

УДК: 621.762; 006.32

DOI 10.36910/775.24153966.2023.76.3

Т.М. Павлиго*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України***СТАНДАРТИ ДЛЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА (ОГЛЯД)**

У міру того, як індустрія адитивного виробництва рухається до промислового виробництва, потреба у стандартах, що охоплюють всі аспекти технології, стає все більш актуальною. У статті проведено огляд міжнародних стандартів для адитивного виробництва.

Ключові слова: стандартизація, адитивне виробництво.

T.M. Pavlyho**THE STANDARDS FOR ADDITIVE MANUFACTURING (REVIEW)**

As the additive manufacturing industry moves toward industrial production, the need for standards that cover all aspects of the technology becomes more pressing. The article reviews international standards for additive manufacturing.

Keywords: standardization, additive manufacturing.

Постановка проблеми. Адитивне виробництво (АМ) – це узагальнена назва технологій, які передбачають виготовлення виробу за даними тривимірної цифрової моделі методом пошарового додавання. У порівнянні з традиційними методами, коли деталі відливаються в задані форми або вирізаються з масивного блоку, АМ засновано на принципі нашарування рідин, порошків, підкладок та плівок для створення тривимірних структур без використання форми. Перспективність технології визначається тим, що питома витрата матеріалів на виробництво деталей при використанні адитивних методів зменшується майже у 10 разів, та у середньому у 5 разів знижуються трудовитрати. Характерною тенденцією останніх років є постійний ріст асортименту та кількості деталей, що виготовляються за адитивними технологіями. І особливо важливим є прогрес у найбільш важкому та інноваційному секторі АМ-технологій – «вирощуванні» виробів із металу. Наявність міжнародних стандартів вкрай потрібна для сприяння широкому використанню процесу та регулюванню оцінки існуючих виробів.

Мета статті – огляд міжнародних стандартів для адитивного виробництва.

Викладення основного матеріалу. Технологія адитивного виробництва пропонує безліч новаторських можливостей для різних компаній по всьому світу. Більшість великих компаній, які використовують АМ для виробництва деталей почали створювати свій власний внутрішній набір матеріалів та інструкцій через відсутність стандартів. Тому знання про процеси адитивного виробництва та створення загальних технічних стандартів для цієї галузі є дуже важливим питанням сьогодення.

Стандартизація — це трудомістке завдання, яке вирішують зацікавлені сторони через участь у різних комітетах зі стандартизації по всьому світу. Зрештою, всі сторони, від виробників адитивних машин та порошків до виробників деталей та кінцевих користувачів, виграють від цих стандартів, оскільки вони є запорукою надійності та довіри до технології.

У 2009 році ASTM International створила комітет F42 [1] з адитивних технологій виробництва. У тому ж році розпочалася національна діяльність у Німеччині та Великій Британії. ISO (Міжнародна організація зі стандартизації) розпочала свою діяльність у рамках TC 261 [2] у 2011 році, а в липні 2013 року обидві організації, ASTM та ISO розробили спільний план розробки стандартів. Метою цієї угоди є усунення дублювання зусиль при максимальному розподілі ресурсів у галузі адитивного виробництва.

Тож на сьогодні є дві основні міжнародні установи, що готують, розробляють та публікують стандарти, щодо адитивного виробництва – це ISO та ASTM International. Європейський комітет зі стандартизації (CEN) [3] також сформував комітети зі стандартизації АМ на регіональному рівні. Крім того, існує низка національних комітетів, пов'язаних зі стандартизацією. До них відносяться BSI (Британський інститут стандартів) [4] та французька AFNOR [5]. У Німеччині національний орган стандартизації DIN (Deutsches Institut für Normung) [6] публікує стандарти, щодо АМ, у співпраці з VDMA (Verband deutscher Maschinen-und Anlagenbauer) [7] та VDI (Verein Deutscher Ingenieure) [8].

У 2020 році ISO/TC 261 у свою чергу уклав додаткові офіційні угоди про співпрацю із 30 комітетами та організаціями.

Гармонізація різних підходів для досягнення загального набору загальноприйнятих стандартів в усьому світі є величезною проблемою. На сьогоднішній день опубліковано стандарти, що охоплюють такі галузі адитивного виробництва:

- термінологія, номенклатура та формати даних;
- матеріали;
- випробування.

У таблиці 1 наведено опубліковані стандарти для адитивного виробництва.

Табл. 1.

Опубліковані міжнародні стандарти в галузі адитивного виробництва [9]

з/п	Позначення та назва стандарту	
	2	3
	ISO 17295:2023	Additive manufacturing. General principles. Part positioning, coordinates and orientation (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Позичонування деталей, координати та орієнтація)
	ISO 17296-2:2015	Additive manufacturing. General principles. Part 2: Overview of process categories and feedstock (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Частина 2: Огляд категорій процесів і вихідної сировини)
	ISO 17296-3:2014	Additive manufacturing. General principles. Part 3: Main characteristics and corresponding test methods (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Частина 3: Основні характеристики та відповідні методи випробувань)
	ISO/ASTM 52900:2021	Additive manufacturing. General principles. Fundamentals and vocabulary (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Основи виробництва та словник термінів)
	ISO/ASTM 52901:2017	Additive manufacturing. General principles. Requirements for purchased AM parts (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Вимоги до придбаних запчастин AM)
	ISO/ASTM 52902:2019	Additive manufacturing. Test artifacts. Geometric capability assessment of additive manufacturing systems (Адитивне виробництво. Випробні артефакти. Оцінка геометричних можливостей систем адитивного виробництва)
	ISO/ASTM 52903-1:2020	Additive manufacturing. Material extrusion-based additive manufacturing of plastic materials. Part 1: Feedstock materials (Адитивне виробництво. Адитивне виробництво пластичних матеріалів на основі екструзії матеріалів. Частина 1: Вихідні матеріали)
	ISO/ASTM 52903-2:2020	Additive manufacturing. Material extrusion-based additive manufacturing of plastic materials. Part 2: Process equipment (Адитивне виробництво. Адитивне виробництво пластичних матеріалів на основі екструзії матеріалів. Частина 2: Технологічне обладнання)
	ISO/ASTM 52904:2019	Additive manufacturing. Process characteristics and performance. Practice for metal powder bed fusion process to meet critical applications (Адитивне виробництво. Характеристики процесу та продуктивність. Практика процесу плавлення шару металевих порошків для критичних застосувань)
0	ISO/ASTM 52906:2022	TR Additive manufacturing. Non-destructive testing. Intentionally seeding flaws in metallic parts (Адитивне виробництво. Неруйнівний контроль. Навмисне виявлення дефектів у металевих частинах)
1	ISO/ASTM 52907:2019	Additive manufacturing. Feedstock materials. Methods to characterize metal powders (Адитивне виробництво. Вихідні матеріали. Методи характеристики металевих порошків)

2	ISO/ASTM 52909:2022	Additive manufacturing of metals. Finished part properties. Orientation and location dependence of mechanical properties for metal powder bed fusion (Адитивне виробництво металів. Властивості готової частини. Орієнтація та залежність розташування механічних властивостей для розплавленого шару металевих порошків)
3	ISO/ASTM 52910:2018	Additive manufacturing. Design. Requirements, guidelines and recommendations (Адитивне виробництво. Проектування. Вимоги, вказівки та рекомендації)
4	ISO/ASTM 52911-1:2019	Additive manufacturing. Design. Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals (Адитивне виробництво. Проектування. Частина 1: Розплавлення металів у порошковому шарі за допомогою лазера)
5	ISO/ASTM 52911-2:2019	Additive manufacturing. Design. Part 2: Laser-based powder bed fusion of polymers (Адитивне виробництво. Проектування. Частина 2: Лазерне сплавлення полімерів у порошковому шарі)
6	ISO/ASTM 52911-3:2023	Additive manufacturing. Design. Part 3: PBF-EB of metallic materials (Адитивне виробництво. Проектування. Частина 3: PBF-EB металевих матеріалів)
7	ISO/ASTM 52912:2020	TR Additive manufacturing. Design. Functionally graded additive manufacturing (Адитивне виробництво. Проектування. Функціонально ґрадуйоване адитивне виробництво)
8	ISO/ASTM 52915:2020	Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2 (Специфікація формату файлу адитивного виробництва (AMF) Версія 1.2)
9	ISO/ASTM 52916:2022	TR Additive manufacturing for medical. Data. Optimized medical image data (Адитивне виробництво для медицини. Дані. Оптимізовані дані медичних зображень)
0	ISO/ASTM 52917:2022	TR Additive manufacturing. Round robin testing. General guidelines (Адитивне виробництво. Циклічне тестування. Загальні вказівки)
1	ISO/ASTM 52925:2022	Additive manufacturing of polymers. Feedstock materials. Qualification of materials for laser-based powder bed fusion of parts (Адитивне виробництво полімерів. Вихідні матеріали. Атестація матеріалів для лазерного порошкового зварювання деталей)
2	ISO/ASTM 52930:2021	TS Additive manufacturing. Qualification principles. Installation, operation and performance (IQ/OQ/PQ) of PBF-LB equipment (Адитивне виробництво. Принципи відповідності. Монтаж, експлуатація та продуктивність (IQ/OQ/PQ) обладнання PBF-LB)
3	ISO/ASTM 52931:2023	Additive manufacturing of metals. Environment, health and safety. General principles for use of metallic materials (Адитивне виробництво металів. Навколишнє середовище, здоров'я та безпека. Загальні принципи використання металевих матеріалів)
4	ISO/ASTM 52936-1:2023	Additive manufacturing of polymers. Qualification principles. Part 1: General principles and preparation of test specimens for PBF-LB (Адитивне виробництво полімерів. Принципи оцінки. Частина 1: Загальні принципи та підготовка випробувальних зразків для PBF-LB)
5	ISO/ASTM 52941:2020	Additive manufacturing. System performance and reliability. Acceptance tests for laser metal powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application (Адитивне виробництво. Продуктивність і надійність системи. Приймальні випробування лазерних машин для плавлення металевих порошкових шарів у металевих матеріалах для аерокосмічного застосування)

6	ISO/ASTM 52942:2020	Additive manufacturing. Qualification principles. Qualifying machine operators of laser metal powder bed fusion machines and equipment used in aerospace applications (Адитивне виробництво. Принципи кваліфікації. Кваліфіковані оператори машин для лазерного плавлення металевих порошкових шарів та обладнання, що використовується в аерокосмічній галузі)
7	ISO/ASTM 52950:2021	Additive manufacturing. General principles. Overview of data processing (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Огляд обробки даних)

Перші з опублікованих стандартів стосувались термінології, бо існувало дуже багато різних термінів та аббревіатур для технології АМ. Загальним терміном для всієї галузі адитивного виробництва є 3D-друк, що в основному пов'язане з ажіотажем навколо недорогих домашніх принтерів. Адитивне виробництво передбачає більш точне виробництво кінцевої деталі і складніші процеси виготовлення металевих компонентів.

Машини, які за адитивними технологіями створюють деталі з металу можна вважати верхом інженерного мистецтва, адже в них сконцентровано найпередовіші знання з металургії, лазерної техніки, оптики, електроніки, систем управління, вимірювальних пристроїв, механіки, вакуумної техніки та інших.

Розглянемо стандарти щодо загальних принципів адитивного виробництва та виробництва виробів із металевих порошків.

ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing. General principles. Fundamentals and vocabulary (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Основи виробництва та словник термінів) [10].

У цьому документі встановлюють та визначають терміни, які використовують в технології адитивного виробництва (АМ), із застосуванням принципу адитивного формування та створення фізичних тривимірних (3D) геометрій шляхом послідовного додавання матеріалу. Терміни класифіковано за сферами застосування.

ISO 17296-3:2014 Additive manufacturing. General principles. Part 3: Main characteristics and corresponding test methods (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Частина 3: Основні характеристики та відповідні методи випробувань) [11].

Цей документ охоплює основні вимоги до випробувань деталей, виготовлених за допомогою процесів адитивного виробництва. Він визначає основні характеристики якості деталей, визначає відповідні процедури випробувань та рекомендує обсяг та зміст випробувань та договорів на поставку. Він призначений для виробників машин, постачальників сировини, користувачів машин, постачальників запчастин та клієнтів, щоб полегшити спілкування за основними характеристиками якості. Він застосовується скрізь, де застосовують процеси адитивного виробництва.

ISO/ASTM 52950:2021 Additive manufacturing. General principles. Overview of data processing (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Огляд обробки даних) [12].

Цей документ охоплює основні аспекти обміну даними для адитивного виробництва. Він уточнює терміни та визначення, які дозволяють обмінюватися інформацією з описом геометрії або деталей, щоб їх можна було виготовляти адитивними методами. У методі обміну даними вказують тип файлу, форматування даних і те, для чого їх можна використати. Також цей документ дозволяє вказати відповідний формат для обміну даними, описує існуючі розробки для адитивного виробництва 3D геометрій, описує існуючі формати файлів, що використовуються як частина існуючих розробок, і дозволяє зрозуміти необхідні функції для обміну даними для тих, хто приймає цей документ. Він призначений для користувачів і виробників процесів адитивного виробництва та відповідних програмних систем. Застосовують його виробники систем і обладнання адитивного виробництва, включаючи програмне забезпечення; інженери-програмісти, що займаються системами CAD/CAE; розробники систем зворотного проектування; випробувальні лабораторії, що порівнюють задану та фактичну геометрії.

ISO 17295:2023 Additive manufacturing. General principles. Part positioning, coordinates and orientation (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Позичування деталей, координати та орієнтація) [13].

Цей документ надає специфікації та ілюстрації для позиціонування та орієнтації деталей щодо систем координат і методології тестування для технологій адитивного виробництва (АМ) з метою

стандартизації методу представлення, який використовують користувачі АМ, виробники, дослідники, освітяни, преса/ засоби масової інформації та інші, особливо під час звітування про результати тестування деталей, виготовлених на системах АМ. Подані у стандарті специфікації стосуються систем координат, розташування та орієнтації частин. Він відповідає принципам ISO 841 і пояснює конкретну адаптацію цих принципів для адитивного виробництва.

ISO 17296-2:2015 Additive manufacturing. General principles. Part 2: Overview of process categories and feedstock (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Частина 2: Огляд категорій процесів і вихідної сировини) [14].

Цей документ описує основи процесу адитивного виробництва (АМ). У ньому подають огляд існуючих категорій процесів, які є невичерпними через розвиток нових технологій. Стандарт пояснює, як різні категорії процесів використовують різні типи матеріалів для формування геометрії виробу. Він також описує, який тип матеріалу використовують в різних категоріях процесу. Специфікації вихідного матеріалу та вимоги до частин, виготовлених шляхом поєднання різних процесів і вихідного матеріалу, будуть надані в наступних частинах цього стандарту.

ISO/ASTM 52901:2017 Additive manufacturing. General principles. Requirements for purchased AM parts (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Вимоги до придбаних запчастин АМ) [15].

Цей документ визначає та конкретизує вимоги до придбаних деталей, виготовлених шляхом адитивного виробництва. У стандарті є вказівки щодо елементів, якими необхідно обмінюватися між замовником і постачальником деталей під час замовлення, включаючи інформацію про замовлення клієнта, дані визначення деталей, вимоги до сировини, кінцеві характеристики та властивості деталей, вимоги до перевірки та методи приймання деталей. Цей стандарт є основою для отримання деталей, виготовлених шляхом адитивного виробництва, які відповідають мінімальним вимогам прийнятності. Більш суворі вимоги до деталей можна вказати шляхом додавання однієї або кількох додаткових вимог під час замовлення.

ISO/ASTM 52902:2019 Additive manufacturing. Test artifacts. Geometric capability assessment of additive manufacturing systems (Адитивне виробництво. Випробні артефакти. Оцінка геометричних можливостей систем адитивного виробництва) [16].

Цей документ охоплює загальний опис геометрії зразків для порівняльного аналізу, а також кількісні та якісні вимірювання, які необхідно провести на зразках для порівняльного аналізу для оцінки ефективності систем адитивного виробництва їх можливостей та калібрування.

Зразок(и) для порівняльного аналізу в основному використовують для кількісної оцінки геометричних характеристик системи АМ. У цьому документі описано набір тестових геометрій, кожна з яких призначена для дослідження одного або кількох конкретних показників ефективності та кілька прикладів конфігурацій цих геометрій у тестових зразках. Він визначає кількість і якість тестових геометрій, що підлягають вимірюванню, але не диктує конкретні методи вимірювання. Різні програми користувача можуть вимагати різного рівня продуктивності. У цьому документі обговорюють приклади конфігурацій функцій, а також вимоги до невизначеності вимірювань, щоб продемонструвати перевірку низького та високого класу та продуктивності. У цьому документі не розглядають конкретні процедури чи параметри машини для виготовлення випробувального зразка, які охоплюють ASTM F 2971 та іншими відповідними специфікаціями процесу.

ISO/ASTM 52904:2019 Additive manufacturing. Process characteristics and performance. Practice for metal powder bed fusion process to meet critical applications (Адитивне виробництво. Характеристики процесу та продуктивність. Практика процесу плавлення шару металевого порошку для критичних застосувань) [17].

Цей документ описує роботу та контроль виробництва машин і процесів для плавлення металевого порошку (PBF) для критичних застосувань, таких як комерційні аерокосмічні компоненти та медичні імпланти. Вимоги, що містяться в цьому документі, застосовують до виробничих компонентів і зразків для механічних випробувань з використанням плавлення порошкового шару (PBF) як лазерними, так і електронними променями.

ISO/ASTM TR 52906:2022 Additive manufacturing. Non-destructive testing. Intentionally seeding flaws in metallic parts (Адитивне виробництво. Неруйнівний контроль. Навмисне виявлення дефектів у металевих частинах) [18].

Цей документ слугує найкращою практикою для ідентифікації дефектів у металевих сплавах, які можна виявити неруйнівним методом, у процесах PBF та DED. Описано три категорії дефектів: недоліки процесу через проектування САПР; маніпулювання параметрами побудови; субтрактивне виробництво.

До них належать дефекти, що наявні в матеріалах, які піддавали термічному обробленню або гарячому ізостатичному пресуванню, а також ті дефекти, які можна виявити завдяки операціям заключної обробки.

Стандартизація вихідних матеріалів для адитивного виробництва є важливим питанням для досягнення надійних властивостей компонентів та процесів. Металеві порошки, як сировина вимагають чіткої технології виготовлення та обробки, і найменші відхилення у властивостях порошку можуть мати величезний вплив на технологічність та властивості компонентів. Для порошків визначають ряд важливих характеристики таких як, розмір частинок, текучість або сипкість, густину, кут природного укусу, вологість.

ISO/ASTM 52907:2019 Additive manufacturing. Feedstock materials. Methods to characterize metal powders (Адитивне виробництво. Вихідні матеріали. Методи характеристики металевих порошків) [19].

Цей документ містить технічні специфікації для металевих порошків, призначених для використання в адитивному виробництві, і охоплює такі аспекти: документування та простежуваність; відбір проб; гранулометричний склад; хімічний склад; характерні густини; морфологія; сипучість; забруднення; пакування та зберігання. Крім того, цей документ містить спеціальні вимоги до металевих порошків, що використовуються у адитивному виробництві.

ISO/ASTM 52909:2022 Additive manufacturing of metals. Finished part properties. Orientation and location dependence of mechanical properties for metal powder bed fusion (Адитивне виробництво металів. Властивості готової частини. Орієнтація та залежність розташування механічних властивостей для розплавленого шару металевого порошку) [20].

Цей документ охоплює додаткові вказівки щодо оцінки механічних властивостей, включаючи статичні/квазістатичні та динамічні випробування металів, виготовлених за допомогою адитивного виробництва (AM), а також вказівки щодо звітності.

У цьому документі є посилання на вже існуючі стандарти. Наведені вказівки щодо вимірювання механічних властивостей та звітності для металевих зразків, а також для зразків, вирізаних із частин. Цей документ розширює номенклатуру ISO/ASTM 52900 і принципи ISO/ASTM 52921 і поширює їх на адитивне виробництво із металів.

ISO/ASTM 52910:2018 Additive manufacturing. Design. Requirements, guidelines and recommendations (Адитивне виробництво. Проектування. Вимоги, вказівки та рекомендації) [21].

У цьому документі містяться вимоги, вказівки та рекомендації щодо використання адитивного виробництва (AM) у проектуванні виробів. Його застосовують під час проектування всіх типів виробів, пристроїв, систем, компонентів або частин, які виготовляють будь-яким методом AM.

ISO/ASTM 52911-1:2019 Additive manufacturing. Design. Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals (Адитивне виробництво. Проектування. Частина 1: Розплавлення металів у порошковому шарі за допомогою лазера) [22].

У цьому документі описано особливості лазерного плавлення металів у порошковому шарі (PBF-LB/M) і надано детальні рекомендації щодо проектування. Він містить сучасний огляд інструкцій щодо проектування і розширює сферу застосування ISO/ASTM 52910.

ISO/ASTM 52911-3:2023 Additive manufacturing. Design. Part 3: PBF-EB of metallic materials (Адитивне виробництво. Проектування. Частина 3: PBF-EB металевих матеріалів) [23].

У цьому документі описано особливості електронно-променевого порошкового плавлення металів (PBF-EB/M) і надано детальні рекомендації щодо проектування. Він містить сучасний огляд інструкцій щодо проектування і розширює сферу застосування ISO/ASTM 52910.

ISO/ASTM TR 52912:2020 Additive manufacturing. Design. Functionally graded additive manufacturing (Адитивне виробництво. Проектування. Функціонально градуйоване адитивне виробництво) [24].

Використання адитивного виробництва (AM) дозволяє виготовляти геометрично складні компоненти шляхом точного осадження матеріалів у контрольований спосіб. Технологічний прогрес у апаратному забезпеченні, програмному забезпеченні AM, а також відкриття нових ринків вимагають більшої гнучкості та більшої ефективності сучасних продуктів, заохочуючи дослідження нових матеріалів із функціональними градаціями та високопродуктивними можливостями. Це було названо функціонально градієнтним адитивним виробництвом (FGAM), пошаровою технікою виготовлення, яка передбачає поступове змінення співвідношення організації матеріалу в компоненті для виконання призначеної функції. Оскільки дослідження в цій галузі викликають інтерес у всьому світі,

інтерпретації концепції FGAM потребують більшого роз'яснення. Цей документ надає концептуальне розуміння FGAM. У ньому розглянуто сучасний рівень техніки та можливості технології FGAM разом із її складними технологічними перешкодами та обмеженнями; оцінено формати обміну даними та представлено деякі нещодавні програми, а також дані рекомендації щодо можливих стратегій подолання бар'єрів і майбутніх напрямків розвитку FGAM.

ISO/ASTM 52915:2020 Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2 (Специфікація формату файлу адитивного виробництва (AMF) Версія 1.2) [25].

Цей документ містить специфікацію для формату файлів адитивного виробництва (AMF), формату обміну адресами поточних і майбутніх потреб технології адитивного виробництва. AMF можна підготувати, відобразити та передати за умови дотримання вимог цієї специфікації. При підготовці в структурованому електронному форматі необхідно суворе дотримання схеми розширюваної мови розмітки (XML) необхідне для підтримки взаємодії, сумісної зі стандартами.

ISO/ASTM TR 52917:2022 Additive manufacturing. Round robin testing. General guidelines (Адитивне виробництво. Циклічне тестування. Загальні вказівки) [26].

Цей документ зосереджений на управлінні циклічним дослідженням (RRS) і надає вказівки щодо розробки обсягу, планування та виконання дослідження RRS. Він надає вказівки щодо визначення вихідної сировини, операцій машини, засобів керування процесом та операцій після обробки до початку дослідження. Організатори тестування можуть визначити під час дослідження контрольовані та додаткові параметри. Цей документ також надає вказівки щодо вибору та використання методів тестування. RRS досліджує варіації, виявлені в методах АМ. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення технологій АМ.

RRS, як описано в цьому документі, відрізняється від міжлабораторного порівняння, оскільки міжлабораторне дослідження встановлює варіабельність методу вимірювання, коли його проводять кілька користувачів на добре контрольованому зразку.

ISO/ASTM TS 52930:2021 Additive manufacturing. Qualification principles. Installation, operation and performance (IQ/OQ/PQ) of PBF-LB equipment (Адитивне виробництво. Принципи відповідності. Монтаж, експлуатація та продуктивність (IQ/OQ/PQ) обладнання PBF-LB) [27].

У цьому документі розглядають питання відповідності встановлення (IQ), відповідності експлуатації (OQ) і відповідності продуктивності (PQ), безпосередньо пов'язані з адитивним виробництвом, які безпосередньо впливають на консолідацію матеріалу. Перші три елементи валідації процесу, відображення процесу, оцінка ризику та планування валідації є необхідними передумовами для встановлення характеристик машини. Цей документ охоплює питання, безпосередньо пов'язані з обладнанням АМ. Питання щодо фізичних засобів, персоналу, процесу та матеріалів включено лише в обсязі, необхідному для визначення характеристик машини.

ISO/ASTM 52931:2023 Additive manufacturing of metals. Environment, health and safety. General principles for use of metallic materials (Адитивне виробництво металів. Навколишнє середовище, здоров'я та безпека. Загальні принципи використання металевих матеріалів) [28].

У цьому документі містяться вказівки та вимоги щодо оцінки ризиків у адитивному виробництві із використанням металевих порошків та впровадження заходів запобігання таких ризиків. Ризики, що описані у цьому документі, стосуються всіх етапів виробничого процесу, включаючи управління відходами. Цей документ не встановлює вимог до конструкції машин і обладнання, що використовуються для адитивного виробництва.

ISO/ASTM 52941:2020 Additive manufacturing. System performance and reliability. Acceptance tests for laser metal powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application (Адитивне виробництво. Продуктивність і надійність системи. Приймальні випробування лазерних машин для плавлення металевих порошкових шарів у металевих матеріалах для аерокосмічного застосування) [29].

Цей документ визначає вимоги та методи випробувань для оцінки та повторної оцінки лазерних променевих машин для сплавлення шарів металевих порошків для аерокосмічного застосування у адитивному виробництві. Його також можна використовувати для перевірки характеристик машини під час періодичних перевірок або після технічного обслуговування та ремонту.

ISO/ASTM 52942:2020 Additive manufacturing. Qualification principles. Qualifying machine operators of laser metal powder bed fusion machines and equipment used in aerospace applications (Адитивне виробництво. Принципи кваліфікації. Кваліфікація операторів машин та

обладнання для лазерного плавлення металевих порошкових шарів, що використовується в аерокосмічній галузі) [30].

У цьому документі встановлюють вимоги до кваліфікації операторів лазерних машин та обладнання для плавлення металевих порошків для адитивного виробництва, що застосовують у аерокосмічній галузі. Цей документ застосовують, якщо кваліфікаційне оцінювання оператора вимагається контрактом або стандартами застосування в галузі аерокосмічної галузі.

ISO/ASTM 52950:2021 Additive manufacturing. General principles. Overview of data processing (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Огляд обробки даних) [31].

Цей документ охоплює основні аспекти обміну даними для адитивного виробництва. Він уточнює терміни та визначення, які дозволяють обмінюватися інформацією з описом геометрії або деталей, щоб їх можна було виготовляти адитивними методами. У методі обміну даними вказують тип файлу, форматування даних і те, для чого їх можна використати. Також цей документ дозволяє вказати відповідний формат для обміну даними, описує існуючі розробки для адитивного виробництва 3D геометрій, описує існуючі формати файлів, що використовуються як частина існуючих розробок, і дозволяє зрозуміти необхідні функції для обміну даними для тих, хто приймає цей документ. Він призначений для користувачів і виробників процесів адитивного виробництва та відповідних програмних систем. Застосовують його виробники систем і обладнання адитивного виробництва, включаючи програмне забезпечення; інженери-програмісти, що займаються системами CAD/CAE; розробники систем зворотного проектування; випробувальні лабораторії, що порівнюють задану та фактичну геометрію.

Адитивне виробництво деталей із металів сьогодні досягло статусу, за якого воно робить крок до індустріалізації. Зокрема, стоматологічна та аерокосмічна галузі вже перейшли на виробництво у промислових масштабах, і їм потрібні стандарти для властивостей матеріалів, процедур випробувань та багато іншого.

Попереду ще багато завдань, щоб зробити цю технологію успішною. Зокрема, тісний зв'язок між параметрами виробничого процесу та властивостями матеріалу потребує особливої уваги порівняно із звичайними процесами обробки металів тиском. Також необхідно враховувати вплив різних систем машин та умов виробництва, що призводить до різних властивостей.

Крім того, властивості матеріалу сильно залежать від вихідного матеріалу (наприклад, металевого порошку) у поєднанні з надійним набором параметрів у межах технологічних операцій. Знаючи це, дуже важливо перевіряти властивості та створювати надійні виробничі процеси для адитивного виробництва. Системи управління якістю також потребують уваги з погляду на правила контролю та перевірки.

Міжнародні організації зі стандартизації не припиняють роботу над створенням нових стандартів для адитивного виробництва. У таблиці 2 наведено проекти стандартів, над якими ведеться робота.

З розвитком адитивного виробництва зріс інтерес до металевих деталей, що виготовляються цими методами, а це у свою чергу поставило ряд питань перед академічним та науковим світом з розроблення нових сплавів, оптимізації параметрів процесів та геометрії виробів, питанням надійності виготовлених деталей.

Україна не відстає від високотехнологічних країн у впровадженні адитивних технологій.

Науково-дослідні колективи Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України, Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Національного авіаційного університету, Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України ведуть свої дослідження в області нових матеріалів та технологій для адитивного виробництва. В Україні існує декілька успішних стартапів із розроблення 3D-принтерів для друку керамічними та металевими матеріалами.

В Україні, на жаль, ще не створено технічного комітету зі стандартизації адитивних технологій, який би займався створенням національних та впровадженням міжнародних стандартів у цій галузі. Такий комітет можна створити на базі Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України, тим більше, що при інституті діє Технічний комітет стандартизації «Порошкова металургія» (ТК 54), роботу якого можна орієнтувати на забезпечення впровадження адитивних технологій, з метою розробки вітчизняних та гармонізації міжнародних та європейських стандартів.

Міжнародні стандарти можуть допомогти гарантувати рівень відтворюваності та дати бізнесу та виробникам такі необхідні гарантії.

Табл. 2.

Проекти міжнародних стандартів в галузі адитивного виробництва [32]

з/п	Позначення та назва стандарту	
	2	3
	ISO/DIS 27548	Additive manufacturing of plastics. Environment, health, and safety. Test method for determination of particle and chemical emission rates from desktop material extrusion 3D printer (Адитивне виробництво пластмас. Навколишнє середовище, здоров'я та безпека. Метод випробувань для визначення інтенсивності викидів частинок і хімічних речовин із настільного 3D-принтера для екструзії матеріалів)
	ISO/ASTM FDIS 52902	Additive manufacturing. Test artifacts. Geometric capability assessment of additive manufacturing systems (Адитивне виробництво. Тестові артефакти. Оцінка геометричних можливостей систем адитивного виробництва)
	ISO/ASTM DIS 52904	Additive manufacturing of metals. Process characteristics and performance. Metal powder bed fusion process to meet critical applications (Адитивне виробництво металів. Характеристики процесу та продуктивність. Процес плавлення шару металевого порошку для критичних застосувань)
	ISO/ASTM DTR 52905	Additive manufacturing of metals. Non-destructive testing and evaluation. Defect detection in parts (Адитивне виробництво металів. Неруйнівний контроль та оцінка. Виявлення дефектів деталей)
	ISO/ASTM DIS 52908	Additive manufacturing of metals. Finished Part properties. Post-processing, inspection and testing of parts produced by powder bed fusion (Адитивне виробництво металів. Властивості готової частини. Подальше оброблення, перевірка та випробування деталей, виготовлених методом порошкового сплавлення)
	ISO/ASTM DIS 52910	Additive manufacturing. Design. Requirements, guidelines and recommendations (Адитивне виробництво. Дизайн. Вимоги, вказівки та рекомендації)
	ISO/ASTM DTR 52913-1	Additive manufacturing. Feedstock materials. Part 1: Parameters for characterization of powder flow properties (Адитивне виробництво. Вихідні матеріали. Частина 1: Параметри для характеристики властивостей текучості порошку)
	ISO/ASTM CD TR 52918	Additive manufacturing. Data formats. File format support, ecosystem and evolutions (Адитивне виробництво. Формати даних. Підтримка форматів файлів, екосистема та еволюція)
	ISO/ASTM CD 52919	Additive manufacturing. Qualification principles. Test method of sand moulds for metal casting (Адитивне виробництво. Принципи кваліфікації. Метод випробування піщаних форм для лиття металу)
0	ISO/ASTM FDIS 52920	Additive manufacturing. Qualification principles. Requirements for industrial additive manufacturing processes and production sites (Адитивне виробництво. Принципи кваліфікації. Вимоги до промислових процесів адитивного виробництва і виробничих ділянок)
1	ISO/ASTM FDIS 52924	Additive manufacturing of polymers. Qualification principles. Classification of part properties (Адитивне виробництво полімерів. Принципи кваліфікації. Класифікація властивостей деталей)
2	ISO/ASTM DIS 52926-1	Additive Manufacturing of metals. Qualification principles. Part 1: General qualification of operators (Адитивне виробництво

		металів. Принципи кваліфікації. Частина 1: Загальна кваліфікація операторів)
3	ISO/ASTM DIS 52926-2	Additive Manufacturing of metals. Qualification principles. Part 2: Qualification of operators for PBF-LB (Адитивне виробництво металів. Принципи кваліфікації. Частина 2. Кваліфікація операторів для PBF-LB)
4	ISO/ASTM DIS 52926-3	Additive Manufacturing of metals. Qualification principles. Part 3: Qualification of operators for PBF-EB (Адитивне виробництво металів. Принципи кваліфікації. Частина 3. Кваліфікація операторів для PBF-EB)
5	ISO/ASTM DIS 52926-4	Additive Manufacturing of metals. Qualification principles. Part 4: Qualification of operators for DED-LB (Адитивне виробництво металів. Принципи кваліфікації. Частина 4: Кваліфікація операторів для DED-LB)
6	ISO/ASTM DIS 52926-5	Additive Manufacturing of metals. Qualification principles. Part 5: Qualification of operators for DED-Arc (Адитивне виробництво металів. Принципи кваліфікації. Частина 5: Кваліфікація операторів для DED-Arc)
7	ISO/ASTM DIS 52927	Additive manufacturing. General principles. Main characteristics and corresponding test methods (Адитивне виробництво. Загальні принципи. Основні характеристики та відповідні методи випробувань)
8	ISO/ASTM DIS 52928	Additive manufacturing of metals. Feedstock materials. Powder life cycle management (Адитивне виробництво металів. Вихідні матеріали. Управління життєвим циклом порошку)
9	ISO/ASTM CD 52929	Additive manufacturing of metals. Powder bed fusion. Presentation of material properties in material data sheets (Адитивне виробництво металів. Розплавлення порошкового шару. Відображення властивостей матеріалів у паспортах матеріалів)
0	ISO/ASTM DIS 52933	Additive manufacturing. Environment, health and safety. Test method for the hazardous substances emitted from material extrusion type 3D printers in the non-industrial places (Адитивне виробництво. Навколишнє середовище, здоров'я та безпека. Метод випробування небезпечних речовин, що виділяються 3D-принтерами типу екструзії матеріалів у непромислових місцях)
1	ISO/ASTM DIS 52935	Additive manufacturing of metals. Qualification principles. Qualification of AM coordination personnel (Адитивне виробництво металів. Принципи кваліфікації. Кваліфікація координаційного персоналу AM)
2	ISO/ASTM DIS 52938-1	Additive manufacturing of metals. Environment, health and safety. Part 1: Safety requirements for PBF-LB machines (Адитивне виробництво металів. Навколишнє середовище, здоров'я та безпека. Частина 1: Вимоги безпеки до машин PBF-LB)
3	ISO/ASTM DIS 52939	Additive Manufacturing for construction. Qualification principles. Structural and infrastructure elements (Адитивне виробництво для будівництва. Принципи кваліфікації. Конструктивні та інфраструктурні елементи)
4	ISO/ASTM CD 52940	Additive manufacturing of ceramics. Feedstock materials. Characterization of ceramic slurry in vat photopolymerization (Адитивне виробництво кераміки. Вихідні матеріали. Характеристика керамічної суспензії при фотополімеризації у ваннах)
5	ISO/ASTM CD 52941	Additive manufacturing. System performance and reliability. Acceptance tests for laser metal powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application (Адитивне виробництво. Продуктивність і надійність системи.

		Приймальні випробування для лазерних машин для плавлення металевих порошкових шарів металевих матеріалів для аерокосмічного застосування)
6	ISO/ASTM DIS 52943-2	Additive manufacturing for aerospace. Process characteristics and performance. Part 2: Directed energy deposition using wire and arc (Адитивне виробництво для аерокосмічної промисловості. Характеристики процесу та продуктивність. Частина 2: Спрямоване укладання дроту за допомогою електричної дуги)
7	ISO/ASTM DIS 52945	Additive manufacturing for automotive. Qualification principles. Generic machine evaluation and specification of key performance indicators for PBF-LB/M processes (Адитивне виробництво для автомобілів. Принципи оцінки. Загальна оцінка машини та специфікація ключових показників продуктивності для процесів PBF-LB/M)
8	ISO/ASTM AWI 52948	Additive manufacturing for metals. Non-destructive testing and evaluation. Imperfections classification in PBF parts (Адитивне виробництво для металів. Неруйнівний контроль та оцінка. Класифікація недосконалостей в деталях PBF)
9	ISO/ASTM DTR 52952	Additive manufacturing of metals. Feedstock materials. Correlating of rotating drum measurement with powder spreadability in PBF-LB machines (Адитивне виробництво металів. Вихідні матеріали. Вимірювання співвідношення обертового барабану із розтіканням порошку в машинах PBF-LB)
0	ISO/ASTM DIS 52953	Additive manufacturing for metals. General principles. Registration of geometric data acquired from process-monitoring and for quality control (Адитивне виробництво для металів. Загальні принципи. Реєстрація геометричних даних, отриманих від моніторингу процесу та для контролю якості)
1	ISO/ASTM CD 52957	Additive Manufacturing. Design. Parts using ceramic materials (Адитивне виробництво. Дизайн. Деталі з використанням керамічних матеріалів)
2	ISO/ASTM CD 52958	Additive Manufacturing of Metals. Powder Bed Fusion (PBF). Best Practice for In-Situ Flaw Detection and Analysis for Laser-based PBF (Адитивне виробництво металів. Розплавлення порошкового шару (PBF). Найкраща практика виявлення та аналізу дефектів на місці для PBF на основі лазера)
3	ISO/ASTM CD 52959	Additive Manufacturing. Test Artifacts. Compression Validation Coupons for Lattice Designs (Адитивне виробництво. Тестові зразки. Система перевірки стисненням для решітчастих конструкцій)

Висновок. Чим більше технологія розвивається і затверджується на ринку, тим більшою стає потреба у загальному розумінні технічних термінів та деталей процесу. Стандарти допомагають підвищити рівень довіри щодо досяжності властивостей, особливо у нових виробничих процесах, таких як адитивне виробництво. Адитивне виробництво - це глобальний бізнес, що потребує міжнародних стандартів. Стандартизація сприяє технічному та економічному співробітництву на національному, регіональному та міжнародному рівнях, забезпечує надійність, прийнятність та безпеку, а також сприяє просуванню технологій на ринку. Впровадження міжнародних стандартів відкриє для України можливість переходу на світові стандарти підвищення рівня технологій, освоєння ресурсів природного середовища, раціонального та розумного споживання енергії, юридичного захисту інтелектуальної власності. Кінцевою метою є створення прогресивної конкурентноспроможної продукції.

Список використаних джерел:

1. ASTM International. – Режим доступу: <https://www.astm.org/committee-f42>.
2. ISO. – Режим доступу: <https://www.iso.org/committee/629086.html>.

3. CEN. – Режим доступу: <https://www.cencenelec.eu>.
4. BSI. – Режим доступу: <https://www.bsigroup.com>.
5. AFNOR ASSOCIATION. – Режим доступу: [afnor.org](https://www.afnor.org).
6. DIN. – Режим доступу: <https://www.din.de/de>.
7. Verband deutscher Maschinen-und Anlagenbauer. – Режим доступу: <https://www.vdma.org>.
8. Verein Deutscher Ingenieure. – Режим доступу: <https://www.vdi.de>.
9. Standards by ISO/TC 261 Additive manufacturing. – Режим доступу: <https://www.iso.org/committee/629086/x/catalogue/p/1/u/0/w/0/d/0>.
10. ISO/ASTM 52900:2021 Additive manufacturing. General principles. Fundamentals and vocabulary. – Режим доступу: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/74514/57d795b6267a427899d7b351598bece2/ISO-ASTM-52900-2021.pdf>.
11. ISO 17296-3:2014 Additive manufacturing. General principles. Part 3: Main characteristics and corresponding test methods. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/61627.html>.
12. ISO/ASTM 52950:2021 Additive manufacturing. General principles. Overview of data processing. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/76830.html>.
13. ISO 17295:2023 Additive manufacturing. General principles. Part positioning, coordinates and orientation. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/76471.html>.
14. ISO 17296-2:2015 Additive manufacturing. General principles. Part 2: Overview of process categories and feedstock. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/61626.html>.
15. ISO/ASTM 52901:2017 Additive manufacturing. General principles. Requirements for purchased AM parts. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/67288.html>.
16. ISO/ASTM 52902:2019 Additive manufacturing. Test artifacts. Geometric capability assessment of additive manufacturing systems. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/67287.html>.
17. ISO/ASTM 52904:2019 Additive manufacturing. Process characteristics and performance. Practice for metal powder bed fusion process to meet critical applications. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/74637.html>.
18. ISO/ASTM TR 52906:2022 Additive manufacturing. Non-destructive testing. Intentionally seeding flaws in metallic parts. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/75716.html>.
19. ISO/ASTM 52907:2019 Additive manufacturing. Feedstock materials. Methods to characterize metal powders. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/73565.html>.
20. ISO/ASTM 52909:2022 Additive manufacturing of metals. Finished part properties. Orientation and location dependence of mechanical properties for metal powder bed fusion. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/74639.html>.
21. ISO/ASTM 52910:2018 Additive manufacturing. Design. Requirements, guidelines and recommendations. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/67289.html>.
22. ISO/ASTM 52911-1:2019 Additive manufacturing. Design. Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/72951.html>.
23. ISO/ASTM 52911-3:2023 Additive manufacturing. Design. Part 3: PBF-EB of metallic materials. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/81137.html>.
24. ISO/ASTM TR 52912:2020 Additive manufacturing. Design. Functionally graded additive manufacturing. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/71905.html>.
25. ISO/ASTM 52915:2020 Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/74640.html>.
26. ISO/ASTM TR 52917:2022 Additive manufacturing. Round robin testing. General guidelines. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/75757.html>.
27. ISO/ASTM TS 52930:2021 Additive manufacturing. Qualification principles. Installation, operation and performance (IQ/OQ/PQ) of PBF-LB equipment. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/79527.html>.
28. ISO/ASTM 52931:2023 Additive manufacturing of metals. Environment, health and safety. General principles for use of metallic materials. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/74641.html>.
29. ISO/ASTM 52941:2020 Additive manufacturing. System performance and reliability. Acceptance tests for laser metal powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/74948.html>.

30. ISO/ASTM 52942:2020 Additive manufacturing. Qualification principles. Qualifying machine operators of laser metal powder bed fusion machines and equipment used in aerospace applications. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/74949.html>.

31. ISO/ASTM 52950:2021 Additive manufacturing. General principles. Overview of data processing. – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/76830.html>.

32. Standard and/or project under the direct responsibility of ISO/TC 261 Secretariat. – Режим доступу: <https://www.iso.org/committee/629086/x/catalogue/p/0/u/1/w/0/d/0>.

Рецензенти:

Баглюк Г.А., в.о. директора Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України, член-кор. НАН України, доктор технічних наук, професор.

Рудь В.Д., доктор технічних наук, професор Луцького національного технічного університету.