

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут матеріалознавства
та зварювання ім. Є.О. Патона**

Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Мирослав КАРПЕЦЬ

«__» _____ 2024 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою

**«Інжиніринг та комп'ютерне моделювання в матеріалознавстві»
спеціальності 132 «Матеріалознавство»**

на тему:

**«Ультразвукове ударне зміцнення поверхні сплаву Co-27Cr-6Mo-5W,
отриманого за адитивною технологією»**

Виконав:

здобувач IV курсу, групи ФМ-01

Лебедев Володимир Олександрович

Керівник:

Проф., д.ф.-м.н. Волошко Світлана Михайлівна

Консультант з розділу охорони праці:

зав. каф., д.т.н., професор Левченко О. Г.

Консультант з економічно-організаційного розділу

доцент, к.е.н., доцент Нараєвський С. В.

Консультант з питань нормоконтролю:

ст. викладач Шаповалова Н. А.

Рецензент:

к.т.н., доц. Биба Є. Г.

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Здобувач _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут матеріалознавства
та зварювання ім. Є.О. Патона
Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг та комп'ютерне моделювання в матеріалознавстві»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Мирослав КАРПЕЦЬ

«__» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу здобувачу в.о.

Лебедєву Володимирі Олександровичу

1. Тема роботи «Ультразвукове ударне зміцнення поверхні сплаву Co-27Cr-6Mo-5W, отриманого за адитивною технологією», керівник роботи Волошко Світлана Михайлівна, д.ф.-м.н., затверджені наказом по університету від «30» травня 2024 р. №2210-е
2. Термін подання студентом роботи _____
3. Вихідні дані до роботи: 3D-друкований сплав Co-Cr-Mo-W; результати переддипломної практики.
4. Зміст роботи: літературний огляд; матеріали та методика досліджень; результати та їх обговорення; економічна частина; охорона праці.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 86 сторінок, 9 таблиць; 23 рисунка; 1 презентація.

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно економічна частина	Нараєвський С.В. доцент		
Охорона праці	Левченко О.Г. зав. каф., професор		
Нормоконтроль	Шаповалова Н.А. ст.викладач		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Видача завдання	20.05.2024	
	Огляд літератури	09.05.2024	
	Освоєння методик дослідження	16.05.2024	
	Виконання експериментальних досліджень	23.05.2024	
	Отримання результатів, їх аналіз	30.05.2024	
	Оформлення дипломної роботи	06.06.2024	
	Попередній захист	05.06.2022	
	Захист на засідання ЕК		

Здобувач

Володимир ЛЕБЕДЄВ

Керівник

Світлана ВОЛОШКО

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 86 сторінок, 23 рисунки, 64 літературні джерела.

АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО, 3D-ДРУК, МІКРОСТРУКТУРА, МІКРОТВЕРДІСТЬ, СПЛАВ Co-Cr-Mo-W, УЛЬТРАЗВУКОВА УДАРНА ОБРОБКА, ФАЗОВИЙ СКЛАД

Об'єкт дослідження: сплав Co-Cr-Mo-W, виготовлений за адитивною (селективного лазерного топлення порошку – СЛТ) технологією та модифікований ультразвуковою ударною обробкою (УЗУО) в інертному середовищі.

Предмет дослідження: структурно-фазовий стан та мікротвердість поверхневих шарів сплаву Co-27Cr-6Mo-5W після інтенсивного деформаційного впливу в інертному середовищі.

Мета роботи: дослідження впливу інтенсивної ультразвукової ударної дії на мікроструктуру та мікротвердість поверхні сплаву Co-27Cr-6Mo-5W, отриманого за адитивною технологією (селективного лазерного топлення порошку).

Задачі дослідження:

1. Літературний огляд сучасних технологій та методів, пов'язаних з адитивним виробництвом металевих сплавів, встановлення переваг та недоліків 3D-друку.
2. Вибір режимів та середовища ультразвукової ударної обробки (УЗУО) для зміцнення поверхні сплаву Co-27Cr-6Mo-5W.
3. Дослідження анізотропії структури сплаву Co-27Cr-6Mo-5W, отриманого за адитивною технологією (селективного лазерного топлення порошку).
4. Визначення впливу ультразвукової ударної обробки на зміни фазового складу та мікротвердість сплаву Co-27Cr-6Mo-5W.

Методи дослідження: оптична та растрова електронна мікроскопія, мікрорентгеноспектральний аналіз, мікродюрOMETричний аналіз, рентгеноструктурний аналіз.

Результати дослідження та їх новизна: результати досліджень цієї роботи становлять інтерес для розуміння впливу ультразвукової ударної обробки на мікроструктуру та механічні властивості сплаву Co-Cr-Mo-W, отриманого за технологією селективного лазерного топлення порошку (СЛТ).

Аналіз мікроструктури сплаву після ультразвукової обробки показав зміни, спричинені інтенсивною пластичною деформацією поверхні та приповерхневих шарів матеріалу. Це призвело до зменшення дефектів та роздрібнення зерен. У результаті експериментів виявлено значне підвищення мікротвердості матеріалу після УЗУО. Ці результати свідчать про ефективність використання цього методу обробки для покращення механічних характеристик сплаву, що має важливе значення для його застосування в медичній промисловості. Новизна отриманих результатів полягає в тому, що вони підтверджують доцільність використання ультразвукової ударної обробки для зміцнення і зменшення пористості сплаву Co-Cr-Mo-W, отриманого за технологією СЛТ. Це може мати важливе практичне значення для розробки нових матеріалів для медичних пристроїв та імплантатів.

Результати досліджень у цій роботі становлять ключовий внесок у розуміння механізмів впливу ультразвукової ударної обробки на мікроструктуру та механічні властивості сплаву Co-Cr-Mo-W, отриманого за допомогою селективного лазерного топлення порошку (СЛТ).

Сфера застосування: використання УЗУО для зміцнення поверхні 3D-друкованих матеріалів медичної промисловості дасть можливість розширити арсенал методів механічної обробки і буде сприяти збільшенню експлуатаційного ресурсу ортопедичних виробів зі складною геометрією.

ABSTRACT

Report on pre-diploma practice: 86 pages, 23 illustrations, 64 literary sources.

3D PRINTING, ADDITIVE MANUFACTURING, Co-Cr-Mo-W ALLOY, MICROHARDNESS, MICROSTRUCTURE, PHASE COMPOSITION, ULTRASONIC IMPACT TREATMENT

Research Object: Co-Cr-Mo-W alloy manufactured by additive (selective laser melting - SLM) technology and modified by ultrasonic impact treatment (UIT) in an inert environment.

Research Subject: Structural-phase state and microhardness of surface layers of Co-27Cr-6Mo-5W alloy after intense deformational influence in an inert environment.

Research Purpose: To investigate the influence of intense ultrasonic impact on the microstructure and microhardness of the surface layers of Co-27Cr-6Mo-5W alloy obtained by powder bed fusion additive manufacturing (SLM).

Research Objectives:

1. A literature review of modern technologies and methods related to additive manufacturing of metal alloys, establishing the advantages and disadvantages of 3D printing.
2. Selection of modes and environments for ultrasonic impact treatment (UIT) to strengthen the surface of the Co-27Cr-6Mo-5W alloy.
3. Investigation of the anisotropy of the structure of the Co-27Cr-6Mo-5W alloy obtained by additive technology (selective laser melting of powder).
4. Determination of the effect of ultrasonic impact treatment on changes in phase composition and microhardness of the Co-27Cr-6Mo-5W alloy.

Research Methods: Optical and scanning electron microscopy, micro X-ray spectroscopy analysis, microhardness analysis, X-ray structural analysis.

Research Results and Their Novelty: The research results are of interest for understanding the influence of ultrasonic impact treatment on the microstructure and

mechanical properties of Co-Cr-Mo-W alloy obtained by selective laser melting (SLM).

Analysis of the microstructure of the alloy after ultrasonic treatment showed changes caused by intense plastic deformation of the surface and subsurface layers of the material. This led to a reduction in defects and grain refinement. As a result of the experiments, a significant increase in material microhardness after UIT was found. These results indicate the effectiveness of using this treatment method to improve the mechanical characteristics of the alloy, which is important for its application in the medical industry. The novelty of the obtained results lies in confirming the feasibility of using ultrasonic impact treatment to strengthen and reduce the porosity of Co-Cr-Mo-W alloy obtained by SLM. This can have significant practical implications for the development of new materials for medical devices and implants.

The results of the research in this work make a significant contribution to understanding the mechanisms of ultrasonic impact treatment influence on the microstructure and mechanical properties of Co-Cr-Mo-W alloy obtained by selective laser melting (SLM).

Application Area: The use of UIT for surface strengthening of 3D-printed materials in the medical industry will expand the range of mechanical processing methods and contribute to increasing the operational life of orthopedic products with complex geometries.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ.....	10
ВСТУП.....	11
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД.....	13
1.1 Сучасні технології адитивного виробництва.....	13
1.2. Застосування ультразвукових технологій поверхневої обробки в адитивному виробництві металевих сплавів.....	17
1.3 Структура та властивості сплавів системи Co-Cr, виготовлених 3D-друком.....	25
1.4 Інтенсивна пластична деформація поверхні сплавів Co-Cr-Mo.....	28
1.5 Висновки до розділу 1.....	31
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ.....	32
2.1	Об'єкти
дослідження.....	32
2.2 Режими УЗУО та обладнання.....	36
2.3 Методика експерименту.....	39
2.3.1 Оптична та растрова електронна мікроскопія.....	40
2.3.2 Мікрорентгеноспектральний аналіз.....	42
2.3.3 МікродюрOMETричний аналіз.....	43
2.3.4 Рентгеноструктурний аналіз.....	44
2.4 Висновки до розділу 2.....	46
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	48
3.1 Особливості мікроструктури 3D-друкованого сплаву Co-Cr-Mo.....	48
3.2 Зміни мікротвердості внаслідок УЗУО за різними режимами.....	54
3.3 Вплив УЗУО в інертному середовищі на фазовий склад.....	57

		9
3.4	Висновки до розділу 3.....	59
4	ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	61
4.1	Науково-технічна адекватність теми досліджень.....	61
4.2	Розрахунок витрат на проведення НДР.....	61
4.2.1	Витрати на оплату праці.....	61
4.2.2	Єдиний соціальний внесок.....	62
4.2.3	Матеріали, необхідні для проведення досліджень.....	63
4.2.4	Енергоносії для проведення досліджень.....	63
4.2.5	Витрати на спеціальне обладнання.....	63
4.2.6	Вартість послуг сторонніх організацій.....	63
4.2.7	Витрати на службові відрядження.....	64
4.2.8	Інші прямі невраховані витрати.....	64
4.2.9	Накладні витрати.....	64
4.2.10	Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми.....	65
4.3	Науково-технічна ефективність НДР.....	66
4.4	Висновки до розділу 4.....	69
5	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	70
5.1	Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві.....	70
5.2	Аналіз параметрів приміщення.....	71
5.3	Аналіз мікроклімату в робочій зоні приміщення.....	72
5.4	Аналіз освітленості приміщення.....	73
5.5	Аналіз інфрачервоного випромінювання.....	73
5.6	Аналіз впливу шуму та вібрації.....	74
5.7	Аналіз забрудненості повітря.....	74
5.8	Електробезпека.....	75
5.9	Пожежна безпека.....	76
5.10	Висновки до розділу 5.....	77
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	78
	GENERAL CONCLUSIONS.....	62

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	10
	80

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ

СЛТ – Селективне лазерне топлення
УЗУО – Ультразвукова ударна обробка
ЛВ – Лазерне виплавлення
АВ – Адитивне виробництво
SLM – Селективне лазерне топлення
SLS – Селективне лазерне спікання
DMLS – Пряме лазерне спікання металу
EBM – Електронно-променеве топлення
WAAM – Електродугове адитивне виробництво
DLD – Пряме лазерне осадження
DMD – Пряме осадження металу
LMD – Лазерне осадження металу
SLA – Стереолітографія
FDM – Осадження з газової фази
ГЦК – гранецентрована кубічна ґратка
РЕМ – растрова електронна мікроскопія
ВС – єдиний соціальний внесок
СМ – витрати на матеріали
Сінш. – інші прямі витрати
НВ – накладні витрати

ВСТУП

У сучасному світі, де наука та техніка стрімко розвиваються, адитивні технології стають все більш актуальними і перспективними. Ці технології надають можливість створювати складні вироби з металів та сплавів шляхом пошарового нанесення матеріалу. Одним з найпоширеніших методів адитивного виробництва є селективне лазерне топлення порошку (СЛТ), яке знаходить широке застосування в медицині, авіаційній та автомобільній промисловості, а також в інших галузях.

Завдяки СЛТ стає можливим виготовлення виробів зі складними геометричними формами, які складно або навіть неможливо отримати за допомогою традиційних методів обробки. Проте, незважаючи на численні переваги, адитивні технології не позбавлені й певних обмежень та проблем.

Проблеми адитивного виробництва.

Однією з ключових проблем адитивного виробництва є неоднорідність мікроструктури та механічних властивостей отриманих виробів. Це зумовлено специфікою процесу СЛТ, адже швидке нагрівання та охолодження призводять до виникнення нерівностей та дефектів на поверхні виробу.

Ультразвукова ударна обробка (УЗУО) як метод покращення властивостей адитивно виготовлених виробів.

Ультразвукова ударна обробка (УЗУО) розглядається як перспективний метод для покращення мікроструктури та механічних властивостей адитивно виготовлених виробів. Цей метод полягає у впливі високочастотних ударних хвиль на поверхню матеріалу, що може спричинити зміни в його структурі та властивостях. Дослідження впливу УЗУО на адитивно виготовлені вироби дасть можливість краще зрозуміти механізми цього процесу та визначити оптимальні параметри обробки для покращення їхніх характеристик.

Мета та значення дослідження.

Метою роботи є дослідження впливу інтенсивної ультразвукової ударної дії на мікроструктуру та мікротвердість поверхні сплаву Co-27Cr-6Mo-5W, отриманого за адитивною технологією (селективного лазерного топлення

порошку).

Задачі дослідження:

1. Літературний огляд сучасних технологій та методів, пов'язаних з адитивним виробництвом металевих сплавів, встановлення переваг та недоліків 3D-друку.

2. Вибір режимів та середовища ультразвукової ударної обробки (УЗУО) для зміцнення поверхні сплаву Co-27Cr-6Mo-5W.

3. Дослідження анізотропії структури сплаву Co-27Cr-6Mo-5W, отриманого за адитивною технологією (селективного лазерного топлення порошку).

4. Визначення впливу ультразвукової ударної обробки на зміни фазового складу та мікротвердість сплаву Co-27Cr-6Mo-5W.

Об'єкт досліджень: сплав Co-Cr-Mo-W, виготовлений за адитивною (селективного лазерного топлення порошку – СЛТ) технологією та модифікований ультразвуковою ударною обробкою (УЗУО) в інертному середовищі.

Предмет дослідження: структурно-фазовий стан та мікротвердість поверхневих шарів сплаву Co-27Cr-6Mo-5W після інтенсивного деформаційного впливу в інертному середовищі.

Очікується, що результати цього дослідження матимуть значний вплив на подальший розвиток адитивних технологій та їхнє застосування у виробництві високоякісних та надійних виробів медичного призначення.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Сучасні технології адитивного виробництва

Адитивне виробництво (AB), також відоме як 3D-друк, представляє собою групу технологій, які дозволяють створювати тривимірні об'єкти з цифрових моделей [1 – 3].

Ці технології пропонують широкий спектр переваг, включаючи:

- свобода дизайну: AB дозволяє створювати складні геометрії, які неможливо виготовити традиційними методами;
- зменшення відходів: AB використовує лише необхідну кількість матеріалу, що призводить до значного скорочення відходів;
- персоналізація: AB може використовуватися для створення персоналізованих продуктів, адаптованих до індивідуальних потреб;
- децентралізація: AB дозволяє виробляти продукти локально, що може скоротити ланцюжки постачання та знизити викиди CO₂ [4].

Існує багато різних технологій AB, які можна розділити на дві основні категорії.

1. Технології, засновані на пошаровому нанесенні.

Стереолітографія (SLA): SLA використовує лазер для затвердіння фотополімерної смоли [5].

Селективне лазерне топлення (SLM): SLM використовує лазер для топлення порошкоподібного металевого матеріалу [6].

Електронно-променеве топлення порошку (EBM): EBM використовує електронний пучок для топлення порошкоподібного металевого матеріалу [7].

Осадження з газової фази (FDM): FDM використовує сопло для екструзії розплавленого пластику [7].

2. Технології, засновані на зв'язуванні порошку.

Зв'язування порошку за допомогою лазерного випромінювання (SLS): SLS використовує лазер для активації зв'язуючого агента, який склеює частинки порошку [8].

Зв'язування порошку за допомогою струменевого друку (ВЛТ): ВЛТ використовує струменевий друк для нанесення зв'язуючого агента на порошкоподібний матеріал [8].

В останні роки розвиток адитивних технологій є одним з пріоритетних напрямків розвитку промисловості [9].

Адитивні технології, в першу чергу, дають можливість ефективно реалізовувати будь-які конструкторські та інженерні ідеї у високотехнологічних галузях, таких як авіабудування, двигунобудування, ракетобудування, сучасні електронні пристрої тощо [10]. Розширення номенклатури матеріалів для адитивних технологій сприятиме їхньому впровадженню в масове виробництво.

Між тим, розробка проривних науково-технічних рішень в галузі адитивних технологій неможлива без нових порошкових матеріалів. Наразі очевидна фундаментальна проблема, а саме відсутність комплексних наукових досліджень, спрямованих на розробку нових порошкових матеріалів для адитивних технологій, адаптацію цих матеріалів до вимог сучасних машин адитивного виробництва та вивчення властивостей виробів, отриманих за адитивною технологією з різними варіаціями технічних параметрів [10 – 12].

Адитивні технології (АТ) є узагальненою назвою технологій, що передбачають виготовлення виробу за цифровою моделлю методом пошарового додавання матеріалу. Ці технології поділяються на величезну кількість видів, які відрізняються методами конструювання та використовуваними матеріалами [12].

Протягом останнього десятиліття АТ активно використовується в машинобудуванні, зокрема в прототипуванні. Також розвиток АТ сприяє їх використанню в масовому виробництві. Такий потужний розвиток цього методу виробництва зумовлений його принциповою відмінністю від класичних методів виробництва, таких як лиття, прокатка, пресування, волочіння, штампування, кування, фрезерування тощо [13].

Цей принцип полягає у використанні методу "додавання", а не "видалення" матеріалу, як у випадку з класичними віднімаючими методами.

Саме високі вимоги до геометрії виробу, які неможливо було отримати класичними методами, наприклад, створення комірчастих структур, дали поштовх до розвитку АТ.

Незважаючи на ці переваги, існує ряд недоліків, які перешкоджають широкому впровадженню АТ в масове виробництво. До них відносяться низькі експлуатаційні характеристики металевих виробів, які в ряді випадків можна усунути за допомогою різних методів обробки. Водночас, методи термічної та фінішної обробки збільшують трудомісткість і тривалість виробництва. Тому пошук нових методів фінішної обробки складних виробів адитивного виробництва є актуальним завданням [14].

З точки зору енергії, що підводиться, і сировини, що використовується, технології адитивного конструювання з металів і їх сплавів можна розділити на два основні типи (процеси): топлення і спікання. У свою чергу, процес топлення поділяється на два наступні методи: (1) метод топлення і формування матеріалу в попередньо нанесеному шарі порошку; (2) метод безпосередньої подачі енергії і матеріалу на будівельний майданчик [15].

Лазерні технології адитивного виробництва, такі як лазерна стереолітографія, селективне лазерне спікання, дозволяють формувати тривимірні (3D) комп'ютерні моделі на основі об'ємних структур і виробів складної архітектури з різних матеріалів з відтворюваністю і просторовою роздільною здатністю, які раніше не могли бути досягнуті іншими методами [16]. Такі вироби на основі біорезорбційних полімерів гомологічного ряду аліфатичних полієфірів сьогодні надзвичайно затребувані як у медико-біологічних дослідженнях, так і в клінічній практиці [16]. Блок-схема процесу формування гібридного продукту за допомогою адитивного виробництва наведена на (рис 1.1).

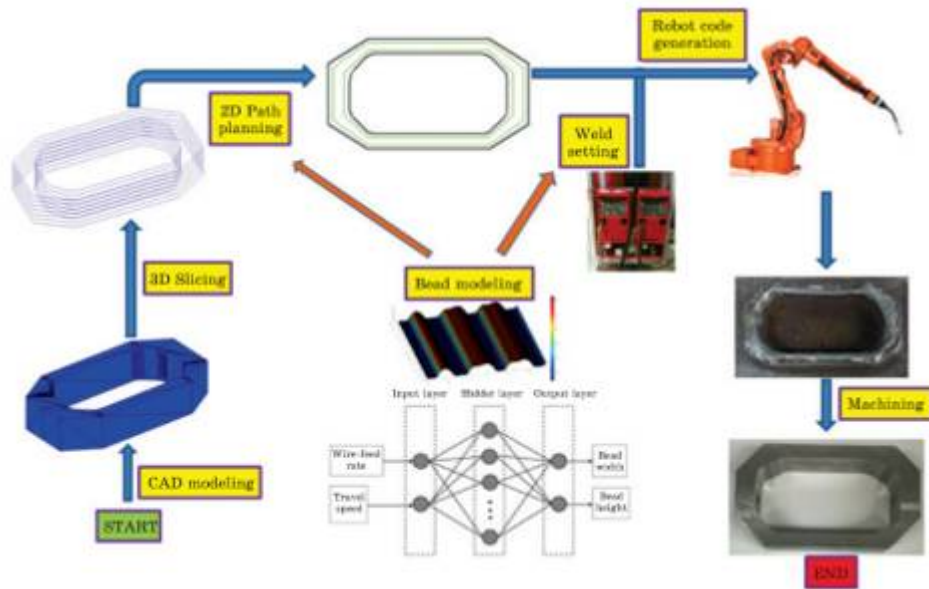


Рисунок 1.1 – Блок-схема процесу формування гібридного продукту за допомогою адитивного виробництва [17]

Одним з найбільш перспективних методів в адитивному виробництві на сьогодні є метод селективного лазерного топлення (СЛТ), суть якого полягає в пошаровому послідовному розплавленні порошкового матеріалу за допомогою лазерного випромінювання. Лазерні технології адитивного виробництва дозволяють виготовляти вироби з дорогих титанових і нікелевих сплавів з низьким коефіцієнтом матеріаломісткості, що є суттєвою перевагою в галузі аерокосмічної промисловості [17].

Технології адитивного виробництва поділяються насамперед за матеріалом, що використовується. Для отримання прототипу з метою перевірки геометричної порівнянності використовуються фотополімери і технологія стереолітографії. Для отримання прототипу для тестування металевих порошків використовуються такі технологічні процеси як селективне лазерне топлення (SLM), селективне лазерне спікання (SLS), пряме лазерне спікання металу (DMLS), електронно-променеве топлення (EBM), електродугове адитивне виробництво (WAAM), пряме лазерне осадження (DLD), пряме осадження металу (DMD), лазерне осадження металу (LMD) [18].

Одним з пріоритетних напрямків досліджень в галузі адитивних технологій є розвиток методів, які дозволяють створювати монолітні об'єкти з

програмованими стверджувальними властивостями, що можуть змінювати свою форму та функцію під позитивним зовнішнім впливом [19].

1.2 Застосування ультразвукових технологій поверхневої обробки в адитивному виробництві металевих сплавів

Ультразвукові технології поверхневої обробки (УТП) використовуються для покращення властивостей поверхонь металевих деталей. Ці технології пропонують широкий спектр переваг, включаючи:

- високу точність: УТП може використовуватися для обробки малих та складних поверхонь [20];

- низький рівень пошкоджень: УТП не спричиняє значного теплового впливу на оброблювану поверхню, що призводить до мінімального пошкодження мікроструктури матеріалу [20 – 22];

- широкий спектр матеріалів: УТП може використовуватися для обробки різних металевих сплавів [23].

Існує багато різних типів УТП, які можна розділити на дві основні категорії.

1. Абразивні УТП: використовуються абразивні частинки для видалення матеріалу з оброблюваної поверхні.

2. Безабразивні УТП: не використовують абразивні частинки, до них належать:

- ультразвукова обробка кавітацією: ультразвукова обробка кавітацією використовує кавітаційні бульбашки для очищення та полірування оброблюваної поверхні [23];

- ультразвукова обробка струменем: ультразвукова обробка струменем використовує струмінь рідини для очищення та полірування оброблюваної поверхні.

Адитивні технології (АВ) виготовлення деталей з металів стають все більш популярними. Однак, вироби, отримані за допомогою 3D-друку, часто мають ряд недоліків, таких як анізотропія мікроструктури, макродефекти,

високий рівень залишкових напружень. Ці фактори значно знижують втомну міцність 3D-вироблених деталей [24].

Вплив ультразвукової ударної обробки (УЗУО) полягає у наступному.

Ультразвукова ударна обробка може бути ефективним способом усунення цих недоліків та покращення властивостей адитивно виготовлених деталей.

Дослідження показали, що за допомогою УЗУО можна:

- зменшити пористість та інші макродефекти: УЗУО може призвести до загоєння та ущільнення наявних дефектів, покращуючи загальну якість поверхні;

- зменшити залишкові напруження: УЗУО може трансформувати розтягуючі залишкові напруження в стискаючі, що робить деталі більш стійкими до втомного руйнування [25];

- подрібнити структуру: УЗУО може призвести до подрібнення зерен та інших структурних фаз, що призводить до підвищення твердості, мікротвердості та зносостійкості [25];

- ініціювати фазові перетворення: УЗУО може стимулювати фазові перетворення, що сприяє покращенню механічних властивостей.

Приклади використання УЗУО.

Приклади деталей зі зменшеною масою через оптимізацію конструкції та адитивне виробництво наведені на (рис 1.2)

Ультразвукова ударна обробка: цей метод використовує ударний інструмент для обробки поверхні деталі під час 3D-друку або як окремий етап пост-обробки. Дослідження показали, що УЗУО може значно покращити втомну міцність адитивно виготовлених деталей з Inconel-718, 316L та алюмінієвих сплавів [26 – 27].

Ультразвукова кавітація: Цей метод використовує вібрації для створення бульбашок в рідині, які руйнують дефекти на поверхні деталі. Дослідження показали, що ультразвукова кавітація може ефективно покращити шорсткість поверхні деталей з сплаву IN625 [27].

Ультразвукове наномодифікування поверхні (UNSM): Цей метод використовує УЗО для зміни структури поверхні на наномасштабі. Дослідження показали, що UNSM може значно покращити втомну міцність деталей з Inconel 718[28].



Рисунок 1.2. – Приклади деталей зі зменшеною масою через оптимізацію конструкції та адитивне виробництво [28]

Переваги УЗУО.

Універсальність: УЗУО може використовуватися для обробки деталей різної форми та розміру.

Локальна обробка: УЗУО може використовуватися для локальної обробки критичних ділянок деталей.

Ефективність: УЗУО може значно покращити властивості деталей за короткий час [29].

Важливі моменти.

Ефективність УЗО залежить від ряду параметрів, таких як амплітуда вібрацій, час обробки та матеріал деталі.

Існує критична величина потужності УЗО, вище якої може відбутися руйнування поверхні деталі.

УЗУО може використовуватися в комбінації з іншими методами обробки, такими як термічний вплив, для досягнення найкращих результатів [29].

УЗУО є перспективним методом покращення властивостей адитивно виготовлених деталей з металевих матеріалів. Дослідження показали, що УЗУО може значно знизити пористість, зменшити залишкові напруження, подрібнити структуру та ініціювати фазові перетворення, що призводить до покращення втомної міцності, твердості, мікротвердості та зносостійкості. УЗУО може використовуватися для обробки деталей різної форми та розміру, а також для локальної обробки критичних ділянок [29 – 30].

Що до проблем, які затримують розвиток і широке застосування металевих АВ-деталей та потребують подальших експериментальних досліджень, то до них відносяться: анізотропія мікроструктури, хімічного складу, механічних властивостей; макродефекти, також, дефекти неповного стоплення, пори, шорсткість поверхні та високий рівень залишкових напружень розтягу [30]. Ці недоліки доволі значно знижують втомну міцність 3D-металевих виробів. Фактична наявність зварювальних залишкових напружень на межі розділу викликає мікроскопічну деформацію деталей, включно з поздовжньою та поперечною термічною усадкою, деформацію вигину, деформацію зсуву та деформацію кручення. Через те, що деформаційні напруження в основному концентруються поблизу пор – це зумовлює завчасне руйнування деталей. Тому головним питанням технології АВ є дієвий контроль щодо зниження ймовірності утворення пористості та її усунення в кінцевих виробках.

На сьогодні, залишкові дефекти та напруження після АВ переважно усуваються її подальшою термічною обробкою (ТО) та механічною деформацією, що дозволяє покращити сукупність механічних властивостей (межу текучості, міцність на розтяг, пластичність і довговічність). Багато для яких сплавів оптимальні режими термічної обробки наразі не можна вважати встановленими. До прикладу, для Inconel-718 [31] рекомендується нагрівання до 980 °C з витримкою в одну годину, з охолодженням на повітрі до температури навколишнього середовища і наступною витримкою протягом 8 годин при температурі 720 °C, охолодженням з піччю до 620 °C і витримкою упродовж 8 годин. Водночас, в [31] пропонується коротке високотемпературне

нагрівання (1020 °C упродовж 0,25 годин), охолодження водою і подальше старіння за температури 720 °C впродовж доби з охолодженням на повітрі.

Вирішального значення також має атмосфера на всіх етапах виготовлення та обробки металевих виробів [32]. Для усунення недоліків деталей, одержаних 3D-друком, використовують також різні процеси міжшарового зміцнення та методи пост-обробки, такі як лазерна обробка, механічна ударна обробка, міжшарова прокатка, ультразвукова дія, ультразвукова вібрація, технології зміцнення мікрокуванням тощо [32]. До прикладу, у той час коли стовпчасті зерна утворюють небезпечні залишкові розтягувальні напруження, а після термообробки та, наприклад лазерного ударного зміцнення, вони перетворюються на напруження стиснення, що сприяють підвищенню втомної міцності [33].

Досліджують також інші комбінації пост-обробки адитивно виготовлених виробів, у тому числі – термічно оброблений 3D-матеріал піддають дробоструменевій фінішній обробці [34]. В цілому, доцільність термічної або поверхневої механічної обробки не викликає сумніву, через те, що останній шар матеріалу під час 3D-друку знаходиться у зовсім інших термодинамічних умовах, ніж інші шари, і вимагає подальшої модифікації.

Одним з ефективних способів усунення поверхневих макродефектів та зниження рівня розтягуючих залишкових напружень є ультразвукова ударна обробка [35], а ефективність її використання було доведено для широкої номенклатури сплавів, вироблених за традиційними технологіями (литво, прокат, штамповки), а також за технологіями, які дозволяють одержувати таку структуру матеріалів, яка наближена до одержаної 3D-друком, зокрема, – порошкових матеріалів.

В сьогоденні, АВ все частіше використовується у поєднанні з ультразвуковими технологіями поверхневої обробки, які включають в себе ультразвукове абразивне полірування, ультразвукову ударну обробку, тощо. У іншому випадку безпосередньо в процесі 3D-друку водночас з формуванням кожного шару матеріалу ударний бойковий інструмент обробляє його поверхню. Обладнання, що використовується при цьому, має компактний

розмір, має високу щільність вкладеної енергії та простоту використання. Електричні коливальні сигнали виводяться ультразвуковим генератором, після, перетворюються на високочастотні механічні вібрації і передаються на бойок, що контактує з оброблюваною деталлю [36].

Приклад реалізації УЗУО в поєднанні з адитивним виробництвом деталей методом дротяно-дугового виробництва (рис 1.3).

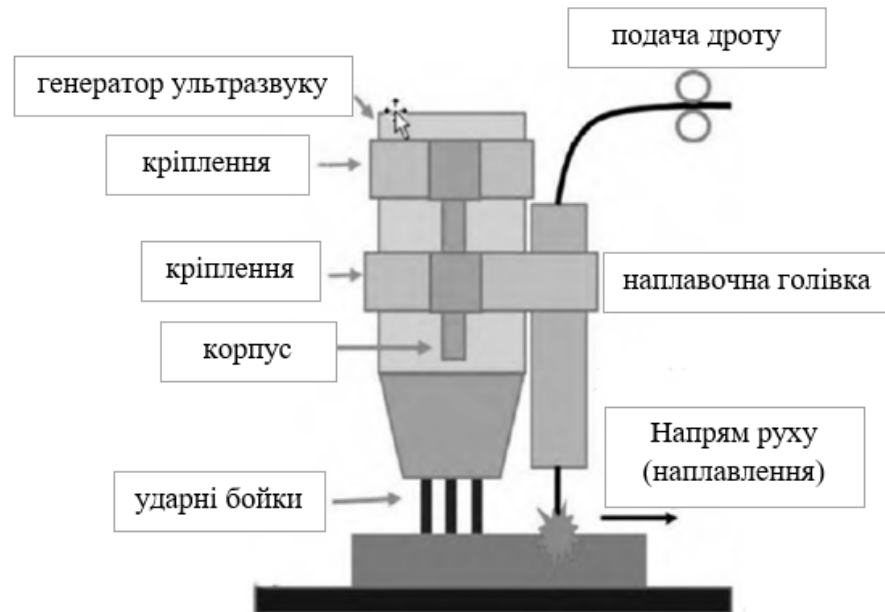


Рисунок 1.3 – Реалізація УЗУО в поєднанні з адитивним виробництвом деталей методом дротяно-дугового виробництва [36]

Дослідження впливу ультразвукової ударної обробки показали, що вона значно підвищує якість оброблюваної поверхні, заліковуючи та ущільнюючи наявні дефекти, зумовлює подрібнення структури, підвищення твердості, мікротвердості та втомної міцності, ініціює фазові перетворення. Також, технологічні параметри УЗУО (амплітуда ультразвукового інструменту, тривалість обробки, відстань між точками впливу, кількість ударів та швидкість сканування), як допоміжної технології в процесі дротяно-дугового виробництва, здійснюють надважливий вплив на якість готового продукту [36].

Стосовно застосування ультразвукової вібрації під час друку сплаву Inconel-718 методом селективного лазерного спікання (SLS), було отримано

надійні результати щодо отримання більш рівномірної та дрібнозернистої структури. Для неіржавіючої сталі 316L після поверхневої ультразвукової ударної обробки відбувається підвищення мікротвердості та зносостійкості. Внаслідок ультразвукового поверхневого полірування алюмінієвого сплаву AlSi10Mg водночас з поліпшенням якості поверхні покращується мікротвердість та зносостійкість. Шорсткість поверхні було зменшено на ~98 % як для напрямку полірування, так і для напрямку бокового проходу, а твердість зразків збільшується на ~24 % [37].

Здебільшого, ефекти від вказаних та схожих видів обробки полягають в помітному зниженні дефектності поверхні деталей, подрібненні приповерхневих структурно-фазових складових, крім того, в ініціюванні фазових перетворень. Вплив такого характеру має прояв в підвищенні втомної міцності, твердості, мікротвердості, зносостійкості та в багатьох випадках – корозійної стійкості.

Зміна мікроструктури адитивно виготовленого сплаву Inconel-718 після накладання ультразвукових вібрацій різної частоти під час формування виробу та зміна мікротвердості та зносостійкості адитивно виготовлених зразків сталі 316 L після ультразвукової ударної обробки поверхні проілюстровані на (рис1.4). та на (рис 1.5).

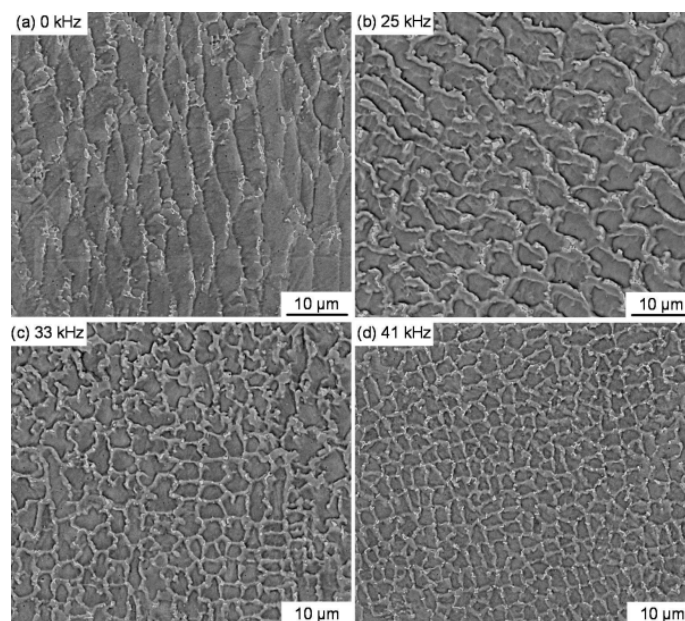


Рисунок 1.4 – Зміна мікроструктури адитивно виготовленого сплаву Inconel-718 після накладання ультразвукових вібрацій різної частоти під час формування виробу [37]

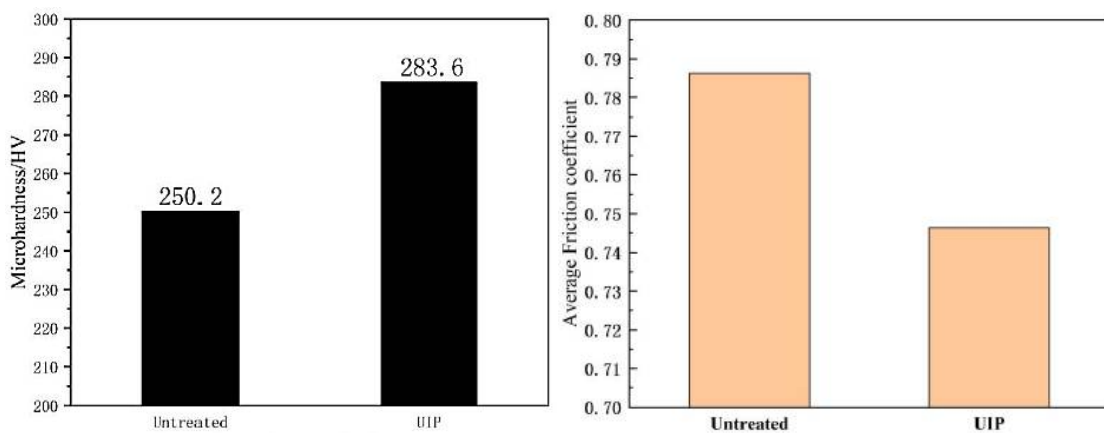


Рисунок 1.5 – Зміна мікротвердості та зносостійкості адитивно виготовлених зразків сталі 316 L після ультразвукової ударної обробки поверхні [37]

Дуже ефективною виявилась і ультразвукова кавітація. На зразку сплаву IN625, виготовленого методом SLS [37], було визначено порядок інтенсивності впливу різних параметрів процесу ультразвукової кавітації в абразивній суспензії частинок карбїду кремнію (15 – 53 мкм) на шорсткість поверхні, а саме: концентрація абразиву > розмір абразиву > час обробки > потужність ультразвуку. Коли ультразвукова потужність, час механічної обробки та концентрація абразиву становлять 900 Вт, 10 хвилин, і 10 % відповідно, досягається найменше значення шорсткості [38].

На особливу увагу заслуговує той факт, що АВ з ультразвуковою підтримкою дозволяє формувати унікальну наноструктуру металевої поверхні, завдяки якій 3D-матеріали отримують високий рівень механічних та фізичних властивостей, а їхня втомна міцність поліпшується. Прикладом цього є ультразвукове наномодифікування поверхні (UNSM) сплаву Inconel-718, виготовленого методом СЛС [38]. Використовуючи ТО залишкові напруження, переважно розтягуючі, що виникають в процесі адитивного виробництва, вдалося зменшити до майже нульового значення. Крім того, ТО сприяє гомогенізації мікроструктури та збільшенню твердості. Але після UNSM залишкові напруження отримують стискаючий характер (-533 МПа та -975

МПа в різних напрямках) і спостерігаються до глибини приблизно 530 мкм. Найефективнішою виявилась комбінація термічної обробки з UNSM оскільки значні напруження стиску (-655 МПа та -1083 МПа) сягають глибини близько 550 мкм, що і стає передумовою для значно вищого ресурсу втомивих адитивно виготовлених металевих виробів з цього сплаву [38].

Використання УЗУО не тільки безпосередньо під час 3D-друку, а і в якості окремого етапу пост-обробки поверхні готових виробів дозволяє обробляти великогабаритні деталі складної форми або здійснювати локальну обробку в місцях, які піддаються критичним вібраційним навантаженням. За допомогою УЗУО можливо зменшити розмір зерна на 55,8 %, та збільшити щільність дислокацій до 46 %, також, рівномірно розподілити виділення вторинних фаз в матриці, таким чином, ефективно покращити механічні властивості компонентів WAAM [37 – 38].

1.3 Структура та властивості сплавів Co-Cr, виготовлених за допомогою 3D-друку

Структура та властивості сплавів системи Co-Cr, що виготовлені за допомогою 3D-друку, є предметом активних наукових досліджень у сучасній матеріалознавчій галузі. Відомо, що ці сплави мають широке застосування в різних сферах, зокрема в медицині, аерокосмічній промисловості, а також в автомобільному та інших галузях виробництва. Дослідження структури та властивостей цих матеріалів дозволяє краще розуміти їхні можливості та обмеження, а також розробляти нові методи виробництва та вдосконалювати існуючі технології.

Одним з головних аспектів дослідження структури сплавів Co-Cr є аналіз їхньої мікроструктури. Мікроструктура сплавів визначається розмірами та формами фаз, присутніми у матеріалі. Для аналізу мікроструктури використовуються різноманітні методи, включаючи оптичну мікроскопію, сканувальну електронну мікроскопію (SEM), рентгенівську дифрактометрію та інші. Дослідження мікроструктури дозволяє встановити основні фази та їхнє

розподілення у матеріалі, що важливо для подальшого аналізу його властивостей [39].

Методи дослідження мікроструктури сплавів Co-Cr можуть включати в себе металографічний аналіз. У металографії, зразок сплаву зазвичай піддають поліруванню та етапам електролітичного травлення для підготовки поверхні для спостереження під мікроскопом. Оптична мікроскопія використовується для вивчення загальної морфології мікроструктури, включаючи розмір та форму фаз. При цьому важливо враховувати, що обробка зразків може впливати на їхню структуру, тому важливо виконувати процедури підготовки зразків з максимальною обережністю [39].

Сканувальна електронна мікроскопія (SEM) є іншим важливим методом дослідження мікроструктури. SEM дозволяє отримувати високороздільні зображення поверхні зразків і вивчати їхню мікроструктуру на дуже дрібному рівні. За допомогою SEM можна аналізувати розмір та розподіл фаз, а також виявляти дефекти та пори у матеріалі. Крім того, SEM може бути використаний для енергодисперсійного аналізу, який дозволяє визначити хімічний склад окремих областей зразка [40].

Диференційна термічна аналіза (ДТА) та термогравіметричний аналіз (ТГА) також використовуються для дослідження структури сплавів Co-Cr. Ці методи дозволяють вивчати термічні перетворення у матеріалі, такі як кристалізація, топлення, окислення та інші. ДТА вимірює тепловий потік, що залежить від температури, під час нагрівання або охолодження зразка, тоді як ТГА вимірює зміни маси зразка при зміні температури. Ці методи можуть допомогти визначити теплові характеристики сплавів, їхню стійкість до високих температур та інші важливі властивості [39 – 40].

Після аналізу мікроструктури, слід розглянути механічні властивості сплавів системи Co-Cr, виготовлених за допомогою 3D-друку. Механічні властивості, такі як міцність, твердість, пластичність та стійкість до корозії, визначаються як мікроструктурними особливостями матеріалу, так і його хімічним складом.

Дослідження механічних властивостей сплавів може виконуватися за допомогою різних методів випробувань, таких як випробування на розтяг, стиск, згин, а також випробування на втому. Ці експериментальні дані використовуються для розрахунку параметрів міцності, модуля пружності та інших важливих характеристик матеріалу [40].

Дослідження механічних властивостей сплавів Co-Cr часто включає випробування на міцність. Випробування на міцність можуть виконуватися за допомогою різних методів, таких як випробування на розтяг, стиск, згин або випробування на втому. Під час цих випробувань реєструються механічні характеристики матеріалу, такі як максимальне напруження, межа текучості, модуль пружності та інші параметри. Дані, отримані під час випробувань, дозволяють оцінити міцнісні характеристики сплавів та їхню стійкість до механічних навантажень [41].

Окрім механічних властивостей, важливо вивчати стійкість сплавів до корозії та інших агресивних середовищ. Сплави Co-Cr, які використовуються у медичній та інших галузях, повинні бути стійкими до взаємодії з тілом, агресивними рідинами та іншими деструктивними факторами. Дослідження корозійної стійкості може виконуватися за допомогою різних методів, таких як електрохімічні випробування, іммерсійні випробування та інші. Оцінка корозійної стійкості дозволяє визначити, наскільки матеріал може бути ефективним у конкретних умовах експлуатації та при взаємодії з різними середовищами [41].

Дослідження біологічної сумісності сплавів Co-Cr є іншим важливим аспектом їхнього використання у медичних застосуваннях. Матеріали, що використовуються для виготовлення імплантатів та інших медичних пристроїв, повинні бути біологічно сумісними, тобто не викликати негативних реакцій організму та не спричиняти відторгнення. Дослідження біологічної сумісності включає в себе клітинні тести, імунологічні випробування та інші методи оцінки впливу матеріалу на живий організм. Отримані дані дозволяють визначити, наскільки сплав може бути безпечним для використання у медичних цілях та визначити його можливі обмеження [39 – 41].

Усі ці дослідження структури та властивостей сплавів системи Co-Cr, виготовлених за допомогою 3D-друку, мають велике значення для подальшого розвитку технологій адитивного виробництва та впровадження нових матеріалів у промисловість. Розуміння мікроструктури та механічних властивостей цих сплавів дозволяє покращувати технології їхнього виробництва та розробляти нові застосування у різних сферах промисловості та медицини. Оцінка корозійної стійкості та біологічної сумісності допомагає забезпечити безпечне та ефективне використання цих матеріалів у реальних умовах експлуатації. Таким чином, дослідження структури та властивостей сплавів Co-Cr, виготовлених за допомогою 3D-друку, є важливим напрямком у розвитку сучасного матеріалознавства [42].

3D-модель зразка СЛТ, що ілюструє мікроструктуру залежно від напрямку друку наведено на (рис 1.6).



Рисунок 1.6 – 3D-модель зразка СЛТ, що ілюструє мікроструктуру залежно від напрямку друку [42]

Були досліджені механізми зношування підшипників кульшового суглоба CoCrMo, підкреслюючи роль додавання вуглецю у впливі на поведінку зносу метал-метал [42]. Аналізуючи результати, ми можемо з'ясувати фактори, що сприяють зносостійкості 3D-друкованих сплавів Co-Cr, та оптимізувати їхню продуктивність для відповідних сфер застосування [39 – 42].

1.4 Інтенсивна пластична деформація поверхні сплавів CoCrMo

Інтенсивна пластична деформація (ІПД) відіграє ключову роль у формуванні мікроструктури та властивостей металевих сплавів. Розділ 1.4 спрямований на дослідження впливу ІПД на сплави CoCrMo, які широко використовуються в біомедичних застосуваннях через свою високу корозійну стійкість та механічну міцність.

Інтенсивна пластична деформація сплавів CoCrMo може бути здійснена різними методами, включаючи обробку ультразвуком, термомеханічну обробку та екструзію. Одним із ключових аспектів теорії ІПД є моделювання процесів рекристалізації та динамічного відпуску, що відбуваються під час деформації. Розглядаючи ці процеси, важливо враховувати параметри деформації, такі як температура, швидкість та напруження [43].

Крім того, моделювання руху дислокацій та їх взаємодії з різними дефектами мікроструктури є ключовим для розуміння механізмів деформації. Вивчення цих процесів дозволяє передбачати зміни в мікроструктурі та механічних властивостях матеріалу під час ІПД.

Для дослідження впливу ІПД на сплави CoCrMo використовуються різноманітні експериментальні методи. Одним із найбільш поширених є мікроструктурний аналіз за допомогою оптичної та електронної мікроскопії. Ці методи дозволяють вивчати зміни в кристалічній структурі матеріалу, розподіл дислокацій та дефектів. Крім того, для оцінки механічних властивостей сплавів CoCrMo після ІПД проводяться випробування на міцність, твердість та пластичність. Ці експерименти дозволяють визначити зміни механічних характеристик матеріалу та встановити зв'язок між процесами, що відбуваються на мікро- та макроскопічному рівнях [43].

Результати досліджень показують, що інтенсивна пластична деформація суттєво впливає на мікроструктуру та механічні властивості сплавів CoCrMo. Під впливом ІПД спостерігається формування нових фаз, рекристалізація зерен та зміна текстури матеріалу. Ці зміни можуть призводити до значного покращення механічних властивостей матеріалу, таких як міцність, твердість та стійкість до корозії. Однак, варто зазначити, що ІПД також може призводити до

виникнення дефектів, таких як порожнистість, тріщини та зміни форми зерен. Ці дефекти можуть знижувати міцність та тривалість експлуатації матеріалу. Тому важливо ретельно контролювати умови деформації та розробляти методи їх попередження [44].

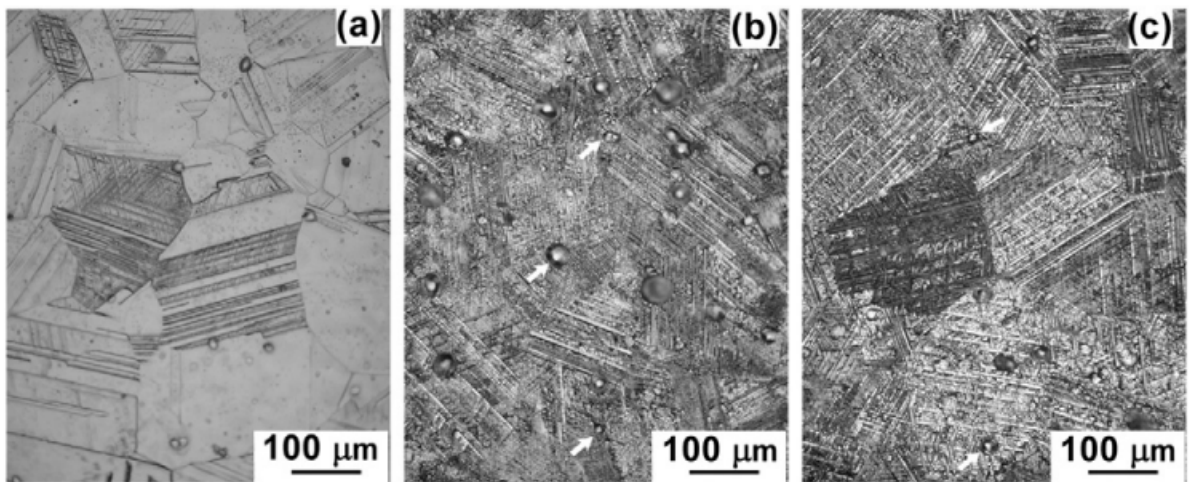
Ультразвукова ударна обробка сприяє утворенню зайвих вакансій та рухомих дислокацій у металевих сплавах, таких як Co–Cr–Mo. Вплив ультразвукових хвиль викликає деформацію ковзання у декількох площинах, що призводить до утворення замків L-C та двійників (рис. 1.7). Під впливом дальнодіючих пружних напруг біля замків L-C відбувається розщеплення провідних дислокацій, утворюючи ковзаючі дислокації Шоклі високої щільності. Ці дислокації сприяють фазовому переходу з γ -фази в ϵ -мартенсит [45].

В результаті впливу ультразвукових хвиль у сплаві Co–Cr–Mo утворюються різноманітні структурні дефекти, такі як хаотичні дефекти упаковки та інтерференційні смуги, які відображаються на зображенні мікродифракції в електронному мікроскопі. Утворення ϵ -мартенситу та неповністю перетвореного мартенситу свідчить про зсувний тип перетворення, що призводить до утворення двох видів структур у матеріалі.

Отже, ультразвукова ударна обробка впливає на структуру та властивості металевих сплавів, сприяючи формуванню специфічних мікроструктурних елементів, які можуть вплинути на їхні механічні характеристики [43 – 45].

Загалом, дослідження інтенсивної пластичної деформації сплавів CoCrMo є актуальним напрямком в сучасній матеріалознавчій науці. Вони відкривають нові можливості для покращення механічних властивостей матеріалів та розробки нових технологій обробки металів.

На (рис. 1.7) показано оптичні мікрофотографії сплаву Co-28Cr-6Mo.



а – у вихідному стані; б – після УЗУО протягом 30 с; в – протягом 120 с
Рисунок 1.7 – Оптичні мікрофотографії сплаву Co-28Cr-6Mo [45]

1.5 Висновки до розділу 1

Розділ 1 надає комплексний огляд сучасних технологій та методів, пов'язаних з адитивним виробництвом металевих сплавів, зокрема системи Co-Cr. Проведений огляд дозволяє зрозуміти важливість використання адитивних технологій у виробництві та експериментальних дослідженнях металевих сплавів. Спеціальна увага приділяється ультразвуковим технологіям поверхневої обробки, які можуть використовуватися для поліпшення властивостей адитивно виготовлених деталей.

Аналіз структури та властивостей сплавів системи Co-Cr, отриманих за допомогою 3D-друку, відкриває широкі перспективи для їхнього практичного застосування в різних галузях промисловості, зокрема в медицині та інженерії.

Дослідження з інтенсивної пластичної деформації поверхні сплавів CoCrMo свідчать про доцільність її застосування для покращення механічних властивостей матеріалів, що має велике значення для подовження терміну експлуатації різних виробів.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Об'єкти дослідження

Завдяки високим механічним властивостям, задовільній біосумісності, високій зносо- та корозійній стійкості стопи на основі Co-Cr знайшли широке застосування у стоматологічній реставрації та ортопедичній хірургії. Наприклад, у стоматології вони використовуються для виробництва зубних коронок, знімних і незнімних протезів, металевих каркасів. Також зазвичай ці стопи застосовуються у ортопедичних цілях, таких як заміна колінного та тазостегнового суглобів, а також для хірургічних імплантатів [46].

В даний час стопи системи Co-Cr, пов'язані із клінічним застосуванням, можна розділити на два основних типи: Co-Cr-Mo і Co-Cr-Mo-W. Хром в першу чергу покращує опір корозії, Мо впливає на подрібнення зерна і зміцнення матриці. Як правило, Co-Cr-Mo стопи містять деякі вуглецеві елементи (не більше 0,35 %) і твердостопне зміцнення є основним. Порівняно зі стопами Co-Cr-Mo, стопи Co-Cr-Mo-W, що містять W, характеризуються меншою товщиною оксидного шару під час процесу виробництва, що важливо для металокерамічних зубних протезів. Крім того, W характеризується низькими значеннями коефіцієнту теплового розширення ($4,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ за температури 298 K та $7,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ – 2673 K) та коефіцієнту тертя, покращуючи зносостійкість матеріалу протезу [47].

Традиційно для виготовлення зубних протезів зі стопів на основі Co–Cr застосовується ливарна технологія або штамповка, але стійкість литих зубних протезів складної форми виявляється при цьому недостатньо високою. Крім того, це трудомісткий процес із багатьма етапами, на яких можуть виникнути різні відхилення від заданих параметрів. І навіть якщо міцність стоматологічних реставрацій, отриманих пластичною деформацією, може бути достатньо високою, тим не менш отримання складних форм таким способом утруднено. Також, стопи Co–Cr важче піддаються литтю, ніж дорогоцінні стопи через їхню вищу температуру топлення і вони важче піддаються подальшій обробці завдяки своїй твердості [47].

Щоб вирішити проблеми, притаманні традиційним технологіям, в даний час успішно освоюється виготовлення ортопедичних виробів за технологією адитивного виробництва (АВ), яка дозволяє створювати тривимірні об'єкти пошарово за один етап [48]. Велика кількість досліджень свідчить, що процедура АВ забезпечує ефективну та швидку техніку для цифрового проектування та виробництва біосумісних металевих каркасів для складних зубних протезів з поліпшеними властивостями, такими як міцність, довговічність і стійкість до фізіологічної корозії. Серед адитивних методів саме техніка селективного лазерного топлення (СЛТ, SLM), яка нещодавно представлена, привернула інтерес дослідників у всьому світі до виготовлення зубних металевих конструкцій, таких як зубні імплантати, коронки, мости та протези зі складною геометрією [48].

Дослідження також показали, що Co–Cr протези, виготовлені СЛТ, мають кращу стійкість до корозії та вищу міцність порівняно з протезами, виготовленими звичайними методами лиття. Зразок для дослідження прпредставлений на (рис 2.1).

СЛТ – це процедура адитивного виробництва, яка дозволяє друкувати металевий компонент безпосередньо з системи автоматизованого проектування (CAD) шляхом швидкого й точного стоплення дрібного металевого порошку в шари потужним лазерним променем (рис. 2.2).

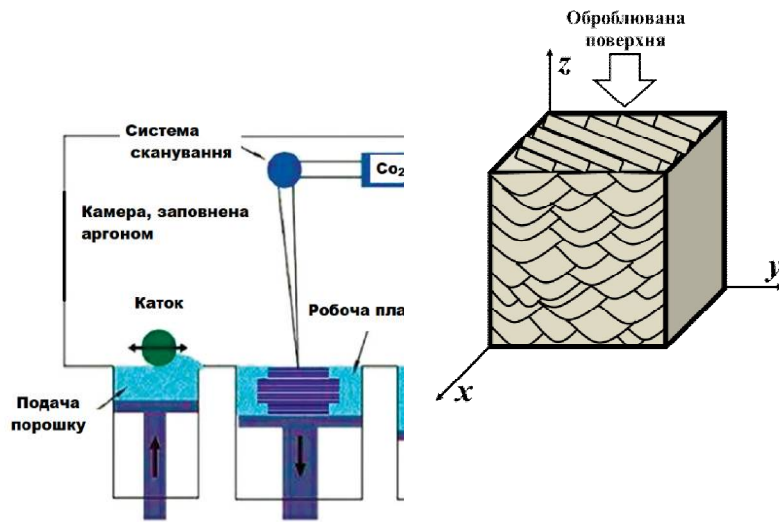


Рисунок 2.1 – Принципова схема використаного СЛТ-принтера [49]

Рисунок 2.2 – Зразок для дослідження

Зразки для дослідження (рис. 2.2) отримані за технологією селективного лазерного топлення на 3D-принтері Alfa-150D компанії ТОВ «Адитивні лазерні технології України» у вигляді монолітного кубу, розмірами 1 см×1 см×1 см [49].

Як вихідний матеріал використовувався сферичний порошок сплаву Co-Cr-Mo-W з розмірами частинок в діапазоні 15 – 45 мкм (рис. 2.3). Хімічний склад зразків Co-Cr-Mo-W, отриманих за технологією СЛТ, наведений в табл. 2.1

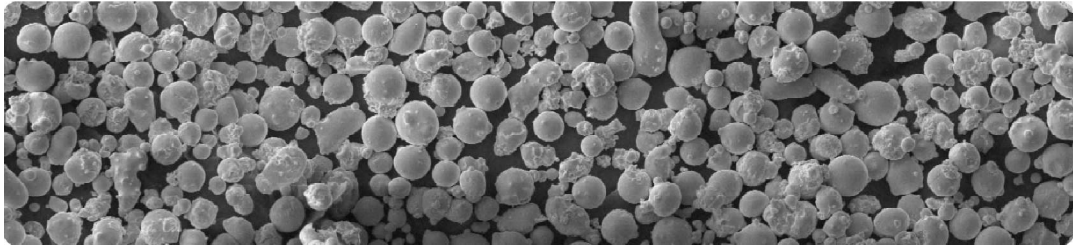


Рисунок 2.3 – Порошок сплаву Co-Cr-Mo-W

Пристрій Alfa-150D з розміром робочого поля 150мм x 150мм x 180 мм був оснащений волоконним ітербієвим лазером з повітряним охолодженням і номінальною потужністю 200 Вт, діаметр лазерного променя ~ 45 мкм і довжина хвилі 1070 ± 2 нм. Параметри, використані для виготовлення зразків: швидкість сканування – 500 мм/с, товщина шару 25 мкм і відстань штрихування 150 мкм (таблиця 2.1). Зовнішній вигляд зразка показаний на (рис 2.4).

Таблиця 2.1 – Основні характеристики лазерного принтера

Розмір робочого поля (Ш x Г x В)	150мм x 150мм x 180 мм
Конфігурація оптичної системи	одиночна
Тип лазера, що застосовується	волоконний (ітербієвий) з повітряним охолодженням
Номінальна оптична потужність лазера	200 Вт
Довжина хвилі лазерного випромінювання	1070 ± 2 нм
Товщина шару	20-100 мкм
Фокусний діаметр лазерного променя	45 мкм
Максимальна швидкість сканування	10 м/с

Точність позиціонування лазерного променя	0,15 мкм
Витрата інертного газу під час друку	≤ 3л/хв
Споживна потужність	2,2 кВт

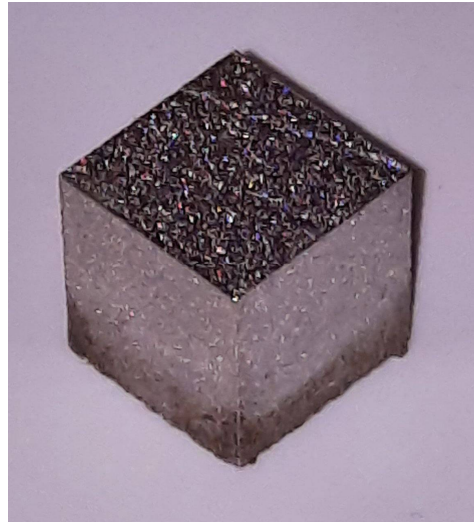


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд досліджуваного зразка (напрямок друку «знизу-вгору»)

Після виготовлення від зразка (рис. 2.4) відрізлася пластина товщиною 2 мм перпендикулярно до осі z , як показано на рис. 2.3, і надалі проводилась УЗУО верхньої площини xy безпосередньо після 3D-друку [49]. Таблиця хімічного складу наведена на (табл. 2.2). Таблиця фізико-механічних властивостей досліджуваного зразка наведена на (табл 2.3).

Таблиця 2.2 – Хімічний склад зразків Co-Cr-Mo-W, отриманих за технологією СЛТ (вміст, ваг.%) [49]

Вміст, ваг.%									
Co	Cr	Mo	W	C	Si	Fe	Ni	Cd	Al
Основа	27,32	6,18	5,28	≤0,1	0,5-1,5	≤1	≤0,1	≤0,02	≤0,1

Фізико-механічні властивості зразків Co-Cr-Mo-W, отриманих за технологією селективного лазерного топлення, демонструють високий рівень міцності, пластичності, твердості та теплопровідності, що робить цей матеріал

придатним для широкого спектру застосувань. Високі значення міцності на розтяг та межі текучості свідчать про здатність матеріалу витримувати значні навантаження, що є критичним для медичних імплантатів та інших відповідальних конструкцій. Висока твердість забезпечує зносостійкість, а достатня пластичність дозволяє матеріалу деформуватися без утворення тріщин.

Таблиця 2.3 – Фізико-механічні властивості зразків Co-Cr-Mo-W, отриманих за технологією СЛТ [49]

	Горизонтальний напрямок ХУ	Вертикальний напрямок Х
Межа міцності	1100 МПа - 1350 МПа	1050 МПа - 1250 МПа
Межа плинності	700 МПа - 1000 МПа	600 МПа - 800 МПа
Модуль Юнга	200 ГПа - 220 ГПа	190 ГПа - 220 ГПа
Подовження	11 % - 17 %	20% - 25 %
Твердість	390-420 HV0.5	
Густина	8,4 г/см ³	

2.2 Режими УЗУО та обладнання

Ультразвукова обробка поверхні включає в себе різноманітні режими, кожен з яких може мати вплив на фізико-хімічні та механічні властивості матеріалів. Основні режими УЗУО включають ультразвукове шліфування, ультразвукове фрезерування, ультразвукове долотування та інші. Ультразвукове шліфування використовується для видалення шару матеріалу з поверхні, що дозволяє підвищити її рівномірність та чистоту. Ультразвукове фрезерування використовується для створення різноманітних геометричних форм на поверхні матеріалу, таких як канавки, різьблення тощо. Ультразвукове долотування застосовується для видалення оксидних плівок та інших дефектів з поверхні, що поліпшує адгезію та корозійну стійкість матеріалу [50].

В даній роботі використовувалась ультразвукова ударна обробка УЗУО, режими якої можуть бути різними за параметрами, такими як частота, потужність, амплітуда коливань, тривалість тощо. Вибір оптимальних

параметрів УЗУО залежить від конкретних вимог до оброблюваного матеріалу та його властивостей. Для здійснення ультразвукової обробки поверхні використовуються спеціальні ультразвукові пристрої та обладнання. Основні компоненти такого обладнання включають ультразвуковий генератор, перетворювач, вантаж та систему управління [50].

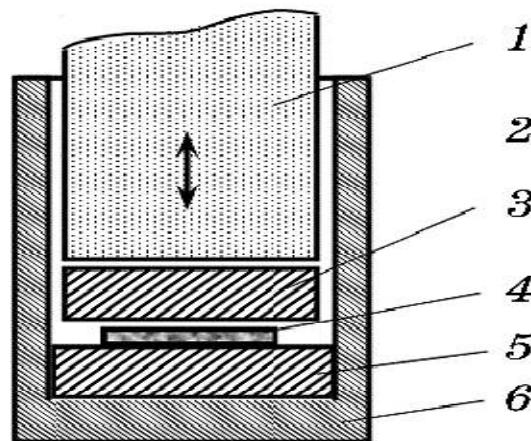
Ультразвуковий генератор виробляє високочастотні електричні сигнали, які потім передаються до ультразвукового перетворювача. Перетворювач перетворює електричні сигнали в ультразвукові коливання, які передаються до оброблюваного матеріалу через вантаж. Вантаж – це металева або керамічна плита, яка має контакт з поверхнею матеріалу та передає ультразвукові коливання.

Система управління включає в себе програмне забезпечення та електронні пристрої, які контролюють параметри УЗУО, такі як частота, потужність та тривалість обробки. Ця система дозволяє забезпечити оптимальні умови для здійснення ультразвукової обробки поверхні з урахуванням конкретних вимог до матеріалу [51].

Схема ультразвукової ударної обробки сплаву Co-Cr-Mo-W наведена на (рис 2.5).

Ультразвукова ударна обробка зразків Co-Cr-Mo-W, отриманих за технологією СЛТ, проводилась в інертному середовищі з частотою ультразвукового перетворювача 21 кГц за методикою, яку застосовано в серії робіт [51, 52, 53]. Використовувався ультразвуковий генератор потужністю 0,6 кВт із частотою коливань 21,7 кГц, підключений до ультразвукового приладу УЗГ–300, та низькочастотний генератор, який забезпечував зворотно-поступальний рух утримувача зразка із низькою частотою (15 Гц). Таким чином під час багаторазового ударного навантаження поверхня зразка Co-Cr-Mo-W піддавалась повторюваним ковзним ударам бойками, розташованими у спеціальній ударній головці між ним і ультразвуковим генератором. Частота ударів дорівнювала ~ 3 кГц, швидкість руху бойків складала ~ 3 м/с. В результаті, оброблюваний зразок зазнавав різноспрямованих ковзних ударів, які обумовлюють інтенсивну пластичну деформацію його поверхневих шарів.

Деформаційне зміцнення поверхневих шарів металів та сплавів внаслідок такої схеми УЗУО досягається за рахунок варіювання амплітуди ультразвукових коливань торця концентратора, величини осьового зміщення зразка, швидкості обертання ударного бойка та тривалості впливу. В даному дослідженні тривалість обробки змінювалась від 20 с до 60 с, амплітуда торця концентратора приймалась рівною 25 мкм [53].



1 – вібраційний ультразвуковий рупор, 2 – ударна головка, 3 – ударники,
4 – зразок, 5 – опора сталевого диска підшипника, 6 – тримач зразка

Рисунок 2.5 – Схема ультразвукової ударної обробки сплаву
Co-Cr-Mo-W [51]

Під час проведення УЗУО металевих сплавів на повітрі основним недоліком обробки є інтенсивний перебіг процесів оксидування та динамічного повернення внаслідок нагріву матеріалу. В результаті залежність мікротвердості від тривалості УЗУО може набувати циклічного характеру. Тому в даній роботі УЗУО зразків сплаву Co-Cr-Mo-W, отриманих селективним лазерним топленням порошку (3D-друк), проведено в інертному середовищі (газ аргон). Застосування захисного середовища перешкоджає синтезу приповерхневих оксидних шарів та знеміцненню сплаву до вихідних значень мікротвердості в процесах динамічного повернення.

2.3 Методика експерименту

Методика експерименту включає в себе: оптичну та растрову мікроскопію, мікрорентгеноспектральний аналіз, мікродюрOMETричний аналіз та рентгеноструктурний аналіз.

Одним із перших етапів є підготовка зразків для експерименту. Зразки повинні бути стандартизовані та однорідні для забезпечення достовірності отриманих результатів. Зазвичай це включає в себе різання або формування сплаву у відповідні розміри та форми, що відповідають вимогам дослідження [54].

Далі йде етап попередньої обробки зразків, який може включати в себе полірування або шліфування для видалення будь-яких дефектів поверхні та створення однорідної поверхні для подальших досліджень. Цей крок важливий для забезпечення однакових умов експерименту для всіх зразків.

Основним етапом є проведення механічного зміцнення зразків за допомогою високочастотних ударів. Для цього використовується спеціальне обладнання, яке забезпечує точну інтенсивність та частоту ударів, а також контролює параметри процесу, такі як тиск і час обробки.

Після завершення механічного зміцнення, проводиться аналіз отриманих результатів. Це включає в себе вимірювання мікротвердості поверхні зразків, а також оцінку їхньої мікроструктури за допомогою оптичної та електронної мікроскопії. Додатково можуть бути використані методи аналізу, такі як рентгеноструктурний аналіз або мікродюрOMETричний аналіз, для отримання більш детальної інформації про зміни, що відбуваються в матеріалі [54].

Усі ці кроки необхідні для забезпечення об'єктивності та достовірності результатів дослідження, а також для визначення ефективності застосованого методу зміцнення поверхні сплаву Co-Cr-Mo-W.

2.3.1 Оптична та растрова електронна мікроскопія

Дослідження мікроструктури проведено за допомогою металографічного тринокулярного мікроскопу iScore IS.1053-PLMi зі збільшенням $\times 100$, $\times 200$ та $\times 500$ крат. Для цього поліровані зразки сплаву Co-Cr-Mo піддавали електро-

літичному травленню в спиртовому розчині 15% H_2SO_4 , 5% HNO_3 , 2 % HCl . Травлення проводили за напруги 9 В та сили струму 350 мА впродовж 10 с – 15 с [55].

Дослідження мікроструктури матеріалів є невід'ємною частиною наукових досліджень у матеріалознавстві, адже саме мікроструктура визначає багато фізичних та механічних властивостей матеріалів. Оптична та растрова електронна мікроскопія (РЕМ) є основними методами аналізу мікроструктури матеріалів, зокрема сплавів системи Co-Cr, виготовлених за допомогою 3D-друку. Ці методи дозволяють отримати детальні зображення поверхні та внутрішньої структури зразків, а також визначити їх фазовий склад, розподіл і розміри зерен, дефекти кристалічної решітки та інші структурні особливості.

Для проведення досліджень використовувалися зразки сплаву Co-Cr-Mo, виготовлені методом 3D-друку. Зразки піддавалися механічній обробці для надання їм відповідної форми і розмірів. Після цього зразки полірувалися і піддавалися електролітичному травленню в спиртовому розчині 15 % H_2SO_4 , 5 % HNO_3 і 2 % HCl для розкриття мікроструктури. Процес травлення проводився при напрузі 9 В та силі струму 350 мА протягом 10 с – 15 с [52].

Для аналізу мікроструктури зразків застосовували металографічний тринокулярний мікроскоп iScore IS.1053-PLMi зі збільшенням $\times 100$, $\times 200$ та $\times 500$ крат. Оптична мікроскопія дозволяє отримати зображення поверхні зразків, оцінити розмір і форму зерен, наявність включень та інших мікроструктурних дефектів. Оптична мікроскопія також є ефективним методом для первинного аналізу зразків перед проведенням більш детальних досліджень за допомогою РЕМ.

Растрова електронна мікроскопія застосовувалася для детальнішого аналізу мікроструктури зразків. Для цього використовували растровий електронний мікроскоп JEOL JSM-7500F, який дозволяє отримати зображення з високою роздільною здатністю та провести елементний аналіз зразків за допомогою енергодисперсійної спектроскопії (EDS).

Оптична мікроскопія дозволила виявити основні мікроструктурні особливості зразків сплаву Co-Cr-Mo. На зображеннях, отриманих при

збільшенні $\times 100$, було видно чітко окреслені зерна, а також наявність деяких включень. При збільшенні $\times 200$ і $\times 500$ можна було детальніше розглянути структуру зерен та їхні межі [52].

Хімічний склад сплаву був визначений за допомогою РЕМ та EDS. У зразках було виявлено наявність γ -фази (FCC), яка є основною фазою сплавів на основі Co-Cr, а також аналізувалась можливість утворення карбідів, що утворюються у ливарних сплавах цієї системи внаслідок високої концентрації вуглецю. Карбіди зазвичай розташовані переважно на межах зерен, що впливає на механічні властивості матеріалу, зокрема на його твердість та зносостійкість.

За допомогою РЕМ вдалося детально вивчити розмір і форму зерен у сплаві. Середній розмір зерен складав приблизно 10 – 20 мкм, однак спостерігалася значна неоднорідність у розмірі зерен. На зображеннях, отриманих за допомогою РЕМ, були помічені численні включення та дефекти, такі як пори, мікротріщини та неметалеві включення. Ці дефекти можуть суттєво впливати на механічні властивості матеріалу, зокрема на його міцність та пластичність. Аналіз цих дефектів дозволяє визначити можливі шляхи покращення технологічного процесу 3D-друку для зменшення їхньої кількості.

Елементний аналіз за допомогою EDS показав, що основними елементами у складі сплаву є кобальт (Co), хром (Cr) та молібден (Mo). Також були виявлені незначні домішки інших елементів, таких як нікель (Ni) та залізо (Fe), які можуть впливати на властивості сплаву. Елементний аналіз дозволяє оцінити однорідність розподілу елементів у зразку та виявити можливі концентраційні неоднорідності.

Для проведення РЕМ використовували растровий електронний мікроскоп РЕММА-106И. Цей мікроскоп забезпечує високу роздільну здатність, що дозволяє отримувати детальні зображення поверхні зразків. Крім того, мікроскоп обладнаний енергодисперсійним спектрометром (EDS), що дозволяє проводити елементний аналіз зразків.

Підготовка зразків для РЕМ включала полірування та електролітичне травлення. Полірування здійснювалося за допомогою автоматичного полірувального пристрою з використанням абразивних матеріалів різної

зернистості. Електролітичне травлення проводилося у спиртовому розчині 15 % H_2SO_4 , 5 % HNO_3 і 2% HCl при напрузі 9 В та силі струму 350 мА протягом 10–15 с. Цей процес дозволяє розкрити мікроструктуру зразків та підготувати їх для подальшого аналізу за допомогою РЕМ [54].

2.3.2 Мікрорентгеноспектральний аналіз

Мікрорентгеноспектральний аналіз є важливим інструментом для вивчення хімічного складу матеріалів на мікрорівні. Цей метод дозволяє отримувати інформацію про елементний склад поверхні або об'єму зразка шляхом вимірювання рентгенівських спектрів, які випромінюються під дією рентгенівського випромінювання. У цьому розділі розглянемо принципи та методики застосування мікрорентгеноспектрального аналізу для вивчення поверхні матеріалів, зокрема сплавів Co-Cr-Mo-W [55].

Перш за все, слід зазначити, що мікрорентгеноспектральний аналіз базується на явищі рентгенівської флуоресценції. Коли рентгенівське випромінювання попадає на зразок, відбувається випромінювання флуоресцентного рентгенівського випромінювання, що характеризується спектром, у якому присутні піки, що відповідають рентгенівському випромінюванню різних елементів у зразку. Аналізуючи ці спектри, можна визначити, які елементи містяться у зразку та в яких кількостях. Для проведення мікрорентгеноспектрального аналізу застосовуються рентгеновські спектрометри, які дозволяють реєструвати та аналізувати рентгенівські спектри. Зазвичай використовуються рентгенівські спектрометри з рентгеновськими детекторами, такими як лінійні множинні детектори або енергетично-дисперсійні детектори [56].

Процес проведення мікрорентгеноспектрального аналізу включає декілька етапів. По-перше, зразок піддається підготовці, яка може включати в себе полірування або шліфування для отримання чистої та однорідної поверхні. Потім зразок піддається впливу рентгенівського випромінювання, яке викликає флуоресценцію, яку реєструє детектор. Отримані дані аналізуються за

допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, яке дозволяє ідентифікувати елементи та визначати їхні концентрації в зразку.

Застосування мікрорентгеноспектрального аналізу для вивчення сплавів Co-Cr-Mo-W дозволяє отримати інформацію про їхній хімічний склад та допомагає визначити елементну композицію, яка впливає на їхні властивості та поведінку у різних умовах. Цей метод може бути використаний для контролю якості виробів та для дослідження впливу різних процесів обробки на хімічний склад та структуру матеріалу [56].

2.3.3 МікродюрOMETричний аналіз

МікродюрOMETричний аналіз є методом для вивчення механічних властивостей матеріалів на мікрорівні шляхом вимірювання мікротвердості поверхні зразка. Цей метод надає інформацію про стійкість матеріалу до подрібнення або пошкодження, що дозволяє оцінити його міцність та твердість на мікрорівні. У даному розділі розглянемо принципи та методіку застосування мікродюрOMETричного аналізу для вивчення механічних властивостей сплавів Co-Cr-Mo-W.

Перш за все, слід зазначити, що мікродюрOMETричний аналіз базується на методі динамічного випробування, в якому невеликий індентор, зазвичай зроблений з твердого матеріалу, застосовується до поверхні зразка з певною силою, і вимірюється глибина або відбиток, який утворюється. Мікротвердість, отримана з таких вимірювань, є характеристикою механічної стійкості поверхні матеріалу [57].

Для проведення мікродюрOMETричного аналізу застосовуються спеціальні прилади, які називають мікродюрOMETрами. Ці прилади включають в себе індентор для застосування навантаження та систему вимірювання для визначення глибини відбитку. Для аналізу мікродюрOMETричних властивостей сплавів Co-Cr-Mo-W використовуються мікродюрOMETри з різними типами інденторів, такими як Вікерса, Кнупа або Роквела, залежно від характеристик матеріалу та вимог дослідження.

Процес проведення мікродюрOMETричного аналізу включає наступні кроки. Спочатку зразок піддається підготовці, яка може включати в себе полірування або шліфування для отримання гладкої та рівної поверхні. Потім індентор втискається до поверхні зразка з певною силою протягом певного часу. Після цього вимірюється глибина відбитку, який формується на поверхні зразка. Ці дані аналізуються для визначення мікротвердості матеріалу.

Застосування мікродюрOMETричного аналізу дозволяє отримати інформацію про механічні властивості поверхні матеріалу, такі як мікротвердість, мікростійкість та мікрозносостійкість. Ці дані можуть бути використані для оцінки якості матеріалу та для вивчення його міцності та зносостійкості у різних умовах експлуатації [57].

2.3.4 Рентгеноструктурний аналіз

Для рентгенівських досліджень використано дифрактометр Rigaku Ultima IV (випромінювання $\lambda_{\text{CuK}\alpha}$). Усі рентгеноструктурні дослідження проводилися для поверхневої площини, що була перпендикулярна напрямку 3D-друку зразків та напрямку прокатки. Умови проведення досліджень: інтервал кутів $2\Theta = 20^\circ$ - 120° , крок зйомки – $0,04^\circ$, час витримки в точці – 2 с; тривалість зйомки одного зразка – 90 хв. Аналіз отриманих рентгенівських спектрів та проведення кількісного та якісного фазового аналізу здійснено з використанням програмного забезпечення PDXL, міжнародної бази даних дифракції ICDD (PDF-2) та відкритої бази кристалографічних даних COD. Визначення величини напружень 1-го роду проведено методом $\sin^2\psi$ за методом Side-inclination за зміною кутового положення дифракційного максимуму (102) та значень кутів $\psi=0^\circ, -10^\circ, -20^\circ, -30^\circ, -40^\circ$.

Кількісний вміст ϵ - та γ -фаз в досліджуваних зразках визначено за формулою Saude та Gillaud [52].

$$V_\epsilon = 1 - \frac{I_{(200)}^{\text{ГЦК}}}{I_{(200)}^{\text{ГЦК}} + 0,45 \cdot I_{(101)}^{\text{ГЦП}}} \times 100. \quad (2.1)$$

Обробка отриманих спектрів проведена з використанням програмного забезпечення Rigaku Residual Stress Analysis.

Рентгеноструктурний аналіз (РСА) є одним з найбільш потужних методів для визначення фазового складу, кристалічної структури та текстури матеріалів. У контексті дослідження сплавів Co-Cr, виготовлених за допомогою 3D-друку, РСА дозволяє отримати детальну інформацію про кристалічні фази, їх просторове розташування та відносні об'ємні частки. Цей метод є особливо важливим для розуміння впливу технологічних параметрів 3D-друку на кінцеві властивості сплаву.

Для проведення рентгеноструктурного аналізу були використані зразки сплаву Co-Cr-Mo, виготовлені методом селективного лазерного топлення (SLM). Зразки були попередньо підготовлені шляхом механічного шліфування та полірування для отримання гладкої поверхні, що знижує рівень фонових шумів під час аналізу. Рентгеноструктурний аналіз проводився за допомогою дифрактометра X'Pert PRO компанії PANalytical, обладнаного мідним анодом (Cu K α випромінювання, $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). Сканування здійснювалося в діапазоні кутів 2θ від 10° до 90° з кроком $0,02^\circ$ та швидкістю сканування $0,5^\circ/\text{хв}$. Використовувалася стандартна конфігурація θ - 2θ , що дозволяє аналізувати кристалічні фази та їх орієнтацію.

Зразки були підготовлені таким чином, щоб забезпечити максимальну площу поверхні для взаємодії з рентгенівським випромінюванням. Полірування зразків виконувалося до дзеркального блиску з використанням алмазної пасти. Це дозволяє знизити вплив поверхневих дефектів та нерівностей на результати дифракційного аналізу. Сканування зразків проводилося при кімнатній температурі. В ході аналізу реєструвалися дифракційні піки, характерні для різних кристалічних фаз, присутніх у сплаві. Зразки були орієнтовані таким чином, щоб мінімізувати ефекти текстури, які можуть призвести до анізотропії дифракційної картини.

Отримані дифракційні дані оброблялися за допомогою програмного забезпечення HighScore Plus. Основні етапи обробки включали:

Ідентифікацію фаз за допомогою порівняння експериментальних даних з даними бази даних PDF-4.

Визначення структурних параметрів методом Рітвельда для визначення точного складу та розмірів кристалічних ґраток.

Оцінку об'ємної частки кожної фази та їхнього просторового розподілу.

В ході аналізу було ідентифіковано декілька кристалічних фаз, включаючи основну γ -фазу (FCC) з параметром кристалічної ґратки $a = 3,561 \text{ \AA}$, що відповідає літературним даним для подібних сплавів. Кожна з фаз була детально проаналізована з точки зору параметрів кристалічної ґратки та структурних дефектів. Це вказує на стабільність фазового складу при використанні адитивних технологій.

Результати аналізу текстури показали, що сплави, виготовлені методом СЛТ, мають певний ступінь анізотропії, що обумовлено напрямком росту кристалів під час процесу друку. Це може впливати на механічні властивості сплаву, такі як міцність та пластичність, і повинно враховуватися при розробці та використанні матеріалів.

Аналіз дифракційних піків показав наявність мікронапружень у зразках, що є наслідком швидкого охолодження та термічних градієнтів під час 3D-друку. Мікронапруження можуть призводити до виникнення дефектів у кристалічній структурі, таких як дислокації та мікротріщини, які впливають на експлуатаційні характеристики матеріалу.

2.4 Висновки до розділу 2

У даному розділі представлені обрані методики експерименту, які використані для вивчення властивостей сплавів Co-Cr-Mo-W, виготовлених за допомогою адитивних технологій. Зокрема, для аналізу мікроструктури та властивостей сплавів було використано такі методики, як оптична та електронна мікроскопія, рентгенівська дифракція та мікродюрометричний аналіз. Комплексний підхід до вивчення матеріалів дозволив отримати всебічну картину про їхню структуру та властивості, що є ключовим для розуміння їхньої поведінки у різних умовах експлуатації.

Детальний аналіз структури та механічних властивостей цих сплавів дозволяє отримати інформацію, необхідну для подальшого вдосконалення

технології їхнього виробництва та подальшого використання в промисловості та науці. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації параметрів 3D-друку та подальшої обробки, що сприятиме підвищенню якості та надійності готових виробів. Це відкриває нові можливості для використання сплавів Co-Cr-Mo-W у різних галузях промисловості, зокрема в медичній та аерокосмічній техніці, де висока міцність, зносостійкість та корозійна стійкість є ключовими вимогами до матеріалів.

Перспективи подальших досліджень включають детальніший аналіз впливу ультразвукової ударної обробки на мікроструктуру та механічні властивості сплавів Co-Cr-Mo-W. Зокрема, варто дослідити вплив різних параметрів обробки, таких як амплітуда та частота ультразвукових коливань, на структуру та властивості матеріалу.

Отримані результати та рекомендації можуть бути використані для розробки нових матеріалів та технологій їхнього виготовлення, що дозволить забезпечити високу якість та надійність готових виробів. Це відкриває нові можливості для використання сплавів Co-Cr-Mo-W у різних галузях промисловості, зокрема в медичній та аерокосмічній техніці, де висока міцність, зносостійкість та корозійна стійкість є ключовими вимогами до матеріалів. Подальший розвиток методів контролю та обробки таких матеріалів дозволить ще більше підвищити їхні експлуатаційні характеристики, забезпечуючи надійність та довговічність виробів у різних умовах експлуатації.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

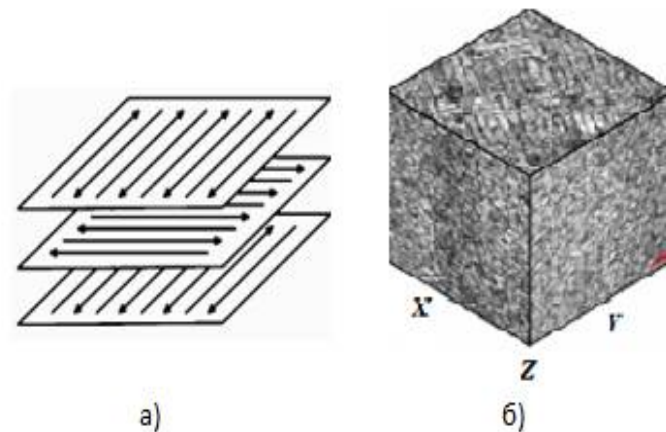
3.1 Особливості мікроструктури 3D-друкованого сплаву Co-Cr-Mo

Розглянемо мікроструктуру ливарних сплавів Co-Cr-Mo-W. Зазвичай для них характерна дендритна структура аустенітної матриці γ -ГЦК (твердий розчин хрому, молібдену і вуглецю в кобальті) та ϵ -фази з ГЦП ґраткою. Додавання вольфраму до складу стопу Co-Cr-Mo стабілізує ϵ -фазу у вигляді довгих прямих смуг. Більшість смуг ϵ -мартенситу проходять через цілі зерна від однієї межі зерна до іншої. Передбачається, що ця ϵ -фаза утворюється в результаті мартенситного атермічного перетворення при загартуванні у воду. Мартенситне перетворення $\gamma \rightarrow \epsilon$ у загартованих стопах Co-Cr-Mo, отриманих звичайним способом лиття, залежить від розміру зерна, і може бути придушено при розмірі зерна менше 90 мкм. Перетворення ГЦК у ГЦП практично не можливе за нормальних умов охолодження і відбувається завдяки загартуванню від температур, що відповідають області стабільності ГЦК-фази, шляхом старіння за температур у інтервалі 650°C – 950 °C або завдяки пластичній деформації.

Мікроструктура ливарних сплавів також складається з блокових карбідів типу $M_{23}C_6$, які виділяються, як правило, по границях зерен і в міждендритних областях, а також на кристалічних дефектах інших типів, таких як дефекти упаковки (ДУ), дислокації та межі розділу фаз γ/ϵ . У цілому карбіди $M_{23}C_6$ є найбільш важливою вторинною фазою в стопах Co-Cr і основним засобом зміцнення. Тип, розмір та об'ємна частка карбиду залежать від умов твердіння, а також від хімічного складу. Вважається, що механічні властивості можуть бути покращені шляхом термічної обробки за допомогою дисперсійного твердіння, тобто розчинення крупної карбідної сітки та утворення дрібних виділень при старінні. Кількість та розмір карбідів можуть бути змінені також інтенсивною пластичною деформацією, наприклад, шляхом волочіння дроту або поверхневого механічного стирання (SMAT-процес).

На сьогодні добре відомо, що мікроструктура адитивно виготовлених сплавів Co-Cr-Mo має певні особливості (порівняно з ливарною технологією), які визначаються технологією і пошаровою стратегією 3D-друку.

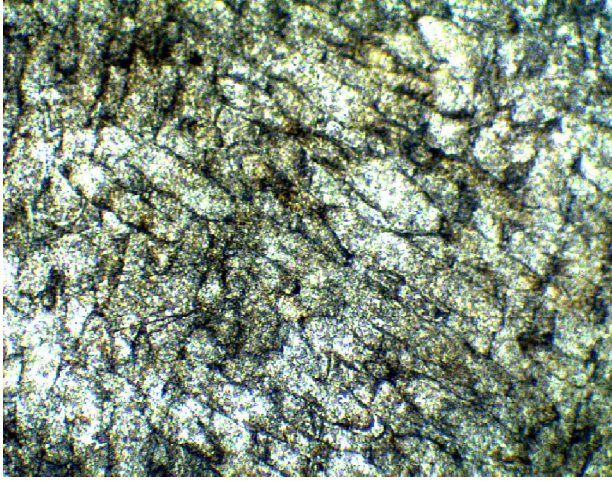
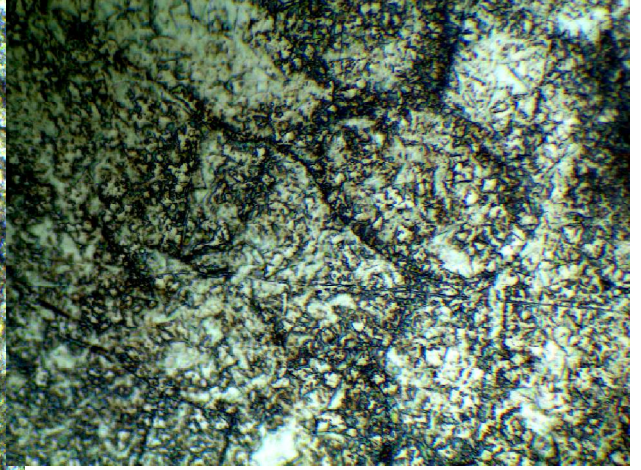
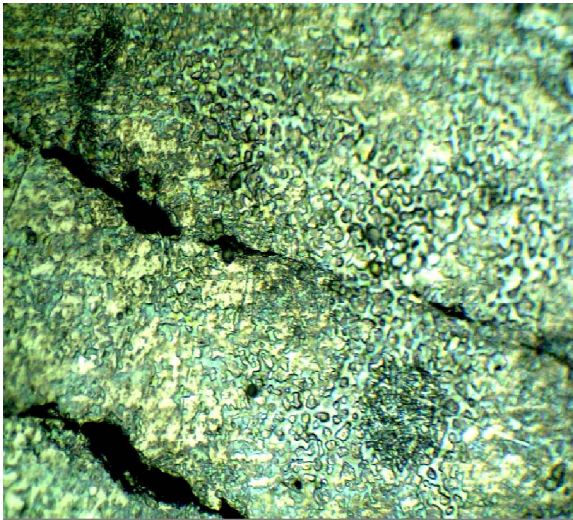
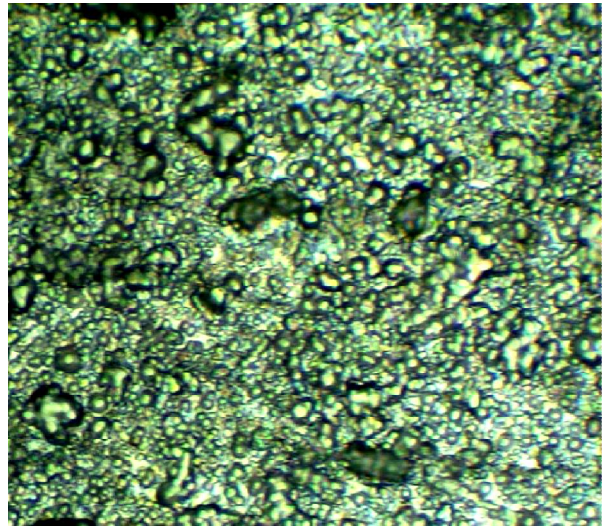
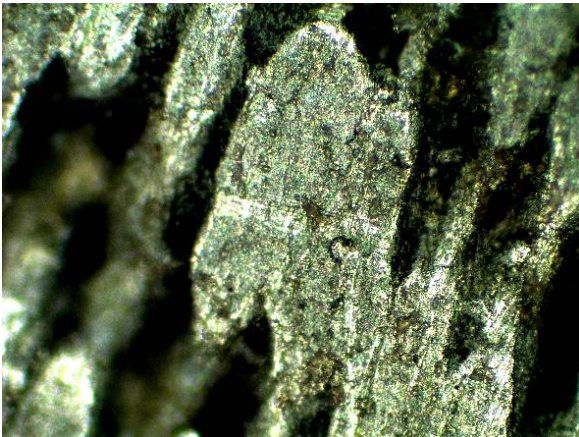
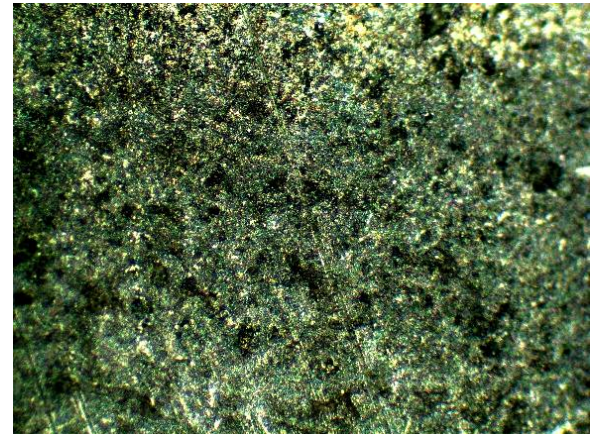
На рис. 3.1 представлена схема використаної в даній роботі пошарової стратегії 3D-друку, а на рис. 3.2 – морфологія поверхні сплаву Co-Cr-Mo-W, отриманого за технологією СЛТ, у вихідному стані.



а – пошарова стратегія 3D-друку; б – схема надрукованого зразка розмірами 10 мм x10 мм x10 мм

Рисунок 3.1 – Схема зразка

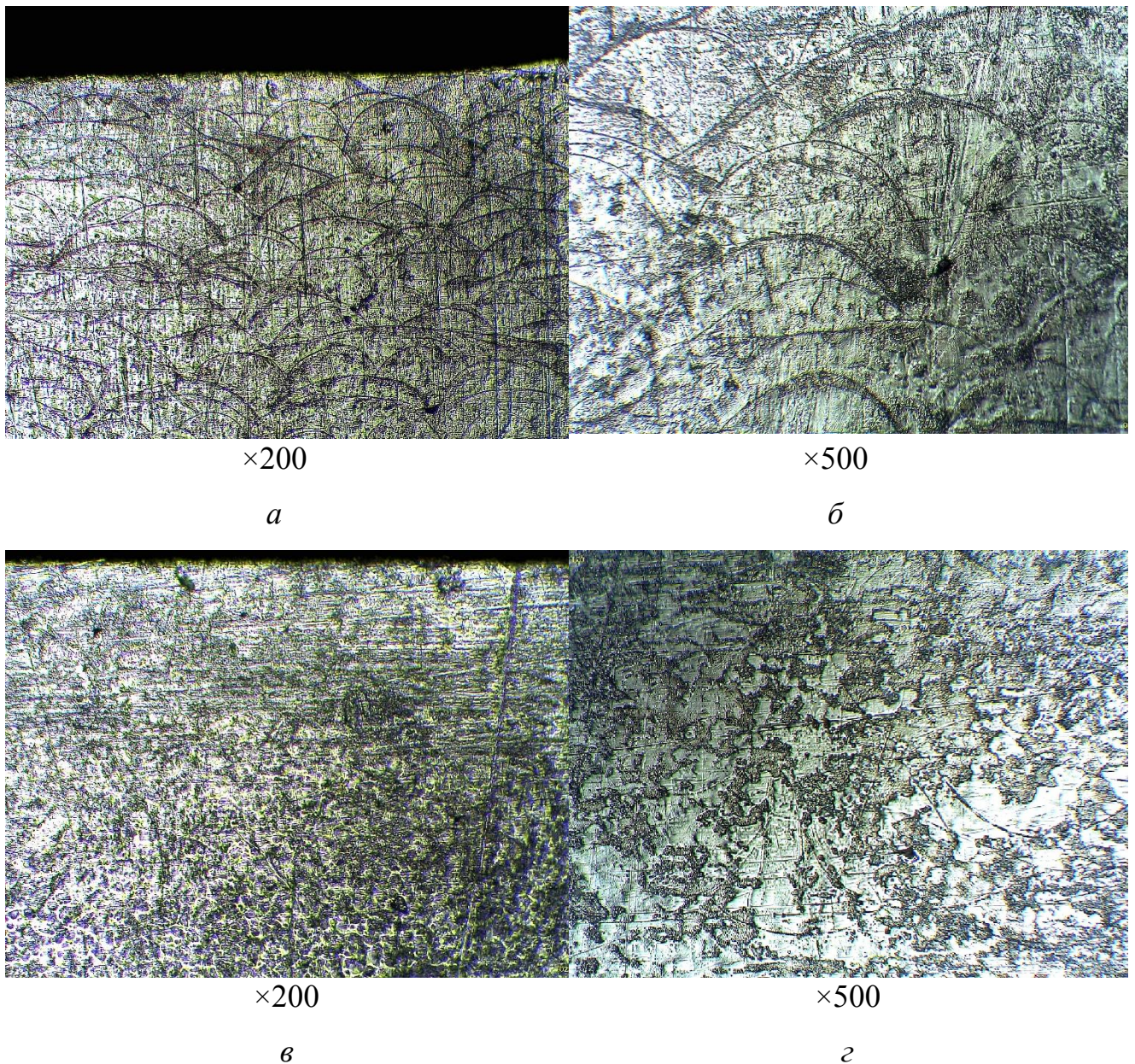
В результаті на горизонтальній поверхні (площина xy) під час 3D-друку формуються доріжки розплаву напівциліндричної форми (рис. 3.2, а, в), що обумовлюється процесом сканування лазерного променя поверхнею шару порошку. При цьому макродефекти, у тому числі дефекти неповного стоплення, пори, значна шорсткість поверхні та високий рівень залишкових напружень розтягу є основними проблемами, які гальмують розвиток і широке застосування стоматологічних конструкцій, отриманих за технологією 3D-друку оскільки значною мірою знижують їхню втомну довговічність. Саме тому в даній час залишкові дефекти та напруження в основному усуваються подальшою термічною обробкою та механічною деформацією.

*a* x50*б* x100*в* x200*г* x500*д* x100*е* x500

a, б, в, г – у вихідному стані; *д, е* – після УЗУО упродовж 50 с із різним збільшенням (площина *xy*)

Рисунок 3.2 – Мікроструктура поверхні зразків сплаву Co-Cr-Mo-W,
отриманих селективним лазерним топленням

У площині xz спостерігається мережа басейнів розплаву, які перекриваються; така хвиляста морфологія за типом «риб'ячої луски» (fish-scale) пов'язана із послідовним твердінням крапельних басейнів розплаву, що виникають під час процесу лазерного розтоплення порошку (рис. 3.3).



a, б – у вихідному стані; *д, е* – після УЗУО упродовж 50 с із різним збільшенням (площина xz)

Рисунок 3.3 – Мікроструктура поверхні зразків стопу Co-Cr-Mo-W,

отриманих СЛТ

На відміну від ЛВ-зразків, місцеве топлення та швидке твердіння, викликане СЛТ, мінімізує дефекти та пористість і сприяє отриманню щільного матеріалу з однорідною дрібнозернистою мікроструктурою.

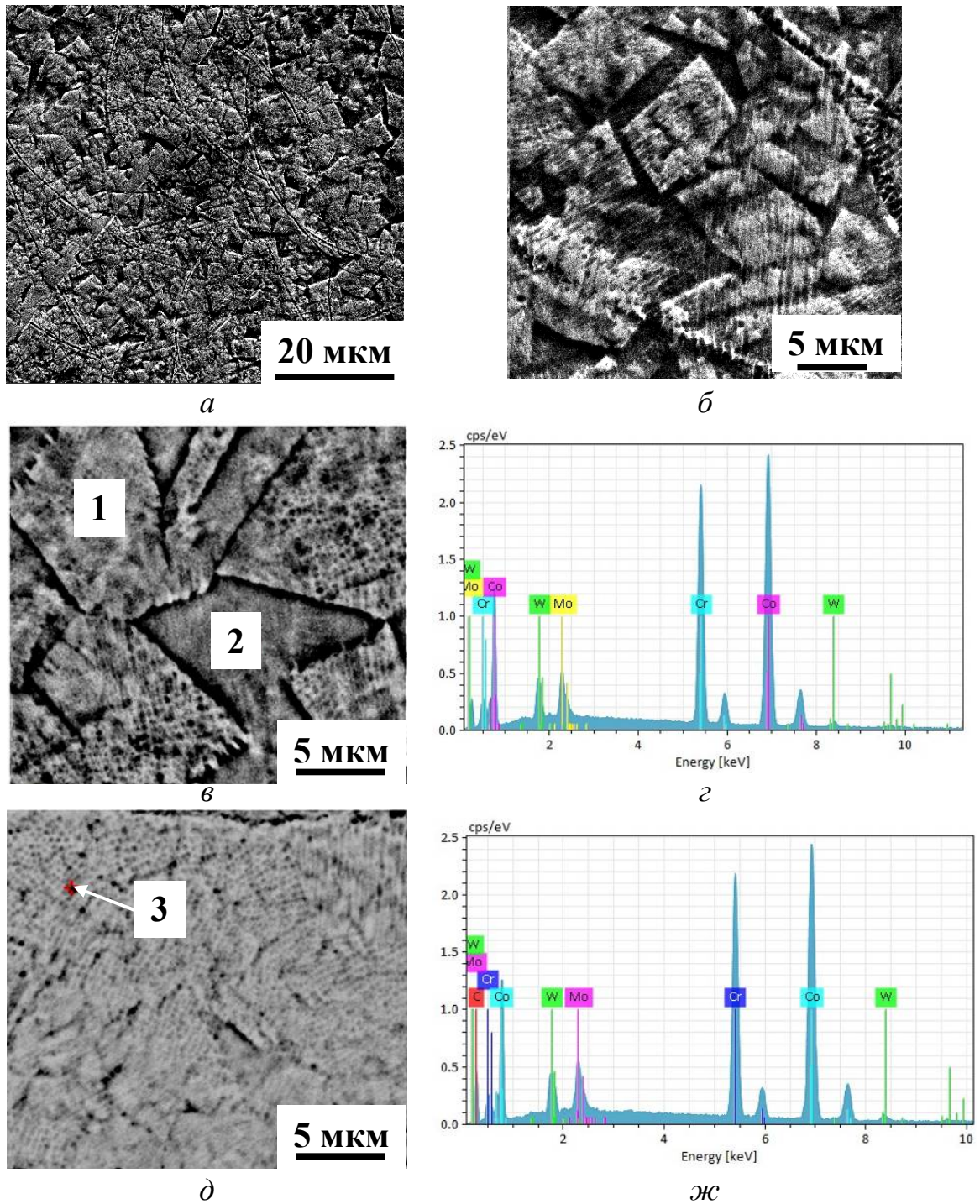
Зразки СЛТ не мають дендритних виділень, для них характерною є комірково-пластинчаста морфологія, яку більш докладно проаналізовано за допомогою растрової електронної мікроскопії РЕМ (рис. 3.4). Ці спостереження показують, що розмір комірок знаходиться в межах ~ 10 мкм. Всередині різноорієнтованих комірок та за їх межами хімічний склад відповідає об'ємному, але спостерігаються незначні коливання концентрації Со та Сг в межах 1–2 ваг.%

Всередині комірок виявлені ділянки розміром 300 нм в яких спостерігається наявність вуглецю (рис. 3.4, ж) в кількості ~ 20 ваг.% (табл. 3.1) і відповідно зменшеним вмістом інших елементів. Стосовно наявності карбідів в зразках складу Со-Сг-Мо, виготовлених за адитивною технологією, однозначної відповіді поки не існує.

Для біомедичних стопів наявність карбідів є принциповим питанням оскільки вони корисні для підвищення зносостійкості. Хоча карбіди можуть грати двояку роль щодо міцності та пластичності: ті з них, які знаходяться в об'ємі зерна, відповідальні за дисперсійно-зміцнювальний ефект, а зернограничні карбіди можуть бути шкідливими у сенсі зниження пластичності та корозійної стійкості. В даному дослідженні не виключається наявність невеликої кількості дрібнодисперсних карбідних виділень всередині комірок, при цьому розтріскування границями зерен/субзерен або інших пошкоджень внаслідок інтенсивної пластичної деформації не спостерігається.

Наявність карбідів у сплавах Со-Сг-Мо-В є важливим аспектом, який впливає на їхні механічні та експлуатаційні властивості. Карбіди, розташовані всередині зерен, сприяють зміцненню матеріалу за рахунок механізму дисперсійного зміцнення. Це дозволяє підвищити зносостійкість та твердість, що особливо важливо для біомедичних імплантатів, які піддаються високим

навантаженням та мають забезпечувати тривалий термін служби.



a, б, в, г – у вихідному стані за даними растрової електронної мікроскопії; *з, ж* – хімічний склад локальних областей
Рисунок 3.4 – Мікроструктура поверхні зразків сплаву Co-Cr-Mo-W, отриманих СЛТ

Таблиця 3.1 – Хімічний склад областей, позначених на рис. 3.1, *з, ж* (1 – всередині комірки, 2 – між комірками, 3 – карбідне включення)

Елемент	Кількість, ваг. %		
	1	2	3
Cr	27,52	26,44	21,77
Co	60,72	62,13	48,69
Mo	6,11	5,8	4,82
W	5,64	5,63	4,93
C	-	-	19,79

3.2 Зміни мікротвердості внаслідок УЗУО за різними режимами

Ультразвукова ударна обробка в інертному середовищі застосовувалась для зміцнення поверхні сплаву Co-Cr-Mo-W в площині *xу* безпосередньо після 3D-друку. На рис. 3.5 наведено залежність зміни мікротвердості поверхні залежно від тривалості УЗУО. У вихідному стані мікротвердість становить ~3,73 ГПа (навантаження 100 г), зі збільшенням тривалості обробки величина мікротвердості зростає та сягає максимального значення 4,9 ГПа після 30 с УЗУО. Подальше збільшення тривалості обробки до 50 с не змінює значення мікротвердості, а після 60 с відбувається поступове зменшення мікротвердості.

На рис. 3.6 наведене порівняння мікротвердості сплаву Co-Cr-Mo-W, виготовленого за різними технологіями, у вихідному стані та після УЗУО впродовж 50 с. Використано зразки, які отримані за технологією ливарного виробництва (ЛВ) шляхом вакуумного лиття у формі циліндричного зливка діаметром 10 мм і товщиною 5 мм з наступною гомогенізацією при 1220 °С упродовж 4 годин та гартуванням у воду. Мікротвердість сплаву, виготовленого за ливарною технологією, є меншою, ніж 3D-зразка, як у вихідному стані, так і після УЗУО. Ефект зміцнення є приблизно однаковим.

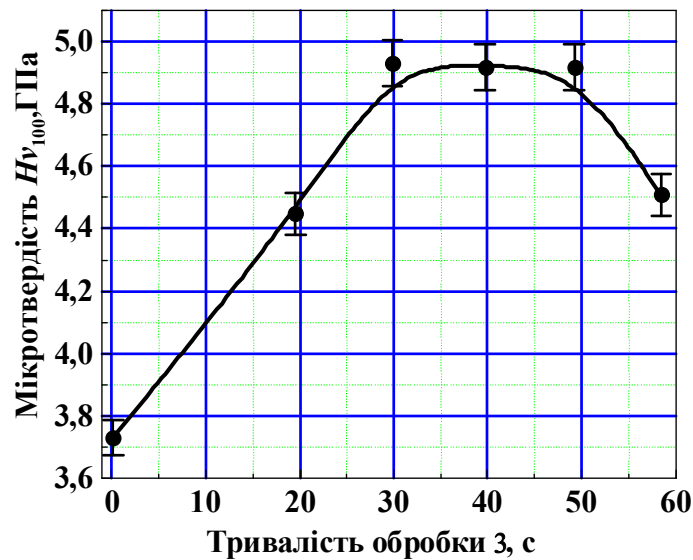


Рисунок 3.5 – Зміна мікротвердості сплаву Co-Cr-Mo-W в залежності від тривалості УЗУО в інертному середовищі

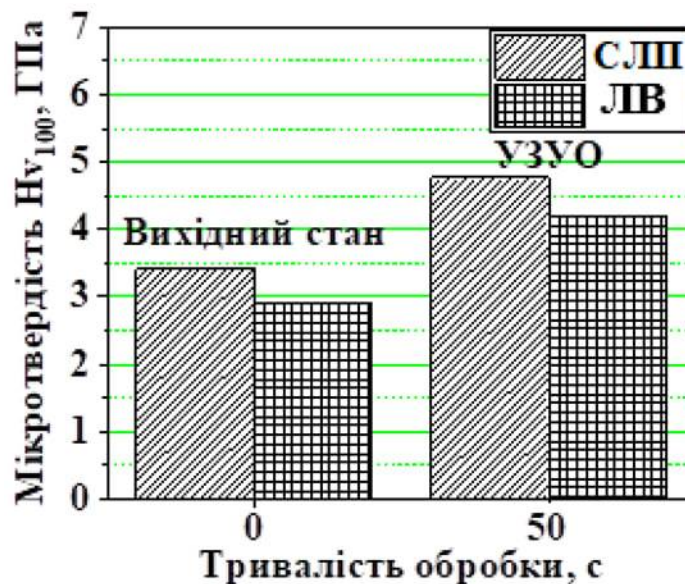
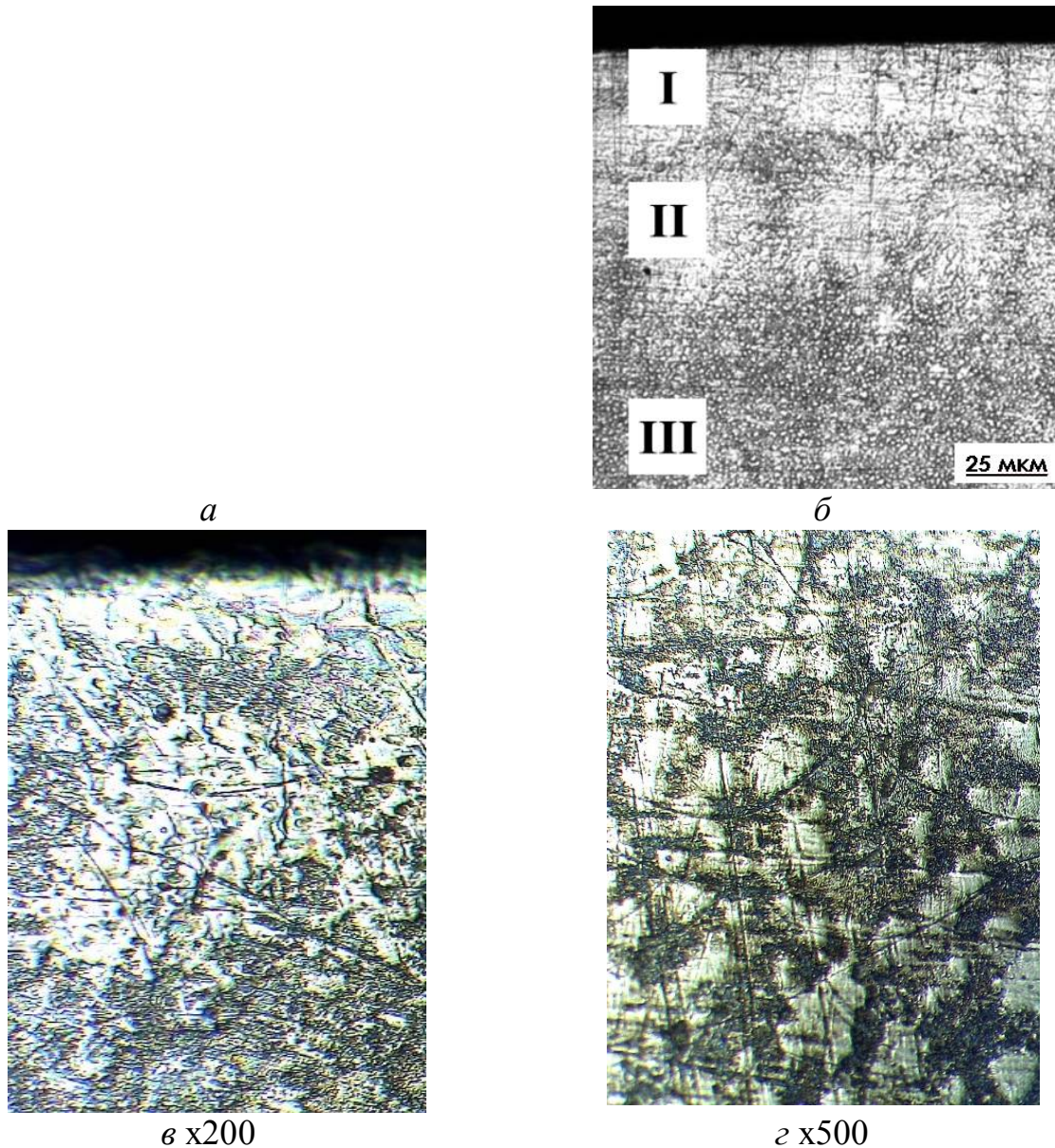


Рисунок 3.6 – Порівняння мікротвердості сплаву Co-Cr-Mo-W, виготовленого 3-D друком (СЛП) та литтям (ЛВ) у вихідному стані та після УЗУО в інертному середовищі упродовж 50 с

На (рис. 3.7, а) наведено результати вимірювання мікротвердості із навантаженням 50 г за поперечним перерізом площини xz сплаву Co-Cr-Mo-W, виготовленого 3D-друком, з метою визначення товщини УЗУО-модифікованого шару. Величина мікротвердості для вихідного стану є більшою порівняно із тією, що спостерігається на (рис. 3.5) і дорівнює 4,2 ГПа. Це пов'язано із різним використаним навантаженням (50 г і 100 г). Можна

проаналізувати вплив тривалості УЗУО на зміни мікротвердості за товщиною модифікованого шару. Найбільш суттєві зміни характерні для інтервалу 30 – 50 с. Спостерігаються області із різною мікротвердістю, які позначені на (рис. 3.7, б) як I, II, III.



a – за поперечним перерізом у площині xz : 1 – $\tau=20$ с; 2 – $\tau=30$ с; 3 – $\tau=60$ с;
б, в, г – мікроструктура поперечного перерізу зміцненого шару після 50 с УЗУО

Рисунок 3.7 – Мікротвердість та мікроструктура сплаву Co-Cr-Mo-W після УЗУО різної тривалості

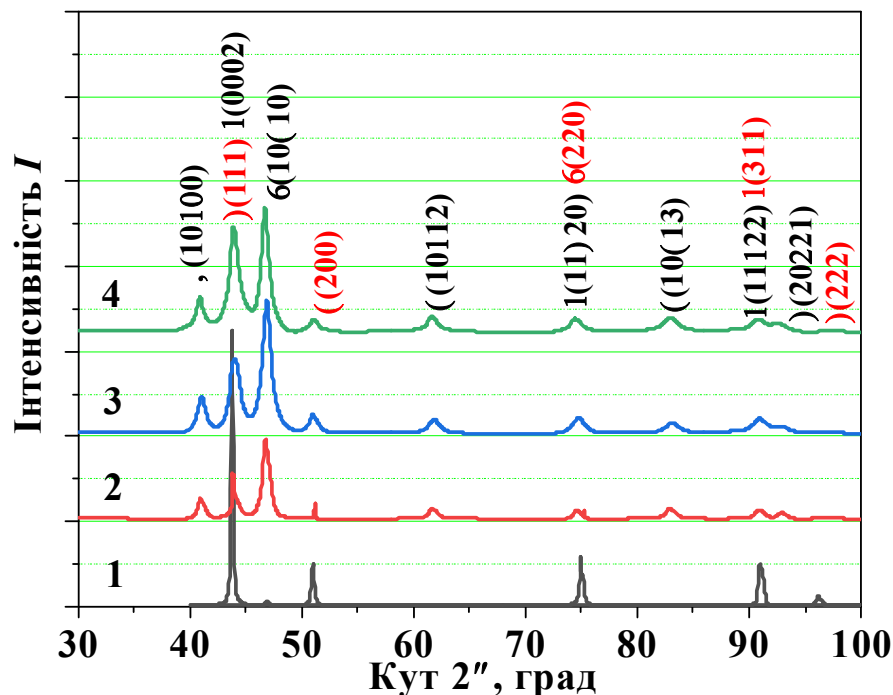
Область I, товщина якої дорівнює ~ 20 мкм, відповідає максимальному деформаційному зміцненню ($Hv=8,2$ ГПа – $8,8$ ГПа). Перехідна область II товщиною ~ 45 мкм відрізняється тим, що відбувається суттєве зменшення мікротвердості. І нарешті, в III-й області товщиною ~ 50 мкм мікротвердість зменшується до вихідного значення (область IV). Товщина модифікованого шару складає ~ 100 мкм – 140 мкм і залежить від часу УЗУО. Якщо тривалість обробки складає 20 с, то чітко простежуються окремі зміцнені шари (рис. 3.7, б), що пояснюється особливостями технології СЛТ. Друк зразка відбувається пошарово і товщина шару порошку складає 25 мкм. Приповерхневий «білий» шар є суцільним і має однакову товщину ~ 20 мкм, слідом розташовується менш зміцнений шар, іншого кольору. Наступний хвилястий «білий» шар має неоднорідну товщину. Якщо тривалість обробки складає 30 с – 50 с, то не тільки значення мікротвердості поверхні є максимальним, а і загальна глибина деформаційного впливу є також найбільшою (~ 140 мкм). Приповерхневий «білий» шар при цьому є суцільним і однакової товщини, зміцнена структура є однорідною і не містить пор та дефектів.

3.3 Вплив УЗУО в інертному середовищі на фазовий склад

На рис. 3.8 показано дифрактограму (1) СЛТ-зразка. Рефлекси кубічних та орторомбічних карбідів хрому типу $M_{23}C_6$ не виявлені у ґратах твердого розчину на основі Со, можливо за рахунок малої кількості та високої дисперсності. Видно, що спостерігаються лише піки дифракції від металевого кобальту, що вказує на те, що компоненти утворюють із цим металом твердий розчин. Згідно з даними кількісного фазового аналізу, γ -фаза (PDF-2 ID: 01-088-2323, просторова група 225: Fm-3m) виявляється у концентрації, близько 95%. Враховуючи фазові діаграми та характеристики кожного металу, які наявні у загальному складі сплаву, цілком очевидно, що пріоритетним є утворення твердого розчину на основі кобальту. Подібність атомних радіусів – $0,125$ нм (Со), $0,13$ нм (Cr), $0,139$ нм (Mo) і $0,137$ нм (W) нм, а також кубічна структура сприяють високій розчинності. Кількість ϵ -фази (PDF-2 ID: 01-071-4239, просторова група 194:P63/mmc) у вихідному стані не перевищує 5% . Під час

УЗУО (рис. 3.9) відбувається зміна інтенсивностей дифракційних максимумів кожної з цих фаз: від γ -фази – зменшується, а від ϵ -фази, навпаки, – збільшується. Оскільки енергія дефектів пакування в ГЦК кобальті має дуже низьке значення і становить близько $10 - 50$ мДж/м², можна вважати, що під час інтенсивної пластичної деформації відбувається мартенситне фазове перетворення. В результаті кількість ϵ -фази досягає 90 %.

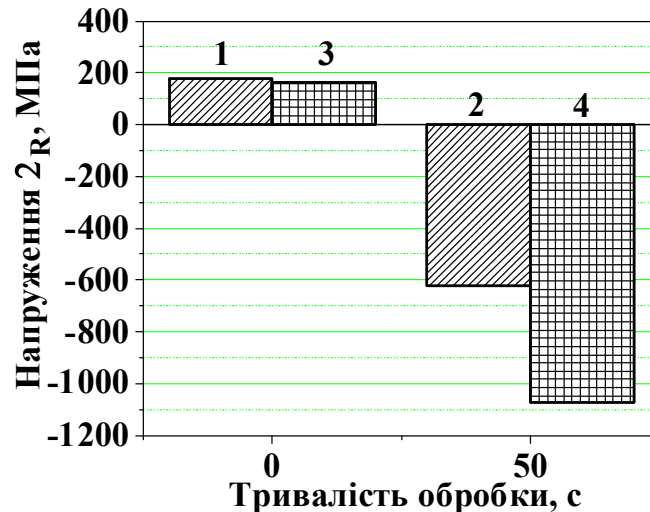
На рис. 3.8 показані також результати рентгенівської дифракції для ЛВ-зразка у вихідному стані (3) та після УЗУО (4). В даному випадку, матеріал оброблений на твердий розчин і загартований, містить дифракційні піки ϵ і γ -фаз і співвідношення ϵ/γ складає 75/20. Наявні піки, які належать карбідам Cr_{23}C_6 та Cr_2C_3 , але кількість їх не перевищує 5 %. Після УЗУО кардинальних трансформацій фазового складу не відбувається – дещо зростає кількість γ -фази до ~ 75 % ймовірно за рахунок оберненого мартенситного перетворення і на ~ 2 % зменшується кількість карбідів.



1, 2 – СЛТ; 3, 4 – ЛВ

Рисунок 3.8 – Дифрактограми зразків сплаву Co-Cr-Mo-W до та після УЗУО, отриманих різними методами

За даними рентгеноструктурного аналізу методом $\sin^2\psi$ визначено рівень залишкових макроскопічних напружень 1-го роду (рис. 3.9).



1, 2 – СЛТ; 3, 4 – ЛВ

Рисунок 3.9 – Напруження 1-го роду для сплаву Co-Cr-Mo-W, виготовленого 3-D друком (СЛТ) та литтям (ЛВ), у вихідному стані та після УЗУО в інертному середовищі

У вихідному стані фіксується наявність напружень розтягу, які після застосування УЗУО змінюються на напруження стиснення, величина яких для СЛТ-зразків становить -600 МПа, а для ЛВ-зразків – перевищує -900 ГПа. Як відомо, підвищення рівня напружень стиснення в поверхневому шарі матеріалу є одним з важливих факторів зміцнення, підвищення тріщиностійкості і втомної міцності. В даному разі внаслідок дії УЗУО цей фактор є більш значимим для ЛВ-зразка, ніж для 3D-друкованого стопу.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Досліджено вплив інтенсивної ультразвукової ударної дії на мікроструктуру, фазовий та хімічний склад, мікротвердість поверхні сплаву Co-27Cr-6Mo-5W, отриманого селективним лазерним топленням порошку (3D-друк), та проведено порівняння з аналогічними властивостями ливарного сплаву.

2. Охарактеризовано анізотропію мікроструктури адитивно виготовлених сплавів Co-27Cr-6Mo-5W: на горизонтальній поверхні (площина xu) формуються доріжки розплаву напівциліндричної форми, що обумовлюється

процесом сканування лазерного променя поверхнею шару порошку; у площині xz спостерігається мережа басейнів розплаву за типом «риб'ячої луски» (fish-scale), які послідовно твердіють під час 3D-друку. Наявності дендритної структури та карбідів, характерних для ливарної технології, не виявлено.

3. Встановлено, що після одноконтантного ударно-навантажувального режиму УЗУО тривалістю 60 с з амплітудою 25 мкм ефект зміцнення адитивно виготовленого сплаву $Co-27Cr-6Mo-5W$ обумовлюється формуванням в поверхневому шарі стискаючих напружень 1-го роду (-600 МПа) і збільшенням вмісту ϵ -фази з 10 % до 90 % за рахунок мартенситного перетворення.

4. Показано, що короткоплинна УЗУО у значній мірі усуває макродефекти, у тому числі дефекти неповного стоплення, пори, значну шорсткість поверхні, які є невід'ємними наслідками адитивної технології, і може бути використана для постобробки поверхні медичних виробів.

4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Науково-технічна актуальність теми досліджень

Адитивне виробництво (3D-друк) здійснило революцію у різних галузях промисловості, включаючи медичну, аерокосмічну та автомобільну. Сплави на основі системи Co-Cr, завдяки своїм високим механічним властивостям і стійкості до корозії, широко використовуються для медичних імплантатів та високотехнологічних компонентів. Однак, забезпечення високої якості поверхні та механічних властивостей 3D-друкованих виробів на сьогодні залишається основною проблемою.

Ультразвукова ударна обробка (УЗУО) є ефективним методом підвищення міцності та твердості поверхні металевих матеріалів, що робить доцільним її застосування в контексті 3D-друку. Інтеграція УЗУО з адитивним виробництвом може значно покращити властивості друкованих сплавів Co-Cr, підвищуючи їхню конкурентоспроможність.

Отже, дослідження впливу УЗУО на структуру та властивості сплавів системи Co-Cr є необхідним для вдосконалення методів адитивного виробництва та забезпечення високих експлуатаційних властивостей готових виробів.

4.2 Розрахунок витрат на проведення НДР

4.2.1 Витрати на оплату праці

Основна заробітна плата (без премій та інших виплат, що здійснюються із прибутку) для виконавців дослідження розраховується на основі даних про трудомісткість окремих робіт по темі (таблиця 4.1) та посадових окладів безпосередніх їх виконавців (таблиця 4.2).

Таблиця 4.1 – Трудомісткість робіт по темі

Найменування робіт по темі дослідження	Трудомісткість за виконавцями, людино-днів			
	Професор	Інженер-дослідник	Технік	Лаборант
1. Пошук і аналіз джерел інформації відповідно до теми роботи	2	4	-	-
2. Вивчення методики проведення досліджень	2	3	-	-
3. Проведення експериментів	3	5	3	3
4. Аналіз одержаних даних	2	4	-	-
5. Написання звіту	2	5	-	-
6. Написання диплому	-	14	-	-
Разом за виконавцями теми	11	35	3	3

Таблиця 4.2 – Розрахунок витрат на оплату праці

Посади виконавців теми	Планова трудомісткість, люд-днів	Заробітна плата, грн		
		Посадовий місячний склад	Середньоденна зарплата	Усього за виконавцями
1. Професор	11	40589,06	1914,58	21060,38
2. Інженер-дослідник	35	9591,3	452,4	15834,0
3. Технік	3	7386,0	348,4	1045,2
4. Лаборант	3	7473,0	352,5	1057,5
Разом оплата праці з теми				38997,08

4.2.2 Єдиний соціальний внесок

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ) – це обов’язкове відрахування на загальнодержавне соціальне страхування. З 1 січня 2016 р. ставка ЄСВ складає 22 %. Базою для нарахування ЄСВ слугують загальні витрати на оплату праці по темі (таблиця 4.2).

$$\text{ЄСВ} = \text{ЗП} \cdot 0,22,$$

де ЗП – загальні витрати на оплату праці по темі.

Наразі ЄСВ буде становити:

$$\text{ЄСВ} = 38997,08 \cdot 0,22 = 8579,36 \text{ грн.}$$

4.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень

У цій статті розраховується вартість усіх видів матеріалів, що будуть використанні при проведенні НДР, вираховуючи вартість зворотних відходів. Оскільки усі матеріали для проведення дослідження надаються кафедрою фізичного матеріалознавства та термічної обробки, і відсутня інформація щодо їх собівартості, тому вартість матеріалів не включені.

4.2.4 Енергоносії для проведення досліджень

Усі роботи проводитимуться на кафедрі фізичного матеріалознавства та термічної обробки, енерговитрати не включені.

4.2.5 Витрати на спеціальне обладнання

Оскільки усе потрібне для проведення дослідження обладнання є на кафедрі фізичного матеріалознавства та термічної обробки, витрати на оренду обладнання не передбачені.

4.2.6 Вартість послуг сторонніх організацій

Оскільки усі потрібні для проведення дослідження зразки, оснащення тощо є на кафедрі фізичного матеріалознавства та термічної обробки, тому витрати на послуги сторонніх організацій не передбачені.

4.2.7 Витрати на службові відрядження

Усі роботи проводимуться безпосередньо на кафедрі фізичного матеріалознавства та термічної обробки, тому витрати на відрядження не передбачені.

4.2.8 Інші прямі невраховані витрати

У цій статті поєднуються всі витрати на проведення НДР, що не увійшли до попередніх статей. При проведенні роботи інші прямі витрати приймаємо на рівні 10 % від суми врахованих витрати на виконання НДР.

$$I_v = (ЗП + ЄСВ) \cdot 0,1, \quad (4.2)$$

Наразі I_v буде становити:

$$I_v = (38997,08 + 8579,36) \cdot 0,1 = 4757,64 \text{ грн.}$$

4.2.9 Накладні витрати

Накладні витрати включаються до калькуляції кошторисної вартості теми пропорційно обсягам витрат на оплату праці основних виконавців або пропорційно сумі прямих витрат на виконання теми досліджень по нормативам організації-виконавця цього дослідження.

Ця стаття включає витрати, пов'язані з управлінням організацією-виконавцем теми, витрати на винахідництво і раціоналізацію; витрати на амортизацію основних засобів; витрати на науково-технічну інформацію; витрати на забезпечення нормальних умов праці і техніки безпеки; витрати на оплату послуг банків; податки, збори та інші обов'язкові платежі і витрати тощо. Розглянемо варіант розрахунку накладних витрат пропорційно сумі прямих витрат на рівні 20 %.

$$H_B = (3\Pi + \text{€CB} + I_B) \cdot 0,2 ,$$

Наразі H_B буде становити:

$$H_B = (38997,08 + 8579,36 + 4757,64) \cdot 0,2 = 10466,82 \text{ грн.}$$

4.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Планова калькуляція вартості проведення досліджень по темі складається на підставі виконаних розрахунків та нормативних даних (таблиця 4.3).

Таблиця 4.3 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1. Витрати на оплату праці	38997,08	Відповідно до розрахунків
2. Єдиний соціальний внесок	8579,36	22 % від загальних витрат на оплату праці
3. Матеріали для проведення досліджень	-	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
4. Енергоносії для проведення досліджень	-	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
5. Спецобладнання для наукових цілей	-	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
6. Вартість послуг сторонніх організацій	-	За договором із сторонніми організаціями (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
7. Витрати на службові відрядження	-	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку не передбачено)
8. Інші невраховані прямі витрати по темі	4757,64	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
9. Накладні витрати	10466,82	Відповідно до нормативів організації-виконавця теми (у нашому випадку 20 % від суми прямих витрат)
10. Усього витрат по темі	62880,9	Сума попередніх статей

4.3 Науково-технічна ефективність НДР

Розрахунок очікуваного економічного ефекту НДР необхідно для визначення доцільності проведення даної роботи. Проте він може бути розрахований лише по НДР, які безпосередньо спрямовані на створення нових матеріалів, покращення параметрів якості продукції, а також створення нових конструкцій.

Для визначення річного економічного ефекту скористаємося бальною системою оцінювання економічної ефективності за наступними показниками:

- важливість розробки (K_1);
- можливість використання результатів розробки (K_2);
- теоретичне значення та рівень новизни (K_3);
- складність дослідження (K_4).

Коефіцієнт K_1 може приймати наступні значення:

- а) ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- б) робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- в) робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- г) робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- г) робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.

Коефіцієнт K_2 може приймати такі значення:

- а) результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- б) результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;
- в) результати розробки можуть бути використані декількома організаціями – 5 балів;
- г) результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі – 8 балів;

г) результатами розробки можуть користуватися у різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт K_3 може приймати такі значення:

а) робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;

б) під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;

в) внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;

г) внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методика тощо – 6 балів;

г) отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.

Коефіцієнт K_4 може приймати такі значення:

а) роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень – 1 бал;

б) роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 гривень до 50 000 гривень – 3 бали;

в) роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів;

г) робота виконується декількома підрозділами, витрати від 100 000 гривень до 200 000 гривень – 7 балів;

г) робота виконується декількома організаціями, витрати понад 200 000 гривень – 9 балів.

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів.

$$B = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$$

(4.4)

В нашому випадку бальна оцінка ефективності згідно таблиці 4.4 становить: $B = 5 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 5 = 750$

Таблиця 4.4 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1. Важливість розробки	K_1	Робота являє собою частину відомчої програми.	5
2. Можливість використання результатів розробки	K_2	Результатами розробки можуть користуватися у різних галузях.	10
3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K_3	Під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів.	3
4. Складність дослідження	K_4	Роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень.	5

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \cdot B - E_n \cdot V_{\text{НДР}}, \quad (4.5)$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (може бути в межах 0,1 – 0,3);

$V_{\text{НДР}}$ – сумарні витрати на виконання НДР (таблиця 4.4).

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 750 - 0,25 \cdot 62880,9 = 359279,78 \text{ грн.}$$

Економічна ефективність НДР визначається коефіцієнтом умовної економічної ефективності E_e . Він є відношенням умовного ефекту виконання НДР до сумарних витрат на виконання НДР та розраховується за формулою:

$$E_e = \frac{E_{\text{НДР}}}{V_{\text{НДР}}}, \quad (4.6)$$

У нашому прикладі E_e буде становити:

$$E_e = \frac{359279,78}{62880,9} = 5,71$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 5,71 (перевищує одиницю), що свідчить про доцільність її виконання.

4.4 Висновки до розділу 4

Дослідження ефективності ультразвукової ударної обробки сплавів системи Co-Cr у контексті адитивного виробництва показало, що впровадження цієї технології може призвести до значних економічних вигід. Розрахунки показали, що очікуваний економічний ефект від використання нових матеріалів та покращення якості продукції є значним. Додатково, врахування витрат на оплату праці та соціальні внески підтверджує доцільність інвестування у подальший розвиток цієї технології.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Для забезпечення безпечних умов праці для виконавців при проведенні досліджень, необхідно враховувати охорону праці, яка включає систему правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я та працездатності людини в процесі трудової діяльності. Це визначено у статті 1 Закону України “Про охорону праці” [58].

Правильна організація робочих умов дозволяє не лише знизити ризики травмування чи фізичних захворювань виконавців дослідження, але і зберегти їхнє ментальне здоров'я, що підвищує ефективність та якість виконуваної роботи. Метою цього розділу є аналіз небезпечних та шкідливих чинників у процесі дослідження ультразвукового ударного зміцнення поверхні сплаву Co-27Cr-6Mo-5W отриманого за адитивною технологією.

5.1 Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві

Закон України «Про охорону праці» є основним нормативним документом, що регулює організацію охорони праці в країні. Згідно зі статтею 13 цього закону, роботодавець зобов'язаний забезпечити на робочих місцях в кожному структурному підрозділі умови, що відповідають нормативно-правовим актам, та дотримання прав працівників у відповідності до законодавства України щодо охорони праці [58]. Крім того, працівники також зобов'язані виконувати вимоги, встановлені нормативно-правовими актами, як зазначено в статті 14.

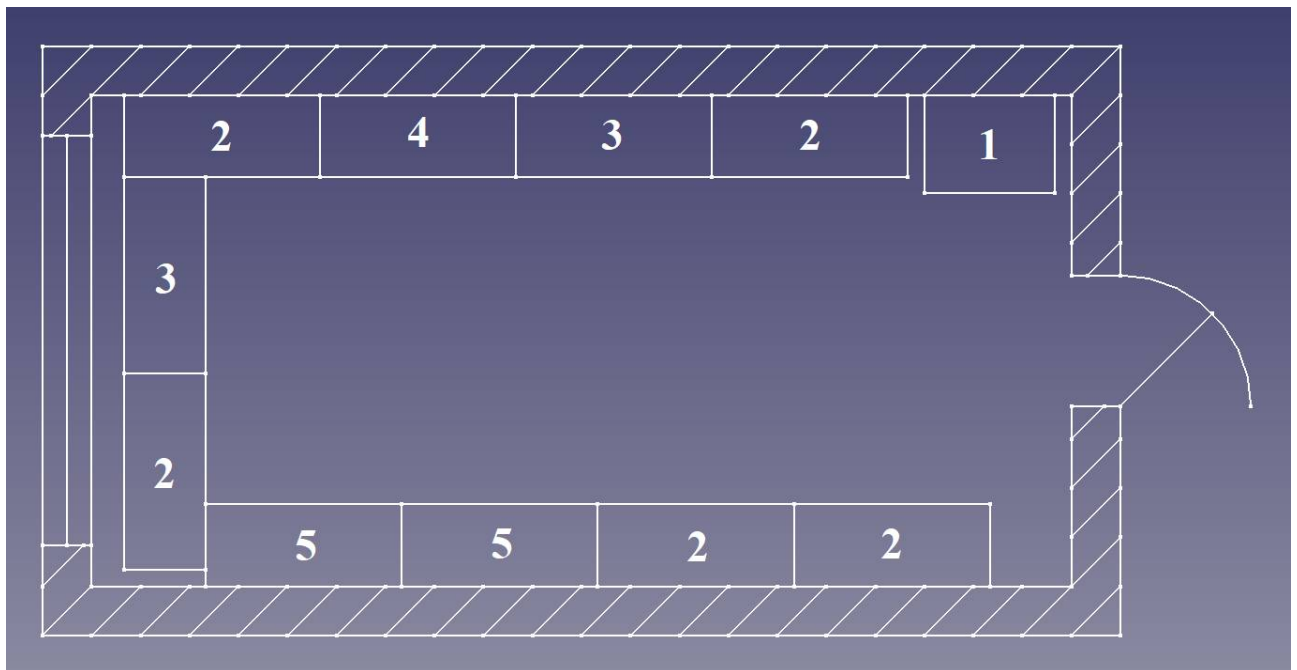
Робоче місце – це простір, в якому відбувається трудова діяльність працівників. Для максимальної ефективності роботи працівників та збереження їх здоров'я на виробництвах дотримуються норм організації праці на робочому місці згідно НПАОП 27.0-1.01-08 [59]. відповідно до типового положення, затвердженого центральним органом виконавчої влади з питань нагляду за охороною праці. У лабораторії 504 кафедри фізичного матеріалознавства та

термічної обробки, де проводитиметься дослідження, відповідальним за охорону праці призначено Волошко С.М.

На підприємствах, де кількість працівників становить або перевищує 50 осіб, роботодавець, відповідно до статті 15, має створити службу охорони праці

5.2 Аналіз параметрів приміщення

Дослідження проводитиметься у лабораторії 504 кафедри фізичного матеріалознавства та термічної обробки. Схематичне зображення лабораторії представлено на (рис 5.1.)



- 1 – раковина з краном; 2 – робочий стіл; 3 – робоче місце з ПК;
4 – робочий стіл з 3D-принтером; 5 – робочий стіл з мікроскопом

Рисунок 5.1 – Схематичне зображення лабораторії 504

Розміри лабораторії – ширина (6 м), довжина (3 м), висота (3,2 м).

Площа лабораторії: $S = a \cdot b = 6 \cdot 3 = 18 \text{ м}^2$.

Об'єм лабораторії: $V = a \cdot b \cdot c = 6 \cdot 3 \cdot 3,2 = 57,6 \text{ м}^3$.

Кількість працюючих у лабораторії – двоє осіб.

Таким чином, на одного працівника лабораторії припадає 9 м^2 площі та $28,8 \text{ м}^3$ об'єму, що відповідає вимогам санітарних норм і правил ДСанПіН 3.3.2.007-98 [60]. Згідно з цими нормами, для приміщень з ПЕОМ площа на

одну особу має становити щонайменше $6,0 \text{ м}^2$, а об'єм приміщення на одну особу – не менше 20 м^3 .

5.3 Аналіз мікроклімату в робочій зоні приміщення

Для визначення мікроклімату внутрішнього середовища лабораторії необхідно проаналізувати фактори, що впливають на його формування: період року, температура, відносна вологість, швидкість руху повітря, температура оточуючих людину поверхонь та інтенсивність теплового (інфрачервоного) опромінення. За важкістю, робота в лабораторії відноситься до категорії Іб (легкі фізичні роботи, що виконуються сидячи, стоячи або пов'язані з ходьбою і не потребують важких систематичних фізичних навантажень, з витратами енергії 150 Ккал/год).

Лабораторія оснащена водяним опаленням та механічною загальнообмінною вентиляцією. Результати дослідження параметрів мікроклімату лабораторії 504 наведені в таблиці 5.1. Порівнюючи виміряні дані факторів формування мікроклімату з нормованими значеннями, можна дійти висновку, що мікроклімат у лабораторії 504 відповідає вимогам санітарних норм ДСН 3.3.6.042-99 [58].

Таблиця 5.1 – Величини параметрів мікроклімату в лабораторії 504

Категорія робіт	Параметр мікроклімату	Період року	Нормовані значення		Дані вимір.	Висновок
			Оптимальне	Допустиме		
Середньої важкості Па	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Теплий	21-23	18-27	22	Оптимально
		Холодний	18-20	17-23	19	Допустимо
	Відносна вологість повітря, %	Теплий	60-40	65	46	Оптимально
		Холодний	60-40	75	55	Оптимально
	Швидкість руху повітря, м/с	Теплий	0,2	0,2-0,4	0,2	Оптимальне
		Холодний	0,2	$\leq 0,3$	0,2	Оптимальне

5.4 Аналіз освітленості приміщення

Недостатнє або надмірне освітлення в робочому приміщенні може призвести до погіршення зору працівників, що потенційно може спричинити професійні захворювання. Тривале перебування в умовах неправильного освітлення може призвести до короткозорості. Крім того, нерівномірність освітлення спричинятиме часту переадаптацію очей під час роботи, що призводить до швидкої їх втоми. Тому аналіз освітленості приміщення має важливе значення.

Існує три види освітлення: природне (яке поділяється на бічне, верхнє і комбіноване), штучне та суміщене. Параметри зорової роботи розподіляються за класами точності на найвищу, дуже високу, високу, середню, малу та дуже малу точність. Робота цього дослідження належить до класу середньої точності.

У лабораторії 504 використовується суміщене освітлення, що дозволяє під час світлового дня користуватися як природним, так і штучним освітленням у разі його нестачі. Природне освітлення в лабораторії забезпечується через бічні світлові прорізи у зовнішніх стінах з південного боку. Вдень природного освітлення зазвичай достатньо для роботи без шкоди для зору співробітників. Однак у похмуру погоду можливий його дефіцит. Тому для дотримання встановлених вимог, приміщення обладнане світильниками штучного освітлення, які розміщені рівномірно у верхній зоні.

5.5 Аналіз інфрачервоного випромінювання

При роботі з 3D-принтером існує ризик теплового впливу на організм людини. Теплові пристрої, які використовуються на підприємствах (у нашому випадку, це 3D-принтер), є джерелами інфрачервоного випромінювання. Інфрачервоне випромінювання впливає на функціональний стан людини, її центральну нервову систему, серцево-судинну систему та може викликати різні патологічні зміни у стані очей. Допустима густина потоку інфрачервоного

випромінювання встановлена з урахуванням області випромінювання. Згідно з “Санітарними нормами мікроклімату виробничих приміщень”, інтенсивність опромінення інфрачервоним випромінюванням від відкритих джерел не повинна перевищувати 140 Вт/м^2 при опромінюванні більш ніж 25% поверхні тіла та обов'язковому використанні засобів індивідуального захисту, включаючи засоби захисту обличчя та очей.

Захист від інфрачервоного випромінювання здійснюється згідно з Державними санітарними нормами ДСН 3.3.6.042-99 за допомогою екранування джерел випромінювання за допомогою теплоізолюючих матеріалів [58 – 61]. Як засоби індивідуального захисту використовуються суконні рукавички та окуляри зі спеціальним захисним склом.

5.6 Аналіз впливу шуму та вібрації

Головним джерелом шуму є 3D-принтер.

Характер шуму – тональний. Тривалість роботи 3D-принтеру залежить від розміру деталі та параметрів налаштування друку (не більше 5 годин). Його фактичний шум складає 45 дБА. Нормування тонального шуму здійснюється відповідно до ДСТУ 2325-93 [61]. Згідно цих норм загальний рівень шуму в приміщенні лабораторії не повинен перевищувати 75 дБА. Оскільки шум в лабораторії не перевищує встановлені норми, то шкідливого впливу на людину не відбувається.

Джерелом вібрація також є 3D-принтер. Фактичний рівень вібрації становить по віброприскоренню 13 дБА та віброшвидкості 26 дБА.

5.7 Аналіз забрудненості повітря

Вплив пилу на організм людини залежить від складу пилу та його походження. Нетоксичний пил може спровокувати подразнення шкіри, при цьому може виникнути захворювання шкіри – дерматит. Якщо пил проникає в легені, то він може бути причиною захворювання, наприклад пневмоконіозу.

Чистота повітря в лабораторії визначається вмістом пилу і шкідливих речовин. В повітрі робочої зони періодично контролюється вміст шкідливих речовин.

Для захисту органів дихання від потрапляння в них пилу в цьому дослідженні слід застосовувати протипилові респіратори [62].

5.8 Електробезпека

Живлення всього обладнання в лабораторії здійснюється від мережі з напругою 220 В. Мікроскоп має підсилену ізоляцію. Лабораторія 504 є приміщенням без підвищеної небезпеки.

Електробезпека людей значною мірою залежить від вологості і температури повітря у приміщенні, ступеня електропровідності підлоги і стін, наявності в повітрі хімічних речовин й електропровідного пилу тощо.

Безпека експлуатації роботи електроустаткування забезпечується захисними заходами: періодичною перевіркою стану ізоляції та недоступністю струмоведучих частин. На дію електричного ураження впливає ряд факторів: величина струму (1 мА), рід струму (змінний струм), частота струму (50 Гц), шлях струму в організмі, тривалість дії струму, стан організму, виробниче середовище.

Величина струму, що протікає через будь-яку ділянку тіла. При розробці захисних заходів, вважають небезпечною силу струму 25 мА, при якому важко самотійно відірватись від провідника, а струм силою 100 мА може призвести до смертельного наслідку.

У лабораторії, де проводилися дослідження, правильно виконане захисне заземлення корпусів, електроустаткування і приладів. Розташування робочих місць таке, що виключається можливість одночасного доторкання до корпусів, електроустаткування і приладів.

Можливими випадками ураження електричним струмом у даній лабораторії є ураження при пошкодженні ізоляції електричного обладнання, або при пошкодженні розетки.

5.9 Пожежна безпека

Лабораторія розташована в будівлі, що належить до першого ступеня пожежної безпеки. Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 [63] за вибухопожежною та пожежною небезпекою лабораторія належить до категорії Г, оскільки робота з негорючими речовинами або матеріалами в гарячому, розпеченому або розплавленому стані передбачає виділення тепла у процесі обробки. Інша частина приміщення належить до категорії В, адже у лабораторії перебувають і застосовуються горючі та важкогорючі рідини, тверді горючі та важкогорючі речовини і матеріали, але при цьому приміщення не належить до категорії А і Б. Таким чином, загальною приймаємо категорію В. Клас зони за вибухонебезпекою відсутній. Клас зони за пожежною безпекою згідно НПАОП 40.1-1.32-01 встановлено П-Па, оскільки електроустаткування розміщено і застосовується у просторі приміщення, у якому присутні тверді горючі речовини та матеріали [64].

План евакуації з лабораторії та поверху, в разі небезпеки показаний на (рис 5.2)

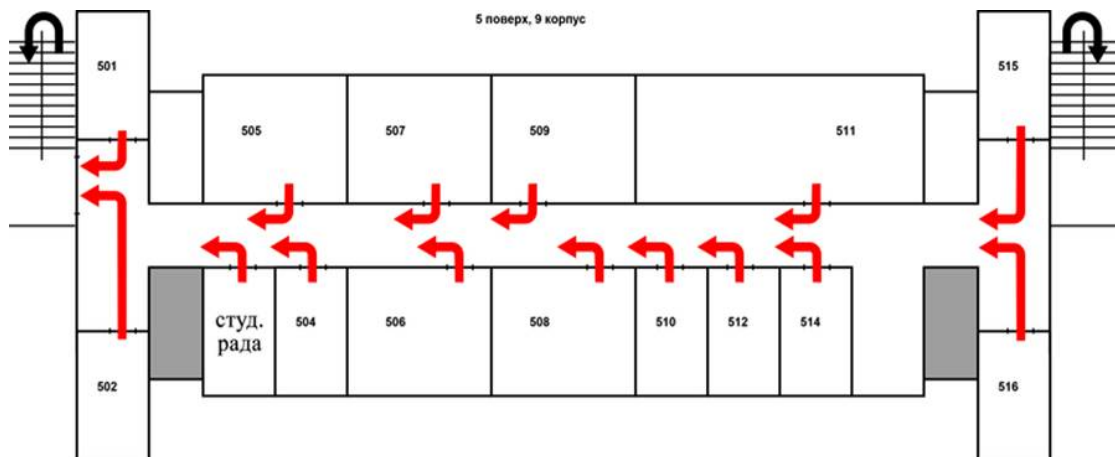


Рисунок 5.2 – План евакуації людей на випадок пожежі, поверх 5

На випадок пожежі в лабораторії є один вогнегасник ОУ-2. Такий вогнегасник забезпечує пожежогасіння у випадку короткого замикання електропроводки без її попереднього відключення. Також розроблений план евакуації. Приміщення обладнане пожежною сигналізацією автоматичної дії комбінованого типу (теплові або димові сигналізатори).

Заходи щодо пожежної безпеки передбачають правильну експлуатацію обладнання, протипожежний інструктаж робітників, заборону куріння в недозволених для цього місцях, наявність засобів гасіння і попередження пожежі (пожежна сигналізація).

5.10 Висновки до розділу 5

Аналіз небезпечних та шкідливих чинників у процесі дослідження ультразвукового ударного зміцнення поверхні сплаву Co-27Cr-6Mo-5W підкреслив важливість організації безпечних умов праці для виконавців. Врахування охорони праці, яка включає правові, соціально-економічні та технічні заходи, є критичним для збереження здоров'я та безпеки працівників. Рекомендації щодо вдосконалення умов праці та дотримання нормативів охорони праці можуть покращити якість виконаної роботи та підвищити загальний рівень безпеки на робочому місці.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Досліджено вплив інтенсивної ультразвукової ударної дії на мікроструктуру, фазовий та хімічний склад, мікротвердість поверхні сплаву Co-27Cr-6Mo-5W, отриманого селективним лазерним топленням порошку (3D-друк), та проведено порівняння з аналогічними властивостями ливарного сплаву.

2. Охарактеризовано анізотропію мікроструктури адитивно виготовленого сплаву Co-27Cr-6Mo-5W: на горизонтальній поверхні (площина xy) формуються доріжки розплаву напівциліндричної форми, що обумовлюється процесом сканування лазерного променя поверхнею шару порошку; у площині xz спостерігається мережа басейнів розплаву за типом «риб'ячої луски» (fish-scale), які послідовно твердіють під час 3D-друку. Наявності дендритної структури та карбідів, характерних для ливарних сплавів, не виявлено.

3. Встановлено, що після одноконтального ударно-навантажувального режиму УЗУО тривалістю 50 с з амплітудою 25 мкм ефект зміцнення адитивно виготовленого сплаву Co-27Cr-6Mo-5W обумовлюється формуванням в поверхневому шарі стискаючих напружень 1-го роду (-600 МПа) і збільшенням вмісту ϵ -фази з 10% до 90% за рахунок мартенситного перетворення.

4. Показано, що короткоплинна УЗУО у значній мірі усуває макродефекти, у тому числі дефекти неповного стоплення, пори, значну шорсткість поверхні, які є невід'ємними наслідками адитивної технології, і може бути використана для постобробки поверхні медичних виробів.

6. Економічний аналіз доцільності дослідження вказує на те, що дане дослідження є доцільним з економічної точки зору.

7. У приміщенні, де проводилася ультразвукова ударна обробка, забезпечені оптимальні умови мікроклімату, освітлення, електробезпеки, пожежної безпеки, а також засоби індивідуального захисту від шуму, вібрацій та пилу, що робить його безпечним для праці.

GENERAL CONCLUSIONS

1. The influence of intensive ultrasonic impact treatment on the microstructure, phase and chemical composition, and microhardness of the surface of the Co-27Cr-6Mo-5W alloy obtained by selective laser melting of powder (3D printing) has been studied, and a comparison with the analogous properties of the cast alloy has been conducted.

2. The anisotropy of the microstructure of the additively manufactured Co-27Cr-6Mo-5W alloy has been characterized: on the horizontal surface (xy plane), semi-cylindrical melt tracks are formed due to the laser beam scanning process on the powder layer surface; in the xz plane, a network of melt pools in the "fish-scale" pattern, which solidify sequentially during 3D printing, is observed. The presence of dendritic structures and carbides, typical for cast alloys, has not been detected.

3. It has been established that after a single-contact impact-loading mode of ultrasonic impact treatment (UIT) lasting 50 seconds with an amplitude of 25 μm , the strengthening effect of the additively manufactured Co-27Cr-6Mo-5W alloy is due to the formation of compressive residual stresses of the first kind (-600 MPa) in the surface layer and an increase in the ϵ -phase content from 10% to 90% due to martensitic transformation.

4. It has been shown that short-term UIT significantly eliminates macro-defects, including incomplete melting defects, pores, and significant surface roughness, which are inherent consequences of additive technology, and can be used for the surface post-processing of medical devices.

6. The economic analysis of the feasibility of the research indicates that this research is economically viable.

7. The premises where the ultrasonic impact treatment was conducted have optimal conditions for microclimate, lighting, electrical safety, fire safety, and also provide individual protection against noise, vibrations, and dust, making it a safe work environment.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Smith J. Additive Manufacturing: Principles/ J.Smith, A. Jones // Advances, and Applications. – 2019. – Vol. 1, no. 4. – P. 20–41.
- [2] Brown K. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing/ K.Brown , B.White // Publisher. – 2020. – Vol. 2, no. 1. – P. 15–30.
- [3] Liu Y. Effects of ultrasonic impact treatment on microstructure and properties of Co-Cr-Mo alloy / Y.Liu, L.Zhou, J.Wang // Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 5, no. 2. – P. 100–120.
- [4] Zhang H. Study on the microstructure and mechanical properties of Co-Cr-Mo-W alloy processed by selective laser melting/ H.Zhang, H.Wang, X.Chen // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2020. – Vol. 29, no. 6. – P. 3784–3792.
- [5] Volokitin A. V. Progress in Additive Manufacturing / A.V.Volotkin, M.A. Latypova, A.T. Turdaliev // Progress in Physics of Metals. – 2023. – Vol. 24, no. 4. – P. 686–714.
- [6] Allar J. Additive laser technology / J.Allar, M.Sellen // Laser Technology Journal. – 2024. – Vol. 3, no. 1. – P. 50–70.
- [7] Thompson A. Ultrasonic Surface Treatment in Additive Manufacturing: A Review/ A. Thopson, B.Smith // Journal of Manufacturing Processes. – 2023. – Vol. 45, no. 3. – P. 102–115.
- [8] Garcia C. Advances in Ultrasonic Polishing Techniques for Additive Manufactured Metals / C.Garcia, D.Martinez// Materials Science and Engineering. – 2023. – Vol. A, no. 782. – P. 139375.
- [9] Johnson R. Ultrasonic Material Removal for Additive Manufactured Parts: Principles and Applications / R.Johnson, K.Brown// International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2023. – Vol. 76, no. 1-4. – P. 245–258.

- [10] Chen H. Influence of 3D Printing Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Co-Cr Alloy / H.Chen, L.Wang // *Materials Research Letters*. – 2019. – Vol. 7, no. 2. – P. 156–165.
- [11] Valiev R. Z. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement / R.Z. Valiev, T.G. Langdon // *Progress in Materials Science*. – 2006. – Vol. 51, no. 7. – P. 881–981.
- [12] Модифікація поверхні 3D-друкованого сплаву Ti-6Al-4V ультразвуковою ударною обробкою / С.М.Волошко [та ін.]// *Металофізика та новітні технології*. – 2023. – Т. 45, № 2. – С. 217–237. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.02.0217>
- [13] Застосування ультразвукових технологій поверхневої обробки в адитивному виробництві металевих сплавів /С.М.Волошко// *Металознавство та обробка металів*.–2024. – Т. 30, № 109. – С. 28–39. <https://doi.org/10.15407/mom2024.01.028>
- [14] Vasylyev M. O. Wire-Feeding Based Additive Manufacturing of the Ti–6Al–4V Alloy. Part I. Microstructure/ M.O. Vasylyev, B.M. Mordyuk, S.M.Voloshko // *Progress in Physics of Metals*. – 2023. – Vol. 24, no. 1. – P. 5–37. <https://doi.org/10.15407/ufm.24.01.005>
- [15] Vasylyev M. O. Wire-Feeding Based Additive Manufacturing of the Ti–6Al–4V Alloy. Part II. Mechanical Properties/ M.O. Vasylyev, B.M. Mordyuk, S.M. Voloshko// *Progress in Physics of Metals*. – 2023. – Vol. 24, no. 1. – P. 38–74. <https://doi.org/10.15407/ufm.24.01.038>
- [16] Фізичні основи ультразвукового ударного зміцнення металевих поверхонь/ Г.І.Прокопенко [та ін.]// – Київ: Наукова думка, 2017. – 466 с.
- [17] Сидоренко С. І. Інженерія поверхні: способи зміцнення металевих поверхонь інтенсивною пластичною деформацією/ С.І.Сидоренко, М.О.Васмильєв, С.М.Волошко // *Наука про матеріали: досягнення та перспективи*. У 2-х т. Т. 1. – Київ: Академперіодика, 2018. – С. 393–413.
- [18] Ультразвукова ударна обробка конструкцій і споруд транспортного машинобудування: монографія/Б.М. Мордюк, Г.І.Прокопенко, С.М.Волошко [та ін.] // – 2020. – 310 с. ISBN 978-966-680-968-4

- [19] Srinivasa Rao Ch. Effect of Heat Treatment on Hardness of Co-Cr-Mo Alloy Deposited With Laser Engineered Net Shaping/ Rao Ch. Srinivasa // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 23, no. 3. – P. 150–162.
- [20] Roudnicka M. Different Response of Cast and 3D-Printed Co-Cr-Mo Alloy to Heat Treatment: A Thorough Microstructure Characterization/ M.Roudnichka, J.Bigas, D.Vojtech // *Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 34, no. 5. – P. 450–467
- [21] Matthews A. Effect of post-additive manufacturing surface modification temperature on the tribological and tribocorrosion properties of Co-Cr-Mo alloy for biomedical applications/ A.Matthews // *Journal of Biomedical Materials Research*. – 2020. – Vol. 33, no. 2. – P. 150–162.
- [22] Li S. Additive Manufacturing of Co-Cr Alloys: Recent Developments and Future Perspectives/ S.Li, H.Zhang // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2019. – Vol. 50, no. 3. – P. 789–802.
- [23] Kim Y. Advanced Surface Modification Techniques for Co-Cr Alloys in Additive Manufacturing / Y.Kim , S.Park // *Surface Science*. – 2020. – Vol. 35, no. 2. – P. 567–580.
- [24] Wang H. Recent Progress in the Mechanical Behavior of Co-Cr-Mo Alloys Fabricated by Additive Manufacturing/ H.Wang, Q.Liu // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2020. – Vol. 40, no. 4. – P. 451–465.
- [25] Chen W. Microstructure-Property Relationships in Co-Cr Alloys Additively Manufactured Using Electron Beam Melting/ W.Chen, J.Li // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2017. – Vol. 65, no. 2. – P. 789–802.
- [26] Park J. Advanced Techniques for Surface Modification of Co-Cr Alloys in Additive Manufacturing: A Review/ J.Park, S.Lee // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 40, no. 3. – P. 112–125.
- [27] Huang H. Recent Advances in Ultrasonic-Assisted Surface Modification of Co-Cr Alloys for Additive Manufacturing Applications/ H.Huang, W.Xu // *Ultrasonics*. – 2017. – Vol. 22, no. 3. – P. 432–445.

- [28] Liu K. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Co-Cr-Mo Alloys Fabricated by Additive Manufacturing: A Review/ K.Liu, Y.Zhao // *Materials Characterization*. – 2021. – Vol. 25, no. 2. – P. 567–580.
- [29] Wang Z. Influence of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Co-Cr Alloys Fabricated by Electron Beam Melting/ Z.Wang, X.Wu // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2020. – Vol. 38, no. 4. – P. 789–802.
- [30] Zhang X. Surface Modification Techniques for Enhancing the Biocompatibility of Co-Cr Alloys Produced by Additive Manufacturing/ X.Zhang, X.Li // *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*. – 2018. – Vol. 40, no. 4. – P. 451–465.
- [31] Li M. Surface Modification Techniques for Improving the Wear Resistance of Co-Cr Alloys Fabricated by Additive Manufacturing/ M.Li, G.Chen // *Tribology Letters*. – 2018. – Vol. 30, no. 4. – P. 567–580.
- [32] Li X. Biocompatibility Evaluation of Co-Cr Alloys Fabricated by Additive Manufacturing: A Review/ X.Li, Y.Liu // *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. – 2020. – Vol. 38, no. 4. – P. 789–802.
- [33] Liu Z. Surface Morphology and Roughness Analysis of Co-Cr Alloys Fabricated by Additive Manufacturing/ Z.Liu, Y.Xu // *Journal of Surface Topography: Metrology and Properties*. – 2017. – Vol. 40, no. 2. – P. 112–125.
- [34] Park J. H. Influence of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Co-Cr Alloys Fabricated by Additive Manufacturing/ J.H.Park, J.H. Choi, H.S.Yang // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2020. – Vol. 275. – P. 116368.
- [35] Wang C. Effects of Post-Processing Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Additively Manufactured Co-Cr-Mo Alloy/ C.Wang, Q.Liu, L.Zhang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Vol. 765. – P. 789–802.
- [36] Li H. Microstructural Evolution and Mechanical Behavior of Additively Manufactured Co-Cr-Mo Alloys under Different Heat Treatment Conditions / H.Li, Z.Wang, Y.Li // *Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. A, 740. – P. 156–165.

- [37] Kim S. Y. Fatigue Behavior of Additively Manufactured Co-Cr-Mo Alloys under Cyclic Loading Conditions/ S.Y. Kim // *International Journal of Fatigue*. – 2018. – Vol. 98. – P. 143–157.
- [38] Zhao X. Microstructure and Mechanical Properties of Co-Cr-Mo Alloys Fabricated by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting/ X.Zhao, W.Zhang, F.Liu // *Journal of Materials Science and Technology*. – 2018. – Vol. 40, no. 4. – P. 112–125.
- [39] Wu Y. Corrosion Behavior of Additively Manufactured Co-Cr Alloys in Simulated Body Fluids/ Y.Wu, X.Wang, Y.Chen // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2018. – Vol. 89. – P. 451–465.
- [40] Yang L. Additive Manufacturing of Co-Cr-Mo Alloys: Processing, Microstructure, and Properties/ L.Yang, J.Sun, Y.Zhang // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2019. – Vol. 40. – P. 432–445.
- [41] Xu J. Characterization of Porosity and Its Influence on the Mechanical Properties of Additively Manufactured Co-Cr Alloys/ J.Xu, L.Wang, K.Liu // *Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. A, 25(2). – P. 789–802.
- [42] Liu S. Effect of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of Co-Cr-Mo Alloys Fabricated by Electron Beam Melting/ S. Liu, H.Zhang, H.Li // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2019. – Vol. 36, no. 2. – P. 112–125.
- [43] Balagna C. Microstructure and Mechanical Properties of Co-Cr-Mo/ C.Balagna, S.Spirano, M.Faga // *Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 32. – P. 125–133.
- [44] Zhu Y. Effect of Ultrasonic Impact Treatment on Surface Hardness of 3D-Printed Co-Cr-Mo Alloys/ Y.Zhu // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 47. – P. 45–54.
- [45] Li J. Enhanced Surface Properties of 3D-Printed Co-Cr-Mo Alloy by Ultrasonic Impact Treatment/ J.Li, Q.Sun // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 831. – P. 154687.
- [46] Davis J.R. Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics/ J.R. Davis // *ASM International*. – 2002. – Vol. 24. – P. 1–10.

- [47] AlMangour B. Improving the Surface Quality and Mechanical Properties by Shot Peening of 17-4 Stainless Steel Fabricated by Additive Manufacturing/ B.AlMangour, J.M. Yang // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 110. – P. 914–924.
- [48] Dinda G.P. Fabrication of Co-Cr-Mo Alloy by Direct Laser Metal Deposition/ G.P.Dinda, L.Song // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2008. – Vol. 39, no. 12. – P. 2914–2922.
- [49] Hanzl P. The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of SLM Parts/ P.Hanzl, M.Zetek, Y.Bakša // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 100. – P. 1405–1413.
- [50] Mahamood R.M. Laser Metal Deposition of Metals and Alloys/ R.M.Mahamood, E.T. Akinlabi // *Springer*. – 2017. – Vol. 18. – P. 50–70.
- [51] Pohlman R. Ultrasonic Impact Treatment and its Effect on the Fatigue Life of Welds/ R.Pohlman, R.Tressler // *Materials Science and Engineering*. – 1981. – Vol. 50. – P. 93–104.
- [52] González J.A. Analysis of Microstructure and Mechanical Properties of Co-Cr-Mo Alloys Manufactured by Selective Laser Melting Technology for Biomedical Applications/ J.A.González, P.P. Rodríguez, B.J. Álvarez // *Materials Characterization*. – 2018. – Vol. 143. – P. 18–28.
- [53] Yasa E. Microstructural Investigation of Selective Laser Melting 316L Stainless Steel Parts Exposed to Laser Re-melting/ E.Yasa, J.Kruth // *Procedia Engineering*. – 2011. – Vol. 19. – P. 389–395.
- [54] Suryawanshi J. Mechanical and Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting/ J. Suryawanshi, K.G. Prashanth, S. Scudino // *Materials & Design*. – 2016. – Vol. 105. – P. 144–152.
- [55] Thijs L. A Study of the Microstructural Evolution during Selective Laser Melting of Ti–6Al–4V/ L.Thijs, F.Verhaeghe, T. Craeghs // *Acta Materialia*. – 2010. – Vol. 58, no. 9. – P. 3303–3312.
- [56] Gu D. Selective Laser Melting Additive Manufacturing of Ti-Based Nanocomposites: The Role of Nanoparticles/ D.Gu, H.Wang, D.Dai // *Advanced Engineering Materials*. – 2015. – Vol. 17, no. 5. – P. 606–614.

- [57] Hanzl P. The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of SLM Parts/ P. Hanzl // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 100. – P. 1405–1413.
- [58] ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – [Чинний від 1999-01-01]. – Київ: МОЗ України, 1999. – 42 с. – (Замість СН 245 71).
- [59] НПАОП 27.0-1.01-08. Правила охорони праці в металургійній промисловості. – [Чинний від 2008-01-01]. – Київ: Держгірпромнагляд, 2008. – 104 с. – (Замість НПАОП 27.0-1.01-07).
- [60] ДСанПіН 3.3.2-007-98. Організація і обладнання робочих місць. – [Чинний від 1998-07-01]. – Київ: МОЗ України, 1998. – 35 с.
- [61] ДБН В.2.5.28-2006. Природне та штучне освітлення. – [Чинний від 2006-07-01]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2006. – 64 с.
- [62] ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – [Чинний від 1999-01-01]. – Київ: МОЗ України, 1999. – 48 с. – (Замість СН 3223-85)
- [63] ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухо-пожежною та пожежною небезпекою. – [Чинний від 2016-07-01]. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2016. – 56 с. – (Замість ДСТУ Б В.1.1-36:2008).
- [64] НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – [Чинний від 2001-06-01]. – К. : Держнагляд охорони праці України, 2001. – 128 с.