

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ 3D-ДРУКУ

В.В. Небрат, І.І. Ключник, П.В. Галкін, В.С. Романчук, І.І. Ключник

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

Анотація

Проведено аналіз точності 3D-принтера. Показано що оцінювання точності та повторюваності позиціонування осей 3D-принтера може проводитись з застосуванням методу безпосереднього роздільного вимірювання окремих осей, який регламентується ISO 230-2 2016 [1]. Поширення норм та правил даного стандарту на 3D-принтери забезпечує єдиний підхід до методів випробувань як до лінійних осей так і осей обертання, однак не охоплює одночасну перевірку кількох осей. Перевірки можуть використовуватися для типових, приймальних, порівняльних випробувань, періодичних підтверджень точності, а також для корекції точності 3D-принтерів. Методика випробувань включає повторні виміри кожної позиції. На підставі проведеного аналізу визначено та розраховано доцільні параметри випробування. Оцінку їх похибок виконано відповідно до ISO/TR 230-9:2005 [2]. Виготовлення тестових деталей здійснено на модифікованому 3D-принтері з використанням готової моделі Tevo Tarantula. Подальший контроль геометричних розмірів дозволив оцінити точність виробів, що виготовляються за технологією 3D-друку.

Ключові слова: 3D-друк, 3D-принтер, вимірювання позиціонування осей, розрахунок відхилень, оцінка точності.

1. Вступ

Сучасні адитивні технології є одним із провідних напрямків цифрового виробництва. Технології пошарового синтезу зазвичай реалізуються шляхом застосування 3D-принтера, який зчитує файл цифрової моделі виробу та створює його, послідовно наносячи шари полімерного, порошкового, паперового чи іншого матеріалу [3]. Ці технології активно застосовуються для швидкого прототипування та виробництва дрібносерійних партій виробів. Швидке прототипування полегшує повторне тестування з послідовною покроковою модернізацією об'єкта. 3D-друк є недорогою альтернативою традиційним методам виготовлення різноманітних предметів, деталей, виробів що створюються одинично або в невеликій кількості.

Існує декілька видів адитивних технологій, кожна з яких використовується для вирішення різних виробничих завдань. Методи друку тонкими шарами, які у кілька разів менші за волос людини, застосовуються для прототипів ювелірних прикрас та стоматологічних протезів. Виготовлення металевих деталей ракетних двигунів та літаків відбувається за допомогою технологій що забезпечують створення особливо міцних об'єктів. Поступово 3D-друк впроваджується у будівництво. Переваги технологій пошарового синтезу – оперативність, економія сировини на виробництві, мала кількість відходів, а також можливість створення складних геометричних форм, які є важкодоступними для традиційних методів обробки. Однак за деякими параметрами 3D-друк ще не досяг рівня традиційних технологій обробки

матеріалів та виготовлення деталей конструкцій, що випускаються масово або серійно. Основними проблемами залишаються точність, якість та відтворюваність виробів.

Наразі відсутня загальноприйнята методика перевірки точності 3D-принтерів, що призводить до стримування процесу подальшого удосконалення адитивних технологій. Зокрема, для FDM-принтерів також залишається актуальним питання визначення точності отриманих виробів.

Незважаючи на заяви деяких виробників щодо характеристик випускаємих ними принтерів, таких, наприклад, як "роздільна здатність 50 мкм", зрозуміло, що без стандартизованої методики випробувань такі твердження є скоріше маркетинговими заявами, ніж технічними параметрами.

Таким чином, розробка методики оцінювання точності 3D-друку є актуальною науковою задачею, що сприятиме підвищенню якості друку, поширенню 3D-друку в нових галузях та застосуванню його у серійному виробництві.

2. Процедура друку 3D моделі

Модель тестового зразка-виробу, який запропоновано у вигляді піраміди складної форми з відповідними розмірами, створено в програмі AutoCAD 3D та представлено на рис. 1 [4-5].

Для друку даного пірамідального зразка виробу був обраний 3D-принтер Tevo tarantula. При підготовці 3D-моделі до друку на 3D-принтері використовувався популярний, безкоштовний і зручний для FDM-друку слайсер CURA. Модель друкувалася ABS пластиком з режимами, вказаними в табл. 1.

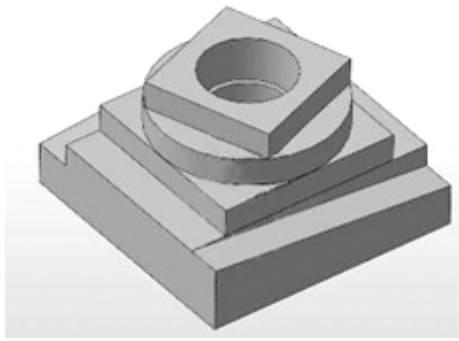


Рис. 1. Модель тестового пірамідального зразка-виробу



Рис. 2. Модель контрольного зразка-виробу з отворами

Таблиця 1 – Параметри 3D друку

Налаштування роботи з матеріалом	
Температура сопла	230°C
Температура друку першого шару	230°C
Початкова температура друку	220°C
Кінцева температура друку	215°C
Температура робочого столу	80°C
Потік	100%
Величина відкату	6,5 мм
Швидкість відкату	25 мм/с
Мінімальне переміщення при відкаті	0,8 мм
Множник для лінії заповнення	1
Перекриття заповнення	10%
Перекриття оболонок	5%
Дистанція закінчення заповнення	0,1 мм
Ширина оболонки	0,8 мм
Дистанція розширення оболонки	0,8 мм
Охолодження	
Швидкість вентилятора	100%
Швидкість	
Швидкість друку	60 мм/с
Швидкість заповнення	100 мм/с
Швидкість друку зовнішньої стінки	30 мм/с
Швидкість переміщення	120 мм/с
Швидкість друку першого шару	30 мм/с
Параметри друку	
Висота шару	0,15 мм
Висота першого шару	0,1 мм
Ширина лінії	0,4 мм
Дистанція обходу	0,625 мм
Заповнення	
Щільність заповнення	90%
Шаблон заповнення	лінії
Дистанція закінчення заповнення	0,1 мм
Відсоток перекриття заповнення	10%
Товщина шару заповнення	0,15 мм
Відсоток перекриття оболонок	5%
Налаштування кута шва	Сховати шов

За аналогічним процесом виготовлено другу тестову модель з отворами, за допомогою якої може бути досліджено точність міжосьових відстаней отворів зразка-виробу та відхилення від площинності. Модель створено в програмі AutoCAD 3D та представлено на рис. 2.

3. Контроль пірамідального тестового зразка виробу

При проведенні контролю пірамідального зразка виробу, здійснюється перевірка відхилення отворів від круглості. Під позначенням «відхилення від круглості» мається на увазі найбільша відстань від точок реального профілю до прилеглої окружності.

Відхилення від круглості D_1 – овальність чисельно визначається за формулою:

$$D_1 = \frac{D - d}{2}$$

де D – найбільший діаметр; d – найменший діаметр.

Контроль зразка виробу, передбачає визначення відхилень розмірів основи виробу.

Проведено вимірювання розмірів, позначення яких представлено на рис. 3. Табл. 2 містить результати вимірювань цих розмірів.

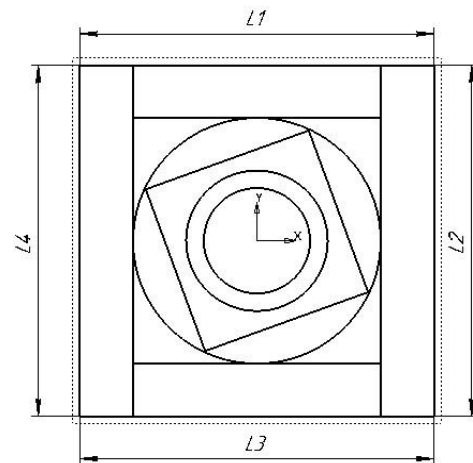


Рис. 3. Позначення розмірів підстави зразка-виробу

Таблиця 2 – Результати вимірювання

Номинальна довжина	L_1 , мм	L_2 , мм	L_3 , мм	L_4 , мм
100 мм	99,8	101,5	99,95	101,3

Розроблена тестова модель пірамідального зразка-вироба дозволяє дослідити круглість зовнішньої циліндричної поверхні.

Для знаходження відхилення від круглості необхідно виміряти вал, що перевіряється (рис. 4), в декількох перетинах та вибрати найбільший і найменший розміри. Різниця цих значень буде відхиленням від круглості. Відхиленням 3D-друку буде найбільший модуль різниці номінального діаметра друку і реального профілю. Результати вимірювання циліндричної поверхні занесені в табл. 3.

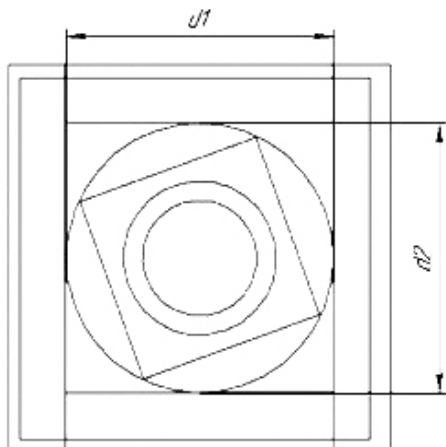


Рис.4. Схема вимірювання зовнішньої циліндричної поверхні

Таблиця 3 – Результати вимірювання циліндричної поверхні

Номінальний діаметр	Вимірювання циліндричної поверхні		Овальність деталі	Найбільше відхилення від номінального розміру
d_n , мм	d_1 , мм	d_2 , мм	$(d_1 - d_2)$, мм	$(d_n - d_2)$, мм
70	70,8	69,85	0,95	0,8

4. Площинність торцевої поверхні повернутого паралелепіпеда

Відхилення від площинності (прямолінійності) – найбільша відстань від точок реальної поверхні (профілю) до прилеглої площини (прямої) в межах нормованої ділянки. Окремими випадками відхилення від площинності і прямолінійності можуть бути опуклість і увігнутість.

Опуклість – відхилення від площинності (прямолінійності), при якому віддалення точок реальної поверхні (профілю) від прилеглої площини (прямої) зменшується від країв до середини.

Увігнутість – відхилення від площини (прямолінійності) при якому віддалення точок реальної поверхні (профілю) від прилеглої площини (прямої) збільшується від країв до середини.

4.1. Вимірювання площинності торцевої поверхні

Для вимірювання площинності торцевої поверхні деталь встановлюється базовою поверхнею

на перевірочну плиту. В даному випадку це протилежна площина вимірюваного паралелепіпеда. Вимірювальний прилад являє собою індикаторну головку закріплену на стійці, яка встановлюється на перевірочну плиту. Вимірювання відбувається згідно зі схемою, представленою на рис. 5, на якій показані точки вимірювання і площини, що перевіряються. Результати вимірювання площинності торцевої поверхні повернутого паралелепіпеда занесені в табл. 4.

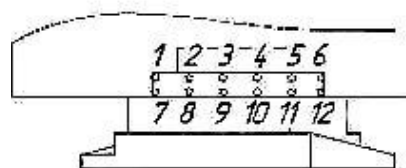
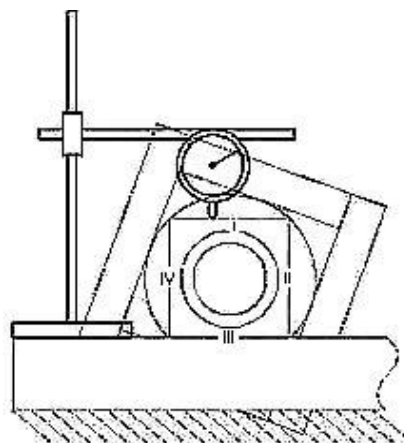


Рис. 5. Схема вимірювань площинності торцевої поверхні повернутого паралелепіпеда

Таблиця 4 – Результати вимірювання площинності торцевої поверхні повернутого паралелепіпеда

Вимірювальні точки	Номери вимірюваних площин			
	I	II	III	IV
	Вимірювання в мм			
1	0	0	0	0
2	0,06	0,03	0,03	-0,02
3	0,04	0,04	-0,01	-0,02
4	0,03	0	-0,07	0,02
5	0,1	0,01	0,1	0,1
6	0,1	-0,02	0	-0,02
7	0,08	-0,02	-0,02	-0,04
8	0,04	0	0	-0,1
9	0,04	-0,06	-0,08	-0,05
10	0,1	-0,07	-0,11	-0,12
11	-0,05	-0,08	-0,11	-0,12
12	-0,1	-0,11	-0,11	0

За результатами вимірювань були виявлені відхилення від прямолінійності в межах базової довжини по точках 1–6 і 7 –12 для кожної вимірюваної площини. Вимірювання відхилення від площинності проведено за схемами наведеними на рис. 6 – 9.

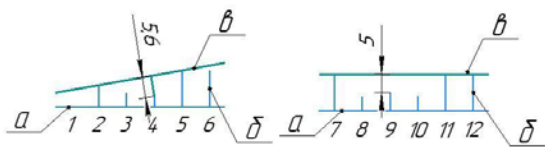


Рис. 6. Відхилення від прямолінійності для площини I

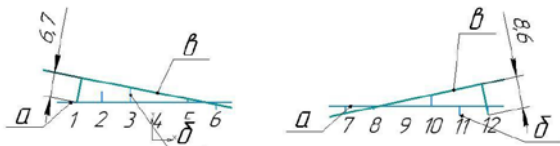


Рис. 7. Відхилення від прямолінійності для площини II

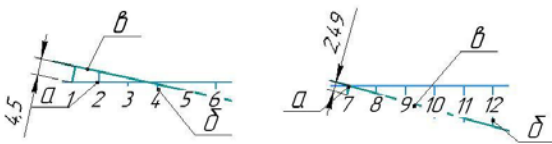


Рис. 8. Відхилення від прямолінійності для площини III

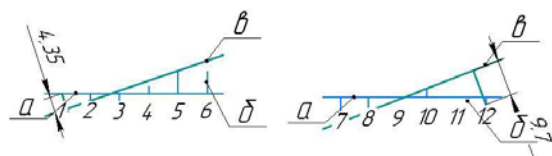


Рис. 9. Відхилення від прямолінійності для площини IV

4.2. Відхилення від паралельності торцевих поверхонь повернутого паралелепіпеда

Відхилення від паралельності представляє собою різницю найбільшої і найменшої відстаней між прилеглими площинами в межах нормованої ділянки. Площини, побудовані для сторін повернутого паралелепіпеда, в програмі для моделювання, переносяться в один робочий простір парами I і II, III і IV і розташовуються, так як на виробі. Причому відстань між площинами не має значення і може виставлятися «на око». Після чого вимірюється найбільша та найменша відстань між площинами і вираховується різниця.

Таблиця 5 містить результати вимірювання паралельності площини I і III.

Таблиця 6 містить результати вимірювання паралельності площини II і VI.

Таблиця 5 – Результати вимірювань відхилення від паралельності торцевих поверхонь I і III повернутого паралелепіпеда

Найбільша відстань між площинами, мм	Найменша відстань між площинами, мм	Різниця, мм
0,20	0,08	0,12

Таблиця 6 – Результати вимірювань відхилення від паралельності торцевих поверхонь II і IV повернутого паралелепіпеда

Найбільша відстань між площинами, мм	Найменша відстань між площинами, мм	Різниця, мм
0,09	0,02	0,07

4.3. Площинність торцевої поверхні зразка-виробу

Для вимірювання площинності торцевої поверхні, деталь встановлюється базовою поверхнею на перевірочну плиту, в даному випадку це «верх» деталі. Вимірювальний прилад являє собою індикаторну головку, закріплену на стійці, яка встановлюється на перевірочну плиту. Схема вимірювання площинності торцевої поверхні зразка-виробу представлена на рис. 10. Результати вимірювання представлені в таблиці табл. 7.

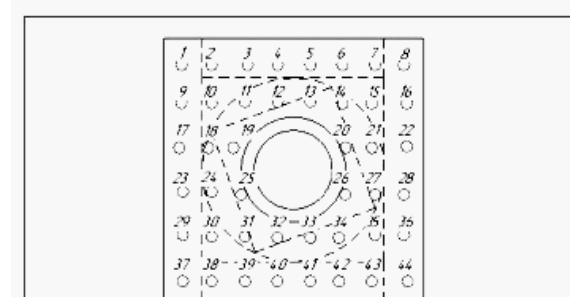
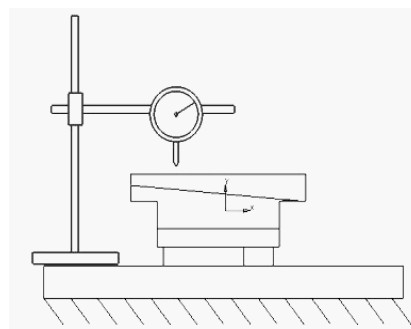


Рис. 10. Схема вимірювання паралельності торцевої поверхні повернутого паралелепіпеда

Таблиця 7 – Результати вимірювання паралельності торцевої поверхні повернутого паралелепіпеда

Вимірювання в точках в мм							
№1	№2	№3	№4	№5	№6	№7	№8
0,02	0,04	0,1	0,14	0,17	0,16	0,14	0,04
№9	№10	№11	№12	№13	№14	№15	№16
0	0,04	0,1	0,14	0,2	0,15	0,11	0,8
Вимірювання в точках в мм							
№17	№18	№19	№20	№21	№22	№23	№24
-0,15	0,4	0,14			0,15	0,1	0,1
№25	№26	№27	№28	№29	№30	№31	№32
-0,15	-0,1	0,05			0,1	0,11	0,8
№33	№34	№35	№36	№37	№38	№39	№40
-0,1	0,2	0,11	0,14	0,14	0,1	0,07	0,09
№41	№42	№43	№44	№45	№46	№47	№48
-0,11	-0,07	0	0,1	0,1	0,05	0,05	0,03

5. Висновки

Запропоновано методику оцінювання точності 3D-принтерів. Застосування цієї методики для дослідження точнісних характеристик як розробленого принтера, так і промислової моделі Tevo Tarantula, дозволило отримати кількісні результати похибок друку. Так, максимальне відхилення від базової площини до площини вимірів становить – 0,07 мм. Найбільше відхилення торцевих граней від перпендикулярності, розташованих по осях X, Y, у моделі, надрукованій на власноруч розробленому принтері, становить 0,1 мм. Найбільше відхилення торцевих граней, розташованих по осях X, Y, від перпендикулярності у моделі, надрукованій на Tevo, дорівнює 0,15 мм.

Таким чином, для оцінки точності 3D-принтерів рекомендовано використовувати комплексні перевірки згідно з ДСТУ ISO 230-2 2016 [1] та ISO 230-4:2022 [6]. Стандарт [1] дозволяє визначити точність і повторюваність позиціювання по всьому робочому об'єму 3D-принтерів за допомогою лазерного інтерферометра.

Впровадження єдиної методики дозволяє порівнювати характеристики принтерів різних виробників на основі кількісних параметрів що, безумовно, сприятиме подальшому розвитку адитивних технологій та їх застосуванню у промисловості. Це також надає можливість проводити обґрунтований вибір моделі принтера при оптимізації рішень багатьох конструкторських та технологічних задач.

Список літератури

1. ISO 230-2:2014 Test code for machine tools – Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes.
2. ISO/TR 230-9:2005 Test code for machine tools – Part 9: Estimation of measurement uncertainty for machine tool tests according to series.
3. Манжілевський О.Д., Іскович-Лотоцький Р.Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування: навч. посібник. Вінниця : БНТУ, 2021. 105 с. ISBN 978-966-641-824-4.
4. Galkin P., Golovkina L., Klyuchnyk I. Analysis of single-board computers for IoT and IIoT solutions in embedded control systems. 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2018/10/9, P. 297–302.
5. Klyuchnik I., Galkin P., Voropaeva V. Workshop: The TATU Lab & smart education. 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV). 2016/2/24, P. 400–402.
6. ISO 230-4:2022 Test code for machine tools – Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools.

Надійшла (Received) 17.12.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 08.02.2025

Відомості про авторів / About the authors

Небрат В'ячеслав Валерійович – аспірант кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв, Харківський національний університет радіоелектроніки, e-mail: viacheslav.nebrat@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2384-3813>

Nebrat Viacheslav Valeriiovych – PhD student of the Department Microelectronics, Electronic Devices and Devices, Kharkiv National University of Radio Electronics, e-mail: viacheslav.nebrat@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2384-3813>

Ключник Ігор Іванович – професор кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів, кандидат технічних наук, доцент, професор університету, Харківський національний університет радіоелектроніки, e-mail: ihor.kliuchnyk@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9352-5716>

Klyuchnyk Igor Ivanovych – professor of the Department of Electronic Devices Design and Operation, PhD, associate professor, professor of the University, Kharkiv National University of Radio Electronics, e-mail: ihor.kliuchnyk@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9352-5716>

Галкін Павло Вікторович – старший викладач кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів, Харківський національний університет радіоелектроніки, e-mail: pavlo.halkin@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0558-6448>

Galkin Pavlo Viktorovych – Senior Lecturer of the Department of Electronic Devices Design and Operation, Kharkiv National University of Radio Electronics, e-mail: pavlo.halkin@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0558-6448>

Романчук Віталій Сергійович – асистент кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів, e-mail: vitalii.romanchuk@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7240-175X>

Romanchuk Vitalii Serhiiiovych – Assistant of the Department of Electronic Devices Design and Operation, Kharkiv National University of Radio Electronics, e-mail: vitalii.romanchuk@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7240-175X>

Ключник Ігор Ігорович – аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Харківський національний університет радіоелектроніки, e-mail: ihor.kliuchnyk1@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3718-0584>

Kliuchnyk Igor Igorovych – PhD student of the Department of Information and Measurement Technology, Kharkiv National University of Radio Electronics, e-mail: ihor.kliuchnyk1@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3718-0584>

Manufacturing parts accuracy evaluation of using 3D printing technology

Nebrat V.V., Klyuchnyk I.Iv., Galkin P.V., Romanchuk V.S., Kliuchnyk I.Ig.

Abstract

The accuracy of a 3D printer was analyzed in accordance with ISO 230-2:2005. This standard provides norms and guidelines for testing, including the evaluation of the accuracy and repeatability of 3D printer axis positioning through direct incremental measurements of individual axes. The testing methods are applicable to both linear and rotational axes. These tests can be used for typical, acceptance, comparative, periodic accuracy confirmations, and accuracy adjustments of the 3D printer, among other purposes. The testing methodology involves repeated measurements at each position. Based on the conducted analysis, the relevant testing parameters were determined and calculated, with their errors assessed in accordance with ISO/TR 230-9. Parts were manufactured on a custom-developed 3D printer using the Tevo Tarantula model as a baseline. Subsequent control of the geometric dimensions of these parts allowed for an evaluation of the accuracy of products produced using 3D printing technology.

Key words: 3D printing, 3D printer, axis positioning measurement, deviation calculation, accuracy evaluation