

**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: «Анізотропія структури та властивостей алюмінієвого сплаву
 $AlSi_{10}Mg$ отриманого селективним лазерним плавленням»**

Виконав:

здобувач ВО IV курсу, групи ФМ-01
Заремба Іван Олександрович

Керівник:

доц., к.т.н., Бурмак Андрій Петрович

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 нормконтролю:

ст. викладач Шаповалова Н.А.

Рецензент:

д.т.н., проф. каф. ВТМ та ПМ Мініцький А.В.

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

Здобувач ВО _____

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 ВО

Зарембі Івану Олександровичу

1. Тема роботи «Анізотропія структури та властивостей алюмінієвого сплаву AlSi10Mg отриманого селективним лазерним плавленням», керівник роботи Бурмак Андрій Петрович, к.т.н., затверджені наказом по університету від «30» травня 2024 р. № 2210-с
2. Термін подання здобувачем ВО роботи _____
3. Вихідні дані до роботи: алюмінієвий сплав AlSi10Mg; 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): 84 сторінок, 14 таблиць; 22 рисунки; 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	02.05.2024	
	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	05.06.2024	
	Попередній захист	07.06.2024	
	Захист на засідання ЕК	17.06.2024	

Здобувач ВО

Іван ЗАРЕМБА

Керівник

Андрій БУРМАК

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 84 сторінки, 22 рисунки, 15 формул, 66 літературних джерел.

АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО, 3D-ДРУК, МІКРОСТРУКТУРА, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, РЕНТГЕНОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ.

Об'єкт дослідження: сплав $AlSi_{10}Mg$ виготовлений за технологією селективного лазерного плавлення порошку.

Предмет дослідження: анізотропія мікромеханічних характеристик, структури, фазового складу та макроскопічних напружень в поверхневому шарі алюмінієвого сплаву $AlSi_{10}Mg$ в залежності від напрямку 3D друку.

Мета роботи: дослідження анізотропії мікротвердості, морфології поверхні, ступеню деформації, структурно-фазового складу алюмінієвого сплаву $AlSi_{10}Mg$ в залежності від напрямку 3D друку.

Методи дослідження: оптична мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія, мікродюрOMETричний аналіз, рентгеноструктурний аналіз, аналіз залишкових макроскопічних напружень.

Результати дослідження та їх новизна: досліджено анізотропію мікротвердості, мікроструктури, фазового складу та напружень 1-го роду в зразках сплаву $AlSi_{10}Mg$ отриманого за технологією селективного лазерного плавлення порошку.

ABSTRACT

Thesis: 84 pages, 22 figures, 15 formulas, 66 literary sources.

ADDITIVE MANUFACTURING, 3D PRINTING, MICROSTRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES, X-RAY STRUCTURAL ANALYSIS.

Research Object: AlSi₁₀Mg alloy produced by selective laser melting powder technology.

Research Subject: Anisotropy of micromechanical characteristics, structure, phase composition, and macroscopic stresses in the surface layer of the aluminum alloy AlSi₁₀Mg depending on the direction of 3D printing.

Research Aim: Investigation of the anisotropy of microhardness, surface morphology, degree of deformation, structural-phase composition of the aluminum alloy AlSi₁₀Mg depending on the direction of 3D printing.

Research Methods: Optical microscopy, scanning electron microscopy, microhardness analysis, X-ray structural analysis, analysis of residual macroscopic stresses.

Research Results and Their Novelty: The anisotropy of microhardness, microstructure, phase composition, and first-order stresses in samples of AlSi₁₀Mg alloy obtained by selective laser melting of powder technology were investigated.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП.....	10
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	13
1.1 Алюміній та сплави на його основі	13
1.2 Характеристика та застосування алюмінієвих сплавів.....	13
1.3 Класифікація та властивості алюмінієвих сплавів	13
1.4 Сплави типу АМц (Al – Mn)	14
1.5 Сплави типу АМг (Al – Mg)	15
1.6 Дюралюміни (Al – Cu – Mg, Al – Cu – Mn)	16
1.7 Авіалі (сплави системи Al – Mg – Si).....	17
1.8 Методи одержання сплавів і вплив технології отримання на структуру та властивості.....	18
1.9 Висновки до розділу 1.....	27
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	39
2.1 Об'єкт дослідження	29
2.2 Методика вимірювання мікротвердості за Віккерсом та визначення мікромеханічних характеристик.....	30
2.3 Оптична металографія.....	32
2.4 Рентгеноструктурний фазовий аналіз.....	33
2.5 Рентгенографічний аналіз напружень 1-го роду.....	35
2.6 Скануюча електронна мікроскопія та мікрорентгеноспектральний аналіз.....	35
2.7 Висновки до розділу 2.....	37
3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	39
3.1 Особливості мікроструктури алюмінієвого сплаву AlSi ₁₀ Mg отриманого за селективним лазерним плавленням.....	39
3.2 Анізотропія мікротвердості та мікромеханічних характеристик алюмінієвого сплаву AlSi ₁₀ Mg в залежності від напрямку 3D друку.....	41

3.3	Зміна структури, фазового складу та напружень 1-го роду в алюмінієвому сплаві $AlSi_{10}Mg$ в залежності від напрямку 3D друку.....	46
3.4	Скануюча електронна мікроскопія та мікрорентгеноспектральний аналіз поверхонь сплаву $AlSi_{10}Mg$	48
3.5	Висновки до розділу 3.....	51
4	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	52
4.1	Науково-технічна актуальність.....	52
4.2	Розрахунок собівартості роботи.....	52
4.2.1	Розрахунок трудових витрат.....	52
4.2.2	Єдиний соціальний внесок.....	54
4.2.3	Витрати на матеріали.....	54
4.2.4	Витрати на спеціальне обладнання та приладдя.....	55
4.2.5	Витрати на послуги сторонніх організацій.....	55
4.2.6	Витрати на службові відрядження.....	55
4.2.7	Інші прямі невраховані витрати.....	55
4.2.8	Накладні витрати.....	56
4.2.9	Кошторисна вартість.....	56
4.3	Розрахунок економічної ефективності.....	57
4.4	Висновки до розділу 4.....	61
5	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	62
5.1	Характеристика приміщення.....	62
5.2	Аналіз штучного та природнього освітлення у приміщенні.....	64
5.3	Небезпечні та шкідливі фактори.....	64
5.3.1	Мікроклімат.....	65
5.3.2	Шум.....	66
5.3.3	Вплив шкідливих речовин.....	66
5.3.4	Електронебезпека.....	67
5.4	Заходи для забезпечення безпеки праці.....	68

	8
5.5 Інженерні рішення, засоби індивідуального захисту.....	69
5.6 Пожежна безпека.....	69
5.7 Висновки до розділу 5.....	70
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	72
CONCLUSIONS.....	74
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	76

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

SLM/СЛС – селективне лазерне спікання

ОКР – області когерентного розсіяння

SLA – стереолітографія

SLS – Вибіркове лазерне спікання

ЕПМ – електронно-променева плавка

МБЛЗ – Механізм Багаторазового Лазерного Зварювання

ЛПДП – Лазерне Плавлення Дрібних Порошків

SIMT – Технологія імплантатів з ефектом пам'яті форми

ВСТУП

Неспинний розвиток адитивного виробництва металевих деталей пояснюється зростаючою ефективністю технологічних процесів та збільшенням рівня якості виробів, що безпосередньо впливає на підвищення рівня їх механічних характеристик. 3D-друк дозволяє оптимізувати виробництво, зменшити енерговитрати і забезпечити більш просте одержання деталей складних форм та невеликих розмірів. Довгий час такий підхід вважався виправданим переважно для сплавів, які мають високу вартість, таких як титанові, нікелеві жароміцні сплави та медичні сплави кобальту з хромом [1].

Тим не менш, значно більш дешеві алюмінієві сплави постійно розширюють своє застосування для одержання друкованих деталей. Особливо доцільним є одержання дрібних серійних деталей, у тому числі складної конфігурації. В порівнянні з класичним литтям під тиском таких алюмінієвих деталей, адитивне виробництво в більшості випадків є більш вигідним і доцільним [2].

Зменшення вартості та підвищення ефективності адитивних виробничих процесів сприяло розширенню його застосування та широкому впровадженню в авіакосмічну промисловість та автомобілебудування. Оскільки для цих галузей важливе значення має зменшення маси деталей, машин і механізмів, використання алюмінієвих сплавів у долі адитивно виготовлених компонентів стрімко зростає [3].

Дуже поширеними промисловими алюмінієвими сплавами як для класичного, так і для сучасного адитивного виробництва є $Al_{12}Si$, Al_7SiMg та $Al_{10}SiMg$. Вони є простими та дешевими у виробництві і при цьому характеризуються досить високим рівнем питомої міцності. До їх технологічних переваг відносяться висока рідкоплинність при незначній температурі плавлення, низькі усадка і коефіцієнт термічного розширення [4].

Сплав $Al_{10}SiMg$ є найбільш широко вивченим серед алюмінієвих сплавів, що використовуються в адитивному виробництві [4, 5]. Як і для всіх доевтектичних силумінів, для нього характерна структура, що складається з твердого розчину на основі алюмінію, евтектичного кремнію та вторинних фаз Mg_2Si . Досягнення найвищого рівня механічних властивостей такого сплаву пов'язане головним чином з досягненням мінімальних розмірів частинок евтектичного кремнію, що можливо при надшвидкій кристалізації, яка є характерною для адитивного виробництва і може досягати 10^6 °C/с. При литті та литті під тиском цей показник є відповідно меншим на п'ять і три порядки [4, 6, 7].

Використання селективного лазерного спікання (СЛС/SLM) для адитивного виробництва деталей зі вказаного сплаву відмічається досягненням високих показників міцності, але часто також високою дефектністю, яка збільшує крихкість сплавів та погіршує їх оброблюваність. Крім таких очевидних факторів впливу на механічні і технологічні характеристики, варто відзначити формування високодисперсної структури та перенасичення твердого розчину на основі алюмінію. Розміри його зерен можуть сягати 3 мкм – 10 мкм, маючи переважно витягнуту овальну або стовпчасту форму. З одного боку, дисперсність структури повинна розглядатися як позитивний фактор для досягнення високих механічних та експлуатаційних характеристик сплаву $Al_{10}SiMg$, але напруження в структурі, її перенасиченість кремнієм та загальна анізотропія вказують на потребу в додатковій термічній обробці 3D-виробів [8].

В сплаві після адитивного виробництва і термічної обробки, зазвичай T5 або T6, проходять структурні зміни, які призводять до зниження міцності і твердості, але зростання пластичності та ударної в'язкості. Це спричиняється певними рекристалізаційними процесами в межах зерен твердого розчину, що пояснюється високою густиною дислокацій та рівнем внутрішніх напружень, розпадом евтектичних ділянок, сфероїдизацією та коагуляцією частинок кремнію і більш однорідним виділенням зміцнюючих фаз [8-10].

Не зважаючи на чисельні дослідження вказаних процесів, для адитивно виготовлених матеріалів та, зокрема сплавів $AlSi_7Mg$ та $Al_{10}SiMg$, залишається багато спірних питань, пов'язаних з його структуро- та фазоутворенням в різних вихідних станах та після термічної обробки [11]. Так в деяких дослідженнях вказано, що після 3D-друку фаза Mg_2Si присутня у вихідних зразках [12], а в інших зазначається, що вона виділяється тільки після термічної обробки [13]. Крім цього, мало досліджень враховують наявність у складі сплавів заліза та марганцю, які можуть сприяти утворенню залізовмісних фаз Al_5FeSi , $Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ та $Al_8Si_6Mg_3Fe$ [8].

Найбільш доцільним та методично вірним способом проведення подібних досліджень є той, який включає порівняння зразків одержаних 3D-друком та литих зразків [14]. Маючи велику кількість даних з досліджень литих зразків у вихідному стані та після термічної обробки, можна більш точно дослідити основні параметри і залежності формування структурно-фазового стану та механічних властивостей адитивно виготовлених сплавів.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Алюміній та сплави на його основі

Алюмінієві сплави є легкими сплавами на основі алюмінію, які містять один або кілька легуючих елементів. У промисловості використовуються сплави алюмінію на основі систем: Al – Cu, Al – Si, Al – Mn, Al – Mg, Al – Cu – Mg. Зазвичай структура сплавів на основі алюмінію складається при кімнатній температурі з α – твердого розчину та інтерметалідної фази. Легуючі елементи, такі як мідь, кремній, магній, цинк, манган, додаються до алюмінію з метою підвищення його міцності [15].

1.2 Характеристика та застосування алюмінієвих сплавів

Основними перевагами всіх сплавів алюмінію є їх низька густина (2,5 – 2,8) г/см³, висока міцність відносно маси, задовільна стійкість до атмосферної корозії, доступна вартість та легкість у виготовленні та обробці. Ці сплави застосовуються в авіаційній галузі (обшивка літаків, важелі підвіски, шпангоути, лонжерони, паливні та масляні баки), суднобудуванні (корпуси суден), автомобільній промисловості (блоки циліндрів, головки блоків циліндрів, поршні двигунів внутрішнього згоряння), приладобудуванні та інших галузях промисловості, а також у виробництві споживчих товарів [15, 16].

1.3 Класифікація та властивості алюмінієвих сплавів

За методом обробки алюмінієві сплави поділяють на наступні категорії:

- а) деформівні сплави призначені для пластичного деформування при виготовленні напівфабрикатів та деталей. Ця категорія включає:

- деформівні алюмінієві сплави, які не піддаються зміцненню термічною обробкою;
- деформівні алюмінієві сплави, що зміцнюються термообробкою.

б) ливарні сплави призначені для обробки методом лиття.

До спеціальних сплавів, які виготовляють за технологіями порошкової металургії, відносяться спечені алюмінієві порошки (САП) та спечені алюмінієві сплави (САС) [15].

1.4 Сплави типу АМц (Al – Mn)

Сплави системи Al-Mg, відомі як магналії, поєднують в собі достатню міцність, високу пластичність, корозійну стійкість та зварюваність, і відзначаються стійкістю до вібрацій. Діаграма стану Al-Mg представлена на рисунку 1.1. Ці сплави широко використовуються для зварних конструкцій. Вони позначаються як АМг0,5 (з вмістом від 0,4 % до 0,8 % Mg), АМг2 (з вмістом від 1,7 % до 2,4 % Mg), АМг5 (з вмістом від 4,8 % до 5,8 % Mg), АМг6 (з вмістом від 5,8 % до 6,8 % Mg), при цьому зі збільшенням порядкового номера зростає міцність. Напівфабрикати можуть бути "м'якими" (АМг5М), напівнагарттованими (АМг5П) та нагарттованими (АМг5Н, зі ступенем деформації від 20 % до 30 %) [16].

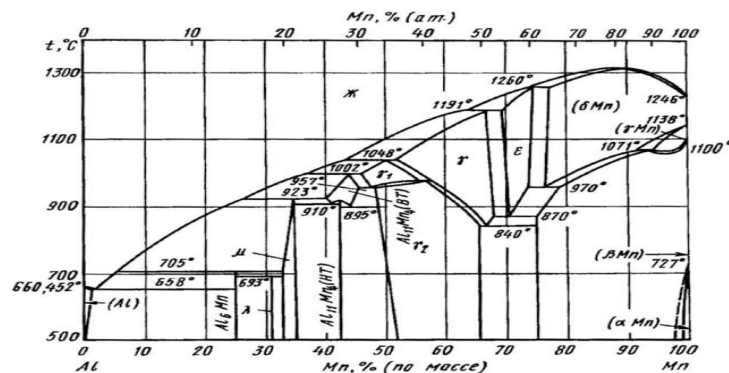


Рисунок 1.1 – Діаграма стану Al – Mn [16]

1.5 Сплави типу АМг (Al – Mg)

Сплави системи Al – Mg (магналії) характеризуються поєднанням достатньої міцності, високої пластичності, корозійної стійкості та зварюваності, є стійкими до вібрацій. Діаграма стану стану Al – Mg наведено на рис. 1.2. Застосовують для зварних конструкцій. Маркують: АМг0,5 ((0,4 – 0,8) % Mg), АМг2 ((1,7 – 2,4) % Mg), АМг5 ((4,8 – 5,8) % Mg), АМг6 ((5,8 – 6,8) % Mg) – зі збільшенням порядкового номера зростає міцність. Напівфабрикати можуть бути «м'якими» (АМг5М), напівнагартованими (АМг5П) та нагартованими (АМг5Н, ступінь деформації – (20 – 30) %) [16].

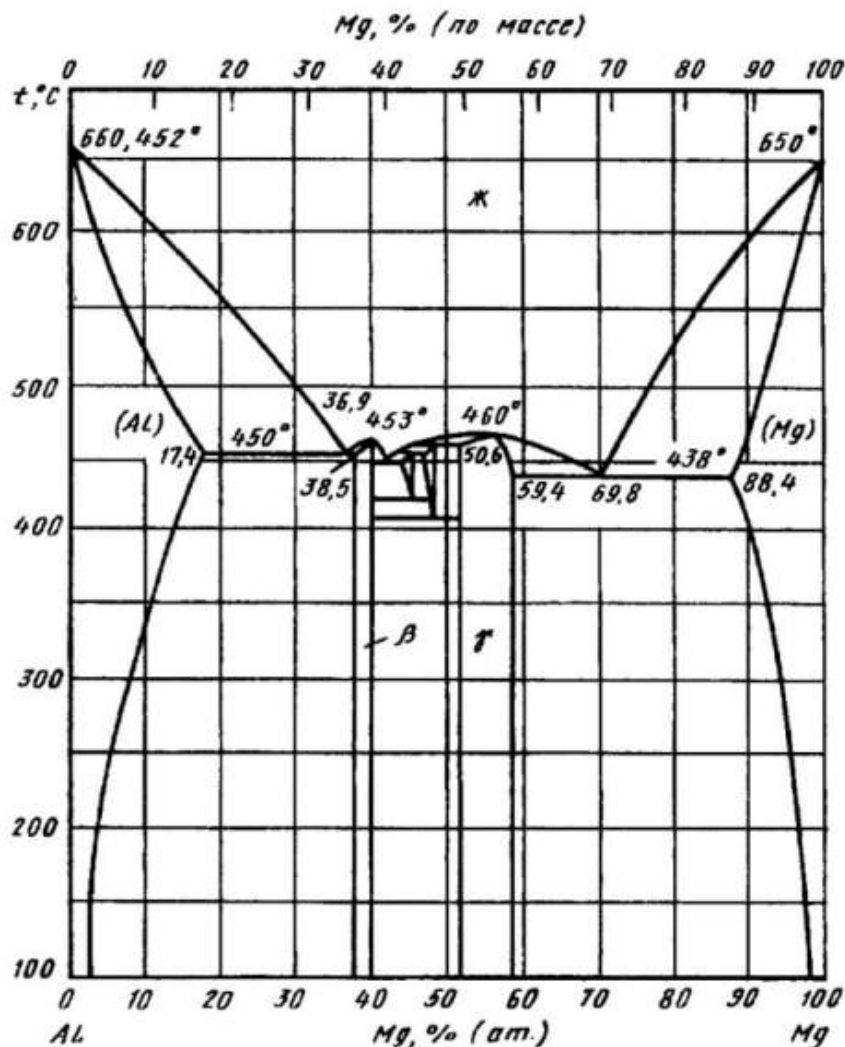


Рисунок 1.2 – Діаграма стану Al – Mg [17]

1.6 Дюралюміни (Al – Cu – Mg, Al – Cu – Mn)

Дюралюміни (дюралюміні) є сплавами алюмінію з міддю, додатково легованими манганом та магнієм. Промислові сплави поділяють на групи:

Д1 – класичний дуралюмін ((3,5 – 4,5) % Cu; (0,4 – 1,0) % Mn; (0,4 – 0,8) % вміст Mg);

Д16 – дуралюмін підвищеної міцності (має підвищений до (1,2 – 1,8) % вміст Mg);

Д19, ВАД1, ВД17 – дуралюміни підвищеної жароміцності (мають збільшене, порівняно з Д1, співвідношення Mg/Cu);

Д18, В65 – дуралюміни підвищеної пластичності (зі зниженим вмістом легувальних елементів) [19].

Цифри в марках сплавів вказують на умовний номер за стандартом. Для збільшення корозійної стійкості дуралюмінів застосовують плакування технічним алюмінієм (99,5 %). Недоліком плакованих листів є низький опір втомі. Іншим способом збільшення корозійної стійкості є електрохімічне оксидування (анодування). Цей процес передбачає витримку напівфабрикатів в сірчаній кислоті, що призводить до утворення щільної плівки Al_2O_3 , що має більшу товщину, ніж звичайно. Дюралюміни широко застосовуються в авіабудуванні через їх високу питому міцність [18, 19].

Сплави системи Al – Cu – Mg (рис. 1.3), додатково леговані залізом та нікелем, відносяться до жароміцних. Один з таких сплавів маркується як АК4 – 1 (1140) і містить (1,9 – 2,7) % Cu, (1,2 – 1,8) % Mg, (0,8 – 1,4) % Fe, (0,8 – 1,4) % Ni. Цей сплав зміцнюється гартуванням при температурі $(530 \pm 5) ^\circ C$ та охолодженні у воді, а також старінням при температурі $((190 - 200) ^\circ C$ протягом 12 – 24 годин). Сплав АК4 – 1 застосовується для виготовлення поковок та штамповок деталей, які експлуатуються при температурі до $(250...300) ^\circ C$ (наприклад, поршні авіадвигунів, обшивка та силовий каркас надзвукових літаків). Недоліком цього матеріалу є низька корозійна

стійкість, тому для захисту листів їх плакують, а напівфабрикати піддають анодуванню [18, 19].

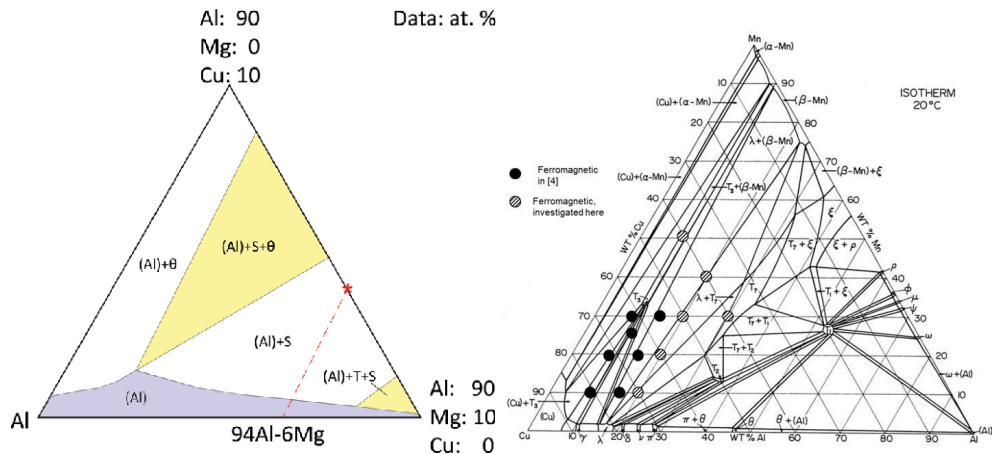


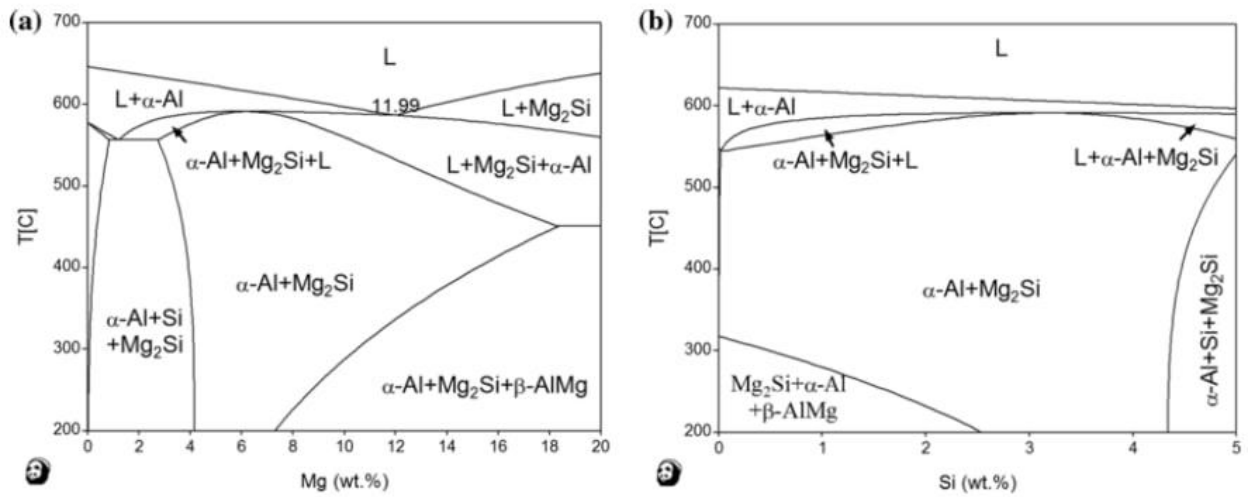
Рисунок 1.3 – Діаграма стану Al – Cu – Mg та Al – Cu – Mn [18, 19]

1.7 Авіалі (сплави системи Al – Mg – Si)

Характерною особливістю цих сплавів є висока пластичність, корозійна стійкість. За міцністю авіалі поступаються дуралюмінам. Сумарний вміст легуючих елементів в авіалях знаходиться на рівні (1 – 2) %. Маркують авіалі: АВ ((0,45 – 0,90) % Mg), АД31 ((0,45 – 0,90) % Mg), АД33 ((0,8 – 1,2) %Mg), АД35 ((0,6 – 1,2) %Mg). Додатково до складу авіалей можуть входити мідь (0,5 %), манган та хром. Термічна обробка авіалей складається з гартування від температури (500 – 520) °С та природного або штучного старіння ((160 – 170) °С протягом (12 – 15) годин). Найбільша міцність відповідає природному старінню (тривалість процесу – до двох тижнів).

На рис.1.4 наведено розраховані фазові діаграми рівноваги сплавів Al–Mg–Si

Використовують авіалі для виготовлення лопатей повітряних гвинтів вертольотів, після анодування – для виготовлення корпусів годинників, декоративних елементів оздоблення автомобілів [20].



а – сплав Al–xMg–2,4Si; б – сплав Al – 7,5Mg–xSi

Рисунок 1.4 – Розраховані фазові діаграми рівноваги сплавів Al–Mg–Si [20]

1.8 Методи одержання сплавів і вплив технології отримання на структуру і властивостей

В медицині широко використовуються сплави на основі кобальту, основними перевагами яких є висока біотолерантність та стійкість до корозії в імітованих біологічних середовищах. Однак ці характеристики безпосередньо залежать від хімічного та фазового складу сплаву. Для забезпечення точного хімічного та фазового складу важливо вибрати відповідні методи виробництва разом із параметрами термічної обробки.

Адитивні технології - це методи виробництва, які дозволяють отримувати якісну продукцію за короткий час та з мінімальними витратами. 3D-друк знайшов широке застосування у багатьох галузях, включаючи будівництво, авто- та авіабудівництво, текстильну промисловість, освіту, ювелірну справу і навіть кулінарію. Ці технології також використовуються в медицині, де вони допомагають покращити якість і ефективність медичного обслуговування. 3D-друк дозволяє створювати об'єкти з високою точністю, враховуючи індивідуальні особливості кожного пацієнта.

1) SLM-технологія: в останні роки для виготовлення сплавів на основі Co-Cr-Mo активно використовується селективне лазерне плавлення (SLM).

Попередні дослідження показали, що сплав на основі Co-Cr-Mo, виготовлений методом СЛМ, має вищу межу текучості, межу міцності на розрив, відносно подовження та твердість, ніж традиційні литі зразки, завдяки дрібнокристалічному та другофазному зміцненню [26-28].

Процес виготовлення SLM має швидку швидкість охолодження і високий температурний градієнт, що забезпечує відносно невеликі зерна і рівномірний розподіл фаз [29, 30]. Однак литий сплав на основі Co-Cr-Mo зазвичай має неоднорідну структуру з великими острівцевими осадами, агрегованими в зернах, що серйозно погіршує механічні властивості.

Дійсно, мікроструктура сплаву на основі Co-Cr-Mo визначає механічні властивості, а також впливає на корозійну поведінку [32, 33]. Корозійна стійкість є критично важливою для біомедичних сплавів, яка не тільки впливає на вивільнення іонів металів, але також пов'язана зі стабільністю структури біомедичних деталей. Насправді, вивільнення іонів металу може погіршити біосумісність і викликати серйозні порушення метаболізму в тканинах [32]. У дослідженні М. Могі та ін. показали, що додавання вуглецю в литі сплави Co-Cr-Mo призводить до зниження корозійної стійкості та збільшення кількості розчинення іонів металів Co та Cr під час випробування на статичне занурення [33]. Елеонора Беттіні (Eleonora Bettini) та ін. показали, що прилегла область осадової фази є переважним місцем для корозії в литих сплавах Co-Cr-Mo [33, 35].

Це пояснюється тим, що осадова фаза (в їхньому дослідженні - карбідний осад) має більш благородний потенціал порівняно з прилеглою областю осадової фази [33, 35]. С. V. Vidal та ін. показали, що вуглецевий осад виснажує вміст Cr в металевій матриці, що зменшує доступність Cr для формування інертної оксидної плівки і ще більше знижує корозійну стійкість [36]. М. Jenko зі співавторами також стверджують, що карбіди та інші включення можуть бути можливим місцем ініціації корозії для литих і кованих сплавів Co-Cr-Mo [37].

Хоча вплив мікроструктури на корозійну поведінку литих і кованих сплавів на основі Co-Cr-Mo досліджували і досягли певних результатів, знання про вплив мікроструктури на корозійну поведінку сплавів на основі Co-Cr-Mo, отриманих методом SLM, все ще обмежені.

Зокрема, вплив преципітатів на корозійну поведінку сплаву Co-Cr-Mo на основі SLM, який має іншу структуру порівняно з литими зразками, є недостатньо вивченим. Крім того, для досягнення тривалого та безпечного терміну служби біомедичного сплаву на основі Co-Cr-Mo, виготовленого методом SLM, вплив мікроструктури на корозійну поведінку потребує кращого розуміння та уточнення.

2) LPBF-технологія: сплави кобальт-хром-молібден (КХМ) знайшли широке застосування в стоматології та ортопедії, наприклад, для виготовлення зубних коронок і протезів колінних суглобів. Таке широке використання можна пояснити їхніми чудовими комплексними властивостями, що охоплюють міцність, зносостійкість, корозійну стійкість і біосумісність [21-23]. Сплави з ГЦК зазвичай мають двофазну структуру, що складається з гексагональної щільноупакованої фази (ϵ -ГЦК фаза), яка являє собою твердий і крихкий продукт мартенситного перетворення [24], і гранецентрованої кубічної фази (γ -ГЦК фаза), яка слугує м'якою матрицею [25]. Таким чином, регулювання формування цих двох фаз, особливо з точки зору об'ємної частки та морфології, є ключовим для досягнення оптимальних механічних властивостей [26]. У литому стані сплави для МБЛЗ часто мають надмірну частку ϵ -фази внаслідок низької швидкості охолодження [27].

Для вирішення цієї проблеми необхідна посттермічна обробка або легування для збільшення частки γ -фази. Однак, хоча термомеханічний шлях часто є складним і енергоємним, наприклад, одновісне гаряче стиснення, використане в роботі [28], доступне легування по всій таблиці Менделєєва не дозволяє збільшити частку γ -фази. [28], кількість доступних легуючих елементів (наприклад, N) в таблиці Менделєєва є досить обмеженою з огляду на біотоксичність елементів [29, 30]. У світлі цих проблем адитивне

виробництво (АМ) є життєздатною альтернативою для виробництва сплавів для МНЛЗ з високою часткою γ -фази. Надвисока швидкість охолодження до ($10^5 - 10^6$) К/с, пов'язана з АМ, допомагає придушити динаміку мартенситного перетворення [32, 33]. Наприклад, Кадзіма та ін. [35] успішно приготували чистий γ -фазний ККМ-сплав з використанням LPBF, хоча отримане в результаті поєднання границі текучості та пластичності (837 МПа-12,3 %) не було особливо вражаючим. Аналогічно, в іншому сплаві Co-Cr-Mo-W, виготовленому методом ЛПБД, загальна пластичність різко покращилася порівняно з литим аналогом (24,5 % проти 3,4 %) завдяки значному зменшенню частки ϵ [36].

Крім того, зразки LPBF часто мають високі залишкові напруження, успадковані від історії швидкого нагрівання-охолодження [34, 36], які негативно впливають на механічні властивості і впливають на поведінку мартенситного переходу, викликаного напруженням (SIMT), у сплавах для МБЛЗ [37, 38].

Вторинні осадки також були введені для покращення механічних характеристик сплавів для МБЛЗ, включаючи інтерметалічні сполуки, карбіди та нітриди [39, 40]. На жаль, ці осадки за своєю природою крихкі і мають тенденцію до швидкого огрубіння вздовж внутрішніх інтерфейсів, таких як границі зерен. Неоднорідна конфігурація цих інтерфейсів призводить до неоднорідного розподілу осадків, що призводить до порушення балансу між міцністю та пластичністю [41, 42]. Нещодавні дослідження були зосереджені на модулюванні процесу осадження шляхом легування та термомеханічної обробки, але ефект все ще далекий від задовільного [43]. У світлі важливої мікроструктурної особливості, індукованої АМ, а саме нанорозмірних комірок, що слугують щільними і майже однорідними місцями зародження осаду, ми можемо реалізувати кращий контроль осадження в цих сплавах ККМ. Наприклад, Ye et al. провели термічну обробку сплаву AM-ed Co₃₀Cr₆Mo і спостерігали тонку дисперсію частинок у матриці, що призвело до чудових комплексних механічних властивостей

порівняно з литим аналогом [44]. Однак досі існують суперечки щодо того, чи можна по-справжньому оптимізувати процес осадження. Наприклад, Сантеккіа та ін. виявили, що термічна обробка сплаву LPBF Co-Cr-Mo-W призводить до швидкого огрубіння та подовження осадів, що значно погіршує характеристики пластичності [45].

На основі вищезазначених спостережень можна зробити висновок, що механічні характеристики сплавів для МБЛЗ, виготовлених методом АМ, варіюються від випадку до випадку, що свідчить про те, що застосування технології АМ до сімейства сплавів для МБЛЗ все ще перебуває на ранній стадії. Можливі причини:

1) недостатня інтеграція унікальної комірчастої субструктури, індукованої процесом LPBF, і надзвичайно низька енергія дефекту укладання (SFE) сплавів з МБЛЗ при проектуванні сплавів;

2) відсутність всебічного розуміння і використання взаємозв'язку між мікроструктурними особливостями ЛПДП і подальшим осадженням, що призводить до невловимого контролю над поведінкою осаду для покращення механічних характеристик.

3) електронно-променева плавка: одним з провідних у галузі процесів адитивного виробництва металів є електронно-променева плавка (ЕПМ). Процес ЕПМ - це процес адитивного виробництва, в якому використовується скануючий електронний промінь для пошарового розплавлення попередньо легованого металевого порошку і створення тривимірної конструкції на основі даних, отриманих з комп'ютерної моделі.

Процес ЕПМ значно відрізняється від звичайних методів виробництва, тому очікується, що властивості і дзеркальна структура матеріалів, виготовлених за допомогою ЕПМ, відрізнятимуться від того, що ми бачимо сьогодні.

Як і багато інших методів швидкого виробництва, процес ЕПМ створює фізичний компонент з цифрової САД-моделі, створюючи його в декілька шарів. Процес ЕПМ починається з нанесення шару

дрібнодисперсного металевго порошку товщиною 70 мкм на сталеву платформу. Електронний промінь електронний промінь створюється шляхом пропускання струму через вольфрамову нитку. Електронний промінь сканує ділянки шару металевго порошку в системі координат x-y (як визначено комп'ютерною моделлю), повністю розплавляючи порошок у відсканованих ділянках. Після того, як промінь просканує відповідні ділянки, сталева платформа опускається на 70 мкм і новий шар порошку розподіляється поверх попередньо розплавленого шару. Цей процес триває, шар за шаром, поки не буде виготовлена повна деталь. Під час обробки у всій камері підтримується температура близько 800 °С. Після того, як деталь завершена, камера заповнюється газом для прискорення охолодження. Схема процесу ЕПМ показана на рисунку 1.5.

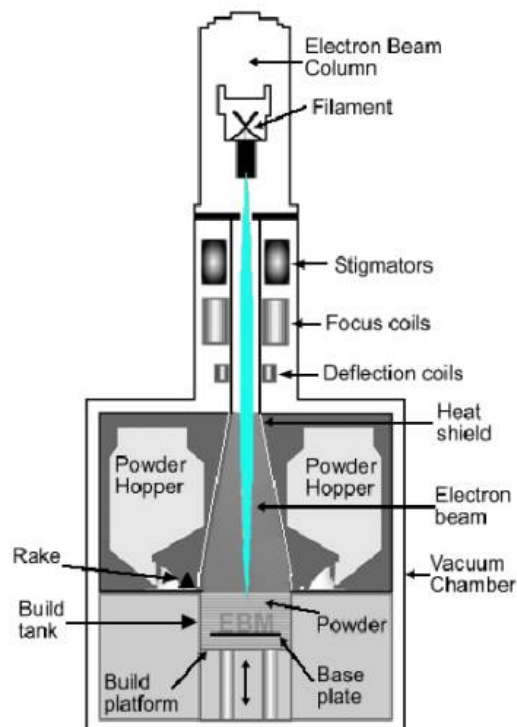


Рисунок 1.5 – Схема процесу вирощування деталі за технологією ЕПМ [46]

Використання електронного променя для постачання енергії, необхідної для розплавлення металевго порошку вимагає, щоб процес

відбувався у вакуумній камері, яка мінімізує хімічні реакції між металевим порошком, що плавиться, і навколишньою атмосферою. В даний час процес ЕВМ дозволяє виготовляти деталі розміром до (200×200×200) мм з точністю до 0,4 мм.

Основні переваги технології ЕПМ:

- висока точність, яка досягається за допомогою магнітних дзеркал, які коректують траєкторію електронного пучка.
- реалізація надзвичайно складної геометрії та пов'язаних структур прямо з файлу CAD 3D;
- механічні властивості порошкових структур, отриманих даною технологією знаходяться на рівні литих;
- відсутній ефект усадки і внутрішніх напружень виробу;
- можливість виготовлення декількох виробів одночасно;
- не потребується додаткова термічна обробка.

4) селективне лазерне спікання: більш правильна назва цієї методики - вибіркоче лазерне спікання (від англ. Selective Laser Sintering, SLS). Це одна з методик 3D друку, широко застосовувана в промисловості. Селективне лазерне спікання є виключно на дорогих професійних 3d-принтерах і відрізняється високою якістю виробів. З допомогою SLS можна досягти результату, наближеного до відтворення виробів методом лиття під тиском.

Селективне лазерне спікання, як і багато інших промислових методики адитивного виробництва використовує в якості матеріалу порошки та порошкові суміші. Ця методика дозволяє створювати повністю металеві об'єкти за лічені години. А можливість виготовлення виробів складної форми пояснює її популярність серед промислових організацій з усього світу .

Основною вимогою, як і в будь-якій іншій технології 3D друку, є наявність готової 3D моделі, що відповідає визначеним вимогам. Саме по ній і буде відтворюватися виріб. Сама технологія досить проста. Спеціальне відділення 3D принтера заповнюється витратним матеріалом, після чого

запускається друк. Цікаво, що безпосередньо перед відтворенням порошок розігрівається практично до температури плавлення.

За допомогою лазерної установки і скануючого дзеркала промінь лазера направляється на необхідні ділянки порошку, спікає їх разом шар за шаром. Після спікання першого шару дорівнювала механізм додає тонкий шар порошку поверх нього, і процес відбувається заново до повної побудови об'єкта. Тобто, відтворення об'єкта відбувається знизу-вгору, а за рахунок заповнення камери порошком не потрібні додаткові підтримки. На рисунку 1.6 наочно продемонстровано пристрій SLS 3D принтера для кращого розуміння принципу.

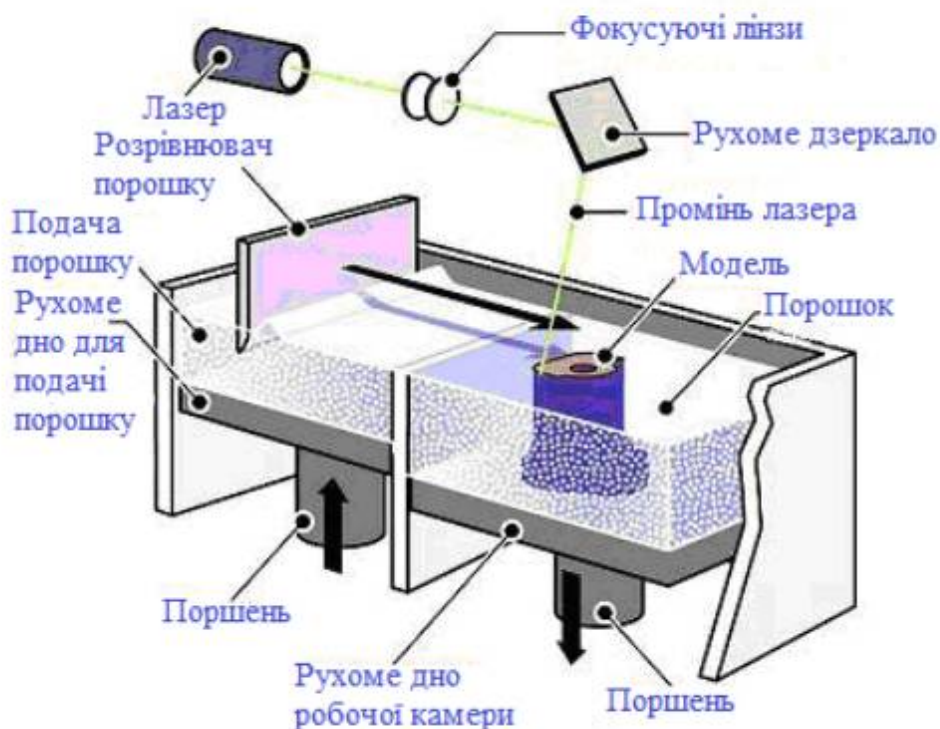


Рисунок 1.6 – Схема 3D принтера, що працює на основі технології SLS [47]

Селективне лазерне спікання не може похвалитися великою різноманітністю кольорових витратних матеріалів, як, наприклад, FDM або SLA. Однак це не означає, що вибір обмежений. Справа в тому, що SLS друк орієнтована на промислові цілі, за рахунок чого і матеріали виробляються

відповідні. На сьогоднішній день є безліч видів різноманітних порошкових сумішей, серед яких нейлон, кераміка, полістирол, і т.д.

Що стосується особливостей, слід відразу відокремити селективне лазерне спікання від іншої схожої технології 3D друку - селективного лазерного плавлення (SLM). Різниця між ними в тому, що SLS забезпечує лише часткове плавлення порошку, необхідне лише для його об'єднання в єдиний елемент. SLM плавить частки повністю, спікаючи порошок в монолітний виріб. Що стосується переваг, виділити можна наступні плюси:

а) промислове обладнання для SLS 3D друку зазвичай обладнано великої областю побудови, що дозволяє створювати не тільки великі деталі, але і виконувати дрібносерійне виробництво;

б) ця методика дозволяє практично повністю уникнути видимості шарів на моделі, а відсутність підтримок також благотворно позначається на якості виробів;

в) селективне лазерне спікання дозволяє створювати вироби складної геометрії без необхідності побудови підтримують структур. Це не тільки розширює можливості друку, але і добре позначається на якості поверхні виробу;

г) за рахунок того, що матеріал не плавиться повністю, SLS 3D принтери працюють набагато швидше за інших своїх порошкових побратимів. Вище швидкість друку - вища продуктивність виробництва;

д) завдяки властивостям витратних матеріалів цю технології 3D друку цілком реально використовувати для виробництва кінцевих продуктів.

5) SLA-технологія: SLA технологія (Stereolithography) – стереолітографія (рис. 1.7), принцип роботи цієї технології полягає у впливі лазера, ультрафіолетового або інфрачервоного опромінення на фотополімер (фоточутливу рідину). В результаті цього рідина перетворюється на досить твердий пластик.

Зверху в полімер занурюється платформа, далі промінь проходить по шару рідини під платформою, що призводить до затвердіння і прилипання

його до платформи, таким чином відбувається створення одного шару. В результаті повторення такої процедури безліч разів утворюється необхідний макет.

До основних переваг такого друку відноситься:

- точність;
- швидкість друку;
- мінімальний відсоток виникнення технічних неполадок, таких як перегрів, відшаровування, збій роботи головки, відлипання, відшаровування кутів.

До недоліків відносяться:

- висока вартість;
- невелика кольорова палітра;
- невисока фізична міцність готового виробу.

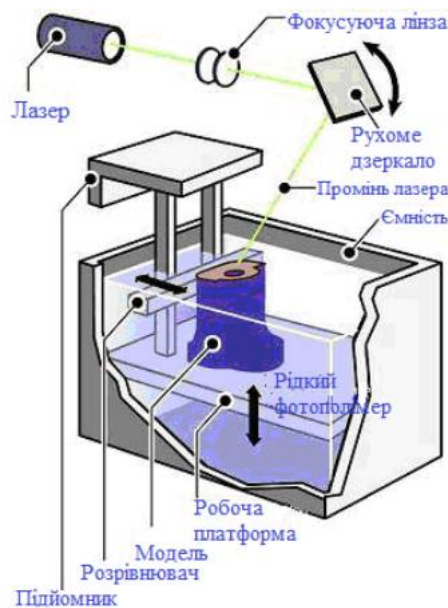


Рисунок 1.7 – Схема 3D принтера, що працює на основі технології SLA[48]

1.9 Висновки до розділу 1

Алюміній та його сплави є ключовими матеріалами у різних галузях промисловості. Основними перевагами алюмінієвих сплавів є їх низька

щільність, висока міцність, стійкість до корозії, доступність та легкість обробки. Ці матеріали широко використовуються в авіаційній, суднобудівній, автомобільній та інших галузях промисловості, а також у виробництві споживчих товарів. Класифікація сплавів алюмінію включає різні типи, такі як АМц, АМг, дюралюміні, авіалі, ковкі сплави та високоміцні сплави, кожен з яких має унікальні властивості та застосування, що робить їх популярними у відповідних галузях промисловості. Таким чином, аналіз літературних джерел підтвердив важливість алюмінію та його сплавів у сучасній авіаційній промисловості.

2 МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Об'єкт дослідження

Зразки алюмінієвого сплаву $AlSi_{10}Mg$ у вигляді паралелепіпеду розмірами $(20 \times 10 \times 5)$ мм та густиною $2,66 \text{ г/см}^3$ отримані за технологією СЛП на 3D-принтері Alfa-150D компанії ТОВ «АЛТ України» (Адитивні лазерні технології України). Принципова схема 3D-друку та технічні характеристики використаного 3D-принтера наведені в [49]. Як вихідний матеріал використовувався сферичний порошок сплаву $AlSi_{10}Mg$ з розмірами частинок в діапазоні $(20 - 63)$ мкм. Пристрій Alfa-150D з розміром робочого поля $(150 \times 150 \times 180)$ 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. У таблиці 2.1 можна дізнатися хімічний склад досліджуваного зразка.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сплаву $AlSi_{10}Mg$ [49]

$Si \leq 9\% - 11\%$	$O \leq 0,1\%$
$Fe \leq 0,55\%$	$Zn \leq 0,1\%$
$Mn \leq 0,45\%$	$N \leq 0,05\%$
$Mg 0,2\% - 0,45\%$	$Ni \leq 0,05\%$
$Ti \leq 0,15\%$	$Cu \leq 0,05\%$
$Pb + Sn \leq 0,1\%$	Al основа

На таблиці 2.2 представлено фізико-механічні властивості, які були визначені після 3D друку.

Таблиця 2.2 – Фізико-механічні властивості сплаву AlSi₁₀Mg [49]

	Горизонтальний напрямок ХУ	Вертикальний напрямок Z
Межа міцності, МПа	325-350	330-360
Межа плинності, МПа	210-245	175-225
Модуль Юнга, ГПа	67-77	62-72
Подовження, %	9-14	5-12
Твердість, НВW	114-124	
Густина, г/см ³	2,66	

Фізико-механічні властивості матеріалу деталей, вироблених за допомогою технології селективного лазерного плавлення, в значній мірі залежать від умов їх подальшої обробки. Зазначені властивості наведені для виробів безпосередньо після завершення процесу 3D-друку і є довідковими.

2.2 Методика вимірювання мікротвердості за Віккерсом та визначення мікромеханічних характеристик

Для визначення мікротвердості за методом Віккерса з навантаженням від 10 г до 1000 г використано мікротвердомір LHVS-1000Z. Загальний вигляд мікротвердоміру наведений на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Мікротвердомір LHVS-1000Z [50]

Мікротвердомір LHV5-1000Z забезпечує можливість вимірювання мікротвердості за методом Віккерса з навантаженням від 10 г до 1000 г, оснащений багатофункціональним кольоровим 7-дюймовим сенсорним екраном, має можливість автоматичного обчислення та введення розмірів D1 та D2, має функцію перетворення шкали твердості: Rockwell, Brinell, Кноор і функцію автоматичної турелі, також мікротвердомір оснащений вбудованим принтером та USB портом для виведення даних.

Величину мікротвердості визначено за формулою:

$$H_{\mu} = 1,82 \cdot 10^7 \frac{p}{d^2}, [H/M^2] \quad (2.1)$$

де P – використане навантаження,
 d – діаметр відбитка.

За величиною мікротвердості H_{μ} , при навантаженні 100 г, з урахуванням табличних значень коефіцієнту Пуассона ($\mu = 0,33$) та модулю Юнга ($E = 70$ ГПа) розраховано межу плинності $\sigma_{0,2}$ (2.2) [51], характеристику пластичності за Ю.В. Мільманом δ_H (2.3), межу міцності σ_s (2.4) [52, 53], пружну деформацію ε_e (2.5) та пластичну деформацію ε_p [54] (2.7):

$$0,33H_{\mu} \approx \sigma_{0,2}, \text{ ГПа} \quad (2.2)$$

$$\delta_H = 1 - 14,3 \cdot (1 - \nu - 2\nu^2)H_{\mu}/E, \quad (2.3)$$

$$\sigma_s = H_{\mu}/(0,28 + 0,6 \ln \ln \left[\frac{3E}{4+\nu\sigma_{0,2}} \right]), \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_e = -1,08 \cdot (1 - \nu - 2 \cdot \nu^2) \cdot \frac{H_{\mu}}{E}. \quad (2.5)$$

Для індентора Віккерса кут при вершині піраміди становить $\gamma_1 = 68^\circ$

(HM – твердість за Меєром), тому пластична деформація ε_p за даними індентування становитиме:

$$H\mu = HM \cdot \sin\gamma_1, \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_p = -\ln \sqrt{1 + (\operatorname{ctg}\gamma_1 - 1,77 \cdot \frac{HM}{E})^2}. \quad (2.7)$$

2.3 Оптична металографія

Дослідження мікроструктури проведено за допомогою металографічного тринокулярного мікроскопу iScore IS.1053-PLMi (рис. 2.2) зі збільшенням $\times 50$, $\times 100$, $\times 200$ та $\times 500$ крат. Для цього поліровані зразки сплаву AlSi10Mg проявляли травником реагентом Келлера – водним розчином 0,5 % HF, 2,5 % HNO₃, 1,5 % HCl.



Рисунок 2.2 – Металографічний тринокулярний мікроскоп iScore IS.1053-PLMi [55]

Мікроскоп оснащений окулярами EWF 10x / 20 мм, план PLMi 5/10/20 / 50x M-IOС цілі, 150 x 140 мм столик. Відображена підсвітка з поляризатором (0-90)°. 3 Вт Підсвічування NeoLED™. Тринокулярний варіант із нахиленими трубками Siedentopf 30°. Між зінична відстань 48 мм – 76 мм з регулювання діоптрії на обох окулярах. П'ятипозиційний тримач об'єктів. План PLMi 5x / 0,12, 10x / 0,25, 20x / 0,40 та 50x / 0,70 IOS. Конденсор Abbe N.A. 1,25 з регулюванням висоти з отвором для додаткових повзунків.

Коаксіальне грубе і точне регулювання з позиційним градуюванням. Точність 1 мкм, 0,2 мм на обертання. Загальний хід приблизно 24 мм. В комплекті камера HD-Lite, кольорова Камера високої чіткості HD 5 МП, високошвидкісна 1080p, 24-бітний колір візуалізація, стандартна карта SD, вихід HDMI і USB-2 із вбудованим програмним забезпеченням захоплення. Може бути використовуватися окремо або з комп'ютером і постачається з програмним забезпеченням ImageFocus 4. Поставляється з об'єктивом 0,45x.

2.4 Рентгеноструктурний фазовий аналіз

У даній роботі проведено дослідження фазового стану зразків сплаву $AlSi_{10}Mg$ з використанням рентгенівського дифрактометра Rigaku Ultima IV (рис. 2.3).



Рисунок 2.3 - Рентгенівський дифрактометр Rigaku Ultima-IV [56]

Рентгеноструктурний фазовий аналіз – метод, суть якого полягає в аналізі рентгенівського випромінювання, яке зазнає дифракції на кристалічній ґратці досліджуваного зразка.

Розподіл інтенсивності дифрагованого кристалом рентгенівського випромінювання в оберненому просторі визначається структурою кристала. Встановлення кристалічної будови речовини передбачає вимірювання інтенсивності дифракційних максимумів, врахувавши всі можливі чинники, що впливають на інтенсивність розсіяння [57]. Інтерференційний максимум відбитих хвиль спостерігатиметься за умови:

$$2d\sin(\theta) = n\lambda, \quad (2.8)$$

де d – міжплощинна відстань;

λ – довжина хвилі рентгенівських променів;

θ – кут дифрагованих рентгенівських променів;

n – ціле число.

З формули (2.8) випливає, що за відомої довжини хвилі випромінювання можна обчислити міжплощинну відстань:

$$d = \frac{n\lambda}{2\sin(\theta)}, \quad (2.9)$$

Для отримання зображень використано схему фокусування за Брегом – Брентано. Зразок розташовувався горизонтально під час проведення структурних досліджень та обертався навколо своєї осі під час зйомки.

Дослідження проведено у випромінюванні $\text{CuK}\alpha$ з довжиною хвилі $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$. Умови проведення досліджень: інтервал кутів $2\theta = 20^\circ - 120^\circ$, крок зйомки – $0,04^\circ$, час витримки в точці – 2 с; тривалість зйомки одного зразка – 90 хв. Для аналізу отриманих рентгенівських спектрів, розрахунку розміру областей когерентного розсіяння (ОКР), ступеню деформації кристалічної ґратки (ε) та кількісного фазового аналізу використано

програмне забезпечення PDXL, міжнародну базу даних дифракції ICDD (PDF-2 (2024)) та відкриту базу кристалографічних даних COD.

2.5 Рентгенографічний аналіз напружень 1-го роду

Отримані рентгенівські спектри були проаналізовані, а кількісний та якісний фазовий аналіз було проведено за допомогою програми PDXL та міжнародних баз даних дифракції, таких як ICDD (PDF-2), і 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 алюмінію (420) та значень кутів $\psi = 0^\circ, -10^\circ, -20^\circ, -30^\circ, -40^\circ$. Крок реєстрації – $0,02^\circ$, час витримки в точці – 2 с.

Отримані спектри були оброблені за допомогою програмного забезпечення Rigaku Residual Stress Analysis. Для згладжування профілів дифракційних максимумів використовувалася функція Savitzky-Golay, а для відокремлення фону застосовувалася функція Sonneveld-Vissers. Визначення кутового положення дифракційних максимумів проводилося на основі значень положення центру ваги. Для розрахунку величини макроскопічних напружень використано табличні значення модулю Юнга ($E = 70$ ГПа) та коефіцієнту Пуассона ($\mu = 0,33$) для алюмінію та значення параметру кристалічної ґратки розраховані при проведенні рентгеноструктурних досліджень даних зразків.

2.6 Скануюча електронна мікроскопія та мікрорентгеноспектральний аналіз

Скануюча електронна мікроскопія (SEM) – це метод дослідження мікроструктури та хімічного складу поверхні твердих тіл. Вона базується на

взаємодії сфокусованого електронного променя зі зразком, що досліджується, і дозволяє значно підвищити роздільну здатність зображення порівняно зі світловою мікроскопією. Для отримання зображень топографії поверхні об'єктів використовуються вторинні або відбиті електрони.

У даній роботі для дослідження мікроструктури та хімічного складу поверхні зразків був використаний растровий електронний мікроскоп Tescan Vega3 з енергодисперсійним аналізатором (ЕДАР), зображений на рисунку 2.4.

Під час фотографування поверхні зразків прискорювальна напруга складала 30 кВ, і зображення структури були зроблені при збільшеннях 1000, 3500 і 5000 разів. Основні характеристики включають такі:

- джерело електронів: вольфрамовий термокатод;
- діапазон прискорювальної напруги: від 0 до 30 кВ;
- доступні детектори: SE (вторинні електрони), BSE (відбиті електрони), EDS (спектроскопія розсіяного рентгенівського випромінювання) з можливістю картографування;
- тип детектора EDS: здвиговий кремнієвий безазотний детектор;
- роздільна здатність: 3 нм (у режимі SE);
- можливість дослідження діелектриків шляхом їх запилення провідниковим шаром;
- максимальні розміри зразків: (10×10×10) мм; (50×50×50) мм.

Головними перевагами растрової електронної мікроскопії є можливість спостереження мікроструктури поверхні як масивних зразків, так і тонких плівок без попередньої підготовки, висока інформативність та можливість отримання зображень у вторинних електронах з високим збільшенням. Растрова електронна мікроскопія дозволяє спостерігати поверхню зразка з дуже високою роздільною здатністю до 3,0 нм та отримувати зображення з корисним збільшенням до 250000, а також досліджувати структуру та топографію поверхні при пошаровому травленні

[58].



Рисунок 2.4 – Растровий електронний мікроскоп Tescan Vega3

Система енергодисперсійного рентгенівського мікроаналізу призначена для швидкого аналізу хімічного складу поверхні твердого тіла в мікрооб'ємах з мікронним розділенням. Вона використовує метод реєстрації енергії та інтенсивності характеристичного випромінювання, яке виникає під час опроміненні зразка сфокусованим електронним променем. Спектрометр енергій рентгенівського випромінювання цієї системи охоплює діапазон від 1 до 40 еВ. Використовуючи цей спектрометр, здійснюється кількісний елементний аналіз як на поверхні зразків після ультразвукової обробки, так і вглиб модифікованого шару. Також будуються графіки розподілу концентрацій елементів вздовж обраної лінії в напрямку від поверхні до об'єму.

2.7 Висновки до розділу 2

В даному розділі представлені обрані методи дослідження, які використані для вивчення анізотропії властивостей алюмінієвого $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ сплаву, виготовленого за технологією селективного лазерного плавлення.

Аналіз мікроструктури проведено з використанням оптичної та скануючої мікроскопії, що дозволило детально дослідити анізотропію структури сплаву в різних напрямках 3D друку.

Вимірювання мікротвердості за методом Вікерса та розрахунок мікромеханічних характеристик дозволив встановити анізотропію міцності та мікротвердості матеріалу на мікрорівні, що є важливим для визначення його механічної стійкості та витривалості.

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.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Особливості мікроструктури алюмінієвого сплаву $AlSi_{10}Mg$ отриманого за селективним лазерним плавленням

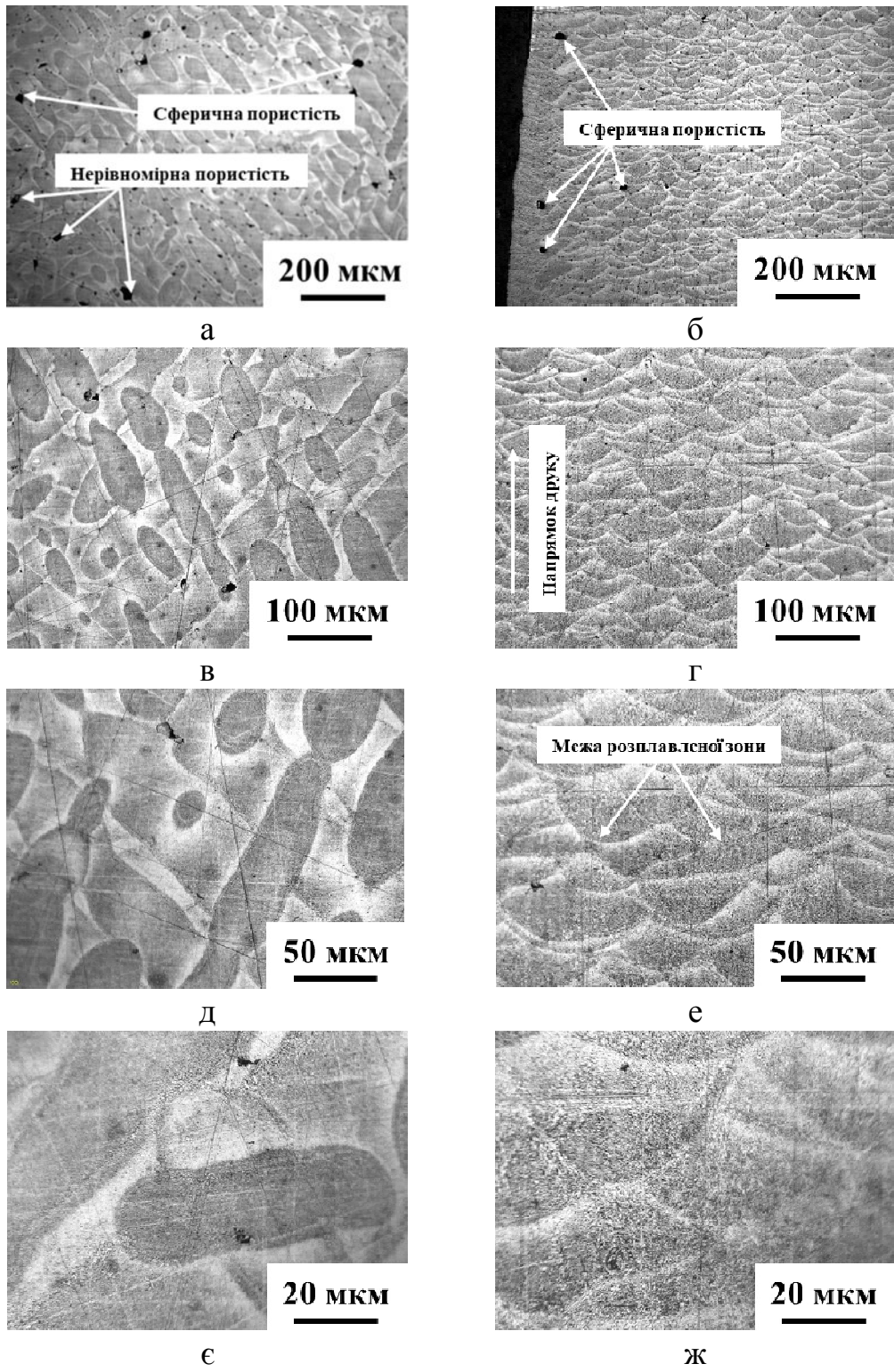
На рис. 3.1 представлена морфологія поверхні зразка сплаву $AlSi_{10}Mg$, отриманого за технологією селективного лазерного плавлення.

Для зразків на горизонтальній поверхні (площина yz) (рис. 3.1, а, в, д, є) та на бічних гранях (площина $xу$) (рис. 3.1, б, г, е, ж) спостерігається типова для СЛП неоднорідна мікроструктура з окремими сегментами [59].

У площині $xу$ сформована мережа басейнів розплаву, які перекриваються. Спостережувана хвиляста морфологія за типом «риб'ячої луски» (fish-scale) [60] пов'язана із послідовним твердінням крапельних басейнів розплаву, що виникають під час процесу лазерного розплавлення порошку. На відміну від цього, у площині yz , формуються доріжки розплаву витягнутої форми, що обумовлюється процесом сканування лазерного променя поверхнею шару порошку [61].

В мікроструктурі сплаву $AlSi_{10}Mg$ присутні стабільні (безперервні треки) та нестабільні (розривні треки та краплі) зони, спостерігаються пори неправильної форми (кристалізаційного походження) та сферичні (газові) пори (рис. 3.1, а, б).

Травлення у розчині Келлера не виявило границь зерен. Усередині треку дендрити стовпчасті та витягнуті у напрямку, зворотному тепловідводу (рис. 3.1, ж).



а, в, д, є – площина уz; б, г, е, ж – площина ху

Рисунок 3.1 – Морфологія поверхні сплаву $AlSi_{10}Mg$ отриманого селективним лазерним плавленням

3.2 Анізотропія мікротвердості та мікромеханічних характеристик алюмінієвого сплаву $AlSi_{10}Mg$ в залежності від напрямку 3D друку

Для оцінки оптимального рівня навантаження для вимірювань мікротвердості сплаву $AlSi_{10}Mg$ в даній роботі виконані попередні випробування за зміни навантаження в інтервалі (10–300) г (рис. 3.2). Оцінювали значення мікротвердості зразка з рівномірною у межах площі вимірювань мікроструктурою (вставка на рис. 3.2). Видно, що мікротвердість в залежності від збільшення навантаження на індентор монотонно зменшення і досягає насичення за навантажень більше 100 г. На підставі одержаних результатів зроблено висновок, що навантаження 100 г на алмазний індентор є найбільш прийнятним для вимірювання мікротвердості досліджуваних зразків сплаву $AlSi_{10}Mg$.

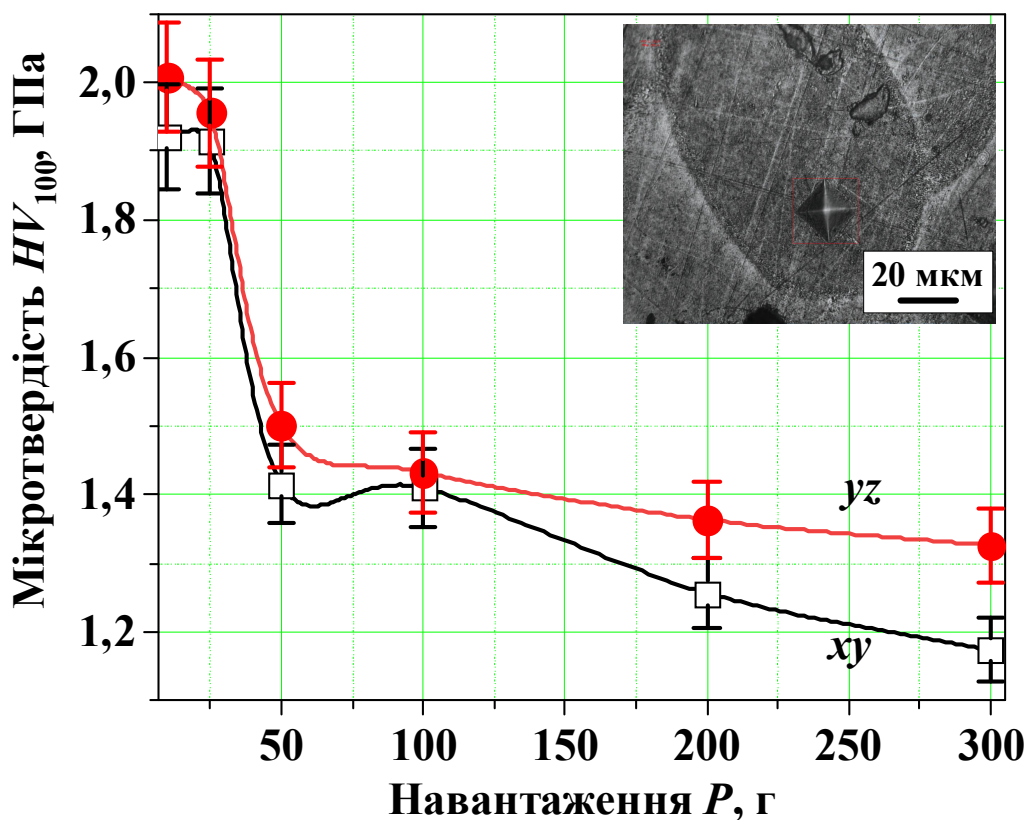


Рисунок 3.2 – Залежність мікротвердості сплаву $AlSi_{10}Mg$ від навантаження на індентор

За результатами вимірювання мікротвердості, при навантаженні на алмазний індентор 100 г, розраховано межу плинності ($\sigma_{0,2}$), межу міцності (σ_S), характеристику пластичності (δ_H), пружну деформацію ϵ_e та пластичну деформацію ϵ_p . Результати розрахунків представлено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Механічні властивості та ступінь деформації поверхні зразка сплаву $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ отриманого селективним лазерним плавленням

Площина	Hv_{100} , ГПа	$\sigma_{0,2}$, ГПа	δ_H	σ_S , ГПа	НМ, ГПа	ϵ_e	ϵ_p
<i>xy</i>	1,41	4,23	0,87	0,81	1,52	-0,010	-0,156
<i>yz</i>	1,43	4,29	0,87	0,82	1,54	-0,010	-0,156

Орієнтаційні залежності зміни мікротвердості 3D-надрукованого зразка сплаву $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ було виміряно на зразку, розрізаному навпіл вздовж вертикальної осі. Виміряні значення мікротвердості проведено на поліровані та протравленій поверхні при навантаженні 100 г.

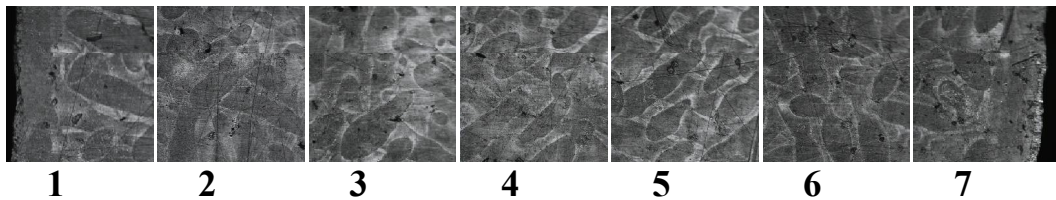
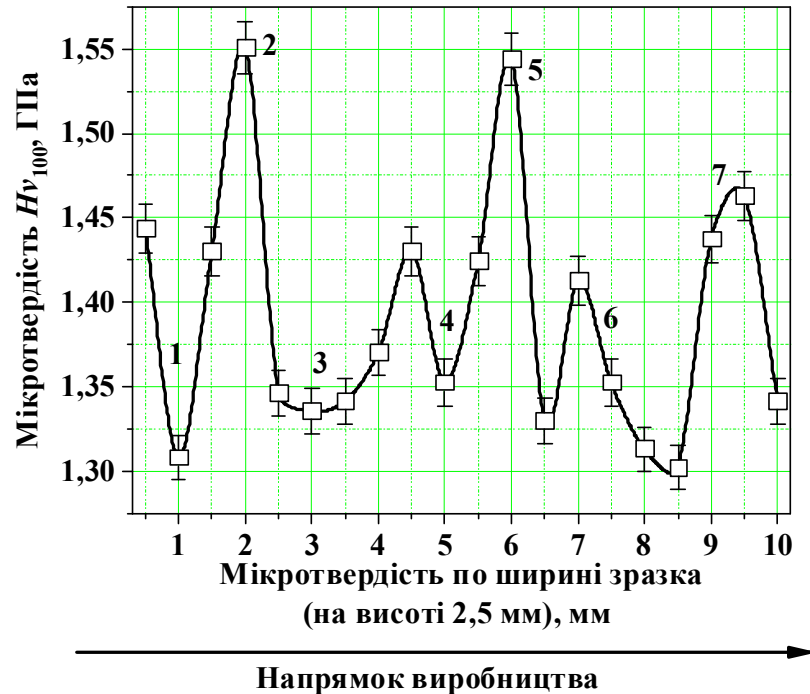
Мікротвердість вимірювали від межі треку на глибині з кроком 50 мкм на всіх площинах сканування ($HV_{0,01}$), а також по всій ширині зразка з кроком (100 –150) мкм у площині сканування *yz* ($HV_{0,01}$).

У процесі селективного лазерного сплавлення при збільшенні товщини виробу градієнт температур у його поверхневої зони зменшується. Вищий градієнт температури нижніх шарах призводить до збільшення дисперсності структури, пересування твердого розчину кремнієм і, ймовірно, вищим значенням залишкових напружень.

При вимірюванні мікротвердості в площині *yz* спостерігається незначний розкид значень мікротвердості в межах від 1,33 ГПа до 1,55 ГПа (рис. 3.3).

Максимальне значення мікротвердості досягається на відстані від 2 мм до 6 мм. Циклічний характер зміни мікротвердості в площині *yz* зразка сплаву $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ пов'язаний із зазначеними вище особливостями

мікроструктури, а також, можливо, з пластичною деформацією та збільшенням щільності дислокацій в окремих зонах з утворенням на них зміцнювальних виділень



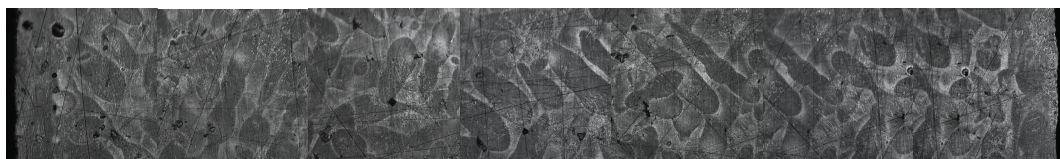
(а) за висотою перерізу зразка сплаву $AlSi_{10}Mg$ та відповідна мікроструктура (б) на рівні перехідної зони між останнім нагрітим шаром і серцевиною 3D-друкованого зразка (площина yz)

Рисунок 3.3 – Розподіл мікротвердості

При вимірюванні мікротвердості в площині yz , але в перпендикулярному до попереднього напрямку вимірювань, спостерігається зовсім інший характер зміни мікротвердості (рис. 3.4). Можна бачити, що мінімальні значення мікротвердості $\sim 1,18$ ГПа спостерігається в області

перших та останніх шарів 3D друку. Максимальне значення мікротвердості досягає 1,45 ГПа в центрі зразка сплаву $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$.

На зображеннях мікроструктури областей в яких проводилося вимірювання мікротвердості за методом Вікерса спостерігається наявність дефектної структури поверхні та основи зразка, виробленого за технологією 3D-друку, що спричинено умовами формування першого та останнього шару матеріалу. Якість поверхневого шару безпосередньо впливає на експлуатаційні властивості готових виробів.

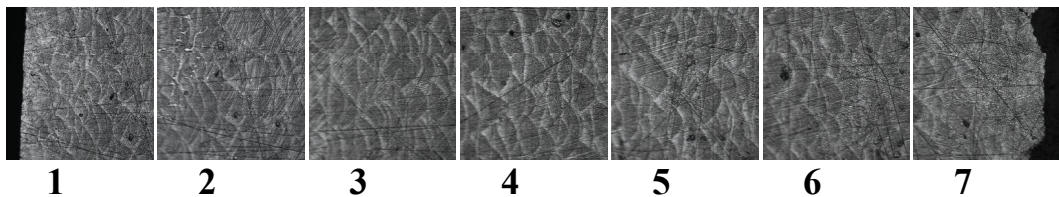
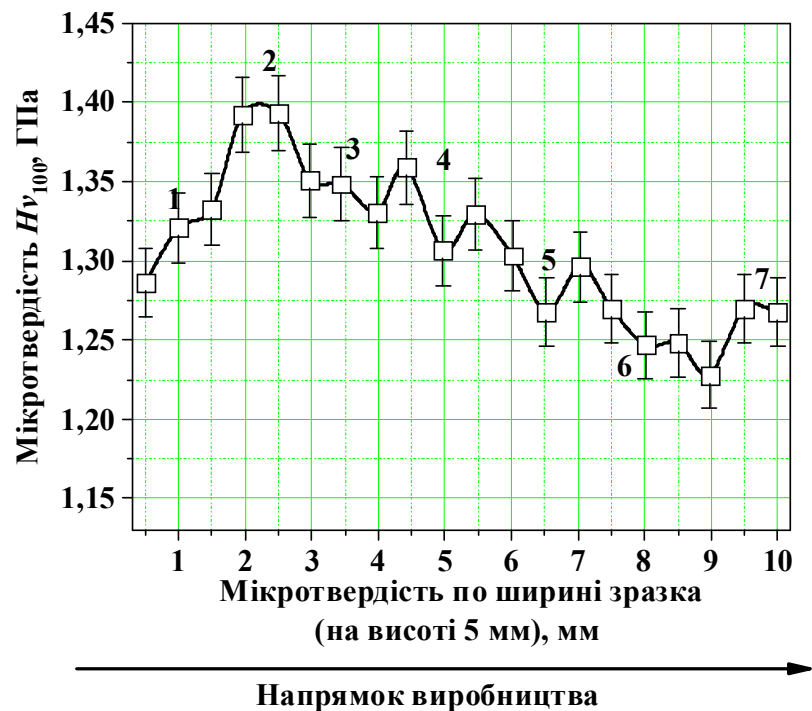


1 2 3 4 5 6 7

(а) за висотою перерізу зразка $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ та відповідна мікроструктура (б) на рівні перехідної зони між останнім нагрітим шаром і серцевиною 3D-друкованого зразка (площина yz)

Рисунок 3.4 – Розподіл мікротвердості

Результати вимірювання мікротвердості в площині ху представлено на рис. 3.5. Спостерігається незначний розкид значень мікротвердості в межах від 1,27 ГПа до 1,38 ГПа. Як і при вимірюванні мікротвердості в площині уз мінімальні значення мікротвердості спостерігається на краю зразків, хоча на зображеннях мікроструктури областей в яких проводилось вимірювання мікротвердості не спостерігається наявність яскраво вираженої структури крайньої області.



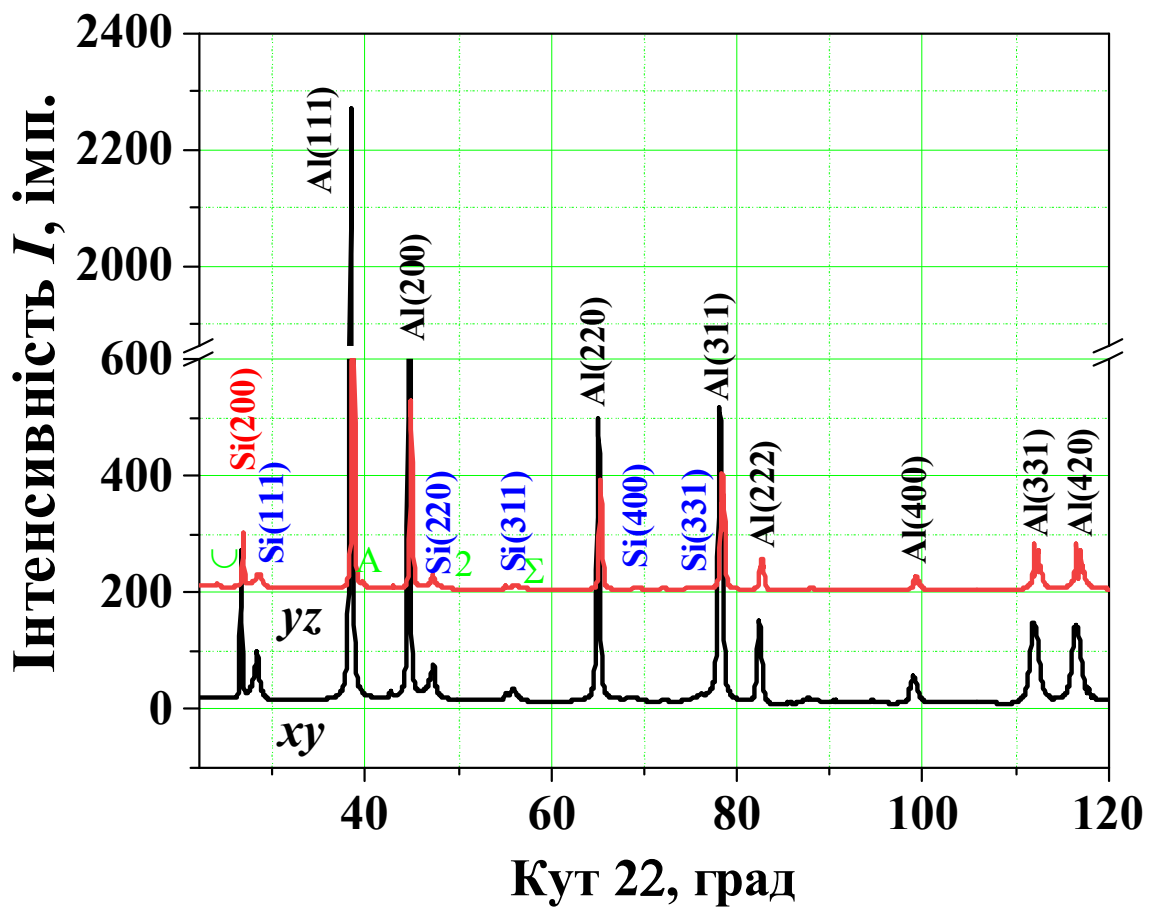
(а) за висотою перерізу зразка $AlSi_{10}Mg$ та відповідна мікроструктура (б) на рівні перехідної зони між останнім нагрітим шаром і серцевиною 3D-друкованого зразка (площина ху)

Рисунок 3.5 – Розподіл мікротвердості

3.3 Зміна структури, фазового складу та напружень 1-го роду в алюмінієвому сплаві $AlSi_{10}Mg$ в залежності від напрямку 3D друку

На рис. 3.6 наведено результати рентгенівської дифракції для зразка сплаву $AlSi_{10}Mg$, отриманого за технологією селективного лазерного плавлення для площини xu (горизонтальна площина) та yz (вертикальна площина).

На дифрактограмах спостерігаються дифракційні максимуми від алюмінієвої матриці, кремнію та включень від зміцнюючої фази Mg_2Si



а – площина xu ; б – площина yz

Рисунок 3.6 – Дифрактограми зразка сплаву $AlSi_{10}Mg$ отриманих селективним лазерним плавленням

За даними рентгеноструктурного аналізу розраховано також розмір областей когерентного розсіювання (ОКР), ступінь деформації кристалічної

гратки (ϵ), параметри кристалічної гратки зразка сплаву $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$, кількісний фазовий склад та величина напружень 1-го роду (σ_R) (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Розмір ОКР, ступінь деформації та параметри кристалічної гратки в зразках сплаву $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ отриманих селективним лазерним плавленням та за технологією ливарного виробництва після різних режимів термічної обробки

Площина	Фаза	ОКР, нм	ϵ , %	a , Å	Кількісний фазовий склад	Напруження σ_R , МПа
xy	Al	44	0,17	4,0536	86	-237
	Si	11	0,1	5,443	12	–
	Mg_2Si	11	0	6,4254	2	–
yz	Al	45,5	0,17	4,0479	86	-176
	Si	11	0,4	5,437	12,5	–
	Mg_2Si	10	0	6,4314	1,5	–

Розмір областей когерентного розсіювання (ОКР), ступінь деформації кристалічної гратки (ϵ) алюмінію, кремнію та включень від зміцнюючої фази Mg_2Si в площинах xy та yz відрізняються в межах похибки вимірювань.

Величина напружень 1-го роду, визначена методом $\sin^2\psi$ за зміною кутового положення дифракційного максимуму алюмінію (420), для площини xy (горизонтальна площина) та yz (вертикальна площина) суттєво відрізняється. Хоча в поверхневому шарі обох площин присутні стискаючі напруження, проте величина стискаючих напружень в площині xy в 1,4 рази більша ніж в площині yz.

3.4 Скануюча електронна мікроскопія та мікрорентгеноспектральний аналіз поверхонь сплаву $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$

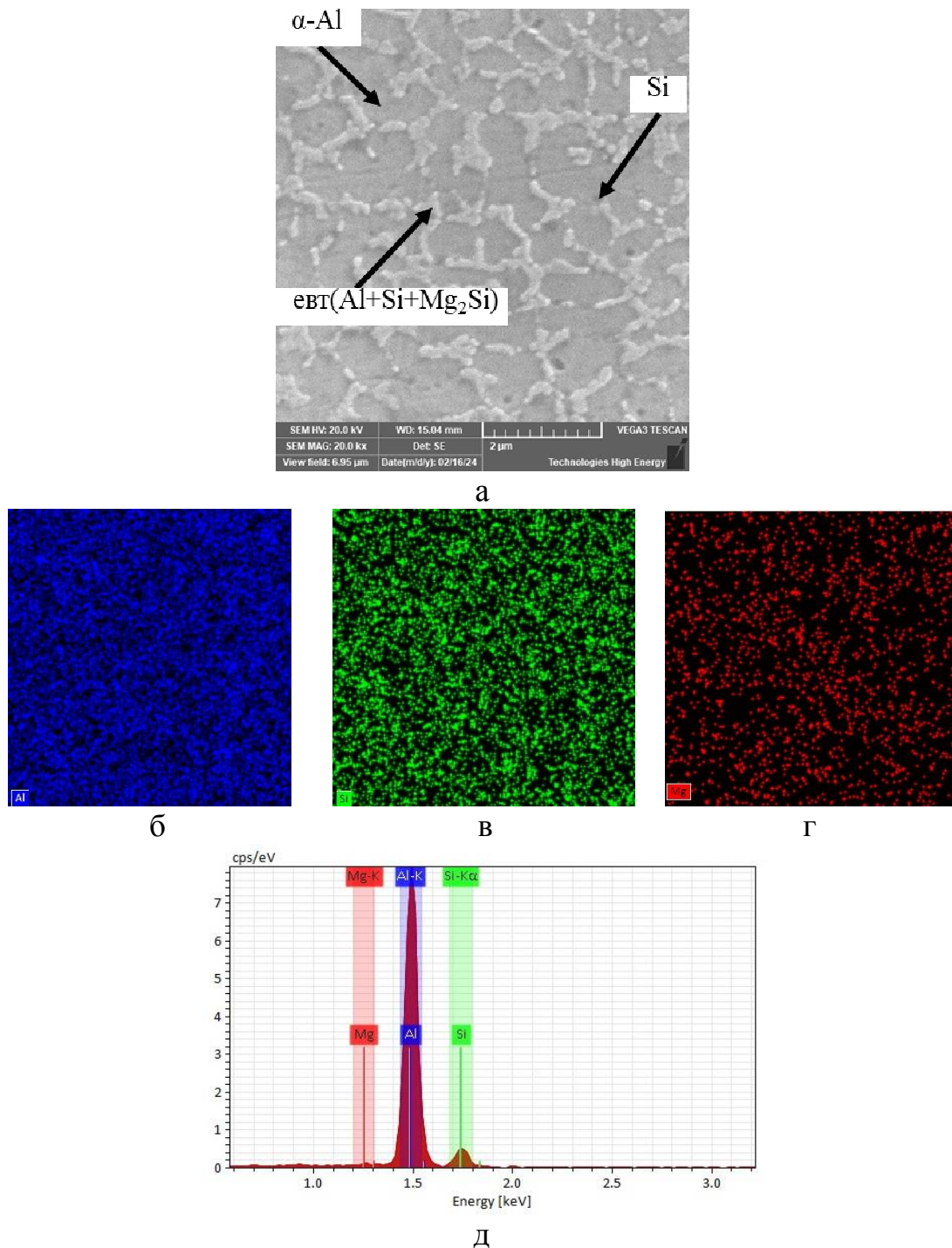
На рис. 3.7 наведено морфологію поверхні зразка сплаву $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ отриманого селективним лазерним плавленням, карти розподілу хімічних елементів та дані енергодисперсійного аналізу площин xy та yz .

Мікроструктура зразка зі сплаву $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ складається з твердого розчину алюмінію, оточеного потрійною евтектикою $[\text{Al}+\text{Si}+\text{Mg}_2\text{Si}]$, що характерно для ливарних алюмінієвих сплавів.

Сплав $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ є доевтектичним, і потрійна евтектика $[\text{Al}+\text{Si}+\text{Mg}_2\text{Si}]$ у ньому утворюється між дендритами другого порядку фази $\alpha\text{-Al}$.

На рис. 3.7 видно матрицю з твердого розчину $\alpha\text{-Al}$ і евтектичної сітки, яка витягнута в напрямку, зворотному тепловідведенню. Крім того, спостерігаються окремі сторонні частки всередині $\alpha\text{-Al}$. Цими частинками, імовірно, є частинки Si , які виділилися в процесі швидкої кристалізації твердого розчину. Після відпалу протягом 2 год при $300\text{ }^\circ\text{C}$ сітка Si у міждендритному просторі зникає і на границях зерен утворюються дисперсні частки Si .

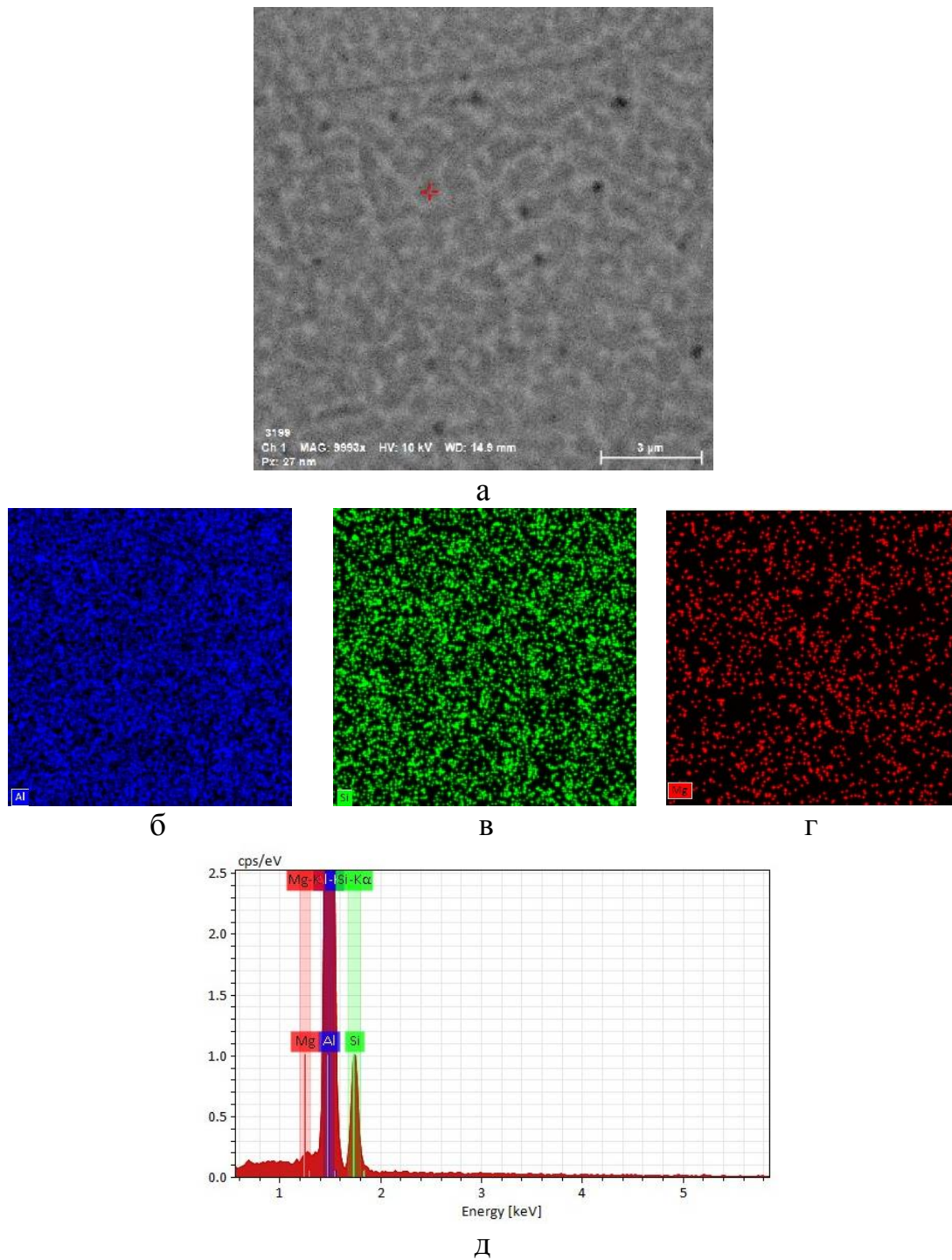
За вмістом легуючих елементів сплав $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ знаходиться в алюмінієвому куті концентраційного трикутника системи Al-Si-Mg , ближче до подвійної евтектики $[\text{Al} + \text{Si}]$, внаслідок чого фаза Mg_2Si у потрійній евтектиці практично відсутня. З'єднання Mg не вдається виявити за допомогою СЕМ через їхній малий відсотковий вміст в сплаві, однак енергодисперсійний мікроаналіз (рис. 3.7) показав, що дрібнодисперсні включення, що містять магній, імовірно β' -фази, близькі за складом до Mg_2Si , розташовуються як в евтектиці, так і всередині дендритів.



(а) сплаву $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ отриманого селективним лазерним плавленням, карти розподілу хімічних елементів (б, в, г) та дані енергодисперсійного аналізу (д) (площина ху)

Рисунок 3.7 – Морфологія поверхні

На рис. 3.8 представлено морфологія поверхні та карти розподілу хімічних елементів сплаву $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ отриманого селективним лазерним плавленням у площині уз.



(а) сплаву $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ отриманого селективним лазерним плавленням, карти розподілу хімічних елементів (б, в, г) та дані енергодисперсійного аналізу (д) (площина yz)

Рисунок 3.8 – Морфологія поверхні

3.5 Висновки до розділу 3

1. Досліджено мікроструктуру, мікротвердість, мікромеханічні характеристики, фазовий склад та напружений стан в зразку алюмінієвого сплаву AlSi10Mg отриманого селективним лазерним плавленням порошку.

2. Охарактеризовано анізотропію мікроструктури адитивно виготовленого сплаву AlSi₁₀Mg: на горизонтальній поверхні (площина yz) формуються доріжки розплаву напівциліндричної форми, що обумовлюється процесом сканування лазерного променя поверхнею шару порошку; у площині xy спостерігається мережа басейнів розплаву, які послідовно кристалізуються в процесі селективного лазерного плавлення.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Науково-технічна актуальність

Науково-технічна актуальність дослідження алюмінієвого сплаву $AlSi_{10}Mg$ полягає в його широкому застосуванні в адитивному виробництві, зокрема в технології селективного лазерного плавлення порошку. Цей сплав відомий своєю високою міцністю, пластичністю та корозійною стійкістю, що робить його ідеальним матеріалом для виготовлення деталей машин, елементів конструкцій та технологічного інструменту.

Дослідження анізотропії мікромеханічних характеристик, структури, фазового складу та макроскопічних напружень в поверхневому шарі сплаву $AlSi_{10}Mg$ в залежності від напрямку 3D друку є важливим для розуміння його властивостей та можливостей в промисловому виробництві.

Це дослідження може мати значний практичний вплив на розвиток сучасних технологій виробництва, сприяючи покращенню характеристик матеріалу та деталей, а також забезпечуючи підґрунтя для подальших наукових досліджень у галузі матеріалознавства та адитивного виробництва.

4.2 Розрахунок собівартості роботи

Для встановлення планової собівартості роботи розраховуються витрати, що затрачені на виконання дипломної роботи.

За допомогою планування кошторису можливо оптимізувати витрати на виконання роботи та досягти високого результату.

4.2.1 Розрахунок трудових витрат

Оплата праці кожного робітника розраховується з урахуванням трудомісткості. Розрахунки проводяться в людино-днях. Денні зарплати

визначаються як відношення місячного окладу до умовного місяця (для проведення дослідних робіт з п'ятиденним робочим тижнем складає 21,2 дня).

Підрахунок трудових витрат включав у себе оцінку часу, витраченого на кожен етап досліджень, а також урахування можливих труднощів та непередбачених обставин, які могли вплинути на загальний обсяг роботи. Ретельний аналіз трудових витрат дозволив здійснити ефективне планування робочого процесу та визначити оптимальні стратегії для досягнення поставлених цілей дослідження.

Фонд заробітної плати розраховується множенням середньоденної заробітної плати за кожною категорією виконавців на відповідну планову трудомісткість робіт. Розраховані дані трудомісткості та фонду заробітної плати наведені у таблицях 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Трудомісткість виконання дипломної роботи

Етапи	Трудомісткість за виконавцями, люд.-дні	
	Доцент	Інженер-дослідник
1. Уточнення та конкретизація завдань по темі дослідження	1	10
2. Аналіз науковотехнічних публікацій по темі дослідження	2	7
3. Обґрунтування мети та напрямів дослідження	1	7
4. Розробка методики проведення дослідження	1	9
5. Проведення дослідження	3	30
6. Обговорення результатів дослідження	2	7
Усього	10	70

Таблиця 4.2 – Фонд заробітної плати для виконавців дипломної роботи

Посада	Трудомісткість, люд.-дні	Місячний оклад, грн	Денна заробітна плата, грн	Сумарна заробітна плата, грн
Доцент	10	32 155	1516	15 160
Інженер- дослідник	70	9 591	452	31 640
Всього	80	41 746	946,92	46 800

4.2.2 Єдиний соціальний внесок

Єдиний соціальний внесок визначаються у відсотках від загального фонду заробітної плати виконавців дослідної роботи, та відраховується в розмірі 22 % загального фонду заробітної плати. Таким чином, єдиний соціальний внесок складе:

$$\text{ЄСВ} = \text{ФЗП} \times 0,22 = 46\,800 \times 0,22 = 10\,296 \text{ грн} \quad (4.1)$$

4.2.3 Витрати на матеріали

Для виконання дипломної роботи необхідні певні матеріали. Витрати, що пішли на закупівлю даних матеріалів вираховуються з ціни одиниці і загальної кількості використаного матеріалу. Витрати на матеріали наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалів	Одиниця вимірювання	Кількість	Ціна, грн	Сума, грн
Газ Аргон	л	40	20	800
Зразок друкованого	шт.	6	11,5	69

сплаву AlSi10Mg				
Разом				869

Транспортно-заготівельні витрати складають 10 % від планової вартості використаних матеріалів, тоді загальні витрати на матеріали складають:

$$V_m = 869 \times 1,1 = 955,9 \text{ грн}$$

4.2.4 Витрати на спеціальне обладнання та приладдя

Дослідження мікроструктури, мікротвердості та мікромеханічних властивостей а також рентгеноструктурні дослідження проводилися на вже існуючому обладнанні, тому закупівля приладдя та обладнання не проводилась і не розглядається.

4.2.5 Витрати на послуги сторонніх організацій

Під час виконання дипломної роботи не передбачається користування послугами сторонніх організацій, тому за даною статтею витрати відсутні.

4.2.6 Витрати на службові відрядження

Під час виконання дипломної роботи службові відрядження не передбачаються, тому за даною статтею витрати відсутні.

4.2.7 Інші прямі невраховані витрати

В цій статті поєднуються всі витрати на проведення дипломної роботи, що не увійшли до попередніх статей. При проведенні даної роботи інші прямі витрати складають 10 % від суми врахованих витрат на дипломну роботу:

$$I_{\text{в}} = (46\,800 + 10\,296 + 955,9) \times 0,1 = 5805,19 \text{ грн}$$

4.2.8 Накладні витрати

До накладних витрат (НВ) відносять:

- а) заробітна плата адміністративна – управлінського, господарського та обслуговуючого персоналу з єдиним соціальним внеском;
- б) витрати на придбання експериментального спеціального обладнання та приладів;
- в) витрати по охороні праці та на техніку безпеки;
- г) утримання виробничих площ, приладів, устаткування та установок;
- д) витрати на воєнізовану охорону;
- е) інші загальногосподарські та дослідницькі витрати.

За нормативами для КПІ ім. Ігоря Сікорського величина накладних витрат складає 20 % від суми всіх прямих витрат по темі:

$$H_{\text{в}} = (46\,800 + 10\,296 + 955,9 + 5805,19) \times 0,2 = 12\,771,38 \text{ грн}$$

4.2.9 Кошторисна вартість

Ці розрахунки є ключовим етапом у плануванні та контролі витрат на проведення досліджень з анізотропії структури та властивостей алюмінієвого сплаву $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$. Плановий кошторис витрат наведено в таблиці 4.4, де детально розглянуті всі складові витрат, включаючи заробітну плату виконавців теми, єдиний соціальний внесок, вартість матеріалів та інші прямі витрати.

Цей розділ дозволяє зрозуміти загальну суму витрат, необхідних для успішного завершення дипломної роботи, та встановлення планової собівартості проекту. Аналіз кошторисної вартості допомагає ефективно

управляти фінансовими ресурсами, забезпечуючи раціональне використання коштів та досягнення запланованих цілей дослідження.

Таблиця 4.4 – Планова кошторисна собівартість дипломної роботи

Назва статей	Сума, грн	Сума, %	Обґрунтування
Заробітна плата виконавців теми	46 800	61,07	За розрахунком
Єдиний соціальний внесок	10 296	13,43	22 % від ФЗП
Вартість основних матеріалів	955,9	1,25	За розрахунком
Вартість спец. обладнання	-	-	Не планується
Витрати на послуги сторонніх організацій	-	-	Не планується
Витрати на службові відрядження	-	-	Не планується
Інші прямі витрати	5 805,19	7,57	10% від суми врахованих витрат
Накладні витрати	12 771,38	16,67	20 % від суми всіх прямих витрат
Разом	76 628,47	100	Сума всіх попередніх

4.3 Розрахунок економічної ефективності

Розрахунок очікуваного економічного ефекту дипломної роботи необхідно для визначення доцільності проведення даної роботи. Проте він може бути розрахований лише по дипломним роботам, які безпосередньо

спрямовані на створення нових матеріалів, покращення параметрів якості продукції, а також створення нових конструкцій.

Під час розрахунку економічної ефективності використовуються спеціальні показники, які враховують важливі аспекти проекту, такі як важливість розробки, можливість використання результатів, теоретичне значення та складність дослідження. Ці показники дозволяють об'єктивно оцінити потенційні переваги та можливі ризики, пов'язані з виконанням дипломної роботи:

- 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;
- д) 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;

д) 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 дипломної роботи створені нові теорії, методики тощо – 6 балів;

д) 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 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 до 200 000) гривень – 7 балів;

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

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів.

$$B = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \quad (4.2)$$

В нашому випадку бальна оцінка ефективності згідно табл. 4.5 становить:

$$Б = 3 \cdot 8 \cdot 3 \cdot 5 = 360$$

Таблиця 4.5 – Бальна оцінка ефективності дипломної роботи

Показник оцінки ефективності	Умовне позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1. Важливість розробки	K_1	Робота виконується за угодою про науково технічне співробітництво	3
2. Можливість використання результатів розробки	K_2	Результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі	8
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	Робота виконує один підрозділ, витрати від (50 000 до 100 000) гривень	5

Умовний ефект дипломної роботи розраховується за формулою:

$$E_{др}^y = 500 \times Б - E_n \times В_{др} \quad (4.3)$$

де 500 – умовна вартість одного балу;

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

$В_{др}$ – сумарні витрати на виконання дипломної роботи (підсумок табл. 4.3).

У нашому прикладі умовний ефект виконання дипломної роботи буде становити:

$$E_{др} = 500 \times 360 - 0,25 \times 76\,628,47 = 160\,842,88 \text{ грн}$$

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

$$E_e = \frac{E_{др}}{B_{др}} \quad (4.4)$$

У нашому випадку E_e буде становити:

$$E_e = \frac{160\,842,88}{76\,628,47} = 2,09$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності дипломної роботи становить 2,09 (перевищує одиницю), що свідчить про доцільність її виконання та ефективність.

4.4 Висновки до розділу 4

1. В розглянутому розділі було визначено планову кошторисну вартість (собівартість) дипломної роботи, яка склала 76 628,47 грн.

2. Проведений економічний аналіз доцільності дослідження, що було проведено під час виконання дипломної роботи вказує на те, що дане дослідження є доцільним з економічної точки зору.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Дипломна робота виконувалась на кафедрі фізичного матеріалознавства та термічної обробки Національного технічного університету України «Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського» в корпусі № 9, на 5 поверсі в кімнаті № 508.

У даній дипломній роботі розглядається силумін - алюмінієвий сплав $AlSi_{10}Mg$ сформований надрукований на 3D принтері в інертному середовищі.

Метою розділу «Охорона праці» є виявлення шкідливих і небезпечних факторів, які виникають під час дослідження сплаву, та є потенційно шкідливими та небезпечними і можуть вплинути на організм людини.

5.1 Характеристика приміщення

Приміщення, в якому проводилася рентгенографічний аналіз і яке розглядається в даному розділі, знаходиться на першому поверсі семиповерхової будівлі. У приміщенні знаходиться шість робочих місць. Підлога приміщення вкрита паркетом, стіни – водоемульсійною побілкою світлого кольору. Вентиляція у приміщенні стаціонарна, також приміщення вентильовується через двері та вікна. Освітлення природне, через вікна, що виходять на південь, та штучне. Розміри вікон складають: ширина – 2,5 м, висота 2 м. Параметри приміщення та його план наведені у таблиці 5.1, та на рисунку 5.1 відповідно.

Цей розділ надає важливу інформацію про середовище, в якому проводилися дослідження, що є ключовим для забезпечення достовірності та об'єктивності отриманих результатів.

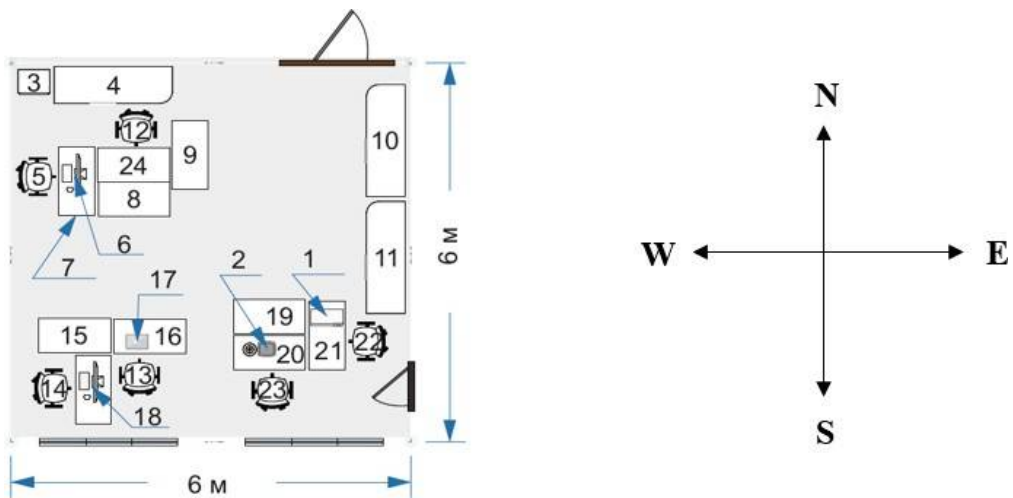
Як видно з таблиці 5.2 параметри приміщення задовольняють норми, що вказані в ДСанПіН 3.3.2-007-98 [61].

Приміщення, в якому виконувався рентгеноструктурний аналіз, має

наступні установки:

Таблиця 5.1 – Параметри приміщення

Параметри	Кількісна характеристика
Розміри приміщення	6 м × 6 м × 2,7 м
Кількість працюючих	2
Площа приміщення	36 м ²
Об'єм приміщення	97,2 м ³



1 – мікротвердомір LHSV-1000Z; 2 – дифрактометр Rigaku Ultima-IV; 3 – тумбочка; 4, 10, 11 – книжкова шафа; 7, 8, 9, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 24 – стіл письмовий; 5, 12, 13, 14, 22, 23 – стілець; 6, 17, 18 – комп'ютер

Рисунок 5.1 – Схема приміщення в якому проводилося дослідження

Таблиця 5.2 – Порівняння реальних значень з нормативними

№	Параметр приміщення	Реальне значення	Нормативні значення
1	2	3	4
1	Площа на одного працюючого	18 м ²	не менше 6 м ²
2	Об'єм на одного працюючого	48,6 м ³	20 м ³
3	Ширина проходу	1,5 м	не менше 1 м

4	Двері	1,5 м	1,5 м
---	-------	-------	-------

Продовження таблиці 5.2

1	2	3	4
5	Вікна	2 м × 2,5 м	1,2 м × 2 м
6	Відстань від комп'ютера до стіни	1,2 м	1 м
7	Відстань між комп'ютерами	2 м	1,5 м

5.2 Аналіз штучного та природнього освітлення у приміщенні

Освітлення робочого приміщення є важливим чинником для забезпечення комфортних умов праці. Правильно розміщене освітлення позитивно впливає на нервову систему робітників, дозволяє бути більш сконцентрованим та уважним.

У лабораторії застосовано суміщене освітлення, за якого природне освітлення доповнюється штучним. Природне освітлення забезпечується вікнами розміри яких складають: ширина – 2,5 м, висота 2 м. а штучне освітлення створюють люмінесцентні лампи ЛБ-40. Категорія робіт, які виконуються у лабораторії, відноситься до середньої точності (четвертий розряд зорових робіт).

5.3 Небезпечні та шкідливі фактори

Під час роботи в приміщенні, зокрема виконання друкування на 3D принтері зразків, їх рентгеноструктурного фазового аналізу та дослідженні оброблених зразків виникають небезпечні та шкідливі фактори, що можуть чинити вплив на стан здоров'я людини. Шкідливі фактори та можливі небезпеки, які можуть бути на місці виконання науково-дослідної роботи представлено у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Небезпечні та шкідливі фактори

Фізичні	Хімічні	Біологічні	Психофізіологічні
Мікроклімат, шум, електронебезпека	Газ	Відсутні	Відсутні

5.3.1 Мікроклімат

Згідно з [63] категорія важкості робіт – I б. Даною категорією передбачаються легкі фізичні роботи до 150 Ккал/год. Роботи у приміщенні виконуються сидячи чи стоячи, що може призводити до появи певного рівня фізичного напруження.

Температура, вологість та рух повітря у приміщенні є важливими факторами, що впливають на стан робочого мікроклімату. Порівняння вимірних параметрів мікроклімату та нормованих величин в робочій зоні кімнати 508 наведено в таблиці 5.4 та таблиці 5.5.

Таблиця 5.4 – Вимірні величини параметрів мікроклімату

Період року	Вимірювані фактичні величини		
	Температура, °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху, м/сек.
Холодний	20	70	0,1
Теплий	23	55	0,2

Таблиця 5.5 – Нормовані величини параметрів мікроклімату

Період року	Оптимальна температура повітря, °С	Оптимальна відносна вологість, %	Оптимальна швидкість руху, м/сек.
Холодний	21 – 23	60 – 40	0,1
Теплий	22 – 24	60 – 40	0,2

Порівнявши виміряні та допустимі значення параметрів мікроклімату можна стверджувати, що величини параметрів мікроклімату входять в допустимі межі і відповідають вимогам санітарних норм, за винятком температури та вологості повітря в холодну половину року. Для виконання постійної роботи в даному приміщенні рекомендується встановлення кондиціонера для підігріву повітря в холодний період року, а також вологопоглинач.

5.3.2 Шум

Шум являє собою небажаний звук чи групу звуків, що можуть чинити вплив на самопочуття та здоров'я людини, може призводити до отримання травм через підвищення неувважності [64]. Довготривала дія шуму викликає запаморочення, підвищену стомленість та дратівливість, погіршення пам'яті. Джерелом шуму в даному приміщенні є водоохолоджувач пристрій для дифрактометра Rigaku Ultima IV.

Документом, що встановлює граничні величини шуму на робочих місцях є ДСНЗ.3.6.037-99 [64].

Для захисту від шуму та ультразвуку застосовуються спеціальні навушники, протишумові екрани, костюми, тощо [64]. В ході виконання рентгеноструктурного фазового аналізу під час виконання дипломної роботи протишумові навушники не застосовувались.

5.3.3 Вплив шкідливих речовин

При друкуванні зразків на 3D принтері використовується інертне середовище за допомогою газу аргону.

Отже, дія аргону на організм людини обумовлена його здатністю заповнювати нижні та середні відділи легень, витісняючи кисень, що

призводить до кисневого голодування органів і тканин, а у важких випадках викликає напади задухи та летальний результат від асфіксії (задухи).

Варто зазначити, що камера для заповнення газом аргону є герметичною, тож ризик витоку являється мінімальним.

5.3.4 Електробезпека

Електробезпека являє собою систему заходів та засобів, що забезпечують захист людини від шкідливого впливу електричного струму, електричного чи електромагнітного поля та статичної електрики.

У наведеному приміщенні розміщується декілька електричних приладів, серед яких два персональних комп'ютери, оптичний мікроскоп iScore IS.1053-PLMi, мікротвердомір LHVS-1000Z та установка для рентгеноструктурного аналізу. Наведені установки живляться напругою 220 В та змінним струмом з частотою 50 Гц.

Відповідно до правил побудови та електрообладнання електроустановок НПАОП 40.1-1.32-01 приміщення № 508-9 відноситься до класу приміщень без підвищеної небезпеки (сухі приміщення із температурою повітря 18 °С – 25 °С та підлогою, що не проводить струм) [62].

Серед чинників, що впливають на важкість ураження організму людини електричним струмом можна виділити три основні типи чинників: електричного характеру (напруга, сила струму, опір тіла людини), неелектричного характеру (час дії струму та індивідуальні особливості організму), виробничого середовища (стан оточуючого середовища) [62].

Електричний струм чинить термічну, електролітичну та біологічну дію на організм людини. Термічний вплив призводить до опіків та термічного ураження тканин організму. Електролітична дія пов'язана з впливом на рідини організму та їх електролітичного розкладу. Біологічний вплив пов'язаний з ураженням нервової системи та порушення її функціонування, що призводить до ураження внутрішніх органів, зупинки серця, тощо.

У приміщенні № 508-9, в якому виконувалася дипломна робота застосовується правильно організоване заземлення електроустановок та обладнання, а організація робочого місця виключає можливість випадкового доторкання до електрообладнання. Ці заходи дозволяють зменшити можливість ураження струмом.

5.4 Заходи для забезпечення безпеки праці

Організація праці на робочому місці – це система заходів, які забезпечують ефективне використання знарядь та предметів праці для трудового процесу [65].

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 [65].

За цими нормами обирається робоча поза (вільна, стоячи або сидячи). Відповідно до обраної робочої пози складається оптимальний графік праці та відпочинку робітників, організовується робочий простір.

Для виконання даної науково-дослідної роботи обрана робоча поза сидячи, оскільки основна частина роботи виконується за допомогою комп'ютера. Під час роботи з ПК робоче місце повинно мати наступні характеристики (рис. 5.2):

- висота столу 800 мм – 900 мм;
- ширина столу 1000 мм – 1400 мм;
- глибина столу 800 мм – 1000 мм;
- місце для ніг: висота – 600 мм, ширина – 500 мм, глибина (на рівні колін) – 450 мм, глибина (на рівні витягнутої ноги) – 650 мм;
- відстань від екрана ПК до очей користувача – 600 мм;
- клавіатура на відстані 300 мм від краю столу;
- коефіцієнт відбиття поверхні робочого столу – 0,6 [86].

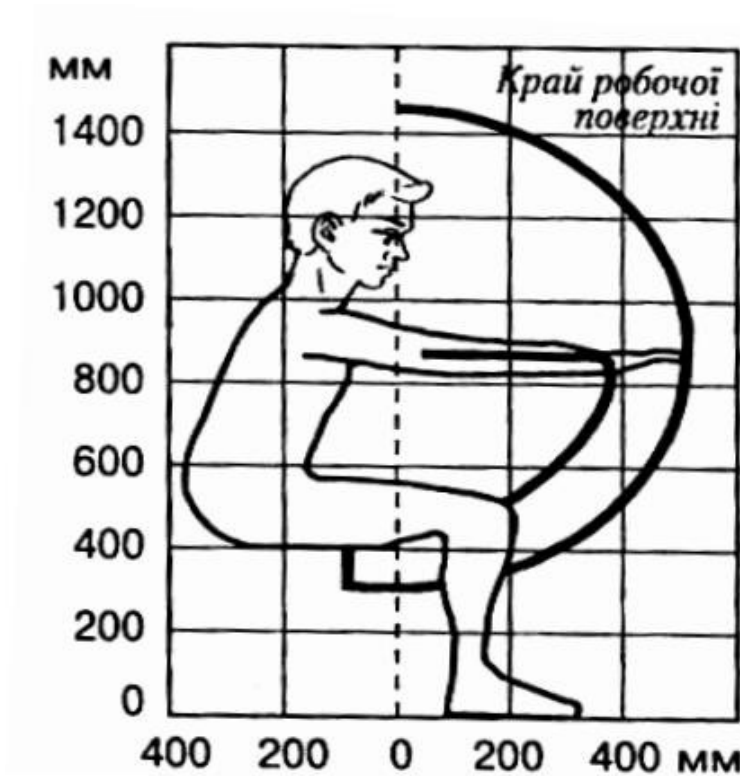


Рисунок 5.2 – Робоча зона працівника

Організація робочих місць в приміщенні №508-9 відповідає санітарним нормам і забезпечує комфортні умови для працівників.

5.5 Інженерні рішення, засоби індивідуального захисту

Камера для заповнення газом аргону є герметичною, тож ризик витоку являється мінімальним, також при роботі з аргонем використовувалась маска респіратор 3М К112 FFP2 з клапаном видиху.

5.6 Пожежна безпека

Пожежна безпека – це система заходів, що застосовуються для запобігання чи протидії пожежі. Згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016 приміщення поділяють на п'ять категорій за вибухо-пожежною та пожежною небезпекою. Приміщення № 508-9 відноситься до категорії «Д», в приміщенні в наявності горючі матеріали та негорючі речовини, що знаходяться за температури

навколишнього середовища [66].

Найбільшу пожежну небезпеку несе в собі обладнання, яке знаходиться в приміщенні та проводка, що прокладена для його живлення. Коротке замикання може призвести до появи пожежі у приміщенні.

Для виявлення пожежі в приміщенні встановлені автоматичні датчики типу ДТП, також оповіщення про пожежу можливе за допомогою службового зв'язку. Засоби гасіння в даному приміщенні представлені вогнегасниками ВВК-3,5.

Евакуація з приміщення № 508-9 відбувається згідно з існуючим планом евакуації наведеним на рис. 5.3.

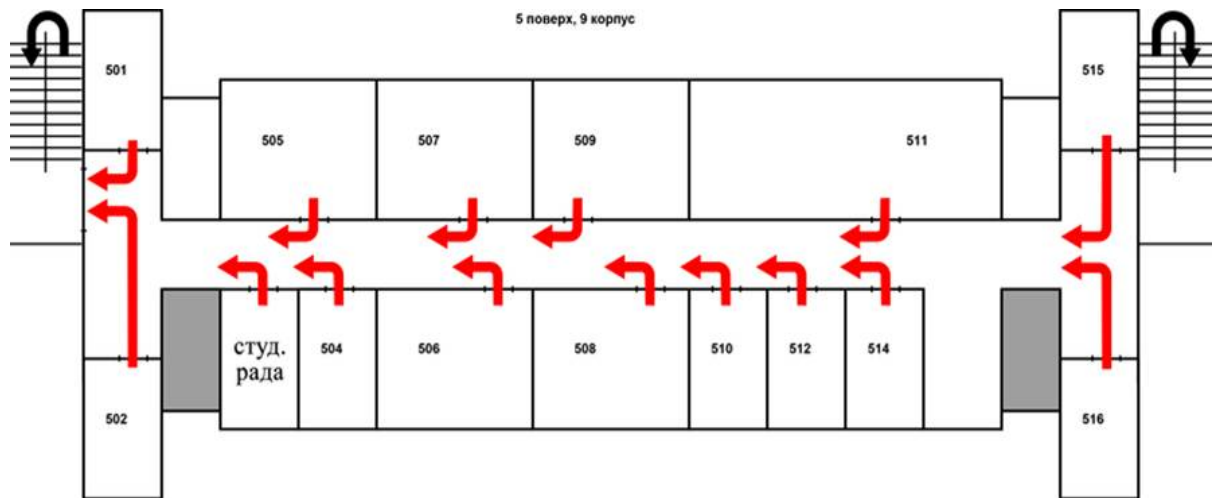


Рисунок 5.3 – План евакуації

Для попередження виникнення пожеж необхідно проводити регулярні перевірки засобів гасіння та перевірки обладнання, перевіряти справність електричної проводки та системи пожежної сигналізації, а також проводити навчання для співробітників, як поводитися у надзвичайних ситуаціях.

5.7 Висновки до розділу 5

1. В приміщенні № 508-9, в якому проводилася розглянута в даній дипломній роботі рентгеноструктурний аналіз, забезпечені оптимальні умови

мікроклімату, освітлення, електробезпеки та пожежної безпеки, приміщення є придатним для безпечної праці.

2. Вплив шуму, пожежної та електробезпеки, інших шкідливих речовин мінімізовано завдяки засобам захисту та конструкційним особливостям обладнання.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено огляд літературних джерел щодо структури та властивостей алюмінієвих сплавів, розглянуто сучасні технології та методи, пов'язані з адитивним виробництвом металевих сплавів.
2. Обрано експериментальні методики, які в комплексі забезпечили достовірність результатів дослідження анізотропії мікроструктури, фазового складу, мікротвердості поверхні сплаву $AlSi_{10}Mg$, отриманого селективним лазерним плавленням порошку.
3. Охарактеризовано анізотропію мікроструктури адитивно виготовленого сплаву $AlSi_{10}Mg$: на горизонтальній поверхні (площина yz) формуються доріжки розплаву напівциліндричної форми, що обумовлюється процесом сканування лазерного променя поверхнею шару порошку; у площині xz спостерігається мережа басейнів розплаву, які послідовно кристалізуються в процесі селективного лазерного плавлення.
4. Розподіл мікротвердості HV в горизонтальній площині зразка сплаву $AlSi_{10}Mg$ становить $1,32 \text{ ГПа} \pm 0,5 \text{ ГПа}$, підтверджуючи відносну рівномірність властивостей і мікроструктури. Розкид даних HV не перевищує $\sim 10\%$, що значно менше від величин розкиду, які спостерігались у матеріалах, друканих іншими методами із застосуванням дроту, а саме: із застосуванням дуги (16%) або лазерного променя (15%).
5. Показана можливість експрес-оцінки розподілу механічних властивостей 3D-друкованого зразка на основі вимірюваних величин мікротвердості у його різних перерізах (у напрямках вирощування та сканування). Проведені оцінки засвідчили відповідність механічних характеристик 3D-друкованого матеріалу та сплаву $AlSi_{10}Mg$, одержаного традиційними методами відлімання.
6. Вивчено вплив виробничих витрат на виготовлення алюмінієвого сплаву $AlSi_{10}Mg$ за допомогою селективного лазерного плавлення порошку.

Проведено порівняльний аналіз витрат на виробництво сплаву $AlSi_{10}Mg$ традиційними методами та методом селективного лазерного плавлення порошку.

Встановлено, що використання технології селективного лазерного плавлення порошку для виготовлення сплаву $AlSi_{10}Mg$ може призвести до зниження витрат на виробництво та покращення якості кінцевого продукту.

7. Проведено аналіз умов праці під час виготовлення алюмінієвого сплаву $AlSi_{10}Mg$ за допомогою селективного лазерного плавлення порошку.

Розроблено та впроваджено заходи щодо забезпечення безпеки та охорони здоров'я працівників під час використання технології селективного лазерного плавлення порошку.

Встановлено, що дотримання вимог щодо охорони праці під час виробництва сплаву $AlSi_{10}Mg$ дозволяє знизити ризики травматизму та покращити умови праці на підприємстві.

CONCLUSIONS

1. A review of the literature on the structure and properties of aluminum alloys has been conducted, modern technologies and methods related to additive manufacturing of metal alloys have been considered.
2. Experimental methodologies have been selected, which in combination ensured the reliability of the results of studying the anisotropy of the microstructure, phase composition, and surface microhardness of the AlSi₁₀Mg alloy obtained by selective laser melting of powder.
3. The anisotropy of the microstructure of the additively manufactured AlSi₁₀Mg alloy has been characterized: on the horizontal surface (yz plane), semi-cylindrical melt tracks are formed, which is due to the process of scanning the laser beam over the surface of the powder layer; in the xy plane, a network of melt pools is observed, which sequentially crystallize during the selective laser melting process.
4. The distribution of microhardness HV in the horizontal plane of the AlSi₁₀Mg alloy sample is 1.32 GPa ± 0.5 GPa, confirming the relative uniformity of properties and microstructure. The scatter of HV data does not exceed ~10%, which is significantly less than the scatter values observed in materials printed by other methods using wire, namely: using arc (16%) or laser beam (15%).
5. The possibility of express assessment of the distribution of mechanical properties of a 3D-printed sample based on measured microhardness values in its different sections (in the growth and scanning directions) has been demonstrated. The assessments made confirm the correspondence of the mechanical characteristics of the 3D-printed material to the AlSi₁₀Mg alloy obtained by traditional subtractive methods.
6. The influence of production costs on the manufacturing of the aluminum alloy AlSi₁₀Mg using selective laser melting of powder has been studied.

A comparative analysis of the costs of producing the $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ alloy by traditional methods and the method of selective laser melting of powder has been conducted.

It has been established that the use of selective laser melting of powder technology for manufacturing the $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ alloy can lead to a reduction in production costs and improvement in the quality of the final product.

7. An analysis of working conditions during the manufacturing of the aluminum alloy $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ using selective laser melting of powder has been conducted.

Measures have been developed and implemented to ensure the safety and health protection of workers during the use of selective laser melting of powder technology.

Compliance with occupational safety requirements during the production of the $\text{AlSi}_{10}\text{Mg}$ alloy helps reduce the risks of injury and improve working conditions at the enterprise.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Study of heat treatment parameters for additively manufactured AlSi10Mg in comparison with corresponding cast alloy / Annalisa Pola, Luca Girelli, Marialaura Tocci, Marcello Gelfi //Materials Science and Engineering:A. – 2018. Vol.739. P. – 317-328. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.10.026>
2. Performance of 3D-Printed (L-PBF) AlSi10Mg / C. Linder , F. Vucko, T. Ma, S. Proper, E. Dartfeldt// Corrosion-Fatigue Performance of 3D-Printed (L-PBF) AlSi10Mg. Materials. – 2023. Vol.16. P. – 5964. <https://doi.org/10.3390/ma16175964>
3. Milling of additively manufactured AlSi10Mg with microstructural porosity defects, finite element modeling and experimental analysis / Ali Hosseini, Yatin Shankar, Narayanan, Nam Nguyen //Journal of Manufacturing Processes. – 2024. Vol.118 . P. – 242-260. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.03.051>
4. Tiwari A. Improved Corrosion Resistance Behaviour of AlSi10Mg Alloy due to Selective Laser Melting / A. Tiwari, G. Singh, R. Jayaganthan // Coatings. – 2023. Vol. 13. P. – 225. <https://doi.org/10.3390/coatings13020225>
5. Serjouei A. Strength-hardness relationship for AlSi10Mg alloy produced by laser powder bed fusion: An experimental study./ A. Serjouei// Materials Science & Engineering A. – 2022. Vol. 861. P. – 144345 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144345>
6. Microstructure and strength of selectively laser melted AlSi10Mg./ J. Wu, X. Q. Wang, W. Wang, M. M. Attallah, M. H. Loretto//Acta Mater. – 2016. Vol. 117. P. – 311–320. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.012>
7. Effect of microstructure and porosity of AlSi10Mg alloy produced by selective laser melting on the corrosion properties of plasma electrolytic oxidation coatings / L. Pezzato, M. Dabalà, S. Gross, K. Brunelli// Surf. Coat. Technol. – 2020. Vol. 404. P. – 126477. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126477>.
8. Controlling mechanical properties and energy absorption in AlSi10Mg

lattice structures through solution and aging heat treatments / Didier Talamona, Daniyar Syrlybayev, Asma Perveen // Materials Science and Engineering. – 2024. Vol.889. P. – 145843 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145843>

9. The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment / N. T. Aboulkhair, I. Maskery, C. Tuck, I. Ashcroft, N. M. Everitt // Mater. Sci. Eng., A. – 2016. Vol. 667. P. – 139-146. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.092>

10. Change in microstructure of selectively laser melted AlSi10Mg alloy with heat treatments / N. Takata, H. Kodaira, K. Sekizawa, A. Suzuki, M. Kobashiv // Change in microstructure of selectively laser melted AlSi10Mg alloy with heat treatments // Mater. Sci. Eng. A. – 2017 Vol. 704. (2017), P.- 218-228. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.029>

11. Contribution of Mg₂Si precipitates to the strength of direct metal laser sintered AlSi10Mg / Amir Hadadzadeh, Babak Shalchi Amirkhiz, Mohsen Mohammadi // Materials Science and Engineering: A. – 2018. Vol. 739. – P. 295-300. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.10.055>

12. Changes in the microstructure and mechanical properties of additively manufactured AlSi10Mg alloy after exposure to elevated temperatures / M. Fousová, D. Dvorský, A. Michalcová, D. Vojtěcha // Mater. Charact. – 2018. Vol. 137. – P.119-126. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.01.028>

13. Process optimization and mechanical property evolution of AlSiMg0.75 by selective laser melting / Y. Bai, Y. Yang, Z. Xiao, M. Zhang, D. Wang // Process optimization and mechanical property evolution of AlSiMg0.75 by selective laser melting. – 2017 Des. Vol. 140. P. – 257-266. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.045>

14. Study of heat treatment parameters for additively manufactured AlSi10Mg in comparison with corresponding cast alloy / Annalisa Pola, Luca Girelli, Marialaura Tocci, Marcello Gelfi // Materials Science and

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.10.026>

15. Технологія конструкційних матеріалів. Підручник / М. Н. Сологуб, І. О. Рожнецький, О. І. Некоз та ін. За ред.. М. Н. Сологуба// – К.: Вища школа; 2002. – 374 с.
16. Кольорові метали і сплави: Навчальний посібник /В. Л. Грешта, О. В. Климов, О. В. Лисиця, Л. П. Степанова//. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2015. – 336 с.
17. Кольорові метали та сплави [текст]: підручник для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напрямом підготовки «Інженерне матеріалознавство» // В.П. Горбатенко, ДонНТУ, Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2012. – 300 с.
18. Технологія конструкційних матеріалів. / В. М. Клименко, О. П. Шиліна, А. Ю. Осадчук, Е. П. Шилена// Частина перша. Конструкційні матеріали: властивості, класифікація, виробництво. Навчальний посібник. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005. – 97 с.
19. ДСТУ 2839-94. Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови. [Текст] / Держстандарт України. – К.: Держстандарт України, 1995. – 49 с.
20. Дубовий О.М. Інженерне матеріалознавство: Підручник / О.М. Дубовий, Ю.О. Казимиренко, Н.Ю. Лебедева, С.М. Самохін // – Миколаїв: НУК, 2009. – 444 с.
21. Li B. Combustion synthesis of CoCrMo orthopedic implant alloys: microstructure and properties / B. Li, A. Mukasyan, A. Varma // Materials Research Innovations. – 2003. – Vol. 7. – P. – 245–252.
22. Poly(lactic-co-glycolic acid)-based composite bone-substitute materials / D. Zhao, T. Zhu, J. Li, et al. // Bioact. Mater. – 2021. – Vol. 6. – P. – 346–360.
23. Powder metallurgical processing of Co–28%Cr–6%Mo for dental implants: Physical, mechanical and electrochemical properties / W. C. Rodrigues,

L. R. Broilo, L. Schaeffer et al. // Powder Technology. – 2011. – Vol. 206. – P. – 233–238.

24. Langer R. Designing materials for biology and medicine / R. Langer, D.A. Tirrell // Nature 2004. – Vol. 428. – P. – 487–492.

25. Niinomi M. Development of new metallic alloys for biomedical applications / M. Niinomi, M. Nakai, J. Hieda // Acta Biomater. – 2012. – Vol. 8. – P. – 3888–3903.

26. Bansal P. Improvement of surface properties and corrosion resistance of ti13nb13zr titanium alloy by plasma-sprayed hazno coatings for biomedical applications / P. Bansal, G. Singh, H.S. Sidhu // Materials Chemistry and Physics. – 2021. – Vol. 257, P. – 123738.

27. Mechanical properties of forged low ni and c-containing co-cr-mo biomedical implant alloy / A. Chiba, K. Kumagai, H. Takeda, N. Nomura, // Materials Science Forum. – 2005. – Vol. 475–479. – P. – 2317–2322.

28. Saravanan M. A review on recent progress in coatings on AISI austenitic stainless steel / M. Saravanan, A. Devaraju, N. Venkateshwaran // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5. – P. – 14392–14396.

29. Talha M. A review on nickel-free nitrogen containing austenitic stainless steels for biomedical applications / M. Talha, C.K. Behera, O.P. Sinha // Materials Science and Engineering: C. – 2013. – Vol. 33. – P. – 3563–3575.

30. Assis S.L. Electrochemical evaluation of ti-13nb-13zr, ti-6al-4v and ti-6al-7nb alloys for biomedical application by long-term immersion tests / S.L. Assis, I. Costa// Materials and Corrosion. – 2007. – Vol. 58. – P. – 329–333.

31. Fatigue behavior of biomedical Co–Cr–Mo–W alloy fabricated by selective laser melting / X. Dong, Y. Zhou, Q. Sun, et al. // Materials Science and Engineering: A. – 2020. – Vol. 795. – P. – 140000.

32. Yamanaka K. Developing high strength and ductility in biomedical Co–Cr cast alloys by simultaneous doping with nitrogen and carbon / K. Yamanaka, M. Mori, A. Chiba // Acta Biomaterialia. – 2016. – Vol. 31. – P. – 435–447.

33. Antunes R. A. Corrosion fatigue of biomedical metallic alloys: Mechanisms and mitigation / R. A. Antunes, M. C. Lopes de Oliveira // *Acta Biomaterialia*. – 2012. – Vol. 8, №. 3. – P. – 937–962.
34. Corrosion resistance of three austenitic stainless steels for biomedical applications / M. Terada, R.A. Antunes, A. F.Padilha, I.Costa, M. Terada // *Materials and Corrosion*. – 2007. – Vol. 58, №. 10. – P. – 762–766.
35. An in vitro evaluation of novel NHA/zircon plasma coating on 316L stainless steel dental implant / E. Karamian, M.R. Kalantar Motamedi, A. Khandan, et al. // *Progress in Natural Science: Materials International*. – 2014. – Vol. 24, №. 2. – P. – 150–156.
36. Electrochemical behaviour and microstructural characterization of different austenitic stainless steel for biomedical applications / E.W.F Sabará; V. Pereira, A.L. Molisani, et. al // *Materials Research Express*. – 2020. – Vol. 7, №. 10. – P. – 105402.
37. Yang K. Nickel-free austenitic stainless steels for medical applications / K. Yang, Y. Ren // *Science and Technology of Advanced Materials*. – 2010. – Vol. 11. – P. – 014105.
38. Talha M. Effect of nitrogen and cold working on structural and mechanical behavior of ni-free nitrogen containing austenitic stainless steels for biomedical applications / M. Talha, C.K. Behera, O.P. Sinha // *Materials Science and Engineering: C*. – 2015. – Vol. 47. – P. – 196–203.
39. The significant impact of mechanically-induced phase transformation on cellular functionality of biomedical austenitic stainless steel / V.S.A. Challa, K.C. Nune, N. Gong, R.D.K. Misra // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. – 2020. – Vol. 108. – P. – 103815.
40. Tailoring surface hydrophilicity property for biomedical 316l and 304 stainless steels: A special perspective on studying osteoconductivity and biocompatibility / C. Peng, T. Izawa, L. Zhu, et. al // *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2019. – Vol. 11. – P. – 45489–45497.

41. Biomedical grade stainless steel coating of polycaffeic acid via combined oxidative and ultraviolet light-assisted polymerization process for bioactive implant application / L.E. Aguilar, J.Y. Lee, C.H. Park, C.S. Kim // *Polymers*. – 2019. – Vol. 11. – P. – 584.
42. Surface characteristics and cell adhesion behaviors of the anodized biomedical stainless steel / H.-J. Hsu, C.-Y. Wu, B.-H. Huang, et. al // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10. – P. – 6275.
43. Assis S.L. Electrochemical evaluation of ti-13nb-13zr, ti-6al-4v and ti-6al-7nb alloys for biomedical application by long-term immersion tests / S.L. Assis, I. Costa, // *Materials and Corrosion*. – 2007. – Vol. 58. – P. – 329–333.
44. Additively manufactured 316l stainless steel with improved corrosion resistance and biological response for biomedical applications / M.J.K. Lodhi, K. M. Deen, M.C. Greenlee-Wacker, W. Haider // *Additive Manufacturing*. – 2019. – Vol. 27. – P. – 8–19.
45. Corrosion performance of cold deformed austenitic stainless steels for biomedical applications / M. Talha, Y. Ma, Y. Lin, et. al // *Corrosion Reviews*. – 2019. – Vol. 37. – P. – 283–306.
46. Hydroxyapatite coatings for biomedical applications deposited by different thermal spray techniques / R. Gadow, A. Killinger, N. Stiegler // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – Vol. 205. – P. – 1157–1164.
47. High-velocity suspension flame sprayed hydroxyapatite coatings for biomedical applications / N. Stiegler, D. Bellucci, G. Bolelli, et. al // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2012. – Vol. 21. – P. – 275–287.
48. Mukhanov I. I. Strengthening Steel Components by Ultrasonically Vibrating Ball / I. I. Mukhanov, Yu.M. Golubev // *Vestn. Mashin*. – 1966. – Vol. 11. – P. – 52.
49. Розробка технології та виробництво високоточних 3D-принтерів для друку металом URL: <https://alt-print.com/> (дата звернення 31.05.2024)

50. Навчально-наукова лабораторія електронної та оптичної мікроскопії URL: <https://www.imz.kpi.ua/uk/595-navchalno-naukova-laboratoriya-elektronnoji-ta-optichnoji-mikroskopiji.html>

51. Fomenko L. S. Micromechanical properties of nanocrystalline titanium prepared by lowtemperature rolling / L. S. Fomenko, A. V. Rusakova, S. V. Lubenets, V. A. Moskalenko // Low temperature physics. – 2010. – Vol. 36. – №7. – P. – 809–818. 58 18.

52. Мильман Ю. В. Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования / Ю. В. Мильман, С. И. Чугунова, И. В. Гончарова // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2011. – Т4. – С. 182–187.

53. Мильман Ю. В. Влияние температуры на механические свойства объемного аморфного сплава на основе циркония / Ю. В. Мильман, А. Н. Слипенюк, В. В. Куприн, Д. В. Козырев // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2011. – Т98. —С. 85–88.

54. Теоретичні основи і методи визначення механічних властивостей матеріалів та покриттів при індентуванні на макро- та мікрорівнях. / О. В. Бякова, О.І. Юркова, Ю.В. Мільман, О.В. Білоцький // Навч. посіб. для студ. вищ. техн. навч. закладів (Київ: «Гарант СЕРВІС»: 2011).

55. Навчально-наукова лабораторія рентгеноструктурного аналізу Rigaku і мас-спектрометрії URL: <https://www.imz.kpi.ua/uk/594-navchalno-naukova-laboratoriya-rentgenostruktornogo-analizu-rigaku-i-mas-spektrometriji.html>

56. Microstructure of Co–Cr Dental Alloys Manufactured by Casting and 3D Selective Laser Melting / M. O. Vasylyev , B. M. Mordyuk, S.M. Voloshko, and P.O. Gurin // Progress in Physics of Metals. – 2022. – Vol. 23. P – 337 <https://doi.org/10.15407/ufm.23.02.337>

57. Сучасні експериментальні методи аналізу низькорозмірних структур: навчальний посібник (частина 1): навч. посіб. для студ.

спеціальності 132 «Матеріалознавство», освітньої програми «Інжиніринг та комп'ютерне моделювання в матеріалознавстві» / С. М. Волошко, О. А. Крутько, Н. В. Франчік, А. П. Бурмак // КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Центр учбової літератури», 2021. – 96с.

58. Методичні вказівки до виконання лабораторного практикуму з розділу «Апаратура та методи електронно-мікроскопічного аналізу структури матеріалів» з дисципліни «Структура і властивості матеріалів» для студ. спец. 133 – «Галузеве машинобудування», 144 – «Теплоенергетика» / Укл.: О.Б. Гірін, В.І. Овчаренко//. – Д.: ДВНЗ УДХТУ, 2017. – 26 с.

59. Micromechanical, corrosion and wet sliding wear behaviours of Co-28Cr-6Mo alloy: Wrought vs. LPBF / V.G Efremenko, A.G. Lekatou, Yu.G. Chabak, B.V. Efremenko, I. Petryshynets, V.I. Zurnadzhy, S. Emmanouilidou and M. Vojtko // *Materials Today Communications*. – 2023. – Vol. 35. –P. – 105936. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105936>

60. Microstructure of Co–Cr Dental Alloys Manufactured by Casting and 3D Selective Laser Melting / M. O. Vasylyev M.O., B.M. Mordyuk, S.M. Voloshko, and P.O. Gurin // *Progress in Physics of Metals*. – 2022. – Vol. 23. <https://doi.org/10.15407/ufm.23.02.337>

61. ДСанПіН 3.3.2-007-98. Організація і обладнання робочих місць. – [Чинний від 1998-07-01]. – Київ: МОЗ України, 1998. – 35 с.

62. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. – [Чинний від 2001-01-01]. – Київ: Держгірпромнагляд, 2001. – 58 с. – (Замість НПАОП 40-1.31-97).

63. 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).

64. 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).

65. 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).

66. 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 ас. – (Замість ДСТУ Б В.1.1-36:2008)..