

© З.В. Сазанішвілі<sup>1</sup>, І.В. Вернер<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ НА ЯКІСТЬ ВИРОБІВ

© Z. Sazanishvili<sup>1</sup>, I. Verner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## INFLUENCE OF PARAMETERS OF MOLDING BY THE SELECTIVE LASER MELTING METHOD ON PRODUCT QUALITY

**Мета.** Розвиток і застосування адитивних технологій, які мають високий показник використання матеріалу і значної гнучкості виробництва у разі одиничного і дрібносерійного виробництва є актуальними для вирішення різного класу інженерних задач. На кінцеві механічні, технологічні і експлуатаційні характеристики виробів, одержаних за адитивними технологіями впливає велика кількість вихідних параметрів, які можна варіювати задля отримання необхідних властивостей матеріалу. Метою даної роботи встановлено вивчення впливу параметрів формоутворення методом селективного лазерного плавлення, зокрема плану сканування, на якість матеріалу і продуктивність виготовлення.

**Методика.** Для досягнення мети методом оптичної мікроскопії проводилися дослідження мікроструктури виробів, одержаних за різних планів сканування, під час яких аналізували форму одиничного треку, а також структуру матеріалу у різних напрямках руху лазерного променя.

**Результати.** Проаналізовано вплив розміру часток, механізм формування металевго виробу під час селективного лазерного плавлення. Показано вплив плану сканування на пористість, міцність і продуктивність виготовлення методом селективного лазерного плавлення. Правильний вибір технологічних параметрів, таких як потужність і швидкість переміщення лазерного променя, товщина шару металевго порошку, крок сканування між двома сусідніми одиничними треками, забезпечує мінімізацію числа і розмірів дефектів (пір, тріщин, раковин) в матеріалі виробу.

**Наукова новизна.** Проаналізовано процес плавлення металевго порошку у процесі формоутворення виробів методом селективного лазерного плавлення. Отримано схему формування одиничного треку у разі вибору різних схем сканування. Сформовано перелік технологічних параметрів, варіювання яких впливає на властивості та якість виробу.

**Практична значимість.** Застосування адитивних технологій для формоутворення виробів в одиничному і дрібносерійному виробництві дозволяє скоротити час підготовки виробництва і знизити кількість відходів. Під час вибору технологічних параметрів слід розуміти їх залежність на кінцеві властивості готового виробу, бо метод селективного лазерного плавлення дозволяє отримати вироби різної пористості, міцності та інших властивостей.

**Ключові слова:** адитивні технології, розмір часток порошку, одиничний трек, план сканування, потужність лазерного променя.

**Вступ.** Під час виготовлення виробів в одиничному та дрібносерійному виробництві на сучасних підприємствах досліджується формоутворення деталей методами адитивних технологій, що дозволяє значно скоротити номенклатуру

додаткових технологічних пристосувань та форм, а також масу відходів. Серед широкого спектру адитивних технологій для виготовлення металевих виробів слід виокремити селективне лазерне плавлення (СЛП). Під час формоутворення методом СЛП на структуру та властивості одержуваних виробів впливає велика кількість вихідних параметрів, серед яких можна виділити: властивості порошку, показники лазера, атмосфера робочої зони, технологічні режими, робочий стіл та ін. Для управління технологічним процесом необхідно розуміти закономірність впливу того чи іншого параметра на кінцевий результат.

Серед дефектів у виробках, отриманих методом СЛП найчастіше зустрічаються пористість, непролави або частково розплавлені частинки порошку, розшарування і непровари між сусідніми проходами лазера або поточним і попереднім шарами. Ці дефекти впливають на механічні властивості (пластичність, міцність та ін.). Для отримання якісних виробів необхідно підбирати параметри виготовлення таким чином, щоб забезпечити суцільність металу в процесі друку.

Зараз досліджень залежності параметрів технології друку стосовно властивості і структури виробів дуже мало і результати досліджень не дають конкретних рекомендацій по отриманій структурі в залежності від обраних режимів друку [1–3]. Для розуміння, якими параметрами можна варіювати, необхідно розуміти, складові технологічної системи машини адитивного виробництва.

Технологічна система СЛП характеризується наступними параметрами елементів [4]:

1) лазер: довжина хвилі; профіль пучка; імпульсний або безперервний режим роботи; діаметр лазерної плями в фокусі;

2) атмосфера: інертний, окислювальний або відновлювальний склад; теплопровідність; енергія іонізації; прозорість;

3) робочий стіл: теплофізичні властивості матеріалу; температура підігріву; шорсткість поверхні;

4) порошок: фізичні властивості (форма частинок, розмір частинок, ступінь окислення, розподіл розміру часток); термічні властивості (прихована теплота плавлення, теплопровідність, питома теплоємність; теплове розширення, температура плавлення); хімічні властивості (хімічний розчинник, ентальпія реакції); металургійні властивості (активність (потенціал окислення), склад сплаву; коефіцієнт дифузії; коефіцієнт ліквідації); оптичні властивості (відображення, поглинання); механічні властивості (модуль пружності межа міцності, межа текучості); реологічні властивості розплавленого металу (в'язкість; поверхневий натяг).

**Основна частина.** Одним із факторів, що впливають на якість деталі є якість металевих порошків та його характеристики. За розмірами частинок  $d_p$  металеві порошки дуже умовно можна класифікувати [5]:

- нанодисперсні ( $d_p < 0,01$  мкм);
- ультрадисперсні ( $d_p = 0,01 \dots 0,1$  мкм);
- високодисперсні ( $d_p = 0,1 \dots 10$  мкм);
- дрібні ( $d_p = 10 \dots 40$  мкм);
- середні ( $d_p = 40 \dots 250$  мкм);
- великі ( $d_p = 250 \dots 1000$  мкм).

Розміри частинок металевого порошку варіюються в значних межах, тому в технологічних процесах, що реалізуються на конкретному обладнанні, використовуються порошки певного фракційного складу. Порошок характеризується діапазоном мінімального або максимального значення розміру частинок, наприклад,  $d_c = 10 \dots 50$  мкм. Так само розмір порошку може бути заданий середнім діаметром частинок порошку, наприклад,  $d_c = 30$  мкм. Величина  $d_c$ , безпосередньо впливає на технологічні параметри і, як наслідок, на якість готового виробу, а саме: чим менше  $d_c$ , тим менше крок сканування може бути заданий, тим більш рельєфно можуть бути опрацьовані малорозмірні елементи виробу і тим кращу шорсткість поверхонь можна отримати. При цьому в зону плями лазера миттєво вводиться велика кількість енергії, тому відбувається розприскування рідкого розплаву, що призводить до підвищення шорсткості поверхонь виробу і до пористості матеріалу. Тому при використанні дрібнодисперсного порошку застосовують лазери малої потужності, що призводить до різкого зменшення продуктивності. Таким чином, для забезпечення високої якості матеріалу і високої геометричної точності виробу необхідно відповідність потужності лазерного променя і фракційного складу металевого порошку. Також необхідним є забезпечення компактної укладки частинок, що має найкращий ефект за умови їх сферичної форми. Проте, під час проходження лазера порошок плавиться не тільки в зоні розплаву, а захоплює сусідні частинки, які під дією температури можуть змінювати свою форму. Технологія СЛП дозволяє повторно використовувати порошок, який залишився не використаним після попередньої побудови. Тому повторюваність властивостей виготовлених деталей забезпечується контролем повторно використовуваного порошку.

Для формування технології друку необхідно проаналізувати процес плавлення металевого порошку лазерним променем і формування одиничного треку. Ванна рідкого металу при плавленні порошку (рис. 1) має характерну форму, витягнуту в напрямку руху лазерного променя. В головній частині ванни розташований парогазовий канал або кратер. На передній стінці каналу відбувається плавлення металу, утворений при цьому шар розплавленого металу відчуває постійні пульсації, спостерігається характерне викривлення передньої стінки парогазового каналу у вигляді сходинки, яка періодично переміщується по висоті каналу. Переміщення розплавленого металу з передньої стінки відбувається при русі сходинки зверху вниз. Перенесення розплавленого металу з головної частини ванни в хвостову частину відбувається по боковим стінкам в горизонтальному напрямку. У хвостовій частині ванни розплавлений метал піднімається вгору і поступово твердіє. При утворенні парогазового каналу над поверхнею металу з'являється плазмовий факел, що складається з продуктів випаровування, які викидаються з ванни, дрібних крапель металу і з частинок конденсованої пари.

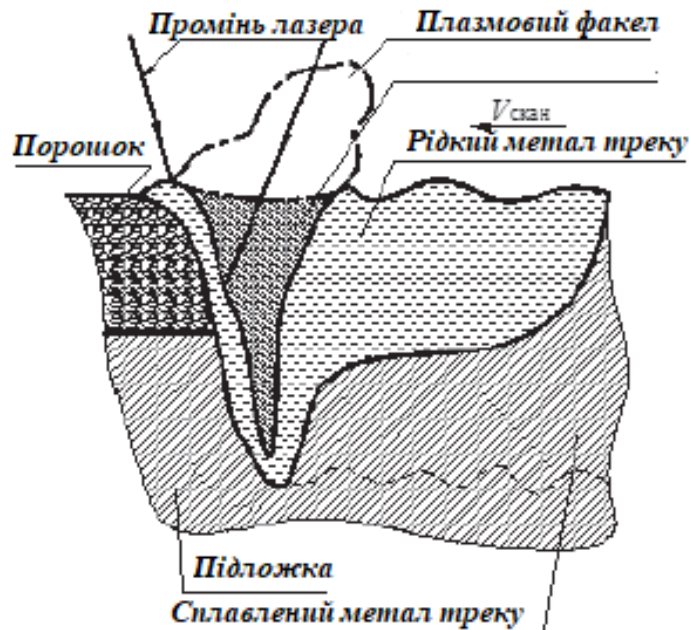


Рис. 1. Ванна рідкого металу при сплавленні частинок порошку лазерним променем

При значній швидкості руху лазерного променя плазмовий факел відхиляється на  $20-60^\circ$  в сторону, протилежну напрямку переміщення лазерного променя. Цей факел поглинає частину енергії лазерного променя і знижує його проплавляючу здатність. Після затвердіння металу формується одиничний трек, який характеризується геометричними параметрами (рис. 2), що залежать від природи металу, яка обумовлює глибину проплавлення підкладки, ширину і висоту треку. Одиничний трек є основним елементом структури матеріалу виробу, тому істотно впливає на монолітність матеріалу. За геометричними параметрами одиничного треку вибирають план сканування лазерним променем шару металевого порошку [6]. Таким чином, одиничний трек є структурною одиницею, яка визначає план сканування кожного шару при формуванні виробу методом СЛП.

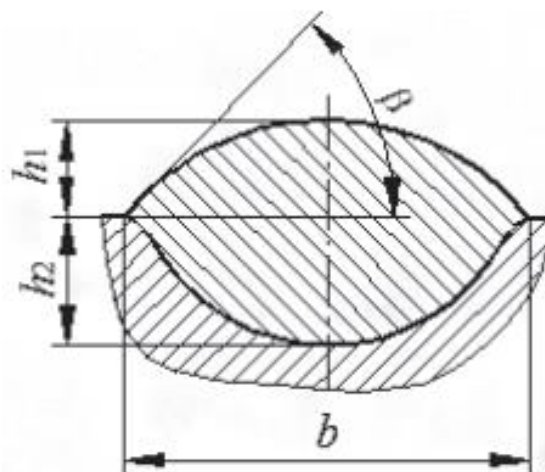


Рис. 2. Геометричні характеристики одиничного треку ( $h_1$  – висота треку над підкладкою;  $h_2$  – глибина проплавлення підкладки;  $b$  – ширина одиничного треку;  $\beta$  – кут змочування підкладки розплавом)

Основним регульованим фактором контролю якості деталі є вибір плану сканування. В залежності руху лазерного променя в шарі під час сканування, плани можна розділити на дві групи – це однопрохідні і двопрохідні.

Однопрохідний план з великим кроком сканування (рис. 3, а) характеризується тим, що крок сканування  $h$  більше або дорівнює ширині одиничного треку  $b$ . Монолітність матеріалу виробу, отриманого за даним планом, буде дуже низькою, а пористість найвищою. такий план руху лазерного променя застосовують при формуванні виробів з низькими показниками міцності. Продуктивність однопрохідного плану з великим кроком сканування максимальна.

Однопрохідний план з малим кроком сканування (рис. 3, б) характеризується тим, що крок сканування  $h$  менше ширини одиничного треку  $b$ . У порівнянні з однопрохідним планом з більшим кроком сканування при даному плані сканування лазерного променя монолітність матеріалу виробу і його міцність дещо зростають, пористість зменшується, а продуктивність знижується.

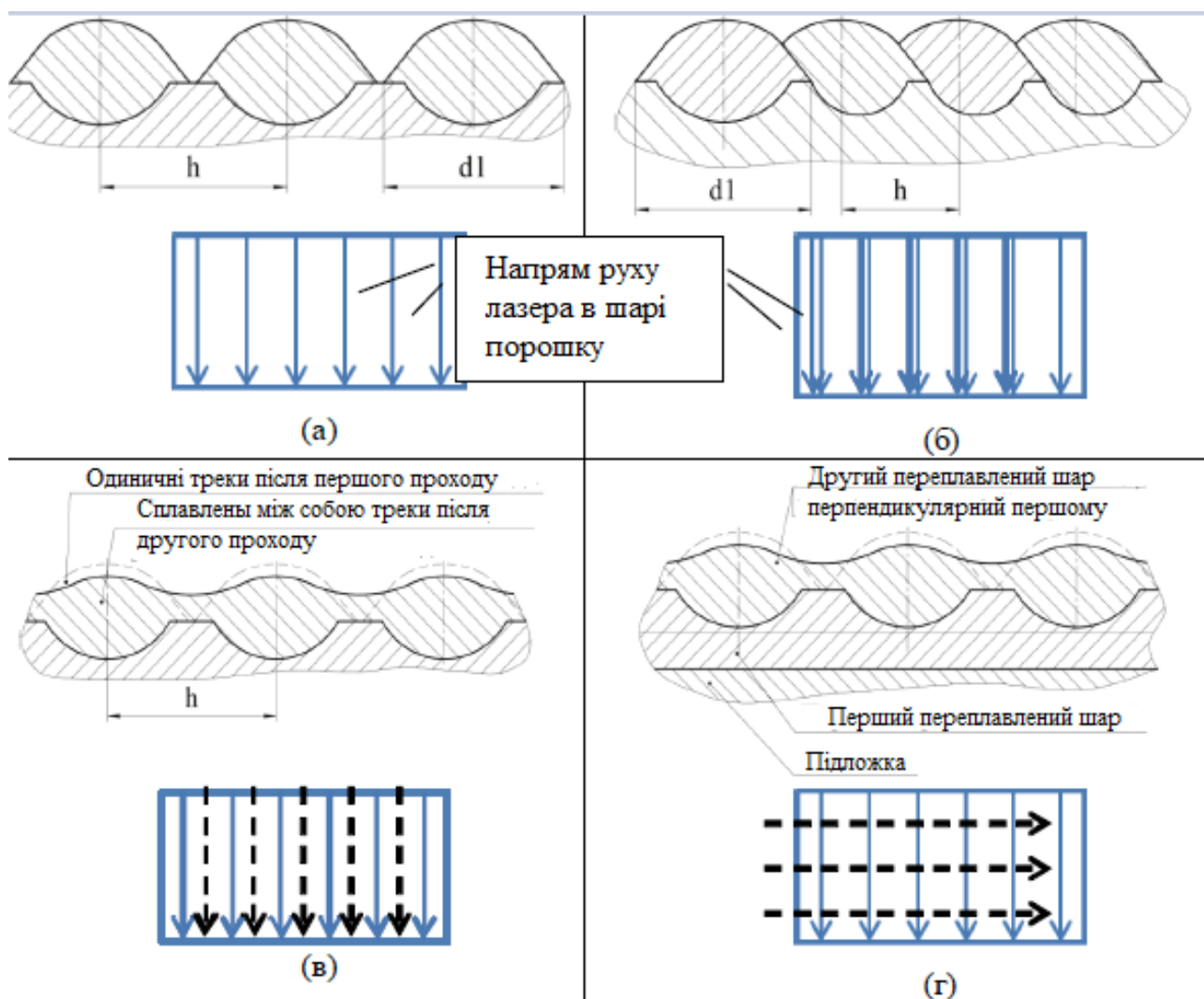


Рис. 3. Стратегії обробки шару порошку лазерним променем

Двопрохідний план з паралельним скануванням (рис. 3, в) характеризується тим, що кожен шар порошкового матеріалу обробляється в два етапи. На

першому етапі крок сканування  $h$  дорівнює ширині одиничного треку  $b$  ( $h = b$ ). На другому етапі лазерний промінь проходить між сусідніми вже переплавленими одиничними треками, сплавляючи два треки між собою. При двопрхідному плані з паралельним скануванням монолітність матеріалу виробу і його міцність дуже високі, пористість мінімальна, а продуктивність мала.

Двопрхідний план з перпендикулярним скануванням (рис. 3, г) характеризується тим, що кожен шар порошкового матеріалу обробляється в два етапи. На першому етапі крок сканування  $h$  дорівнює ширині одиничного треку  $b$  ( $h = b$ ). На другому етапі лазерний промінь проходить перпендикулярно одиничним трекам, отриманим на першому етапі, сплавляючи треки між собою. Кроки сканування на першому і другому етапах рівні. При двопрхідному плані з перпендикулярним скануванням монолітність матеріалу виробу і його міцність максимальні. Пористість матеріалу мінімальна і не перевищує 1%. Продуктивність даного плану сканування найменша. Перевагою двопрхідного плану з перпендикулярним скануванням є відсутність періодичної хвильової структури поверхонь, яка спостерігається при розглянутих вище планах сканування, що забезпечує низьку шорсткість поверхонь виробу і високу точність його розмірів.

Хід лазерного променя безпосередньо впливає на структуру матеріалу (рис. 4). Рациональний вибір технологічного режиму СЛП, в тому числі параметрів плану сканування, забезпечує поєднання достатньої якості виробу при прийнятній продуктивності процесу формування.

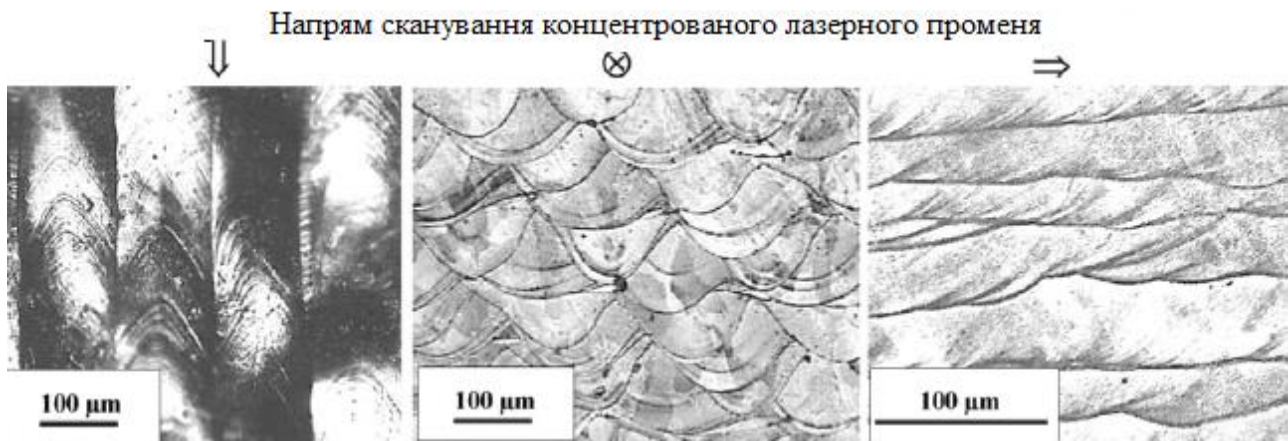


Рис. 4. Мікроструктура зразків виробів, виготовлених за допомогою методу селективного лазерного плавлення

Перед безпосереднім формуванням конкретного виробу проводять пошук раціонального режиму шляхом варіювання основних параметрів, що впливають на якість виробу, а саме: потужність лазерного випромінювання; швидкість сканування; розмір часток порошку, товщина шару порошку. Критерієм для вибору параметрів технологічного режиму є формування стабільних, бездефектних одиничних треків, що мають правильну геометричну форму. Матеріал виробу, одержуваного методом СЛП, є сукупністю одиничних треків. Якість готового виробу складається з якості кожного треку, тому налагодження технологічного

режиму ведуть експериментально на одиничних треках. Проводячи параметричний аналіз, можна отримати залежності якості одиничного треку від параметрів процесу плавлення. Наприклад, формування стабільних треків в залежності від швидкості сканування і потужності лазерного випромінювання представлені на рис. 5.

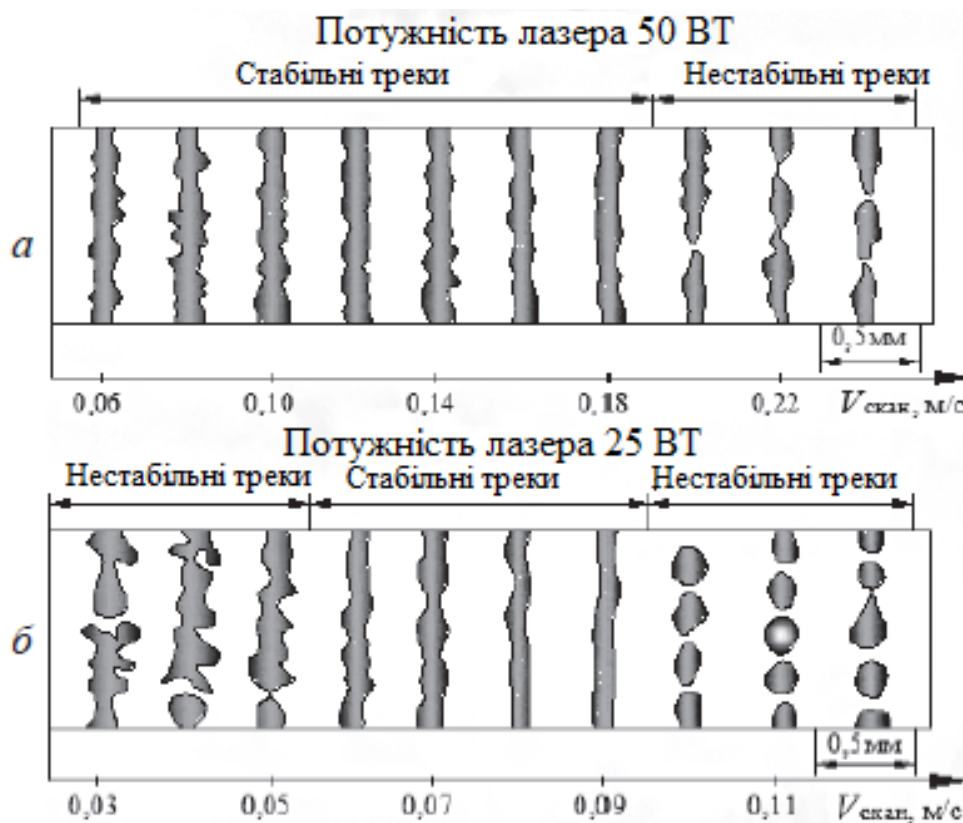


Рис.5. Результати дослідження по визначенню оптимальних параметрів

Як правило, в процесі формування матеріалу і геометрії виробу методом СЛП відхилення основних параметрів від оптимальних значень може бути дуже великим, тому оптимальний технологічний режим не може в повній мірі забезпечити постійну якість формування одиничних треків в процесі виготовлення виробу. Причиною виникнення цих відхилень є безліч факторів, які впливають на параметри і тривалість виготовлення виробу. Ще великі відхилення виникають при виготовленні партії ідентичних виробів. Таким чином, для підтримки якості на прийнятному рівні потрібен постійний контроль рівня технологічних параметрів і стану зони лазерної обробки (зони формування треку).

**Висновки.** Під час вибору параметрів технологічного режиму СЛП, можна регулювати якість і властивості формованого виробу, отримуючи необхідну продуктивність технологічного процесу. Правильний вибір технологічних параметрів, таких як потужність і швидкість переміщення лазерного променя, товщина шару металевих порошків, крок сканування між двома сусідніми одиничними треками, забезпечує мінімізацію числа і розмірів дефектів (пір, тріщин, раковин) в матеріалі виробу.

### Перелік посилань

1. Yadroitsev, I., Krakhmalev, P., Yadroitsava, I., Johansson, S., & Smurov, I. (2013). Energy input effect on morphology and microstructure of selective laser melting single track from metallic powder. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(4). 606–613.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.11.014>
2. Yadroitsev, I., Bertrand, P., & Smurov, I. (2007). Parametric analysis of the selective laser melting process. *Applied surface science*, 253(19). 8064–8069.  
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.02.088>
3. Gusarov, A. V., Yadroitsev, I., Bertrand, P., & Smurov, I. (2009). Model of radiation and heat transfer in laser-powder interaction zone at selective laser melting. *Journal of heat transfer*, 131(7), 072101.  
<https://doi.org/10.1115/1.3109245>
4. Klocke, F., Wagner, C., & Ader, C. (2003). Development of an integrated model for selective laser sintering. *Proc. 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. June 3–5, Saarbrücken, Germany*. 387–392.
5. Yadroitsev, I. (2009). *Selective laser melting: Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders*. LAP Lambert Academic Publishing.
6. Matilainen, V., Piili, H., Salminen, A., Syvänen, T., & Nyhnilä, O. (2014). Characterization of Process Efficiency Improvement in Laser Additive Manufacturing. *Physics Procedia*, 56, 317–326.  
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.177>

### ABSTRACT

**Purpose.** The development and application of additive technologies, which have a high rate of material utilization and significant production flexibility in the case of single and small-scale production, are relevant for solving various types of engineering problems. The final mechanical, technological and operational characteristics of products obtained by additive technologies are affected by a large number of initial parameters that can be varied in order to obtain the necessary properties of the material. The purpose of this work is to study the influence of the parameters of shape formation by the method of selective laser melting, in particular the scanning plan, on the quality of the material and the productivity of production.

**The methods.** To achieve the goal, studies of the microstructure of products obtained by different scanning plans were carried out using optical microscopy, during which the shape of a single track, as well as the structure of the material in different directions of the laser beam, were analyzed.

**Findings.** The effect of particle size, the mechanism of formation of a metal product during selective laser melting is analyzed. The influence of the scanning plan on the porosity, strength, and productivity of manufacturing by the method of selective laser melting is shown. The correct choice of technological parameters, such as the power and speed of the laser beam, the thickness of the metal powder layer, the scanning step between two adjacent single tracks, ensures the minimization of the number and size of defects (pores, cracks, shells) in the product material.

**The originality.** The process of metal powder melting in the process of shaping products by the method of selective laser melting is analyzed. The scheme of formation of a single track is obtained in the case of choosing different scanning schemes. A list of technological parameters, the variation of which affects the properties and quality of the product, has been formed.

**Practical implementation.** The use of additive technologies for the molding of products in single and small-batch production allows to reduce the time of production preparation and reduce the amount of waste. When choosing technological parameters, one should understand their dependence on the final properties of the finished product, because the method of selective laser melting allows to obtain products of different porosity, strength and other properties.

**Keywords:** additive technologies, powder particle size, single track, scan plan, laser beam power.