

doi: 10.32620/oikit.2020.89.04

УДК 629.7.02

В. Є. Зайцев*, А. С. Полупан

Вибір параметрів процесу селективного лазерного плавлення для металевих порошків

**Харківський технологічний університет «ШАГ»
Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

Розглянуто питання визначення оптимальних параметрів процесу селективного лазерного плавлення (СЛП) з метою розроблення технології виробництва елементів конструкції літаків із титанових сплавів. Зазначено переваги титанових сплавів, які мають більш високу питому міцність і корозійну стійкість порівняно з більшістю сталей і алюмінієвих сплавів. Визначено, що традиційні способи формоутворення деталей з титану призводять до великої кількості відходів матеріалу, високої вартості виробництва і тривалого терміну виробництва. Зауважено, що технологія СЛП, дає можливість створювати складні за геометрією деталі з титанових сплавів. Крім того, акцентовано увагу на тому, що титановий сплав Ti-6Al-4V є найбільш популярним титановим сплавом, який використовують в авіабудуванні. В даній роботі описано процес СЛП і приведений перелік параметрів, які впливають на побудову й остаточні властивості матеріалу. Основну увагу приділено основним параметрам СЛП: густині енергії, температурі процесу (температурі будівельної платформи), умовам середовища, властивостям матеріалу та стратегії сканування. Зазначено вплив перелічених параметрів процесу СЛП на якість виробництва та терміни виготовлення. Знаходження оптимальних значень параметрів процесу СЛП є важливим етапом створення деталі, що виготовляють задля отримання пріоритетних механічних показників. Використання під час процесу захисної атмосфери, заповнюючи робоче середовище інертним газом (азот, аргон і гелій) для запобігання окисленню значно впливає на процес, кінцеві механічні властивості і мікроструктуру вироблених деталей. Для виготовлення якісної продукції важливо, щоб металевий порошок мав сферичну форму зерна і розмір, що не перевищує товщину одного нанесеного шару. Температура будівельної платформи повинна варіюватися в залежності від бажаних механічних властивостей кінцевого виробу. Змінні параметри процесу (стратегія сканування, параметри лазера) впливають на тепловий баланс, продуктивність, геометричну точність пористості, що впливає на механічні властивості і мікроструктуру. Даний аналіз іноземного досвіду та майбутні дослідження дозволять у подальшому вдосконалити технологію виробництва елементів конструкції літаків.

Ключові слова: селективне лазерне плавлення; титанові сплави; адитивні технології; параметри процесу; властивості матеріалу; стратегія сканування; параметри лазера; умови середовища; температура процесу; технологія виробництва.

Вступ

Протягом багатьох років аерокосмічна промисловість відігравала визначальну роль в розробленні та застосуванні нових матеріалів. Поточний попит на зниження витрати палива в поєднанні з високими стандартами якості виробництва спонукає сектор аерокосмічного машинобудування розробляти нові матеріали, які можуть одночасно привести до значної економії ваги і витримати складні умови, залишаючись при цьому простими у виготовленні.

Матеріали, використовувані в аерокосмічній промисловості, повинні мати ряд властивостей залежно від застосування. До таких властивостей відносяться: низька густина, стійкість до високих температур і окрихчування при низьких температурах, висока корозійна стійкість і низьке теплове розширення. Порівняно з більшістю сталей і алюмінієвих сплавів титанові сплави мають більш високу

питому міцність і корозійну стійкість. Титанові сплави знаходять все більше застосування на сучасних літаках; вони мають більш високу температурну стабільність, ніж алюмінієві сплави, і вдвічі менше ваги більшості сталей, на додаток до високого показника втомної міцності, опору поширенню тріщин і в'язкості руйнування [1].

Традиційне виробництво виробів з титанових сплавів засноване на куванні, литті і прокатці з наступною механічною обробкою до остаточної форми і розмірів. Ці традиційні виробничі процеси завжди неминуче призводять до великої кількості відходів матеріалу, високої вартості виробництва і тривалого терміну виробництва. В таких умовах адитивні технології (АТ), зокрема селективне лазерне плавлення, передова виробнича технологія виробництва, безпосередньо з CAD-моделей шляхом додавання матеріалів пошарово, дозволяє виготовляти геометрично складні деталі з титанових сплавів [2].

Для виготовлення деталей методом селективного лазерного плавлення може використовуватися ряд титанових порошків. Серед різних марок титанових сплавів Ti-6Al-4V є найбільш популярним і знаходить своє широке застосування в аерокосмічній промисловості. Цей α/β -сплав має гарну комбінацією механічних властивостей, широкий температурний діапазон для обробки і добре зварюється [1]. Тому розроблення технологічного процесу отримання деталей елементів конструкції літальних апаратів з титанового сплаву методом селективного лазерного плавлення є актуальним науково-технічним завданням.

Метою даної роботи є проведення аналізу параметрів процесу селективного лазерного плавлення металічних порошків на прикладі іноземного досвіду, і визначення їх оптимальних значень для виготовлення якісних кінцевих виробів з визначеними механічними властивостями, що в подальшому дозволить удосконалити технологію виробництва елементів конструкції літаків.

Процес селективного лазерного плавлення

СЛП – це процес плавлення в порошковому шарі, який використовує енергію лазерного променя для розплавлення частинок металевих порошків в рідкій ванні, яка швидко твердне, об'єднуючи матеріал і утворюючи компонент. Компонент будується шляхом сканування лазерної плями за бажаної площі поперечного перерізу компонента в порошковому шарі. Цей процес об'єднує матеріал шар за шаром до тих пір, поки не буде досягнута задана геометрія компонента [3].

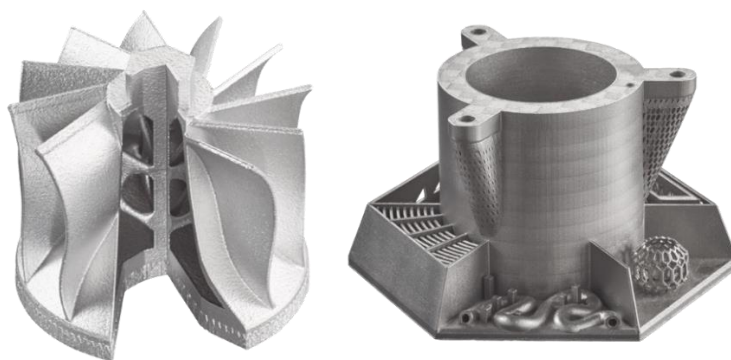


Рис. 1. Приклад готових виробів, виготовлених методом СЛП [4]

На рисунку 1 показані титанові вироби, виготовлені методом СЛП. Конструкція цих виробів вказує на топологічну оптимізовану геометрію, яка досяжна за допомогою процесів СЛП.

Процес виготовлення починається з нанесення шару порошку за допомогою ролика. Потім лазерний промінь, що направляється скануючим дзеркалом, починає переміщення і розплавляє частки порошку, згідно з тривимірною моделлю CAD утворюючи крихітну ванну розплаву. Після цього лазер рухається вперед, щоб розплавити наступні частки порошку. У процесі затвердіння плавильна ванна об'єднується з навколишнім середовищем. Після сканування певної області ролик наносить порошок на оброблений шар. Далі стіл опускається на висоту шару за допомогою будівельного поршня і процес триває аналогічним чином, поки не буде закінчено вирощування деталі [5].

Після закінчення процесу виготовлення неспечений порошок видаляють. Особливістю процесу є те, що під час виготовлення виріб занурений в неспечений порошок, який служить опорою для частин деталі, що спрощує створення тонких стінок, перегородок і нависаючих ділянок [3].

У зоні впливу поряд з навколишнім середовищем виникають кілька теплових і фізичних зон, і ці зони мають великий вплив на характер фізичної поведінки матеріалів. Механічні властивості, а також якість виробу безпосередньо залежать від цієї фізичної поведінки матеріалів, якою можна керувати за допомогою параметрів оброблення. Тепло передається за рахунок теплопровідності, конвекції, випромінювання і тепла, що забирається випаровуванням металу із зони впливу в навколишнє середовище як показано на рисунку 2, що також впливає на фізичну поведінку, а також на мікроструктурне фазове перетворення деталі.

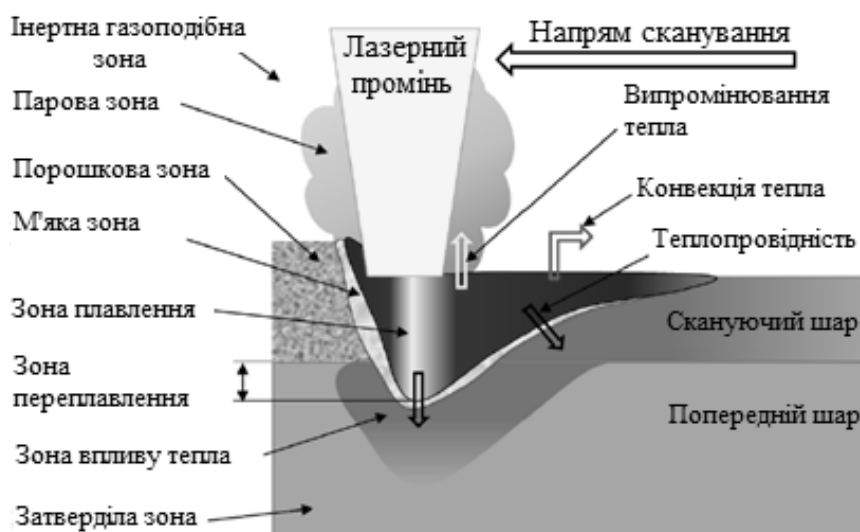


Рис. 2. Схематична модель теплових і фізичних зон у технології СЛП [5]

Параметри процесу селективного лазерного плавлення

Процес СЛП контролюється різними параметрами оброблення, такими, як потужність лазера P , швидкість сканування v , товщина шару t і крок штрихування h . Ці параметри визначають густину енергії процесу як [6]:

$$E = \frac{P}{vth}. \quad (1)$$

Ефект від збільшення потужності полягає в тому, що плавлення відбувається на більш високих швидкостях і на більшій глибині проникнення тепла. Зі збільшенням швидкості сканування, зменшується час нагріву та, відповідно, при даній потужності лазера зменшується час для розсіювання тепла в сторони, що сприяє звуженню областей плавлення та зони термічного впливу [7].

Також варто зазначити важливість фокусування лазерного випромінювання. Як зазначено у дослідженні [8] доцільно забезпечувати збіжний пучок лазерного випромінювання у верхніх частинах гранул, як показано на рисунку 3. Це дозволяє забезпечити послідовну перекристалізацію сплаву, отримати більш щільну структуру матеріалу без пор, яка характеризується підвищеною твердістю.

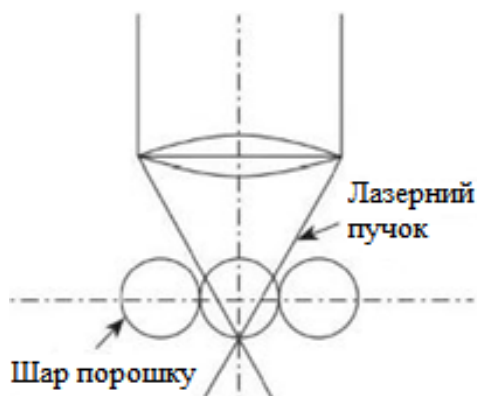


Рис. 3. Схема плавлення порошку збіжним пучком лазера [8]

Хоча густина енергії є мірою енергії, вкладеної в процес, існують і інші чинники (рисунк 4), такі як властивості матеріалу, умови середовища в камері побудови, стратегія сканування і температура процесу, які також мають велике значення. Для отримання необхідних властивостей, якості і геометрії виробу надзвичайно важливо вибрати оптимальні параметри процесу СЛП.

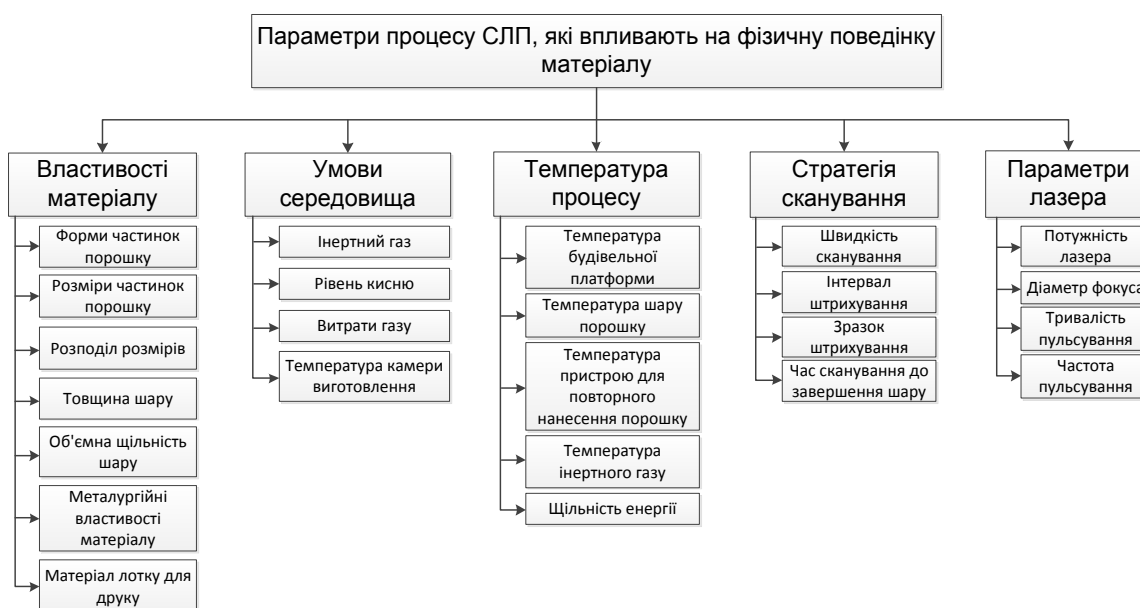


Рис. 4. Деякі параметри оброблення, які впливають на фізичну поведінку матеріалів у процесі виготовлення СЛП [5]

Властивості матеріалу. У роботі [9] зазначено, що гранулометричний склад, морфологія поверхні частинок, пористість, мікротвердість, наявність неметалічних включень, значно впливають на структуру і ФМС виготовлюваних об'єктів, позначаються на рівномірності розподілу порошку по платформі побудови. Вони впливають також на густину шару, що розплавляється в процесі СЛП.

Згідно з дослідженням [10] визначено, що отримання якісних виробів можливо при однорідному хімічному складі металевих порошків, сферичній формі частинок з коефіцієнтом форми від 1,0 до 2,0 і вузьким розподілом частинок за розмірами із середнім значенням від 40 до 75 мкм. Такі порошки мають малий коефіцієнт тертя між частинками і гарну сипкість, велику насипну густину і густину після утруски. Всі перелічені чинники забезпечують безперебійну подачу порошку і гарне нанесення у вигляді тонких шарів в процесі СЛП. Наявність внутрішніх пір і оксидних шарів в таких порошках вкрай небажано. Оксидна плівка на поверхні частинок порошку знижує змочуваність частинок краплею розплаву і призводить до сфероїдизації і формування пористого шару. На рисунку 5 зображено гранули порошку титанового сплаву Ti-6Al-4V.

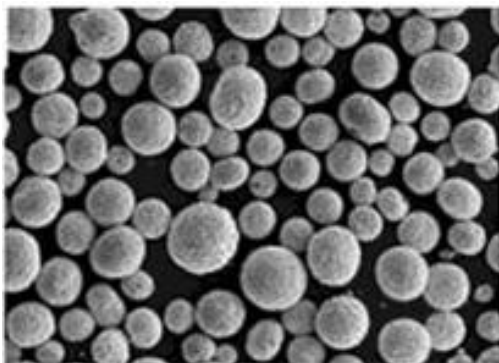


Рис. 5. Гранули порошку Ti-6Al-4V [9]

Температура процесу. В даній категорії параметрів на властивості кінцевого виробу, найбільш вагомо впливає температура будівельної платформи. В роботі [11] досліджено вплив температури платформи в діапазоні 100 ... 770°C на механічні властивості зразків Ti-6Al-4V. Зазначено, що підвищення температури платформи зі 100°C до 570°C поліпшило пластичність виробу під час випробувань на розтяг при кімнатній температурі, при цьому 570°C є максимальним показником пластичності. Подальше нагрівання платформи під час виготовлення зразків до 770°C призвело до зниження пластичності до нуля, хоча межа міцності на розтяг при 100°C і 570°C була приблизно постійною (~ 1,2 ГПа) і мала найнижче значення при 770°C. Також було виявлено, що найбільші пори (> 100 мкм) були присутні при 570°C. Об'ємна частка пір зменшується з підвищенням температури.

Також, дослідження [12] демонструє, що попереднє нагрівання платформи побудови до 400°C забезпечує зниження залишкової напруги на 50%.

Умови середовища у камері побудови. В процесі СЛП використовуються високі температури для плавлення частинок металевих порошків. В дослідженнях [9, 13] вказується, що такі умови процесу викликають потребу в контролюванні (інертній) атмосфері з низьким вмістом кисню для запобігання окислення, декорбанізації, утворення пір у кінцевому виробі і зниження твердості всього аг-

ломерату. Автори зазначають, що уникнення негативних наслідків плавлення досягається за рахунок поєднання надлишкового тиску інертного технологічного газу (аргону, гелію або азоту) (таблиця 1) і вакуумної відкачки для видалення повітря з робочого простору. Застосування в процесі плавлення газів високої чистоти, а також правильний підбір хімічного складу атмосфери дають можливість комбінувати елементи, особливо вразливі до окислення, зокрема титан через його високу спорідненість до кисню. Також, в роботах звертається увага на появу плазми над ванною зварювання. Ця плазма може поглинати і/або заломлювати лазерне випромінювання, негативно впливаючи, таким чином, на поглинання матеріалом енергії. Ефект ослаблення лазерного пучка плазмою менший для газів з більш високим потенціалом іонізації. Відмінності в глибині проникнення матеріалу можуть бути значними, особливо при використанні лазера з потужним пучком.

Таблиця 1

Основні властивості захисних газів [9]

Характеристика речовини	Азот	Гелій	Аргон
Молярна маса	28	4	40
Температура плавлення, °C	-210	-268,9	-189,4
Точка кипіння, °C	-195,8	-	-185,9
Критична температура, °C	-147	-267,9	-122,5
Температура займання, °C	негорючий	негорючий	негорючий
Відносна щільність газу (повітря = 1)	0,97	0,14	1,38
Перший потенціал іонізації, eV	14,54	24,46	15,68

Стратегія сканування. Стратегія лазерного сканування - це спосіб програмування лазера на переміщення фокуса променя над шаром порошку.

В дослідженні [14] автори приводять такі типи стратегії сканування: односпрямована, зигзагоподібна і типу «шахівниця» (острівна [15]) (рисунк 6). Підкреслено, що загальна стратегія сканування, полягає в переміщенні лазера зигзагоподібно по траєкторії заданої векторами (рис. 4, б.). Односпрямована стратегія сканування (рис. 4, а), веде до зниження щільності синтезованого матеріалу і в даний час практично не застосовується. Використання стратегія шахівниці (рис. 4, в), полягає в тому, що область сканування ділиться на більш дрібні ділянки (острівки), які скануються з певною послідовністю. Такий поділ великої зони сплаву на більш дрібні ділянки (за замовчуванням 5 мм на 5 мм) дозволяє скоротити довжину векторів сканування, що призводить до локалізації градієнтів температури, і як наслідок, зменшення залишкових напружень [16, 17].

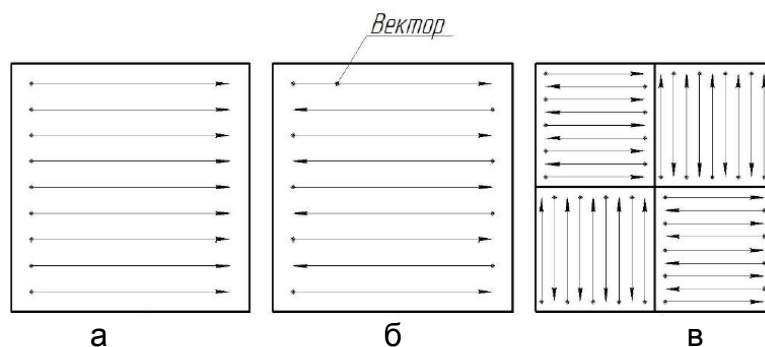


Рис. 6. Види стратегій сканування:

а - односпрямована; б - зигзагоподібна; в – типу «шахівниця» [14]

Зустрічаються і інші траєкторії сканування, наприклад, рух по спіралі від центру до периферії одержуваного шару [9]. Хоча це дозволяє зменшити довжину вектора сканування і змінити орієнтацію вектора в кожному шарі, повідомляється [15], що різницю у величині залишкових напружень у порівнянні з зигзагоподібною схемою не спостерігається. Однак спіральна стратегія знайшла застосування там, де деталі не можуть бути виготовлені з використанням зигзагоподібного візерунка. Автори [15] вказують, що стратегія спірального сканування підходить для обробки складних моделей, де кривизна значно змінюється і/або де кожен шар є нерегулярним і непослідовним.

Висновки

Селективне лазерне плавлення є найбільш поширеною технологією адитивного виробництва завдяки можливості виготовлення виробів складної геометрії згідно з CAD-моделлю з різних металевих порошків, зокрема титану і його сплавів.

У процесі СЛП безліч параметрів впливає на правильність побудови і остаточні властивості виробу. Окрім густини енергії, до основних, параметрів відносяться: фокусування лазерного випромінювання, температура процесу, умови середовища, властивості матеріалу і стратегія сканування.

Кожен із цих параметрів впливає на якість виробництва деталей і час виготовлення. Важливо знайти оптимальні значення параметрів, щоб процес міг тривати з максимальною швидкістю і точністю, з мінімальними дефектами в отриманому виробі. В даному аналізі показана важливість визначення і підбору правильних параметрів процесу СЛП для отримання пріоритетних (кастамізованих) показників густини матеріалу, яка визначає механічні властивості деталі, яку виготовляють.

Забезпечення збіжного пучка лазерного випромінювання дозволяє отримати більш щільну структуру матеріалу без пір, яка характеризується підвищеною твердістю. Температуру будівельної платформи слід встановлювати в діапазоні 100...770°C в залежності від бажаних механічних властивостей кінцевого виробу. Використання під час процесу інертної атмосфери, що запобігає окисленню, значно впливає на процес, кінцеві механічні властивості і мікроструктуру вироблених деталей. Металевий порошок повинен мати сферичну форму зерна і розмір, що не перевищує товщину одного нанесеного шару. Стратегія сканування впливає на тепловий баланс, продуктивність, геометричну точність, пористість, а отже і на механічні властивості і мікроструктуру виробу. Доцільно використовувати стратегію «шахівниці» для зменшення залишкових напружень в кінцевому виробі.

Слід зазначити, що параметри процесу, використовувані при обробленні СЛП, взаємозалежні, а відповідно, властивості готових компонентів є функцією взаємозв'язку цих параметрів процесу, а не вибору окремого параметра.

Аналіз іноземного досвіду виробництва продукції методом СЛП, в подальшому, дозволить удосконалити технологію виробництва елементів конструкції літаків, та створювати якісні вироби з заданими механічними властивостями.

Список літератури

1. Gomez, Ares & Mandal, Paranjayee & Gonzalez, Diego & Zuelli, Nicola & Blackwell, Paul. (2018). Studies on Titanium Alloys for Aerospace Application. Defect and Diffusion Forum. 385. 10.4028/www.scientific.net/DDF.385.419.

2. Liu, Shunyu & Shin, Yung. (2018). Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design*. 164. 107552. 10.1016/j.matdes.2018.107552.
3. Довбыш В. М., Забеднев П. В., Зеленко М. А. Аддитивные технологии и изделия из металла // Библиотечка литейщика - № 8–9. 2014.
4. Selective Laser Melting – SLM processes with marhellabs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.marhellabs.com/en/3d-manufacturing-processes/selective-laser-melting-slm/> – 10.10.2020 г.
5. Pal, Snehashis & Igor, Drstvensek & Brajliah, Tomaz. (2018). Physical Behaviors of Materials in Selective Laser Melting Process. 10.2507/daaam.scibook.2018.21.
6. Zhang, LaiChang & Attar, Hooyar. (2015). Selective Laser Melting of Titanium Alloys and Titanium Matrix Composites for Biomedical Applications: A Review. *Advanced Engineering Materials*. n/a-n/a. 10.1002/adem.201500419.
7. Kusuma, Chandrakanth, "The Effect of Laser Power and Scan Speed on Melt Pool Characteristics of Pure Titanium and Ti-6Al-4V Alloy for Selective Laser Melting" (2016). Browse all Theses and Dissertations. 1510.
8. Барабонова И. А. и др. Селективное лазерное плавление коррозионно-стойкой стали // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 1. Материаловедение / редкол. А. В. Белый (гл. ред.) [и др.]. Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2017. С. 6—1.
9. Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники: учебн. пособие для вузов / А. Л. Галиновский, Е. С. Голубев, Н. В. Коберник, А. С. Филимопов; под общей редакцией А. Л. Галиновского. — М: Юрайт, 2020. — 115 с. — (Высшее образование). — Текст: непосредственный.
10. Попкова И. С. Селективное лазерное плавление как инновационная технология изготовления сложнопрофильных изделий / И. С. Попкова // XVI международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов-молодых ученых. Екатеринбург, 7-11 декабря 2015: сборник научных трудов. — Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2015. — Ч. 2. — С. 276-279.
11. Pedrazzini, Stella & Pek, M.E. & Ackerman, A.K. & Ghadbeigi, Hassan & Mumtaz, Kamran & Dessolier, Thibaut & Britton, T.B. & Bajaj, Priyanshu & Jägle, Eric & Gault, B. & London, A.J. & Galindo-Nava, Enrique. (2020). Influence of powder-bed temperature on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V produced by selective laser melting.
12. McFadden, S., J. Quinn and Ryan Harkin. "A Review of Powder Bed Fusion for Additively Manufactured Ti-6Al-4V." (2018).
13. Spears, Thomas & Gold, Scott. (2016). In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing. Integrating Materials and Manufacturing Innovation. 5. 10.1186/s40192-016-0045-4.
14. Исследование влияния режимов селективного лазерного сплавления на качество заготовок: метод. указ. / сост. А.В. Агаповичев, А.В. Сотов, В.Г. Сметлов. — Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. — 32 с.: - 10 ил.
15. Shipley, Harry & McDonnell, Darren & Culleton, Mark & Lupoi, R. & O'Donnell, Garret & Trimble, Daniel. (2018). Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 128. 10.1016/j.ijmachtools.2018.01.003.

16. Hagedorn-Hansen, Devon & Bezuidenhout, Martin & Dimitrov, Dimitar & Oosthuizen, G.A.. (2017). The Effects of Selective Laser Melting Scan Strategies on Deviation of Hybrid Parts. South African Journal of Industrial Engineering. 28. 10.7166/28-3-1862.

17. Cheng, B., Shrestha, S. and Chou, K. 2015. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting, Addit. Manuf., 12, pp. 240–251.

References

1. Gomez, Ares & Mandal, Paranjayee & Gonzalez, Diego & Zuelli, Nicola & Blackwell, Paul. (2018). Studies on Titanium Alloys for Aerospace Application. Defect and Diffusion Forum. 385. 10.4028/www.scientific.net/DDF.385.419.

2. Liu, Shunyu & Shin, Yung. (2018). Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. Materials & Design. 164. 107552. 10.1016/j.matdes.2018.107552.

3. Dovbyish V. M., Zabednev P. V., Zelenko M. A. Additivnyie tehnologii i izdeliya iz metalla //Bibliotekha liteyschika - # 8–9. 2014.

4. Selective Laser Melting – SLM processes with marhellabs [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: <https://www.marhellabs.com/en/3d-manufacturing-processes/selective-laser-melting-slm/> – 10.10.2020 g.

5. Pal, Snehashis & Igor, Drstvensek & Brajlil, Tomaz. (2018). Physical Behaviors of Materials in Selective Laser Melting Process. 10.2507/daaam.scibook.2018.21.

6. Zhang, LaiChang & Attar, Hooyar. (2015). Selective Laser Melting of Titanium Alloys and Titanium Matrix Composites for Biomedical Applications: A Review. Advanced Engineering Materials. n/a-n/a. 10.1002/adem.201500419.

7. Kusuma, Chandrakanth, "The Effect of Laser Power and Scan Speed on Melt Pool Characteristics of Pure Titanium and Ti-6Al-4V Alloy for Selective Laser Melting" (2016). Browse all Theses and Dissertations. 1510.

8. Barabonova I. A. i dr. Selektivnoe lazernoe plavlenie korrozionno-stoykoy stali // Sovremennyye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov : sb. nauchnykh trudov. V 3 kn. Kn. 1. Materialovedenie / redkol. A. V. Belyiy (gl. red.) [i dr.]. Minsk: FTI NAN Belarusi, 2017. S. 6—1.

9. Additivnyie tehnologii v proizvodstve izdeliy aerokosmicheskoy tekhniki: uchebn. posobie dlya vuzov / A. L. Galinovskiy, E. S. Golubev, N. V. Kobernik, A. S. Filimopov; pod obschey redaktsiei A. L. Galinovskogo. — M: Yurayt, 2020. — 115 s. — (Vyisshee obrazovanie). — Tekst: neposredstvennyiy.

10. Popkova I. S. Selektivnoe lazernoe plavlenie kak innovatsionnaya tehnologiya izgotovleniya slozhnoprofilnykh izdeliy / I. S. Popkova // XVI mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya Uralskaya shkola-seminar metallovedomolodykh uchenykh. Ekaterinburg, 7-11 dekabrya 2015: sbornik nauchnykh trudov. — Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 2015. — Ch. 2. — S. 276-279.

11. Pedrazzini. Stella & Pek. M.E. & Ackerman. A.K. & Ghadbeigi. Hassan & Mumtaz. Kamran & Dessolier. Thibaut & Britton. T.B. & Bajaj. Priyanshu & Jgle. Eric & Gault. B. & London. A.J. & Galindo-Nava. Enrique. (2020). Influence of powder-bed temperature on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V produced by selective laser melting.

12. McFadden, S.. J. Quinn and Ryan Harkin. "A Review of Powder Bed Fusion for Additively Manufactured Ti-6Al-4V." (2018).

13. Spears. Thomas & Gold. Scott. (2016). In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing. Integrating Materials and Manufacturing Innovation. 5. 10.1186/s40192-016-0045-4.

14. Issledovaniye vliyaniya rezhimov selektivnogo lazernogo splavleniya-na kachestvo zagotovok: metod. ukaz. / sost. A.V. Agapovichev. A.V. Sotov. V.G. Sme-lov. – Samara: Izd-vo Samarskogo universiteta. 2017. – 32 s.: - 10 il.

15. Shipley. Harry & McDonnell. Darren & Culleton. Mark & Lupoi. R. & O'Donnell. Garret & Trimble. Daniel. (2018). Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 128. 10.1016/j.ijmachtools.2018.01.003.

16. Hagedorn-Hansen. Devon & Bezuidenhout. Martin & Dimitrov. Dimitar & Oosthuizen. G.A.. (2017). The Effects of Selective Laser Melting Scan Strategies on Deviation of Hybrid Parts. South African Journal of Industrial Engineering. 28. 10.7166/28-3-1862.

17. Cheng. B.. Shrestha. S. and Chou. K. 2015. Stress and deformation evaluations of scanning strategy effect in selective laser melting. Addit. Manuf.. 12. pp. 240–251.

Надійшла до редакції 21.10.2020, розглянута на редколегії 22.10.2020

Selections parameters of selective laser melting for metal powders

The article deals with the issues of determining the optimal parameters of the selective laser melting (SLM) process in order to develop a technology for manufacturing aircraft structural elements from titanium alloys. This literature review notes the advantages of titanium alloys, which have higher specific strength and corrosion resistance compared to most steels and aluminum alloys. It is determined that traditional methods of forming titanium parts lead to a large amount of material waste, high production costs and long production times. It is noted that the SLM technology makes it possible to create parts of titanium alloys with complex geometry. It is also emphasized that the titanium alloy Ti-6Al-4V is the most popular titanium alloy used in aircraft construction. This paper presents a description of the SLM process and a list of parameters that affect design and final material properties. Attention is drawn to the main parameters of SLM: energy density, process temperature (temperature of the building platform), environmental conditions, material properties and scanning strategy. The influence of the above parameters of the SLM process on product quality and production time is shown. Finding the optimal values for the SLM process parameters is an important step in creating a part that is manufactured to obtain priority mechanical properties. The need is stressed to employed a protective atmosphere during the process is emphasized, the use of internal gases (nitrogen, argon and helium) to prevent oxidation, significantly affects the process, the final mechanical properties and microstructure of the parts produced. It is shown that for the production of high-quality products, it is important that the metal powder has a spherical grain shape and a size not exceeding the thickness of one applied layer. The build chamber temperature should be varied depending on the desired mechanical properties of the final product. Variable process parameters (scanning strategy, laser parameters) affect the thermal balance,

productivity, geometric accuracy of porosity, which affects the mechanical properties and microstructure. This analysis of foreign experience and future research will further improve the technology for the production of aircraft structural elements.

Keywords: selective laser melting; titanium alloys; additive technologies; process parameters; material properties; scanning strategy; laser parameters; environmental conditions; process temperature; production technology.

Відомості про авторів:

Зайцев Віталій Єгорійович – доктор технічних наук, професор, ректор Харківського технологічного університету «ШАГ», Харків, Україна, vitaliy.zaytsev@gmail.com, ORCID 0000-0002-5743-2141.

Полупан Антон Сергійович – аспірант кафедри технології виробництва літальних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна, antonpolupan@ukr.net, ORCID 0000-0002-0158-7312.

Information about the authors:

Zaytsev Vitaliy – Dr. Tech. Sc., professor, rector of the Kharkiv University of Technology «STEP», Kharkiv, Ukraine, vitaliy.zaytsev@gmail.com, ORCID 0000-0002-5743-2141.

Polupan Anton – PhD student of the Department of technology of production of aircraft, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, antonpolupan@ukr.net, ORCID 0000-0002-0158-7312.