446. DOI: 10.52150/2522-9117-2023-37-434-446.

Надійшла до редакції 15.06.2024, розглянута на редколегії 15.08.2024

THE INFLUENCE OF CHANGING THE COMBINATIONS OF THE MANUFACTURING PARAMETERS USING THE SLP TECHNOLOGY OF THE MAIN BODY - POST-BORDER - BORDER ON THE CONTINUITY AND ROUGHNESS OF THE SAMPLES

Sergey Adjamskiy, Ganna Kononenko, Rostyslav Podolskiy,
Sergey Baduk

Recently, the production of metal products has become more adaptable and rapid because of the use of 3-D technologies based on layer-by-layer manufacturing. The quality of products produced using selective laser melting (SLP technology) depends on many factors, which can be divided into main groups: equipment, materials, processes, details, and finishing. To ensure high-quality products, a systematic approach is necessary. **Subject of research.** Patterns of influence of changes in combinations of the main parameters of the manufacturing process (scanning strategy, distance between tracks, specific power of the process, scanning speed, power) of various elements (main body, border, post-border) of products manufactured using SLP technology on their quality (integrity and surface roughness). **Purpose.** Development of recommendations for border and post-border printing modes for 316L stainless steel with a layer thickness of 30 μm at different distances between tracks and with varying laser beam scanning speeds. **Methods.** For research purposes, samples of 10×10×5 mm were prepared using SLP technology from AISI 316L austenitic steel powder. The main body of the test samples was produced with constant parameters: layer thickness 30 μm , power 100 W, scanning speed, 1700 mm/s; distance between tracks, 0.05 mm; calculated specific energy density is 39.21 J/mm³, continuity ~99, 9%. The test samples of groups A, B, and C differed according to the scanning strategy (Out2In or In2Out) and the distance between the boundary tracks. Test samples of groups D, E, and F were made with constant power parameters of 100 W and the distance between the border tracks of 0.05 mm and with variable scanning speed parameters for group D 2.6...1.75 m/s; for group E 2.6...1.55 m/s; for group F 3.0...1.55 m/s. Samples were printed on an Alfa-150 3D printer by ALT Ukraine LLC. Etching of the structure was carried out in Kalling's solution, and analysis of the microstructure was carried out using an AxioVert 200M optical microscope. Roughness control was performed using BioBase 220R with a constant control zone of 1.25 mm. **Results.** It was established that the borders of samples of groups A and C printed in the range of specific energy density $\approx 27\text{--}33$ J/mm³ have thin borders that do not protrude and have no visible deviations. Roughness control showed that test samples A3, A4, C4, D5, E1,

E2, and F6 had roughness values in the range of 9.7...11.2 microns. When comparing the obtained data with the manufacturing parameters and microstructure analysis, it was established that to achieve high continuity with minimal roughness in the finished products on the surface, it is necessary to apply the parameters in such a way that the post-contour manufacturing parameters energetically fluctuate in the range of $\pm 4 \text{ J/mm}^3$ from the specific energy density main body.

Keywords: selective laser melting; AISI 316L; main body; post-border; border; roughness.

Аджамський Сергій Вікторович – Ph.D, головний конструктор ТОВ «Адитивні лазерні технології України»; старш. наук. співроб. Інституту транспортних систем і технологій НАН України, Дніпро, Україна.

Кононенко Ганна Андріївна – д-р техн. наук, учений секретар Інститута чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України; інженер- матеріалознавець ТОВ «Адитивні лазерні технології України», Дніпро, Україна.

Подольський Ростислав Вячеславович – Ph.D, наук. співроб. Інститута чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України; інженер- матеріалознавець ТОВ «Адитивні лазерні технології України», Дніпро, Україна.

Бадюк Сергій Іванович – канд. техн. наук, інженер-технолог ТОВ «Адитивні лазерні технології України», Дніпро, Україна.

Sergey Adjamskiy – Ph.D, Chief Designer of LLC "Additive Laser Technology of Ukraine"; Senior Researcher at the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine,
e-mail: info@alt-print.com, ORCID: 0000-0002-6095-8646.

Ganna Kononenko – Doct. Technical Science, Scientific Secretary at the Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of NAS of Ukraine; Materials Engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Dnipro, Ukraine,
e-mail: perlit@ua.fm, ORCID: 0000-0001-7446-4105.

Rostyslav Podolskiy – Ph.D, Researcher at the Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov of NAS of Ukraine; Materials Engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Dnipro, Ukraine,
e-mail: rostislavpodolskij@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0288-0641.

Sergey Baduk – Cand. Technical Science, Process Engineer LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Dnipro, Ukraine,
e-mail: uroboroz33@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1074-3057.