

<https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105>  
УДК 669.24.018.45:621.762.8:004.923

**С. В. АДЖАМСЬКИЙ**<sup>1,2</sup>, аспірант, директор  
ORCID 0000-0002-6095-8646

**Г. А. КОНОНЕНКО**<sup>2,3</sup>, вч. секретар, канд. техн. наук  
ORCID 0000-0001-7446-4105

**Р. В. ПОДОЛЬСЬКИЙ**<sup>2,3,4</sup>, магістрант, інж. першої категорії  
ORCID 0000-0002-0288-0641

<sup>1</sup> Дніпровський національний університет ім. О. Гончара,  
Проспект Гагаріна, 72, Дніпро, Україна, 49000

<sup>2</sup> LLC «Additive Laser Technology of Ukraine»  
вул. Сергія Подолінського 31, Дніпро, Україна, 49000

<sup>3</sup> Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України  
Площа Академіка Стародубова, 1, Дніпро, Україна, 49107

<sup>4</sup> Національна металургійна академія України  
Проспект Гагаріна 4, Дніпро, Україна, 49000

## ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ SLM-ПРОЦЕСУ НА ФОРМУВАННЯ ОБЛАСТІ КОРДОНІВ ДЕТАЛЕЙ З ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ INCONEL 718

*Роботу присвячено удосконаленню режимів технології селективного лазерного плавлення на основі розрахункової моделі для зниження рівня залишкових напружень та запобігання відхилень в геометрії деталі. Приводяться результати моделювання на універсальній воксельній структурі і спрощеному об'єкті для прогнозування поведінки металу в залежності від щільності питомої енергії в області кордонів металевої деталі з Inconel 718. Проведено експеримент для вивчення впливу різних стратегій і режимів процесу на викривлення деталей в результаті впливу залишкових напружень з метою їхньої мінімізації. Друк здійснювався на 3D-принтері «Alfa-150» (ТОВ «ALT Україна») при постійній потужності і відстані між треками в кожній зоні (up-skin, down-skin, in-skin) зі зміною швидкості руху променя лазера, а також різними схемами нарощування зразків способом 3D-принтингу з поворотом 67° кожного нового шару відносно попереднього. З метою визначення дефектів і відхилень від вихідної моделі до твердого тіла (зразок) був виконаний металографічний аналіз за допомогою оптичної мікроскопії (Carl Zeiss AXIOVERT 200M). Встановлено, що симуляція процесів друку, виконана на платформі Magics, за допомогою розбивки моделі на воксельну структуру дає можливість аналітичної оцінки напружень і деформацій. Аналіз зовнішнього вигляду дослідних зразків показав, що найкращі показники down-skin формуються при потужності 80 Вт і щільності питомої енергії (40...38 Дж/мм<sup>3</sup>). При використанні стратегії друку в шаховому порядку з поворотом 67° при оптимальній щільності питомої енергії можливо мінімізувати залишкові внутрішні напруження, що призводять до викривлення виробу. У майбутньому результати можуть бути доповнені дослідженнями впливу залишкових напружень сил стиснення при впливі променя лазера при постійній підведеній потужності. З використанням розрахункової моделі, яка дозволяє обчислювати залишкові напруження при нанесенні наступного шару в залежності від швидкості руху лазера, потужності і відстані між нанесеними треками можливе отримання високоточних деталей з заданими властивостями. Виконано адаптацію моделі, яка дозволяє отримати кількісну оцінку залишкових термічних напружень в залежності від швидкості пересування і потужності лазера для жароміцного сплаву Inconel 718. Визначено оптимальні режими для мінімізації цих напружень і зменшення викривлення деталі.*

**Ключові слова:** залишкові напруження, селективне лазерне плавлення, Inconel 718, сила стиснення, лазер.

Цитування: Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В. Вплив параметрів SLM-процесу на формування області кордонів деталей з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718. *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 6 (133). С. 105—114. <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105>

## ВСТУП

SLM-технологія — це сучасний спосіб виробництва деталей зі складною геометрією і високими механічними властивостями [1]. Ця технологія полягає у побудові виробу за допомогою багаторазового пошарового нанесення металевого порошку, його швидкого розплавлення під впливом іттербієвого волоконного лазера, який сканує поверхню відповідно до заданої траєкторії.

Дана технологія має ряд переваг для виготовлення виробів авіаційно-космічного призначення: можливість отримання тонкостінних деталей з криволінійними каналами, спрощення їхнього виробництва за рахунок зменшення кількості технологічних переходів, застосування комп'ютерних програм і засобів автоматизації, що дозволяють оптимізувати конструкцію виробу, можливість полегшення конструкції для підвищення коефіцієнта «Buy-to-Fly».

Одним з недоліків даної технології є наявність внутрішніх напружень у виробі. Причинами формування напружень є висока швидкість охолодження при затвердінні ванни розплаву у межах одного треку (швидкості охолодження від  $10^3$  до  $10^8$  К/с), великий градієнт температур між рідким розплавом ванни і попередніми твердими шарами виробу. Особливо це актуально для жароміцного суперсплаву Inconel 718, оскільки для нього характерний низький коефіцієнт теплопередачі. Нерівномірність розподілу залишкових напружень пов'язана з такою особливістю технології, як відмінності в умовах охолодження треку, який формує бічну поверхню деталі і треку в центрі її перетину, що зумовлює різницю тепловідведення на кордоні порошок — метал і метал — метал відповідно.

При формуванні залишкових напружень, крім високих швидкостей охолодження і постійного сусідства рідкого і твердого металу у процесі побудови деталі, важливим фактором є нерівномірність розподілу залишкових напружень, пов'язаних з геометрією: наявність виступаючих частин, переходів від товстого до тонкого перерізу, гострокутних отворів.

Якщо рівень залишкових напружень перевищує границю текучості, то вони можуть призвести до деформації (викривлення) деталі.

Ще більш небезпечним є здатність залишкових напружень проявлятися згодом — коли вже після обробки готова деталь механізму раптово і швидко починає зношуватися внаслідок виходу розмірів за межі допусків.

При виготовленні деталей за технологією SLM в області контуру (краю) масивного виробу виникають напруження стиснення, які можуть призводити до утворення ряду дефектів [5]: зміни первісної форми (викривлення) виробу [6], утворення пор і розшарування між новим і холонучим металом через зміни його геометрії, виникнення мікротріщин, формування вираженої текстури, що призводить до зниження механічних властивостей і їхньої анізотропності.

У зв'язку з цим важливою є мінімізація залишкових напружень у процесі виготовлення деталей методом SLM. Для запобігання відхилень в геометрії деталі необхідно враховувати співвідношення між щільністю питомої енергії, яка підводиться, і її поглинанням під час процесу [4]. Однак оптимальні технологічні параметри [2] і стратегії побудови [3] SLM-процесу для металевих матеріалів складно передбачити, оскільки якість виробу залежить від великої кількості факторів. Пошук шляхів попередньої оцінки і розробка заходів щодо зниження залишкових напружень при виготовленні деталей методом SLM є актуальним завданням сучасного матеріалознавства.

Нижче представлено результати імітаційної моделі побудови куба на ребрі для прогнозування поведінки металу в залежності від щільності питомої енергії в області кордонів металевої деталі з Inconel 718 [2].

**Мета роботи.** Встановлення раціональних технологічних параметрів та стратегії побудови деталей за технологією селективного лазерного плавлення для мінімізації викривлень, які виникають внаслідок дії залишкових напружень.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ПРОЦЕДУРИ

Моделювання сил стиснення виконувалося на платформі Materialise, яка дає зворотний зв'язок досліднику для виключення потенційних проблем при виробництві деталі за допомогою SLM-технології.

Модуль Magics проводить моделювання на підставі воксельної структури деталі. Воксель (Voxel) (об'ємний піксель) — це кубічна одиниця тривимірної матриці, яка складає тривимірний об'єкт і її можна розглядати як еквівалент пікселя у двовимірному об'єкті при обробці [2].

Процес симуляції на платформі Magics на основі воксельної структури представлено на рис. 1 [2]. Показано розподіл залишкових напружень, які виникають при нарощуванні нових шарів. Ділянки поблизу краю поверхні останнього шару стискаються при охолодженні, і шар деформується, згинаючи край всередину.

В результаті поведінки матеріалу зразків, надрукованих при різних стратегіях побудови, формуються області розтягувальних напружень, які можна представити у вигляді істинної діаграми розтягування (рис. 2), яка б показала відношення між подовженням і напруженням. При симуляції Inconel 718 демонструє лінійну залежність напруження — деформація до границі текучості. При різних стратегіях побудови зразків, шахове і паралельне сканування характерною особливістю є відмінність областей II (ділянок текучості). Матеріал зразка, побудованого по стратегії шахового сканування, більш плавно переходить в ділянку самозміцнення, тим самим перестроювання кристалічної решітки відбувається при більшому навантаженні, що зберігає запас переходу до незворотних змін матеріалу. До границі текучості тіло може повернутися до своєї первісної форми і розміру, коли напруження розтягу усунені [8].

При перевищенні границі текучості Inconel 718 демонструє пластичну поведінку, що характеризується невідновлюваною пластичною деформацією, і залежність деформації від напруження стає нелінійною.

Для мінімізації термічних напружень при реалізації SLM-технології передбачено низку можливостей з управління параметрами процесу: різні типи треків, поворот і зміщення шарів відносно попередніх, різні стратегії друку.

Шари в залежності від геометрії розбиваються на зони, кожній зоні присвоюється індивідуальний ідентифікатор, згідно з яким будуються траєкторії руху і встановлюються типи треків зі

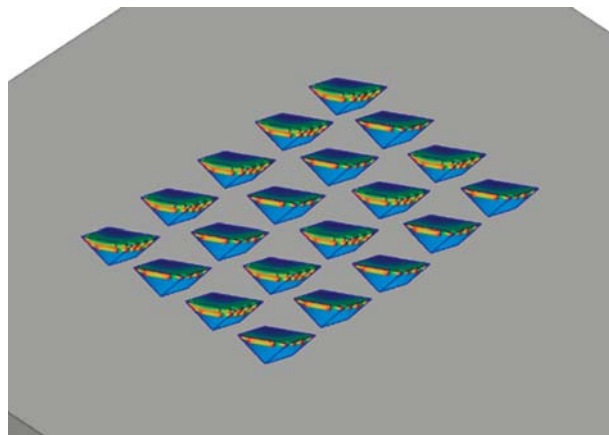


Рис. 1. Симуляція залишкових напружень на платформі Magics при накладенні нового шару виробу

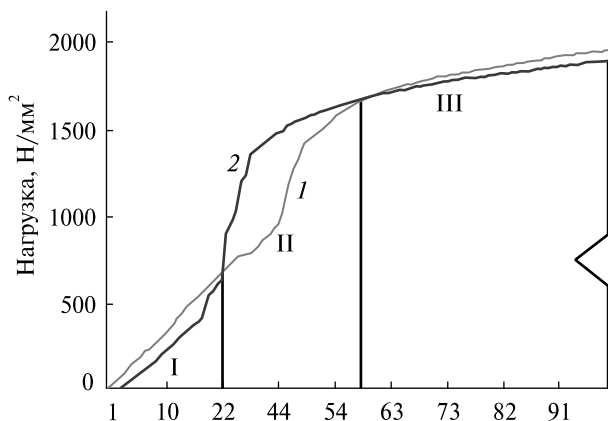


Рис. 2. Справжня діаграма розтягування зразків з шаховою (1) і паралельною (2) стратегією сканування: I — ділянка пропорційності, II — ділянка текучості, III — ділянка самозміцнення

своїми параметрами потужності і швидкості руху лазерного променя. Дані ідентифікатори можна рознести на три основні групи: нижній шар (down-skin), внутрішній шар (in-skin), верхній шар (up-skin) (рис. 3, а). При цьому в кожній групі створюються свої підгрупи: заливка (hatches), контур (border), постконтур (fill border) як показано на рис. 3, б.

Штрихування лазером або стратегія руху променя лазера — це траєкторія проходження лазерним променем по поверхні шару металевого порошку при заливці основного тіла і контурів

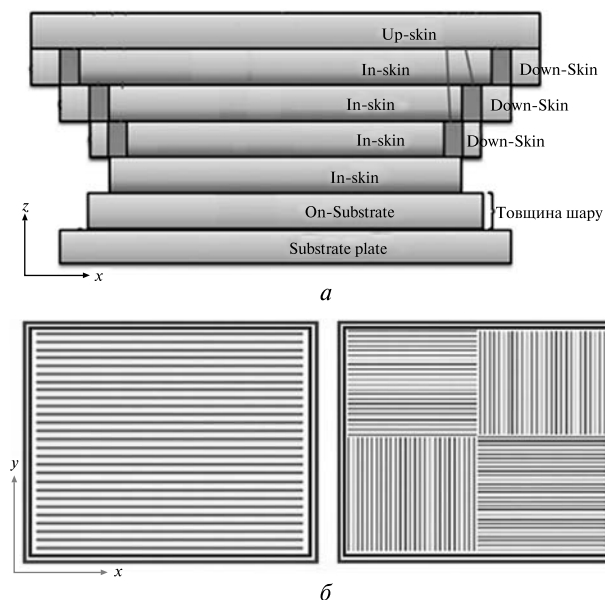


Рис. 3. Формування шарів в напрямку зростання деталі (а), підгрупи треків (б) [3]

виробу [1]. У процесі SLM тепловий градієнт виникає від верхнього шару до попереднього шару, що призводить до того, що зерна мають тенденцію до зростання вздовж напрямку теплового потоку, чим визначається пріоритетний напрям зростання зерна. Таким чином, один напрямок стає основним напрямком росту зерен після затвердіння шару. Тому стратегія лазерного сканування чинить істотний вплив на текстуру виготовленого виробу SLM [9].

Є ряд різних стратегій руху лазерного променя у шарі, який сплавляється (рис. 4) [10, 11].

У дослідженні [12] змінювався напрямок сканування лазера в кожному новому шарі на певний кут відносно попереднього шару на 90°, 105°, 120°, 135°, 150°. Найкращі механічні властивості були у об'єктів, отриманих при куті повороту 105°, коли шари з однаковим напрямком руху лазерного променя повторювалися тільки через 24 шари (рис. 5). У зразка, отриманого при куті 90°, рівень механічних властивостей найменший, однак різниця між властивостями зразків не перевищує 10 %. Крім того, стратегію сканування також рекомендується змінювати для нижніх (біля основи платформи), середніх і

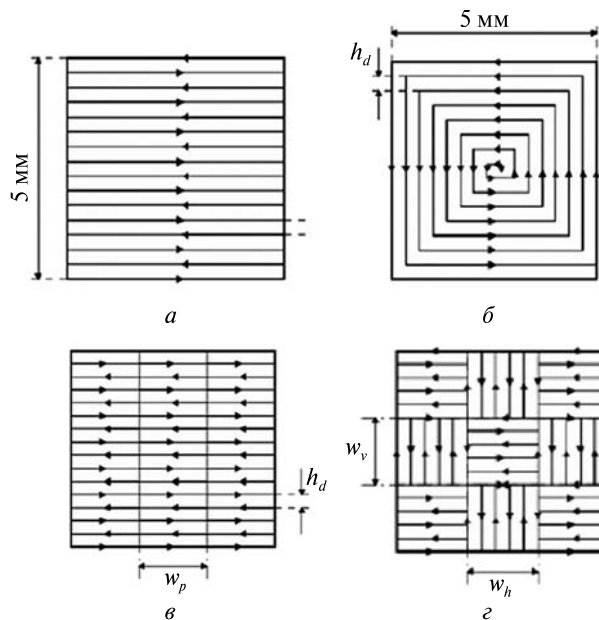


Рис. 4. Види стратегії сканування: а — паралельне сканування, б — спіральне сканування, в — різноспрямоване паралельне сканування, г — сканування у шаховому порядку

90°	105°	120°	135°	150°
Кут між напрямками плавлення шарів				
(4)	(24)	(3)	(8)	(12)

Кількість шарів між однаковими напрямками плавлення

Рис. 5. Стратегія зміни напрямку повороту шарів [12]

Таблиця 1. Постійні параметри друку зразків «Куб на ребрі» (ряд 1 і 2 — прямолінійно з поворотом на 67°, ряд 3 і 4 — у шаховому порядку з поворотом на 67°)

Зона	$d$ , мм	$P$ , Вт
1 і 3 ряд		
in-skin	0.08	80
up-skin	0.05	50
down-skin	0.05	80
2 і 4 ряд		
in-skin	0.08	170
up-skin	0.05	110
down-skin	0.05	110



верхніх шарів, оскільки умови тепловідведення всюди будуть різними.

Деякі особливості геометрії деталей (звисаючі краї, похилі поверхні, тонкі стінки, тонкий профіль, змінний переріз, отвори) вимагають спеціальних умов сканування, наприклад подвійний обхід по контуру тонкого профілю, перерозподіл енергії лазерного випромінювання у пучку, а також, можливо, зміна потужності і швидкості сканування лазерного променя.

Майже всі передові процеси виготовлення деталей, які прагнуть підвищити якість кінцевого виробу, зосереджуються на мінімізації ефектів внутрішніх напружень [13].

Проведено експеримент для вивчення впливу різних стратегій (прямолінійний і шаховий порядок) і режимів процесу на викривлення деталей в результаті впливу залишкових напружень з метою їхньої мінімізації.

Друк проводився на 3D-принтері «Alfa-150» (ТОВ «ALT Україна») при постійних потужності і відстані між треками в кожній зоні (up-skin, down-skin, in -skin) (табл. 1) зі зміною швидкості руху променя лазера (табл. 2), а також різною схемою нарощування зразків способом селективного лазерного плавлення (рис. 6). Кут повороту між шарами становив 67°, таким чином, кількість шарів між однаковими напрямками плавлення дорівнювала 67. Маркування зразків складається з двох цифр, перша з яких позначає ряд, друга — порядковий номер зразка в ряду.

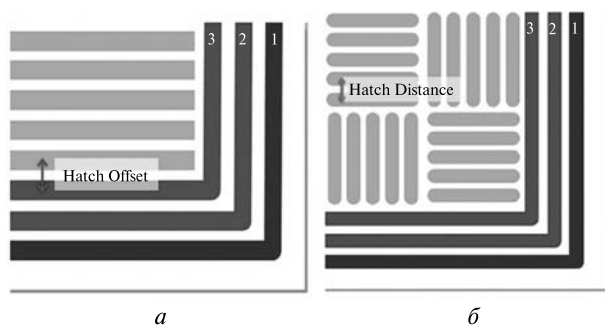


Рис. 6. Стратегія заповнення основного тіла: а — прямолінійний, б — шаховий порядок, 1 — контур, 2, 3 — пост-контур

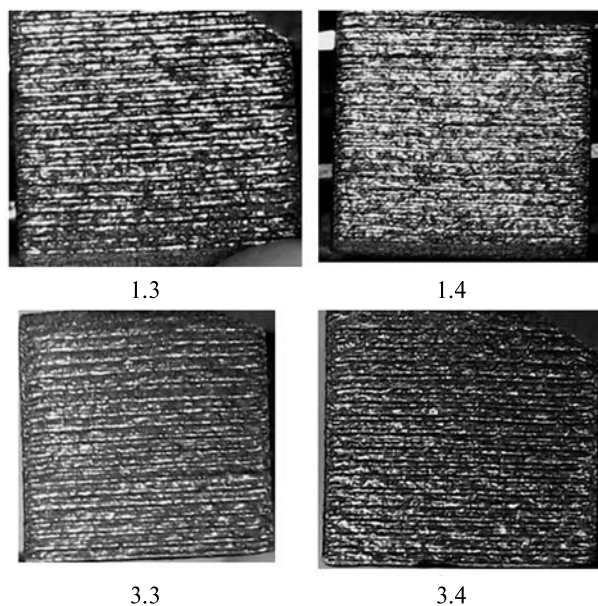


Рис. 7. Down-skin досліджуваних зразків

Таблиця 2. Швидкість сканування при вирощуванні дослідних зразків (прямолінійно з поворотом на 67° / у шаховому порядку з поворотом на 67°)

Зона	V, мм/с				
	1:1/3:1	1:2/3:2	1:3/3:3	1:4/3:4	1:5/3:5
in-skin	750	800	850	900	1000
up-skin	650	750	800	900	950
down-skin	1250	1300	1350	1400	1450
	2:1/4:1	2:2/4:2	2:3/4:3	2:4/4:4	2:5/4:5
in-skin	1350	1400	1500	1600	1650
up-skin	1500	1600	1700	1750	1800
down-skin	1600	1650	1700	1750	1800

При візуально-оптичному контролі області down-skin були відзначені як найкращі зразки з маркуванням 1.3, 1.4, 3.3, 3.4 (рис. 7). Для оцінки вкладу джерела нагрівання використовується щільність питомої енергії (фактор першого порядку), вона дозволяє визначити внесок технологічних параметрів SLM-технології та їхній вплив на матеріал під час плавлення [3]. Для розрахунку щільності питомої енергії використано формулу

$$E = P/(V \cdot d \cdot t), \quad (1)$$

де  $E$ , Дж/мм<sup>3</sup> — щільність питомої енергії;  $P$ , Вт — потужність лазера;  $V$ , мм/с — швидкість сканування лазера;  $d$ , мм — товщина шару;  $t$ , мм — відстань між проходами лазера.

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Було розраховано значення щільності питомої енергії down-skin (табл. 3). Щільність питомої енергії для зазначених дослідних зразків лежали в інтервалі 38...39.5 Дж/мм<sup>3</sup>.

При візуальній оцінці деформації було відзначено, що при прямолінійному порядку друку з

Таблиця 3. Щільність питомої енергії down-skin при друці прямолінійно з поворотом 67° і друці в шаховому порядку з поворотом 67°

Зразок	$E$ , Дж/мм <sup>3</sup>
1.1	42.67
1.2	41.02
1.3	39.51
1.4	38.10
1.5	36.78

Таблиця 4. Щільність питомої енергії in-skin треків основного тіла

Порядок друку	Зразок	$E$ , Дж/мм <sup>3</sup>	Зразок	$E$ , Дж/мм <sup>3</sup>
Прямолінійно з поворотом на 67°	2.1	52.46	2.2	50.59
	4.1	52.46	4.2	50.59

поворотом шару відносно попереднього на 67° (зразки 1.3, 1.4) через напруження відбувається більше викривлення металу в області тонкого краю, ніж при друці в шаховому порядку (зразки 3.3 і 3.4) при тих же режимах (рис. 8).

Розраховані значення щільності питомої енергії in-skin для зразків 2.1, 2.2 і 4.1, 4.2 представлено у табл. 4. Через те що режими (швидкість, потужність і відстань) для зразків були однаковими, то щільність їхньої питомої енергії не чинила вирішального впливу на залишкові напруження, які призводять до викривлення зразків. В результаті експерименту встановлено, що при стратегії побудови зразків у шаховому порядку формуються мінімальні залишкові напруження.

На наступному етапі відпрацювання стратегії побудови треків області контуру досліджували вплив черговості побудови шару. Розглядали два режими: in2out — зсередини назовні (рис.6, заливка in-skin → постконтур → контур) і out2in — ззовні всередину (рис. 6, контур → постконтур → заливка in-skin). Для мінімізації термічних напружень, релаксації залишкових напружень та усунення викривлення металовиробів дослідні зразки виготовляли у режимах зі зниженою щільністю питомої енергії в інтервалі від 22 до 30 Дж/мм<sup>3</sup> з кроком 1.75 Дж/см<sup>3</sup> на контурі зразків.

Слід зазначити, що всі зразки в координатах 1.1—1.5 (in2out) при порівнянні зі зразками 3.1—3.5 (out2in) не мають видимих дефектів. Також було розглянуто області кордонів (вид зверху) для визначення умовної товщини і рівномірності друку контурів (уривчастість, спікання, прилипання порошку), результати візуального оптичного контролю (ВОК) представлено на рис. 7.

Виходячи з отриманих даних, можна зробити висновок, що контури зразків в координатах 1.1—1.5 і 3.1—3.5 мають тонкий неvistупаючий кордон, не переривчастий при збільшенні окуляром, прилипання порошку не спостерігалось.

Друк контуру зразків в координатах 2.1—2.5 і 4.1—4.5 здійснювався при нижчій щільності питомої енергії в діапазоні 16...24 Дж/мм<sup>3</sup> з кроком 2 Дж/мм<sup>3</sup>. В результаті ВОК були відзначені тонкий контур, уривчастість, і велика відстань між

треками основного тіла і треками друку контуру, в даній області можлива висока ймовірність утворення пор через малу щільність питомої енергії і велику відстань між треками контуру і треками основного тіла.

Грунтуючись на ВОК областей контуру, можна зробити висновок, що зразки, надруковані при постійних режимах зі зміною швидкості руху лазера і параметрів побудови треків кордонів (in2out, out2in), ідентичні, не мають видимих відхилень, не мають уривчастості треків і виступів над основним тілом. Показано, що раціональним рівнем щільності питомої енергії для друку цих типів треків є значення  $27 \text{ Дж/мм}^3$ ; для зразків 1.4 і 3.4 щільність питомої енергії дорівнювала  $27.3 \text{ Дж/мм}^3$ .

При відпрацюванні режимів друку кордонів з товщиною шару  $50 \text{ мкм}$  при відстанях між треками  $0.06...0.11 \text{ мм}$  і зі зміною швидкостей пересування лазера від  $700$  до  $1200 \text{ мм/с}$  встановлено, що режим друку контуру зі швидкістю сканування  $1000 \text{ мм/с}$ , потужністю  $100 \text{ Вт}$ , відстанню між треками  $0.08 \text{ мм}$  є раціональним для побудови області контуру.

З метою визначення дефектів і відхилень по геометрії від вихідної моделі в твердому тілі (зразок) був виконаний металографічний аналіз дослідних зразків за допомогою оптичної мікроскопії. Мікроструктуру дослідних зразків, виготовлених з різними параметрами процесу і стратегіями друку, представлено на рис. 9.

У зразках, надрукованих зі стратегією побудови треків в шаховому порядку з поворотом на  $67^\circ$ , спостерігалось менше викривлення, ніж у зразках з прямолінійною стратегією друку з поворотом на  $67^\circ$ . Слід зазначити, що зразки не мають дефектів основного тіла (пористість, висока шорсткість).

Сформована ванна розплаву основного тіла під впливом лазерного променя шляхом плавлення порошкового шару і матеріалу підкладки має рівномірне проплавлення, чітко побудовані треки. В основному ширина і глибина ванн розплаву основного тіла, як правило, більша від діаметра лазерного променя, як представлено на рис. 9. Границі ванни розплаву перебувають у постійному русі і переміщуються слідом

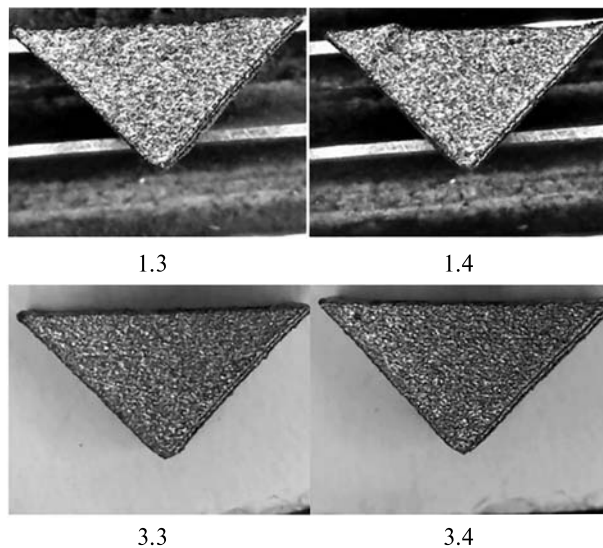


Рис. 8. Візуальна оцінка деформації досліджуваних зразків

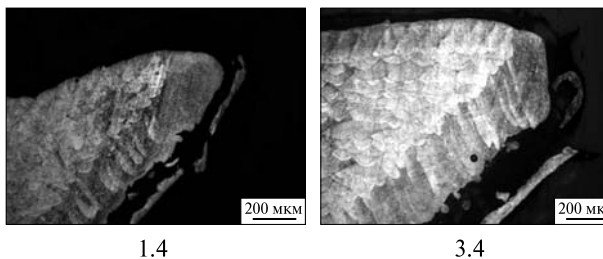


Рис. 9. Дослідження мікроструктури в області тонкого краю

за лазерним променем, внаслідок чого наявне характерне викривлення наступних треків в області контуру під дією термічних напружень і недостатнього відводу тепла. У головній частині ванни розплаву (на яку впливає промінь лазера) відбувається постійне плавлення порошкового шару і матеріалу підкладки — в області контуру це пов'язано з нерівномірним тепловідводом, оскільки у хвостовій частині ванни розплаву відбувається постійна кристалізація розплавленого металу.

Характерна форма і розміри ванн розплаву, що формують мікроструктуру (рис. 9) залежали від таких факторів: величини і співвідношення потужності і швидкості переміщення лазерного променя, товщини шару металевих порошків,

розподілу інтенсивності випромінювання по діаметру лазерного променя.

На закінчення слід зазначити, що глибину, ширину і час перебування металу у розплавленому вигляді визначає кількість теплоти, яка залежить від щільності питомої енергії (фактор першого порядку) — зі збільшенням щільності питомої енергії посилюється гідродинамічна нестабільність. Розподіл інтенсивності випромінювання (фактор другого порядку) по діаметру лазерного променя впливає на геометричні характеристики ванни розплаву через зміну температурного поля за обсягом ванни розплаву і, як наслідок, кінцеву геометрію виробу.

## ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що симуляція процесів друку, виконана на платформі Magics, за допомогою розбивки моделі на воксельну структуру

дає можливість аналітичної оцінки напружень і деформацій, що виникають при різних умовах побудови виробів по SLM-технології без витрат ресурсів.

2. В результаті аналізу зовнішнього вигляду дослідних зразків виготовлених з різними режимами і стратегіями побудови встановлено, що найкращі показники down-skin формуються при потужності 80 Вт і щільності питомої енергії 40...38 Дж/мм<sup>3</sup>.

3. Встановлено, що з використанням стратегії друку в шаховому порядку з поворотом 67° при оптимальній щільності питомої енергії можна мінімізувати залишкові внутрішні напруження, що призводять до викривлення виробу.

4. Встановлено раціональні режими друку треків кордонів: швидкість сканування 1000 мм/с, потужність 100 Вт, відстань між треками 0.08 мм при товщині шару 50 мкм.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Аджамський С. В., Кононенко А. А., Подольський Р. В. *Исследование влияния режимов SLM-процесса на качество в области контура изделий*. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Університетська наука — 2020» (20—21 травня 2020, Маріуполь). Маріуполь, 2020. С. 157—158.
2. Аджамський С. В., Кононенко А. А., Подольський Р. В. *Симуляція впливу остаточних напружень і параметрів SLM-технології на формування області границь изделия из жаропрочного никелевого сплава Inconel 718*. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології у металургії та машинобудуванні» (17—19 березня 2020, Дніпро). Дніпро, 2020, С. 4—6. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2020.01.001>
3. Аджамський С. В., Кононенко А. А. Закономерности влияния параметров процесса выборочного лазерного плавления (SLM) на формирование единичного слоя из жаропрочного никелиевого сплава Inconel 718 [Електронний ресурс]. *Лучевые технологии в сварке и обработке материалов*. 2019. Вип. 9. С. 5—11.
4. Аджамський С. В., Кононенко А. А., Подольський Р. В. *Двумерное моделирование нестационарного температурного поля единичного трека из жаропрочного сплава INCONEL 718*. Матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції «Проблеми математичного моделювання» (27—28 травня 2020, Кам'янське). Кам'янське, 2020. С. 42—45.
5. Parida A. K., Maity K. Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation. *Eng. Sci. and Technol., Int. J.* 2018. **21**. P. 364—370.
6. Criales L. E., Arsoy Y. M., Lane B., et al. Laser powder bed fusion of nickel alloy 625: experimental investigations of effects of process parameters on melt pool size and shape with spatter analysis. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2017. **121**. P. 22—36.
7. Zhouab Y. H., Wanga Y. P., Zhangab Z. H. Selective laser melting of typical metallic materials: An effective process prediction model developed by energy absorption and consumption analysis. *Additive Manufacturing*. 2019. **25**. P. 204—217.
8. Grasso M., Colosimo B. M. Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: A review. *Measurement Science and Technology*. 2017. **28**, P. 1—25.
9. Williams R. J., Piglione A., Ronneberg T., Jones C., Pham M.-S., Davies C. M., Hooper P. A. In situ thermography for laser powder bed fusion: Effects of layertemperature on porosity, microstructure and mechanical properties. *Additive Manufacturing*. 2019. P. 1—14.
10. Shiomi M., Osakada K., Nakamura K., Yamashita T., Abe F. Residual stress within metallic model made by selective laser melting process. *CIRP Annals Manufacturing Technology*. 2004. **53**, № 1. P. 195—198.
11. Wang D. et al. Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2012. № 58. P. 1189—1199.



12. Dilip J. S., Zhang S., Teng C., et al. Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Progress in Additive Manufacturing*. 2017. № 2. P. 157–167. <https://doi.org/10.1007/s40964-017-0030-2>
13. Zheng B. et al. Thermal behavior and microstructure evolution during laser deposition with laser-engineered net shaping: Part II. Experimental investigation and discussion. *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.* 2008. **39**, № 9. P. 2237–2245.

## REFERENCES

1. Adzhamskiy S. V., Kononenko A. A., Podol'skiy R. V. (2020). *Research of the influence of the SLM-process modes on the quality in the area of the product contour*. Materials of the International Science and Technology Conference “University Science-2020” (May 20-21, 2020, Mariupol). Mariupol, 157–158 [in Russian].
2. Adzhamskiy S. V., Kononenko A. A., Podol'skiy R. V. (2020). *Simulation of the influence of residual stresses and parameters of SLM-technology on the formation of the area of product boundaries from the heat-resistant nickel alloy Inconel 718*. Materials of the International Science and Technology Conference “Information Technology metallurgy and machine-building” (17-19 March 2020, Dnipro). Dnipro, 4–6. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2020.01.001> [in Russian]
3. Adzhamskiy S. V., Kononenko A. A. (2019). Regularities of the influence of the parameters of the selective laser melting (SLM) process on the formation of a single layer from the heat-resistant nickel alloy Inconel 718 [Electronic resource]. *Beam technologies in welding and material processing*. 9. 5–11 [in Russian].
4. Adzhamskiy S. V., Kononenko A. A., Podol'skiy R. V. (2020). *Two-dimensional modeling of a non-stationary temperature field of a single track made of heat-resistant alloy INCONEL 718*. Materials of the All-Ukrainian scientific-methodical conference “Problems of mathematical modeling” (May 27-28, 2020, Kam'yanske). Kam'yanske, 42–45 [in Russian].
5. Parida A. K., Maity K. (2018). Comparison the machinability of Inconel 718, Inconel 625 and Monel 400 in hot turning operation. *Eng. Sci. and Technol., Int. J.*, **21**, 364–370 [in English].
6. Criales L. E., Ansoy Y. M., Lane B., et al. (2017). Laser powder bed fusion of nickel alloy 625: experimental investigations of effects of process parameters on melt pool size and shape with spatter analysis. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **121**, 22–36 [in English].
7. Zhouab Y. H., Wanga Y. P., Zhangab Z. H. (2019). Selective laser melting of typical metallic materials: An effective process prediction model developed by energy absorption and consumption analysis. *Additive Manufacturing*, **25**, 204–217 [in English].
8. Grasso M., Colosimo B. M. (2017). Process defects and in situ monitoring methods in metal powder bed fusion: a review. *Measurement Sci. and Technol.*, **28**, 1–25 [in English].
9. Williams R. J., Piglione A., Rønneberg T., Jones C., Pham M.-S., Davies C. M., Hooper P. A. (2019). In situ thermography for laser powder bed fusion: Effects of layer temperature on porosity, microstructure and mechanical properties. *Additive Manufacturing*, 1–14 [in English].
10. Shiomi M., Osakada K., Nakamura K., Yamashita T., Abe F. (2004). Residual stress within metallic model made by selective laser melting process. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, **53** (1), 195–198 [in English].
11. Wang D. et al. (2012). Study on energy input and its influences on single-track, multi-track, and multi-layer in SLM. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, № 58, 1189–1199 [in English].
12. Dilip J. S., Zhang S., Teng C., et al (2017). Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, porosity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Progress in Additive Manufacturing*, № 2, 157–167 [in English]. <https://doi.org/10.1007/s40964-017-0030-2>
13. Zheng B. et al. (2008). Thermal behavior and microstructure evolution during laser deposition with laser-engineered net shaping: Part II. Experimental investigation and discussion. *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, **39** (9), 2237–2245 [in English].

Стаття надійшла до редакції 21.12.2020  
 Після доопрацювання 21.06.2021  
 Прийнято до друку 16.12.2021

Received 21.12.2020  
 Revised 21.06.2021  
 Accepted 16.12.2021

S. V. Adzhamskiy<sup>1,2</sup>, Postgraduate Student, Technical Director  
ORCID 0000-0002-6095-8646

E-mail: as@alt-print.com

G. A. Kononenko<sup>2,3</sup>, Ph.D. in Tech., Scientific Secretary  
ORCID 0000-0001-7446-4105

E-mail: perlit@ua.fm

R. V. Podolskiy<sup>2,3,4</sup>, Master of Science Student, Engineer  
ORCID 0000-0002-0288-0641

E-mail: rostislavpodolskij@gmail.com

<sup>1</sup> Oles Honchar Dnipro National University

72, Gagarin Ave., Dnipro, 49010 Ukraine

<sup>2</sup> LLC «Additive Laser Technology of Ukraine»

31, Serhiy Podolinsky Street, Dnipro, 49000 Ukraine

<sup>3</sup> Iron and Steel Institute of Z.I.Nekrasov, National Academy of Sciences of Ukraine

1, Academician Starodubov Sq., Dnipro, 49107 Ukraine

<sup>4</sup> National Metallurgical Academy of Ukraine

4, Gagarin Ave., Dnipro, 49000 Ukraine

#### INFLUENCE OF SLM-PROCESS PARAMETERS ON THE FORMATION OF THE BOUNDARIES OF PARTS OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY INCONEL 718

We consider the improvement is considered of the modes of selective laser melting technology based on the design model to reduce the level of residual stresses and prevent deviations in the geometry of the part. Simulation results are presented on a universal voxel structure and a simplified object to predict metal behaviour depending on the specific energy density in the region of the boundaries of a metal part made of Inconel 718. An experiment was carried out to study the influence of different strategies and process modes on the curvature of parts as a result of the effect of residual stresses in order to minimize them. Printing was carried out on a 3-D printer “Alfa-150” (LLC “ALT Ukraine”) at constant power and distance between tracks in each zone (up-skin, down-skin, in-skin) with a change in the speed of the laser beam movement, as well as a different pattern of sample growth by 3-D printing with 67 degrees rotation of each new layer relative to the previous one. To identify defects and deviations from the original model to the solid (sample), metallographic analysis was performed using optical microscopy (Carl Zeiss AXIOVERT 200M). It was found that the simulation of printing processes, performed on the Magics platform by breaking the model into a voxel structure, allows an analytical assessment of stresses and strains. Analysis of the appearance of the prototypes showed that the best down-skin indicators are formed at a power of 80 W and a specific energy density (40...38 J/mm<sup>3</sup>). By using the 67 degrees staggered printing strategy at the optimum specific energy density, it is possible to minimize the residual internal stresses leading to distortion of the product. In the future, the results can be supplemented by studies of the effect of residual stresses of compressive forces when exposed to a laser beam at constant applied power. Using a computational model that allows calculating the residual stresses during the deposition of the next layer, depending on the speed of the laser, the power and the distance between the applied tracks, it is possible to obtain high-precision parts with specified properties. The adaptation of the model, which allows us to obtain a quantitative estimate of the residual thermal stresses depending on the speed of movement and the laser power for the Inconel 718 heat-resistant alloy, has been carried out. Optimal modes have been determined to minimize these stresses and reduce the curvature of the part.

**Keywords:** residual stresses, selective laser melting, Inconel 718, compression force, laser