

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИРОБІВ 3D – ПРИНТЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

INVESTIGATION OF POSSIBILITIES FOR IMPROVING THE QUALITY OF 3D – PRINTING PRODUCTS

*Святослав Яцишин, І. Полянський,
Національний університет «Львівська політехніка», Україна*

*Svyatoslav Yatsyshyn, I. Polyanskiy
Lviv Polytechnic National University, Ukraine*

Анотація

Представлено аналіз методів контролю якості виробництва на 3D – принтері для технології селективного лазерного плавлення та лазерного припікання.

Ключові слова: Метрологія, контроль якості, моніторинг, аналіз, 3D – принтер, додаткове виробництво.

Abstract

The analysis of methods of quality control of production on 3D - printer for the technology of selective laser melting and laser baking is presented. The considered technologies make it possible to produce a set of special complex products. Typical means of selective laser melting consists of a laser, a scanner, a system, a controller, and a camera. Characteristics can be improved in the presence of additional modules (e.g., for monitoring and control of the temperature of the heating). According to the results of previous studies, for each material (alloy, composite), we have to choose a particular number of defining characteristics. For instance, previous experiments can optimize the required value of the pulse energy of the laser. This is especially important in connection with the extreme conditions of the considered method when the solidification occurs: here the properties of hardened microstructures may differ from the optimal ones. The necessary additional heat treatment of the manufactured product can be carried out in order to optimize the microstructure, residual micro-stresses and improve the quality of the surface to be treated. The latter is important for biomedical frames.

In order to obtain high-quality parts, an optimum combination of laser radiation power, scanning speed, thickness of the powder layer and spacing between the rows (also known as the hatch interval) is required; it allows minimizing possible defects by optimizing the area of the melt. To improve the accuracy of reproduction of product sizes, a laser beam displacement, as well as flooding of its contour may be used.

It is necessary to process the technological parameters (temperature of the deposited powder, its dispersion, power and laser operation mode, etc.) for new materials. In particular, study of the temperature regime of powder deposition and the mechanical stresses of the resulting product enables to improve the technological requirements for reproduction of geometric sizes, surface irregularities and others.

Keywords: Metrology, Quality Control, Monitoring, Analysis, 3D - Printer, Additional Croduction.

Вступ. 3D – принтери, літографічні пристрої та системи швидкого прототипування, з'явившись наприкінці ХХ століття, активно удосконалюються і розвиваються, що потребує розроблення методів та засобів для перевірки та контролю якості, як процесу виробництва, так і контролю якості, продукції та сировини для такого виробництва. 3D – принтер — це пристрій, що здійснює виробництво унікальної за формою продукції. Нині за допомогою 3D принтерів вдається виконувати відтворення тривимірних об'єктів, як з неметалевих матеріалів (переважно ABS-пластику), так і з металів, кераміки, композитів. Засоби 3D – друку досить часто використовуються для модельно-натурної перевірки форм деталей, технічних рішень, оцінки працездатності окремих вузлів машин. Цікавим і неоднозначним є питання доцільності 3D друку в дослідницькій сфері, для проведення досліджень механічних систем та виробів складної геометричної форми [1].

Недоліком методу оцінки якості роботи 3D – принтера за виробленими об'єктами є відсутність єдиного еталону якості для готової продукції різних технологій 3D – друку. Тому, до прикладу, розвивається система дослідження та моніторингу виробництва в реальному часі - система QMmeltpool 3D на основі технології селективного лазерного спікання. Її недоліком вважається складність у реалізації, зокрема, температурного контролю та несумісність з іншими технологіями 3D – друку, наприклад, стереолітографії, рідкого видавлювання, виробництва шаруватих об'єктів, виробництва з використанням балістики.

Мета роботи. Дослідження можливості покращення якості 3D – друку, а саме точності відтворення розмірів деталі та непевності товщини нанесеного шару, шляхом уточнення режимів роботи за рахунок впровадження системи моніторингу низки метрологічних параметрів, включаючи температурний режим виготовлення.

Аналіз якості 3D - друку за характеристиками вироблених виробів. У зв'язку із розвитком адитивного виробництва та зростанням вимог до експлуатації виготовлених виробів, потреба у розробленні точніших засобів вимірювання і контролю якості посилюється. Тому нижче проаналізуємо відомі методи виготовлення виробів.

А) Метод наплавлення. Швидке прототипування, що виконується за технологією FDM (Fused Deposition Modeling), відбувається за рахунок пошарового накладання на контур створюваного виробу воском або полікарбонатної нитки. Проходячи через головку екструдера, нитка нагрівається до напіврозплавленого стану. Завдяки цьому шари сплавляються між собою і утворюють монолітну поверхню. Технологія FDM застосовується для виготовлення одиничних зразків продукції.

Більшість FDM принтерів можуть використовувати стандартні рулони ниток, доступні діаметри яких 1,75 або 2.85 мм. Декілька принтерів (наприклад, Zortrax M200 або Tiko) використовують власні нитки; це, як правило, дорожче, ніж стандартні рулони, але забезпечують кращу якість [2].

При цьому, всі FDM 3D - принтери працюють з низькими швидкостями і друкують вироби приблизно однакової якості (серед них якість і високу продуктивність демонстрували принтери виконані в закритому корпусі з металу і оснащені системою охолодження; при цьому, FDM 3D - принтери не здатні формувати вироби із деталізацією нижче 100-300 мікрон. Вищої якості можна досягнути завдяки використанню технологій SLS або SLM 3D – друку [3].

Б) Селективно-лазерне спікання. Проведено тестування технології Selective Laser Sintering (SLS) або селективного лазерного спікання. За основу взято результати власних досліджень і дані компанії EOS GMBH [4]. Параметри та умови тестування: Товщина шару - 0,1 мм; матеріал - бежевий міцний пластик (поліамід); зсув променя - 0,33 мм (це параметр відстані від зовнішнього краю шару, якою повинен затвердіти, до середини лазерного променя).

Однією з основних частин в установках адитивного виробництва є лазерна система, в якій використовуються CO₂, Nd: YAG, волоконний або дисковий лазери. Встановлено, що використання лазерів з довжиною хвилі 1,0-1,1 мкм для нагрівання металів і карбідів ефективніше, оскільки вони на 25-65 % краще поглинають згенероване лазерне випромінювання. У той же час, використання CO₂-лазера з довжиною хвилі 10,64 мкм найкраще підходить для таких матеріалів, як полімери і оксидна кераміка. Вища абсорбційна здатність дає змогу збільшити глибину проплавлення і в ширших межах варіювати параметри процесу.

Зазвичай лазери, які використовуються в адитивному виробництві, працюють в безперервному режимі. Порівняно з ними застосування лазерів, які працюють в імпульсному режимі або в режимі модульованої добротності, за рахунок великої енергії імпульсу і короткої тривалості імпульсу (наносекунди) дає змогу посилити міцність зв'язку між шарами і зменшити зону термічного впливу. Можна відзначити, що характеристики використовуваних лазерних систем лежать в таких межах: потужність лазера - 50-500 Вт, швидкість сканування до 2 м / с, швидкість позиціонування до 7 м / с, діаметр сфокусованої плями - 35-400 мкм.

Для дослідження вибрані моделі виробів, спроектовані у програмному середовищі AutoCad, з різними геометричними розмірами (куа нахилу, діаметр отворів, товщини стінок, ширини шпар). На рисунку 1 зображено спеціальний виріб для перевірки можливості виготовлення виробів з певним кутом нахилу поверхні. При куті нахилу більшому від 30% верхні шари скочуються вниз, псуючи виріб. На рисунку 2 представлено спосіб перевірки можливостей виготовлення виробів із отворами, коли 3D – принтеру дається завдання (з допомогою програми на комп'ютері сформувати належну 3D - модель) виготовити виріб з товщиною стінок від 0,5 - 2,0 мм та кроком 0,1 мм. В результаті, похибка відтворення розмірів становить $\pm 0,02$ мм. Рисунок 3 проказує результат тесту на виробництво стрижнів певної геометричної форми діаметрів від 0,5 – 2,0 мм при кроці 0,1 мм. Максимальне відхилення становить 0,3 мм; при цьому, якщо стрижень є меншим, то відхилення зростає.

Цікавим є вплив коефіцієнту пористості матеріалу (даний параметр обчислюється відношенням об'єму пор до об'єму всього продукту). Високий коефіцієнт пористості може призвести до руйнування продукту, що зумовлює розроблення методів та засобів метрологічного контролю коефіцієнту пористості. Крім того, у зв'язку із появою нових матеріалів для 3D - друку та технологій адитивного виробництва, виникає потреба у розробленні методів та засобів для контролю застосовуваних порошків на сферичність. Не менш важливим є питання вимірювання температури виробу під час його виготовлення (можна отримувати більше інформації про температуру досліджуваного продукту, якщо використати акустичний метод вимірювання температури з чутливістю 10 кГц на 1 градус) [4].

Середня шорсткість поверхні виготовленого виробу становить Rz 10 - 20. Для покращення її стану застосовують шліфування вручну або з допомогою піскоструминної установки. Коагуляція впливає на шорсткість спеченого поверхневого шару. Доведено, що зменшенню діаметру коагульованих частинок сприяє спікання в захисному середовищі аргону, підігрів порошкового матеріалу, збільшення діаметра сфокусованої плями лазера, збільшення швидкості переміщення і потужності випромінювання лазера. Для зменшення шорсткості, покращення внутрішньої структури і підвищення міцності, спікання рекомендується проводити в аргоні із застосуванням металевих порошкових матеріалів, які підлягають попередній 1- і 3-хвилинній активації. При цьому, товщина і шорсткість спеченого шару впливає не тільки на якість поверхні, а й на монолітність та зчеплення суміжних шарів [5].

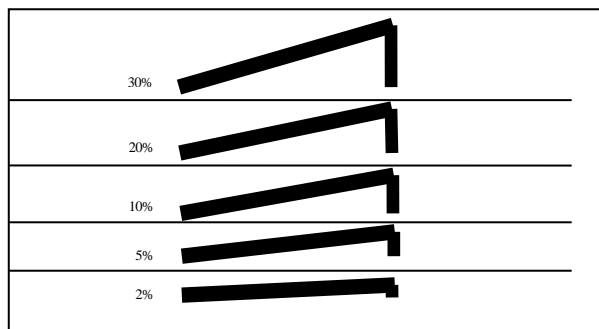


Рис. 1 - Тест кута нахилу поверхні площини побудови при селективному лазерному спіканні
 Fig. 1 - Test of the angle of inclination of the surface for selective laser sintering technology

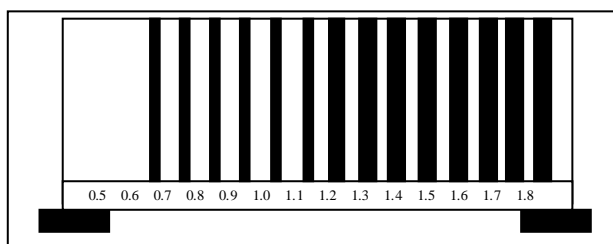


Рис. 2 - Тест на товщину стінок при селективному лазерному спіканні
 Fig. 2 - Wall thickness test for selective laser sintering

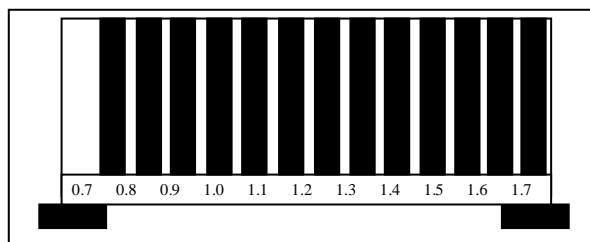


Рис. 3 - Тест на друк стрижнів при селективному лазерному спіканні
 Fig. 3 - Test for the printing of rods for selective laser sintering

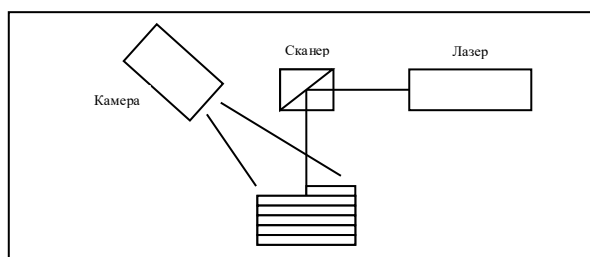


Рис. 4 - Локальний моніторинг зони розплаву системою QMmeltpool 3D з позиціонуванням (фотодіод і камера відповідають за моніторинг площі та інтенсивності зони розплаву)
 Fig. 4 - Local monitoring of the melt zone by the QMmeltpool 3D system with precise positioning (the photodiode and the camera are responsible for monitoring area and intensity of melted zone)

Для покращення контролю якості продукції 3D – принтерів розроблено **систему QMmeltpool 3D**, що здійснює моніторинг зони розплаву лазера з допомогою фотодіодної камери (Рис. 4). Вона також здійснює пошарове сканування, створюючи цифрову модель виробу, на основі якої формують висновок щодо якості. Така система використовується при впровадженні нових матеріалів, наприклад, металокераміки – актуального матеріалу для військової промисловості.

Вироби за технологією селективного лазерного плавлення. Вказана технологія представляє собою сукупність спеціальних засобів виробництва виробів складної форми. Типовий засіб селективного лазерного плавлення складається з лазера, сканера, системи контролера і камери. Характеристики можуть бути покращені за наявності додаткових модулів (наприклад, моніторингу та контролю температури підігріву). Для кожного нового матеріалу (сплаву, композиту) індивідуально підбирають, за результатами попередніх досліджень, низку визначальних характеристик. До прикладу, такою низкою можна вважати - потужність лазерного

випромінювання, товщина шару, швидкість та міжрядковий інтервал сканування, його стратегія. Інакше, виникають пористість, складки, залишкові напруження, тріщини або порушується геометрія виготовленої продукції. Для підвищення її щільності та жорсткості або для досягнення вищої точності забезпечення геометричних розмірів, використовують додаткові методи, такі як лазерне переплавлення тощо [6].

Параметри селективного лазерного плавлення, в першу чергу, оптимізовані для досягнення найвищої щільності. Для цього процес виробництва повинен передбачати: неповне плавлення порошку, оптимальні температурні градієнти, незначну турбулентність зони розплаву, щільні і т.д. Попередні експерименти можуть оптимізувати необхідне значення енергії імпульсу лазера. Це особливо важливо у зв'язку з екстремальними умовами даного методу, коли відбувається затвердіння: тут властивості затверділих мікроструктур можуть відрізнятися від оптимальних. Необхідна додаткова термічна обробка виготовленого виробу може здійснюватися з метою оптимізації мікроструктури, залишкових мікронапружень і покращення якості обробленої поверхні. Останнє є важливо для біомедичних каркасів.

Для отримання високоякісної деталі потрібно оптимальне поєднання потужності лазерного випромінювання, швидкості сканування, товщини шару порошку і інтервалу між рядками (також відомим як інтервал штрихування); це дає змогу звести до мінімуму можливі дефекти шляхом оптимізації площі розплаву. Для покращення точності відтворення розмірів виробу може застосовуватись зміщення лазерного променя, а також заливання його контуру (Рис. 5). Граничні параметри (наприклад лінії сканування, параметри зміщення) підвищують точність і якість контуру.

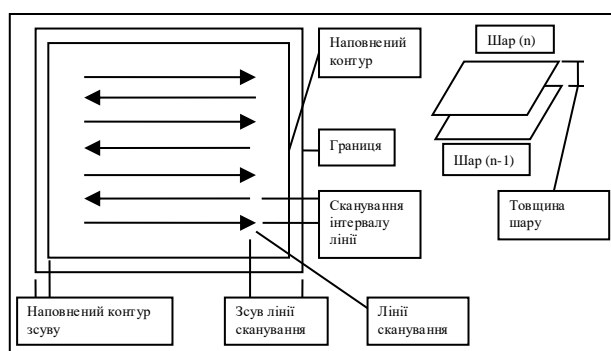


Рис. 5 - Схематичне представлення параметрів сканування, які можуть бути змінені для покращення якості
Fig. 5 - Schematic representation of scan parameters that can be modified to improve quality

Важливим параметром процесу виробництва вважається густина енергії, переданої матеріалу і віднесеної до одиниці його об'єму, причому із залученням швидкості сканування, інтервал сканування (або проміжок між рядками) та товщини шару, що наноситься:

$$E_p = P/vst \text{ (J/mm}^3\text{)} \quad \text{або} \quad E_p = P/vs \text{ (J/mm}^2\text{)},$$

де E_p - густина енергії (Дж/мм³), P - потужність лазера (Вт), v - швидкість сканування (мм/с), s - інтервал сканування (мм) і t - товщина шару (мм). Відповідно, збільшення потужності лазера і зменшення швидкості сканування, інтервалу або товщини шару збільшує густину опромінення.

Тепловізор, як засіб вдосконалення якості виробництва на 3D – принтері. Необхідність застосування тепловізора зумовлена вимогами контролю за тепловим станом [7]. Даний прилад надає можливості оцінити температуру виробу, лазера та зони контакту лазера та розподіл температури у процесі виготовлення, що особливо важливе для технології селективного лазерного плавлення, оскільки дасть змогу зрозуміти причину зернистості та пор у виробах, продукованих на 3D - принтері.

Контактні засоби вимірювання температури, як засіб вдосконалення якості виробництва на 3D – принтері. Перспективними виглядають засоби вимірювання розподілу температури по поверхні виробу, що виготовляється, з використанням багато-елементних квазіточкових сенсорів електричного опору [8]. Проте, у цьому випадку слід застосовувати малоінерційні сенсори, узгоджуючи їхні характеристики інерційності із виробничими потребами.

Висновки:

Для вдосконалення технології 3D – друку необхідно розвивати системи моніторингу процесу виготовлення. Однією з перспективних технологій 3D – друку вважається технологія, що передбачає лазерне припикання та розплавлення порошку, який наноситься пошарово. Для нових матеріалів слід відпрацювати технологічні параметри (температура осаджуваного порошку, його дисперсність, потужність та режим роботи лазера тощо). Зокрема, вивчення температурного режиму осадження порошку та механічних напружень отриманого виробу дає змогу покращити технологічні вимоги до відтворення геометричних розмірів, нерівності поверхні тощо.

Література

1. Про доцільність використання засобів 3D друку для підвищення точності статичних і динамічних досліджень важільно-оберткових механізмів / [В. М. Орел, В. Т. Щетинін, О. О. Ченчева та ін.]. // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 1/2015 (90). Частина 2. – 2015. – С. 111 – 117.
2. Grieser F. FDM vs SLA: 3D Printing Explained and Compared [Електронний ресурс] / Franz Grieser. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: <https://all3dp.com/fdm-vs-sla/>.
3. Ликбез о точности и качестве современной 3D печати. FDM, SLA 3D принтеры. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://3dprinter.ua/3d-print-quality/>.
4. Правила моделирования и разрешение деталей при 3D-печати методом SLS [Електронний ресурс]. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: <http://can-touch.ru/blog/modelirovanie-razreshenie-sls-3d/>.
5. Сапрыкина Н. А. Совершенствование технологии формирования поверхностного слоя изделий, полученных послойным лазерным спеканием Научная библиотека диссертаций и авторефератов disserCat <http://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-tehnologii-formirovaniya>
6. Kruth J.-P. Additive Manufacturing of Metals via Selective Laser Melting Process Aspects and Material Developments / Jean-Pierre Kruth, Sasan Dadbakhsh, Jan Van Humbeeck, Karolien Kempen, Jef Vleugels and Bey Vrancken // Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications / [edited by T.S. Srivatsan, T.S. Sudarshan]. — London: CRC Press, 2016. — P. 70 — 96.
7. Cyber-Physical Systems. Metrological Issues, Edited by. S. Yatsyshyn, B.Stadnyk, 2016, IFSA Publishing, Barcelona, Spaine.
8. Dorozhovets M., Burdega M. Measurement of a Surface Temperature Distribution Using Multi-element Resistance Sensors // Proceeding of the IEEE 9-th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. 21-23 Sept. Bucharest, Romania, Vol.1. – IDAACS, - 2017. – pp.602-606.

References

1. V. Orel, V. Shchetynin, O. Chencheva ta in., “Pro dotsilnist vykorystannia zasobiv 3D druku dlia pidvyshchennia tochnosti statychnykh i dynamichnykh doslidzhen vazhilno-obertovykh mekhanizmiv”, *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, vyp.1 (90). chast.2, s.111-117, 2015.
2. F. Grieser. FDM vs SLA: 3D Printing Explained and Compared. [Online]. Available: <https://all3dp.com/fdm-vs-sla/>. Acc. Oct. 17, 2018.
3. Lykbez o tochnosti y kachestve sovremennoi 3D pechaty. FDM, SLA 3D pryntery. [Online]. Available: <https://3dprinter.ua/3d-print-quality/>. Acc. Oct. 17, 2018.
4. Pravylya modelyrovaniya y razresheniye detalei pry 3D-pechaty metodom SLS. [Online]. Available: <http://can-touch.ru/blog/modelirovanie-razreshenie-sls-3d/>. Acc. Oct. 17, 2018.
5. N. Saprykina, “Sovershenstvovanye tekhnolohyy formyrovaniya poverkhnostnogo sloia yzdelyi, poluchennykh posloinym lazernym spekanyem”, PhD thesis, Sc Bibl. [Online]. Available: <http://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-tehnologii-formirovaniya>. Acc. Oct. 17, 2018.
6. J.-P. Kruth et al, “Additive Manufacturing of Metals via Selective Laser Melting Process Aspects and Material Developments”, in *Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications*, T.S. Srivatsan and T.S. Sudarshan, Eds. London, UK: CRC Press, 2016, pp.70-96..
7. *Cyber-Physical Systems. Metrological Issues*. Ed. S. Yatsyshyn, B.Stadnyk. Barcelona, Spaine: IFSA Publishing, 2016.
- 8 M. Dorozhovets, M. Burdega, “Measurement of a Surface Temperature Distribution Using Multi-element Resistance Sensors”, in *Proc. IEEE 9th Internat. Conf. on Intel. Data Acq. and Adv. Comp. Systems: Techn. & Appl.* Bucharest, Romania, vol.1, 2017, pp. 602-606.