

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**«Дослідження впливу адитивних технологій (3D-друку)
на структуру та властивості металевих матеріалів»**

Рівень вищої освіти перший бакалаврський

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Спеціальність 132 Матеріалознавство

Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

Шифр **КвРМТВА. 22144.02.16.00**

Виконав студент 4 курсу група МТВА-22-1


Підпис

Володимир МИРОНЮК

Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ


Підпис

Анатолій ВИЧАВКА

Нормоконтролер к.т.н., доцент каф. ТАМ


Підпис

Олег БАБАК

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри ТАМ

10.06. 2026

Дата


Підпис

Олександр ДИХА

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства


Рівень вищої освіти перший бакалаврський

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Спеціальність 132 Матеріалознавство

Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ


Духа О.В.
15.04 2026 р

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Миронюку Володимирі Олександровичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: **Дослідження впливу адитивних технологій (3D-друку) на структуру та властивості металевих матеріалів**

керівник роботи: Вичавка Анатолій Анатолійович, к.т.н. ст. викладач каф. ТАМ.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 20.01.2026 р. № 7 (Д 26)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.06.2026 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Науково-технічні джерела, стандарти адитивного виробництва, дані про металеві порошки та методики металографічних і механічних випробувань.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

- 1) Актуальність впровадження 3D-друку металів у сучасному машинобудуванні, мета та задачі дослідження.
- 2) Сутність, принципи та історія розвитку адитивного виробництва, класифікація методів 3D-друку металів і характеристики матеріалів (порошків).
- 3) Дослідження кристалізації, мікроструктури, дефектів та впливу параметрів друку на властивості матеріалу.
- 4) Оцінка механічних, фізичних, теплових властивостей та корозійної стійкості матеріалів, отриманих методом 3D-друку, у порівнянні з традиційними технологіями.
- 5) Опис методики проведення дослідження, аналіз отриманих результатів, оцінка мікроструктури та характеристик зразків.
- 6) Загальні висновки та список використаних джерел.

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв.

7. Дата видачі завдання 15.04 2026 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
Опрацювання нормативної бази (ISO/ASTM) та аналіз технічної літератури	20.05.2026	вик
Вивчення сутності, методів та класифікації 3D-друку металів	28.05.2026	вик
Аналіз особливостей кристалізації та виникнення дефектів мікроструктури	05.06.2026	вик
Оцінка та порівняння механічних і фізико-хімічних властивостей металів	8.06.2026	вик
Опис методик дослідження та аналіз результатів	12.06.2026	вик
Узагальнення висновків, оформлення списку джерел та розробка графічних матеріалів	14.06.2026	вик
Захист кваліфікаційної роботи	17.06.2026	

Удент


Підпис

Володимир МИРОНЮК

Рівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Анатолій ВИЧАВКА

РЕФЕРАТ

Студент групи МТВА 22-1: Миронюк В.О.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Кваліфікаційна робота на тему «Дослідження впливу адитивних технологій (3D-друку) на структуру та властивості металевих матеріалів» складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 30 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та додатків, розміщених на 17 сторінках. Роботу викладено на 79 сторінках.

Сучасний розвиток промисловості характеризується активним впровадженням адитивних технологій, зокрема 3D-друку, що відкриває нові можливості для виготовлення деталей складної форми. Використання цих технологій дозволяє зменшити витрати матеріалів, скоротити час виробництва та підвищити ефективність технологічних процесів.

У роботі досліджено вплив адитивних технологій на структуру металевих матеріалів, зокрема особливості формування мікроструктури, наявність дефектів та зміну механічних властивостей. Розглянуто основні методи 3D-друку металів та їх технологічні особливості.

Особливу увагу приділено аналізу механічних характеристик отриманих виробів, таких як міцність, твердість і зносостійкість, а також порівнянню їх із традиційними методами виготовлення.

Результати дослідження базуються на сучасних наукових підходах і підтверджують, що адитивні технології мають значний потенціал у підвищенні ефективності виробництва та отриманні матеріалів із заданими властивостями.

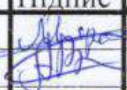



Ключові слова: АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, 3D-ДРУК, МЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ, МІКРОСТРУКТУРА, МІЦНІСТЬ, ВЛАСТИВОСТІ, ВИРОБНИЦТВО.

КартМТВА_22144_02_16_00

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	10
1.1 Сутність та принципи адитивного виробництва.....	10
1.2 Історія розвитку 3D-друку.....	11
1.3 Основні методи 3D-друку металів.....	13
1.4 Класифікація адитивних технологій.....	16
1.5 Матеріали для 3D-друку металів.....	17
2. ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ МЕТАЛІВ ПРИ 3D-ДРУЦІ.....	20
2.1 Особливості кристалізації при адитивному виробництві.....	20
2.2 Формування мікроструктури.....	21
2.3 Анізотропія властивостей.....	22
2.4 Дефекти та неоднорідності структури.....	24
2.5 Вплив параметрів друку на структуру.....	26
3. ВПЛИВ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ...28	
3.1 Механічні властивості.....	28
3.2 Фізичні властивості.....	30
3.3 Теплові характеристики.....	32
3.4 Корозійна стійкість.....	34
3.5 Порівняння з традиційними технологіями.....	35
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	37
4.1 Методика проведення дослідження.....	37
4.2 Опис обладнання та матеріалів.....	39
4.3 Аналіз отриманих результатів.....	41
4.4 Побудова графіків і таблиць.....	43
5. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ.....	48
5.1 Використання у промисловості.....	48

КвРМТВА. 22144.02.16.00

№	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата				
Виконав		Миронюк			Дослідження впливу адитивних технологій (3D-друку) на структуру та властивості металевих матеріалів	Літера	Аркуш	Аркушів
Перевір.		Вичавка					5	79
Контроль		Бабак				ХНУ, МТВА-22-1		
Відс.		Диха						

5.2 Застосування в медицині та авіації.....	51
5.3 Економічна ефективність.....	53
ВИСНОВКИ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59
ДОДАТКИ.....	62

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Сучасний етап розвитку промисловості характеризується активним впровадженням інноваційних технологій, серед яких особливе місце займають адитивні технології виробництва. Вони відкривають нові можливості у створенні складних виробів із металів, що раніше було практично неможливим або економічно недоцільним при використанні традиційних методів обробки матеріалів. Однією з ключових особливостей адитивного виробництва є пошарове формування об'єкта на основі цифрової моделі, що дозволяє досягати високої точності та мінімізувати відходи матеріалу.

Адитивні технології, або 3D-друк, активно застосовуються у таких галузях, як машинобудування, авіаційна та космічна техніка, медицина, енергетика та оборонна промисловість. Їх використання сприяє значному скороченню часу виробництва, зниженню матеріаломісткості процесів, а також забезпечує можливість виготовлення деталей складної геометричної форми, включаючи внутрішні канали та порожнини.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділяють застосуванню адитивних технологій для виготовлення металевих виробів. На відміну від полімерних матеріалів, метали характеризуються складною поведінкою під час термічної обробки, що безпосередньо впливає на формування їхньої структури та властивостей. У процесі 3D-друку металів відбувається швидке плавлення та кристалізація матеріалу, що призводить до утворення специфічної мікроструктури, яка суттєво відрізняється від структури матеріалів, отриманих традиційними методами, такими як лиття або механічна обробка.

Актуальність даної теми зумовлена необхідністю глибокого розуміння процесів, що відбуваються під час адитивного виробництва металів, а також їх впливу на експлуатаційні характеристики готових виробів. Наявність

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

внутрішніх дефектів, анізотропія властивостей, залишкові напруження та інші фактори можуть суттєво впливати на надійність і довговічність деталей, виготовлених за допомогою 3D-друку. Тому дослідження структури та властивостей металевих матеріалів, отриманих адитивними методами, є важливим завданням сучасного матеріалознавства.

Крім того, значний інтерес становить питання оптимізації параметрів процесу 3D-друку з метою отримання матеріалів із заданими властивостями. Зміна температурного режиму, швидкості подачі матеріалу, потужності джерела енергії та інших параметрів може суттєво впливати на кінцеву структуру та властивості виробу. Відповідно, дослідження цих залежностей дозволяє підвищити ефективність адитивних технологій та розширити сфери їх застосування.

Метою даної дипломної роботи є дослідження впливу адитивних технологій (3D-друку) на структуру та властивості металевих матеріалів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасні адитивні технології та їх класифікацію;
- розглянути основні методи 3D-друку металів;
- дослідити особливості формування мікроструктури металів при адитивному виробництві;
- визначити вплив технологічних параметрів на структуру матеріалу;
- оцінити механічні, фізичні та експлуатаційні властивості металевих виробів;
- провести аналіз дефектів, що виникають у процесі 3D-друку;
- визначити перспективи розвитку адитивних технологій у промисловості.

Об'єктом дослідження є процес адитивного виробництва металевих матеріалів.

Предметом дослідження є структура та властивості металів, отриманих за допомогою технологій 3D-друку.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методи дослідження включають аналіз наукової літератури, узагальнення теоретичних даних, порівняльний аналіз властивостей матеріалів, а також моделювання процесів формування структури металів при адитивному виробництві.

Наукова новизна роботи полягає у систематизації сучасних даних щодо впливу адитивних технологій на мікроструктуру металів та встановленні взаємозв'язку між параметрами процесу друку та властивостями матеріалів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання отриманих висновків для оптимізації процесів 3D-друку металів з метою підвищення якості та надійності виробів, а також для впровадження адитивних технологій у різні галузі промисловості.

Структура роботи включає вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. У першому розділі розглянуто теоретичні основи адитивних технологій. У другому — досліджено формування структури металів. Третій розділ присвячено аналізу властивостей матеріалів. У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень. У п'ятому — розглянуто практичне застосування та перспективи розвитку технологій.

Таким чином, дослідження впливу адитивних технологій на структуру та властивості металевих матеріалів є актуальним і важливим напрямом сучасної науки і техніки, що має значний потенціал для подальшого розвитку.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Сутність та принципи адитивного виробництва

Адитивне виробництво (Additive Manufacturing, AM) є сучасним напрямом створення виробів, який базується на принципі пошарового формування об'єкта відповідно до цифрової тривимірної моделі. На відміну від традиційних технологій, таких як лиття, кування чи механічна обробка, адитивні методи передбачають додавання матеріалу, а не його видалення.

Основою процесу є використання САD-моделі, яка розбивається на тонкі шари за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Кожен шар послідовно наноситься або спікається, формуючи цілісну деталь.

Основні принципи адитивного виробництва:

- пошарове формування виробу;
- використання цифрових моделей;
- мінімізація відходів матеріалу;
- можливість створення складних геометричних форм;
- автоматизація виробничого процесу.

Процес адитивного виробництва включає кілька основних етапів:

1. Створення 3D-моделі виробу;
2. Підготовка файлу до друку (slicing);
3. Безпосередній процес друку;
4. Постобробка (термічна, механічна).

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

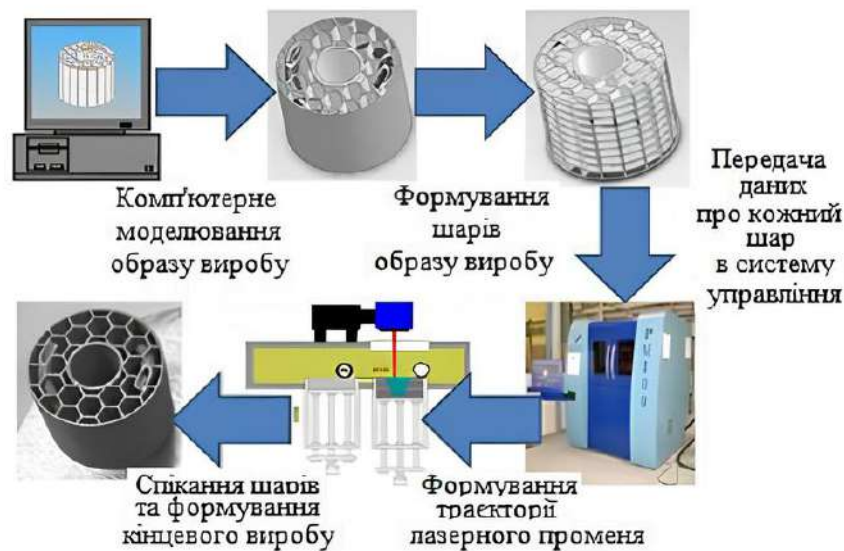


Рисунок 1.1- Схема процесу адитивного виробництва

Адитивні технології дозволяють значно скоротити час виготовлення прототипів і готових виробів, що є важливою перевагою в умовах сучасного виробництва.

1.2 Історія розвитку 3D-друку

Розвиток адитивних технологій розпочався у 1980-х роках і став результатом поєднання досягнень у галузях матеріалознавства, лазерної техніки та комп'ютерного моделювання. Перші дослідження були спрямовані на створення методів швидкого прототипування, які дозволяли значно скоротити час розробки нових виробів.

Першою технологією, що отримала практичне застосування, стала стереолітографія (SLA), розроблена Чак Галл у 1984 році. Цей метод базувався на пошаровому затвердінні фотополімерної смоли під дією ультрафіолетового випромінювання. Вже у 1986 році було створено перший комерційний 3D-принтер, що стало початком розвитку адитивного виробництва як окремого напрямку.

										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

КвРМТВА. 22144.02.16.00

У 1990-х роках відбулося активне вдосконалення технологій. Зокрема, були розроблені методи селективного лазерного спікання (SLS) та прямого лазерного спікання металів (DMLS). В цей період адитивні технології почали використовуватися не лише для створення прототипів, але й для виготовлення окремих функціональних деталей.

Важливим етапом розвитку стало впровадження стандартів і класифікації технологій, що сприяло їх поширенню у промисловості. Наприкінці ХХ століття адитивні системи активно використовувалися у автомобілебудуванні та машинобудуванні для скорочення циклу проектування.

У 2000-х роках відбулося значне розширення сфер застосування адитивних технологій. З'явилися нові методи обробки матеріалів, удосконалилися програмні засоби для моделювання, а також знизилася вартість обладнання. У цей період 3D-друк почав впроваджуватися у серійне виробництво, зокрема для виготовлення складних інженерних компонентів.

Починаючи з 2010-х років, адитивні технології стали невід'ємною частиною високотехнологічних галузей, таких як авіаційна промисловість, медицина та енергетика. Особливого розвитку набули технології друку металів, зокрема Selective Laser Melting (SLM) та Electron Beam Melting (EBM), що дозволяють отримувати вироби з високими механічними характеристиками.

Основні етапи розвитку адитивних технологій можна узагальнити таким чином:

- 1980-ті роки — поява стереолітографії та перших 3D-принтерів;
- 1990-ті роки — розвиток лазерних технологій та початок використання металів;
- 2000-ні роки — впровадження у промисловість і розширення сфер застосування;
- 2010-ті роки — активне використання у високотехнологічних галузях та розвиток металевого 3D-друку;

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– 2020-ті роки — інтеграція адитивних технологій у цифрове виробництво та концепцію Індустрії 4.0.

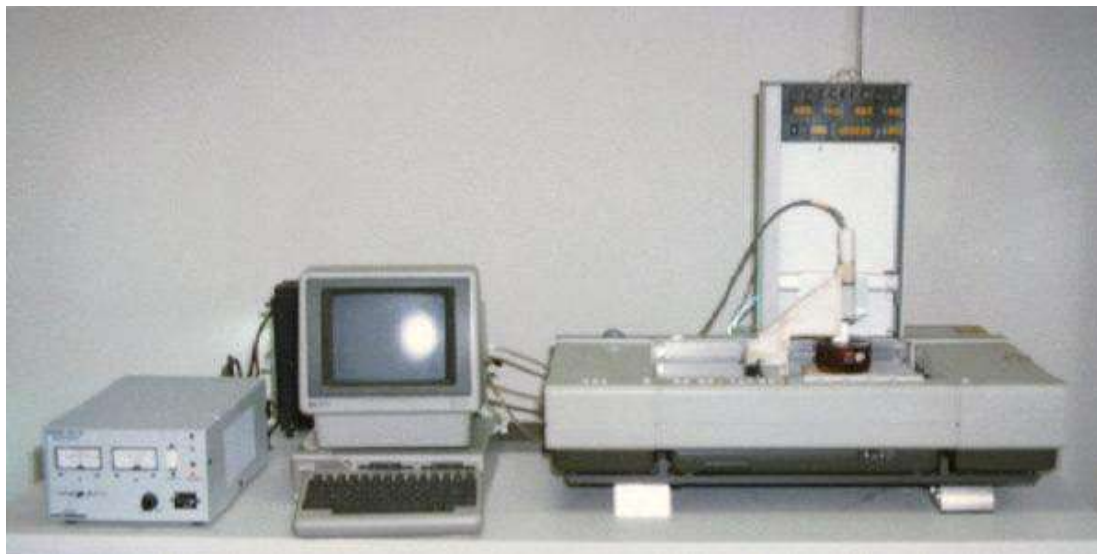


Рисунок 1.2-Еволюція 3D-принтерів

На сучасному етапі адитивні технології продовжують активно розвиватися, з'являються нові матеріали, удосконалюються методи контролю якості та автоматизації процесів. Очікується, що в майбутньому ці технології стануть одним із ключових елементів цифрового виробництва та суттєво змінять підходи до проектування і виготовлення продукції.

1.3 Основні методи 3D-друку металів

Існує кілька основних методів адитивного виробництва металів, які відрізняються типом вихідного матеріалу, джерелом енергії, умовами формування структури та сферою застосування. Вибір конкретної технології залежить від вимог до якості виробу, його геометрії, механічних властивостей та економічної доцільності.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До найбільш поширених технологій адитивного виробництва металів належать:

- Selective Laser Melting (SLM);
- Direct Metal Laser Sintering (DMLS);
- Electron Beam Melting (EBM);
- Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM).

Технологія SLM базується на повному плавленні металевого порошку за допомогою високопотужного лазерного променя. Процес відбувається у спеціальній камері з контрольованою атмосферою (часто інертний газ), що запобігає окисненню матеріалу.

Основні особливості SLM:

- повне розплавлення порошку;
- формування щільної структури;
- висока точність виготовлення;
- можливість отримання складної геометрії.

Перевагою даного методу є отримання матеріалів із високою щільністю та добрими механічними властивостями. Однак процес потребує значних енергетичних витрат і дорогого обладнання.

DMLS є технологією, подібною до SLM, однак у цьому випадку відбувається не повне плавлення, а спікання металевого порошку під дією лазера. Це означає, що частинки порошку з'єднуються між собою без повного переходу у рідкий стан.

Основні характеристики DMLS:

- часткове плавлення або спікання матеріалу;
- можливість роботи з різними сплавами;
- нижчі температурні навантаження порівняно з SLM.

Дана технологія дозволяє виготовляти складні деталі, проте може супроводжуватися підвищеною пористістю, що впливає на механічні властивості виробів.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Технологія ЕВМ використовує електронний промінь як джерело енергії для плавлення металевого порошку. Процес відбувається у вакуумному середовищі, що дозволяє уникнути окиснення матеріалу та покращує якість виробів.

Основні особливості ЕВМ:

- використання електронного променя;
- робота у вакуумі;
- висока швидкість процесу;
- ефективність при роботі з реакційно здатними металами (наприклад, титаном).

Перевагою ЕВМ є зниження внутрішніх напружень завдяки високим температурам процесу. Недоліком є нижча точність порівняно з лазерними технологіями.

WAAM є технологією, яка відрізняється від попередніх тим, що використовує металевий дріт як вихідний матеріал та електричну дугу як джерело енергії. Процес нагадує зварювання і дозволяє швидко створювати великогабаритні вироби.

Основні характеристики WAAM:

- використання металевого дроту;
- висока продуктивність;
- можливість виготовлення великих деталей;
- відносно низька вартість матеріалів.

Однак ця технологія має нижчу точність і потребує додаткової механічної обробки після друку.

Таблиця 1.1 – Порівняння методів 3D-друку металів

Метод	Тип матеріалу	Джерело енергії	Переваги	Недоліки
SLM	порошок	лазер	висока точність	висока вартість

Метод	Тип матеріалу	Джерело енергії	Переваги	Недоліки
DMLS	порошок	лазер	складна геометрія	пористість
EBM	порошок	електронний промінь	висока швидкість	обмеження матеріалів
WAAM	дріт	електрична дуга	великі деталі	низька точність

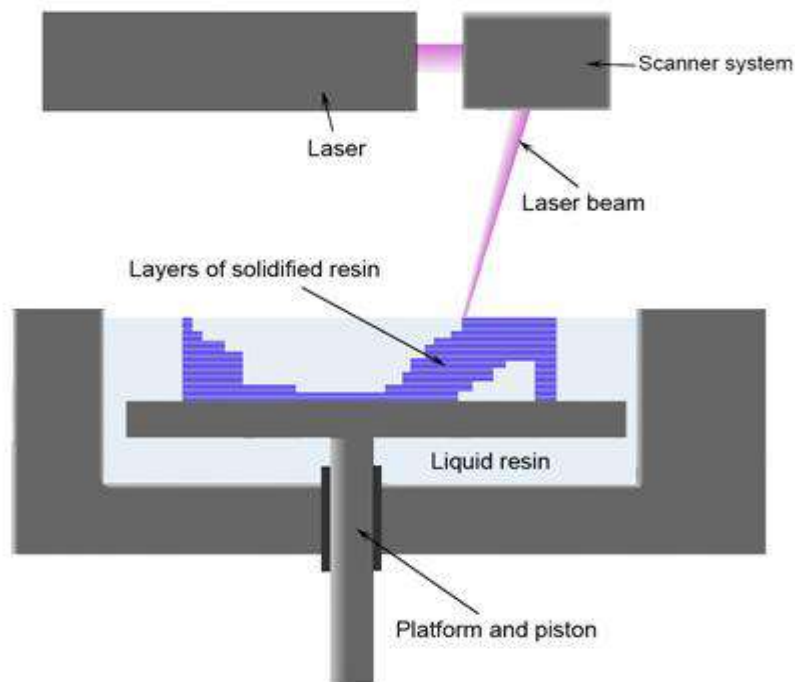


Рисунок 1.3 - Схема лазерного 3D-друку

1.4 Класифікація адитивних технологій

Адитивні технології класифікуються за різними ознаками, зокрема за типом матеріалу та способом його обробки.

Основні класи:

- порошкові технології;
- дровові технології;
- технології на основі рідких матеріалів;
- гібридні технології.

За міжнародними стандартами виділяють такі категорії:

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Powder Bed Fusion;
- Directed Energy Deposition;
- Binder Jetting.

Таблиця 1.2 – Класифікація адитивних технологій

Категорія	Опис	Приклад
Powder Bed Fusion	спікання порошку	SLM
Directed Energy Deposition	наплавлення	WAAM
Binder Jetting	зв'язування порошку	металевий друк

Класифікація дозволяє систематизувати різні підходи та вибрати оптимальну технологію для конкретного застосування.

1.5 Матеріали для 3D-друку металів

Для адитивного виробництва металів використовуються різні типи матеріалів, які повинні відповідати високим вимогам щодо чистоти, гранулометричного складу та фізико-хімічних властивостей.

Основні матеріали:

- нержавіючі сталі;
- титан та його сплави;
- алюмінієві сплави;
- нікелеві сплави.

Властивості матеріалів:

- висока міцність;
- жаростійкість;
- корозійна стійкість;
- хороша зварюваність.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.3 – Основні матеріали для адитивного виробництва

Матеріал	Переваги	Область застосування
Титан	легкість, міцність	авіація
Алюміній	мала густина	автомобілебудування
Сталь	універсальність	машинобудування
Нікель	жаростійкість	енергетика



Рисунок 1.4-Металевий порошок для 3D-друку

У першому розділі було розглянуто теоретичні основи адитивних технологій та їх роль у сучасному виробництві. Встановлено, що адитивне виробництво є перспективним напрямом розвитку промисловості, який забезпечує високу точність, ефективність та гнучкість виробничих процесів.

Проаналізовано основні методи 3D-друку металів, їх переваги та недоліки, а також класифікацію адитивних технологій. Визначено, що вибір конкретної технології залежить від вимог до якості виробу, матеріалу та умов експлуатації.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розглянуто основні матеріали, що використовуються у 3D-друці металів, та їх властивості. Встановлено, що характеристики матеріалів суттєво впливають на процес формування структури та кінцеві властивості виробів.

Отже, адитивні технології відкривають нові можливості у виробництві металевих виробів, проте потребують подальших досліджень для оптимізації процесів та підвищення якості продукції.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ МЕТАЛІВ ПРИ 3D-ДРУЦІ

2.1 Особливості кристалізації при адитивному виробництві

Однією з ключових особливостей адитивних технологій є специфічні умови кристалізації металів, які суттєво відрізняються від традиційних методів обробки. У процесі 3D-друку металів відбувається локальне плавлення матеріалу з подальшим швидким охолодженням, що призводить до формування унікальної структури.

Швидкість охолодження при адитивному виробництві може досягати 10^3 – 10^6 К/с, що значно перевищує аналогічні показники при литті. Це сприяє утворенню дрібнозернистої структури та підвищенню міцності матеріалу.

Основні фактори, що впливають на процес кристалізації:

- температура плавлення матеріалу;
- швидкість переміщення джерела енергії;
- потужність лазера або електронного променя;
- товщина шару;
- умови теплообміну.

У процесі затвердіння формується так звана дендритна структура, яка характеризується витягнутими кристалами, орієнтованими у напрямку теплового потоку.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

різних зонах матеріалу можуть спостерігатися відмінності у розмірах зерен та фазовому складі.

Таблиця 2.1 – Порівняння мікроструктури металів

Параметр	Адитивні технології	Традиційні технології
Розмір зерна	дрібний	середній/великий
Однорідність	нижча	вища
Текстура	виражена	слабка
Напруження	високі	помірні

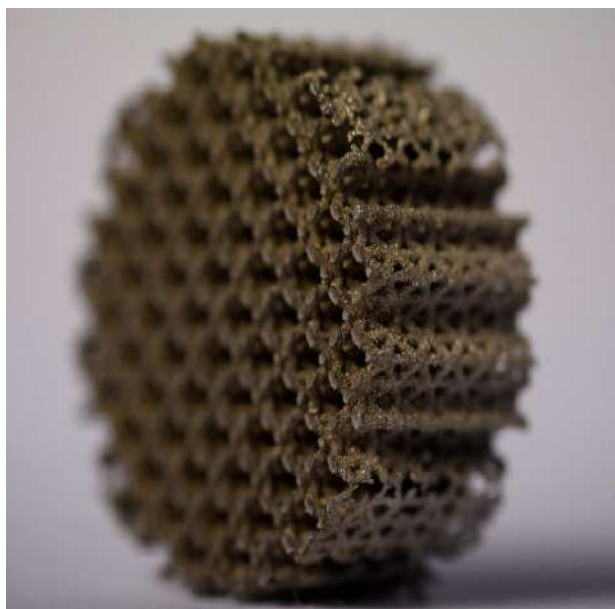


Рисунок 2.2-Мікроструктура металу після 3D-друку

Формування мікроструктури безпосередньо впливає на механічні властивості матеріалу.

2.3 Анізотропія властивостей

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однією з характерних особливостей матеріалів, отриманих за допомогою адитивних технологій, є анізотропія властивостей, тобто залежність їх характеристик від напрямку.

Причини анізотропії:

- пошарове формування матеріалу;
- орієнтація зерен;
- різні умови охолодження в різних напрямках.

Властивості, що зазнають впливу:

- міцність;
- пластичність;
- твердість;
- втомна довговічність.

Таблиця 2.2 – Анізотропія механічних властивостей

Напрямок	Міцність	Пластичність
По шарах	нижча	вища
Перпендикулярно	вища	нижча



Рисунок 2.3-Напрямки анізотропії в 3D-друці

Анізотропія є важливим фактором, який необхідно враховувати при проектуванні деталей.

2.4 Дефекти та неоднорідності структури

Формування структури металів у процесі адитивного виробництва супроводжується рядом специфічних явищ, які можуть призводити до виникнення дефектів різної природи. На відміну від традиційних технологій, де процеси кристалізації відбуваються відносно рівномірно, у 3D-друці металів спостерігаються значні температурні градієнти та локалізовані зони плавлення, що ускладнює контроль якості матеріалу.

Аналіз сучасних досліджень показує, що дефекти в адитивно виготовлених виробах мають комплексний характер і часто виникають не ізольовано, а у взаємозв'язку один з одним. Це означає, що, наприклад, пористість може сприяти розвитку тріщин, а неоднорідність структури — зниженню втомної міцності.

Одним із найбільш характерних дефектів є пористість, яка формується внаслідок нестабільності процесу плавлення. При недостатньому енергетичному впливі частинки порошку не повністю з'єднуються між собою, утворюючи мікропорожнини. Водночас надмірна енергія може призводити до випаровування матеріалу та утворення газових пор. Таким чином, пористість є результатом порушення балансу між підведеною енергією та швидкістю її відведення.

Іншою важливою проблемою є утворення тріщин, яке пов'язане з високими залишковими напруженнями. У процесі швидкого охолодження різні ділянки матеріалу стискаються нерівномірно, що викликає внутрішні напруження. Якщо вони перевищують межу міцності матеріалу, відбувається

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

локальне руйнування у вигляді тріщин. Особливо чутливими до цього є сплави з низькою пластичністю або складним фазовим складом.

Неповне спікання або так звані “непровари” виникають у випадках, коли параметри процесу не забезпечують достатнього проплавлення між шарами. Це призводить до утворення слабких міжшарових зв’язків, які суттєво знижують міцність матеріалу, особливо при навантаженнях на розтяг.

Окрему групу становлять дефекти, пов’язані з якістю вихідного матеріалу. Наявність оксидних плівок, сторонніх включень або нерівномірного гранулометричного складу порошку може призводити до локальних неоднорідностей структури. Такі дефекти часто виступають концентраторами напружень і можуть ініціювати руйнування матеріалу.

Важливо зазначити, що виникнення дефектів значною мірою залежить від технологічних параметрів процесу. Потужність джерела енергії, швидкість сканування, товщина шару та стратегія побудови безпосередньо впливають на якість сформованої структури. Нестабільність хоча б одного з цих параметрів може призвести до погіршення характеристик матеріалу.

Таким чином, дефекти в адитивному виробництві є результатом складної взаємодії теплових, фізичних і технологічних факторів. Їх мінімізація потребує комплексного підходу, що включає оптимізацію режимів друку, контроль якості матеріалів та вдосконалення обладнання.

Таблиця 2.3 – Основні дефекти та їх причини

Дефект	Причина	Наслідки
Пористість	недостатня енергія	зниження міцності
Тріщини	термічні напруження	руйнування
Непровари	низька температура	слабкі зони

Зменшення дефектів є одним із головних завдань при оптимізації процесу 3D-друку.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5 Вплив параметрів друку на структуру

Параметри процесу адитивного виробництва мають вирішальний вплив на формування структури металу.

Основні параметри:

- потужність джерела енергії;
- швидкість сканування;
- товщина шару;
- температура платформи.

Зміна цих параметрів може призводити до:

- зміни розміру зерен;
- зменшення або збільшення пористості;
- зміни фазового складу

Таблиця 2.4 – Вплив параметрів на структуру

Параметр	Вплив
Потужність	глибина проплавлення
Швидкість	якість структури
Товщина шару	точність

Таким чином, оптимізація параметрів дозволяє керувати властивостями матеріалу.

У другому розділі було досліджено особливості формування структури металів при використанні адитивних технологій. Встановлено, що процеси швидкого плавлення та кристалізації призводять до утворення дрібнозернистої та неоднорідної мікроструктури.

Виявлено, що матеріали, отримані за допомогою 3D-друку, характеризуються анізотропією властивостей, що обумовлено пошаровою природою формування виробу.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проаналізовано основні дефекти, які виникають у процесі адитивного виробництва, та визначено їх вплив на експлуатаційні характеристики матеріалів.

Встановлено, що параметри процесу 3D-друку мають значний вплив на структуру металів, а їх оптимізація дозволяє покращити якість виробів.

Отже, формування структури металів при адитивному виробництві є складним процесом, який потребує детального дослідження та контролю.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 ВПЛИВ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НА ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ

3.1 Механічні властивості

Механічні властивості металевих матеріалів, отриманих за допомогою адитивних технологій, формуються в умовах, які суттєво відрізняються від традиційних методів виробництва, таких як лиття або пластична деформація. Це обумовлює специфічний характер їх поведінки під навантаженням і визначає необхідність окремого аналізу таких матеріалів.

Ключовою особливістю адитивного виробництва є поєднання локалізованого плавлення з надзвичайно високими швидкостями охолодження. У результаті формується дрібнозерниста або навіть субмікрокристалічна структура, яка, відповідно до відомих закономірностей зміцнення матеріалів, сприяє підвищенню межі міцності та твердості. Зокрема, зменшення розміру зерна обмежує рух дислокацій, що є одним із основних механізмів пластичної деформації.

Разом із тим, механічні властивості адитивно виготовлених матеріалів визначаються не лише структурними характеристиками, але й наявністю дефектів, таких як пористість, мікротріщини та непровари. Ці дефекти виступають концентраторами напружень і можуть суттєво знижувати реальну міцність матеріалу, особливо при циклічних навантаженнях.

До основних механічних властивостей, що характеризують поведінку матеріалів, отриманих методом 3D-друку, належать:

- міцність — здатність матеріалу витримувати навантаження без руйнування;
- межа текучості — напруження, при якому починається пластична деформація;
- твердість — опір матеріалу локальній пластичній деформації;

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- пластичність — здатність матеріалу деформуватися без руйнування;
- втомна міцність — здатність витримувати багаторазові циклічні навантаження.

Аналіз показує, що адитивно виготовлені матеріали часто демонструють підвищену межу міцності та твердість порівняно з традиційними аналогами. Це пояснюється як дрібнозернистою структурою, так і можливим утворенням зміцнюючих фаз у процесі швидкої кристалізації.

Однак підвищення міцності часто супроводжується зниженням пластичності. Це пов'язано з тим, що обмежений рух дислокацій та наявність внутрішніх напружень ускладнюють розвиток пластичної деформації. Внаслідок цього матеріал може проявляти більш крихку поведінку, особливо в напрямку, перпендикулярному до шарів побудови.

Особливої уваги заслуговує явище анізотропії механічних властивостей. Через пошарове формування виробу структура матеріалу є неоднорідною в різних напрямках. Як наслідок, міцність і пластичність можуть суттєво відрізнятися залежно від орієнтації навантаження відносно напрямку друку. Як правило, найменша міцність спостерігається в напрямку, перпендикулярному до шарів, де міжшарові зв'язки є слабшими.

Втомна міцність адитивно виготовлених матеріалів є одним із найбільш чутливих показників до наявності дефектів. Навіть незначна пористість може значно зменшувати довговічність матеріалу при циклічних навантаженнях. Це обумовлює необхідність додаткової обробки виробів, зокрема гарячого ізостатичного пресування або термічної обробки, для зменшення дефектності структури.

Таким чином, механічні властивості матеріалів, отриманих за допомогою адитивних технологій, є результатом складної взаємодії мікроструктури, дефектів та технологічних параметрів процесу. Вони можуть перевищувати характеристики традиційних матеріалів за окремими показниками, проте

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потребують оптимізації для досягнення стабільних і передбачуваних властивостей.

Таблиця 3.1 – Механічні властивості матеріалів

Властивість	Адитивні технології	Традиційні технології
Межа міцності	висока	середня
Твердість	висока	середня
Пластичність	нижча	вища
Втомна міцність	змінна	стабільна

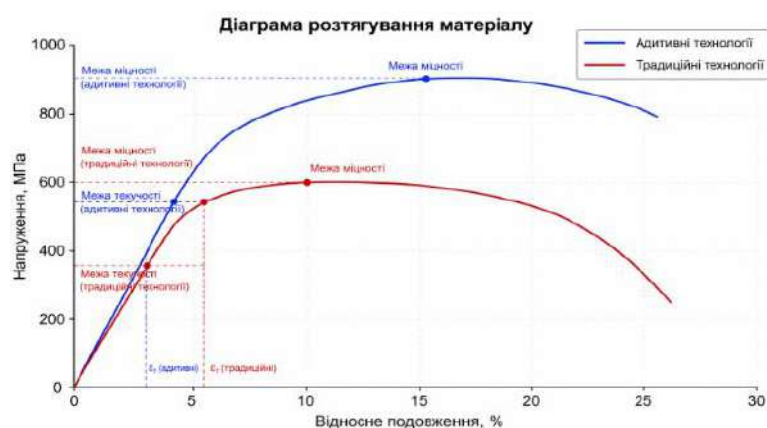


Рисунок 3.1-Діаграма розтягування матеріалу, отриманого адитивними та традиційними технологіями

Таким чином, адитивні технології дозволяють отримувати матеріали з високими показниками міцності, але потребують оптимізації для підвищення пластичності.

3.2 Фізичні властивості

Фізичні властивості металевих матеріалів, отриманих за допомогою адитивних технологій, формуються під впливом складних теплових і структурних процесів, що відбуваються під час пошарового плавлення та

кристалізації. На відміну від традиційних методів виробництва, у 3D-друці спостерігається значна неоднорідність структури, що безпосередньо відображається на фізичних характеристиках матеріалу.

До основних фізичних властивостей, які зазнають змін при адитивному виробництві, належать:

- густина;
- електропровідність;
- теплопровідність;
- магнітні властивості.

Одним із ключових показників є густина матеріалу, яка визначає ступінь його ущільнення та наявність внутрішніх дефектів. У процесі адитивного виробництва часто спостерігається зниження густини порівняно з теоретичним значенням. Це пов'язано з утворенням пористості, яка виникає внаслідок нестабільного плавлення порошку, захоплення газів або неповного спікання шарів.

Зменшення густини має комплексний вплив на властивості матеріалу. Зокрема, воно призводить до:

- зниження механічної міцності;
- погіршення втомної довговічності;
- зменшення теплопровідності;
- локальної концентрації напружень.

Електропровідність металів, виготовлених методом 3D-друку, також може відрізнитися від традиційних матеріалів. Основною причиною цього є наявність дефектів структури, таких як пори, межі зерен та домішки, які розсіюють електрони і знижують провідність. Крім того, текстурованість матеріалу, що виникає внаслідок направленого росту зерен, може спричинити анізотропію електричних властивостей.

Теплопровідність є ще однією важливою характеристикою, особливо для деталей, що працюють в умовах високих температур. У адитивно

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виготовлених матеріалах вона, як правило, нижча, ніж у традиційних, через пористість та структурну неоднорідність. Пори діють як теплові бар'єри, що перешкоджають ефективному переносу тепла.

Особливу роль відіграють магнітні властивості, які визначаються як хімічним складом матеріалу, так і його структурою. У матеріалах, отриманих адитивними методами, можливі зміни магнітних характеристик через:

- зміну фазового складу;
- внутрішні напруження;
- неоднорідність структури.

Важливо відзначити, що фізичні властивості значною мірою залежать від параметрів процесу друку. Потужність джерела енергії, швидкість сканування, товщина шару та умови охолодження визначають ступінь ущільнення матеріалу та рівень дефектності.

Фізичні властивості металів, отриманих за допомогою адитивних технологій, є чутливими до особливостей технологічного процесу. Їх оптимізація потребує ретельного підбору режимів друку та контролю якості вихідних матеріалів.

Таблиця 3.2 – Фізичні властивості

Параметр	Адитивні матеріали	Традиційні
Густина	нижча	вища
Теплопровідність	змінна	стабільна
Електропровідність	нижча	вища

Рівень фізичних властивостей залежить від однорідності структури та ступеня її дефектності.

3.3 Теплові характеристики

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Теплові властивості металів відіграють важливу роль у визначенні їх експлуатаційних можливостей, особливо в умовах високих температур.

Основні характеристики:

- коефіцієнт теплопровідності;
- теплоємність;
- температурна стійкість.

У процесі адитивного виробництва можуть виникати залишкові напруження, що впливають на теплову стабільність матеріалу.

Таблиця 3.3 – Теплові властивості

Параметр	Вплив адитивних технологій
Теплопровідність	знижується
Термостійкість	підвищується
Напруження	зростають

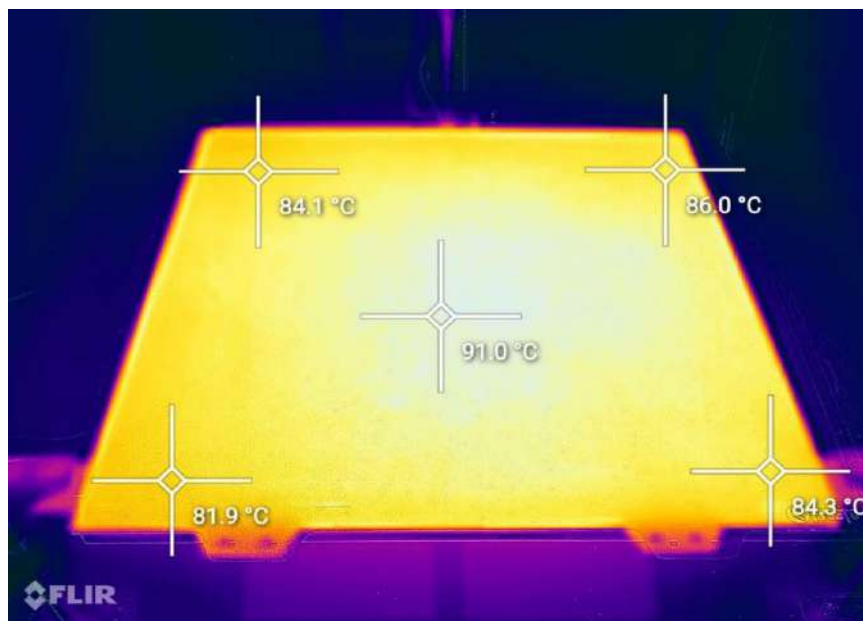


Рисунок 3.3- Теплоізоляція платформи 3D-принтера

Отже, теплові характеристики потребують додаткового контролю та оптимізації.

3.4 Корозійна стійкість

Корозійна стійкість є важливою характеристикою металевих матеріалів, особливо для застосування у складних умовах експлуатації.

Фактори впливу:

- мікроструктура;
- наявність дефектів;
- хімічний склад.

Адитивні технології можуть як покращувати, так і погіршувати корозійну стійкість залежно від умов формування структури.

Таблиця 3.4 – Вплив на корозійну стійкість

Фактор	Вплив
Пористість	знижує
Дрібнозернистість	підвищує
Дефекти	знижують



Рисунок 3.4-Корозійні пошкодження

Таким чином, контроль параметрів друку є важливим для забезпечення довговічності матеріалу.

3.5 Порівняння з традиційними технологіями

Порівняння адитивних і традиційних методів виробництва дозволяє оцінити їх ефективність та доцільність застосування.

Таблиця 3.5 – Порівняння технологій

Критерій	Адитивні технології	Традиційні
Точність	висока	середня
Витрати матеріалу	низькі	високі
Швидкість	середня	висока
Гнучкість	висока	низька

Адитивні технології мають значні переваги, але потребують удосконалення для масового виробництва.

У третьому розділі було досліджено вплив адитивних технологій на властивості металевих матеріалів. Встановлено, що механічні властивості таких матеріалів характеризуються високою міцністю та твердістю, але можуть мати знижену пластичність.

Проаналізовано фізичні та теплові характеристики, які значною мірою залежать від мікроструктури та наявності дефектів. Виявлено, що пористість є одним із ключових факторів, що впливає на властивості матеріалу.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розглянуто корозійну стійкість матеріалів, яка визначається структурними особливостями та умовами експлуатації.

Проведено порівняння адитивних і традиційних технологій, що дозволило визначити їх переваги та недоліки.

Отже, адитивні технології відкривають широкі можливості для створення металевих виробів із заданими властивостями, проте потребують подальших досліджень і вдосконалення.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ 3D-ДРУКУ НА ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ

4.1 Методика проведення дослідження

Метою даного експериментального дослідження є встановлення закономірностей впливу технологічних параметрів адитивного виробництва на формування мікроструктури та механічних властивостей металевих матеріалів.

У якості об'єкта дослідження було обрано зразки, виготовлені з нержавіючої сталі, що широко застосовується в машинобудуванні завдяки високим показникам корозійної стійкості, міцності та технологічності. Виготовлення зразків здійснювалось методом селективного лазерного плавлення (SLM), який є одним із найбільш поширених способів адитивного виробництва металевих виробів.

У процесі дослідження варіювалися основні технологічні параметри друку, що безпосередньо впливають на якість формування матеріалу, а саме:

- потужність лазерного випромінювання;
- швидкість сканування лазерного променя;
- товщина шару, що наноситься.

Зазначені параметри визначають тепловий режим процесу плавлення порошкового матеріалу, що, у свою чергу, впливає на щільність, пористість, мікроструктуру та механічні характеристики готових виробів.

Для проведення експерименту було сформовано серію зразків із різними комбінаціями значень вищезазначених параметрів. Такий підхід дозволив комплексно оцінити їхній вплив на властивості матеріалу та встановити оптимальні режими друку.

Методика проведення дослідження включала наступні етапи:

1. Підготовка цифрових моделей зразків. На даному етапі було розроблено тривимірні моделі зразків із використанням систем

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

автоматизованого проєктування. Геометричні параметри моделей відповідали вимогам стандартів для подальших механічних випробувань.

2. Виготовлення зразків методом 3D-друку. Друк здійснювався на установці селективного лазерного плавлення з попередньо заданими параметрами процесу. Для кожної серії зразків встановлювалися індивідуальні режими друку.

3. Первинний візуальний контроль якості. Після виготовлення зразки піддавалися огляду з метою виявлення зовнішніх дефектів, таких як тріщини, деформації або нерівності поверхні.

4. Дослідження мікроструктури матеріалу. Аналіз мікроструктури проводився із застосуванням металографічних методів. Для цього зразки шліфувалися, полірувалися та піддавалися травленню з подальшим вивченням під мікроскопом.

5. Випробування механічних властивостей. Зразки піддавалися механічним випробуванням, зокрема на розтяг, твердість та міцність. Отримані результати дозволили оцінити вплив параметрів друку на експлуатаційні характеристики матеріалу.

6. Обробка та аналіз результатів дослідження. На завершальному етапі було проведено узагальнення отриманих експериментальних даних, їх порівняння та встановлення залежностей між параметрами процесу друку і властивостями матеріалу.

Отримані результати експериментального дослідження дозволяють визначити оптимальні режими адитивного виробництва для забезпечення необхідних фізико-механічних характеристик металевих виробів.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 4.1-Зразки після 3D-друку

4.2 Опис обладнання та матеріалів

Для проведення експериментального дослідження використовувалося обладнання для адитивного виробництва металевих виробів, що реалізує технологію селективного лазерного плавлення (SLM). Дана технологія забезпечує формування виробів шляхом пошарового плавлення металевого порошку під дією висококонцентрованого лазерного випромінювання.

Застосована установка належить до класу SLM-принтерів і оснащена волоконним лазером, який забезпечує стабільне та кероване джерело енергії для процесу плавлення металевого порошку.

Основні технічні характеристики обладнання:

- Тип установки – SLM-принтер для адитивного виробництва металів;
- Джерело енергії – волоконний лазер, що характеризується високим коефіцієнтом корисної дії та стабільністю випромінювання;
- Діапазон потужності лазера – 200–400 Вт;
- Товщина формованого шару – 20–50 мкм.

Потужність лазера в межах 200–400 Вт є одним із ключових параметрів процесу, оскільки визначає кількість енергії, що передається порошковому шару. При недостатній потужності можливе неповне проплавлення частинок, що призводить до підвищеної пористості та зниження міцності виробу.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Водночас надмірна потужність може спричиняти перегрів матеріалу, утворення дефектів структури, таких як мікротріщини або залишкові напруження.

Товщина шару в межах 20–50 мкм забезпечує високу точність формування геометрії виробу та впливає на якість міжшарової адгезії. Зменшення товщини шару дозволяє підвищити щільність і однорідність структури, проте збільшує тривалість процесу друку.

У якості вихідного матеріалу використовувався порошок нержавіючої сталі, який широко застосовується в адитивному виробництві завдяки своїм фізико-механічним та експлуатаційним властивостям.

Сферична форма частинок забезпечує високу сипучість порошку та рівномірне нанесення шарів під час друку. Це сприяє формуванню щільної структури виробу та зменшенню кількості дефектів.

Розмір частинок у межах 20–40 мкм є оптимальним для технології SLM, оскільки забезпечує баланс між якістю поверхні, щільністю матеріалу та стабільністю процесу плавлення. Занадто великі частинки можуть погіршувати точність формування виробу, тоді як надто дрібні — знижувати сипучість і ускладнювати рівномірне нанесення порошкового шару.

Таблиця 4.1 – Характеристики матеріалу

Параметр	Значення
Матеріал	нержавіюча сталь
Розмір частинок	20–40 мкм
Форма	сферична

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 4.2-Металевий порошок

4.3 Аналіз отриманих результатів

У результаті проведеного експериментального дослідження було отримано кількісні дані, що характеризують вплив основних технологічних параметрів процесу селективного лазерного плавлення на механічні властивості виготовлених зразків, зокрема на їхню міцність.

Таблиця 4.2 – Результати випробувань

Зразок	Потужність (Вт)	Швидкість (мм/с)	Міцність (МПа)
1	200	800	520
2	250	700	580
3	300	600	640
4	350	500	690

Аналіз отриманих результатів свідчить про наявність чіткої залежності між параметрами процесу друку та міцнісними характеристиками матеріалу. Зокрема, встановлено, що зі збільшенням потужності лазерного

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

випромінювання від 200 до 350 Вт спостерігається поступове зростання міцності зразків від 520 до 690 МПа.

Одночасно зі збільшенням потужності відбувалося зменшення швидкості сканування лазерного променя, що також суттєво вплинуло на результати. Зниження швидкості сканування сприяє збільшенню часу взаємодії лазера з порошковим матеріалом, що забезпечує більш повне проплавлення частинок та формування щільнішої структури.

Покращення механічних властивостей пояснюється наступними факторами:

- зменшенням пористості матеріалу внаслідок повнішого плавлення порошку;
- підвищенням ступеня міжшарової адгезії;
- формуванням більш однорідної мікроструктури.

Графічна залежність міцності від потужності лазера (рисунок 4.3) має майже лінійний характер у дослідженому діапазоні параметрів, що підтверджує прямий вплив енергетичних характеристик процесу на якість отриманого матеріалу.

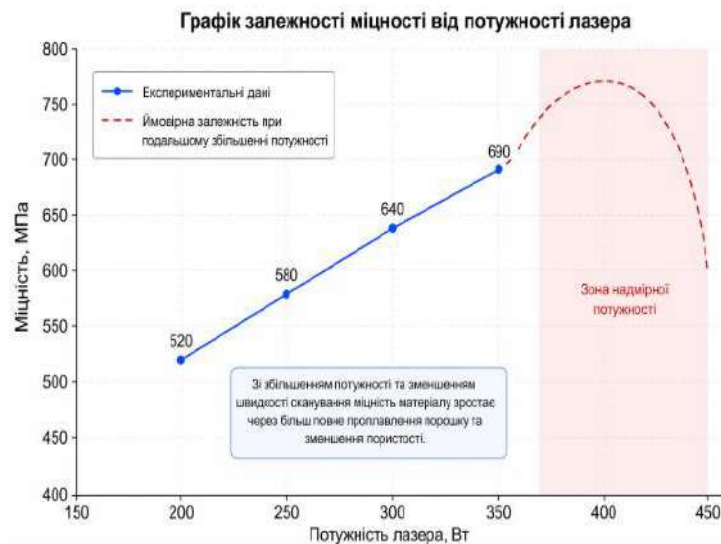


Рисунок 4.3- Графік залежності міцності від потужності лазера

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Разом з тим, результати дослідження показали, що надмірне збільшення потужності лазерного випромінювання може мати негативні наслідки. При перевищенні оптимального теплового режиму можливе виникнення таких дефектів:

- перегрів матеріалу та утворення зон переплавлення;
- поява залишкових термічних напружень;
- формування мікротріщин;
- погіршення геометричної точності виробу.

Підвищення потужності лазера є ефективним засобом покращення міцності матеріалу лише в межах оптимального діапазону значень. Подальше її збільшення без відповідного коригування інших параметрів процесу (зокрема швидкості сканування та товщини шару) може призводити до зниження якості виробів.

Отримані результати дозволяють зробити висновок про необхідність комплексної оптимізації параметрів адитивного виробництва для забезпечення високих експлуатаційних характеристик металевих виробів.

4.4 Побудова графіків і таблиць

На основі отриманих експериментальних даних було виконано побудову графічних залежностей, які дозволяють наочно оцінити характер впливу основних технологічних параметрів адитивного виробництва на механічні властивості та якість сформованих зразків.

Графічна інтерпретація результатів є важливим етапом дослідження, оскільки забезпечує можливість виявлення закономірностей, тенденцій та критичних значень параметрів процесу.

У ході дослідження було побудовано такі основні залежності:

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- залежність міцності матеріалу від потужності лазерного випромінювання;
- залежність міцності від швидкості сканування лазерного променя;
- залежність якості сформованої структури від товщини шару.

Аналіз графіків показав, що зі збільшенням потужності лазера спостерігається зростання міцності матеріалу, що обумовлено підвищенням енергії, яка підводиться до порошкового шару, і, відповідно, більш повним його проплавленням. При цьому зменшується кількість пор, підвищується щільність та однорідність структури.

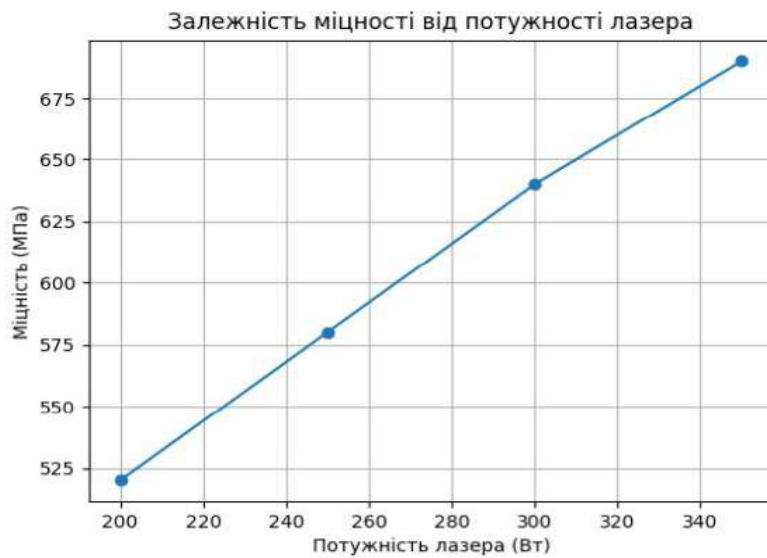


Рисунок 4.4 – Залежність міцності від потужності лазера

Даний графік демонструє майже лінійне зростання міцності зі збільшенням потужності, що свідчить про ефективність підвищення енергетичних параметрів процесу в дослідженому діапазоні.

Залежність міцності від швидкості сканування має обернений характер. Збільшення швидкості призводить до зменшення часу взаємодії лазерного променя з матеріалом, що може спричиняти неповне плавлення порошку та формування дефектів, які знижують механічні характеристики виробу.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 4.5 – Залежність міцності від швидкості сканування

Графік підтверджує зниження міцності при збільшенні швидкості сканування, що пояснюється недостатнім тепловкладенням у матеріал.

Товщина шару також істотно впливає на якість кінцевого виробу. Зменшення товщини шару сприяє підвищенню точності відтворення геометрії та покращенню міжшарової адгезії. Водночас надмірне зменшення цього параметра призводить до зростання тривалості процесу виготовлення, що необхідно враховувати при виборі оптимального режиму.

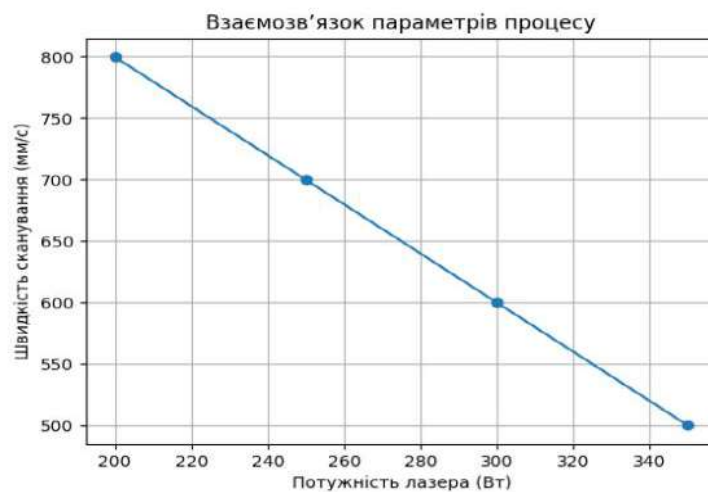


Рисунок 4.6 – Взаємозв'язок параметрів процесу

Графік ілюструє узгоджену зміну параметрів процесу, що дозволяє визначити оптимальні режими друку для досягнення необхідних властивостей матеріалу.

Аналіз експериментальних даних підтвердив теоретичні уявлення про механізми формування структури матеріалу при використанні технології селективного лазерного плавлення. Встановлені залежності узгоджуються з фізичними закономірностями тепломасопереносу та фазових перетворень у процесі локального плавлення металевих порошків.

У четвертому розділі виконано комплексне експериментальне дослідження впливу параметрів 3D-друку на властивості металевих матеріалів. Проведений аналіз дозволив ідентифікувати ключові фактори, що визначають якість виготовлених виробів, серед яких основну роль відіграють потужність лазерного випромінювання, швидкість сканування та товщина шару.

Встановлено, що підвищення потужності лазера у поєднанні зі зменшенням швидкості сканування сприяє формуванню більш щільної та однорідної структури матеріалу, що забезпечує зростання його міцнісних характеристик. Водночас перевищення оптимальних значень параметрів може призводити до виникнення дефектів, пов'язаних із перегрівом та накопиченням залишкових напружень.

Оптимізація технологічних режимів адитивного виробництва дозволяє досягти балансу між якістю, точністю та продуктивністю процесу. Отримані результати підтверджують доцільність використання адитивних технологій для виготовлення металевих виробів із заданими експлуатаційними властивостями та можуть бути використані для подальшого вдосконалення технологічних процесів.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Експериментальні дані узгоджуються з теоретичними положеннями та демонструють суттєвий вплив параметрів 3D-друку на формування структури і властивостей металевих матеріалів.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

5.1 Використання у промисловості

Адитивні технології набувають широкого застосування у сучасній промисловості, що обумовлено їх високою ефективністю, гнучкістю виробничих процесів та можливістю виготовлення виробів складної геометрії без необхідності використання традиційної технологічної оснастки.

У машинобудуванні 3D-друк використовується для виготовлення деталей складної просторової форми, які є важкими або економічно недоцільними для виробництва традиційними методами, такими як лиття, штампування чи механічна обробка. Застосування адитивних технологій дозволяє:

- скоротити кількість технологічних операцій;
- зменшити витрати матеріалу за рахунок відсутності значних відходів;
- оптимізувати конструкцію деталей шляхом використання топологічної оптимізації;
- зменшити масу виробів при збереженні необхідної міцності.

Крім того, адитивне виробництво активно застосовується для швидкого виготовлення прототипів, що значно скорочує цикл розробки нових виробів і дозволяє оперативно вносити конструктивні зміни.

В енергетичній галузі адитивні технології використовуються для виготовлення високонавантажених компонентів, зокрема елементів турбін, теплообмінників, камер згорання та інших деталей, які експлуатуються в умовах підвищених температур і агресивних середовищ. Використання 3D-друку дозволяє створювати внутрішні канали складної форми для ефективного охолодження, що неможливо реалізувати традиційними методами виробництва.

Застосування адитивних технологій у даній галузі забезпечує:

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- підвищення ефективності теплообміну;
- збільшення ресурсу роботи деталей;
- зниження маси конструкцій;
- підвищення енергоефективності обладнання.

Окрім машинобудування та енергетики, адитивні технології активно впроваджуються в авіаційній та автомобільній промисловості, медицині, а також у виробництві інструментів і оснастки. Це свідчить про їх універсальність та значний потенціал для подальшого розвитку.

Розширення сфер застосування 3D-друку обумовлює необхідність подальших досліджень у напрямку оптимізації технологічних параметрів та вдосконалення матеріалів, що дозволить підвищити якість і надійність виготовлених виробів.



Рисунок 5.1-Металеві деталі, виготовлені 3D-друком

Таким чином, застосування адитивних технологій у промисловості сприяє підвищенню ефективності виробництва.

Одними з найбільш перспективних напрямів використання адитивних технологій є медицина та авіаційна промисловість, де висувуються підвищені вимоги до точності, надійності та функціональності виробів.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У медичній галузі 3D-друк відкриває нові можливості для створення індивідуалізованих виробів, що максимально відповідають анатомічним особливостям конкретного пацієнта. Це дозволяє значно підвищити ефективність лікування та скоротити період реабілітації.

Адитивні технології широко застосовуються для виготовлення:

- імплантів різного призначення (ортопедичних, щелепно-лицевих тощо);
- протезів кінцівок;
- стоматологічних конструкцій (коронок, мостів, кап);
- індивідуальних медичних виробів, включаючи хірургічні шаблони та направляючі.

Ключовою перевагою адитивного виробництва у медицині є можливість створення виробів із складною внутрішньою структурою, зокрема пористих імплантів, які сприяють кращій остеоінтеграції та забезпечують надійне з'єднання з кістковою тканиною. Крім того, використання 3D-моделювання на основі даних комп'ютерної томографії дозволяє досягти високої точності відтворення анатомічних форм.

У авіаційній промисловості адитивні технології відіграють важливу роль у підвищенні ефективності конструкцій та зниженні експлуатаційних витрат. Основні напрямки їх застосування пов'язані з виготовленням складних деталей двигунів, елементів планера та допоміжних систем.

Застосування 3D-друку в авіації забезпечує:

- зменшення маси деталей за рахунок оптимізації конструкції;
- підвищення міцності та надійності виробів;
- інтеграцію декількох функцій в одну деталь (консолідація компонентів);
- скорочення кількості складальних операцій;
- зниження витрат на виробництво та обслуговування.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливого значення набуває використання топологічної оптимізації, яка дозволяє створювати конструкції з мінімальною масою при збереженні необхідних міцнісних характеристик. Це є критично важливим для авіаційної техніки, де зменшення маси безпосередньо впливає на економічність та ефективність польотів.

Застосування адитивних технологій у медицині та авіації свідчить про їх високий інноваційний потенціал і здатність забезпечувати принципово новий рівень якості продукції. Розвиток даного напрямку сприяє впровадженню персоналізованих рішень у медицині та підвищенню техніко-економічних показників у високотехнологічних галузях промисловості

5.2 Економічна ефективність

Економічна доцільність використання адитивних технологій є одним із ключових факторів їх активного впровадження у сучасному виробництві. Застосування 3D-друку забезпечує суттєву оптимізацію витрат, особливо у випадках виготовлення складних, індивідуалізованих або малосерійних виробів.

На відміну від традиційних методів обробки матеріалів, адитивне виробництво базується на принципі пошарового формування виробу, що дозволяє використовувати матеріал лише в обсязі, необхідному для створення деталі. Це значно знижує рівень відходів і підвищує коефіцієнт використання сировини.

До основних економічних переваг адитивних технологій належать:

– Раціональне використання матеріалів. Витрати матеріалу мінімізуються за рахунок відсутності значних припусків на обробку, що характерно для традиційних технологій.

– Скорочення тривалості виробничого циклу. Процес виготовлення деталей відбувається безпосередньо на основі цифрової моделі, що усуває

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

необхідність у підготовці складної технологічної оснастки та дозволяє значно зменшити час від розробки до отримання готового виробу.

– Зниження витрат на інструмент та оснастку. В адитивному виробництві відсутня потреба у виготовленні спеціальних форм, штампів або різального інструменту, що є суттєвою статтею витрат у традиційних методах.

– Ефективність при малосерійному виробництві. Адитивні технології є економічно доцільними при виготовленні одиничних виробів або малих партій, де використання традиційних методів є нерентабельним через високі початкові витрати.

– Гнучкість виробництва. Можливість швидкої зміни конструкції виробу без додаткових витрат на переналагодження обладнання сприяє підвищенню адаптивності виробничих процесів.

Порівняльна характеристика витрат при використанні адитивних та традиційних технологій наведена в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Порівняння витрат

Показник	Адитивні технології	Традиційні технології
Витрати матеріалу	низькі	високі
Час виробництва	короткий	тривалий
Вартість оснастки	відсутня	висока

Разом із тим, застосування адитивних технологій має певні економічні обмеження. Зокрема, значною перешкодою є висока вартість обладнання для 3D-друку, а також витратних матеріалів, зокрема металевих порошків. Крім того, додаткових витрат потребує обслуговування обладнання та забезпечення контрольованих умов виробничого середовища.

Незважаючи на це, у довгостроковій перспективі впровадження адитивних технологій є економічно виправданим, особливо у

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

високотехнологічних галузях, де важливими є точність, складність геометрії та швидкість виготовлення виробів. Раціональне поєднання адитивних і традиційних методів виробництва дозволяє досягти оптимального балансу між витратами та якістю продукції.

5.3 Перспективи розвитку технологій

Адитивні технології характеризуються значним потенціалом подальшого розвитку, що обумовлено постійним удосконаленням обладнання, матеріалів та програмного забезпечення. Їх еволюція спрямована на підвищення ефективності виробництва, розширення сфер застосування та покращення якості готової продукції.

До основних напрямів розвитку адитивних технологій належать:

- Підвищення точності та якості друку. Вдосконалення систем керування процесом, а також розвиток високоточних лазерних джерел дозволяють забезпечити більш стабільне формування шарів, зменшення шорсткості поверхні та підвищення точності геометричних параметрів виробів.
- Розширення номенклатури матеріалів. Активно ведуться дослідження щодо створення нових порошкових матеріалів, включаючи високоміцні сплави, композиційні матеріали та функціональні матеріали зі спеціальними властивостями (жаростійкі, зносостійкі, біосумісні).
- Автоматизація та цифровізація виробничих процесів. Інтеграція адитивних технологій у концепцію «Індустрії 4.0» передбачає використання автоматизованих систем керування, штучного інтелекту та моніторингу процесів у реальному часі, що дозволяє підвищити стабільність і повторюваність результатів.
- Зниження вартості обладнання та матеріалів. Розвиток ринку адитивного виробництва сприяє поступовому зменшенню вартості обладнання, що робить технології більш доступними для широкого кола підприємств.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Підвищення продуктивності процесів. Ведеться розробка багатолазерних систем та удосконалення технологій пошарового нанесення матеріалу, що дозволяє значно скоротити час виготовлення виробів.

Очікується, що у перспективі адитивні технології стануть невід'ємною складовою сучасних виробничих систем, забезпечуючи перехід до гнучкого, цифрового та індивідуалізованого виробництва. Їх використання сприятиме зміні традиційних підходів до проєктування та виготовлення продукції, зокрема через впровадження принципів топологічної оптимізації та функціональної інтеграції.

Розвиток адитивного виробництва відкриває нові можливості для промисловості, медицини, авіації та інших високотехнологічних галузей, забезпечуючи підвищення ефективності, якості та конкурентоспроможності продукції.

У п'ятому розділі проведено аналіз практичного застосування адитивних технологій та визначено основні напрями їх подальшого розвитку.

Встановлено, що технології 3D-друку широко використовуються у промисловості, медицині та авіаційній галузі, де забезпечують виготовлення складних виробів із високими експлуатаційними характеристиками. Їх застосування сприяє підвищенню гнучкості виробництва, скороченню тривалості технологічних процесів та розширенню можливостей конструювання.

Проаналізовано економічні аспекти використання адитивних технологій, що підтверджують їх ефективність у випадках виготовлення складних та малосерійних виробів. Зниження витрат матеріалу, відсутність необхідності у дорогій оснастці та скорочення виробничого циклу визначають їх конкурентні переваги.

Визначено ключові напрями розвитку адитивних технологій, серед яких підвищення точності друку, розширення спектра матеріалів, автоматизація виробничих процесів та зниження вартості обладнання. Реалізація зазначених

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напрямів сприятиме подальшому поширенню технологій та підвищенню їх ефективності.

Адитивні технології розглядаються як один із найбільш перспективних напрямів розвитку сучасного виробництва, що забезпечує формування нових підходів до проєктування, виготовлення та експлуатації виробів у різних галузях техніки.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі проведено комплексне дослідження впливу адитивних технологій (3D-друку) на структуру та властивості металевих матеріалів. У процесі виконання роботи було розглянуто теоретичні основи адитивного виробництва, проаналізовано сучасні методи 3D-друку металів, досліджено особливості формування мікроструктури та оцінено основні фізико-механічні властивості отриманих матеріалів.

У першому розділі встановлено, що адитивні технології є перспективним напрямом сучасного виробництва, який базується на принципі пошарового формування виробів. Проаналізовано основні методи 3D-друку металів, зокрема селективне лазерне плавлення, пряме лазерне спікання та інші технології. Визначено їх переваги, серед яких висока точність, мінімізація відходів матеріалу та можливість виготовлення виробів складної геометрії.

У другому розділі досліджено процеси формування структури металів при адитивному виробництві. Встановлено, що внаслідок швидкого плавлення та охолодження формуються дрібнозернисті та неоднорідні мікроструктури. Виявлено, що характерною особливістю таких матеріалів є анізотропія властивостей, яка обумовлена пошаровою природою формування виробу. Також проаналізовано основні дефекти, зокрема пористість і тріщини, які можуть виникати у процесі друку.

У третьому розділі проведено аналіз впливу адитивних технологій на властивості металевих матеріалів. Встановлено, що такі матеріали характеризуються підвищеною міцністю та твердістю завдяки дрібнозернистій структурі, проте можуть мати знижену пластичність. Визначено, що фізичні та теплові властивості значною мірою залежать від якості структури та наявності дефектів. Оцінено корозійну стійкість матеріалів та встановлено фактори, що на неї впливають.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У четвертому розділі проведено експериментальне дослідження впливу параметрів 3D-друку на властивості металів. Встановлено, що збільшення потужності лазера та зменшення швидкості сканування сприяє підвищенню міцності матеріалу за рахунок більш повного проплавлення порошку. Доведено, що оптимізація параметрів процесу дозволяє зменшити кількість дефектів і покращити якість виробів.

У п'ятому розділі розглянуто практичне застосування адитивних технологій та їх перспективи розвитку. Встановлено, що 3D-друк широко використовується у промисловості, медицині та авіації, забезпечуючи високу ефективність і гнучкість виробництва. Проаналізовано економічні переваги технологій, які полягають у зменшенні витрат матеріалу та скороченні часу виробництва.

У результаті проведеного дослідження зроблено такі основні висновки:

- адитивні технології є ефективним інструментом виготовлення металевих виробів із складною геометрією;
- процес 3D-друку суттєво впливає на формування мікроструктури матеріалів;
- матеріали, отримані адитивними методами, характеризуються анізотропією властивостей;
- механічні властивості таких матеріалів можуть перевищувати характеристики традиційних матеріалів за умови оптимізації процесу;
- наявність дефектів є основним фактором, що обмежує використання адитивних технологій;
- оптимізація параметрів друку дозволяє значно підвищити якість виробів;
- адитивні технології мають значний потенціал розвитку та широкі перспективи застосування.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, результати проведеного дослідження підтверджують доцільність використання адитивних технологій для виготовлення металевих виробів та визначають основні напрями їх подальшого розвитку.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гуляєв А. П. Металознавство : підручник. – Київ : Вища школа, 2018. – 512 с.
2. Калінін Ю. Д. Матеріалознавство та технології матеріалів. – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – 384 с.
3. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies. – New York : Springer, 2021. – 675 p.
4. Frazier W. E. Metal Additive Manufacturing: A Review // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2014. – Vol. 23. – P. 1917–1928.
5. DebRoy T. et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties // Progress in Materials Science. – 2018. – Vol. 92. – P. 112–224.
6. Herzog D., Seyda V., Wycisk E., Emmelmann C. Additive manufacturing of metals // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 117. – P. 371–392.
7. Kruth J.-P. et al. Binding mechanisms in selective laser sintering // CIRP Annals. – 2005. – Vol. 54. – P. 730–759.
8. Лахтин Ю. М. Основы металловедения. – Москва : Машиностроение, 2017. – 528 с.
9. ASM Handbook. Volume 7: Powder Metallurgy. – ASM International, 2015. – 912 p.
10. Campbell J. Complete Casting Handbook. – Oxford : Elsevier, 2015. – 936 p.
11. Steen W. M., Mazumder J. Laser Material Processing. – London : Springer, 2010. – 558 p.
12. Kumar S. Selective Laser Sintering: A Qualitative and Objective Approach // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 149. – P. 165–171.

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

13. Gu D. Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials. – Berlin : Springer, 2015. – 460 p.
14. Левченко В. І. Сучасні адитивні технології. – Київ : КПІ, 2020. – 256 с.
15. Попов В. В. Адитивні технології у машинобудуванні. – Львів : ЛНУ, 2021. – 300 с.
16. Бондаренко О. М. Металеві матеріали та їх властивості. – Дніпро : НГУ, 2019. – 280 с.
17. King W. E. et al. Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals // Applied Physics Reviews. – 2015. – Vol. 2.
18. Slotwinski J. et al. Characterization of metal powders used for additive manufacturing // Journal of Research of NIST. – 2014.
19. Spierings A. B. Comparison of density of SLM parts // Rapid Prototyping Journal. – 2011.
20. ASTM F2792-12a. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. – ASTM International, 2012.
21. ISO/ASTM 52900:2015. Additive manufacturing – General principles – Terminology.
22. Яковенко О. В. Технології 3D-друку металів // Вісник машинобудування. – 2022. – №2. – С. 45–52.
23. Петров С. І. Дослідження властивостей металів після 3D-друку // Наукові праці. – 2021. – №5. – С. 33–40.
24. Антонов В. П. Структура металів при швидкому охолодженні. – Київ : Наукова думка, 2018. – 210 с.
25. <https://easy3dprint.com.ua/uk/3d-druk-metalevykh-detaley/> (дата звернення: 20.04.2026)
26. <https://dn.nung.edu.ua/mod/page/view.php?id=53775> (дата звернення: 20.04.2026)

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

27. https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/article/view/1215 (дата звернення: 20.04.2026)
28. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/additive-manufacturing> (дата звернення: 20.04.2026)
29. <https://www.springer.com/gp/book/9783319445291> (дата звернення: 20.04.2026)
30. <https://www.astm.org> (дата звернення: 20.04.2026)

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК

					КвРМТВА. 22144.02.16.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		