

Д. О. ДМИТРИЄВ

професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8200-351X

С. Г. КАТРИЧ

аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0006-7964-693X

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ УМОВ НА ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ В АДИТИВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

У статті «Вплив температурно-технологічних умов на параметри якості в адитивному виробництві» досліджено вплив температурних параметрів технологічних умов на показники якості виробів, виготовлених за допомогою адитивного виробництва. Розглянуто основні проблеми, пов'язані з контролем показників температури під час процесу 3D-друку, та її вплив на точність відтворення геометричних форм, шорсткість поверхні, на необхідність постобробки а також на механічні властивості кінцевих продуктів. Проаналізовано вплив температурних факторів на якісні характеристики виробів за різними технологіями 3D-друку – стеріолітографії (SLA), селективне лазерне спікання (SLS), пряме лазерне спікання металу (DLMS). Особлива увага приділена технології Fused Deposition Modeling (FDM), яка є однією з найпоширеніших у сучасному адитивному виробництві. Проаналізовано останні дослідження у цій сфері.

Встановлено, що параметри, такі як висота шару, швидкість друку та температура екструзії, мають критичний вплив на якість виробів. Зокрема, оптимальна висота шару 200 мкм забезпечує утворення краплі оптимальних розмірів, що сприяє надійному з'єднанню з попереднім шаром та покращує механічні властивості виробу. По джерелах науково технічної літератури визначено вплив температурно-технологічних параметрів на забезпечення необхідної якості виробів в адитивному виробництві. Температура екструзії суттєво впливає на формування початкових дефектів які ведуть до втрати механічних характеристик виробів в майбутньому. Зроблено аналітичний огляд адитивних технологій, акцентовано увагу на контролі температурних параметрів під час 3D-друку, які суттєво впливають на формування адгезійних шарів, фізичні характеристики та якість виробів, що підтверджується даними сучасних наукових досліджень.

Ключові слова: адитивне виробництво, 3D-друк, FDM, стеріолітографія (SLA), селективне лазерне спікання (SLS), пряме лазерне спікання (DLMS), температурно-технологічні умови, якість 3D-виробів.

D. O. DMYTRIIEV

Professor at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8200-351X

S. G. KATRICH

Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics
and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0006-7964-693X

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE-TECHNOLOGICAL CONDITIONS ON QUALITY PARAMETERS IN ADDITIVE MANUFACTURING

In the article «The Influence of temperature-technological conditions on quality parameters in additive manufacturing» the impact of temperature parameters of technological conditions on the quality indicators of products manufactured using additive production was studied. The main issues related to the control of temperature indicators during the 3D printing process and its influence on the accuracy of geometric form reproduction, surface roughness, the necessity of post-processing and the mechanical properties of the final products are considered. The influence of temperature factors on the quality characteristics of products based on various 3D printing technologies – stereolithography (SLA), selective laser sintering (SLS), direct laser metal sintering (DLMS) was analyzed. Special attention is paid to the Fused Deposition Modeling (FDM) technology, which is one of the most common in modern additive manufacturing. The latest research in this field is analyzed.

Parameters such as layer height, print speed, and extrusion temperature have been found to have critical effects on product quality. In particular, the optimal layer height of 200 μm ensures the formation of a droplet of optimal sizes, which contributes to a reliable connection with the previous layer and improves the mechanical properties of the product. According to sources in scientific and technical literature, the influence of temperature-technological parameters on ensuring the necessary quality of products in additive manufacturing has been determined. Extrusion temperature significantly affects the formation of initial defects that lead to the loss of mechanical characteristics of products in the future. An analytical review of additive technologies has been conducted, emphasizing the control of temperature parameters during 3D printing, which significantly affect the formation of adhesion layers, physical characteristics, and quality of products, as confirmed by modern scientific research data.

Key words: additive manufacturing, 3D printing, FDM, stereolithography (SLA), selective laser sintering (SLS), direct laser sintering (DLMS), temperature and technological conditions, 3D-product quality.

Постановка проблеми

Адитивне виробництво (Additive Manufacturing – (AM)), як приклад – найпоширеніший технології FDM (Fused Deposition Modeling), набуло широкого застосування у різних галузях промисловості завдяки можливості швидкого прототипування та виготовлення складних геометричних форм [13]. Забезпечення необхідної якості виробів залишається актуальною проблемою. Якість друку обумовлена багатофакторною взаємодією технологічних параметрів, характеристик обладнання та властивостей матеріалів що використовуються. Одним із ключових факторів, що впливають на якість кінцевого продукту, є температурно-технологічні умови процесу друку. Невідповідність температурних режимів до вимогам технологічного процесу може призвести до дефектів, таких як деформація, недостатня адгезія між шарами та нерівномірна поверхня виробу. Кожен матеріал, від термопластів у FDM до смол у Stereolithography (SLA), потребує точних налаштувань температури для досягнення необхідних результатів якості. Тому дослідження впливу температурних параметрів, як частини технологічних умов, на якість виробів є важливим завданням для досягнення необхідної якості, ефективності та надійності адитивного виробництва [9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Основними чинниками, що впливають на якість виготовлених виробів, є технологічні параметри. Визначення налаштувань температурного режиму, швидкісних параметрів друку, товщини формувального шару безпосередньо впливає на точність геометричних форм і якість поверхонь виробу. У статті «Вплив технологічних режимів адитивного 3D друку на якість сувенірної продукції» [2] досліджено залежність точності відтворення та шорсткості поверхні від налаштувань друку, таких як висота шару та швидкість друку. Інші дослідники акцентують увагу на важливості правильного налаштування температури екструдера та платформи для забезпечення якісного друку [1]. Також відзначається, що ретельний підбір температурних режимів сприяє покращенню фізико-механічних характеристик виробів. Проте, незважаючи на наявність численних досліджень, питання визначення таких температурно-технологічних умов для різних матеріалів та конструкцій залишається відкритим і потребує подальшого вивчення [12].

Дослідження науково технічної літератури для теоретичного аналізу та визначення необхідних температурно-технологічних параметрів процесу 3D-друку, які впливають на завдану якість виготовлених виробів. Вплив температури екструдера, температури платформи, швидкості друку та висоти шару на точність геометричних розмірів, шорсткість поверхні та механічні властивості виробів (міцність, жорсткість, твердість, пластичність). Отримання виробів із заданими механічними властивостями за процесом виробництва методом FDM-друку неможливо без вивчення впливу температурно-технологічних параметрів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Температурно-технологічні параметри є одним із ключових чинників, що визначають якість кінцевої продукції в адитивному виробництві. Правильний температурний контроль забезпечує стабільність геометричних розмірів виробів, рівномірність шарів, достатню міжшарову адгезію, а також оптимальні фізико-механічні характеристики матеріалу і як наслідок належну якість виробу. Незалежно від технології друку (Fused Deposition Modeling, Selective Laser Sintering (SLS), Stereolithography (SLA), Direct Metal Laser Sintering (DMLS)), кожен матеріал має свої специфічні температурні режими, які необхідно враховувати для досягнення кращого результату [6]. Розглянемо два найпоширеніших температурних параметри у технології FDM, SLS та DMLS та SLA.

Однією з найпоширеніших технологій адитивного виробництва є моделювання методом наплавлення (FDM), при якому термопластичний матеріал розплавляється в екструдері та пошарово наноситься на друкарську платформу. У цьому процесі температура нагріву екструдера повинна відповідати конкретному типу полімеру. Наприклад, для термопластичного PLA (Polylactic Acid)-матеріалу робочий діапазон температури екструдера становить 180–220 °C, тоді як для ABS (Акрилонітрилбутадієнстирол) він сягає 230–250 °C. У разі невідповідного вибору температурного режиму можуть виникати такі проблеми:

– Вища 250 °C температура для ABS призводить до надмірного плавлення матеріалу, що викликає утворення ниткоподібних дефектів («stringing»), а також сповільнює застигання, що може спричинити деформації виробу.

– Температура нижча за 180 °С для PLA викликає погане зчеплення між шарами, що знижує механічну міцність виробу та збільшує ризик його розшарування [1].

В роботі [8] визначено важливу роль нагрівання платформи. Для ABS-пластика, який має тенденцію до деформації при охолодженні, рекомендована температура платформи становить 90–110 °С. Для PLA, що менш схильний до усадки, достатньо 50–60 °С. Невідповідність температури нагріву платформи може спричинити відшарування першого шару від друкарської платформи або ж виникнення внутрішніх напружень у виробі.

Стереолітографія (SLA) є однією з високоточних технологій 3D-друку, що працює на основі фотополімеризації рідких смол за допомогою ультрафіолетового лазера. У цій технології температура впливає на процес затвердіння полімеру:

– Вибір температури фотополімерної смоли, в більшості випадків робочий діапазон становить 20–30 °С. При нижчих температурах смола стає в'язкішою, що ускладнює її рівномірне нанесення, а при вищих – можливе передчасне затвердіння у непотрібних зонах [7].

– Постобробка. Після друку виріб піддається додатковому ультрафіолетовому опроміненню для завершення полімеризації. Якщо процес постобробки проводиться за неправильною температурою або надмірним рівнем УФ-випромінювання, матеріал може стати крихким або змінити свої розміри через внутрішні напруження [8].

Температурний контроль є одним із критичних факторів у процесі 3D-друку незалежно від вибраної технології. Відповідне налаштування температурних параметрів дозволяє:

- забезпечити рівномірне нанесення шарів та їхню міцність;
- зменшити ризики усадки, деформацій та залишкових напружень;
- покращити якість поверхні та механічні властивості виробу;
- підвищити повторюваність процесу та зменшити кількість дефектів.

Підбір відповідного температурного режиму є ключовим завданням для операторів 3D-друку, особливо при виробництві високоточних деталей для авіаційної, медичної та промислової галузей.

Вплив температури на якість продукції. Температурний режим у процесі адитивного виробництва має безпосередній вплив на кінцеві характеристики виробів, зокрема на міцність, щільність, точність геометричних розмірів, поверхневу якість і довговічність. Відхилення від встановлених температурних параметрів може призвести до різних дефектів, таких як міжшарова нестабільність, внутрішні напруження, тріщини, пористість та усадка. Для різних технологій адитивного виробництва цей вплив має свої особливості [12]. Наприклад, зміна межі обчисленої міцності $[\sigma]$, МПа, виробів із PLA у функції температури екструдера T_e , показано на рис. 1 точка максимальної міцності PLA $[\sigma] = 35,1$ МПа [1].

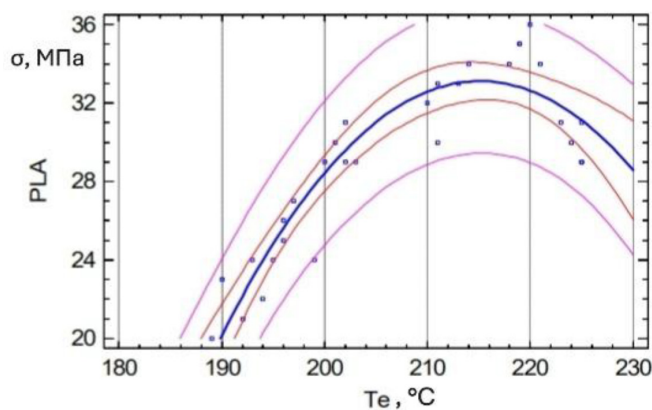


Рис. 1. Зміна межі міцності $[\sigma]$, МПа, виробів із PLA у функції температури екструдера T_e , °С

Одним із ключових аспектів є вплив температурного режиму на механічну міцність виробів. У випадку технології FDM температура екструдера визначає рівень міжшарової адгезії, що безпосередньо впливає на кінцеву жорсткість і міцність матеріалу. Наприклад, при надто низькій температурі (<190 °С для PLA) спостерігається слабе зчеплення між шарами, що може спричинити розшарування та ламкість виробу. У разі високих температур (>230 °С для PLA) надмірне розплавлення може викликати деформацію форми та зниження структурної цілісності [2].

У технологіях лазерного спікання (SLS) і лазерного плавлення металів (DMLS) температура впливає на якість спікання порошкових матеріалів. Недостатня температура лазерного впливу призводить до неповного спікання, утворення мікропор та зниження механічної міцності виробу. З іншого боку, надмірний температурний вплив може спричинити утворення внутрішніх напружень і мікротріщин, що суттєво зменшує довговічність конструкцій, особливо в авіаційній і медичній галузях.

Для технології холодного газодинамічного напылення (Cold Gas Dynamic Spraying CGDS) з використанням порошку титану, вплив температури показано на графіку на рис. 2, а саме, зі зростанням температури, спікання шару відбувається при значно низькому тиску [11].

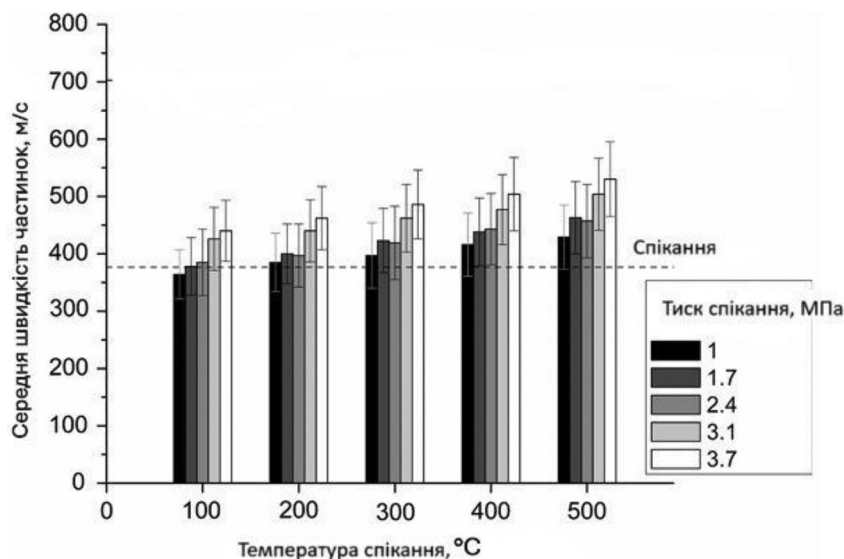


Рис. 2. Вплив температури на середню швидкість частинок та спікання для різного тиску

Температурний контроль є одним із головних факторів, що впливають на точність відтворення геометричних параметрів виробів. Наприклад, у технології FDM різниця температур між друкованим матеріалом і навколишнім середовищем може спричинити усадку або деформацію. Для ABS-пластику, який має високий коефіцієнт теплового розширення, необхідно використовувати нагріту камеру або платформу (90–110 °C) для зменшення ризику термічних деформацій.

У технологіях SLS та DMLS підтримка рівномірного температурного режиму в камері запобігає локальним деформаціям та нерівномірному стисканню виробів під час охолодження. Занадто швидке охолодження металевих деталей може викликати залишкові напруження, що призводять до викривлення конструкцій [3].

Якість поверхні друкованих виробів залежить від температурного режиму як під час друку, так і на етапі постобробки. Наприклад:

- у FDM підвищена температура екструдера може викликати утворення ниток («stringing») та нерівномірність шарів. Натомість ретельно обраний температурний режим дозволяє отримати гладку поверхню без необхідності додаткового шліфування;
- у SLA температура впливає на рівень полімеризації фотополімерної смоли, що визначає якість поверхні. Висока температура може спричинити перевищену полімеризацію, що робить матеріал крихким;
- у SLS та DMLS температура лазерного променя впливає на рівномірність спікання частинок порошку. При недостатньому нагріванні можуть утворюватися мікропори, що погіршує текстуру поверхні та потребує додаткової механічної обробки [3].

Температурні відхилення можуть спричинити наступні дефекти у 3D-друкованих виробах:

Дефекти, пов'язані з відхиленням температурного режиму

Дефект	Причина	Технології, де зустрічається
Розшарування (delamination)	температура екструдера або камери нижча за 190 °C	FDM, SLS
Деформація (warping)	Різне охолодження, недостатній нагрів платформи до 90 °C	FDM, SLS, DMLS
Мікропори	Недостатня температура спікання	SLS, DMLS
Перегрів	Надмірний температурний вплив	FDM, SLA, SLS
Внутрішні напруження	Різниця температур між шарами	DMLS, SLS

Для покращення якості друку та мінімізації дефектів необхідно застосовувати такі методи:

- калібрування температурних параметрів – підбір значень температури екструдера, платформи та камери відповідно до матеріалу;
- використання терморегульованих камер – стабілізація температурного режиму для зменшення ризику внутрішніх напружень;

- поступове охолодження металевих виробів – запобігання різкому термічному розширенню та стисненню;
- ретельний підбір параметрів лазерного впливу – баланс між температурою лазерного випромінювання та часом експозиції для уникнення перегріву або неповного спікання порошку;
- контроль постобробки – використання термічної обробки після друку для зміцнення матеріалу (відпал для металевих виробів, додаткове УФ-опромінення для SLA).

Температурний режим є одним із найбільш критичних параметрів у адитивному виробництві, оскільки він безпосередньо впливає на міцність, точність та довговічність виробів. Недотримання оптимальних температурних параметрів може спричинити значні дефекти, що унеможливають використання виробів у промислових і високотехнологічних сферах.

Подальші дослідження в цій галузі спрямовані на розробку адаптивних алгоритмів температурного контролю, що дозволять автоматично налаштовувати температурні параметри відповідно до матеріалу та конструктивних особливостей виробу.

Визначення та вибір температурних параметрів є одним із ключових завдань при впровадженні адитивного виробництва. Коректне налаштування температурного режиму дозволяє не лише підвищити якість друку, але й зменшити кількість дефектів, забезпечити механічну стійкість виробів, покращити міжшарову адгезію та підвищити точність геометричних параметрів. В останні роки з'явилося багато підходів до автоматизації цього процесу, що включають застосування датчиків, штучного інтелекту, адаптивного контролю та термічних [4].

У технології FDM одним із головних викликів є підтримання стабільної температури екструдера та платформи. Сучасні 3D-принтери оснащені PID (Proportional-Integral-Derivative)-регуляторами, які дозволяють автоматично підтримувати температуру в заданих межах.

Методи поліпшення якості 3Д друку включають:

- змінне нагрівання екструдера – для покращення зчеплення перших шарів температура екструдера на початку друку часто встановлюється на 5–10 °C вище технологічно визначеного значення, а після друку перших шарів знижується до стандартного рівня (наприклад, 210 °C → 200 °C для PLA);

- визначення та налаштування температури платформи – деякі принтери використовують градієнтний нагрів, при якому температура поступово знижується після друку 50–70 % моделі, що мінімізує ризик усадки. Наприклад, платформа може починати друк із 100 °C і поступово охолоджуватися до 80 °C у кінці процесу для ABS-пластику;

- контроль термічних деформацій – у промислових FDM-принтерах використовуються камери з активним підігрівом, які забезпечують рівномірний температурний режим під час друку великих моделей. Це дозволяє уникнути тріщин та розшарування матеріалу, особливо при друці великих конструкцій з інженерних полімерів, таких як РЕЕК (Polyether Ether Ketone) чи ULTEM (поліетерімід) [7].

У лазерному спіканні порошків (SLS) та лазерному плавленні металів (DMLS) ключовим фактором є підтримання стабільної температури у робочій камері та регулювання потужності лазера.

Методи поліпшення у SLS-друці:

- прецизійне керування температурою камери – підтримка стабільної температури (зазвичай на 10–20 °C нижче температури плавлення полімерного порошку) дозволяє мінімізувати термічні деформації. Наприклад, при друці з PA12(нейлон 12) температура камери встановлюється на рівні 170–185 °C;

- змінна потужність лазера – використання адаптивного контролю дозволяє варіювати потужність лазерного випромінювання залежно від геометрії друкуваної моделі. Це знижує ризик перегріву тонких елементів та недостатнього спікання у товстих шарах;

- контроль теплового балансу в процесі друку – у сучасних SLS-принтерах застосовуються системи багаточасового вимірювання температури, які дозволяють автоматично регулювати локальні параметри процесу в режимі реального часу [7].

Методи вдосконалення у DMLS-друці:

- використання попереднього підігріву порошку – металеві порошки (Ti-6Al-4V, Inconel 718, AlSi10Mg) часто попередньо нагрівають до 200–500 °C перед друком, що зменшує залишкові напруження у матеріалі [10];

- градієнтне охолодження – щоб уникнути термічних тріщин, металеві вироби після друку охолоджують поступово. Наприклад, у деяких промислових установках використовується охолодження в середовищі аргону, що дозволяє знизити різницю температур між зовнішніми і внутрішніми шарами;

- застосування мультилазерних систем – сучасні DMLS-принтери обладнані декількома лазерами, які працюють синхронно, дозволяючи рівномірно розподіляти теплове навантаження на матеріал, що зменшує деформації під час друку складних геометричних об'єктів [8].

Останні дослідження у сфері адитивного виробництва показують, що комп'ютерне термічне моделювання може значно покращити якість друку [4].

Методи скінченних елементів при моделюванні (Finite Element Analysis – FEA) дозволяють прогнозувати зміну температури у різних зонах виробу під час друку та охолодження.

Термодинамічні симуляції використовуються для оптимізації траєкторії лазерного проміння у DMLS, що зменшує перегрів окремих зон та сприяє рівномірному розподілу напружень.

Машинне навчання для прогнозування дефектів – у промислових установках активно застосовуються алгоритми на основі зв'язку через (протоколи API) зі штучним інтелектом, які аналізують температурні показники в режимі реального часу та автоматично коригують параметри друку.

Ретельний підбір та визначення температурно-технологічних параметрів є важливим напрямом досліджень у сфері адитивного виробництва. Застосування автоматичних систем контролю температури, адаптивного нагріву та цифрових симуляцій дозволяє значно покращити якість продукції, підвищити точність друку та зменшити кількість дефектів. Подальші дослідження в цьому напрямку спрямовані на розробку розумних систем саморегуляції, що дозволять у реальному часі коригувати параметри друку відповідно до характеристик матеріалу та конструктивних особливостей виробу.

Висновки

Температурно-технологічні умови є одним із ключових факторів, що визначають якість продукції, виготовленої методами адитивного виробництва. Відповідне налаштування температурних параметрів безпосередньо впливає на механічну міцність виробів, точність геометричних розмірів, рівень міжшарової адгезії та поверхневу якість. Недотримання оптимального температурного режиму може спричинити виникнення різноманітних дефектів, таких як розшарування, пористість, внутрішні напруження, перегрів або термічні деформації.

У ході дослідження встановлено, що для кожної технології 3D-друку існують специфічні температурні режими, які необхідно суворо дотримуватися. Зокрема, в технології FDM стабільність температури екструдера та нагріву платформи забезпечує рівномірне нанесення шарів і запобігає деформаціям. У методах лазерного спікання та плавлення (SLS, DMLS) контроль температури лазерного випромінювання, нагріву камери та процесу охолодження дозволяє мінімізувати мікропористість і залишкові напруження в структурі матеріалу. Водночас, у технології SLA регулювання температури фотополімерної смоли є критичним для рівномірності полімеризації та механічної міцності виробу.

Вдосконалення температурно-технологічних параметрів включає впровадження сучасних методів керування температурою, таких як адаптивні регулятори PID (Proportional-Integral-Derivative), інтелектуальні сенсори, чисельне термічне моделювання та алгоритми машинного навчання. Використання таких технологій дозволяє не лише підвищити якість друкованих виробів, але й значно знизити відсоток браку та покращити економічну ефективність виробництва.

Результати таких досліджень мають практичне значення для різних сфер застосування адитивних технологій, зокрема в авіаційній, медичній, автомобільній промисловості та інженерному прототипуванні. Контроль температурних режимів є ключовим завданням для забезпечення високої якості кінцевої продукції та підвищення рівня надійності 3D-друкованих деталей.

Подальші дослідження в цій галузі повинні бути зосереджені на розробці інтелектуальних алгоритмів керування температурою у реальному часі, впровадженні нових матеріалів з покращеними термомеханічними характеристиками та використанні комплексних моделей прогнозування термічної поведінки під час друку. Інтеграція штучного інтелекту та автоматизованих систем регулювання температури дозволить зробити процес адитивного виробництва ще більш ефективним і стабільним.

Список використаної літератури

1. Саленко О. Ф., Орел В. М., Габузян Г. В., А. Костенко, Д. Цуркан. Вплив температури екструдованого філаменту на параметри міцності тонкостінних виробів. *Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: матеріали XXIII наук. техн. конф. (КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023р.)*. Київ, 2023. С. 185–189.
2. Володько М. Ю., Клименко Т. Є., Талімонова Н. Л. Вплив технологічних режимів адитивного 3D-друку на якість сувенірної продукції. *Технологія і техніка друкарства*. 2023. № 1(79). С. 46–58.
3. Гончарук О. О. Визначення впливу технологічних параметрів лазерного спікання на процес формування інструментальних композитів з НТМ. *Збірник наукових праць НТУУ «КПІ»*. Сер. *Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2016. № 1. С. 158–165.
4. Ковалевський С. В. Оптимізація технологічних систем на основі потокового моделювання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 2. С. 76–81.
5. Лісова Р. В., Лісовий О. В. Застосування адитивних технологій у виробництві та їхній вплив на бізнес-процеси. *Економічний аналіз*. 2019. № 4, т. 29. С. 68–77.
6. Манжілевський О. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2021. С. 105.
7. Масючок О. П., Юрженко М. В., Колісник Р. В., Кораб М. Г. Адитивні технології полімерних матеріалів. *Автоматичне зварювання*. 2020. № 5. С. 53–60.

8. Слєпцов О.О., Осауленко С.І., Осипенко О.А., Грищенко Я.М. Інноваційні технології адитивного виробництва – проблеми та перспективи. *Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання* : колективна монографія за матеріалами Всеукраїнської наукової конференції, м. Київ, 18 жовтня 2023 року / за ред. В. П. Плаван, А. О. Касич, О. О. Бутенко. Київ : КНУТД, 2023. С. 80–84.
9. 3D printing resolution: meaning, importance and optimization: веб-сайт. URL: <https://www.raise3d.com/blog/3d-printing-resolution/> (дата звернення: 13.01.2025)
10. Pirohov D. O., Vorontsov B. S. Prospects Of Use And Processing Of Titanium Blanks Obtained By xBeam 3D Metal Printing Technology. *Technium Vol. 12, 2023*. ISSN: 2668-778X. С. 53–57.
11. D. MacDonald R., Fernánde F., Delloro B. Cold Spraying of Armstrong Process Titanium Powder for Additive Manufacturing. *J. Therm Spray Tech. 2017*. DOI 10.1007/s11666-016-0489-2. С. 598–609.
12. Longfei Zhou, Jenna Miller, Jeremiah Vezza, Maksim Mayster, Muhammad Raffay, Quentin Justice, Zainab Al Tamimi, Gavyn Hansotte, Lavanya Devi, Sunkara and Jessica Bernat. Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Sensors. 2024. 24, 2668*. <https://doi.org/10.3390/s24092668>
13. Г.О. Андрощук, Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку. *Наука, технології, інновації*. 2017. № 1. С. 68–77.

References

1. Salenko, O. F., Orel, V. M., Gabuzyan, G. V., Kostenko, A., & Tsurkan, D. (2023). Influence of the temperature of the extruded filament on the strength parameters of thin-walled products. In Proceedings of the XXIII International Scientific and Technical Conference “Progressive Technology, Engineering and Education” (Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky, 2023, pp. 185–189). Kyiv : KPI.
2. Volodko, M. Yu., Klymenko, T. E., & Talimonova, N. L. (2023). The influence of technological modes of additive 3D printing on the quality of souvenir products. *Technology and Printing Technique*, 1(79), 46–58.
3. Honcharuk, O. O. (2016). Determination of the effect of technological parameters of laser sintering on the process of forming instrumental composites from NTM. Collection of Scientific Works of NTUU “KPI”. Series: Chemical Engineering, Ecology and Resource Conservation, 1, 158–165.
4. Kovalevskiy, S. V. (2020). Optimization of technological systems based on flow modeling. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 2, 76–81.
5. Lisova, R. V., & Lisovyi, O. V. (2019). Application of additive technologies in production and their impact on business processes. *Economic Analysis*, 29(4), 68–77.
6. Manzhilevskiy, O. D. (2021). Modern additive technologies of 3D printing. Features of practical application: Teaching manual. Vinnytsia: VNTU.
7. Masyuchok, O. P., Yurzhenko, M. V., Kolisnyk, R. V., & Korab, M. G. (2020). Additive technologies of polymer materials. *Automatic Welding*, 5, 53–60.
8. Sleptsov, O. O., Osaulenko, S. I., Osypenko, O. A., & Hryshchenko, Ya. M. (2023). Innovative technologies of additive manufacturing – problems and prospects. In V. P. Plavan, A. O. Kasych, & O. O. Butenko (Eds.), *Education for a sustainable future: Ecological, technological, economic and socio-cultural issues: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific Conference*, Kyiv, October 18, 2023 (pp. 80–84). Kyiv : KNUITD.
9. Raise3D. (2025, January 13). 3D printing resolution: Meaning, importance and optimization. Raise3D Blog. <https://www.raise3d.com/blog/3d-printing-resolution/>
10. Pirohov, D. O., & Vorontsov, B. S. (2023). Prospects of use and processing of titanium blanks obtained by xBeam 3D metal printing technology. *Technium*, 12, 53–57. ISSN: 2668-778X.
11. MacDonald, D. R., Fernández, F., & Delloro, B. (2017). Cold spraying of Armstrong Process titanium powder for additive manufacturing. *Journal of Thermal Spray Technology*, 26, 598–609. <https://doi.org/10.1007/s11666-016-0489-2>
12. Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Al Tamimi, Z., Hansotte, G., Devi, L. S., & Bernat, J. (2024). Additive manufacturing: A comprehensive review. *Sensors*, 24(9), 2668. <https://doi.org/10.3390/s24092668>
13. Androschuk, H. O. (2017). Additive technologies: Prospects and problems of 3D printing. *Science, Technologies, Innovations*, 1, 68–77.