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

Інститут матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона
Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії

«На правах рукопису»
УДК _621.791

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ /Богомол Ю.І./
«___»_____20_____ р.

Магістерська
Дисертація на здобуття ступеня магістра
зі спеціальності 132 Матеріалознавство
на тему: «ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ ПОРОШКУ Ti6Al4V У ПРОЦЕСІ 3Д-ДРУКУ НА ВЛАСТИВОСТІ ВИРОБІВ»

Виконала:
студентка 2 (магістерського) курсу, групи ФН-21мн
Чернета Зореслава Євгеніївна _____

Керівник:
Доцент,к.т.н,
Соловйова Т.О. _____

Консультант з охорони праці:
Зав. каф., д.т.н. професор,
Левченко О. Г.,

Консультант з експериментальної частини:
Єфіменко М.Ю. _____

Рецензент:
Доцент, к.т.н.,
Бурмак А.П. _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студентка Чернета З.Є.

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона
Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою
Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»
(«Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Ю.І.Богомол
«___»_____20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Чернеті Зореславі Євгеніївні

1. Тема дисертації: «Оцінка впливу повторного використання порошку Ti6Al4V у процесі 3Д друку на властивості виробів»,
науковий керівник дисертації: Соловйова Тетяна Олександрівна доцент к.т.н.,
затверджені наказом по університету від «25» березня 2024 р. №1451-с

2. Термін подання студентом дисертації 03.06.2024 _____

3. Об’єкт дослідження: технологічний процес отримання матеріалу Ti6Al4V методом SLM (Selective Laser Melting).

4. Предмет дослідження: вплив кількості циклів повторного використання порошку Ti6Al4V Grade 23, що використовується для виготовлення медичних виробів, на рівень деградації порошку та властивості готових виробів.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

а) провести аналіз сучасного стану теорії та технологічного процесу 3Д друку сплавами Ti6Al4V;
б) визначити закономірності отримання виробів методом SLM (Selective Laser Melting);
в) оцінити вплив рециклінгу на морфологію, структуру частинок, механічні властивості та відстежити вміст елементів O (мас.%) у порошку;
г) критична оцінка наявних результатів в порівнянні з стандартом ASTM F2924-14;
д) визначити шкідливі та небезпечні виробничі фактори;
е) розробити заходи для попередження впливу шкідливих та небезпечних виробничих факторів.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

а) актуальність роботи;
б) об’єкт, предмет та завдання дослідження;
в) методи дослідження;
г) опис отриманих результатів.

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях	Зав. каф., професор, д.т.н. Левченко О. Г.,		
Експериментальна частина	Єфіменко М. Ю.		

9. Дата видачі завдання 05.02.2024

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Підготовка експериментального матеріалу	05.04.2024	
2.	Підготовка ілюстративного матеріалу	25.04.2024	
3.	Написання тексту роботи	10.05.2024	
4.	Підготовка презентації	30.05.2024	
5.	Оформлення дипломної роботи	03.06.2024	
6.	Захист дипломної роботи	13.06.2024	

Студент Зореслава ЧЕРНЕТА

Науковий керівник дисертації Тетяна СОЛОВЙОВА

РЕФЕРАТ

Робота вміщує: 72 стор., 30 рис., 15 табл., 57 літ. дж.

ПОРОШКОВА МЕТАЛУРГІЯ, ТИТАНОВІ ПОРОШКИ, 3Д ДРУК, СЕЛЕКТИВНЕ ЛАЗЕРНЕ ПЛАВЛЕННЯ

Об’єкт дослідження: технологічногічний процес отримання сплаву Ti6Al4V методом SLM (Selective Laser Melting).

Предмет дослідження: вплив кількості циклів повторного використання порошку Ti6Al4V Grade 23, що використовується для виготовлення медичних виробів, на рівень деградації порошку та властивості готових виробів.

Мета роботи – встановити вплив циклічного використання порошку на властивості друкованих виробів, якість яких залишається на достатньому рівні для медичного використання.

Методи дослідження – гранулометричний метод, хімічний аналіз, аналіз мікроструктури та дослідження механічних випробувань.

Результати та їх новизна – встановлено, що максимальна величина межі плинності $\sigma_т$, становить 1020 МПа, а максимальна величина тимчасової міцності $\sigma_в$, тобто напруження, яке сплав витримує до руйнування – 1070 МПа. Вміст оксигену в новому порошку складає 13,22 ат.% , відразу після лазерної дії , вміст зменшується до 9,62 ат.%, але після просіву досягає 14,83 ат.%.

Значимість роботи – однією з ключових переваг адитивного виробництва є реалізація сталого розвитку та можливість зменшення витрат сировини. Тому надзвичайно важливо розуміти механізми деградації металевого порошку і мати процедуру суворого контролю деградації порошку в умовах багаторазового використання, особливо в реальних виробничих умовах.

ABSTRACT

The work contains 72 p., 30 fig., 15 table, 57 refer.

POWDER METALLURGY, TITANIUM POWDER, 3D PRINTING, SELECTIVE LASER MELTING

Objects of study: technological process of producing Ti6Al4V alloy by SLM (Selective Laser Melting).

The subject of the study is the influence of the number of reuse cycles of Ti6Al4V Grade 23 powder used for the manufacture of medical devices on the level of powder degradation and the properties of finished products.

The purpose of the study is to determine the optimal and maximum permissible number of cycles of powder reuse, at which the quality of printed products remains at a sufficient level for medical use.

Research methods - granulometric method, chemical analysis, microstructure analysis and mechanical testing.

The results and their novelty - it was found that the maximum value of the yield strength σt is 1020 MPa, and the maximum value of the temporary strength σt, i.e. the stress that the alloy can withstand before fracture, is 1070 MPa. The oxygen content in the new powder is 13.22 at.%; immediately after laser exposure, the content decreases to 9.62 at.%, but after sieving it reaches 14.83 at.%.

Significance of the work - one of the key advantages of additive manufacturing is the realization of sustainable development and the possibility of reducing the consumption of raw materials. Therefore, it is extremely important to understand the mechanisms of metal powder degradation and to have a procedure for strictly controlling powder degradation under conditions of repeated use, especially in real production conditions.

ЗМІСТ

ВСТУП 9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД 10
1.1 Характеристика та області застосування титанового сплаву 10
1.1.1 Ti6Al4V grade 23 (ELI) 10
1.1.2 Сфери застосування порошку Ti6Al4V ELI 14
1.1.3 Селективне лазерне плавлення та його особливості 17
1.2 Вплив основних параметрів друку на властивості матеріалу 24
1.2.2 Захисна атмосфера 24
1.3 Сушка порошку 27
1.4 Висновки та постановка завдань досліджень 28
2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ 29
2.1 Характеристика вихідних матеріалів 29
2.2 Дослідження порошку на гранулометричний склад 30
2.3 Визначення зміни хімічного складу Ti6Al4V 31
2.4 Аналіз мікроструктури 32
2.5 Дослідження зразків на розтяг 34
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ 36
3.1 Визначення гранулометричного складу 36
3.2 Дослідження фізико-хімічних властивостей порошку 38
3.3 Аналіз мікроструктури 42
3.4 Дослідження зразків на розтяг 45
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В 50
НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 50
4.1. Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів 50
4.2 Аналіз параметрів приміщення 53
4.3 Мікроклімат робочої зони 55
4.4 Аналіз освітленості приміщення 57
4.5 Аналіз рівня шуму 58

4.6 Електробезпека 59
4.7 Безпека в надзвичайних ситуаціях 60
4.7.1 Пожежна безпека 60
4.7.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях 61
4.8 Висновки до розділу 4 63
ВИСНОВКИ 64
CONCLUTIONS 65
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ 66

ВСТУП

Для технології селективно лазерного плавлення (SLM) сировина з якою виготовляють виріб, в нашому випадку – порошок, має значний вплив на якість кінцевого виробу. Тим більше, що генезис «цифрового виробництва» має на меті повторне використання порошку. Дана концепція стає буде привабливою з точки зору сталого виробництва та економіки. Однак для того щоб було відповідальне споживання та виробництво необхідно створити удосконалену процедуру повторного використання порошку. Важливим також є опис кожної групи металевих матеріалів з граничними вимогами до стану порошку. Тобто, скільки циклів переробки є найбільш підходящий та безпечний без втрати якості на готовий виріб.

Одним із поширених матеріалів, що використовує дана технологія є високоміцний двофазний титановий сплав – Ti6Al4V. У авіакосмічній галузі конструкційний матеріал має широку сферу застосування через свою корозійну стійкість, сумісність із композиційними матеріалами та високу питому міцність. Значний відсоток використання сплаву припадає на медичну галузь, адже матеріал має чудову біосумісність з тканинами людини, завдяки швидкому утворенні тонкого шару кисню на поверхні матеріалу, а також характеризується низькою вагою та стійкістю до корозії.

Проблеми, пов’язані з дією лазера на частинки, які зазнають високих рівнів концентрованої енергії, особливо ті, що знаходяться в безпосередній близькості до басейну розплаву викликають серйозні занепокоєння в стійкості процесу адитивного виробництва. Це говорить про надзвичайну важливість в розумінні механізмів деградації металевого порошку та тримання під контролем всіх змін властивостей в умовах багаторазового використання, особливо в реальних виробничих умовах.

Дипломна робота має на меті встановити межі повторювання порошку титанового сплаву медичного призначення.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Характеристика та області застосування титанового сплаву

1.1.1 Ti6Al4V grade 23 (ELI)

Активний інтерес до сплаву Ti6Al4V характеризується його унікальними фізичними властивостями: високим співвідношенням міцність - вага, достатньою пластичністю, здатністю витримувати високі температури та високою корозійною стійкістю [1]. Сплав Ti6Al4V і його модифікація Ti6Al4V ELI (Extra Low Interstitials) і ці низькі інтерстиції забезпечують поліпшену пластичність і в'язкість руйнування, а також незначне зниження міцності. Найголовніше, сплав демонструє підвищену втомну міцність за високих циклів (без тріщин). Також він має знижений зміст домішок впровадження (O, N, C) і підвищену корозійну стійкість. За температури та тиску навколишнього середовища чистий титан має α-фазу з щільно упакованою гексагональною структурою, яка перетворюється на β-фазу з об’ємно - центрованою кубічною структурою приблизно при 890 °C.(рис.1.1)

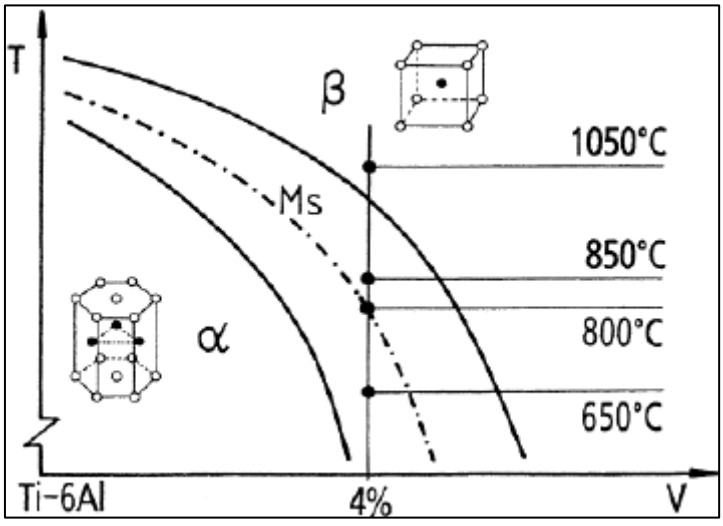


Рисунок 1.1 – Фазова діаграма Ti6Al4V[3]

Добре відомо, що механічні властивості цього сплаву залежать від його мікроструктури, особливо від форми й розміру α-зерен та розподілу β-фази. Титан і його сплави мають міцність на розрив від 210 до 1380 МПа, що відповідає міцності більшості легованих сталей. Щільність титану становить лише 56 відсотків від щільності сталі, а його стійкість до корозії схожа на щільність платини. Титан має високу температуру плавлення 3135°F (1725°C). Ця температура плавлення на 400°F (220°C) вища від температури сталі та приблизно на 2000°F (1100°C) вища за температуру плавлення алюмінію[4].

Існують різні класи даного металевого порошку в залежності від вмісту. В табл. 1.1 представлені деякі з них.

Таблиця 1.1 – Класи порошку титану [5]

Клас матеріалу	**Характеристика**
Grade 1	UNS(Unified Numbering System) R50250. Нелегований титан
Grade 5	UNS R56400. Титановий сплав (6 % алюмінію, 4 % ванадію)
Grade 11	UNS R52250. Нелегований титан плюс від 0,12 до 0,25 % паладію
Grade 12	UNS R53400. Титановий сплав (0,3 % молібдену, 0,8 % нікелю)
Grade 19	UNS R58640. Титановий сплав (3 % алюмінію, 8 % ванадію, 6 % хрому, 4 % цирконію, 4 % молібдену)
Grade 21	UNS R58210. Титановий сплав (15 % молібдену, 3 % алюмінію, 2,7 % ніобію, 0,25 % кремнію)
Grade 23	UNS R56407. Титановий сплав (6 % алюмінію, 4 % ванадію з надзвичайно низьким вмістом інтерстиціальних елементів, ELI)
Grade 41	UNS R56461. Титановий сплав (6 % алюміній, 1 % залізо)

Завдяки титановим сплавам в деяких галузях промисловості йде швидкий розвиток і успішне вирішення проблем, які отримують за допомогою методів зварювання. Ti6Al4V – це сплав α+β. В якості домішок виступає - кисень, азот, водень і вуглець, що значно пливають на механічні властивості. Азот та кисень є

альфа – стабілізаторами в частинах Ti6Al4V і зазвичай збільшують швидкість мартенситного перетворення. В таблиці 1.2 – 1.4. наведені фізико-хімічні властивості сплаву.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад сплаву марки 23 T6Al4V ELI [5]

Елемент	**Вміст, %**
Титан, Ті	88.09 – 91
Алюміній, Ал	5,5 – 6,5
Ванадій, В	3,5 – 4,5
Залізо, Fe	≤ 0,25
Карбон, С	≤ 0,080
Азот, Н	≤ 0,030
Гідроген, Н	≤ 0,0125
Інше	≤ 0,40

Таблиця 1.3 – Фізичні властивості сплаву 23 Ti6Al4V ELI [5]

Властивості	**Значення**
Щільність, г/см3	4,45
Точка плавлення, °С	1604 – 1660

Таблиця 1.4 – Механічні властивості сплаву 23 Ti6Al4V ELI [5]

Властивості	Значення
Міцність на розрив, МПа	860
Межа текучості, МПа	790
Коефіцієнт Пуассона	0,342
Модуль пружності, ГПа	113,8

Продовження таблиці 1.4

Модуль зсуву, ГПа	44,0
Подовження при розриві, %	15
Твердість, Брінель	326
Твердість, Роквелл	35
Твердість, Віккерс	341

Задля можливості отримання якісних виробів необхідно необхідний однорідний хімічний склад металевих порошків, сферична форма частинок з коефіцієнтом форми від 1,0 до 2,0 і вузький розподіл частинок за розмірами із середнім значенням від 40 до 70 мкм. Такі порошки мають малий коефіцієнт тертя між частинками і гарну сипучість, велику насипну густину. Небажаними є наявність внутрішніх пор і оксидних шарів. Оксидна плівка відіграє основну роль під час сфероїдизації частинок, адже на поверхні частинок порошку знижує змочуваність частинок краплею розплаву і призводить формування пористого шару.

На рисунку 1.2 зображено гранули порошку титанового сплаву Ti6Al4V[6,7].

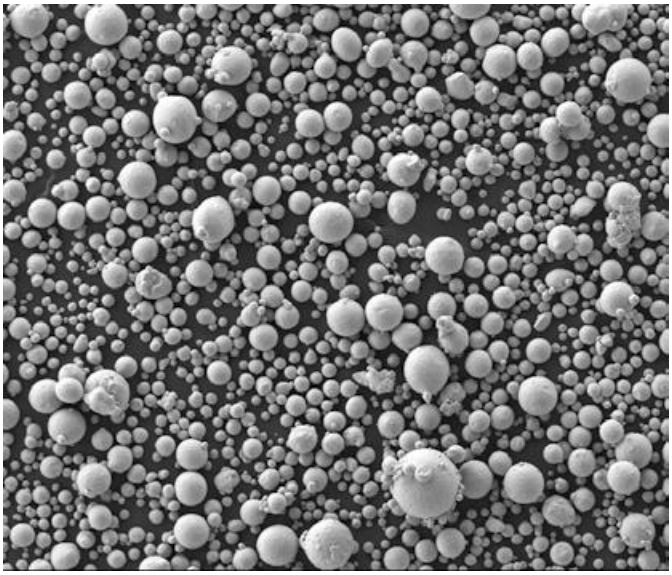


Рисунок 1.2 – Гранули порошку Ti6Al4V ELI [5]

1.1.2 Сфери застосування порошку Ti6Al4V ELI

Титановий сплав, досліджуваний у даній роботі був успішно представлений у другій половині минулого століття і зараз він вважається головним робочим елементом титанової промисловості. 6 % алюмінію, 4 % ванадію з надзвичайно низьким вмістом інтерстиціальних елементів, Ti6Al4V ELI застосовується в різних галузях. Таким чином, клас 23 зазвичай використовується для медичних імплантатів і для деяких інших вимогливих застосувань (наприклад, в аерокосмічній промисловості. У сплаві Ti6Al4V основні властивості титану, такі як жорсткість і термічні властивості, зберігаються, роблячи його значно міцнішим, ніж чистий титан[8].

Головні переваги титанових сплавів:

а) висока міцність: сплави мають високу міцність при цьому маючи низьку вагу, це ідеально підходить для застосувань, де важлива міцність, але де при цьому має значення вага, наприклад в авіації;

б) корозійна стійкість - титанові сплави мають чудову корозійну стійкість та можуть витримувати агресивні середовища, такі як морська вода або хлор;

в) висока температурна стійкість - сплави витримують високі температури, що є необхідним в авіаційній та космічній промисловості.

В аерокосмічній промисловості титан використовується для виготовлення жорсткості фюзеляжу, ходової частини або турбіни. Ti6Al4V є матеріалом, який часто обирають через меншу масу порівняно з конструкційних сталей, стійкість до температур, що виникають у польоті, стійкість до корозії, а також можливість з’єднання титану з композиційними матеріалами.

У автомобільній промисловості титанові сплави можна зустріти також. Їх застосовують у високопродуктивних автомобілях для зменшення ваги та підвищення ефективності, також мають провідне значення в деталях двигуна, вихлопних системах та інших складових автомобіля [9].

Значний відсоток використання сплаву припадає на медичну галузь. Зокрема це виготовлення:

а) ортопедичних штифтів та гвинтів;

б) ортопедичних кабелів;

в) затискачів для лігатур;

г) хірургічних скоб;

д) пружин;

е) ортодонтичних приладів;

є) кріогенних судин;

ж) пристроїв для фіксації кісток.

Металеві імпланти допомагають покращити якість життя та довголіття людини. Вони виступають замінниками частин скелету. Серед усіх застосувань значущими є вимоги до заміни хребта, тазостегнового та колінного суглобів Це зумовлено його біосумісністю з тканинами людини, адже на поверхні матеріалу утворюється тоненький шар кисню, що дозволяє кістці швидше вростати в імплант[10].

Фактичне клінічне застосування визначає вимоги до властивостей імплантатів, наприклад, стегнові імплантати вимагають чудової міцності на стиск і розтяг, тоді як зубні імплантати вимагають високої стійкості до втоми та зносостійкості. Крім того, очікується, що вони прослужать усе життя без відмови або ревізійної операції. Однією з проблем є те, що модуль пружності більшості сучасних металевих імплантатів набагато вищий, ніж модуль пружності кістки, яку потрібно замінити, наприклад, модуль пружності людської кістки коливається від 0,02–40 ГПа порівняно зі 110 ГПа для комерційно чистого титану (CP-Ti).), 190–210 ГПа для Co-Cr сплавів і 210–253 ГПа для нержавіючої сталі 316L. Решітки можна визначити як тривимірні (3D) структури з відкритими комірками, утворені компонуванням повторюваної типової елементарної комірки, що складається із з’єднаних опор або пластин. Розмір елементарної комірки може варіюватися від нанометрів до сантиметрів. Решітки не повинні містити ізольованих пор, але мають високу пористість (наприклад, >50% або навіть 70%) [11]. Однак адитивне виробництво (AM) може виробляти решітки з меншою пористістю без ізольованих пустот. Гратчаста конструкція забезпечує ефективний спосіб зниження модуля пружності та

міцності твердого матеріалу, а також інноваційну біологічну форму фіксації, сприяючи вростанню кісткової тканини в її відкритокомірчасті структури [12]. Крім того, решітоподібні відкриті клітинні структури є більш провідними для введення антибіотиків для усунення або контролю інфекції. Трабекулярна структура показана на рисунку 1.3.

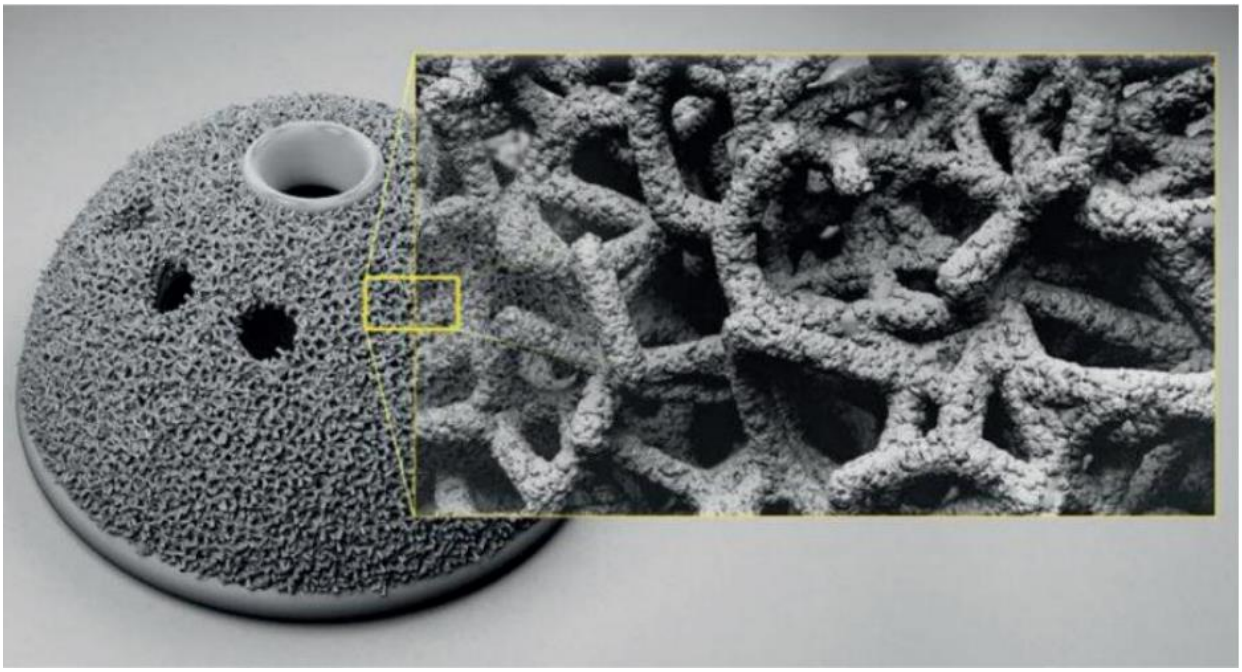


Рисунок 1.3 – Структура контактної поверхні імплантату [13]

Решітки Ti6Al4V, виготовлені за допомогою добавок, демонструють унікальні механічні та біологічні властивості завдяки своїй інженерній структурі. Ці атрибути дозволяють створювати інноваційний дизайн індивідуальних медичних імплантатів, які і відповідають передбачуваній хірургічній геометрії, імітують механічні властивості натуральної кістки та забезпечують кращу біологічну взаємодію з традиційними імплантатами [14].

1.1.3 Селективне лазерне плавлення та його особливості

Сплав можна формувати гарячим або холодним способом, але він повинен бути оброблений на повільній швидкості за допомогою високошвидкісних інструментів з карбіду вольфраму або на основі кобальту. Під час обробки рекомендується відповідна якість потоку охолоджуючої рідини та висока швидкість подачі. Ці проблеми спонукають до пошуку нових, економічно прийнятних і більш простих способів формування. Технології адитивного виробництва (АМ) зараз випробовуються в подібних випадках. Ці методи були започатковані випробуваннями, проведеними наприкінці 1960-х років у Меморіальному інституті Бателла (Колумбус, штат Огайо, США), а потім розроблені іншими. Одним із таких методів є селективне лазерне плавлення (SLM). Ця техніка використовує комбінацію лазерного плавлення та фрезерування для створення твердих тривимірних об’єктів[15].

SLM може характеризуватися локалізованим високим підведенням теплової енергії та відносно коротким часом взаємодії лазерного променя з обробленим матеріалом. Це призводить до швидкого затвердіння і відносно швидкого охолодження матеріалу. Це може вплинути як на мікроструктуру, так і на властивості матеріалу та призвести до значної залишкової напруги, що призведе до неприпустимої деформації виробу. Мікроструктура титану марки 23, отриманого селективним плавленням порошку з використанням сфокусованого лазерного променя, складається в основному з дрібного голчастого α'-мартенситу з гексагональною щільно упакованою (hcp) кристалічною структурою [16]. Ця фаза є метастабільною, тому під час подальшої термічної обробки вона може перетворюватися на суміш двох термодинамічно стабільних фаз, тобто α і β. Результуюча мікроструктура залежить від температури термообробки. Нижче 995 °C (тобто температура β-трансусу) з'являється пластинчаста мікроструктура з розміром і об'ємною часткою голок α-фази залежно від температури [17]. Вище 995 °C α'-фаза перетворюється на β-фазу з високотемпературним ростом зерен. При

температурі β-переходу ця фаза при охолодженні перетворюється на грубу пластинчасту двофазну мікроструктуру (тобто α+β).

Вибір параметрів сканування лазерним променем дуже важливий. Неправильні параметри можуть призвести до нестабільності басейну розплаву та призвести до небажаних термічних напруг, явищ сегрегації та розвитку нерівноважних фаз. Вплив різних параметрів процесу, таких як потужність лазера, товщина шару, швидкість сканування, на щільність, якість поверхні, мікроструктуру та механічні властивості продукту. Різні виробники використовують дещо різні комбінації параметрів, і ефективність процесу часто є одним із найважливіших факторів виробництва[18].

Селективне лазерне плавлення – є сучасним методом виготовлення деталей та вузлів складної геометрії, які складно відтворити в умовах традиційного виробництва. Хоча дане виробництво має безліч факторів від яких буде залежати якість продукції, їх можна розділити на основні групи: обладнання, матеріал, процес, деталь, фінішна обробка. Технологія LPBF(SLM) використовує волоконний лазер як джерело тепла для вибіркового сканування та плавлення металевих порошків шар за шаром [19]. Коли частинки розплавленого металу охолоджуються, вони твердіють, утворюючи компонент. Схематичний малюнок басейну розплаву показано на рисунку 1.4.

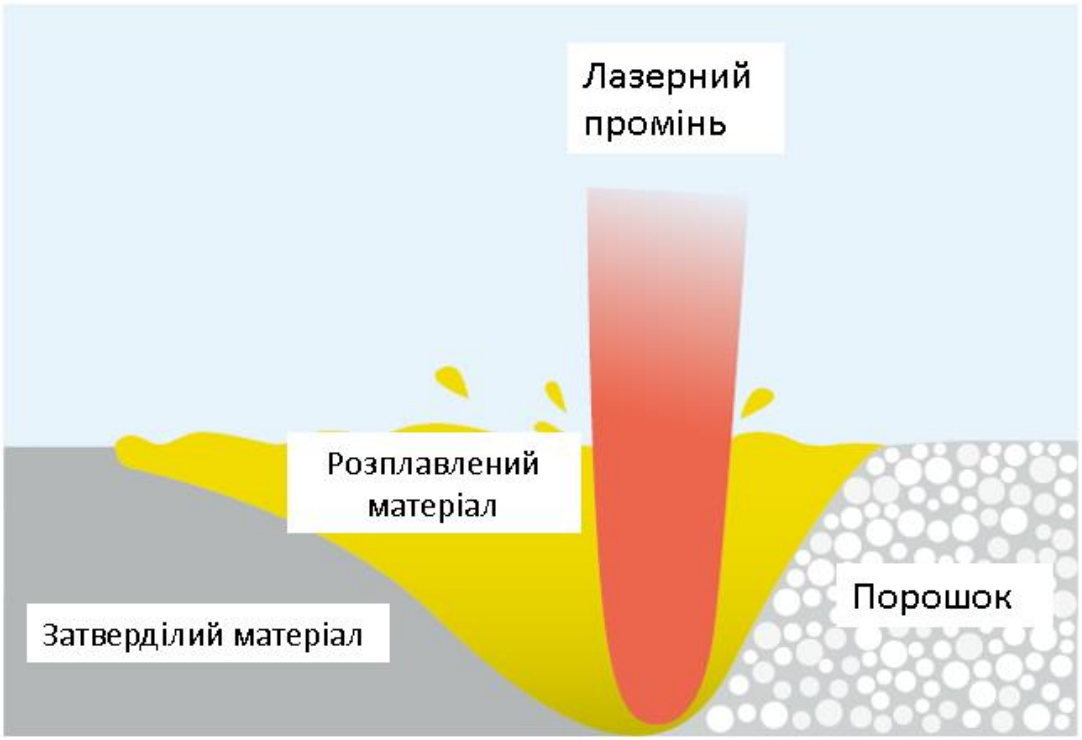


Рисунок 1.4 – Схема басейну розплаву при лазерному порошковому синтезі[19]

Сам процес починається з 3D-моделювання об’єкта, побудованого в CAD системі в форматі STL, в результаті отримуємо елемент, розбитий на воксельну структуру з певним набором параметрів, придатних для друку. При цифровій обробці модель розділяється на шари товщиною від 20 до 60 мікрон і формуються вектори руху лазерного променю. Процес виготовлення починається з нанесення шару металевого порошку, необхідного для друку одного шару, на металеву платформу, яка кріпиться до опорної конструкції і переміщається у вертикальному напрямку по осі Z. Процес друку відбувається всередині камери з інертним газом (зазвичай використовується аргон або азот),нагрітої до оптимальної температури друку, в якій підтримується строго контрольована атмосфера [20].

Уникнути окислення використовуваного матеріалу дає закрита камера наповнена аргоном. Потім волоконно - оптичний лазер сканує поперечний переріз деталі, сплавляючи металеві частинки. Коли шар закінчено, платформа рухається вниз, дозволяючи додати ще один шар порошку. Процес повторюється до тих пір,

поки не вийде остаточна частина. Потужність лазерного випромінювача зазвичай знаходиться в діапазоні від 200 Вт до 1000 Вт. Потім потрібно дати 3D-принтеру охолонути , а нерозплавлений порошок видалити з лотка, щоб побачити надруковану частину. Схема процесу представлена на рисунку 1.5.

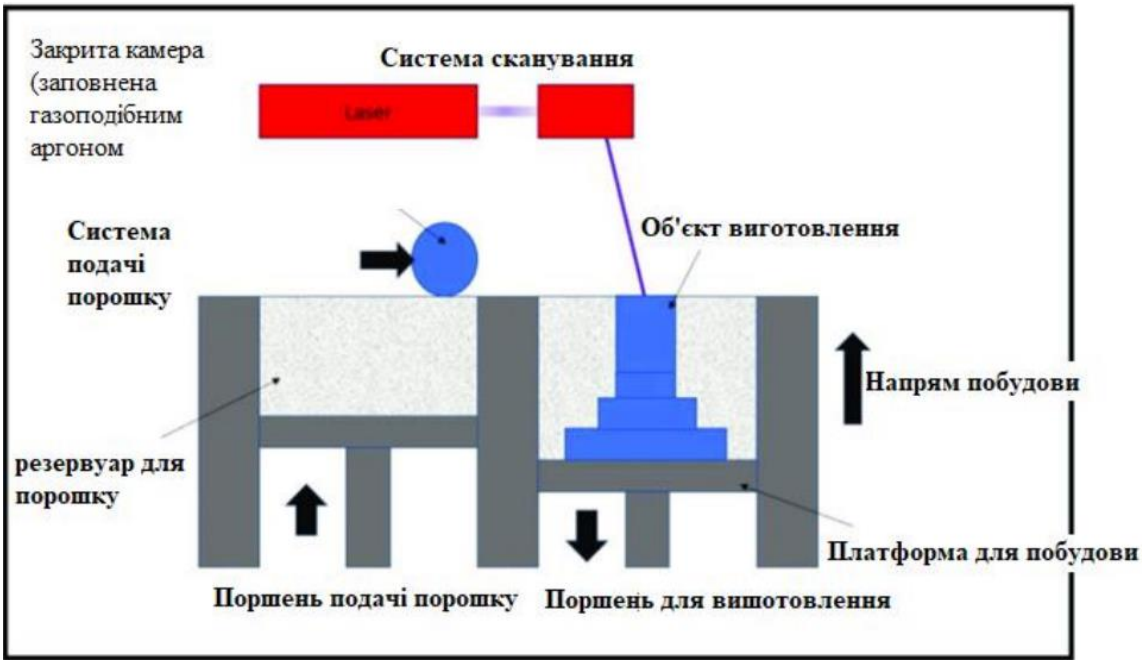


Рисунок 1.5 – Схема процесу селективно лазерного плавлення (SLM)[21]

Деталь кріпиться до робочої пластини завдяки підтримкам, оскільки вони зменшують явища викривлення та спотворення, які спостерігаються при високих температурах. Зазвичай їх видаляють методами різання або механічної обробки або електроерозією. Деталі можна термічно обробити для зменшення залишкових напруг і покращення механічних властивостей. Подальша пост обробка може включати етапи обробки з ЧПУ та процеси полірування для забезпечення кращої якості поверхні.

За допомогою процесу SLM можуть бути отримані зразки зі складною геометрією, які неможливо або складно виготовити іншими традиційними способами виробництва. Важливим показником продуктивності для металевих

конструкційних компонентів, виготовлених за допомогою добавок, є досягнення механічних властивостей, порівнянних або навіть кращих, ніж їх ковані аналоги.

Для Ti6Al4V, виготовленого за допомогою добавок, вимагається, щоб його мікроструктура була практично без пор і включала відповідні фази, які можуть мати міцність та пластичність.

Рисунок 1.6 – Схема установки для SLM[21]

Таким чином, технологія SLM дозволяє забезпечувати високу якість виробів (точність і унікальність геометрії, високий комплекс механічних властивостей, висока щільність, однорідність мікроструктури і хімічного складу) [21].

1.1.4 Детальний опис технологічної операції виготовлення методом SLM

На рисунку 1.7 представлена схема опису технологічних операції, які необхідні для виготовлення імпланту.

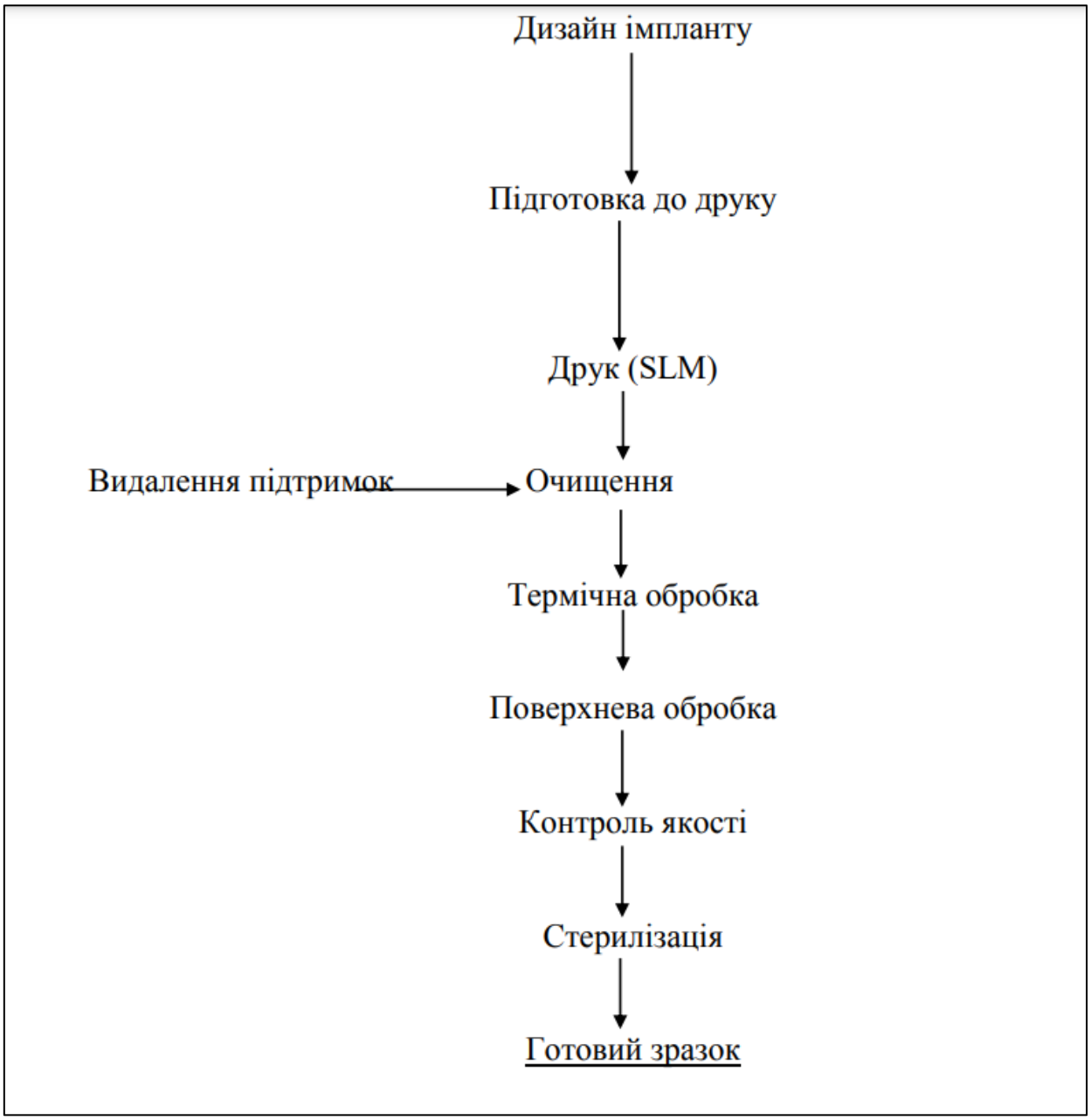


Рисунок 1.7 – Технологічна схема готового імланту виготовленого методом 3D друку

Дизайн імпланту. Початковою стадією є виготовлення в спеціальних програмах Fusion та Blender 3Д модель необхідного імпланту. Зазвичай вона базується на медичних зображеннях пацієнта (наприклад, МРТ або КТ). Такий підхід дає можливість зробити імплант конкретній людині, дивлячись на її захворювання.

Підготовка до друку. Коли 3Д модель готова, необхідно її перетворити в той формат, який може прочитати 3D-принтером, зазвичай це формат STL або OBJ. Потім файл завантажується в програмне забезпечення 3D-принтера. Там же проходить налаштування параметрів друку, такі як швидкість, температура, потужність лазера та ін[22,23].

Друк. Процес SLM включає в себе насипання шар за шаром порошку Ti6Al4V на платформу друку. Лазер проходить по цьому порошку і розплавляє його відповідно до зробленої 3Д моделі. Весь процес повторюється завдяки опусканні платформи на яку насипається порошок.

Очищення. Необхідно усунути надлишок порошку з деталі. Дану операцію можна зробити за допомогою спеціальної щіточки. Далі цей порошок збирається і повторно використовується.

Видалення підтримок. Друк відбувається за допомогою підтримок, щоб запобігти небажаній деформації. Щоб прибрати їх використовують спеціальні інструменти або машинне оброблення [24].

Термічна обробка. Обов’язково, для запобігання внутрішніх напружень деталь проходить термічну обробку і остаточно набуває потрібних властивостей.

Поверхнева обробка. Вироби без обробки мають шорстку і непідходящу для медицини поверхню. Тому необхідно зробити покращення за допомогою таких методів, як полірування, покриття чи хімічне травлення.

Контроль якості. Обов’язково після всіх попередніх операцій, виріб піддають контролю якості, залежно від поставлених вимог.

Стерилізація. Перед тим як передавати імплант лікарю, обов’язково проводиться стерилізація в ультразвуковій ванні в розчині спирту.

Під час формування залишкових напружень, крім високих швидкостей охолодження і постійного сусідства рідкого і твердого металу у процесі побудови деталі, важливим фактором є нерівномірність розподілу залишкових напружень, пов’язаних з геометрією: наявність виступаючих частин, переходів від товстого до тонкого перерізу, гострокутних отворів. Якщо рівень залишкових напружень перевищує границю текучості, то вони можуть призвести до деформації деталі. Ще

більш небезпечним є здатність залишкових напружень проявлятися згодом — коли вже після обробки готова деталь механізму раптово і швидко починає зношуватися внаслідок виходу розмірів за межі допусків. Виготовлення деталей технологією SLM в області контуру (краю) масивного виробу виникають напруження стиснення, що супроводжується утворенням ряду дефектів[25]: зміни первісної форми (викривлення) виробу [26], утворення пор і розшарування між новим і холонучим металом через зміни його геометрії, виникнення мікротріщин, формування вираженої текстури, це призводить до зниження механічних властивостей і їхньої анізотропності. Тому важливим є мінімізувати залишкові напруження у процесі виготовлення деталей методом SLM. Для запобігання відхилень в геометрії деталі, необхідно враховувати співвідношення між щільністю питомої енергії, яка підводиться, і її поглинанням під час процесу [26]. Однак оптимальні технологічні параметри [27] і стратегії побудови SLM-процесу для металевих матеріалів складно передбачити, оскільки якість виробу залежить від великої кількості факторів.

1.2 Вплив основних параметрів друку на властивості матеріалу

1.2.2 Захисна атмосфера

Існують різні чинники, які значною мірою впливають на властивості матеріалу, серед них: умови середовища в камері побудови, стратегія сканування і температура процесу. Для отримання бажаних властивостей, якості і геометрії виробу надзвичайно важливо обирати оптимальні параметри процесу SLM. Умови середовища у камері побудови потребують контрольованої (інертної) атмосфери з низьким вмістом кисню для запобігання окислення, утворення пор у кінцевому виробі і зниження твердості всього агломерату[28]. Уникнення негативних наслідків плавлення досягається за рахунок поєднання надлишкового тиску інертного технологічного газу (аргону, гелію або азоту) і вакуумної відкачки для видалення повітря з робочого простору. Розплавлений титан має високу реакційну здатність, тому, щоб запобігти цій реакції з газами, присутніми в повітрі, виробнича камера наповнюється аргоном, а рівень кисню зазвичай контролюють нижче 0,2 мас.%.

Застосування в процесі плавлення газів високої чистоти, а також правильний підбір хімічного складу атмосфери дають можливість комбінувати елементи, особливо вразливі до окислення, зокрема титан через його високу спорідненість до кисню. Основні властивості захисних газів представлені в таблиці 1.5

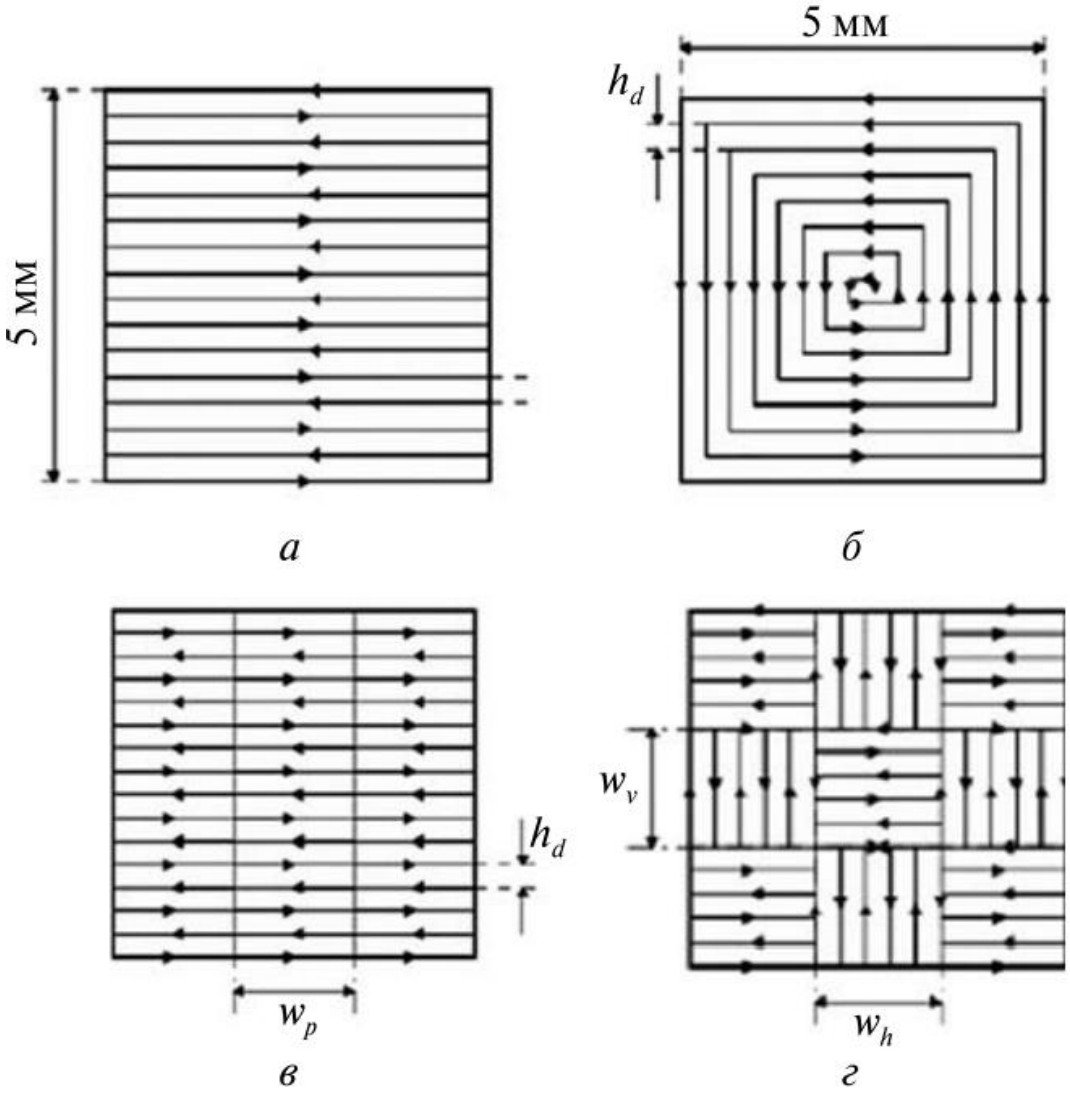
Таблиця 1.5 – Основні властивості захисних газів [29]

Характеристика речовини	Азот	Гелій	Аргон
Молярна маса	28	4	40
Температура плавлення, °С	-210	-268,9	-189,4
Точка кипіння, °С	-195,8	-	-185,9
Критична температура, °С	-147	-267,9	-122,5
Температура займання, °С	негорючий	негорючий	негорючий
Відносна щільність газу (повітря = 1)	0,97	0,14	1,38
Перший потенціал іонізації, еВ	14,54	24,46	15,68

1.2.3 Стратегія сканування

Штрихування лазером або стратегія руху променя лазера — це траєкторія, яку проходить лазерний промінь по поверхні шару металевого порошку при заливці основного тіла і контурів виробу [30]. У процесі SLM тепловий градієнт виникає від верхнього шару до попереднього шару, що призводить до того, що зерна мають тенденцію до зростання вздовж напрямку теплового потоку, чим визначається пріоритетний напрям зростання зерна. Таким чином, один напрямок стає основним напрямком росту зерен після затвердіння шару. Тому стратегія лазерного сканування чинить істотний вплив на текстуру виготовленого виробу SLM [31].

Є ряд різних стратегій руху лазерного променя у шарі, який сплавляється (рис.1.8).



а – паралельне сканування; б – спіральне сканування; в – різноспрямоване паралельне сканування; г – сканування у шаховому порядку

Рисунок 1.8 – Види стратегії сканування [32]

Деякі особливості геометрії деталей (звисаючі краї, похилі поверхні, тонкі стінки, тонкий профіль, змінний переріз, отвори) вимагають спеціальних умов сканування, наприклад подвійний обхід по контуру тонкого профілю, перерозподіл енергії лазерного випромінювання у пучку, а також, можливо, зміна потужності і швидкості сканування лазерного променю. Передові процеси виготовлення деталей завжди прагнуть підвищити якість кінцевого виробу, тому зосереджуються на мінімізації ефектів внутрішніх напружень [32,33].

1.3 Сушка порошку

Операція сушки порошку є надзвичайно важливою, адже під час роботи матеріал забирає на себе велику кількість вологи, через що відбувається зменшення текучості, а це в подальшому зменшує міцність[33]. Тому щоб запобігти небажаних агломератів, порошок після кожного процесу другу висушується в сушильній камері, з контролюванням температури 70° та витримці 8 годин у вакуумі (-1 атм) та охолодженні разом з сушильною шафою (рис.1.9). Потім порошок знаходиться весь час під вакуумом.

Рисунок 1.9 – Шафа сушильна вакуумна СВ-30 [33]

1.4 Висновки та постановка завдань досліджень

Проаналізувавши знайдені літературні дані визначено, що якість і характеристики порошку в процесах плавлення шару відіграють важливу роль . Порошок титанового сплаву, який використовується для процесу лазерної плавки в порошкових шарах (L-PBF), є достатньо дорогим. Одним із рішень є включення стратегії переробки порошку, що дозволяє рекуперувати невикористані або відкриті частинки порошку після виробництва, поповнити їх і використовувати для майбутніх зборів. Однак у час процесу L-PBF частинки порошку піддаються впливу високого рівня концентрованої енергії лазера. Особливо те, що знаходиться в безпосередній близькості від ванни розплаву, призводить до утворення бризків і агломерованих частинок. Ці частинки можуть осісти на порошковому шарі, що потім впливає на розподіл частинок за розмірами та однорідністю шару.

Завдання дослідження полягає в тому, щоб проаналізувати порошок Ti6Al4V (Grade 23) з наднизьким вмістом проміжних частинок (ELI) після максимальної кількості ітерацій повторного використання, перевіряючи зміну властивостей порошку на послідовних етапах повторного використання.

2 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У цьому розділі представлені експериментальні методики, які використовувались для дослідження гранулометричного, хімічного складу порошку та дослідження на розтяг.

2.1 Характеристика вихідних матеріалів

В даному дослідженні використовувався порошок ELI Ti6Al4V, отриманий канадською фірмою AP&C, згідно ASTM F3049-14 [42]. До порошків для адитивного друку, згідно ASTM , висуваються особливі вимоги, зокрема це – сферична форма часток, що сприяє максимально компактному укладанню шару та полегшує процес спікання електронним чи лазерним променем. Суміш перевозиться у повітронепроникних контейнерах з вологопоглиначем. Частинки первинного порошку знаходились у діапазоні із розміром часток від 10 до 100 мкм. Приблизно 85% часток мали розмір від 40 до 80 мкм. Даний титановий сплав часто використовується у медицині, зокрема в ортопедичних імплантах, завдяки своїм властивостям, що поєднують високу міцність, низьку щільність та добру біологічну сумісність з тканинами людського організму. Він є сплавом титану з додаванням 6% алюмінію та 4% ванадію та інших легуючих добавок (табл. 2.1). [35]

Таблиця 2.1 – Хімічний склад порошку Ti6Al4V Grade 23 (мас.%) [36]

Елемент	Ti	Al	V	O	N	C	H	Fe	Y	Інші ел., кожен	Інші ел., всього
мін.	Решта	5,50	3,50	-	-	-	-	-	-	-	-
макс.		6,50	4,50	0,13	0,05	0,08	0,012	0,25	0,005	0,10	0,40

Однорідна мікроструктура порошку гарантує, що кожна частинка має подібну структуру та склад, що сприяє однорідним механічним властивостям виготовлених імплантів. Консистенція порошку визначає його фізичні характеристики, такі як розмір та розподіл частинок, що можуть бути контрольовані для досягнення бажаної якості та надрукованості. Завдяки цьому, порошок має гарні фізико-механічні властивості, які більш детально представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Фізико-механічні властивості порошку Ti6Al4V Grade 23[37]

Розмір порошку, мкм	20 - 80
Щільність сплаву, г/см^3	4,45
Межа міцності на розрив, МПа	828
Межа текучості (0.2% відхилення), МПа	759
Відносне видовження, %	10

2.2 Дослідження порошку на гранулометричний склад

Для даного дослідження використали базовий сферичний газорозпилений порошок Ti6Al4V. Експериментальний набір складався з чотирьох видів зразків: свіжий порошок, робочий порошок до просіву, відсів (не використовується) та робочий порошок після просіву. Дане дослідження проводилось за допомогою приладу Bettersizer S3 Plus (рис.2.1). Прилад приймає діапазон розмірів від 0,01-3500 мкм. Для визначення гранулометричного складу було прийнято такі параметри:

а) затемнення – 5,6 %;

б) залишок – 2, 832%;

в) розмах – 0,93%

г) джерело живлення – AC220V 50Гц, потужність хоста – 100 Вт;

д) джерело лазера – DPSSL накачування, зелене світло 532нм, потужність хоста – 5МВт[37].

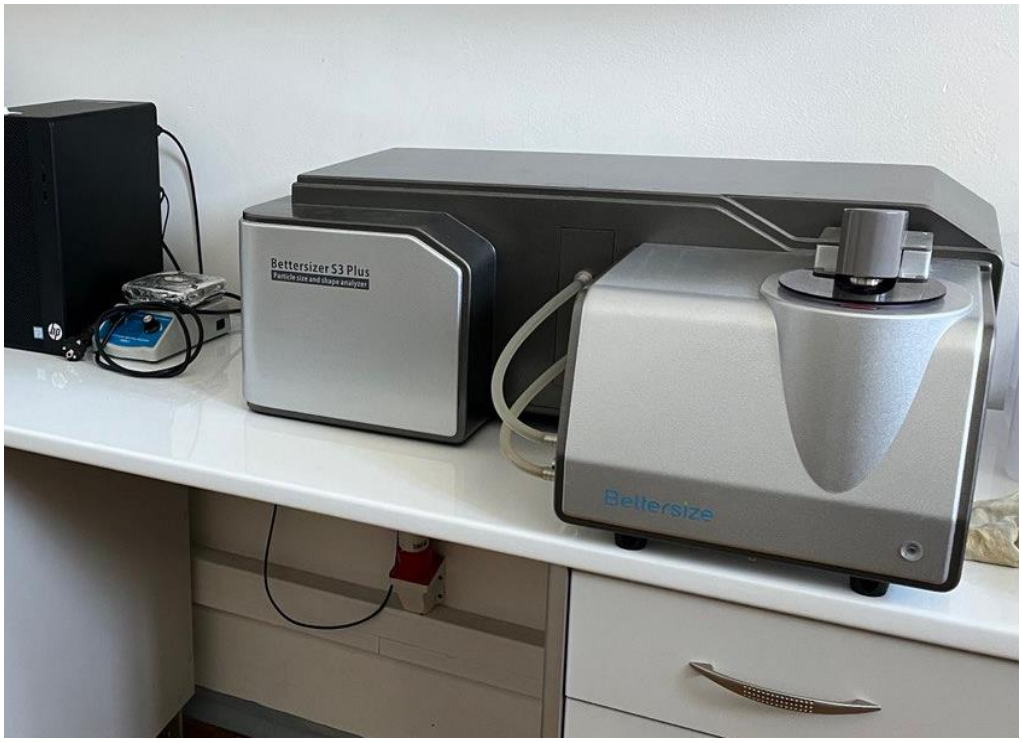


Рисунок 2.1 – Лазерний аналізатор розміру частинок Bettersizer S3 Plus [34]

2.3 Визначення зміни хімічного складу Ti6Al4V

Дослідження зразків полягало у вивчені їх мікроструктури та встановлені зміни хімічного складу. Завдання було зроблене за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM) із польовим емісійним пістолетом (рис. 2.2). Цей прилад дозволяє отримати високороздільні зображення поверхні зразків і проводити аналіз їхньої мікроструктури.

Рисунок 2.2 – Скануючий електронний мікроскоп Axia ChemiSEM [35]

За допомогою двох методів формування пучка в тонкий зонд: електромагнітні лінзи та магнітна імерсія, було визначено точний хімічний склад титанового порошку. Зокрема найбільш цікаві елементи такі як Ti, Al, V, O. Електронна колона з джерелом польової емісії Шоттки забезпечує стабільні високі струми в поєднанні з високою роздільною здатністю, це дозволяє отримати розділення до 1,0 нм при 1 кВ (без використання уповільнення пучка), а також виконувати енергетичну і зарядову фільтрацію сигналів.

2.4 Аналіз мікроструктури

Мікроскопічні дослідження спрямовані на вивчення внутрішньої будови матеріалу були зроблені на установці показаній на рисунку 2.3.

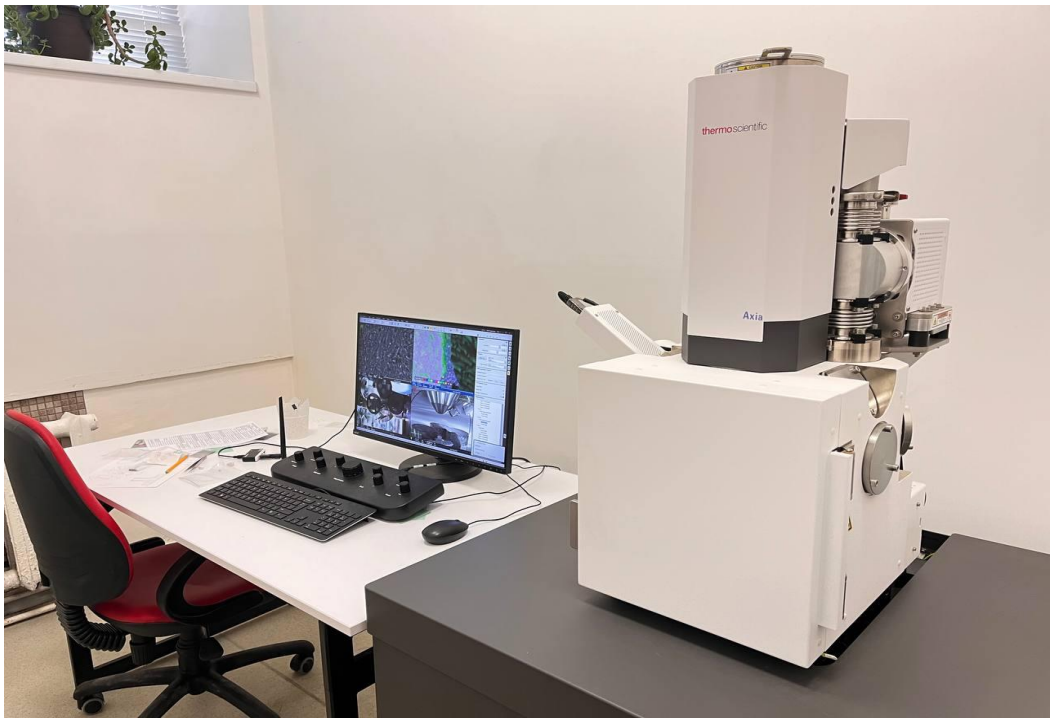


Рисунок 2.3 – Робоче місце скануючого електронного мікроскопу Axia ChemiSEM[35]

Скануючий електронний мікроскоп – це прилад для спостереження і фотографування структури металів і сплавів, що використовує відбите світло від непрозорого об'єкта – шліфа. Набір об'єктивів і окулярів забезпечує в сучасних мікроскопах корисне збільшення до 2000 разів. Axia є простим у використанні та має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, має безліч особливостей, які роблять його ідеальним рішенням для дослідження параметрів різноманітних матеріалів, наноструктур, мікрорельєфу поверхонь об’єктів різного складу та походження.

Дослідження проведено для виявлення змін внутрішньої будови сплаву під впливом термічної обробки або механічного впливу на сплав, мікротріщини і багато іншого.

2.5 Дослідження зразків на розтяг

Спостерігання за поведінкою матеріалу і визначення його характеристик міцності і пластичності при розтягу – один із основних і найбільш розповсюджених видів випробувань. Отримані в результаті експерименту характеристики дозволяють зробити висновки про міцність матеріалу при статичних навантаженнях, обирати матеріал для конструкції, що проектується і вважаються основними під час розрахунків деталей машин, елементів конструкцій і споруд на міцність. Задля оцінки механічної поведінки отриманих сплавів проводилося випробування на одновісний розтяг та циклічне навантаження за допомогою машини INSTRON 5966 при постійній швидкості деформації, при кімнатній температурі (рис.2.4).

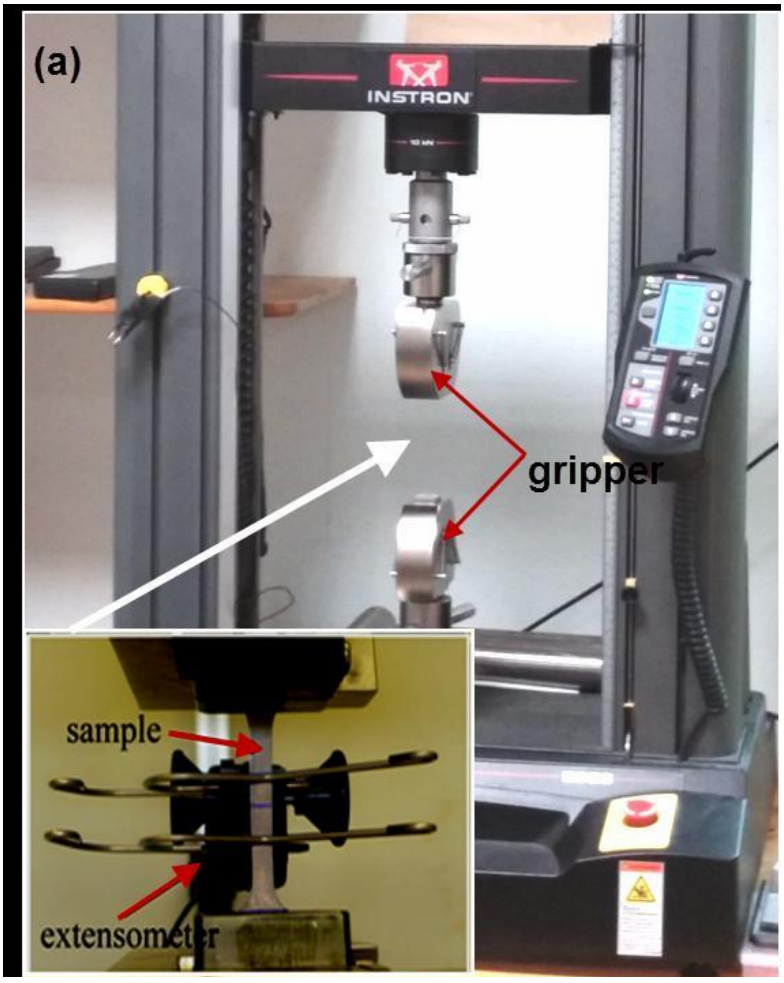


Рисунок 2.4 – Установка INSTRON 5966 для випробування на розтяг [36]

Для випробувань на розтяг, відповідно до ГОСТ 1497-84 (ICO 6892-84) застосовують пропорційні циліндричні зразки діаметром d від 5 мм (рис. 2.5) .

Рисунок 2.5 – Циліндричні зразки для випробування

Нормальна початкова розрахункова довжина зразка повинна становити:

$$l_0 = 10d_0,$$

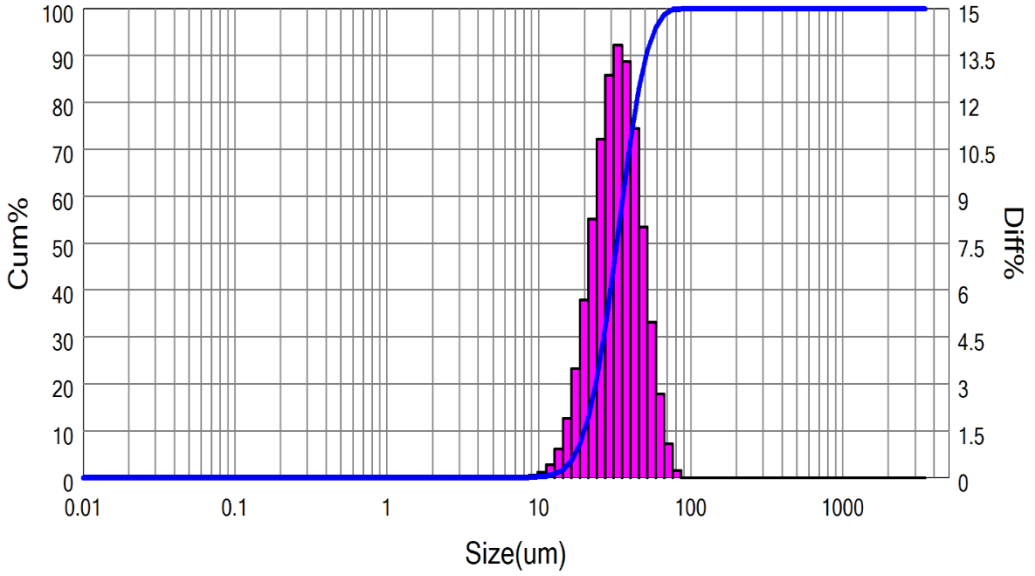
де d_0 - початковий діаметр поперечного перерізу зразка, d=10мм.

Зразки надруковані в вертикальній орієнтації. Перед проведенням дослідження на розтяг пройшли термічну обробку в сушильній шафі. Після чого було проведено механічну обробку , зняття підтримок, та оброблення даних деталей у піскоструминній камері.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Визначення гранулометричного складу

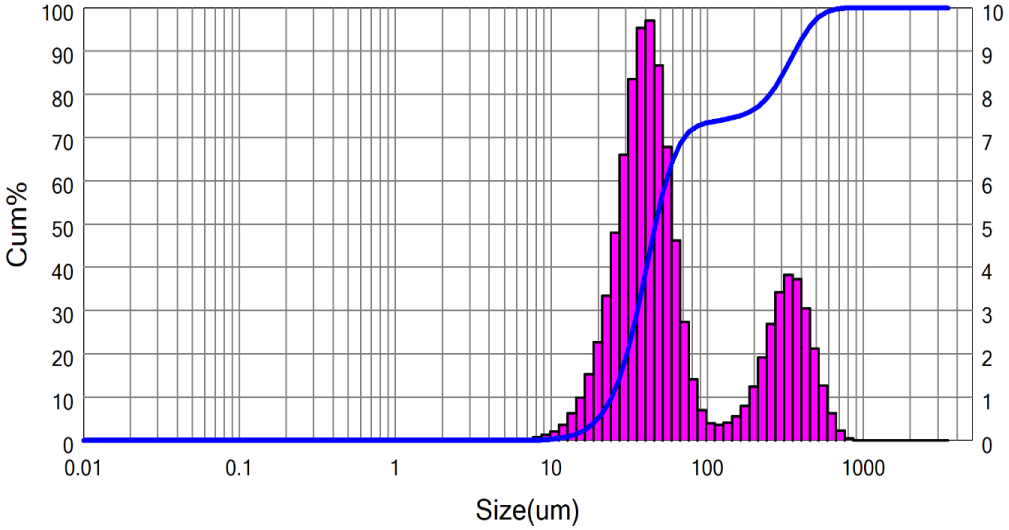
На рисунках 3.1–3.4 зображено розподіл за гранулометричним складом для різних видів зразків: свіжий порошок, робочий порошок до просіву, відсів (не використовується) та робочий порошок після просіву[37]. На рисунку 3.1 можна побачити, що основний розмір частинок припадає від 20 до 100 мкм.



Diam um	Percent
0.200	0.00
0.500	0.00
1.000	0.00
2.000	0.00
5.000	0.00
10.00	0.15
20.00	9.73
45.00	82.07
75.00	99.75
100.0	100.00

Рисунок 3.1 – Зерна свіжого порошку Ti6Al4V - розподіл за гранулометричним складом

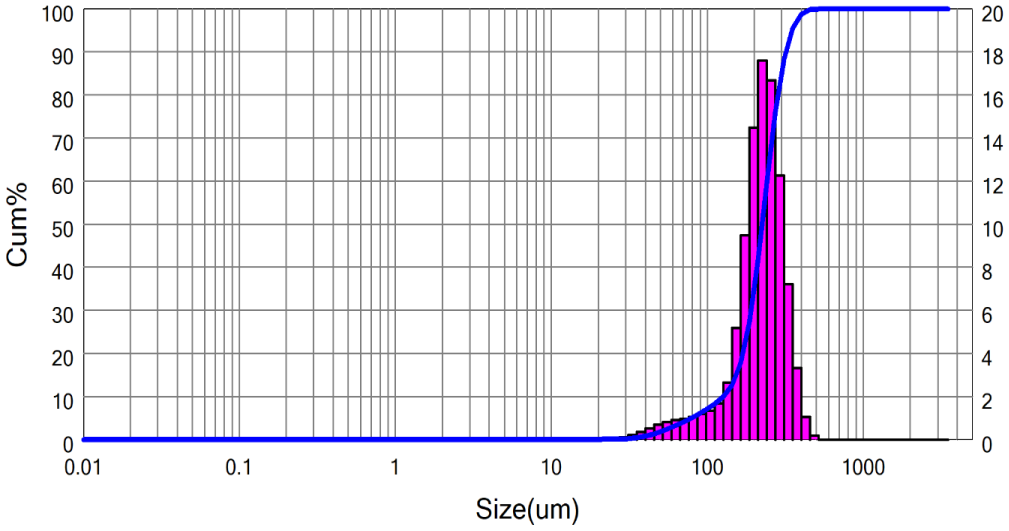
На рисунку 3.2 постерігається більш складніша картина, частинки присутні такі як і на попередньому графіку, але також є значна частина від 100 до 800 мкм, такий розбіг є занадто великий, тому даний порошок потребує просіву. Після нього всі максимально дрібні та великі, які з’єдналися з бризками частинки підуть у відсів, а середнього розміру порошок буде придатний для подальшого використання.



Diam um	Percent
45.00	47.55
75.00	71.14
100.0	73.44
200.0	76.58
300.0	84.26
400.0	92.73
500.0	97.45
600.0	99.29
700.0	99.88
800.0	99.99

Рисунок 3.2 – Зерна робочого порошку Ti6Al4V до просіву - розподіл за гранулометричним складом

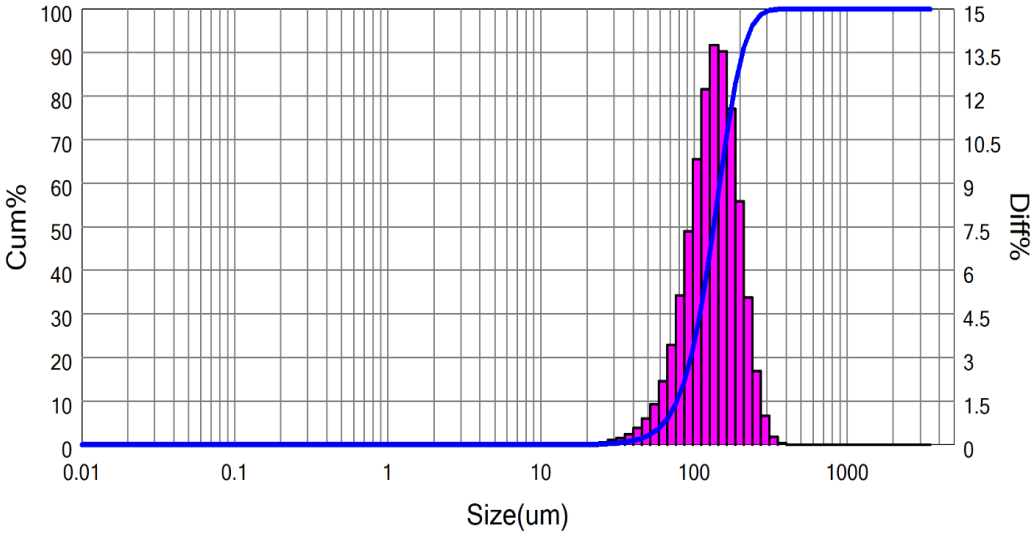
На рисунку 3.3 вміст частинок від 200 до 500 мкм найбільший, тому даний порошок було визнано, як непридатний до подальшого використання. Адже основна маса частинок має розмір 254,6 мкм, що є занадто великі для використання в медичній галузі.



Diam um	Percent
5.000	0.00
10.00	0.00
20.00	0.01
45.00	1.22
75.00	4.55
100.0	7.10
200.0	35.29
300.0	85.50
400.0	98.81
500.0	100.00

Рисунок 3.3 – Зерна відсіву Ti6Al4V - розподіл за гранулометричним складом

На рисунку 3.4 вже відсіяний порошок, в якому залишилися частинки середнього розміру, від 75 до 400 мкм найбільший, тому даний порошок буде використовуватись для друку далі.



Diam um	Percent
2.000	0.00
5.000	0.00
10.00	0.00
20.00	0.00
45.00	1.36
75.00	8.85
100.0	23.19
200.0	87.64
300.0	99.52
400.0	100.00

Рисунок 3.4 – Зерна робочого порошку Ti6Al4V після просіву - розподіл за гранулометричним складом

3.2 Дослідження фізико-хімічних властивостей порошку

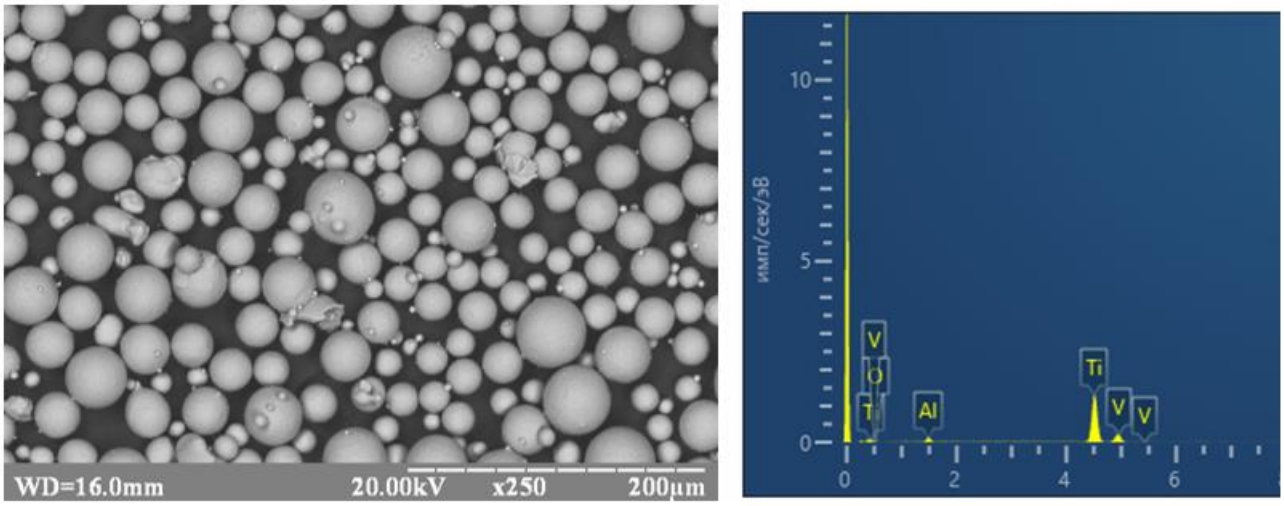
SEM-зображення особливостей і морфології поверхні частинок порошку були зроблені зі збільшенням 250×, 500×, як показано на рисунках 3.5 – 3.8. На зображеннях показано високосферичні властивості порошку з наявністю супутників на кожному зображенні. Аналіз зображення проводився на первинному (новий) і переробленому (робочий порошок до просіву, після та відсів) порошку для кількісних доказів розкладання. Первинний порошок містив високосферичні частинки. Однак більші агломеровані частинки бризок були присутні в переробленому порошку. Після просіву число агломерованих частинок значно зменшилось, що добре вплине на механічні властивості майбутньої деталі.

В таблицях 3.1 – 3.4 наведений хімічний склад кожного досліджуваного порошку. З даних таблиці можна визначити, що зокрема вміст оксигену в новому порошку складає 13,22 атомних % , відразу після лазерної дії , вміст зменшується до

9,62 %, але після просіву досягає 14,83 %. У відсіві ж вміст оксигену становить 8,26%, що майже в половину менше ніж в первинному порошку.

Не дивлячись на те, що використання інертного газу (зазвичай аргону) в технологічній камері присутнє, але так як в атмосфері залишається деякий відсоток кисеню, через високу хімічну спорідненість титану до нього, під час процесу друку відбувається швидке окислення разом з можливим поглинанням азоту і водню в металевий розплав. Крім того, порошкові бризки утворюються при взаємодії з лазером. Ці гарячі розпилені частинки розлітаються на великі відстані всередині технологічної камери і схильні до поглинання елементів. Розпорошені частинки існують у різних формах і розмірах і потрапляють на шар порошку, накопичуючись при багаторазовому використанні. Хоча великі розбризкані частинки видаляються шляхом просіювання, менші окислені частинки залишаються в порошку, збільшуючи його загальний вміст кисню.

Середній розмір частинок збільшується зі збільшенням циклів процесу, одним із можливих механізмів зменшення фракцій є можливість взаємодії дрібних частинок із повітрям.



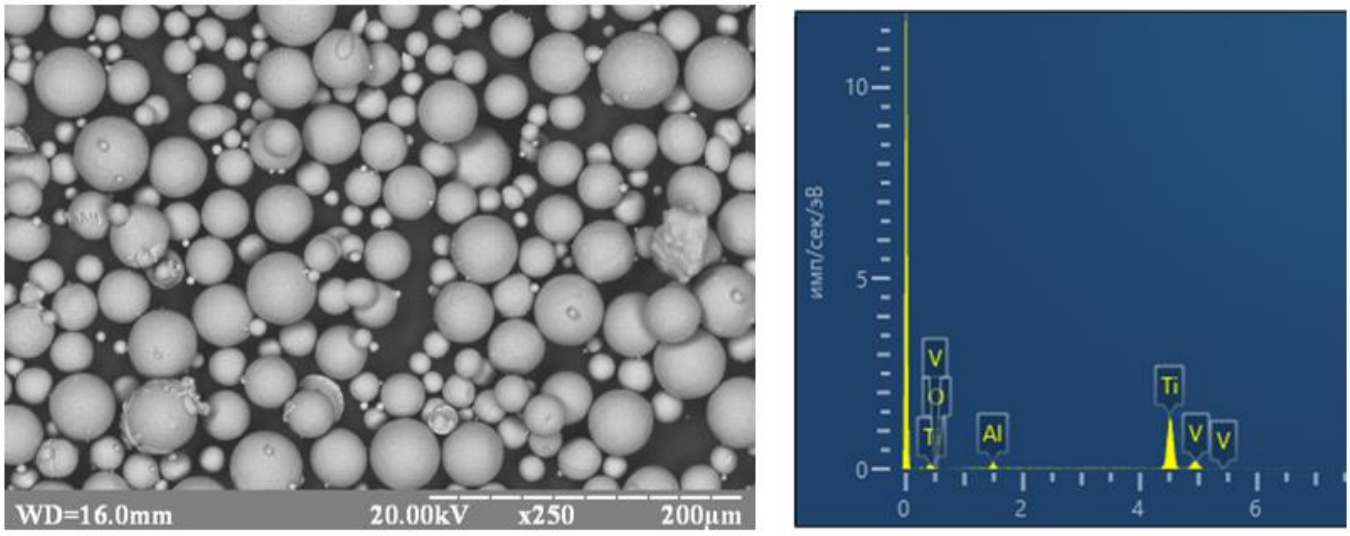
а б

а – загальний вигляд; б – розподіл за хімічним складом

Рисунок 3.5 – Зерна нового порошку Ti6Al4V

Таблиця 3.1 – Хімічний склад нового порошку Ti6Al4V

Спектр 1 Елемент	Тип лінії	Мас.,%	Похибка вимір., %	Атом.,%
Ti	K - серія	86,86	3,42	86,80
Al	K - серія	4,34	0,35	6,81
V	K - серія	3,81	0,58	3,17
O	K - серія	4,99	3,69	13,22
Разом	K - серія	100,00		100,00



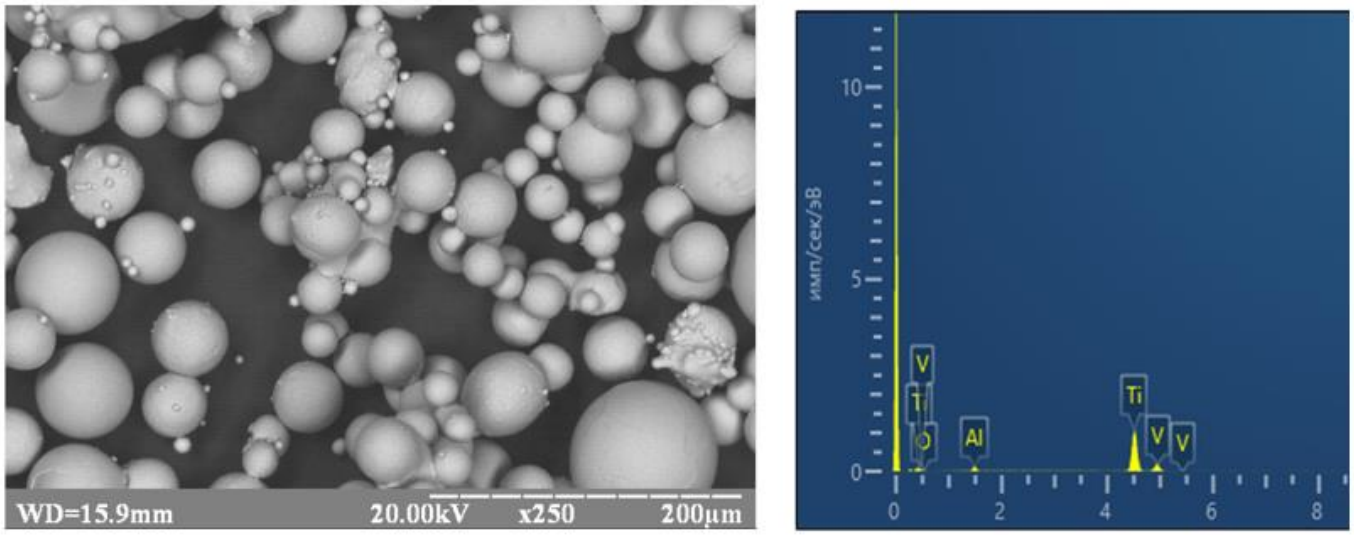
а б

а – загальний вигляд; б – розподіл за хімічним складом

Рисунок 3.6 – Зерна робочого порошку Ti6Al-4V до просіву

Таблиця 3.2 – Хімічний склад робочого порошку Ti6Al4V до просіву

Спектр 1 Елемент	Тип лінії	Мас.,%	Похибка вимір., %	Атом.,%
Ti	K - серія	87,98	3,8	78,90
Al	K - серія	5,83	0,47	9,29
V	K - серія	2,60	0,68	2,19
O	K - серія	3,58	4,09	9,62
Разом	K - серія	100,00		100,00



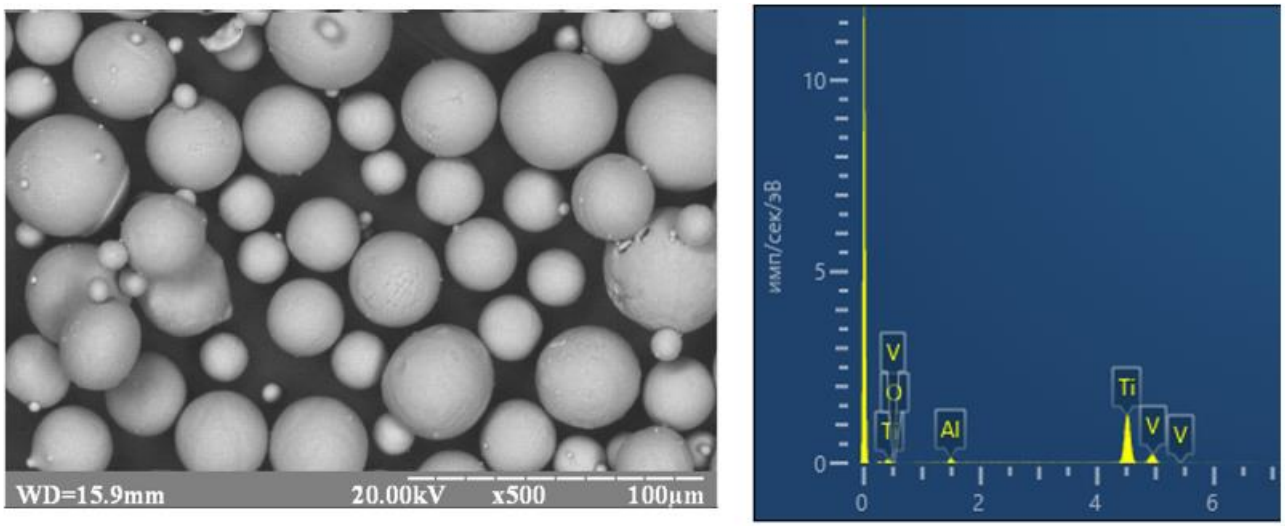
а б

а – загальний вигляд; б – розподіл за хімічним складом

Рисунок 3.7 – Зерна відсіву порошку Ti6Al4V

Таблиця 3.3 – Хімічний склад відсіву порошку Ti6Al4V

Спектр 1 Елемент	Тип лінії	Мас.,%	Похибка вимір., %	Атом.,%
Ti	K - серія	86,82	4,38	79,05
Al	K - серія	5,26	0,5	8,50
V	K - серія	4,89	0,74	4,19
O	K - серія	3,03	4,82	8,26
Разом	K - серія	100,00		100,00



а б

а – загальний вигляд; б – розподіл за хімічним складом

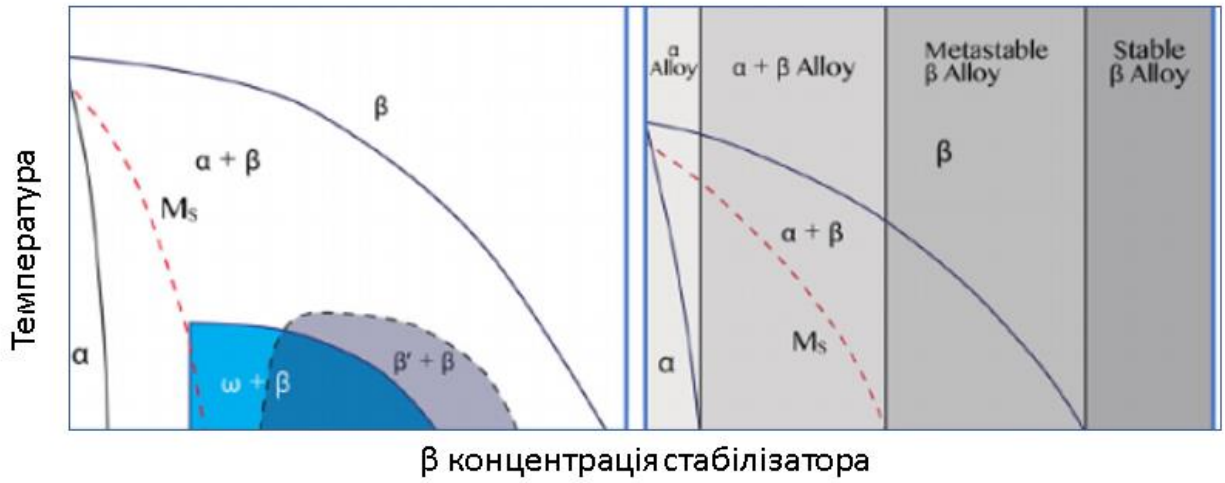
Рисунок 3.8 – Зерна робочого порошку Ti6Al4V після просіву

Таблиця 3.4 – Хімічний склад робочого порошку Т 6Al4V після просіву

Спектр 1 Елемент	Тип лінії	Мас.,%	Похибка вимір., %	Атом.,%
Ti	K - серія	85,31	3,67	74,66
Al	K - серія	4,22	0,37	6,55
V	K - серія	4,81	0,64	3,96
O	K - серія	5,66	4,00	14,83
Разом	K - серія	100,00		100,00

3.3 Аналіз мікроструктури

Сплави (α+β) Ті мають більший вміст β-стабілізаторів (рис. 3.9), і трансформуються мартенситно при швидкому охолодженні від бета-поля до кімнатної температури. Відповідно до рисунку 3.9 використаний в роботі порошок знаходить в області стабільного (α+β) – сплаву.

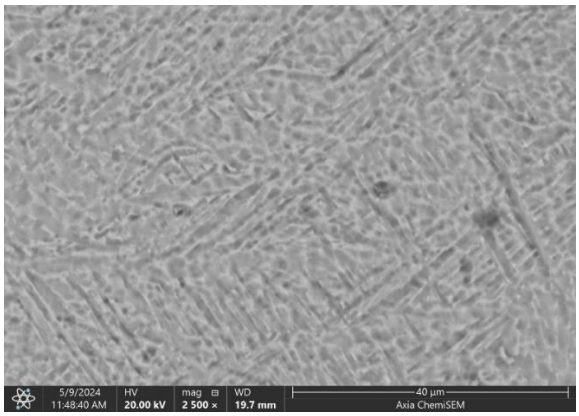


а б

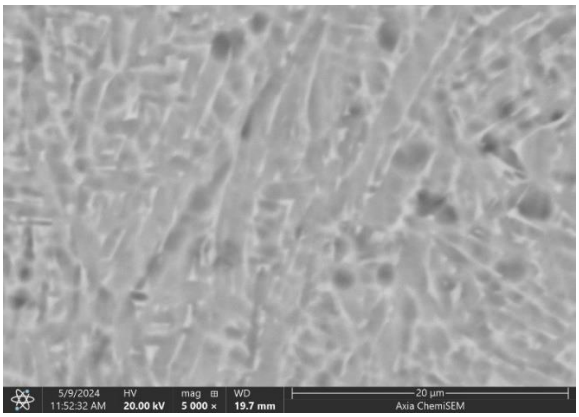
Рисунок 3.9 – Класифікація Ті-сплаву як функції β -стабілізатора (а); схема метастабільного (α+β) фазового поля (б) [38]

Отже, різні мікроструктури можуть бути отримані відповідно до різних термічних або термомеханічних циклів з метою оптимізації механічних властивостей цих сплавів. На рисунку 3.10 показано п’ять різних мікроструктур сплаву (а + ß) типу Ti6Al4V, який є найбільш широко використовуваним біомедичним сплавом, та можна чітко прослідити однорідність даних зразків.

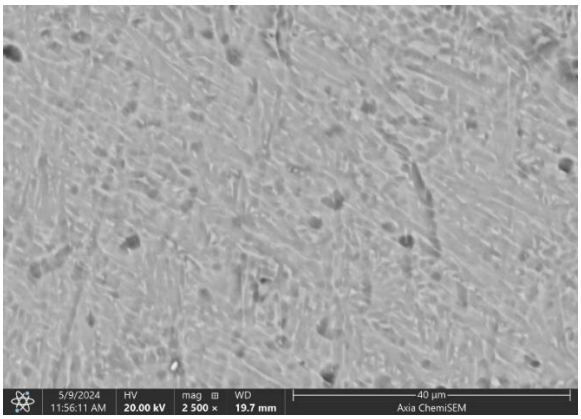
Пластинчаста мікроструктура показана на всіх 5 рисунках. У дослідженні було використано три надруковані методом SLM зразки та представлені у різних збільшеннях. Дана мікроструктура забезпечує вищі значення в’язкості руйнування порівняно з мартенситною, бімодальною і рівновісною мікроструктурою. Різна мікроструктура/механічні властивості Ti6Al4V впливають на корозійну поведінку сплаву. Поява двофазної мікроструктури зменшує корозійну поведінку через розподіл розчиненої речовини між пластинами а і ß та результатом гальванічної взаємодії між двома фазами.



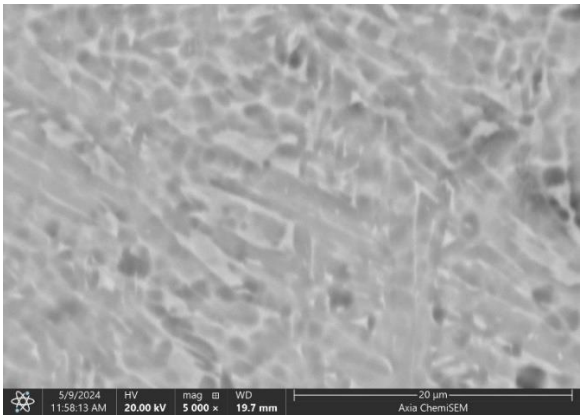
а



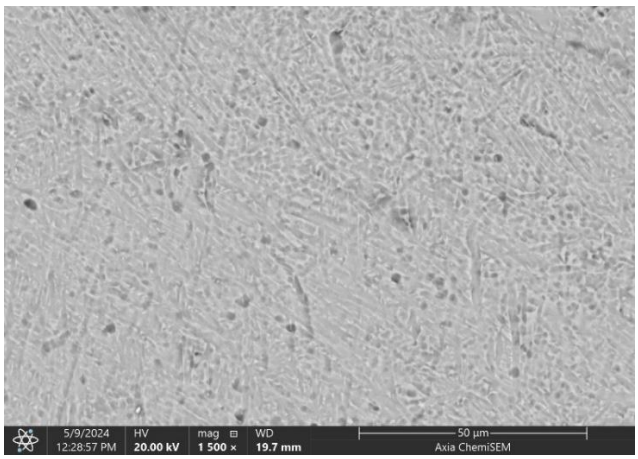
б



в



г



д

а – перший надрукований зразок при збільшенні 2500х; б – перший надрукований зразок при збільшенні 5000х складом; в - другий надрукований зразок при збільшенні 2500х; г - другий надрукований зразок при збільшенні 5000х; д - третій надрукований зразок при збільшенні 1500х

Рисунок 3.10 – Мікроструктура сплаву Ti6Al4V

На рисунку 3.10 постерігається характерна структура у вигляді повздовжніх перпендикулярних рисок. Стовпчасті β-зерна, паралельні напрямку побудови є більш вираженими, а велика кількість дрібних гострокутних α′ мартенситів з високими аспектними співвідношеннями спостерігається всередині стовпчастих зерен. Більшість α′-мартенситів зароджуються на попередніх границях β-зерен і ростуть всередині своїх батьківських β-зерен незважаючи на те, що деякі α′-мартенсити поширюються в сусідні β-зерна. α′-мартенсит має високу щільність заплутаних дислокацій, які можуть ефективно пристосовуватися до мартенситного перетворення. Існування цих дислокацій створює пріоритетний рівень для зародження і росту мартенситу, а також сприяє утворенню ієрархічної структури. Крім того, взаємно паралельні вторинні α′ мартенсити внутрішньо здвоюються в набагато дрібнішому масштабі з товщиною в десятки в десятки нанометрів. При охолодженні до температур, нижчих за температуру солідусу, швидко почнеться кристалізаційне перетворення L → β. При подальшому падінні температури нижче початку мартенситного перетворення, мікроструктура повністю складається з великих стовпчастих β-зерен. Завдяки такому охолодженню атомна дифузія сильно обмежена, і таким чином β→α перетворення гальмується[39]. При подальшому охолодженні до температури нижче MS,(рис. 3.9) утворюються гострокутні первинні α′-мартенсити.

3.4 Дослідження зразків на розтяг

Після випробувань зразок видовжується на довжину $\boldsymbol{\ell_1}$ і отримується зруйнований зразок (рис.3.11), на якому є в наявності звужене місце , яке має назву «шийка». Воно може з’явитися у будь якій послабленій точці робочої довжини $\boldsymbol{\ell_0}$ зразка[40]. Дані зразки були надруковані з порошку класифікація якого в даній роботі є як «порошок для друку після просіву на ситі». Також після кожного п’ятого циклу необхідно додавати не більше 6% нового порошку. Для більш точного

результату міцності кожна точка це є апроксимацією 3х зразків. Після кожного разу друку отримуємо три зразки, для визначення середнього значення міцності.

а б в

а – загальний вигляд трьох зразків після розриву; б – розрив першого зразка;
в – розрив другого зразка

Рисунок 3.11 – Загальний вигляд зразків після випробування

На рисунку 3.12 – 3.14 показана залежність міцності титанового порошку від кількості циклів. Дослідження показало, що відносне видовження $\sigma_{заг.}$ зі збільшенням циклів зменшується.

Максимальна величина межі плинності $\sigma_т$, становить від 980 до 988 МПа, а максимальна величина тимчасової міцності $\sigma_в$, тобто напруження, яке сплав витримує до руйнування становить від 1049 до 1052 МПа. Відносне видовження є в межах від 11,6 до 10%. Текучість же збільшується зі збільшенням використання порошку, це можна поясними високим вмістом кисню. З квазістатичних експериментів можна зробити висновок, що вплив переробки порошку на даних циклах не має значного впливу на механічні властивості.

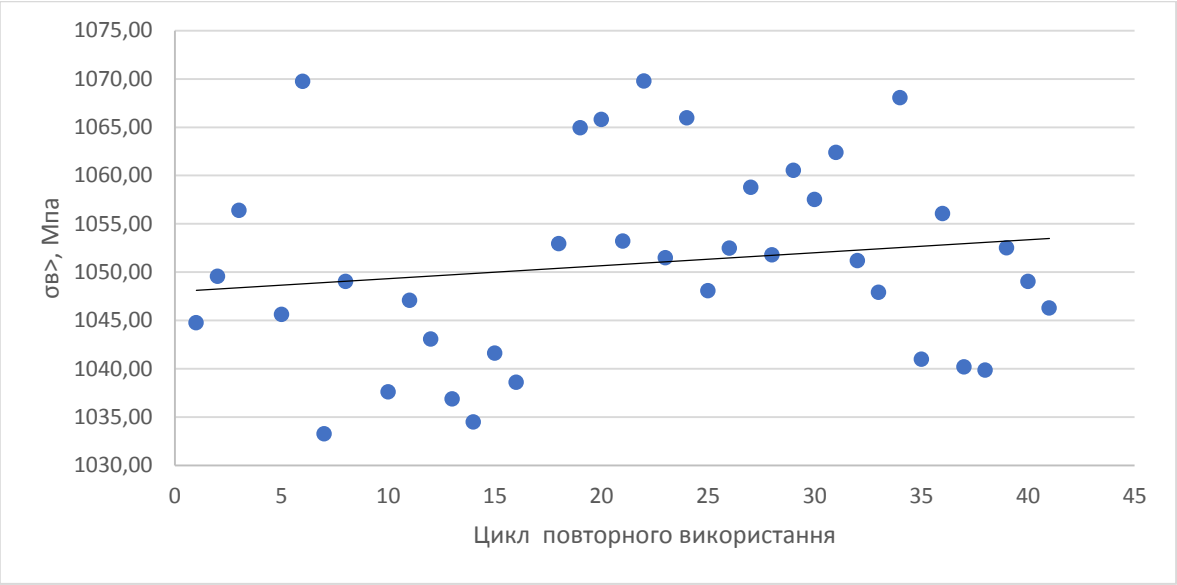


Рисунок 3.12 – Графік залежності міцності від кількості циклів повторного використання

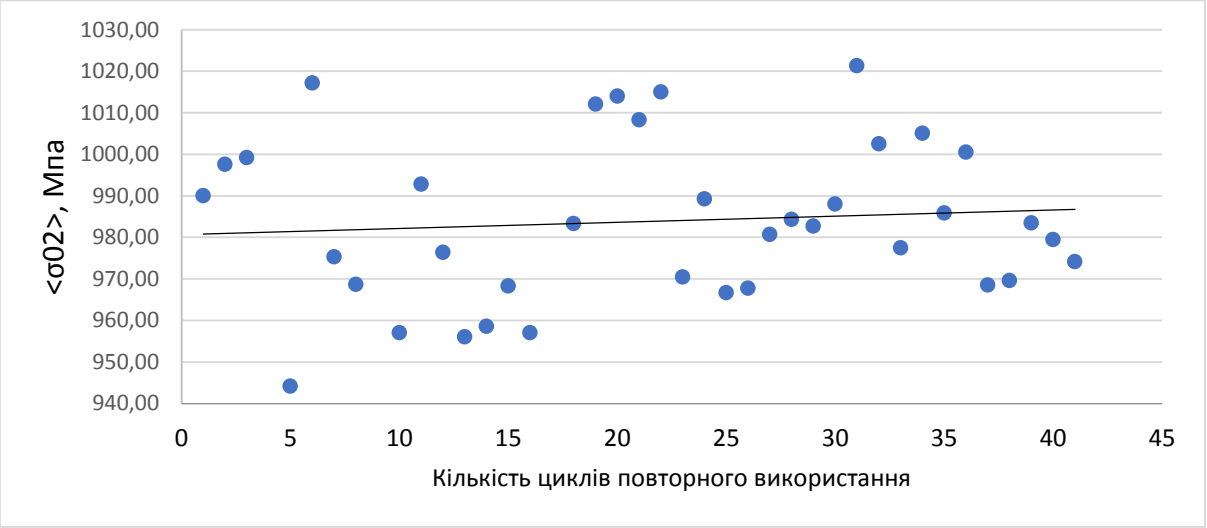


Рисунок 3.13 – Графік залежності границі плинності від кількості циклів повторного використання

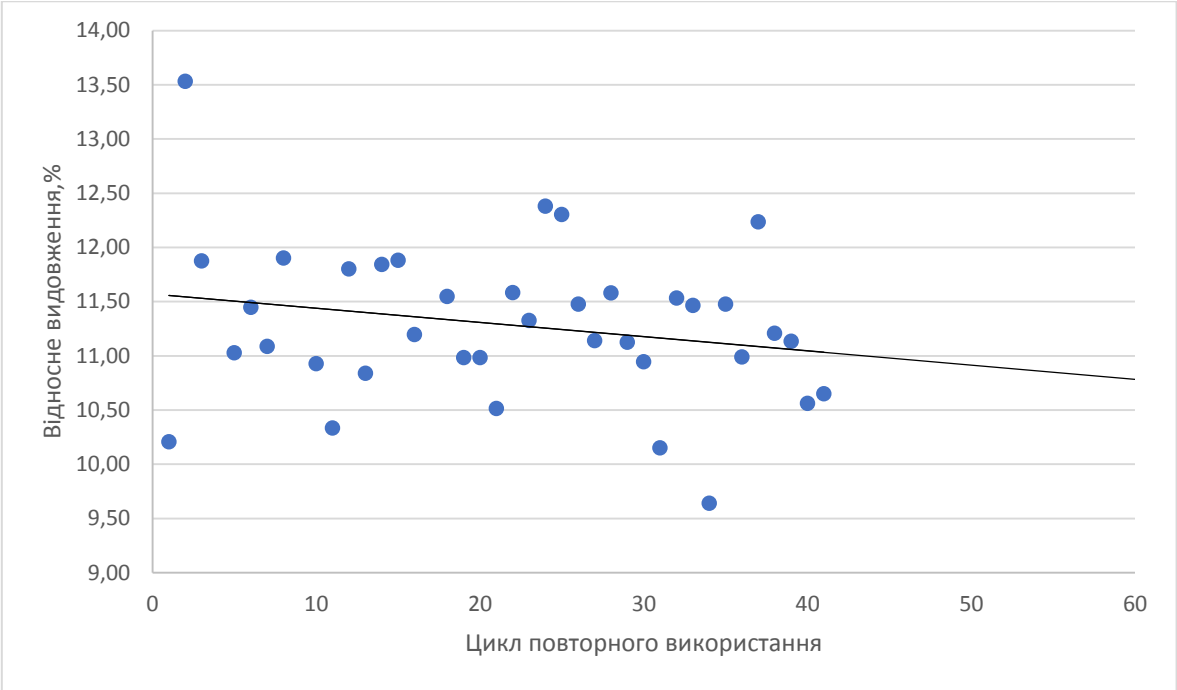


Рисунок 3.14 – Графік залежності загальної міцності від кількості циклів повторного використання

Порівнявши отримані результати із стандартом ASTM F3049-14 (ри.3.15), можемо зробити висновок, що попередньо, без додавання нового порошку, міцність на розрив має бути більше 825 МПа, межа текучості більше 895 МПа, а відносне видовження при розриві = 6-10 %. Отримані результати повністю підходять під дані стандарту.

Таблиця 3.5 - Механічні властивості Ti6Al4V після SLM та термічної обробки відповідно до ASTM F2924-14 [41]

Умови	Міцність на розрив, МПа	Межа текучості, МПа	Відносне видовження при розриві, %
SLM, виготовлений	1220±60	1140±60	3,2±1,5

Продовження таблиці 3.5

SLM, 800^{0}C, 4 год.	1080±10	983±25	9,9±1
SLM, 950^{0}C, 1,5 год.	1083±10	977±35	10,6±1
EBM, як сфабрикований	915-1200	830-1150	13-25
ASTM F2924-14	≥825	≥895	6-10
ISO 5832-3	860	780	8-10

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Для створення безпечних умов праці, зниження ймовірності нещасних випадків та професійних захворювань необхідно створити нормативні умови праці. Вони прописані у в законодавчих документах багатьох країн, включаючи Україну, та призначені для контролю температури, освітлення, вологості та якості повітря на робочому місці. Їх дотримання є важливим елементом забезпечення безпеки та здоров'я працівників на робочих місцях. Тому розділ «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» є необхідною частиною при плануванні дослідів для науково-дослідницької роботи[42,43].

Метою розділу є аналіз шкідливих і небезпечних факторів процесу дослідження титанового порошку та виготовлення деталей, щодо створення безпечних і здорових умов праці на робочих місцях, виключення можливості виробничого травматизму, професійних захворювань, пожеж, вибухів. Тому важливою частиною являється дотримання правил безпеки користування обладнанням та вихідними матеріалами.

4.1. Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів

При дослідження титанового порошку існує ряд небезпечних факторів, які можуть суттєво погіршити здоров’я працівників. Потенційну небезпеку несуть наступний ряд технологічних операцій:

Таблиця 4.1– Шкідливі та небезпечні виробничі фактори

Найменування операції	Устаткування	Потенційна небезпека
Змішування порошків	Вручну	Вдихання порошку
Просіювання	Протиральне Сито	Вдихання порошку, електричний струм
Сушка	Шафа сушильна вакуумна СВ-30	Впливу інфрачервоного випромінювання, а також дії високих температур.
3Д друк	Concept Laser M2	Іскри і бризги розплавленого металу, отруєння газом, високий тиск.
Термічна обробка	«Кристал 206»	Опіки, адже досягається висока температура
Механічна обробка	Фрезерный станок с ЧПУ универсальный MIKRON WF 52 C-ID11523	Пил та аерозолі, які можуть містити частинки металу
Ренгенівський аналіз	Рентгенівський дифрактометр Rigaku Ultima 4	Радіаційна небезпека
РЕМ	MIRA 3	Радіаційна небезпека
Дослідження на розтяг	Установка INSTRON 5966	Ураження електричним струмом, загазованість

Змішування порошків титану з додаванням нового являє собою перемішування дрібнодисперсних порошкових частинок які легко осідають на будь-яких поверхнях. Гранично допустима концентрація ураження Ti6Al4V становить 3,5 мг/м3. Таким чином контакт з порошком усувається використанням гумових рукавичок, респіратора, спеціальних захисних окулярів та одягу, що запобігає потраплянню порошинок в дихальні шляхи, на шкіру та слизову оболонку.

Просіювання відбувається на електричному протиральному ситі, що дає можливість оператору отримати ураження електричним струмом та потрапляння частинок порошку в дихальні шляхи. Під час даної операції необхідно використовувати рукавичками та респіратором.

Процес сушіння зразків проходить у вакуумній шафі СВ-30. Під час операції оператор має на собі значний вплив інфрачервоного випромінювання, а також дії високих температур. Сушильні шафи оснащенні захисною оболонкою, а також системою що не дає увімкнути нагрівні елементи шафи доки дверцята не будуть зачинені. Для того, щоб дістати готові зразки необхідно використати вогнетривкі рукавиці та спеціальний щуп[44].

3Д друк відбувається на установці Concept Laser M2. Перед роботою з піччю необхідно переконатися у її справності та належному підключені до електричної мережі, потім налаштувати подачу просушеного порошку, після чого обережно під’єднати балон з аргоном. За допомогою комп’ютерної системи запустити машину для друку, налагоджуючи шари друку та кількість подачі порошку. Під час всіх цих операцій обов’язково одягати захисний костюм який закриває все тіло, та обличчя.

Термічна обробка проводиться на установці «Кристал 206». Під час якої зразки досягається температури 800 градусів в зоні нагріву. Для уникнення небезпеки необхідно чітко слідувати правилам роботи з даною установкою провіряти заземлення та справність елементів установки, використовувати захисний одяг, рукавиці.

Механічна обробка складається з відєднання підтримок від готово зразка. Під час процесу мають місце відскоки дрібних частинок від поверхні, які можуть нанести пошкодження оператору установки. При роботі оператору необхідно

знаходитися на безпечній відстані від станка, що дозволить контролювати процес та унеможливить шанс нанесення пошкоджень. Використовувати при цьому необхідно гумові рукавички [45,46], одягнути захисні окуляри та халат, щоб максимально убезпечити себе від потрапляння часточок на слизову оболонку, в дихальні шляхи та на шкіру.

Рентгенівський аналіз на Rigaku Ultima 4 супроводжується рентгенівським випромінюванням. Установка обладнана захисним бар'єром для запобігання ураження людини радіаційними променями.

Растрова електронна мікроскопія здійснювалась на MIRA 3, де для аналізу зразку використовуються рентгенівські промені. Захист оператора під час досліду забезпечується конструкцією установки, а саме захисною вакуумною камерою.

Дослідження на розтяг відбувалося на установці INSTRON 5966 . Перед роботою необхідно переконатися у її справності та належному підключені до електричної мережі. Також необхідно дотримуватися всіх правил поводження з пресом, адже при розриві зразка можливий гучний звук та відскакування частинок порошку від виготовленої деталі.

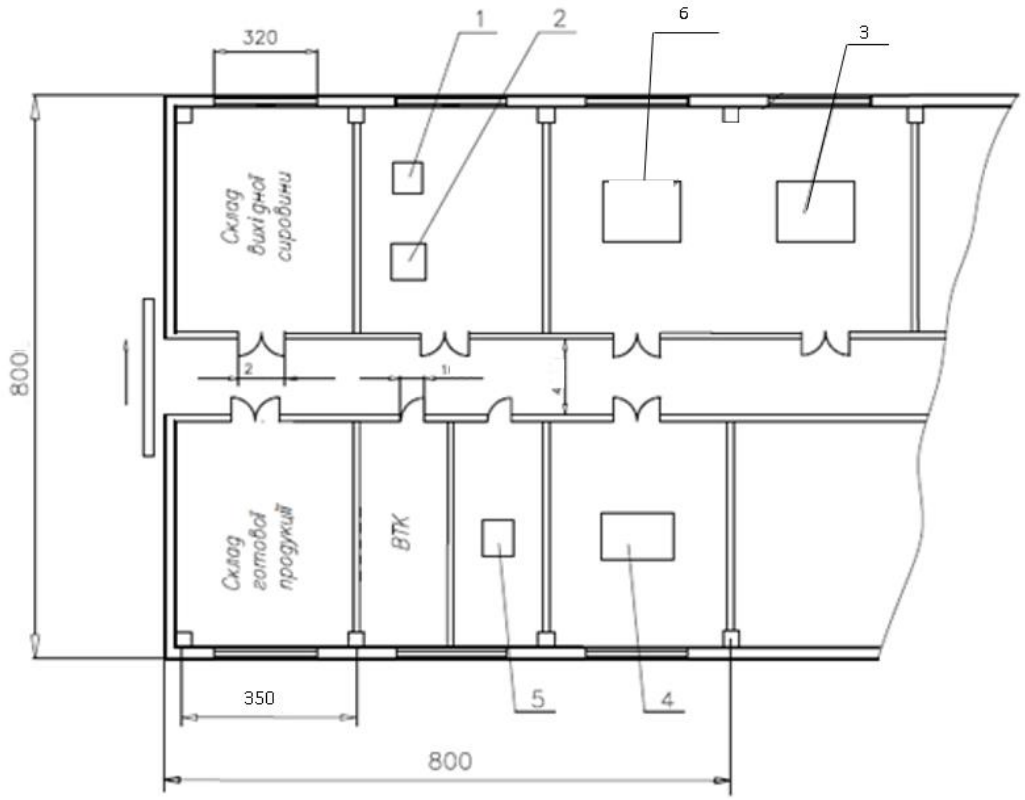
4.2 Аналіз параметрів приміщення

Виконання дипломної роботи відбувалося у Центрі колективного користування науковим обладнання (ЦККНО) в навчально-науковому інституті матеріалознавства та зварювання на базі КПІ ім. Ігоря Сікорського. Відповідно до основних вимог [47] до будівель виробничого призначення висота виробничих приміщень повинна бути не менше 3,2 м, а об’єм і площа – 15 $м^3$ та 4,5 $м^2$ відповідно на кожного працівника.

Здійснивши вимірювання лабораторії отримали наступні значення: висота стелі – 3,5 м, ширина – 3 м, довжина – 9 м. З подальший розрахунків отримали наступні значення: площа приміщення складає S = 27 $м^2$, а об’єм – V =94,5 $м^3$. У лабораторії працюють двоє співробітників. Отримані показники відповідають

нормам [47], згідно яким, на одну людину повинно приходитись не менше 6 м^2 площі та 20 м^3 об’єму.

Характеристики приміщення в якому знаходиться робоче місце: довжина 8 м, ширина 8 м, висота 4 м. З подальший розрахунків отримали наступні значення: площа приміщення складає S = 64 м^2 , а об’єм V =256 м^3. У лабораторії працюють троє співробітників. Отримані показники відповідають нормам [47], згідно яким, на одну людину повинно приходитись не менше 6 м^2 площі та 20 м^3 об’єму. Схематичне зображення лабораторії 0-28, а також розташування всіх елементів продемонстровано на рисунку 4.2.



1 – шафа сушильна; 2 – «Кристал 206»; 3 – Concept Laser M2;
4 – сито протиральне; 5 – фрезерний станок

Рисунок 4.2 – Схематичний план лабораторії 0-28

Характеристики приміщення в якому знаходиться робоче місце зведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Реальні та нормативні характеристики приміщень і розміщення технологічного обладнання

№	Параметр приміщення	Реальне значення лабораторії №0-28	Нормативні значення
1	Площа на 1-го працюючого	21,3 $м^2$	6 $м^2$
2	Об’єм на 1-го працюючого	85,3$м^3$	20 $м^3$
3	Мінімальна ширина проходу	1 м	1 м

4.3 Мікроклімат робочої зони

Якість повітря в робочій зоні є надзвичайно важливою під час виконання будь-якої роботи, оскільки вона впливає на здоров’я працівника та його продуктивність. Специфіка технологічного процесу передбачає наявності в робочому середовищі в якості хімічно активного середовища газу аргон, оскільки він є нетоксичний і невибухонебезпечний, це не призводить до підвищення небезпеки, та ізопропиловий спирт, підвищена концентрація якого вирішується вентиляцією[48].

Оптимальні мікрокліматичні умови — це таке поєднання кількісних показників мікроклімату, які при тривалій і систематичній дії на людину забезпечують збереження нормального теплового стану організму без напруження механізмів терморегуляції. Вони забезпечують почуття теплового комфорту і створюють передумови для високого рівня працездатності. Людина працездатна і гарно себе почуває, якщо температура навколишнього повітря знаходиться у межах 18 – 20 °С, відносна вологість — 40-60%, а швидкість руху повітря — 0,1 – 0,2 м/с.

При високій температурі та вологості може статись перегрів тіла, навіть тепловий удар. Висока температура у виробничому приміщенні призводить до

інтенсивного перерозподілу крові від внутрішніх органів до шкіри. Змінюється діяльність серцево-судинної системи, пульс прискорюється і може досягти 100 ударів на хвилину, що спричиняє інтенсивне потовиділення, розширення судин шкіри. Фізична робота в умовах підвищеної температури призводить до різкого прискорення серцебиття. Артеріальний тиск падає, дихання прискорюється.

При низькій температурі може статись переохолодження організму, що призведе до простудного захворювання. В умовах дії низьких температур поверхневі судини м’язів і шкіри рук, ніг, обличчя звужуються. Це призводить до зниження кровотоку на всіх ділянках тіла людини підвищується в’язкість крові, що зменшує її приток до переохолодженої поверхні.

У зоні розташування фрезерного станку для механічної обробки та протирочного сита вставлено місцеву вентиляцію, для уникнення можливого запилення. Підлога в дільниці бетонна, не проводить струм. За кожним робочим місцем працює лише один оператор. Реальні та нормативні характеристики приміщення наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Параметри мікроклімату [49]

Фактор клімату	Оптимальне	Допустиме	Фактичне	Висновки
Холодний період року				
Температура, °С	17-19	13-23	10-11	Нижче допустимої
Відносна вологість, %	40-60	≤75	60-63	В межах оптимальної
Швидкість руху, м/с	0,2	≤0,4	0,2-0,4	В межах допустимої
Теплий період року				
Температура, °С	20-22	15-30	20	В межах допустимої
Відносна вологість, %	40-60	70	70	В межах допустимої
Швидкість руху, м/с	0,3	0,2-0,5	0,2-0,3	В межах допустимої

Аналіз мікроклімату приміщення, виходячи з допустимих значень в залежності від періоду року. Теплий період року, відповідно з санітарно-гігієнічного нормування, при середньодобовій температурі вище +10 °С, холодний –

середньодобова температура не вище +10 °С. Через невідповідність температури в приміщенні в холодний період року повинен відбуватись обігрів цеху [49].

4.4 Аналіз освітленості приміщення

Освітлення буває трьох видів: природне, штучне і суміщене. Природне у свою чергу поділяється на бічне, верхнє та комбіноване. Штучне освітлення може бути загальним та комбінованим. Загальним називають освітлення, при якому світильники розміщуються у верхній зоні приміщення (не нижче 2,5 м над підлогою) рівномірно (загальне рівномірне освітлення) або з урахуванням розташування робочих місць (загальне локалізоване освітлення).

Комбіноване освітлення складається із загального та місцевого. Його доцільно застосовувати при роботах високої точності, а також, якщо необхідно створити певний або змінний в процесі роботи напрямок світла. Місцеве освітлення створюється світильниками, що концентрують світловий потік безпосередньо на робочих місцях. Застосування лише місцевого освітлення не допускається з огляду на небезпеку виробничого травматизму та професійних захворювань.

Характеристика зорової роботи поділяється за класами точності :

а) найвищої точності;
б) дуже високої;
в) високої;
г) середньої;
д) малої;
е) дуже малої точності.

Наша робота підходить під клас середньої точності. Природне та штучне освітлення в приміщеннях регламентується нормами ДБН В.2.5–28:2018 [50], які враховують характер зорової роботи, найменший розмір об'єкта розрізнення, розряд зорової роботи (I–VIII), систему освітлення, характеристику фону та контраст об'єкта розрізнення з фоном [50].

Природне освітлення поділяється на бокове (одно- або двостороннє), яке здійснюється через вікна у зовнішніх стінах; верхнє – через ліхтарі та отвори в дахах і перекриттях; та комбіноване, що поєднує верхнє та бокове освітлення. У лабораторії використовується природне бокове освітлення через вікно з північного боку, відстань до місця основної роботи складає 2 м. Виконувана робота належить до робіт високої точності (восьмий розряд зорових робіт), оскільки розмір зразків не перевищує кількох міліметрів (3 мм – 5 мм). Недостатня або надмірна освітленість, а також нерівномірність освітлення в полі зору, спричиняють втому очей, зниження продуктивності праці, підвищують ризик помилкових дій і нещасних випадків. Надмірна яскравість джерел світла може викликати головний біль, різь в очах, розлади гостроти зору, а світлові відблиски – тимчасове засліплення.

У лабораторії використовується суміщене освітлення, природнє доповнене штучним. Природне бокове освітлення забезпечується віконними прорізами, відстань від вікна до основної робочої зони складає 4 м. Для забезпечення загального штучного освітлення використовуються люмінесцентні лампи ЛБ-40 в кількості 3 штук. Виконувану в лабораторії роботу можна віднести до роботи малої точності (5 розряд зорових робіт).

4.5 Аналіз рівня шуму

Під шумом розуміють усі неприємні та небажані звуки (їх сукупність), які заважають нормально працювати, сприймати потрібні звуки, відпочивати. Шум несприятливо впливає на людину і може спричинити хворобливі наслідки: з' являються симптоми перевтоми, послаблюється увага, підвищується нервова збудливість, знижується працездатність, порушується робота шлунково-кишкового тракту. Шум - це одна з форм фізичного (хвильового) забруднення природного середовища, адаптація до якого організму людини практично не можлива. Для характеристики шумових явищ використовують таку величину, як рівень шуму (звуковий тиск).

За походженням шум поділяється на механічний (джерело – вакуумний насос) та електромагнітний (джерело – установки «Кристал –206» та «Кристал – 106»). При одночасній роботі всього устаткування рівень шуму може перевищувати допустимі норми ДСН 3.3.6.037-99, що призводить до виникнення профзахворювань [51]. Рівень шуму для приміщень лабораторій для виконання експериментальних робіт допускається 75дБА. При виконанні даної дипломної роботи ці вимоги виконуються. Рівень шуму в лабораторії складає 65 дБА. Він вимірюється шумомірами не менше одного разу в шість місяців.

В разі перевищення рівня шуму застосовують звуко- і віброізоляцію, звуко- і вібропоглинання та глушники шуму. Також для зменшення шкідливого впливу шуму використовуються індивідуальні засоби захисту від шумового впливу, або обмеження часу перебування в зоні підвищеного шуму.

Частина науково-дослідницької роботи виконувалась в лабораторії, де присутній пристрій «Фрезерний станок з ЧПУ універсальний MIKRON WF 52 C-ID11523», від якого йде певний шум під час його роботи. Це устаткування не перевищує допустимий рівень шуму при роботі, згідно з ДСН 3.3.6.037-99 [52], тому не призводить до виникнення профзахворювань.

У ході виконання науково-дослідної роботи рівень шуму всіх устаткувань відповідав нормам ДСН 3.3.6.037-99 і не був перевищений, за рахунок чого не мав негативного впливу на здоров’я виконавців досліджень.

4.6 Електробезпека

У приміщенні використовується струм напругою 220 В для живлення сушильної шафи та фрезерного станка струм напругою 380 В для живлення установок «Кристал 206» та 3Д принтера. Опір ізоляції силових та освітлювальних електропроводів контролюється відповідно до вимог та не перевищує 0,5 МОм.

Під час роботи за установкою «Кристал 206» існує небезпека ураження електричним струмом оскільки для роботи електронного променю використовуються струми високої потужності, електробезпека є крайньо важливою.

Також має заземлення та програмне забезпечення, що виключає можливість прийняття небезпечних рішень пов’язаних з режимами роботи установки. Приміщення класифікується як ІІІ-й клас за ступенем небезпеки ураження електричним струмом, тобто це приміщення з особливою небезпекою [53].

Для запобігання ураженню струмом всі установки мають захисне заземлення, яке забезпечує електричне з'єднання з землею або її еквівалентом металевих частин електроустаткування згідно з вимогами національних стандартів. Встановлено також захисне вимкнення, що автоматично відключає електроустаткування при виникненні небезпеки ураження струмом, наприклад, при замиканні фази на корпус електроустаткування або появі високої напруги в мережі. Призначено кваліфіковану особу, яка періодично перевіряє стан ізоляції та електроустаткування на предмет пошкоджень або зниження опору, а також стан захисного заземлення. Для попередження ураження електричним струмом використовуються знаки безпеки, інструкції та плакати. На всьому обладнанні та кожухах, що закривають електроапаратуру, є напис "Висока напруга". Весь персонал пройшов інструктаж з техніки безпеки [54].

4.7 Безпека в надзвичайних ситуаціях

4.7.1 Пожежна безпека

Науково-дослідна лабораторія відповідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [55]. належить до категорії Г, тому що там зберігаються та переробляються негорючі речовини та матеріали у гарячому, розпеченому стані [55].

Були прийняті наступні правила та заходи безпеки у лабораторії для запобігання пожежі:

а) технічні:

1) лабораторія оснащена автоматичною пожежною сигналізацією;
2) будівельні конструкції лабораторії не спалимі з межею вогнестійкості від 0,75 години до 2,5 годин;
3) передбачено систему знеструмлення при пожежі електроустаткування;

4)проведення планово-попереджувальних робіт і оглядів електроустановок, опалювального, вентиляційного, технічного устаткування;

5) в лабораторії знаходиться порошковий вогнегасник ВП-2.

б) організаційні:

1) розроблено інструкції про міри пожежної безпеки;

2) вивішені на поверхах плани евакуації;

3) персонал проходить інструктаж з пожежної безпеки та інші види протипожежної підготовки;

4) призначено відповідальних осіб за протипожежний стан лабораторій та інших приміщень;

в) режимні:

1) обмеження числа осіб, що здійснюють експлуатацію устаткування;

2) виділено визначені місця для паління.

У приміщенні лабораторії установлено 4 пожежні сигналізатори ИП-105, сигнал з яких надходить на основну панель пожежної сигналізації. Сигналізатори ИП-105 спрацьовують на підвищення температури до t = 72 ºС. У коридорі знаходиться пожежний кран із приєднаним пожежним рукавом. У лабораторії встановлені вогнегасники типу ОУ-2, ОУ- 5 (при напрузі 220 В) відповідно до вибрати тип і кількість відповідно до нормативних документів [56].

4.7.2 Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пробою електричної напруги на корпус електродугового агрегату необхідно відключити рубильник і довести до відома про це майстра або начальника дільниці[57].

Якщо хтось потрапив під дію електричного струму, необхідно негайно вимкнути електроприлад від мережі. Потім покласти постраждалого на дерев'яну поверхню, підклавши під голову ватник. Викликати швидку допомогу за телефоном 103 і в разі потреби надати потерпілому штучне дихання.

Кожен робітник і службовець, що виявив пожежу або загорання, зобов'язаний:

а) негайно сповістити про це в заводську пожежну охорону за телефоном 101;

б) приступити до гасіння вогню пожежі наявними в цеху (на дільниці) засобами пожежогасіння (вогнегасник, пісок, пожежний кран тощо);

в) викликати до місця пожежі посадових осіб (начальника цеху, дільниці).План евакуації з приміщення продемонстрований на рисунку 4.3.

У випадку загорання електродугового агрегату необхідно відключити рубильник і приступити до гасіння пожежі за допомогою вогнегасника[58].

План евакуації з лабораторії № 0-28 наведено на рисунку 4.2.

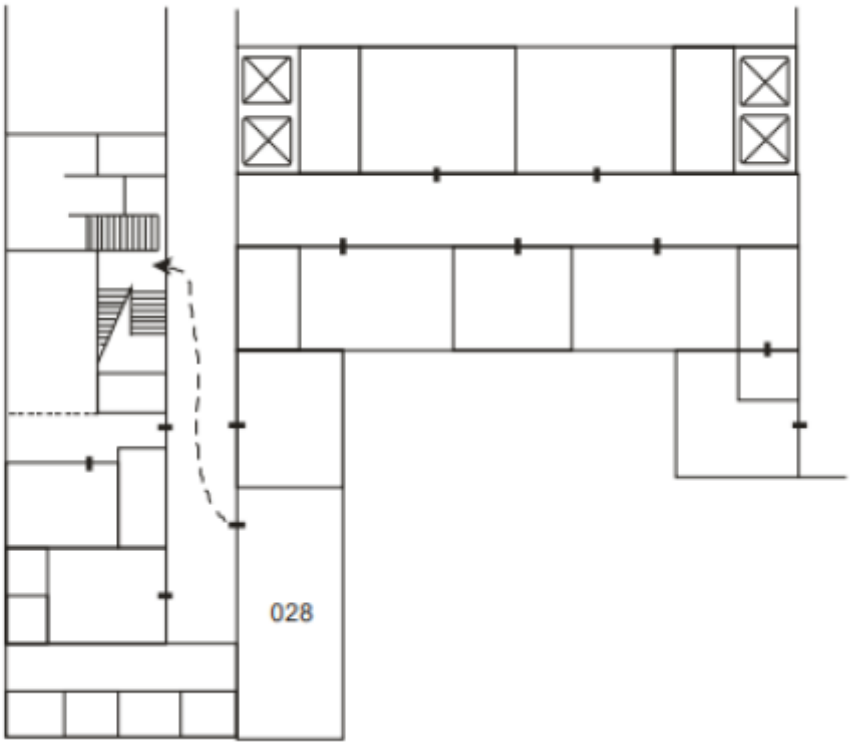


Рисунок 4.3 − План евакуації із лабораторії № 0-28

4.8 Висновки до розділу 4

Розглянувши відповідні норми з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях, що встановлені законодавством, можна зробити висновок, що аналіз шкідливих речовин і небезпечних факторів показав, що всі технологічні операції відповідають нормам. Рівень шуму, мікроклімат та освітлення відповідає нормативним значенням. Дослідницьке обладнання має всі необхідні захисні елементи. Лабораторне приміщення обладнане протипожежною системою, а персонал пройшов інструктаж з охорони праці.

ВИСНОВКИ

В результаті комплексних досліджень порошку Ti6Al4V встановлені наступні закономірності деформаційної поведінки при збільшенні циклів використання, серед яких найбільш важливими є:

1.Аналіз розподілу порошків показав, що частинки мають бути сферичної форми, розміром від 77,42 мкм до 207,4 мкм, даний вміст повинен бути найбільший, тільки в такому випадку, він визначається, як придатний до подальшого використання;

2.Дослідження зміни хімічного складу показало, що вміст оксигену в новому порошку складає 13,22 ат.%, відразу після лазерної дії , вміст зменшується до 9,62 ат.%, але після просіву досягає 14,83 ат.%.

3.Досліджено, що мікроструктура зразків складається з ієрархічної структури мартенситу в межах стовпчастих попередніх β зерен. Ці α′-мартенсити містять високу щільність дислокацій і велику кількість двійників. Використаний в роботі порошок знаходить в області стабільного сплаву (a + ß) Ti.

4.Встановлено, що максимальна величина межі плинності σт, становить 988 МПа, а максимальна величина границі міцності σв, тобто напруження, яке сплав витримує до руйнування - 1052 МПа, та відносне видовження в межах від 11,87 до 10%. Збільшення текучості відбувається зі збільшенням кількості циклів використання порошку, що пояснюється високим вмістом кисню. Квазістатичний експеримент показав, що вплив переробки порошку на механічні властивості є незначним. Встановлено, що з додаванням до 6% свіжого порошку максимальна кількість циклів повторного використання порошку може досягати до 40, без зміни механічних властивостей виробів.

CONCLUTIONS

As a result of comprehensive studies of Ti6Al4V powder, the following regularities of deformation behavior with increasing cycles of use were established, among which the most important are

1.The analysis of the powder distribution showed that the particles should be spherical in shape, ranging in size from 77.42 μm to 207.4 μm, this content should be the largest, only in this case, it is defined as suitable for further use;

2.The study of changes in the chemical composition showed that the oxygen content in the new powder is 13.22%, immediately after laser exposure, the content decreases to 9.62%, but after sieving it reaches 14.83%.

3.The microstructure of the samples was found to consist of a hierarchical structure of martensite within the columnar preceding β grains. These α′-martensites contain a high density of dislocations and a large number of twins. The powder used in this work is in the region of the stable (a + ß) Ti alloy.

4.It was found that the maximum value of the yield strength σt is 988 MPa, and the maximum value of the strength limit σv, i.e. the stress that the alloy can withstand before fracture, is 1052 MPa, and the relative elongation ranges from 11.87 to 10%. The yield strength increases with the number of cycles of powder use, which is explained by the high oxygen content. From quasi-static experiments, it can be concluded that the effect of powder processing does not have a significant impact on mechanical properties. It was found that with the addition of up to 6% fresh powder, the maximum number of powder reuse cycles can reach up to 40, without changing the mechanical properties of the products.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies [Electronic resource] / Lawrence E. Murr [et al.] // Journal of Materials Science & Technology. – 2012. – Vol. 28, no. 1. – P. 1–14. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/s1005-0302(12)60016-4 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
2. Karolewska K. Comparison analysis of titanium alloy Ti6Al4V produced by metallurgical and 3D printing method [Electronic resource] / Karolina Karolewska, Bogdan Ligaj // SCIENTIFIC SESSION ON APPLIED MECHANICS X: Proceedings of the 10th International Conference on Applied Mechanics, Bydgoszcz, Poland. – [S. l.], 2019. – Mode of access: https://doi.org/10.1063/1.5091886 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
3. An Automated Visual Inspection System for the Classification of the Phases of Ti-6Al-4V Titanium Alloy [Electronic resource] / Antonino Ducato [et al.] // Computer Analysis of Images and Patterns. – Berlin, Heidelberg, 2013. – P. 362–369. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-3-642-40246-3_45 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
4. Weiss I., Semiatin S. L. Thermomechanical processing of alpha titanium alloys-an
5. overview // Mat. Sci. and Engng. A. 1999. Vol. A263. P. 243–256.
6. Уточнення умови пластичності ущільнювального порошкового середовища з частинками складної форми / О.В.Заболотний // Вісник ЖІТІ. – 2001. – №19 / Технічні науки. – С. 14-17.
7. Яцун, В. І. Термічна стабільність NiSi у плівках Ni/Pt(6нм)/Sieп/Si(001) при відпалах : Магістерська робота: 132 Матеріалознавство / Яцун Віталій Ігорович. – Київ, 2019. – 92 с.
8. Безсмертна, О. С. Особливості мартенситного перетворення в сплавах на основі Zr-Ta : Магістерська робота 132 Матеріалознавство / Безсмертна Ольга Станіславівна. – Київ, 2019. – 87 с.

9. Producing hip implants of titanium alloys by additive manufacturing [Electronic resource] / Anatoliy Popovich [et al.] // International Journal of Bioprinting. – 2016. – Vol. 2, no. 2. – Mode of access: https://doi.org/10.18063/ijb.2016.02.004 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
10. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering [Electronic resource] / Wei Gao [et al.] // Computer-Aided Design. – 2015. – Vol. 69. – P. 65–89. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
11. Institute A. N. S. Specification for Titanium & Titanium Alloy Welding Electrodes & Rods (A5.16-90) (ANSI/Aws) / American National Standards Institute. – [S. l.] : American Welding Society, 1990. – 24 p.
12. Grade 23 Ti 6Al 4V ELI Alloy (UNS R56401) [Electronic resource] // https://www.bzstainless.com/. – Mode of access: https://www.bzstainless.com/grade-23-ti-6al-4v-eli-alloy-uns-r56401.html?gclid=Cj0KCQiA8aOeBhCWARIsANRFrQEd9Sr3WByBWkyL5IEswH9ZMNUuJzr3ftSrrsNTRXXlmK_IPr0xxkAaAnfXEALw_wcB (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
13. Fatigue behavior of Ti6Al4V and 316 LVM blasted with ceramic particles of interest for medical devices [Electronic resource] / S. Barriuso [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2014. – Vol. 30. – P. 30–40. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.10.013 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
14. Porous tantalum and tantalum oxide nanoparticles for regenerative medicine [Electronic resource] / Gokhuldass Mohandas [et al.] // Acta Neurobiologiae Experimentalis. – 2014. – Vol. 74, no. 2. – P. 188–196. – Mode of access: https://doi.org/10.55782/ane-2014-1984 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
15. Vandenbroucke B. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts [Electronic resource] / Ben Vandenbroucke, Jean-Pierre Kruth // Rapid Prototyping Journal. – 2007. – Vol. 13, no. 4. – P. 196–203. –

Mode of access: https://doi.org/10.1108/13552540710776142 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.

16. Review of selective laser melting: Materials and applications [Electronic resource] / C. Y. Yap [et al.] // Applied Physics Reviews. – 2015. – Vol. 2, no. 4. – P. 041101. – Mode of access: https://doi.org/10.1063/1.4935926 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
17. Ashby M. F. The properties of foams and lattices [Electronic resource] / M. F. Ashby // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2005. – Vol. 364, no. 1838. – P. 15–30
18. Critical Essays [Electronic resource] / Inca Rumold [et al.] // Die Unterrichtspraxis / Teaching German. – 1983. – Vol. 16, no. 2. – P. 336. – Mode of access: https://doi.org/10.2307/3530165 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
19. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties [Electronic resource] / Bey Vrancken [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. – 2012. – Vol. 541. – P. 177–185. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.07.022 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
20. Kruth J. P. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping [Electronic resource] / J. P. Kruth, M. C. Leu, T. Nakagawa // CIRP Annals. – 1998. – Vol. 47, no. 2. – P. 525–540. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)63240-5 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
21. Ductility of a Ti-6Al-4V alloy produced by selective laser melting of prealloyed powders [Electronic resource] / Luca Facchini [et al.] // Rapid Prototyping Journal. – 2010. – Vol. 16, no. 6. – P. 450–459. – Mode of access: https://doi.org/10.1108/13552541011083371 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
22. Мурашко, А. М. Вплив легування оловом на структуру та механічні властивості сплавів на основі Ti–12% Mo : Магістерська робота / Мурашко Андрій Миколайович. – Київ, 2019. – 87 с.

23. Луценко Д.В. Виробництво деталей вогнепальної зброї з порошкових матеріалів : Магістерська робота / Луценко Дарина Віталіївна. – Київ, 2022. – 102 с.
24. Adzhamskiy S. V. Influence of SLM-process parameters on the formation of the boundaries of parts of heat-resistant nickel alloy Inconel 718 [Electronic resource] / S. V. Adzhamskiy, G. A. Kononenko, R. V. Podolskyi // Kosmìčna nauka ì tehnologìâ. – 2021. – Vol. 27, no. 6. – P. 105–114. – Mode of access: https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
25. In situ thermography for laser powder bed fusion: Effects of layer temperature on porosity, microstructure and mechanical properties [Electronic resource] / Richard J. Williams [et al.] // Additive Manufacturing. – 2019. – Vol. 30. – P. 100880. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100880 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
26. Pal S. Physical Behaviors of Materials in Selective Laser Melting Process [Electronic resource] / Snehashis Pal, Igor Drstvensek // DAAAM International Scientific Book. – [S. l.], 2018. – P. 239–256. – Mode of access: https://doi.org/10.2507/daaam.scibook.2018.21 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
27. Dillenburger B. Additive Construction [Electronic resource] / Benjamin Dillenburger // 3D Printing and Additive Manufacturing. – 2022. – Vol. 9, no. 1. – P. 1. – Mode of access: https://doi.org/10.1089/3dp.2021.29016.bd (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
28. Additive manufacturing of Trabecular Titanium orthopedic implants [Electronic resource] / M. Regis [et al.] // MRS Bulletin. – 2015. – Vol. 40, no. 2. – P. 137–144. – Mode of access: https://doi.org/10.1557/mrs.2015.1 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
29. Підготовка до ендопротезування, види ендопротезів кульшового суглоба, в Клініці Лінько проводять операції по заміні суглоба [Електронний ресурс] // Ортопед-травматолог в Киеве Тарас Рокита - артроскопия,

эндопротезирование. – Режим доступу: https://arthroscopy.kiev.ua/ua/podgotovka-k-ehndoprotezirovaniyu-tazobedrennogo-sustava.html (дата звернення: 11.06.2024). – Назва з екрана.

30. Praneeth J. Process parameters influence on mechanical properties of AlSi10Mg by SLM [Electronic resource] / Jammula Praneeth, Sriram Venkatesh, L. Sivarama Krishna // Materials Today: Proceedings. – 2023. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.222 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
31. Adzhamskiy S. V. Influence of SLM-process parameters on the formation of the boundaries of parts of heat-resistant nickel alloy Inconel 718 [Electronic resource] / S. V. Adzhamskiy, G. A. Kononenko, R. V. Podolskyi // Kosmìčna nauka ì tehnologìâ. – 2021. – Vol. 27, no. 6. – P. 105–114. – Mode of access: https://doi.org/10.15407/knit2021.06.105 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
32. Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники: учебн. пособие для вузов / А. Л. Галиновский, Е. С. Голубев, Н. В. Коберник, А. С. Филимопов; под общей редакцией А. Л. Галиновского. — М: Юрайт,2020. — 115 с.
33. Сушильна вакуумна шафа СВ-30 – UOSlab [Електронний ресурс] // Головна – UOSlab. – Режим доступу: https://uoslab.com/sushylne-obladnannia/vakuumni-shafy/vakuumnyj-sushilnyj-shkaf-sv-30 (дата звернення: 11.06.2024). – Назва з екрана. Аналізатор розміру та форми частинок Bettersizer S3/S3 Plus | Купити [Електронний ресурс] // Новації - аналітичне обладнання | Розробка аналітичних методів дослідження. – Режим доступу: https://novations.ua/analizator-rozmiru-ta-formy-chastynok-bettersizer-s3/ (дата звернення: 11.06.2024). – Назва з екрана.
34. Новий електронний мікроскоп Axia ChemiSEM від Thermo Scientific [Електронний ресурс] // Новації - аналітичне обладнання | Розробка аналітичних методів дослідження. – Режим доступу: https://novations.ua/novij-

elektronnij-mikroskop-axia-chemisem-vid-thermo-scientific/ (дата звернення: 11.06.2024). – Назва з екрана.

35. The deformation mechanisms in the β-metastable β-Cez titanium alloy [Електронний ресурс] / Thierry Grosdidier [та ін.] // Scripta Materialia. – 1997. – Т. 36, № 1. – С. 21–28. – Режим доступу: https://doi.org/10.1016/s1359-6462(96)00341-7 (дата звернення: 11.06.2024). – Назва з екрана.
36. Adjamskiy S. V. Influence of technological parameters of slm-process on porosity of metal products [Electronic resource] / S. V. Adjamskiy, G. A. Kononenko, R. V. Podolskyi // Avtomatičeskaâ svarka (Kiev). – 2020. – Vol. 2020, no. 10. – P. 14–20. – Mode of access: https://doi.org/10.37434/as2020.10.03 (date of access: 07.06.2024). – Title from screen.
37. Хрієнко Б.О. Виготовлення індивідуального імпланта зі сплаву ВТ6 методом 3D друку : Дипломна робота / Хрієнко Богдан Олександрович. – м. Київ, 2023. – 70 с.
38. Producing hip implants of titanium alloys by additive manufacturing [Electronic resource] / Anatoliy Popovich [et al.] // International Journal of Bioprinting. – 2016. – Vol. 2, no. 2. – Mode of access: https://doi.org/10.18063/ijb.2016.02.004 (date of access: 11.06.2024). – Title from screen.
39. Passive Layers and Corrosion Resistance of Biomedical Ti-6Al-4V and β-Ti Alloys [Електронний ресурс] / Patrizia Bocchetta [та ін.] // Coatings. – 2021. – Т. 11, № 5. – С. 487. – Режим доступу: https://doi.org/10.3390/coatings11050487 (дата звернення: 11.06.2024). – Назва з екрана.
40. ASTM F3049-14 Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.
41. Писаренко Г. С. Опір матеріалів : Підруч. для ст. машинобуд. спец. вищ. навч. закл. / Г. С. Писаренко. – К. : [б. в.], 1993. – 655 с.
42. Редчиць, Д. О. Формування впорядкованої фази L10 в нанорозмірних плівках FePt-Ag : Магістерська робота / Редчиць Дмитро Олександрович. – Київ, 2019. – 75 с.

43. Власенко В.А. Вплив напружено-деформованого стану матеріалу пресовок з порошків заліза на формування їх структури під час спікання : Магістерська робота / Власенко Валентин Анатолійович. – м. Київ, 2023. – 86 с.
44. Магера, В. В. Вплив вільної поверхні на дифузійні характеристики поверхневих шарів Pt : Магістерська робота / Магера Віктор Вікторович. – Київ, 2019. – 77 с.
45. ДСТУ EN 420-2017. Загальні вимоги до рукавиць.
46. ДСТУ EN 175-2001. Засоби індивідуального захисту очей та обличчя.
47. ДБН В.2.2-28:2010 "Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення".
48. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
49. ДБН В.2.5.28-2018. Природне та штучне освітлення.
50. ДСН3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
51. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
52. ПУЕ-2017. Правила улаштування електроустановок. – К.:Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.
53. ДНАОП 0.00-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
54. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою
55. ДСТУ 4479-2005 "Пожежна безпека об'єктів. Порядок та умови впровадження систем пожежної безпеки та гасіння пожеж в приміщеннях і на об'єктах"
56. Єфіменко М. Ю. Структура та властивості спрямовано закристалізованого евтектичного сплаву B4C-TaB2-SiC : Магістерська робота / Єфіменко Максим Юрійович. – м.Київ, 2021. – 90 с.
57. Охорона праці в Україні. Нормативні документи. – Київ : КНТ, вид-во, 2004. – 438 с.