

СТАНДАРТИЗАЦІЯ ТА СЕРТИФІКАЦІЯ

УДК 536.58; 536.52; 62.492

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ВИРОБІВ 3D-ПРИНТЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

© Яцишин Святослав, Полянський Ігор, 2017

Національний університет “Львівська політехніка”, кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Проаналізовано методи контролю якості виробництва на 3D-принтері для технології селективного лазерного плавлення та лазерного припикання.

Ключові слова: метрологія, контроль якості, моніторинг, аналіз, 3D-принтер, додаткове виробництво.

Проанализированы методы контроля качества производства на 3D-принтере для технологий селективного лазерного плавления и припекания.

Ключевые слова: метрология, контроль качества, мониторинг, анализ, 3D-принтер, дополнительное производство.

The analysis methods of quality control on production 3D- printer for selective laser sintering technology of special products via the sizes of which we can estimate the geometric parameters and via an additional control system we can high up their quality in real time.

Increasing demands for precision measurement raises new problems of optimization of mathematical models of measuring transformations, and adequate processing of experimental data. This problem in modern MIs is particularly relevant due to the capabilities of inexpensive hardware implementation in basis of modern microelectronic components that opens the possibility of computing realization directly in the measuring path.

Obtaining the necessary precision in many cases is only possible in the case of optimal mathematical models that provide in a certain sense the best approach of MI general transformation function. Rational choice of mathematical model of transformation function in many cases improves the measuring accuracy or expands the measurement range of preset accuracy.

In this regard, becomes important choice of suitable criterion during processing the experimental data. Normal criteria mostly applicable for analyzing experimental data, is the most common method of mean squared errors, which consists in minimizing the sum of squares of the errors and computing the average of these squares. Unfortunately, the root-mean-square approximation does not provide achievement of the lowest difference between the estimator and function that is estimated at all points of observation, which is desirable during the precision processing of experimental data. Therefore, for solving the calibration tasks should be used the minimax criterion which ensures the minimum possible errors of reproducing the experimental calibration characteristics.

Physical modeling is an experimental method of scientific research, which implies the substitution of the studied physical process by other similar to it of the same physical nature – by model.

Physical model is a smaller or larger physical copy of an object. The geometries of model and object are often similar in the sense that one is a rescaling of the other; in such cases the scale is an important characteristic. Geometrically similar to the original the model can be both reduced and increased in the comparison with original sizes, and the model of process or phenomenon may differ from the real process by the quantitative physical characteristics such as power, energy, process pressure etc. In a broad sense, any physical experiment conducted in laboratory, including an experiment with natural object or part of it, is a physical modeling. The latter is based on the similarity theory and dimensional analysis, establishing the similarities criteria. The identity of the latter for a nature and the model provides the ability to transfer the experimental results obtained by physical modeling, in natural conditions. With the

implementation of relevant conditions of physical modeling, i.e. the identity of similarity criteria, the values of variables that characterize a real phenomenon of proportionality of the similar points in space and at similar moments of time, become to be proportional to values of the same variables for the model. Presence of such proportionality allows perform recalculation of experimental results that were obtained on a model by multiplying the value of each of the identified variables on a constant for all values a given dimension set factor – the similarity factor.

Key words: metrology, quality control, monitoring, analysis, 3D-printer, additional production.

Вступ. 3D-принтери, літографічні пристрої та системи швидкого прототипування, з'явившись наприкінці XX ст., активно удосконалюються і розвиваються, що потребує розроблення методів та засобів для перевірки та контролю якості як процесу виробництва, так і 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 і з неметалевих матеріалів (переважно ABS-пластику), і з металів, кераміки, композитів. Засоби 3D-друку доволі часто використовують 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 досліджень механічних систем та виробів складної геометричної форми [1].

Недоліком методу оцінювання якості роботи 3D-принтера за виробленими об'єктами є відсутність єдиного еталону якості для готової продукції різних технологій 3D-друку. Тому, для 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, за допомогою уточнення режимів роботи за рахунок впровадження системи моніторингу низки метрологічних параметрів, зокрема температурного режиму виготовлення.

Аналіз якості 3D-друку за характеристиками вироблених виробів. У зв'язку із розвитком адитивного виробництва та зростанням вимог до експлуатації виго-

товлених виробів потреба у розробленні точніших засобів вимірювання і контролю якості підвищується. 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 воску 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 забезпечує кращу якість [2].

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

Б. Селективно-лазерне спікання. Здійснено 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, який повинен затвердіти, до середини лазерного променя).

Однією з основних частин в установках адитивного виробництва є лазерна система, в якій застосовуються 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. Водночас використання CO₂-лазера з довжиною хвилі 10,64 мкм найкраще підходить для таких матеріалів, як полімери й 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 у 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 зміцнити зв'язок між шарами і зменшити зону термічного впливу. Можна зазначити, що характеристики застосовуваних лазерних систем лежать у 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 вибрано моделі виробів, спроектовані у програмному середовищі AutoCad, з різними геометричними розмірами (кут нахилу, діаметр отворів, товщини стінок, ширини шпар). На рис. 1 зображено спеціальний виріб для перевірки можливості виготовлення виробів з певним кутом нахилу поверхні. Якщо кут нахилу більший від 30 %, верхні шари скочуються вниз, псуючи виріб. На рис. 2 зображено спосіб перевірки можливостей виготовлення виробів із отворами, коли 3D-принтеру дається завдання (за 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. У результаті, похибка відтворення розмірів становить $\pm 0,02$ мм. На рис. 3 показано результат тесту на виробництво стрижнів певної геометричної форми діаметрів від 0,5–2,0 мм з кроком 0,1 мм. Максимальне відхилення становить 0,3 мм; якщо стрижень менший, то відхилення зростає.

Цікавий вплив коефіцієнта пористості матеріалу (цей 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 коефіцієнта 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 за допомогою піскоструминної установки. Коагуляція впливає на шорсткість спеченого поверхневого шару. Доведено, що зменшенню діаметра коагульованих частинок сприяє спікання в захисному середовищі аргону, підігрівання порошкового матеріалу, зростання діаметра сфокусованої плями лазера, збільшення швидкості переміщення і потужності випромінювання лазера. Для зменшення шорсткості, покращення внутрішньої структури і підвищення міцності спікання рекомендується здійснювати в аргоні із застосуванням металевих порошкових матеріалів, які підлягають попередній 1- і 3-хвилинній активації. Товщина і шорсткість спеченого шару впливають не тільки на якість поверхні, а й на монолітність та зчеплення суміжних шарів [5].

Для покращення контролю якості продукції 3D-принтерів розроблено **систему QMmeltpool 3D**, що здійснює моніторинг зони розплаву лазера за допомогою фотодіодної камери (рис. 4). Вона також здійснює пошарове сканування, створюючи цифрову модель виробу, на основі якої формують висновок щодо якості. Таку систему використовують для впровадження нових матеріалів, наприклад, металокераміки – актуального матеріалу для військової промисловості.

Вироби за технологією селективного лазерного плавлення. Вказана технологія – це сукупність спеціальних засобів виробництва виробів складної форми. Типовий засіб селективного лазерного плавлення складається із 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, товщину шару, швидкість та міжрядковий інтервал сканування, його стратегію. 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].

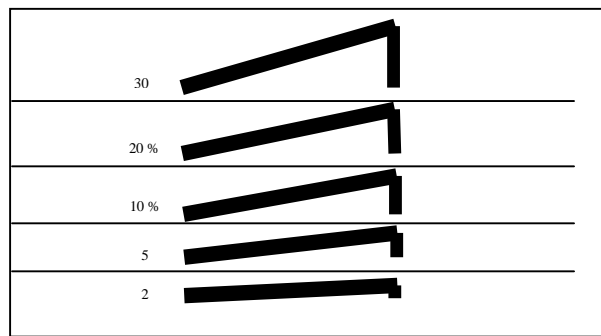


Рис. 1. Тест кута нахилу поверхні площини побудови за селективного лазерного спікання

Fig. 1. Test of the angle of inclination of the surface for selective laser sintering technology

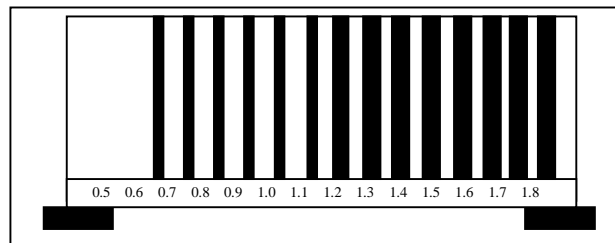


Рис. 2. Тест на товщину стінок за селективного лазерного спікання

Fig. 2. Wall thickness test for selective laser sintering

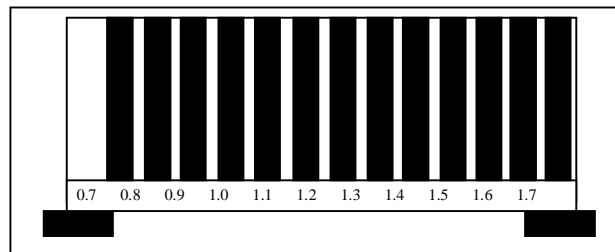


Рис. 3. Тест на друк стрижнів за селективного лазерного спікання

Fig. 3. Test for the printing of rods for selective laser sintering

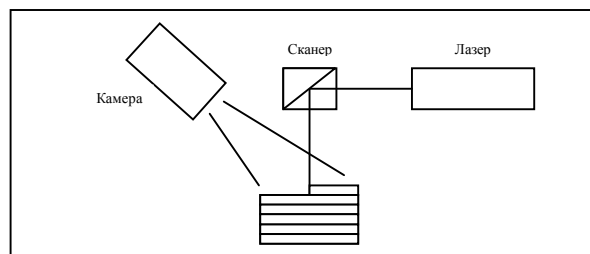


Рис. 4. Локальний моніторинг зони розплаву системою QMmeltpool 3D з позиціонуванням (фотодіод і камера відповідають за моніторинг площі та інтенсивності зони розплаву)

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)

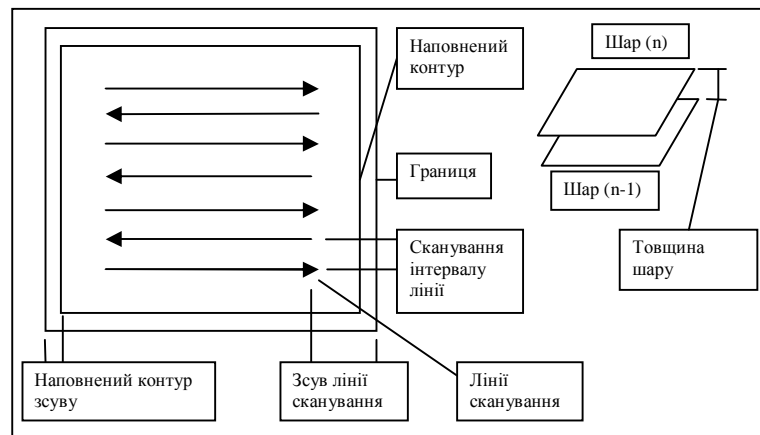


Рис. 5. Схематичне подання параметрів сканування, які можна змінити для покращення якості

Fig. 5. Schematic representation of scan parameters that can be modified to improve quality

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

Для отримання високоякісної деталі потрібне оптимальне поєднання потужності лазерного випромінювання, швидкості сканування, товщини шару порошку та інтервалу між рядками (також відомого як інтервал штрихування); це дає змогу звести до мінімуму можливі дефекти, оптимізувавши площу розплаву. Щоб підвищити точність відтворення розмірів виробу, можна застосовувати зміщення лазерного променя, а також заливання його контуру (рис. 5). Граничні параметри (наприклад, лінії сканування, параметри зміщення) підвищують точність і якість контуру.

Важливим параметром процесу виробництва вважається густина енергії, переданої матеріалу і віднесеної до одиниці його об'єму, причому із залученням

швидкості сканування, інтервалу сканування (або проміжку між рядками) та товщини шару, що наноситься:

$$E_p = \frac{P}{vst} \left(\frac{J}{mm^2} \right).$$

Або

$$E_p = \frac{P}{vs} \left(\frac{J}{mm^2} \right),$$

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

Тепловізор як засіб удосконалення якості виробництва на 3D-принтері. Необхідність застосування тепловізора зумовлена вимогами контролю за тепловим станом [7]. Цей прилад надає можливість оцінити температуру виробу, лазера та зони контакту лазера та розподіл температури під час виготовлення, що особливо важливо для технології селективного лазерного плавлення, оскільки дасть змогу зрозуміти причину зернистості та пор у виробах, виготовлених на 3D-принтері.

Контактні засоби вимірювання температури як засіб вдосконалення якості виробництва на 3D-принтері. Перспективними видаються засоби вимірювання розподілу температури по поверхні виробу, що виготовляється, з використанням багатоелементних

квaziточкових сенсорів електричного опору [8]. Проте у такому разі необхідно 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 припікання та розплавлення порошку, який наноситься пошарово. Для нових матеріалів треба відпрацьовувати технологічні параметри (температура осаджуваного порошку, його дисперсність, потужність та режим роботи лазера тощо). Зокрема, вивчення температурного режиму осадження порошку та механічних напружень отриманого виробу дають змогу уточнити технологічні вимоги до відтворення геометричних розмірів, нерівності поверхні тощо.

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. Вип. 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. Лукбез о точ-

ности и качестве современной 3D печати. FDM, SLA 3D принтеры [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://3dprinter.ua/3d-print-quality/>. 4. Правила моделирования и разрешение деталей при 3D-печати методом SLS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <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 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-tekhnologii-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. – P. 602–606.