

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені
Є. О. Патона
Кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ **Юрій БОГОМОЛ**
«__» _____ 2023 р.

Дипломна робота
«Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»
спеціальності 132 «Матеріалознавство»
на тему: «Виготовлення індивідуального імпланта зі сплаву ВТ6 методом 3D
друку»

Виконав:
студент IV курсу, групи ФН-91
Хрієнко Богдан Олександрович
Керівник:
к. т. н., ст. дослідник
Солодкий Євген Васильович
Консультант з економічного розділу:
Доцент, к. е. н., доцент
Нараєвський Сергій Вікторович
Консультант з розділу охорони праці:
Консультант з охорони праці:
Професор, д.т.н., зав.кафедрою
Левченко Олег Григорович
Нормоконтроль: 22.06.2023
Доцент, к. т. н., доцент
Бірюкович Ліна Олегівна
Рецензент:
Доцент, к. т. н., доцент,
Іващенко Євген Вадимович

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.
Студент _____
Київ – 2023 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут
матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона
Кафедра високотемпературних матеріалів та
порошкової металургії

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **Юрій БОГОМОЛ**

«__» _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Хрієнко Богдан Олександрович

1. Тема роботи **«Виготовлення індивідуального імпланта зі сплаву ВТ6 методом 3D друк»**, керівник роботи Солодкий Євген Васильович, к.т.н., ст. дослідник, затверджені наказом по університету від «01» червня 2023 р. № 2122-с.

2. Термін подання студентом роботи 12.06.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: Дослідження сучасного стану моделювання імплантів та їх виготовлення методом 3D-друку з використанням титанового сплаву ВТ6. Аналізуються переваги 3D-друку, високі технологічні можливості та біосумісність сплаву ВТ6. Дослідження спрямоване на розробку процедур комп'ютерного моделювання і виготовлення індивідуальних імплантів зі сплаву ВТ6 для покращення результатів медичного лікування та адаптації пацієнтів.

Організаційно-економічний розділ має забезпечити ефективність виконання роботи та оцінити потенційність перспективи даної роботи.

Розділ охорони праці має забезпечити безпеку працівників та виявити потенційні загрози, які можуть виникнути під час проведення досліджень.

4. Зміст роботи:

- провести аналіз сучасного стану 3Д-друку металами та друк імплантів;
- змодельовати імплант;
- виготовити імплант методом 3Д-друку
- дослідити структуру та механічні властивості імпланту з ВТ6;
- визначити та обґрунтувати необхідну кількість робітників, планової калькуляції кошторисної вартості та показники продуктивності та актуальності роботи;
- виявити потенційні загрози під час проведення дослідження та розробити заходи для їх урегулювання.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: технологічна схема одержання імпланту з ВТ6, гранулометричний склад порошку ВТ6, рентгеноструктурний аналіз порошку ВТ6.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно-економічний	старший викладач к.е.н. Нараєвський С.В.	08.05.2023	
Охорона праці	професор, д.т.н. Левченко О. Г.	25.05.2023	

7. Дата видачі завдання 25.10.2022

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Підготовка експериментального матеріалу для дослідження	07.02	
2	Підготовка ілюстративного матеріалу досліджень	17.04	
3	Написання тексту роботи	24.04	
4	Підготовка презентації	05.06	
5	Оформлення роботи	10.06	
6	Захист дипломної роботи	20.06	

Студент

Богдан ХРІЄНКО

Керівник

Євген СОЛОДКИЙ

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт вміщує: 67 сторінок, 21 рисунок, 20 таблиць, 21 літературне джерело.

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВЕ ПЛАВЛЕННЯ, СЕЛЕКТИВНЕ ЛАЗЕРНЕ ПЛАВЛЕННЯ, Ti6Al4V, 3D ДРУК.

Об'єктом дослідження є сплав Ti6Al4V, отриманий методом 3D друку.

Метою роботи було створення індивідуального імпланту з Ti6Al4V методом 3D-друку.

Методи дослідження:

- металографічний аналіз;
- електронна мікроскопія;
- рентгеноструктурний аналіз;
- дослідження механічних властивостей.

У даній роботі описано процес 3D-друку металів, його переваги та недоліки, різні типи 3D-друку металів, а також детальніше розглянуто технологію селективного лазерного плавлення SLM, яка є однією з найбільш поширених у цій галузі. Також розглянуто основні види сировини, зокрема в якості сировини для створення імпланту був обраний матеріал Ti6Al4V. Для даного матеріалу в рамках методу SLM (Selective Laser Melting) описані підготовка порошку, механічна обробка та мийка деталей.

Методом 3D друку за технологією SLM було отримано імплант та досліджено його механічні характеристики. Встановлена повна відповідність по вимогам отриманого виробу для виготовлення імплантів для вживлення в живий організм.

Порівняння створеного методом 3D друку за технологією SLM зразка з еталонною моделлю імпланта показало, що розбіг розмірів становив не більше 0.1 мм, що цілком вписується в похибку сканера, а отже, деталь виготовлена в допустимих межах погрешності.

ABSTRACT

Diploma project contains: 67 pages, 21 figures, 20 tables, 21 sources.

ELECTRON BEAM MELTING, SELECTIVE LASER MELTING, Ti6Al4V, 3D PRINTING.

The object of the study is the Ti6Al4V alloy obtained by the 3D printing method.

The purpose of the work was to create an individual implant from Ti6Al4V by 3D printing.

Research methods:

- metallographic analysis;
- electron microscopy;
- X-ray structural analysis;
- study of mechanical properties.

This paper describes the process of 3D printing of metals, its advantages and disadvantages, various types of 3D printing of metals, as well as a more detailed look at the technology of electron beam melting (Electron Beam Melting - EBM), which is one of the most common in this field. The main types of raw materials will also be considered, in particular, the Ti6Al4V material was chosen as the raw material for creating the implant. Powder preparation, mechanical processing and parts washing were described for this material within the framework of the SLM (Selective Laser Melting) method.

The implant was obtained by the method of 3D printing using SLM technology and its mechanical characteristics were studied. Full compliance with the requirements of the obtained product for the manufacture of implants for implantation into the living body has been established.

A comparison of the sample created by 3D printing using SLM technology with the reference model of the implant showed that the deviation in dimensions was no more than 0.1 mm, which is completely within the scanner error, and therefore, the part was manufactured within the permissible limits of error.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	11
1.1 Характеристика та застосування сплаву Ti6Al4V	11
1.1.1 Характеристика та властивості сплаву Ti6Al4V grade 23	11
1.1.2 Застосування сплаву Ti6Al4V	14
1.2 Методи виготовлення імплантів	17
1.2.1 Традиційні методи виготовлення імплантів	17
1.2.2 3D-друк (Адитивні технології) у виготовленні імплантів	18
1.3. SLM друк та його особливості	21
1.3.1 Принципи та технологія SLM друку	21
1.3.2 Особливості використання порошку Ti6Al4V grade 23 у SLM друці	25
1.4 Висновки і постановка задач досліджень	28
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	30
2.1 Характеристика вихідних матеріалів	30
2.1.1 Вихідний матеріал.....	30
2.1.2 Грануло метричний аналіз.....	30
2.2 Визначення фізико-механічних властивостей.....	30
2.2.1 Випробування міцності та жорсткості	30
2.3 Оцінка точності та геометричних параметрів імпланту	32
2.3.1 3D-сканування і порівняння з вихідною 3D-моделлю	32
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ.....	34
3.1 Характеристика вихідних матеріалів	34
3.1.1 Вихідний матеріал.....	34
10.1.2 Грануло метричний аналіз.....	36
3.2 Визначення фізико-механічних властивостей.....	39
3.2.1 Випробування міцності та жорсткості	39
3.3 Оцінка точності та геометричних параметрів імпланту	40
3.3.1 3D-сканування і порівняння з вихідною 3D-моделлю	40
4. РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ	44
4.1 Специфікація технологічного обладнання та оснащення вибраного приміщення	44
4.2 Оцінка ключових небезпечних та шкідливих виробничих факторів і розроблення заходів поліпшення.....	46

4.3. Хімічні джерела небезпечних та шкідливих виробничих факторів (рідини, пари, гази, пил, аерозолі)	49
4.4. Небезпека ураження людини електричним струмом	50
4.5 Пожежна безпека	51
4.6 Висновки до розділу	52
5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ	54
5.1 Науково-технічна актуальність НДР	54
5.2 Розрахунок витрат на проведення НДР	55
5.2.1 Витрати на оплату праці	56
5.2.2 Єдиний соціальний внесок	57
5.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень	58
5.2.4 Енергоносії для проведення досліджень	58
5.2.5 Витрати на спеціальне обладнання	59
5.2.6 Вартість послуг сторонніх організацій	59
5.2.7 Витрати на службові відрядження	59
5.2.8 Інші прямі невраховані витрати	59
5.2.9 Накладні витрати	60
5.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми	61
5.3 Науково-технічна ефективність НДР	61
5.4 Висновки до розділу	65
ВИСНОВКИ	66
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	68

ВСТУП

Одним з найбільш важливих факторів успіху при роботі з 3D-друком металів є дотримання всіх вимог до процесу друку, а також використання високоякісних матеріалів [1] і технології електронно-променевого друку (Electron Beam Melting - EBM) [2]. Ця технологія є перспективною і знаходить все більше застосувань в різних галузях, таких як медицина, [3],[4]. авіаційна та космічна промисловість, виробництво електроніки та автомобілів. За допомогою постійного вдосконалення процесу та обладнання, можна очікувати ще більші досягнення у цій галузі. За останні роки цей метод став дедалі більш поширеним, зокрема 3D-друк металів, який дозволяє створювати високоякісні та складні форми деталей. У даній роботі буде розглянуто процес 3D-друку металів, його переваги та недоліки, різні типи 3D-друку металів, а також детальніше розглянуто технологію електронно-променевого друку (Electron Beam Melting - EBM), яка є однією з найбільш поширених в даній галузі [5]. Також будуть розглянуті основні види сировини, підготовка порошку, механічна обробка та мийка деталей.

3D-друк металів має безліч застосувань, і не обмежується лише виробництвом запчастин та деталей. Наприклад, він може бути використаний в медицині для виготовлення індивідуальних протезів та імплантів, останні будемо використовувати в дипломній роботі. Крім того, ця технологія може бути використана для виробництва складних металевих конструкцій, що не можуть бути виготовлені за допомогою інших технологій [6].

За останні роки технологія 3D-друку металів стала дедалі більш поширеною, і має великий потенціал для майбутнього розвитку. Ця технологія дозволяє створювати складні, високоякісні та міцні деталі, що важливо для багатьох галузей виробництва. Продовжуючи опис процесу 3D-друку металів, важливо зазначити, що даний метод застосовується в різних галузях, таких як медицина, авіаційна та космічна промисловість, а також виробництво електроніки та автомобілів. 3D-друк металів дозволяє створювати деталі зі складною геометрією, які складно або навіть неможливо виготовити за допомогою традиційних методів виробництва. Крім того,

3D-друк металів дозволяє зменшити час та витрати на виробництво, що є важливим фактором для бізнесу [7-8].

Проте, слід зазначити, що процес 3D-друку металів має свої недоліки. Окрім складності та вимог до особливих умов, він також потребує високих витрат на матеріали, які є значно вищими порівняно з іншими методами виробництва. Крім того, якість виготовлених деталей може бути погіршеною у випадку, якщо не дотримуватись всіх вимог до процесу друку [8].

Незважаючи на ці недоліки, 3D-друк металів все ще є перспективним методом виробництва, який знаходить все більше застосувань в різних галузях. За допомогою постійного вдосконалення процесу та обладнання, можна очікувати ще більші досягнення у цій галузі.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Характеристика та застосування сплаву Ti6Al4V

1.1.1 Характеристика та властивості сплаву Ti6Al4V grade 23

Особливістю титану і його сплавів є те, що вони мають міцність на розрив від 210 МПа до 1380 МПа, що в свою чергу еквівалентно міцності більшості легованих сталей. В той же час, щільність у титану складає лише 56 % від щільності сталі, а по стійкості до корозії титан подібний до платини. Температура плавлення титану складає 1725 °С, що є достатньо високим показником. Ця температура приблизно на 220 °С вища за температуру плавлення сталі та приблизно на 1100 °С вища за температуру плавлення алюмінію.

В залежності від вмісту існують різні класи порошку титану. В таблиці 1.1 представлені деякі з них.

Таблиця 1.1 – Класи порошку титану [9]

Клас матеріалу	Характеристика
Grade 1	UNS 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)

Успіх використання різноманітних титанових сплавів в ряді галузей промисловості пояснюється швидким розвитком металургії титану і успішним вирішенням проблем, пов'язаних з розвитком методів зварювання. Ці сплави можуть бути досить надійно з'єднані за допомогою різноманітних звичайних і твердотільних процесів, не дивлячись на те, що їх хімічна реакційна здатність вимагає особливих запобіжних заходів, щоб уникнути забруднення зон плавлення та термічного впливу як на лицьовій, так і на кореневій сторонах. В загальному випадку Ti6Al4V – це сплав $\alpha+\beta$. В свою чергу різноманітні домішки: кисень, азот, водень і вуглець мають значний вплив на його механічні властивості. Кисень і азот є альфа - стабілізаторами в Ti6Al4V і можуть збільшити швидкість мартенситного перетворення. В таблиці 1.2- 1.4. наведено для прикладу різноманітні фізико-хімічні властивості сплаву.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад сплаву марки 23 Ti 6Al 4V ELI [10]

Елемент	Вміст (%)
Титан, Ti	88.09 – 91
Алюміній, Al	5,5 – 6,5
Ванадій, V	3,5 – 4,5
Залізо, Fe	$\leq 0,25$
Карбон, C	$\leq 0,080$
Азот, N	$\leq 0,030$
Гідроген, H	$\leq 0,0125$
Інше	$\leq 0,40$

Таблиця 1.3 – Фізичні властивості сплаву 23 Ti 6Al 4V ELI [10]

Властивості	Одиниці виміру
Щільність, г/см ³	4,45
Точка плавлення, °C	1604 – 1660

Таблиця 1.4 – Механічні властивості сплаву 23 Ti 6Al 4V ELI [10]

Властивості	Одиниці виміру
Міцність на розрив	860 МПа
Межа текучості	790 МПа
Коефіцієнт Пуассона	0,342
Модуль пружності	113,8 ГПа
Модуль зсуву	44,0 ГПа
Подовження при розриві	15%
Твердість, Брінель	326
Твердість, Роквелл	35
Твердість, Віккерс	341

Для отримання якісних виробів потрібні: однорідний хімічний склад металевих порошків, сферична форма частинок з коефіцієнтом форми від 1,0 до 2,0 і вузьким розподілом частинок за розмірами із середнім значенням від 50 мкм (рис. 1.1).

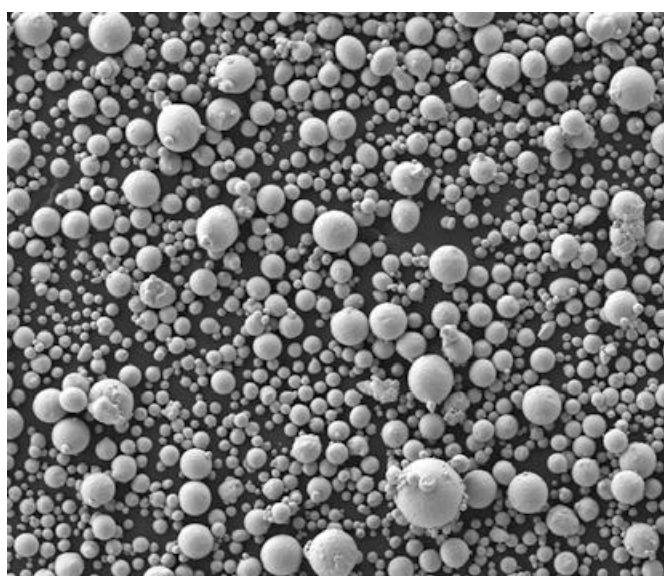


Рисунок 1.1 – Вигляд сферичного порошку Ti-6Al-4V ELI

Для таких порошків характерним є малий коефіцієнт тертя між частинками і гарна сипучість, велика насипна густина. В свою чергу, вкрай небажаною є наявність внутрішніх пор і оксидних шарів в таких порошках. Оксидна плівка на поверхні частинок порошку знижує змочуваність частинок краплею розплаву і призводить до

сфероїдизації і формування пористого шару. На рисунку 1.1 зображено сферичні частинки порошку титанового сплаву Ti-6Al-4V.

1.1.2 Застосування сплаву Ti6Al4V

Сплав, що розглядається в роботі Ti-6Al-4V — містить 6% алюмінію та 4% ванадію та решту титану, є найбільш широко використовуваним титановим сплавом у світі. Цей сплав, також відомий як титановий сплав класу 5, має відмінні властивості, які є кращими, ніж чистий титан. У сплаві Ti-6Al-4V основні властивості титану, такі як жорсткість і термічні властивості, зберігаються, роблячи його значно міцнішим, ніж чистий титан.

Основою титанових сплавів є елемент титан - високоміцний біосумісний матеріал, що широко застосовується в медицині, авіабудуванні, машинобудуванні, промисловості. До особливостей титанових сплавів можна віднести:

- 1 Висока міцність: титанові сплави мають високу міцність при низькій вазі, що робить їх ідеальними для застосувань, де важлива міцність, але де при цьому має значення вага, наприклад в авіації.
- 2 Корозійна стійкість - титанові сплави мають відмінну корозійну стійкість та можуть витримувати агресивні середовища, наприклад морська вода або хлор.
- 3 Висока температурна стійкість - титанові сплави можуть витримувати високі температури, що робить їх корисними для застосувань в авіаційній та космічній промисловості.

Наведемо тепер області застосування титанових сплавів [11]:

- 4 Перш за все титанові сплави широко використовуються в авіації та космонавтиці через їх високу міцність, низьку вагу та високу температурну стійкість. Вони використовуються у двигунах літаків, корпусах ракет та інших складових частинах.
- 5 Титанові сплави є біосумісними, що робить їх відмінним вибором для медичних імплантатів, таких як протези суглобів, штифти для кісток та зубні імпланти (рисунку. 1.2).



Рисунок 1.2. – Приклад виготовленого суглоба з сплаву $Ti\ 6Al4V\ ELI$ [11]

6 У автомобільній промисловості титанові сплави використовуються у високопродуктивних автомобілях для зменшення ваги та підвищення ефективності. Вони використовуються в деталях двигуна, вихлопних системах та інших складових автомобіля (рис. 1.3).

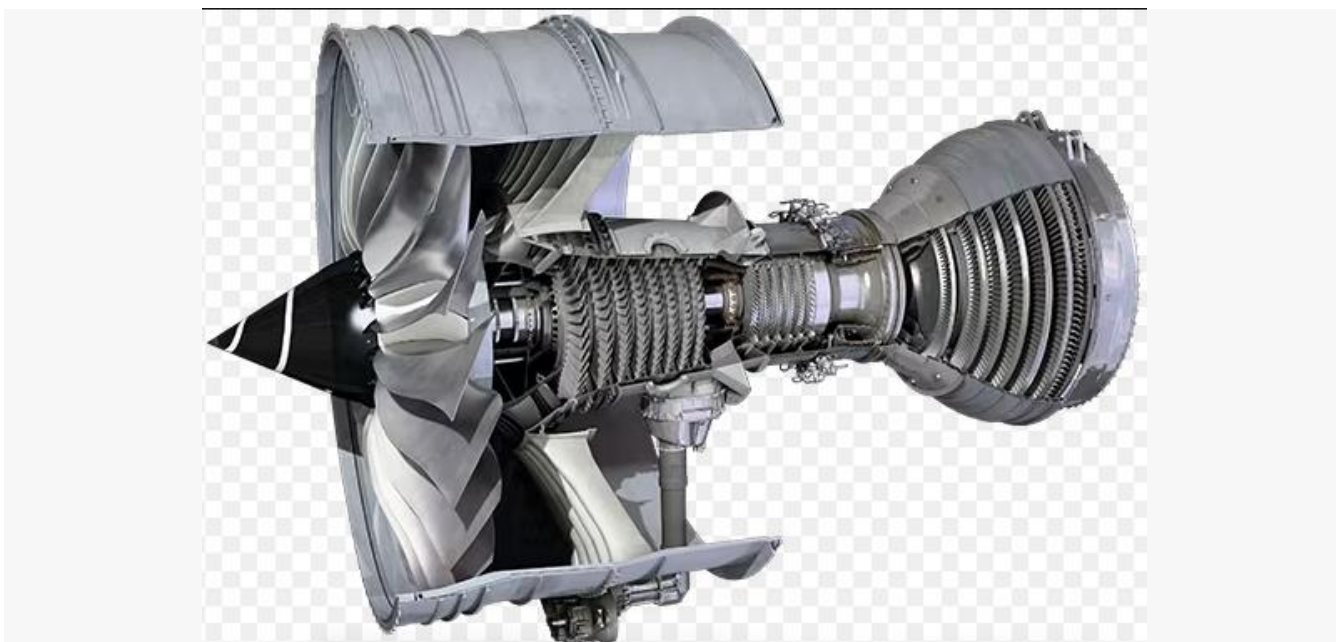


Рисунок 1.3 – Приклад двигуна Rolls-Royce Trent виготовленого з титану [11]

- 7 Титанові сплави також знайшли застосування у виробництві спортивного обладнання, такого як велосипеди, ключки для гольфу та ракетки для тенісу, через їх високу міцність та легкість.
- 8 Титанові сплави використовуються в нафтогазовій промисловості через їх корозійну стійкість. Вони використовуються в трубопроводах, клапанах та іншому обладнанні, яке знаходиться в корозійних середовищах.
- 9 Титанові сплави використовуються в стоматології для виготовлення імплантатів та інших стоматологічних пристроїв через їх біосумісність та корозійну стійкість.
- 10 Також, титанові сплави використовуються у виробництві ювелірних виробів, включаючи обручки, сережки та інші прикраси.

Титанові сплави продовжують знаходити нові застосування в різних галузях завдяки своїм унікальним властивостям. Окремо хотілось би відмітити, застосування сплаву у виготовленні медичних імплантів, що і будемо розглядати. Виготовлення медичних імплантатів – це важлива область, де використовуються високоточні технології та матеріали, такі як титанові сплави. Ось огляд основних процесів:

1. Проектування - процес виготовлення імплантатів починається з детального проектування імплантата, який зазвичай виконується за допомогою комп'ютерної програми CAD (Computer Aided Design). Це дозволяє враховувати індивідуальні потреби пацієнта, забезпечуючи оптимальний розмір та форму імплантата.

2. Виробництво - після проектування імплантат виготовляється. Це може бути зроблено за допомогою традиційних методів обробки металів, таких як фрезерування та точіння. Однак, все більш поширеним стає використання адитивних технологій виробництва, таких як 3D-друк SLM.

3. Пост-обробка - після виготовлення імплантату, він може потребувати пост-обробки для досягнення потрібної гладкості поверхні, твердості, чи інших характеристик. Це може включати обробку теплом, полірування, покриття або інші методи.

4. Стерилізація - перед використанням у медичній процедурі, імплантати стерилізуються, щоб забезпечити їх безпеку для пацієнта.

5. Імплантація - імплантат імплантується пацієнту в хірургічній процедурі. Основною перевагою використання титанових сплавів в медичних імплантатах є їх біосумісність, що означає, що вони не викликають алергічних реакцій або відторгнення організмом. До того ж, титанові сплави мають високу міцність та корозійну стійкість, що робить їх ідеальними для довгострокового використання в тілі.

1.2 Методи виготовлення імплантів

1.2.1 Традиційні методи виготовлення імплантів

Різноманітні методи виготовлення імплантів кінцівок допомагають людям, які втратили свої кінцівки, повернути функціональність та якість життя. Кожен метод має свої переваги та обмеження, і вибір конкретного методу залежить від потреб пацієнта, фізіологічних особливостей та доступних технологій [12-15].

До традиційних методів виготовлення імплантів для кінцівок, можна віднести наступні:

1) За допомогою 3D-друку. Цей метод стає все більш популярним саме для виготовлення імплантів кінцівок. Він дозволяє створити точні копії втрачених частин кінцівок, використовуючи біоматеріали, такі як титан або полімери. Цей метод дозволяє індивідуалізувати дизайн імпланту, враховуючи анатомічні особливості кожного пацієнта.

2) З використанням протезів. Виготовлення імплантів кінцівок може включати використання протезів, що виготовляються з різних матеріалів, таких як метал, пластик або карбонові волокна. Ці протези можуть бути стандартними або виготовленими на замовлення, з урахуванням індивідуальних потреб пацієнта.

3) Використання кібернетичних протезів. Кібернетичні протези - це імпланти, що використовують технології штучного інтелекту та електроніки для відновлення руху

та чуття в кінцівках. Ці протези можуть бути керовані міжшлунковими м'язами, нейромоторними інтерфейсами або навіть думками.

4) Методи біологічного вирощування: Цей підхід полягає в вирощуванні тканин або органів з використанням клітин, біосумісних матеріалів і біореакторів. В деяких дослідженнях вдалося виростити шкіру, кістку та інші тканини для використання в імплантах кінцівок.

1.2.2 3D-друк (Адитивні технології) у виготовленні імплантів

3D-друк металів - це процес створення тривимірних об'єктів з металевих порошків або металевих дрітків за допомогою різних технологій друку. Для цього використовуються спеціальні 3D-принтери, які застосовують технологію шарування (рис.1.4) [16-19].

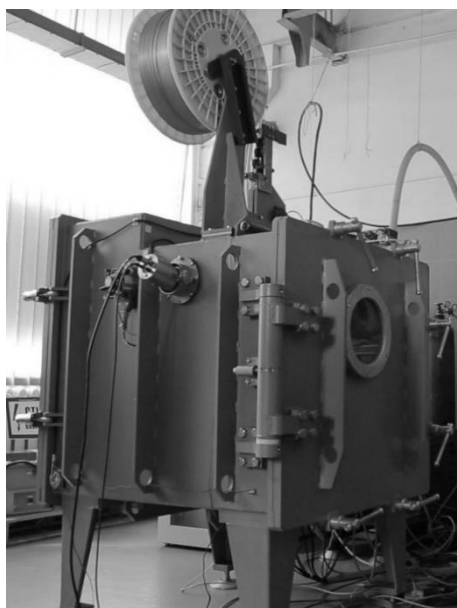


Рисунок 1.4 – 3D-друк металів

Для того, щоб зрозуміти особливості 3D друку металів, потрібно для початку розглянути історію виникнення та розвитку цього напрямку. Легендарну дамаську сталь, яка складається з шарів твердого та м'якого металу, можна відтворити з використанням 3D-друку та лазера. Німецьким вченим з Дюссельдорфа та Аахена вдалося створити її аналог зі сплаву заліза, нікелю і титану. Хоча в процесі було

використано лише один матеріал, структура створеної деталі повторює результати старовинних ковальських технологій [3-5].

3D-друк широко використовується у різних сферах діяльності, включаючи кінематографію, де 3D-принтери використовуються для створення різноманітних об'єктів, таких як маски для шпигунів та частини зброї. Однак, деякі ідеї, наприклад, створення копій коштовних кольє за допомогою 3D-друку, можуть бути складні в реалізації. Таким чином, 3D-друк є важливою технологією, яка знайшла своє застосування в різних сферах діяльності та продовжує розвиватися і покращуватися з кожним днем [7].

Перші принтери для 3D-друку були дорогими та великими, але згодом устаткування стало більш зручним, компактним та масовим. Нині є принтери, які можна використовувати навіть вдома. Широкий спектр матеріалів, що використовуються для технології, значно розширився за останні роки. Починали з полімерів, а сьогодні застосовуються навіть бетон і шоколад. Все більш популярним стає створення тривимірних об'єктів з металів та сплавів (рис. 1.5) [19-21].

Перші патенти на 3D-принтери для друку металевих виробів були отримані в 90-х роках XX століття.

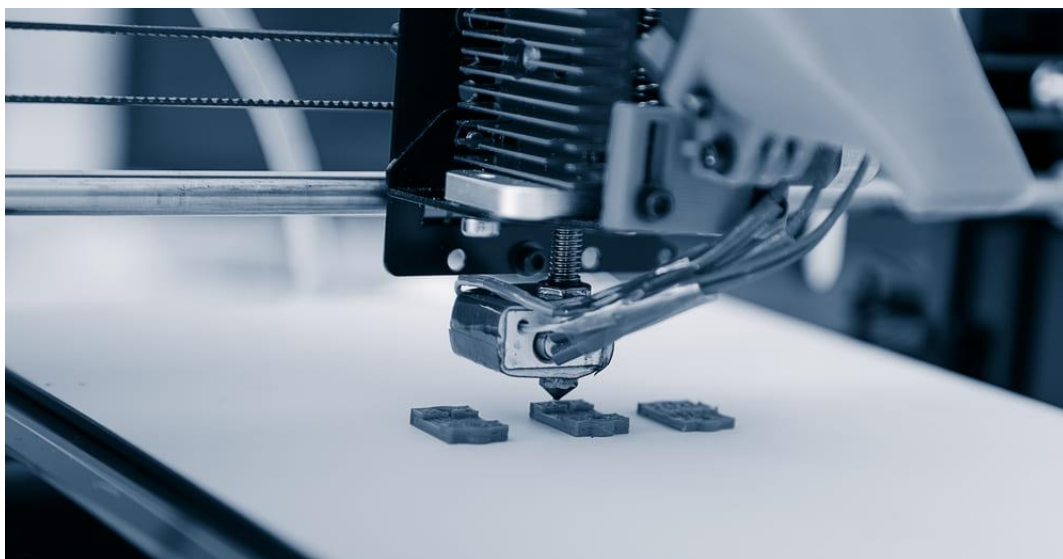


Рисунок 1.5 – Процес друку металевих виробів

Технологія, яка застосовується для такого друку, називається "Пряме лазерне спікання матеріалу" (Direct metal laser sintering, DMLS) і є розвитком технології SLS. Для тривимірного друку металевих виробів застосовуються десятки видів металевої сировини у форматі сферичних гранул.

Найпопулярніші металеві порошки для 3D-друку містять як кольорові метали (титан, алюміній, мідь, кобальт-хром), так і сплави на основі заліза. Сталеві порошки можна поділити на нержавіючі, інструментальні та нікелеві сплави, зокрема Inconel 625 та Inconel 718. За допомогою таких технологій можна створювати вироби складної форми, густина яких перевищує показники лиття. Металева продукція, створена на 3D-принтерах, знаходить застосування в харчовій, аерокосмічній, нафтогазовій промисловості, а також в медицині, протезуванні, машинобудуванні, електроніці, ювелірній справі та інших галузях[2-5].

Окрім технології SLS/DMLS, для друку тримірних виробів з металу застосовують електронно-променеве плавлення (Electron beam melting, EBM). На початку використовували металевий дріт, проте для виготовлення високоточних деталей краще використовувати спеціальний матеріал - металоглину, що складається з металевої стружки, органічного клею та води. Однак, є можливості для подальшого вдосконалення виробництва металевих виробів за допомогою 3D-друку. Наприклад, застосування цієї технології ефективне в процесі виготовлення складних форм, які важко виробити за допомогою лиття. Проте, при масштабуванні виробництва, ефективність 3D-друку значно знижується, крім того, готовий продукт зазвичай потребує фінішної обробки, що займає додатковий час [4].

Тренди на ринку 3D-друку постійно зростають, згідно з дослідженням Wohlers Report, глобальний ринок 3D-друку збільшився на 7.1% в 2020 році і склав 5.3 млрд доларів США, незважаючи на пандемію COVID-19. Також зростає популярність використання 3D-друку металів. Щоб підтримати його подальший розвиток, необхідно знизити вартість та спростити процес друкування металами. Можливості застосування 3D-принтера дуже широкі, від друкування моделей в офісі до виробництва складних великих об'єктів. Наприклад, компанія GE презентувала найбільший лазерний 3D-принтер ATLAS, а стартап Relativity Space має намір

створити багаторазову ракету-носіє, використовуючи 3D-друкування для створення реактивних двигунів та інших деталей. Застосування 3D-друку може дозволити значно скоротити час та вартість виготовлення складних виробів. Але для масового впровадження цих технологій потрібні значні інвестиції та роки перебудови технологічних ланцюгів [3, 6, 9].

1.3. SLM друк та його особливості

1.3.1 Принципи та технологія SLM друку

Для виготовлення індивідуального імпланту з різних типів матеріалу можуть бути використані різноманітні методи 3D-друку. Одним з найпоширеніших промислових технологій 3D друку є метод SLM. Його повна назва - Selective Laser Melting, або селективне лазерне плавлення. Часто також можна зустріти назву "Селективне лазерне плавлення металу", оскільки саме металеві порошки є основним витратним матеріалом для цього різновиду друку на 3D принтері. Багато хто плутає селективне лазерне плавлення металу з іншими схожими технологіями – селективним лазерним спіканням (SLS) та прямим лазерним спіканням металів (DMLS). Незважаючи на деяку подібність у процесі відтворення виробів, це все ж таки різні методики 3D друку. Технологія SLM відрізняється від них деякими ключовими особливостями, які наведено нижче.

Отже, спочатку потрібно створити 3D модель необхідного виробу, створену за всіма правилами 3D моделювання для 3D друку. Модель завантажується в спеціальну програму-слайсер (зазвичай необхідне програмне забезпечення постачається разом з 3D принтером), де відбувається її підготовка до друку. Мається на увазі виставлення необхідних параметрів та налаштувань друку та поділ майбутнього виробу на шари для роботи з 3D принтером. Після цього можна приступати до друку [17].

Селективне лазерне плавлення металу на перших кроках нагадує методики SLS і DMLS: в робочу камеру подається тонкий шар порошку в кількості, необхідному для першого шару. Однак наноситься матеріал на рухому робочу платформу, яка переміщається по осі Z. Порошок так само розрівнюється спеціальним валиком,

надлишки видаляються. Найцікавіше, що камера 3D принтера під час роботи заповнюється інертним газом – найчастіше аргоном чи азотом із низьким вмістом кисню (рис. 1.6).

Як тільки все готово, принтер приступає до 3D друку: за допомогою потужного лазера разом сплавляє металевий порошок по контуру першого шару. У напрямку X і Y пристрій лазера орієнтується за рахунок спеціальних дзеркал, що сканують. Після завершення процедури платформа опускається і процес повторюється. Ці кроки виконуються до повного відтворення об'єкта. Готова модель витягується з 3D принтера разом з платформою, механічно відокремлюється від неї та очищається від підтримки (рис 1.7).



Рисунок 1.6 – Схема установки SLM

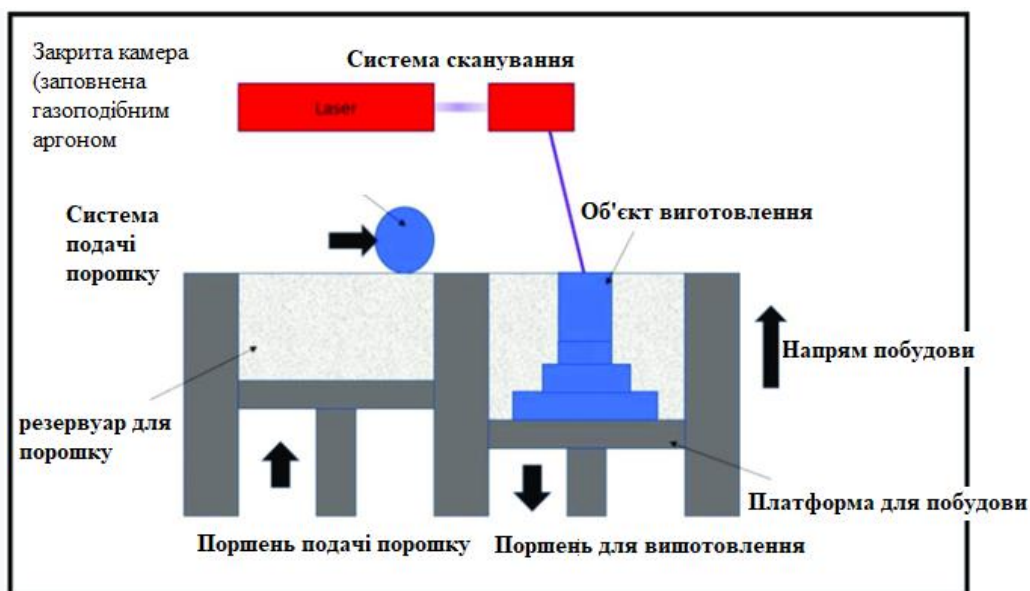


Рисунок 1.7 – Принципова схема процесу селективного лазерного плавлення (SLM)

Селективне лазерне плавлення металу наявністю рухомої платформи нагадує технології SLA та FDM. Як і в цих методиках, під нависаючими елементами виробу вибудовуються структури, що підтримують, які повинні бути видалені після завершення 3D друку. Також важливою особливістю технології є 3D друк у камері з інертним газом, завдяки чому виключається окислення металевого порошку, що дозволяє використовувати як витратний матеріал, наприклад, титан.

До переваг цього методу можна віднести:

- 1) Майже повна монолітність виробів. Селективне лазерне плавлення металу не частково (як у SLS та DMLS), а повністю сплавляє порошок між собою, що впливає на міцність виробу;
- 2) Можливість виготовлення виробів із складною геометрією. Як і в інших промислових технологіях 3D друку, форма виробу не має значення. За рахунок цього, а також попереднього фактора, селективне лазерне плавлення металу здатне скласти серйозну конкуренцію лиття під тиском;
- 3) Зменшення маси виробів. Цей пункт частково перетинається з попереднім: за рахунок додавання внутрішніх порожнин у вихідну 3D модель готовий виріб буде легшим, що надзвичайно важливо, наприклад, в аерокосмічній сфері;

4) Економія матеріалу. Цей метод не можна назвати повністю безвідходним, але близько 97-99% матеріалу, який не був задіяний у безпосередній побудові виробу, готовий до повторного використання.

Що до матеріалів які використовуються в цьому методі, слід зазначити, що селективне лазерне спікання металу відрізняється тим, що в ньому можна користуватися не тільки сплавами, а й чистими металевими порошками. Спектр доступних для цього методу 3D друку матеріалів набагато ширше, ніж для методик SLS і DMLS. Так, в числі порошків для друку на SLM 3D принтерах: кобальт-хром, сталь, інструментальна сталь, титанові сплави, титан, алюміній, золото, платина, вольфрам, мідь.

Трабекулярна структура: SLM - це метод 3D-друку, в якому лазерним променем плавиться металевий порошок та згущується шар за шаром, формуючи виріб. Завдяки цьому методу можна створити трабекулярну структуру, що складається з мережі переплетених порожнин та тонких стінок. Ця структура нагадує природну трабекулярну кістку і має багато вигод для осеоінтеграції.

Осеоінтеграція відноситься до процесу прямого контакту тканин, зокрема кістки, з поверхнею імпланту, що сприяє їх зростанню та інтеграції. Трабекулярна структура імпланту з Ti6Al4V Grade 23 має велику поверхню та пористу структуру, що сприяє зростанню кістки всередині порожнин та фіксуванню імпланту. Це покращує міцність та стабільність осеоінтеграції, що веде до успішного прийняття імпланту організмом.

Кістковий цемент традиційно використовується для фіксації імпланту до кістки. Однак, використання кісткового цементу може мати певні недоліки, такі як можливість розриву або зміщення з часом. Трабекулярна структура імпланту, що друкується SLM методом, дозволяє досягти достатньої стабільності імпланту без використання кісткового цементу. Пориста структура імпланту дозволяє проникнення кісткової тканини всередину порожнин, що забезпечує надійну фіксацію імпланту без додаткових матеріалів.

Трабекулярна структура імпланту з Ti6Al4V Grade 23, що друкується SLM методом, виявляє позитивний вплив на осеоінтегративні властивості, забезпечуючи

ефективну інтеграцію з кістковою тканиною, та дозволяє уникнути використання кісткового цементу. Це робить такі імпланти привабливими в медичних застосуваннях, зокрема в ортопедії та стоматології.

1.3.2 Особливості використання порошку Ti6Al4V grade 23 у SLM друці

Використовуючи технологію SLM, яка дозволяє створювати складні геометрії з металів, таких як Ti6Al4V grade 23, а також, тонкий шар порошку та лазер для його плавлення, опис технологічних операцій виготовлення індивідуального імпланту з Ti6Al4V даним методом можна описати наступним чином [19]:

На рисунку 1.8 представлена технологічна схема процесу виготовлення виробів за технологію SLM.

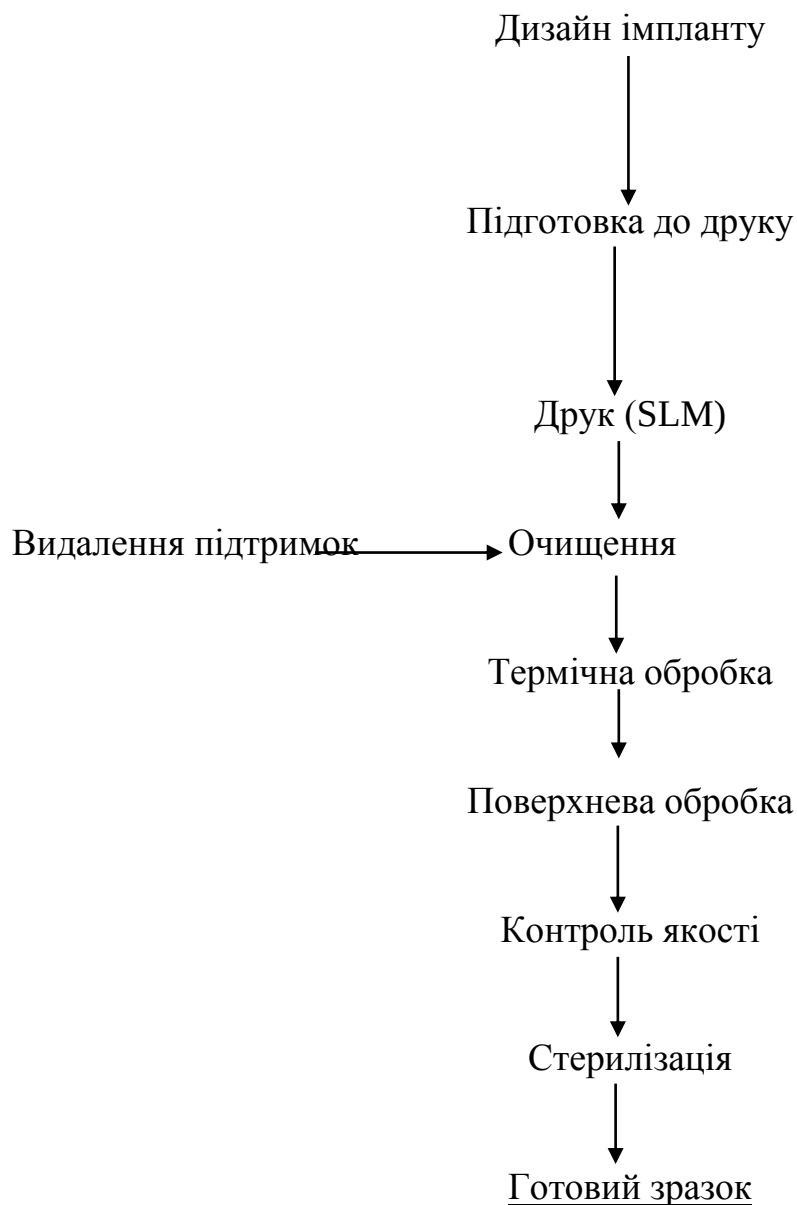


Рисунок 1.8 – Технологічна схема одержання готового імпланту методом 3D друку

Дизайн імпланту. Починається процес з детального 3D-дизайну імпланту, який створюється в програмах Fusion та Blender (рис. 1.9). Дизайн базується на медичних зображеннях пацієнта (наприклад, МРТ або КТ), що дозволяє виготовити імплант, який ідеально підходить саме для конкретного пацієнта.

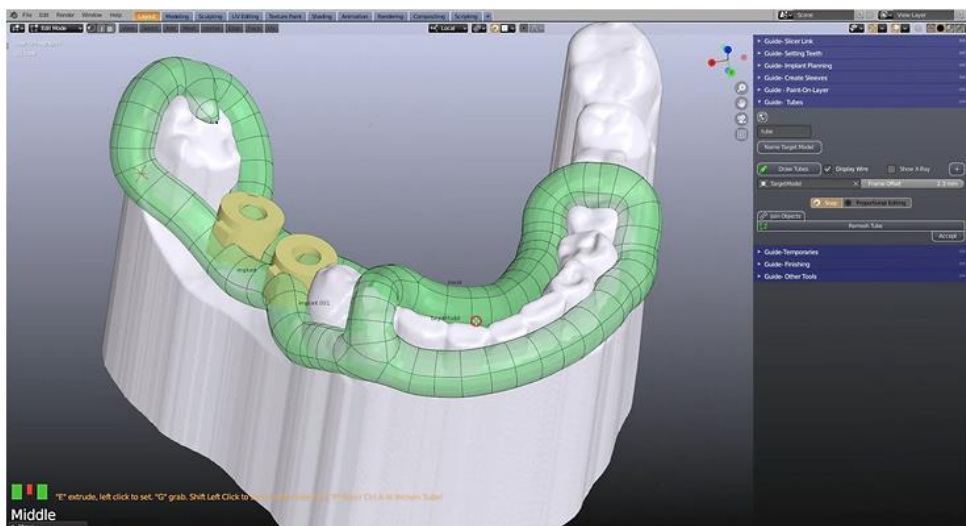


Рисунок 1.9 – Приклад зубного імпланту створеного у програмі Blender

Підготовка до друку. Після завершення дизайну, файл CAD перетворюється в формат, який може бути прочитаний 3D-принтером, зазвичай це формат .STL або OBJ. Потім файл завантажується в програмне забезпечення 3D-принтера, де можуть бути встановлені параметри друку, такі як швидкість, температура, потужність лазера та ін.

Процес друку. Процес SLM включає в себе насипання тонкого шару порошку Ti6Al4V на платформу друку. Потім лазер плавить порошок точно відповідно до дизайну, створюючи перший шар імпланту. Потім платформа опускається, і новий шар порошку наноситься на попередній шар. Цей процес повторюється, поки не буде виготовлено весь імплант.

Очищення. Перш за все, необхідно усунути надлишок порошку з імпланту. Це можна зробити за допомогою повітряного струменя або ультразвукової ванни. Порошок, який не плавився, можна зібрати та повторно використати (рис. 1.10).

Видалення підтримок. Якщо під час процесу SLM були використані підтримки (наприклад, для запобігання деформації), їх треба видалити. Це можна зробити вручну за допомогою інструментів або машинного оброблення.

Термічна обробка. Іноді, для поліпшення механічних властивостей імпланту, його піддають термічній обробці, такій як відпуск або нормалізація.



Рисунок 1.10 – Порошок сплаву Ti6Al4V

Поверхнева обробка. Зазвичай, вироби SLM мають досить шорстку поверхню, яка може бути небажаною для імплантів. Поверхня може бути покращена за допомогою різних технік, включаючи полірування, хімічне травлення, або покриття.

Контроль якості. Нарешті, імплант має бути підданий контролю якості. Зазвичай це включає в себе візуальний огляд, а також інші методи, такі як контроль ультразвуком або дефектоскопія. Може також бути проведено механічне тестування, або випробування на корозію, залежно від вимог до кінцевого продукту.

Стерилізація. Перед тим, як імплант можна використовувати в медичних цілях, його потрібно стерилізувати.

1.4 Висновки і постановка задач досліджень

Отже, виходячи із матеріалу представленого в попередніх пунктах основною задачею даної роботи є 3D моделювання за допомогою програми Blender і створення імпланту із матеріалу Ti6Al4V grade 23 методом 3D друку за технологією SLM.

Таким чином, метою роботи було створення індивідуального імпланту з Ti6Al4V методом 3Д-друку.

Для досягнення мети потрібно було вирішити такі задачі:

- пошук та аналіз літератури по сплаву Ti6Al4V;
- огляд різних методів 3Д-друку, вибір оптимального;
- дослідження хімічного, фазового складу порошку з Ti6Al4V та його гранулометричний аналіз;
- дослідження механічних властивостей;
- моделювання індивідуального імпланту;
- виготовлення індивідуального імпланту.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Характеристика вихідних матеріалів

2.1.1 Вихідний матеріал

Протягом усього дослідження використовувався порошок ELI Ti6Al4V, отриманий канадською фірмою AP&C, згідно ASTM B822. Ця суміш поставлялася у повітронепроникних контейнерах з вологопоглиначем. Частинки первинного порошку знаходились у діапазоні із розміром часток 10...100 мкм. Приблизно 85% часток мали розмір від 40 до 80 мкм.

2.1.2 Грануло метричний аналіз

В якості базового порошку використовувався 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 532 нм, потужність хоста 5 МВт.

2.2 Визначення фізико-механічних властивостей

2.2.1 Випробування міцності та жорсткості

Для оцінки механічної поведінки отриманих сплавів проводили випробування на одновісний розтяг та циклічне навантаження за допомогою машини INSTRON 5966 за постійної швидкості деформації, за кімнатної температури (рис.2.2).



Рисунок 2.1 – Лазерний аналізатор розміру частинок Bettersizer S3 Plus [18]

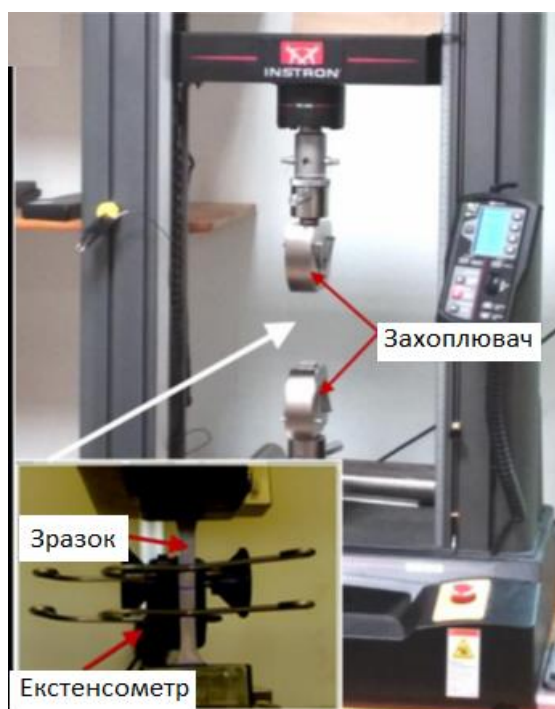


Рисунок 2.2 – Установка INSTRON 5966 для випробування на розтяг [19]

2.3 Оцінка точності та геометричних параметрів імпланту

2.3.1 3D-сканування і порівняння з вихідною 3D-моделлю

3D-сканування є процесом створення точного цифрового відображення фізичного об'єкта за допомогою спеціального обладнання, такого як 3D-сканер (вис.2.3).



Рисунок 2.3 3D-сканер

Коли об'єкт сканується, отримується набір точок, що утворюють хмару точок, яку можна використовувати для створення 3D-моделі. У програмі Blender можна порівняти цю хмару точок з вихідною 3D-моделлю, щоб оцінити точність сканування та виявити різницю між ними.

3D-сканування включає у себе наступні кроки:

- 1) Імпорт хмари точок у Blender.
- 2) Завантаження вихідної 3D-моделі, з якою ви хочете порівняти скановану хмару точок. Перевірка співпадіння, масштабу та орієнтації.
- 3) Використовуючи інструменти вирівнювання у Blender, такі як перетворення, повороти і зсуви, реалізація варіанту, коли обидві моделі максимально схожі за позицією та орієнтацією.
- 4) Візуалізація різниці між хмарию точок та вихідною 3D-моделлю. Наприклад, можна використовувати техніку "нормалізації розміру точок", де точки хмари забарвлюються в залежності від відстані до відповідних точок в 3D-моделі, щоб візуально відобразити різницю.

- 5) Аналіз різниці між хмарою точок та 3D-моделлю, аналізуючи візуальну відмінність та оцінюючи точність сканування.

Цей процес порівняння допомагає оцінити якість сканування, точність та відповідність між сканованою моделлю та вихідною 3D-моделлю.

З РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1 Характеристика вихідних матеріалів

3.1.1 Вихідний матеріал

Зображення досліджуваного порошку отримане на скануючому електронному мікроскопі наведено на рисунку 3.1 з різним масштабом.

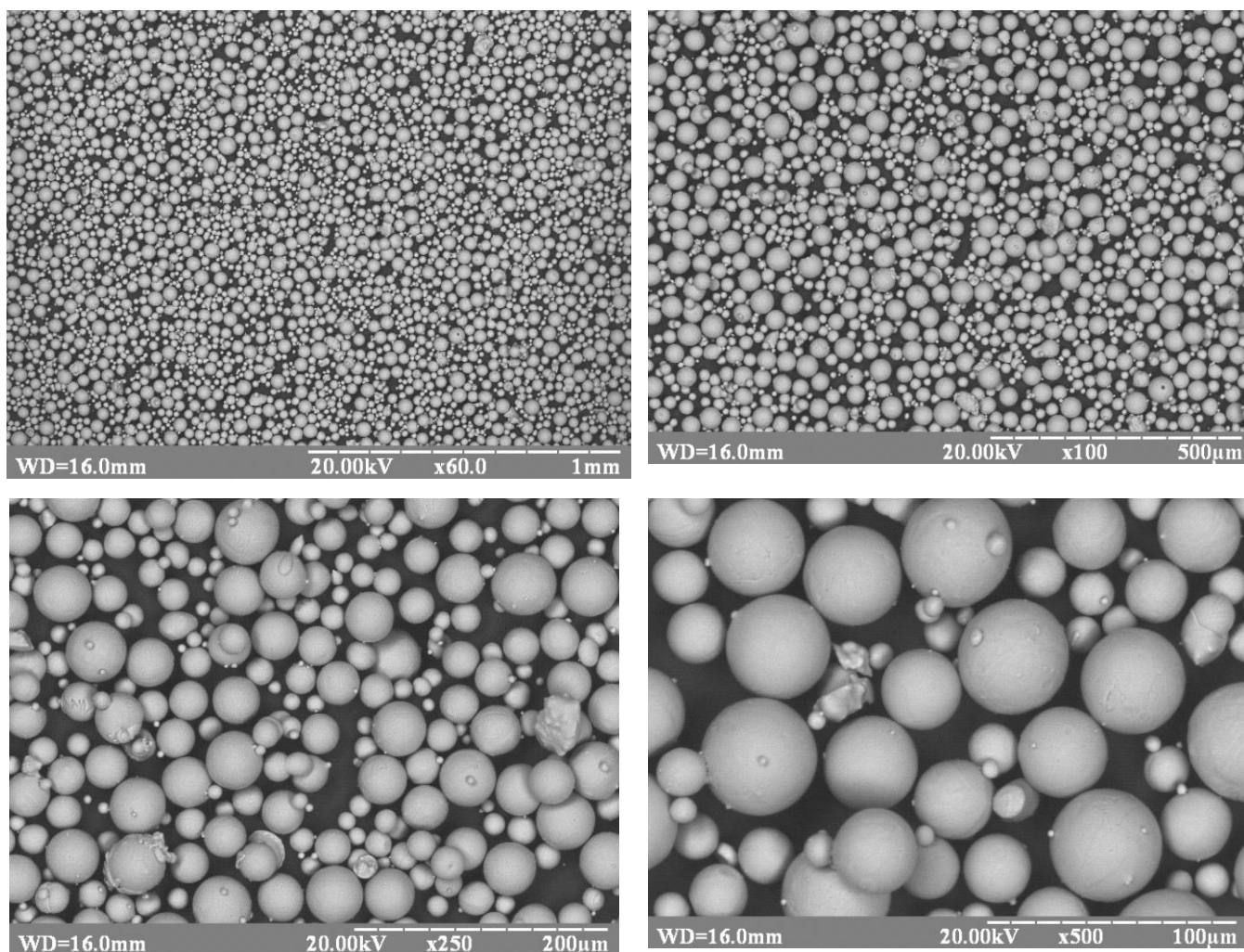


Рисунок 3.1 – Частинки порошку Ti6Al4V з роздільною здатністю

Для розуміння хімічного складу досліджуваного зразку Ti6Al4V був проведений спектральний аналіз представлений на (рис. 3.2).

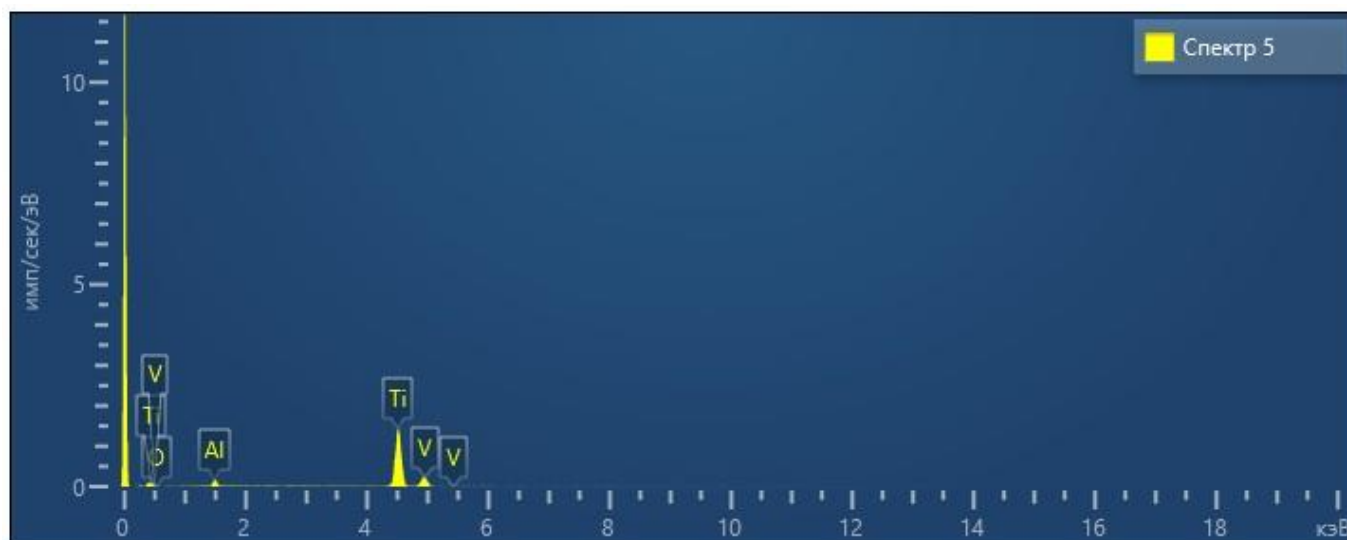


Рисунок 3.2 Результати хімічного аналізу порошку Ti6Al4V

Результати хімічного аналізу зразка, спектри якого представлені на (рис. 3.2) можна побачити в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Номінальний хімічний склад порошку Ti6Al4V

Елемент	Тип лінії	Ваг, %	Атом, %
Ti	K -серія	89.88	86.42
Al	K -серія	5.51	9.41
V	K -серія	4.61	4.16
O	K -серія	0.00	0.00

Зразок Ti6Al4V мав форму призми квадратного поперечного перетину, розміром 11x11x65 мм. Густина порошку Ti-6Al-4V, складає 4501 кг/м³. Густина базового зразка після друку без додаткової обробки складає 4402 кг/м³. Відповідно густина термообробленого зразку складає 4459 кг/м³. За значеннями густини було

обраховано значення істинної пористості, що склала 2,17% та 0,91% для базового та термообробленого зразка, відповідно.

10.1.2 Грануло метричний аналіз

Протягом усього дослідження використовувався порошок ELI Ti6Al4V, отриманий канадською фірмою AP&C, згідно ASTM B822. Ця суміш поставлялася у повітронепроникних контейнерах з вологопоглиначем. Частинки первинного порошку знаходились у діапазоні із розміром часток 10...100 мкм. Приблизно 85% часток мали розмір від 40 до 80 мкм. Для використання даного матеріалу у якості імпланту перш за все був проведений рентгеноструктурний аналіз результати якого представлені на (рис. 3.3).

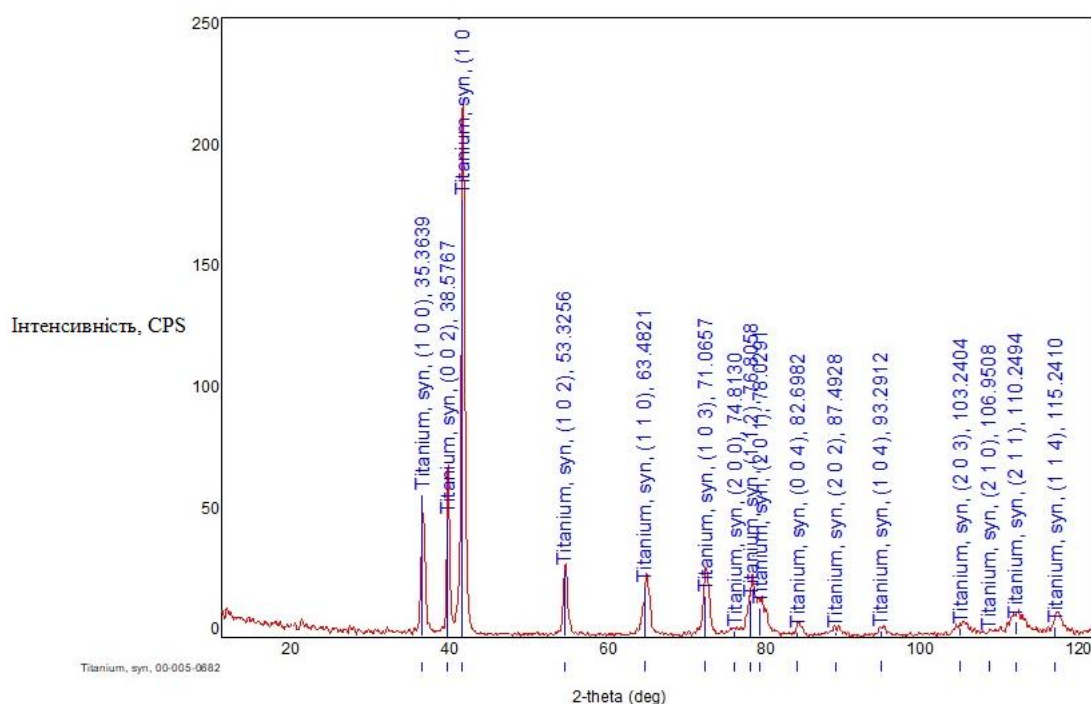


Рисунок 3.3 Дифрактограма досліджуваного зразка Ti6Al4V

Як можна бачити з рисунку 3.3 маємо 13 піків, які відповідають кутам дифракції, що відповідають титану.

Отриманий наступний розподіл за гранулометричним складом, що представлений на (рис 3.4).

У якості основного методу для рентгеноструктурного аналізу представленого на рисунку 3.2 був обраний метод Вільямсона-Холла. Цей метод заснований на комбінуванні формул Шеррера і Стокса-Уілсона, враховуючи таким чином, розширення рефлексів, викликаних як розмірами частинок, так і мікронапруженнями в кристалі. Результати розрахунків методом Вільямсона-Холла представлені на рисунку 3.5 і у таблиці 3.2.

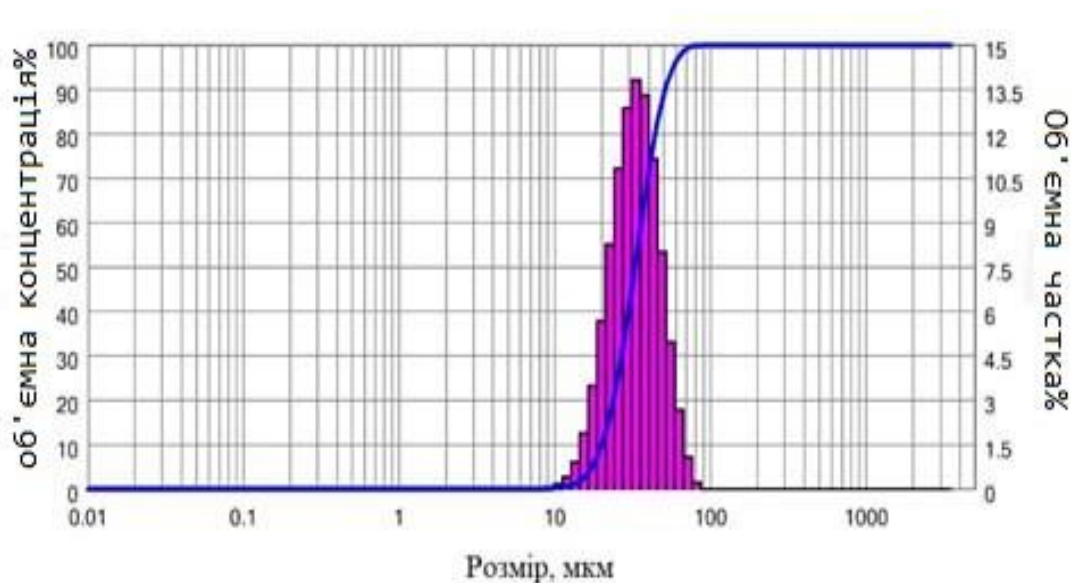


Рисунок 3.4 – Розподіл порошку Ti6Al4V за гранулометричним складом

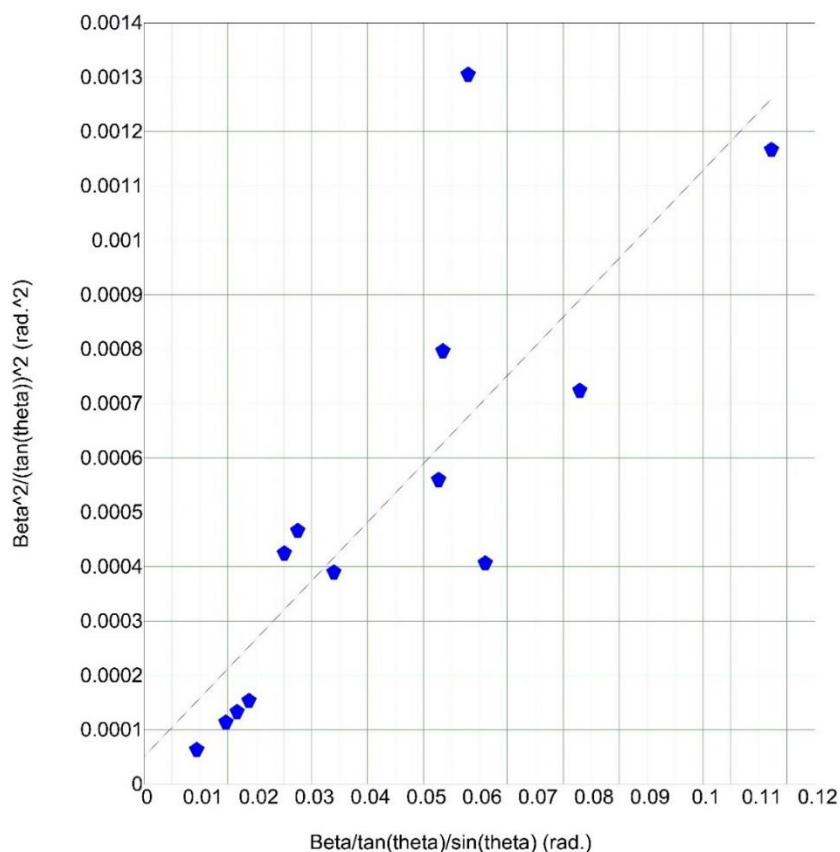


Рисунок 3.5 – Результати розрахунків методом Вільямсона досліджуваного зразка Ti6Al4V

Таблиця 3.2 – Розмір кристалітів і деформація решітки досліджуваного зразка Ti6Al4V

Назва фази	BT6
Назва сету даних	15
Розмір кристаліту (А)	150(32)
Деформація (%)	0.2(2)

Таким чином, аналізуючи результати представлені на рисунках 3.3 - 3.5 і в таблиці 3.2 можемо стверджувати, що не фіксується переходу альфа фази титану (гексагональна щільноупакована ґратка) в бета титан (з кубічною об'ємно-центрованою упаковкою), а це свідчить, про те, що досліджуваний зразок Ti6Al4V відповідає необхідним фізико-хімічним властивостям необхідним для побудови імпланту.

3.2 Визначення фізико-механічних властивостей

3.2.1 Випробування міцності та жорсткості

Результати оцінки механічної поведінки отриманих сплавів представлені на рисунку 3.6.

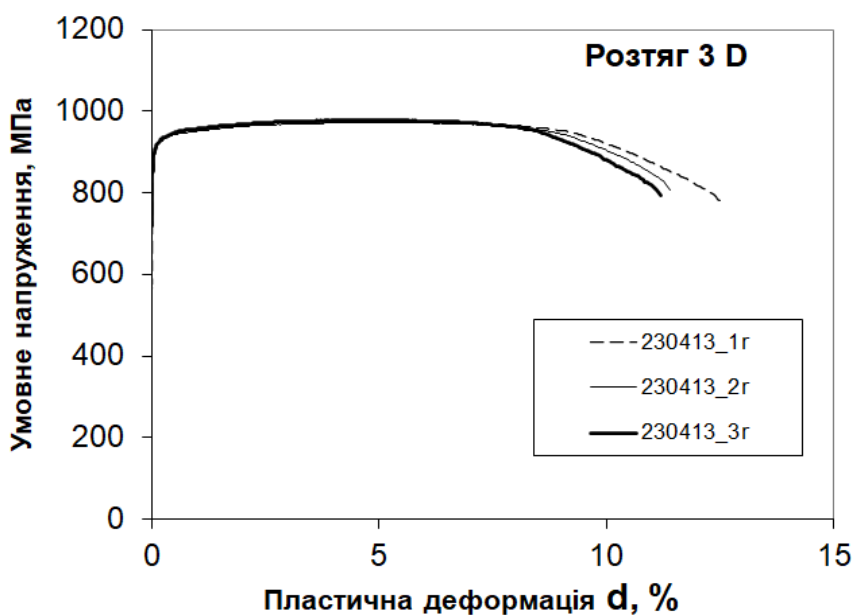


Рисунок 3.6 – Діаграма розтягу для зразка Ti6Al4V

В таблиці 3.3 представлені механічні характеристики, визначені з рисунка 3.6:

Таблиця 3.3 – Результати оцінки механічної поведінки сплаву Ti6Al4V

Партія	№	σ_{001}	σ_{02}	σ_b	$d_{\text{рівн}}$	$d_{\text{загаль}}$	$\sigma_{\text{руйн}}$	ϵ	γ
		МПа	МПа	МПа	%	%	МПа		%
230413	1	845,7	929,4	976,0	5,88	12,57	1265,0	0,492	38,86
	2	852,9	926,9	972,5	5,69	11,40	1202,8	0,398	32,81
	3	847,4	933,0	978,4	5,31	11,20	1162,5	0,380	31,64
середнє		848,7	929,8	975,6	5,63	11,72	1210,1	0,423	34,44

Як можна бачити із рисунка 3.6 і таблиці 3.3, досліджуваний зразок не деформується в достатньо широкому діапазоні напружень.

3.3 Оцінка точності та геометричних параметрів імпланту

3.3.1 3D-сканування і порівняння з вихідною 3D-моделлю

Результати 3D-сканування імпланту у програмі Blender представлені на рисунку 3.7.

Імплант був від сканований на 3D сканері та порівняний з еталонною моделлю імпланта. В результаті, розбіг становив не більше 0.1 мм. Це цілком вписується в похибку сканера. З цього можна зробити висновок, що деталь виготовлена в допустимих межах погрішності.

На рисунку 3.8 представлені фото готового імпланту з матеріалу Ti6Al4V, що був змодельований в Blender (рис. 3.7) і роздрукований на 3D принтері за технологією SLM.

На рисунку 3.9 представлений результат вживлення імпланту в лапу пацієнта (кота).

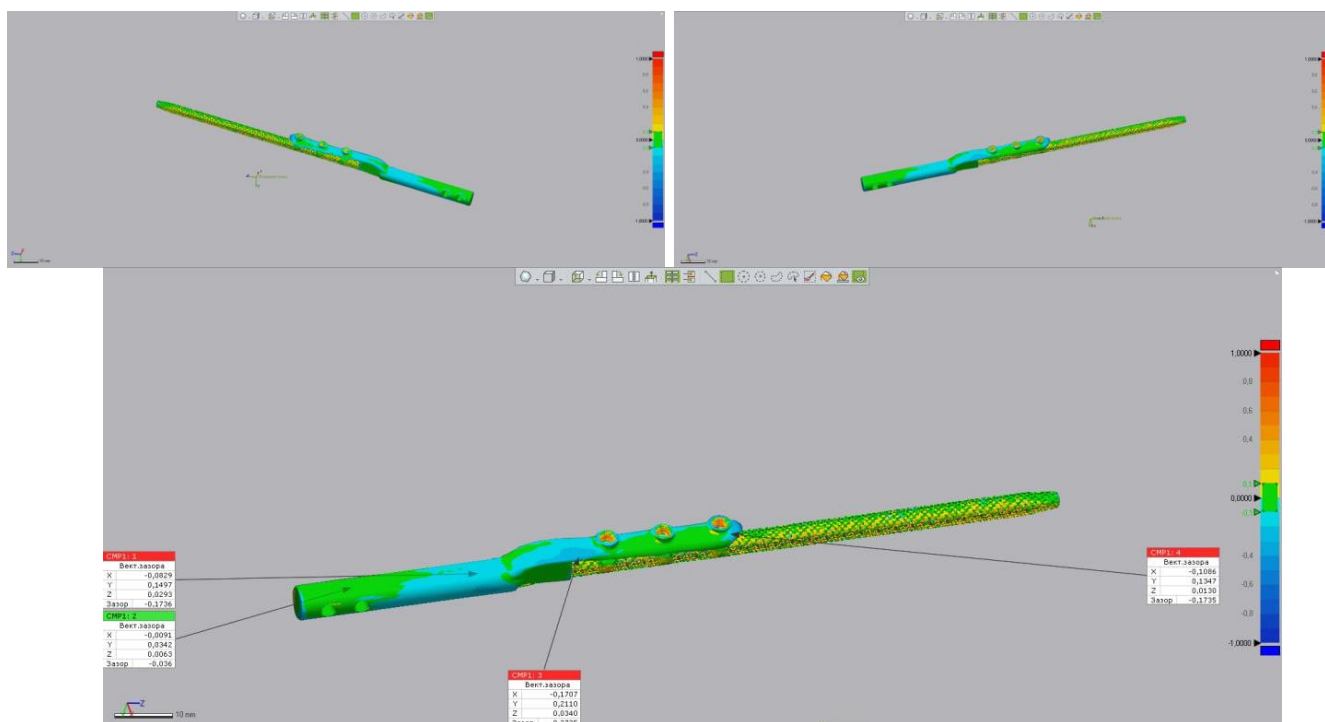


Рисунок 3.7 – Результати 3D-сканування



Рисунок 3.8 – Фото імпланту з матеріалу $Ti6Al4V$, що роздрукований на 3D принтері за технологією SLM

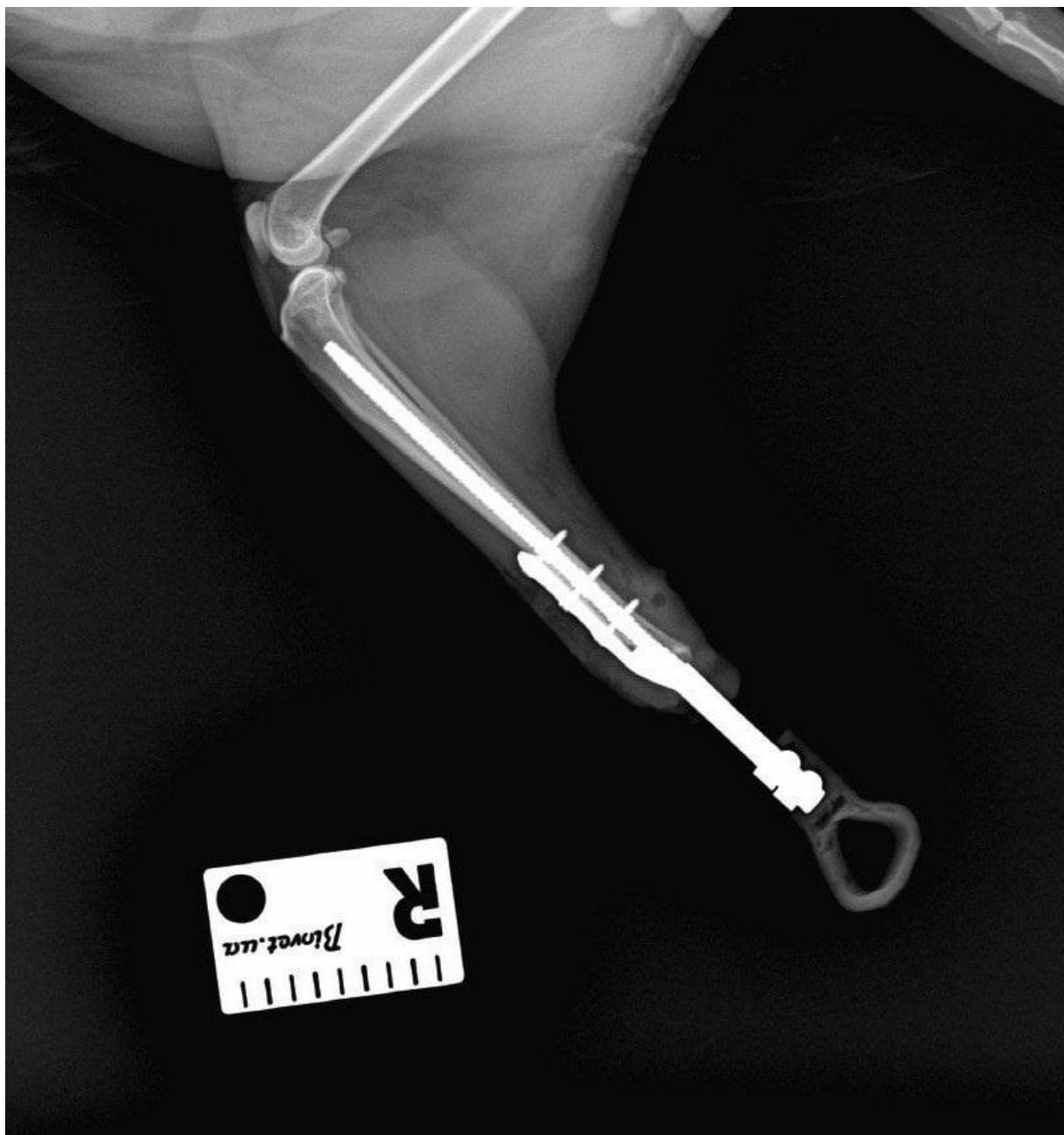


Рисунок 3.9 – Результат вживлення імпланту в лапу пацієнта (кота)

4. РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ

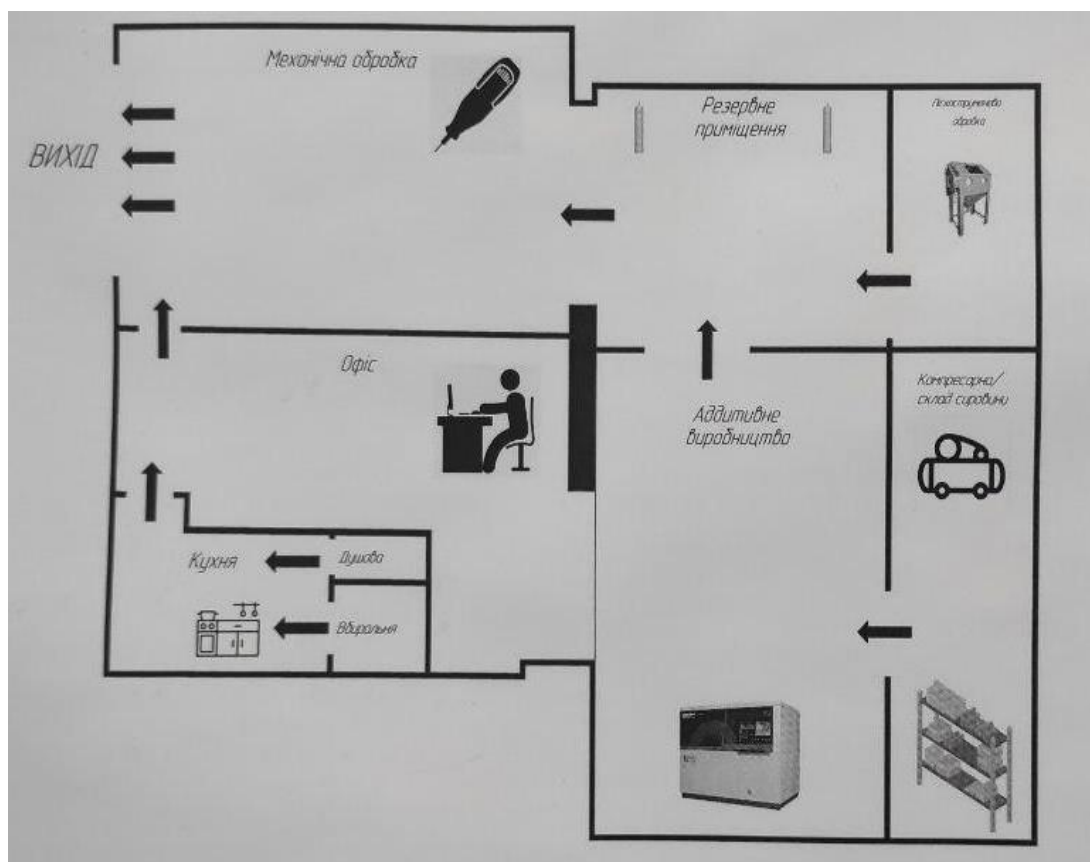
Метою розділу є аналіз шкідливих і небезпечних факторів процесу спрямованої кристалізації щодо створення безпечних і здорових умов праці на робочих місцях, виключення можливості виробничого травматизму, професійних захворювань, пожеж, вибухів. Тому важливою частиною являється дотримання правил безпеки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

4.1 Специфікація технологічного обладнання та оснащення вибраного приміщення

Таблиця 4.1 – Специфікація технологічного обладнання та оснащення вибраного приміщення

№	Найменування	Основні характеристики	Кількість
1	3D-принтер	Метод друку: 3D-друк	1
2	Титановий порошок	Матеріал: Ti6Al4V	1
3	Лазерна система	Лазерна потужність: (вказати характеристику лазерної системи)	1
4	Робоча камера	Розміри: залежать від специфікацій конкретної 3D-друкарки	1

План приміщення в якому проводиться лабораторне дослідження зображений на рисуюнок 4.1.



Рисуюнок 4.1. – План приміщення

Відповідно до основних вимог до будівель виробничого призначення висота виробничих приміщень повинна бути не менше 3,2 м, а об'єм і площа – 15 м^3 та 5 м^2 відповідно на кожного працівника.

У даному випадку площа приміщення складає $S = 15 \cdot 5 = 75 \text{ м}^2$, а об'єм приміщення $V = 15 \cdot 5 \cdot 4,5 = 337,5 \text{ м}^3$. Під час досліджень в лабораторії працює 4 чоловіки, звідки ми отримуємо, що площа на одного чоловіка складає $S_{\text{ч}} = 75/4 = 18,75 \text{ м}^2/\text{чол.}$, а об'єм – $V_{\text{ч}} = 337,5/4 = 84,375 \text{ м}^3/\text{чол.}$

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

№	Параметр приміщення	Реальне значення лабораторії 028	Нормативні значення
1	Площа на 1-го працюючого	18,75 м ²	4,5 м ²
2	Об'єм на 1-го працюючого	84,375 м ³	15 м ³
3	Мінімальна ширина проходу	2,5 м	1,5 м

4.2 Оцінка ключових небезпечних та шкідливих виробничих факторів і розроблення заходів поліпшення

Оцінка ключових небезпечних та шкідливих виробничих факторів і розроблення заходів поліпшення (нормалізації) умов праці в процесі "Виготовлення індивідуального імпланту з Ti6Al4V методом 3Д-друку" включає такі фізичні джерела небезпечних і шкідливих виробничих факторів:

1. Іскри, бризки і викиди розплавленого металу:
 - Забезпечення використання відповідного захисного екрану або кабіни для мінімізації ризику контакту з іскрами та бризками розплавленого металу [22].
 - Застосування безпечних методів роботи з розплавленим металом, таких як використання робочих рукавиць та окулярів [22].
2. Механізми і вироби, що рухаються:

- Встановлення безпечних пристроїв і блокування, які запобігають ненавмисному ввімкненню або руху механізмів під час роботи з ними [22].
- Навчання персоналу правилам безпечної роботи поряд з рухомими механізмами та виробами [29].

3. Надлишковий тиск або вакуум:

- Регулярна перевірка та обслуговування систем, що знаходяться під тиском, для запобігання витoku або вибуху [29].
- Використання відповідного захисного спорядження, такого як шоломи або маски, для роботи з системами під тиском [23].

4. Недостатня освітленість і підвищена яскравість світла:

- Забезпечення достатньої освітленості робочого простору, включаючи використання як природного, так і штучного освітлення [23].
- Використання захисних окулярів або шторок для зменшення яскравості світла [23].

5. Шум та вібрація:

- Встановлення засобів заглушення шуму або використання звукопоглинаючих матеріалів для зниження рівня шуму [28].
- Використання вібраційно-поглинаючих підкладок або рукавичок для зменшення впливу вібрації на руки та тіло працівників [28].

6. Виробничі випромінювання (інфрачервоні, ультрафіолетові, електромагнітні, лазерні, іонізуючі):

- Використання відповідного захисного спорядження, такого як окуляри або костюми, щоб зменшити вплив виробничих випромінювань на працівників [28].
- Регулярна перевірка та обслуговування обладнання, що випромінює, для запобігання небезпечним випромінюванням [28].

Розроблені заходи:

1. Заходи для зменшення ризику іскр, бризків і викидів розплавленого металу:

- Встановлення захисного екрану або кабіни, що забезпечує ізоляцію робочої зони від розплавленого металу.
- Використання автоматизованих систем, які контролюють рух розплавленого металу та мінімізують ризик викиду іскр та бризків.

2. Заходи для безпеки при роботі з механізмами і рухомими виробами:

- Встановлення видимих сигналів і засобів блокування для виявлення руху механізмів та зупинки їх роботи в разі потреби.
- Навчання працівників правилам безпечної роботи поряд з рухомими механізмами та виробами.

3. Заходи для безпеки при роботі з системами під тиском:

- Регулярна перевірка і обслуговування систем, що знаходяться під тиском, для запобігання витoku або вибуху.
- Забезпечення наявності відповідних захисних пристроїв, таких як шоломи або маски, для роботи з системами під тиском.

4. Заходи для поліпшення освітленості робочого місця:

- Встановлення достатнього природного та штучного освітлення для забезпечення оптимальної освітленості робочої зони.
- Використання адекватних світлових фільтрів та шторок для зменшення яскравості світла та попередження засліплення.

5. Заходи для зменшення шуму та вібрації:

- Встановлення звукоізоляційних матеріалів або використання шумопоглинаючих конструкцій для зниження рівня шуму.
- Використання вібраційно-поглинаючих матеріалів або рукавичок для зменшення впливу вібрації на працівників.

4.3. Хімічні джерела небезпечних та шкідливих виробничих факторів (рідини, пари, гази, пил, аерозолі)

У процесі Виготовлення індивідуального імпланту з Ti6Al4V методом 3D-друку хімічні джерела небезпечних та шкідливих виробничих факторів можуть включати наступні речовини:

1. **Розчинники:** Використання розчинників для очищення деталей або усунення залишків матеріалу може створювати ризик отруєння парів або контакту з розчинниками. Деякі поширені розчинники, такі як ацетон, ізопропанол, можуть бути шкідливими для здоров'я, тому необхідно забезпечити належні заходи безпеки при їх використанні [25].
2. **Пил та аерозолі:** Під час обробки та шліфування металевих деталей може утворюватися пил та аерозолі, які можуть містити частинки металу. Ці частинки можуть бути шкідливими для дихальних шляхів, тому необхідно застосовувати відповідні заходи захисту, такі як використання респіраторів або витяжних систем для видалення пилу [25].
3. **Випаровування металу:** Під час процесу 3D-друку з Ti6Al4V можуть виникати випаровування металу. У разі нагрівання та плавлення металевого матеріалу можуть утворюватися пари та гази, які можуть бути шкідливими для дихання. Необхідно забезпечити належну вентиляцію робочої зони та використовувати відповідні захисні засоби, такі як респіратори або витяжні системи [25].
4. **Хімічні реагенти:** В процесі 3D-друку можуть використовуватися хімічні реагенти, такі як розчини для очищення або промивання. Необхідно дотримуватися вимог безпеки та правил використання цих реагентів, включаючи правильне зберігання, вентиляцію та використання особистого захисту [25].

Усі ці хімічні джерела небезпечних та шкідливих виробничих факторів повинні бути враховані при розробці технологічного процесу "Виготовлення індивідуального

імпланту з Ti6Al4V методом 3Д-друку", і необхідні заходи безпеки повинні бути впроваджені для зменшення впливу цих факторів на здоров'я та безпеку працівників.

4.4. Небезпека ураження людини електричним струмом

Ураження людини електричним струмом є серйозною небезпекою, яка може мати негативні наслідки для здоров'я та безпеки. Основні ризики, пов'язані з ураженням електричним струмом, включають:

1. Електричний удар: Прямий контакт з електричним джерелом може призвести до протікання струму через тіло людини. Це може призвести до пошкодження нервової системи, серця і інших органів, а також до опіків [23].

2. Пожежа та вибух: Неправильне встановлення або використання електричного обладнання може призвести до перевантаження електричної системи, перегріву проводів або короткого замикання, що може спричинити пожежу або вибух.

Для запобігання ураженню людини електричним струмом необхідно вживати наступні заходи безпеки:

1. Забезпечити правильну установку, заземлення та ізоляцію електричного обладнання [24].
2. Правильно підключати та відключати електричні прилади, використовуючи безпечний підхід [24].
3. Використовувати безпечні розетки, перехідники та продовжувачі з належною ізоляцією [24].
4. Використовувати захисні пристрої, такі як резидуальний струмовий пристрій (RCD) або автоматичний вимикач [22].
5. Не використовувати електроприлади в близькості до води або вологих середовищ [26].
6. Регулярно перевіряти та обслуговувати електричне обладнання для виявлення можливих проблем [26].
7. Надавати належну інструктаж та навчання працівникам щодо безпеки роботи з електричними пристроями [26].

Відповідні заходи безпеки повинні бути вжиті для забезпечення безпечних умов праці та запобігання ураженню людини електричним струмом.

4.5 Пожежна безпека

Відповідно до [26] та пожежною небезпекою», науково-дослідницька лабораторія, у якій проводилась НДР належить до категорії Б, відповідно до характеристик речовин і матеріалів, що знаходяться у приміщенні (Горючий пил, волокна, легкозаймисті рідини з температурою спалаху більше 28°C, горючі рідини (ГР) в такій кількості, що можуть утворювати вибухонебезпечні пилоповітряні або пароповітряні суміші, у разі займання яких розвивається розрахунковий надлишковий тиск вибуху у приміщенні, що перевищує 5 кПа [27].

Для запобігання пожежі застосовані наступні заходи забезпечення пожежної безпеки:

а) технічні [27]:

- 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 [29]:

- 1) розроблено інструкції про міри пожежної безпеки;
- 2) вивішені на поверххах 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[27]:

- 1) обмеження числа осіб, що здійснюють експлуатацію устаткування;
- 2) виділено визначені місця для паління.

У приміщенні лабораторії встановлено 4 пожежні сигналізатори ИП-105, сигнал з яких надходить на основну панель пожежної сигналізації. Сигналізатори ИП-105 спрацьовують на підвищення температури до $t = 72\text{ }^{\circ}\text{C}$. У коридорі знаходиться пожежний кран із приєднаним пожежним рукавом.

Проведений аналіз шкідливих речовин і небезпечних факторів показав, що всі технологічні операції відповідають нормам. Обладнання устатковане всіма необхідними захисними елементами. Робочі місця— ергономічні, виділені зони відпочинку та є спеціальні місця для спостереження за обладнанням. Більшість процесів автоматизовані. Схема виконання роботи максимально знижує можливість контакту з небезпечними речовинами.

4.6 Висновки до розділу

У процесі "Виготовлення індивідуального імпланту з Ti6Al4V методом 3Д-друку" існують різні фізичні та хімічні джерела небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть впливати на здоров'я та безпеку працівників. Фізичні джерела небезпечних виробничих факторів включають іскри, бризки і викиди розплавленого металу, рухомі механізми і вироби, надлишковий тиск або вакуум, недостатня освітленість, шум та вібрацію, інфразвук, ультразвук та виробничі випромінювання.

Хімічні джерела небезпечних виробничих факторів включають розчинники, пил та аерозолі, випаровування металу та використання хімічних реагентів. Для поліпшення умов праці та забезпечення безпеки необхідно вживати відповідні заходи, такі як встановлення безпечних пристроїв і систем, використання особистого захисту, проведення відповідної вентиляції, навчання працівників правилам безпеки та регулярне обслуговування обладнання. Необхідно дотримуватися вимог безпеки та нормативних вимог, що стосуються ураження людини електричним струмом, забезпечувати належне заземлення, використання ізольованих інструментів та застосування захисних пристроїв. Регулярне оновлення знань та навичок щодо

безпеки праці з небезпечними виробничими факторами є важливим для забезпечення безпеки та запобігання нещасним випадкам.

Загальним висновком є необхідність належної уваги до безпеки та здоров'я працівників у процесі "Виготовлення індивідуального імпланту з Ti6Al4V методом 3Д-друку" шляхом впровадження заходів безпеки та дотримання встановлених стандартів та нормативів.

5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

5.1 Науково-технічна актуальність НДР

У сучасному світі створення імплантів із трабекулярними структурами, що до того ж здатні витримувати високі навантаження, є важливим завданням в медицині та біомедичній інженерії. Такі імпланти можуть бути застосовані для відновлення функцій рухової системи, зокрема для заміни пошкоджених або втрачених суглобів, кісток та інших елементів скелету. Однак, існуючі матеріали та методи виготовлення імплантів не завжди забезпечують оптимальну комбінацію міцності, стійкості та біологічної сумісності.

У цьому контексті, використання титанових імплантів з трабекулярними структурами, виготовлених за допомогою методів 3D-друку, має великий потенціал для досягнення високої міцності та стійкості, а також біологічної сумісності з організмом. Трабекулярна структура імплантів, яка наслідує природну будову кісток, забезпечує ефективне розподілення навантаження і сприяє регенерації тканин.

Методи 3D-друку дозволяють створювати складні геометричні форми імплантів з високою точністю та повторюваністю. Використання титану як матеріалу дозволяє отримати імпланти з високою міцністю при відносно невеликій вазі та великій стійкості до корозії. Крім того, титан є біологічно сумісним матеріалом і має доведену придатність для використання в медичних імплантах.

Останні роки характеризуються активними дослідженнями в області виготовлення титанових імплантів з трабекулярними структурами за допомогою методів 3D-друку. Багато наукових робіт та публікацій присвячені аналізу технологій друку, оптимізації геометрії та параметрів структур імплантів, а також вивченню їх механічних та біологічних властивостей.

Результати досліджень показують, що титанові імпланти з трабекулярними структурами, виготовлені методами 3D-друку, мають високу міцність та стійкість до навантаження. Такі імпланти можуть успішно застосовуватись для реконструкції скелету та заміни пошкоджених суглобів у хворих з високими вимогами до функціональності та тривалості експлуатації.

Проте, на сьогоднішній день існують ряд науково-технічних проблем, які потребують додаткових досліджень і розв'язання. До них належить оптимізація параметрів друку та геометрії трабекулярних структур, вивчення взаємодії між імплантом та організмом для поліпшення біологічної сумісності, а також дослідження механічних трабекулярних структур імплантів.

Отже, розробка титанових імплантів з трабекулярними структурами за допомогою методів 3D-друку є актуальною науково-технічною проблемою. Впровадження таких імплантів може значно покращити якість лікування хворих з пошкодженнями рухової системи та сприяти розвитку науково-технічного прогресу в біомедичній інженерії. Дослідження в цій галузі спрямовані на вирішення проблем, пов'язаних з оптимізацією технологічних процесів, вдосконаленням властивостей матеріалів та підвищенням ефективності використання імплантів. Подальше дослідження в цьому напрямку дозволить досягти значних успіхів у використанні титанових імплантів з трабекулярними структурами для відновлення функцій рухової системи.

5.2 Розрахунок витрат на проведення НДР

Розрахунок усіх витрат організації-виконавця науково-дослідної роботи (НДР), пов'язаних з виконанням теми, дає можливість встановити її собівартість або кошторисну вартість. Кошторис розробляє виконавець робіт на основі календарного плану проведення досліджень і затверджує замовник або орган, що забезпечує фінансування робіт. Як правило, кошторис складається до початку виконання робіт і тому називається плановим. Методичні поради щодо встановлення величини витрат на проведення робіт по темі в розрізі типових статей кошторисної вартості (калькуляції собівартості) НДР наводяться нижче.

5.2.1 Витрати на оплату праці

Витрати за цією статтею включають заробітну плату безпосередніх виконавців теми, а заробітна плата адміністративно-управлінського персоналу, працівників дослідних виробництв включаються в кошторисну вартість теми через статтю «Накладні витрати». Крім цього, слід враховувати, що для тем, які фінансуються за рахунок держбюджету прибуток не планується і тому в дану статтю витрат включається тільки основна заробітна плата (без премій та інших виплат, що здійснюються із прибутку). Витрати на оплату праці розраховують на основі даних про трудомісткість окремих робіт по темі (табл. 5.1) та посадових окладів безпосередніх їх виконавців (таблиця 5.2).

Таблиця 5.1 – Трудомісткість робіт по темі

Найменування робіт по темі дослідження	Трудомісткість за виконавцями, людино-днів			
	Провідний науковий співробітник	Інженер-дослідник	Інженер	Лаборант
Підготовчий етап	5	5	—	—
Проведення експерименту	5	14	1	5
Написання записки	7	20	—	—
Оформлення, перевірка та захист	5	14	—	—
Разом за виконавцями теми	22	53	1	5

Загальна трудомісткість робіт, що виконуються безпосередньо студентом (інженером-дослідником), визначається навчальним планом відповідного напрямку підготовки.

Подальші розрахунки витрат на оплату праці проводяться за алгоритмом, зрозумілим із таблиці 5.2.

Середньоденна заробітна плата за категоріями виконавців розраховується шляхом ділення їх посадового місячного окладу на 21,2 (де 21,2 – усереднене число робочих днів за місяць).

Таблиця 5.2 – Розрахунок витрат на оплату праці

Посада виконавців теми	Планова трудомісткість , люд-днів	Заробітна плата, грн		
		Посадовий місячний оклад	Середньоденна зарплата	Усього за виконавцями
1.Старший лаборант з вищою освітою	23	8 390	395,75	9102,358
2.Інженер-дослідник	56	10 530	496,70	27815,094
3. Технік	16	6 680	315,09	5041,509
Разом оплата праці з теми				41958,962

5.2.2 Єдиний соціальний внесок

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ) – це обов’язкове відрахування на загальнодержавне соціальне страхування. З 1 січня 2016 р. ставка ЄСВ складає 22 %. Базою для нарахування ЄСВ слугують загальні витрати на оплату праці по темі (підсумок по табл.1.2).

$$\text{ЄСВ} = \text{ЗП} \cdot 0,22, \quad (5.1)$$

де ЗП – загальні витрати на оплату праці по темі.

Наразі ЄСВ буде становити:

$$\text{ЄСВ} = 41958,962 \cdot 0,22 = 9230,97 \text{ грн.} \quad (5.2)$$

5.2.3 Матеріали, необхідні для проведення досліджень

Вартість матеріалів, необхідних для проведення даної науково-дослідної роботи, може бути розрахований шляхом перемноження ціни одиниці матеріалу на загальну кількість використаного матеріалу. Результати розрахунків зведені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Вартість матеріалів, необхідних для виконання НДР

Найменування матеріалу	Одиниця виміру	Кількість	Ринкова ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
Порошок ВТ6	кг	0,011	11099	122,089
Загальні витрати на матеріали				122,089

Транспортно-заготівельні витрати приймаємо на рівні 10 % від планової вартості загальних витрат на матеріали:

$$T_b = 122,089 \cdot 0,1 = 12,209 \text{ грн.} \quad (5.3)$$

У такому разі загальна сума витрат на закупівлю матеріалів та їх транспортування буде становити:

$$B_m = 122,089 + 12,209 = 134,298 \text{ грн.} \quad (5.4)$$

5.2.4 Енергоносії для проведення досліджень

Всі роботи проводились безпосередньо в лабораторіях центру колективного користування обладнанням «Матеріалознавство тугоплавких сполук та композитів» НН ІМЗ ім. Є.О. Патона, тому витрати на енергоносії не передбачені.

5.2.5 Витрати на спеціальне обладнання

У роботі використовуються існуючі засоби обладнання, а саме:.. Додаткового спеціального устаткування не придбавалося.

5.2.6 Вартість послуг сторонніх організацій

У виконанні даної роботи сторонні організації участі не приймали. Оскільки дана робота не потребувала оренди дослідницьких установок, адже всі вони були в наявності.

Зразки вивчались безпосередньо в лабораторіях центру колективного користування обладнанням «Матеріалознавство тугоплавких сполук та композитів» НН ІМЗ ім. Є.О. Патона, тому витрати на послуги сторонніх організацій не передбачені.

5.2.7 Витрати на службові відрядження

Дослідження були проведені з використанням наявного обладнання, яке знаходиться в лабораторіях центру колективного користування обладнанням «Матеріалознавство тугоплавких сполук та композитів» НН ІМЗ ім. Є.О. Патона, тому витрати на виробничо-наукові відрядження не передбачені.

5.2.8 Інші прямі невраховані витрати

Ця стаття охоплює всі додаткові витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідних робіт, які не були враховані в попередніх статтях. Серед цих витрат включаються оплата фахівців з інших організацій, консультаційні послуги, використання обладнання інших організацій та інші витрати, пов'язані з цим. При

проведенні роботи інші прямі витрати приймаємо на рівні 10 % від суми врахованих витрат на виконання НДР.

$$I_B = (ЗП + ЄСВ + B_M) \cdot 0,1. \quad (5.5)$$

Наразі I_B буде становити:

$$I_B = (41958,96 + 9230,97 + 134,30) \cdot 0,1 = 5132,42 \text{ грн.} \quad (5.6)$$

5.2.9 Накладні витрати

Ця стаття включає витрати, пов'язані з управлінням організацією-виконавцем теми, витрати на винахідництво і раціоналізацію; витрати на амортизацію основних засобів; витрати на науково-технічну інформацію; витрати на забезпечення нормальних умов праці і техніки безпеки; витрати на оплату послуг банків; податки, збори та інші обов'язкові платежі і витрати тощо.

Накладні витрати (H_B) по НДР визначаються у відсотках до прямих витрат. У Інституті проблем матеріалознавства відсоток накладних витрат складає 20 % від суми всіх прямих витрат по ДР:

$$H_B = (ЗП + ЄСВ + B_M + I_B) \cdot 0,2. \quad (5.7)$$

Тоді H_B буде становити:

$$H_B = (41958,96 + 9230,97 + 134,30 + 5132,42) \cdot 0,2 = 11291,33 \text{ грн.} \quad (5.8)$$

5.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Планова калькуляція вартості проведення досліджень по темі складається на підставі виконаних розрахунків та нормативних даних (див. табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування статей	Сума, грн	Обґрунтування
Витрати на оплату праці	41958,962	Відповідно до розрахунків
Єдиний соціальний внесок	9230,97	22 % від ЗП
Матеріали на проведення досліджень	134,30	Відповідно до розрахунків
Енергоносії для проведення досліджень	–	Відповідно до розрахунків
Витрати на спеціальне обладнання	–	Відповідно до розрахунків
Витрати на послуги сторонніх організацій	–	Не передбачено
Витрати на службові відрядження	–	Не передбачено
Інші прямі витрати	5132,42	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
Накладні витрати	11291,33	20 % від суми прямих витрат
Усього витрат по темі	67747,986	Сума попередніх статей

5.3 Науково-технічна ефективність НДР

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

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

Частку сумарного річного економічного ефекту, що утвориться за кожною з перелічених шкал, позначають умовно відповідним номеру шкали коефіцієнтом (K_1 , K_2 , K_3 , K_4). Наведемо докладніше систему оцінки за кожною шкалою. Першою розглянемо шкалу важливості розробки.

Коефіцієнт K_1 може приймати наступні значення:

- ініціативна робота, яка не входить до складу комплексної програми та не є завданням директивних органів – 1 бал;
- робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво – 3 бали;
- робота являє собою частину відомчої програми – 5 балів;
- робота являє собою частину комплексної міжвідомчої програми з елементами впровадження результатів – 7 балів;
- робота є частиною міжнародної комплексної програми – 8 балів.
- Коефіцієнт K_2 може приймати такі значення:
- результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією 3 бали;
- результати розробки можуть бути використані багатьма організаціями 5 балів.
- результатами розробки можуть користуватися споживачі в межах однієї галузі – 8 балів;
- результатами розробки можуть користуватися споживачі в різних галузях – 10 балів.
- Коефіцієнт K_3 може приймати такі значення:
- робота являє собою аналіз, узагальнення або класифікацію відомої інформації, подібні результати раніше були відомі в досліджуваній галузі – 2 бали;
- під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів – 3 бали;

- внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів – 5 балів;
- внаслідок виконання НДР створені нові теорії, методики або що-небудь подібне – 6 балів;
- отримана інформація формує принципово нові уявлення, які не були відомі раніше – 8 балів.
- Коефіцієнт K_4 може приймати такі значення:
 - роботу виконує один підрозділ, витрати до 10 000 гривень – 1 бал;
 - роботу виконує один підрозділ, витрати від 10 000 до 50 000 гривень – 3 бали;
 - роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень – 5 балів;
 - робота виконується багатьма підрозділами, витрати від 100 000 до 200 000 гривень – 7 балів;
 - робота виконується багатьма організаціями, витрати понад 200 000 гривень – 9 балів.
- Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів.

$$Б = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4. \quad (5.9)$$

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

$$Б = 1 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 5 = 200. \quad (5.10)$$

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

$$E_{\text{НДР}}^y = 500 \cdot Б - E_n \cdot V_{\text{НДР}}, \quad (5.11)$$

де 500 – умовна вартість одного балу; E_n – нормативний коефіцієнт економічної ефективності (може бути в межах 0,1 – 0,3, для розрахунку обираємо $E_n = 0,25$); $V_{\text{НДР}}$ – сумарні витрати на виконання НДР (підсумок табл. 5.4);

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 200 - 0,25 \cdot 67747,986 = 83063 \text{ грн.} \quad (5.12)$$

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

$$E_e = E_{\text{НДР}} / V_{\text{НДР}}. \quad (5.13)$$

Таблиця 5.5 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показники оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристика даної розробки	Кількість балів
Важливість розробки	K_1	Робота ініціативна, не є завданням будь-яких директивних органів або частиною комплексної програми	1
Можливість використання результатів розробки	K_2	Результатами розробки можуть користуватися споживачі в межах однієї галузі	8
Теоретична значимість та рівень новизни розробки	K_3	Внаслідок виконання роботи отримана нова інформація, яка частково змінює уявлення про природу досліджуваних процесів	5
Складність проведення дослідження	K_4	Роботу виконує один підрозділ, витрати від 50 000 до 100 000 гривень	5

У нашому прикладі E_e буде становити:

$$E_e = 83063 / 67747,986 = 1,226. \quad (5.14)$$

Коефіцієнт економічної доцільності виконання даної науково-дослідної роботи становить $E_e = 1,226$ (перевищує одиницю), тобто виконання цієї роботи є економічно вигідним.

5.4 Висновки до розділу

Під час виконання даного розділу було розраховано сумарні витрати на виконання НДР, які складають 67747,986 грн. Також визначено, що проведений економічний аналіз підтверджує доцільність даного науково-дослідницького проєкту з економічної перспективи.

ВИСНОВКИ

Проведено хімічний, гранулометричний та рентгенофазовий аналіз сферичного порошку Ti6Al4V, призначеного для 3D друку за технологією SLM.

З використанням програмного забезпечення Blender була розроблена 3D модель імпланту.

Методом 3D друку за технологією SLM було отримано імплант та досліджено його механічні характеристики. Встановлена повна відповідність по вимогам отриманого виробу для виготовлення імплантів для вживлення в живий організм.

Порівняння створеного методом 3D друку за технологією SLM зразка з еталонною моделлю імпланту показало, що розбіг розмірів становив не більше 0.1 мм, що цілком вписується в похибку сканера, а отже, деталь виготовлена в допустимих межах погрішності.

Економічні розрахунки показали, що сумарні витрати на виконання НДР складають 67747,986 грн. Проведений економічний аналіз підтверджує доцільність даного науково-дослідницького проєкту з економічної перспективи.

CONCLUSIONS

Chemical, granulometric and X-ray phase analysis of Ti6Al4V spherical powder intended for 3D printing using SLM technology was carried out.

A 3D model of the implant was developed using Blender software.

The implant was obtained by the method of 3D printing using SLM technology and its mechanical characteristics were studied. Full compliance with the requirements of the obtained product for the manufacture of implants for implantation into the living body has been established.

A comparison of the sample created by 3D printing using SLM technology with the reference model of the implant showed that the deviation in dimensions was no more than 0.1 mm, which is completely within the scanner error, and therefore, the part was manufactured within the permissible limits of error.

Economic calculations showed that the total costs of implementing the NDR amount to UAH 67,747.986. The conducted economic analysis confirms the expediency of this research project from an economic perspective.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Rosen I. Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing / I. Gibson, D. Stucker, B. Additive. - New York Springer, 2015. – 755 p.
2. Frazier W.E. Metal Additive Manufacturing: A Review. / W.E. Frazier // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2014. - 23(6). - 1917-1928 p.
3. Gu D.D. Meiners W. Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials / D.D. Gu, W. Meiners - Berlin Springer. 2019. - 356 p.
4. Murr L.E. Metallurgy and Design of Alloys with Hierarchical Microstructures / L. E. Murr. - Amsterdam Elsevier. 2016. - 678 p.
5. Zäh M.F. Proceedings of the 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference / Zäh, M.F., Lutzmann, S. // University of Texas at Austin. 2015. - 123-125 p.
6. Kumar S. Additive Manufacturing: Applications and Innovations / S. Kumar, J. P. Kruth. Singapore Springer. 2020. – 317 p.
7. Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties. / T. DebRoy, H.L. Wei, J.S. Zuback et all // Progress in Materials Science. – 2018. - 92. - 112-224 p.
8. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti–6Al–4V / L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs et all // Acta Materialia. – 2010. - 58(9). - 3303-3312 p.
9. Сайт приватної компанії – « Bozhong Metal Group » [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.bzstainless.com/grade-23-ti-6al-4v-eli-alloy-unsr56401.html?gclid=Cj0KCQiA8aOeBhCWARIsANRFrQEd9Sr3WByBWkyL5IEswH9ZMNUuJzr3ftSrrsNTRXXlmK_IPr0xxkAaAnfXEALw_wcB. – Назва з екрану. – Дата перегляду: 18.05.2023.
10. Sasai K. Suppression of Postmitochondrial Signaling and Delayed Response to UV-induced Nuclear Apoptosis in HeLa Cells / K. Sasai, H. Yajima, F. Suzuki // Japanese journal of cancer research. - 2002. - 93(3). - 275-283.
12. Wittbrodt B. The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components / B. Wittbrodt, J M. Pearce, // Additive Manufacturing. – 2015. – 8. - 110-116 p.

13. Gibson I. Additive manufacturing technologies / I. Gibson, D. Rosen, Stucker, B. - Springer. - 2015. - 789 p.
14. Gao W. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering / W. Gao // Computer-Aided Design. - 2015. – 69. - 65-89 p.
15. Mani M Additive manufacturing and metrology: A review of state-of-the-art and practical applications / M. Mani, B. Lane, A. Donmez // Measurement Science and Technology, - 2015. - 26(12). - 123001.
16. Єфременко Б.В. 3D друк в умовах біомедичного використання конспект лекцій з дисципліни «3D друк в умовах біомедичного використання» // Б.В. Єфременко. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – 56 с.
17. Ong J. Kerr Clinical Potential of GABAB Receptor Modulators / J. Ong, I.B. David // In ASM Specialty Handbook. ASM International. - 2006ю - 11(3). - 317–334 p.
18. Microstructure and mechanical behavior of Ti–6Al–4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications / L.E. Murr, S.A. Quinones, S.M. Gaytan, et al. // Journal of the mechanical behavior of biomedical materials. – 2009. - 2(1). - 20-32.
19. Traini T. Direct laser metal sintering as a new approach to fabrication of an isoelastic functionally graded material for manufacture of porous titanium dental implants / T. Traini, 20. C. Mangano, R.L. Sammons // Dental Materials. – 2008. - 24(11). - 1525-1533.
- Sing S.L. Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs / S.L. Sing, J. Yeong, W.Y. Wiria // Journal of Orthopaedic Research 34 - 2016. – (3). - 369-385.
21. НПАОП 27.0-1.01-08. Правила охорони праці в металургійній промисловості.
- 22.НПАОП 28.0-1.37-14. Правила охорони праці при нанесенні металопокриттів.
- 23.НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.
- 24.НАПБ Б.01.008-2018. Правила експлуатації та типові норми належності вогнегасників.
- 25.НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок.

- 26.НАПБ Б.03.002-2007 «Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.
27. Охорона праці та цивільний захист / О.Г. Левченко, О.І. Полукаров, В.В. Зацарний та ін. // за ред. О.Г. Левченка. – К. Основа, 2019. – 472 с.
- 28.Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний та ін. – К. Основа, 2006. – 448 с.
29. ДСТУ 7239:2011. Національний стандарт України. Система стандартів безпеки праці. Засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація.