

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

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____Юрій БОГОМОЛ

«___»_____2026 р.

Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою
«Нанотехнології та комп'ютерний дизайн матеріалів»
спеціальності 132 «Матеріалознавство»
на тему: «Дільниця з виробництва сферичних порошків титанових
сплавів для адитивного виробництва»

Виконав:

студент IV курсу, групи ФН-з21

Чечко Назар Валентинович

Керівник:

Доцент каф ВТМ та ПМ, к.т.н., ст. дослідник

Солодкий Євген Васильович

Консультант з організаційного-економічного розділу:

Доцент, к.е.н., доцент

Нараєвський Сергій Вікторович

Консультант з охорони праці:

Зав.кафедри, д.т.н., професор

Левченко Олег Григорови

Нормоконтроль:

Доцент, к.т.н., доцент

Бірюкович Ліна Олегівна

Рецензент:

Доцент, к.т.н., доцент

Іващенко Є.В.

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

[illegible]

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

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Чечко Назару Валентиновичу

1. Тема проєкту «Дільниця з виробництва сферичних порошків титанових сплавів для адитивного виробництва», керівник проєкту Доцент каф ВТМ та ПМ, к.т.н., ст. дослідник Солодкий Євген Васильович, затверджені наказом по університету від «28» травня 2026р. №1987
2. Термін подання студентом проєкту 12.06.2026
3. Вихідні дані до дипломного проєкту. Вимоги до сферичного порошку Ti-6Al- 4: діапазон розмірів 10-60 мкм; ступінь сферичності не гірше 0,9; вміст кисню не більше 0,13 мас.%, алюмінію 5,5-6,75, ванадію 3,5-4,5. Річна продуктивність виробництва: 10 тон/рік.
4. Зміст пояснювальної записки. Вступ, технологічний розділ, будівельний розділ, спеціальний розділ, охорона праці, організаційно-економічний розділ, висновки.
5. Перелік графічного матеріалу. План дільниці, апаратно-технологічна схема, атомасітор ALD EIGA-50, техніко-економічні показники.

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Організаційно-економічний	Нараєвський С.В. доцент		
Охорона праці	Левченко Олег Григорович зав..кафедри		

7. Дата видачі завдання **05.06.2026 року.**

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Технологічна частина	20.05.26-04.06.26	
2	Матеріальний баланс і розрахунок обладнання	24.05.26-06.06.26	
3	Графічна частина	01.06.26-08.06.26	
4	Оформлення пояснювальної записки	20.05.26-08.06.26	
5	Оформлення будівельного розділу	07.06.26-08.06.26	
6	Оформлення спеціального розділу	06.06.26	
7	Оформлення розділу охорони праці	07.06.26	
8	Оформлення організаційно-економічного розділу	08.06.26	
9	Захист	16.06.26	

Студент

Назар ЧЕЧКО

Керівник проєкту

Євген СОЛОДКИЙ

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Дільниця з виробництва
сферичних порошків титанових сплавів
для адитивного виробництва»**

Київ – 2026

РЕФЕРАТ

Проект складається з пояснювальної записки формату А4 та графічної частини. Пояснювальна записка обсягом 83 сторінок, вміщує 8 рисунків, 24 таблиць, 42 бібліографічних найменувань. Графічна частина представлена 4 кресленнями на аркушах формату А4.

ГАЗОВА АТОМІЗАЦІЯ, МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС, ТИТАНОВИЙ СПЛАВ, TI-6AL-4V, EIGA.

Метою дипломного проекту є вибір оптимального технологічного процесу, розрахунок матеріального балансу для отримання порошку із заданими характеристиками з річною продуктивністю 10 тонн/рік.

У технологічному розділі обґрунтовано використання методу безтигельної газової атомізації як найефективнішого для отримання високочистих титанових порошків. Проведено детальні матеріальні розрахунки, які дозволили обрати необхідну кількість технологічного обладнання та встановити його.

У розділі охорони праці проаналізовано специфічні умови експлуатації обладнання та ідентифіковано параметри небезпечних і шкідливих виробничих чинників.

В енергетичному, організаційному та економічному розділах проекту визначено питомі витрати електроенергії на індукційний нагрів та компресування газу, розраховано оптимальну чисельність персоналу, фонд оплати праці та собівартість одиниці продукції. Доведено високу економічну ефективність проекту: термін окупності капітальних інвестицій становить 5,6 років.

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Чечко Н.В.			РЕФЕРАТ		
Перевір.		Солодкий Є.В.					
Реценз.							
Н. Контр.		Бірюкович Л.О.					
Затверд.		Богомол Ю. І.					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						2	2
					НТУУ«КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-з21		

ABSTRACT

The project consists of an explanatory note in A4 format and a graphical part. The explanatory note is 83 pages long and contains 8 figures, 24 tables, and 42 bibliographic references. The graphical part is represented by 4 drawings on A4 sheets.

TITANIUM ALLOY, TI-6AL-4V, GAS ATOMIZATION, EIGA, MATERIAL BALANCE.

The aim of the diploma project is to select the optimal technological process and calculate the material balance to obtain a powder with specified characteristics at an annual production capacity of 10 tons/year.

The technological section justifies the use of the crucible-free gas atomization method as the most effective approach for producing high-purity titanium powders. Detailed material calculations were performed, which allowed for the selection and positioning of the necessary technological equipment.

In the occupational safety section, the specific operating conditions of the equipment were analyzed, and the parameters of hazardous and harmful production factors were identified.

In the energy, organizational, and economic sections of the project, the specific energy consumption for induction heating and gas compression was determined; the optimal number of personnel, the payroll fund, and the unit cost of production were calculated. The high economic efficiency of the project has been proven: the payback period of capital investments is 5,6 years.

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ABSTRACT		
Розроб.		Чечко Н.В.					
Перевір.		Солодкий Є.В.					
Реценз.							
Н. Контр.		Бірюкович Л.О.					
Затверд.		Богомол Ю. І.					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						3	2
					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-з21		

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	7
1.1 Вибір матеріалу	7
1.2 Огрунтування вибору технологічної схеми	15
1.2.1 Порівняльний аналіз методів атомізації	15
1.2.2 Термодинамічні та гідродинамічні закономірності	18
1.2.3 Опис технологічних операцій	20
1.3 Розрахунок та складання балансу матеріалів	23
1.3.1 Теоретичні основи матеріального балансу	23
1.3.2 Обґрунтування коефіцієнтів	24
1.3.3 Поетапний математичний розрахунок балансу	25
1.4 Вибір необхідної кількості технологічного обладнання	34
1.4.1 Вибір основного обладнання	34
1.4.2 Вибір обладнання ділянки класифікації	40
1.4.3 Вибір обладнання ділянки гомогенізації	41
1.4.4 Вибір обладнання ділянки фасування	42
2 БУДІВЕЛЬНИЙ РОЗДІЛ	44
2.1 Об'ємно-планувальні рішення ділянки	44
2.2 Архітектурно-конструктивні рішення	45
2.3 Розрахунок витрат електроенергії	46
3 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ	48
3.1 Оптимізація газодинамічних параметрів	48
3.1.1 Фізико-механічні закономірності розпаду	48
3.1.2 Дослідження впливу тиску аргону	50
3.1.3 Запобігання утворенню сателітів	50
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	52
4.1 Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві	52
4.2 Аналіз параметрів приміщення	53

4.3 Аналіз освітленості приміщення.....	55
4.4 Аналіз шуму та вібрації	56
4.5 Аналіз загазованості та запиленості	56
4.6 Аналіз систем вентиляції.....	57
4.7 Аналіз електромагнітного та теплового випромінювання.....	57
4.8 Електробезпека	58
4.9 Пожежна безпека	58
4.10 Засоби індивідуального захисту.....	59
5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ	61
5.1 Розрахунок чисельності виробничих робітників.....	61
5.2 Визначення фондів заробітної плати.....	63
5.3 Розрахунок продуктивності праці.....	66
5.4 Розрахунок капітальних вкладень	66
5.5 Розрахунок собівартості продукції	70
5.6 Розрахунок прямих матеріальних витрат	70
5.7 Загальновиробничі витрати	71
5.8 Розрахунок планової калькуляції собівартості продукції	71
5.9 Розрахунок показників економічної ефективності	72
ВИСНОВКИ	76
CONCLUSIONS	77
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	78
ДОДАТКИ	81

ВСТУП

Сучасний етап розвитку високотехнологічних галузей промисловості, зокрема аерокосмічного машинобудування, автомобілебудування та біомедичної інженерії, нерозривно пов'язаний із масштабним впровадженням технологій адитивного виробництва. Серед широкого спектра методів 3D-друку домінуючі позиції займають технології синтезу на підкладці – селективне лазерне плавлення (L-PBF/SLM) та електронно-променеве плавлення (EBM). Застосування цих технологій дозволяє створювати деталі зі складною топологічною оптимізацією, внутрішніми порожнинами та біонічним дизайном, що неможливо реалізувати традиційними методами субтрактивної обробки.

Найбільш затребуваним матеріалом для виготовлення критично важливих деталей є титановий сплав системи Ti-6Al-4V. Цей матеріал володіє унікальним комплексом властивостей: високою питомою міцністю, винятковою корозійною стійкістю та абсолютною біосумісністю. Проте, ключовим бар'єром для подальшого масштабування адитивних технологій є гострий дефіцит якісної вихідної сировини – сферичних титанових порошків із заданими фізико-хімічними характеристиками.

Для технологій порошкового шару висуваються надзвичайно жорсткі вимоги: порошок повинен мати високий ступінь сферичності (не менше 0,9) для забезпечення бездоганної текучості та високої щільності пакування; вузький гранулометричний склад (переважно 10–60 мкм для лазерних систем); а також абсолютну відсутність неметалевих включень і мінімальний вміст домішок впровадження.

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВСТУП		
Розроб.		Чечко Н.В.					
Перевір.		Солодкий Є.В.					
Реценз.							
Н. Контр.		Бірюкович Л.О.					
Затверд.		Богомол Ю. І.					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						6	1
					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-321		

1 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Вибір матеріалу для виготовлення виробу згідно з поставленим завданням

Згідно з технічним завданням, кінцевим продуктом виробництва є сферичний титановий порошок фракції 10–60 мкм із високим ступенем сферичності (не гірше 0,9). Жорсткі вимоги висуваються до хімічного складу матеріалу: вміст алюмінію має становити 5,5–6,75 мас.%, ванадію 3,5–4,5 мас.%, а вміст кисню суворо обмежується показником не більше 0,13 мас.%.

Для виконання цього завдання проведено порівняльний аналіз існуючих марок титану та його сплавів:

Нелегований (комерційно чистий) титан (CP Ti Grade 1–4): відрізняється високою корозійною стійкістю та пластичністю, проте не містить необхідних легуючих елементів (алюмінію та ванадію) і не забезпечує необхідного рівня міцності, тому не відповідає умовам завдання.

Спеціальні титанові сплави (алюмініди титану TiAl, β -сплави): мають специфічні властивості для вузькоспеціалізованих задач (надвисока жароміцність або низький модуль пружності), але їхній базовий хімічний склад кардинально відрізняється від заданої системи Ti-Al-V.

Стандартний сплав Ti-6Al-4V (Grade 5): є найпоширенішим ($\alpha + \beta$)-титановим сплавом, що містить необхідну кількість алюмінію та ванадію. Проте міжнародні стандарти для Grade 5 допускають вміст домішок кисню до 0,20 мас.%, що перевищує максимально допустиму межу технічного завдання (0,13 мас.%).

Титановий сплав Ti-6Al-4V ELI (Grade 23): модифікація базового сплаву з наднизьким вмістом домішок проникнення. У цьому матеріалі

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Чечко Н.В.			ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ		
Перевір.		Солодкий Є.В.					
Реценз.							
Н. Контр.		Бірюкович Л.О.					
Затверд.		Богомол Ю. І.					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						7	38
					НТУУ«КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-321		

жорстко обмежено вміст кисню ($\leq 0,13$ мас.%), азоту ($\leq 0,05$ мас.%), вуглецю ($\leq 0,08$ мас.%) та заліза ($\leq 0,25$ мас.%).

Обґрунтування вибору: на основі проведеного аналізу для виробництва виробів обрано титановий сплав Ti-6Al-4V ELI (Grade 23). Тільки ця марка матеріалу стовідсотково відповідає вимогам технічного завдання щодо вмісту легуючих елементів та кисню.

Знижений вміст кисню відіграє критичну роль у процесі адитивного виробництва (3D-друку), для якого призначається виготовлений сферичний порошок. Кисень у титані діє як потужний α -стабілізатор, що значно підвищує міцність, але різко знижує пластичність і в'язкість руйнування. Використання сплаву Grade 23 ($O_2 \leq 0,13\%$) гарантує високу стійкість надрукованих деталей до утворення мікротріщин, чудову втомну міцність та високу біосумісність, що робить цей порошок ідеальним матеріалом для аерокосмічної галузі та медичного імплантування. Хімічна чистота та сферичність частинок ($\geq 0,9$) забезпечуватиметься використанням методу безтигельної індукційної газової атомізації (EIGA).

Титановий сплав системи Ti-6Al-4V Grade 23 належить до класичної групи двофазних ($\alpha + \beta$)-сплавів мартенситного класу [1,2]. Кристалографічна архітектура даного матеріалу визначається термодинамічною стабільністю та об'ємною часткою двох основних алотропних модифікацій титану:

α -фаза: Кристалізується у гексагональній щільноупакованій (ГПУ) решітці. При кімнатній температурі параметри решітки для нелегованого титану становлять $a = 0,29506$ нм та $c = 0,46835$ нм, з осьовим відношенням $c/a = 1,587$, що є меншим за ідеальне значення для щільної упаковки куль (1,633). Введення алюмінію як легуючого елемента заміщення призводить до зменшення параметра a та збільшення відношення c/a , що суттєво змінює анізотропію пружних властивостей та механізмів пластичної деформації [2,3].

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

β -фаза: Кристалізується в об'ємноцентрованій кубічній (ОЦК) решітці. Параметр решітки при температурах існування стабільної фази становить $a = 0,332$ нм. ОЦК-структура має вищу кількість систем легкого ковзання порівняно з ГПУ-структурою, що забезпечує підвищену пластичність та здатність до гарячої деформації [2,3].

Критична температура поліморфного $(\alpha + \beta \rightarrow \beta)$ -перетворення (температура трансусу T_β) є найважливішим термодинамічним параметром при проектуванні процесів термічної та металургійної обробки. Для високочистого сплаву Grade 23 ELI значення T_β лежить у вузькому діапазоні 975–985°C, що на 15–20°C нижче, ніж для стандартного технічного сплаву Grade 5 ($T_\beta \approx 995 - 1000^\circ\text{C}$) [3,4]. Побудова точної емпіричної залежності температури поліморфного перетворення від хімічного складу сплаву описується рівнянням:

$$T_\beta = 882 + 21,1 \cdot [\text{wt. \%Al}] - 9,5 \cdot [\text{wt. \%V}] + 23,3 \cdot [\text{wt. \%Fe}] + 420 \cdot [\text{wt. \%O}] - 30 \cdot [\text{wt. \%C}]$$

Ці коефіцієнти у рівнянні для розрахунку температури β -трансусу є емпіричними константами. Вони отримані експериментальним шляхом за допомогою методів математичної статистики та регресійного аналізу величезних масивів експериментальних даних.

У дипломному проєкті це рівняння є критично важливим інструментом автоматизації: підставляючи у формулу точні дані з сертифіката хімічного аналізу кожної вхідної партії прутків (електродів), технолог дільниці миттєво отримує точне значення T_β для конкретної плавки [3,4]. Це дозволяє гнучко коригувати потужність високочастотного індуктора атомізатора для забезпечення оптимального перегріву розплаву ($\Delta T = 30\text{--}50^\circ\text{C}$ вище за температуру плавлення) без ризику неконтрольованого випаровування

легуючих елементів.

Роль алюмінію та ванадію як легуючих елементів заміщення.

Легуючі елементи системи Ti-6Al-4V за характером їхньої взаємодії з титаном та впливом на діаграму фазової рівноваги поділяються на дві категорії.

Алюміній (Al): Є типовим α -стабілізатором заміщення [1,3]. Розчинність алюмінію в α -титані сягає 7,5 мас.% при температурі поліморфного перетворення. Введення алюмінію розширює температурну область існування ГПУ-фази у бік високих температур. Механізм стабілізації полягає в електронній взаємодії: алюміній знижує концентрацію вільних електронів на атом (e/a), стабілізуючи тим самим менш щільну ГПУ-упаковку. Окрім термодинамічної ролі, алюміній забезпечує ефективне твердорозчинне зміцнення за рахунок створення локальних полів пружних спотворень внаслідок різниці атомних радіусів ($R_{Ti} = 0,146$ нм, $R_{Al} = 0,143$ нм).

Ванадій (V): Належить до групи ізоморфних β -стабілізаторів [1,3]. Він має необмежену розчинність в ОЦК-модифікації титану і обмежену (до 1,5 мас.%) – у ГПУ-модифікації. Ванадій знижує вільну енергію ОЦК-фази при низьких температурах, збільшуючи електронну концентрацію e/a . Це призводить до розширення двофазної ($\alpha + \beta$)-області та зниження температури початку мартенситного перетворення (M_H). Присутність 4 мас.% ванадію дозволяє при кімнатній температурі зберегти у структурі після відпалу близько 6-10 об.% залишкової β -фази, яка розподіляється у вигляді тонких прошарків по границях пластин α -фази, гальмуючи ріст зерна та підвищуючи тріщиностійкість [1,5].

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

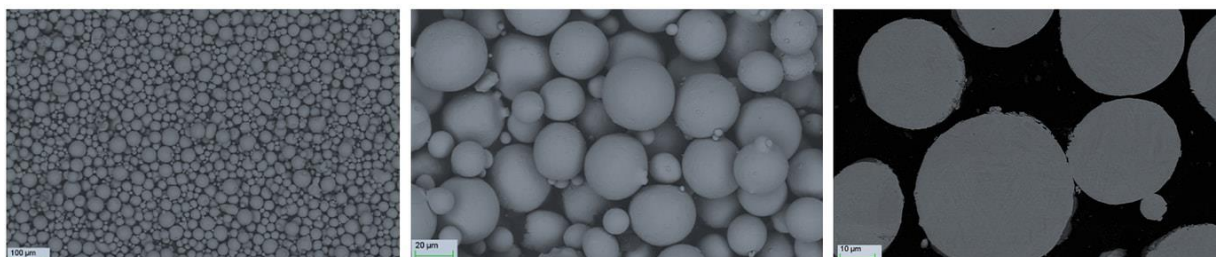


Рисунок 1.1 – Сферичний титановий порошок сплаву Ti-6Al-4V

Вплив домішок впровадження на механічні властивості та дислокаційне ковзання. Домішки впровадження (кисень O, азот N, водень H, вуглець C) мають малий атомний радіус порівняно з титаном і займають октаедричні або тетраедричні міжвузля у кристалічній решітці. Для сплаву Grade 23 ELI встановлено суворі ліміти на ці елементи, що відображено у таблиці 1.1 [1,3]:

Таблиця 1.1 – Граничні концентрації домішок

Домішка	Граничний вміст за стандартом, мас%	Тип міжвузля, що займається	Вплив на параметри решітки α -фази
Кисень (O)	$\leq 0,13$	Октаедричні	$\Delta c = +0,0045$ нм/ат.%
Азот (N)	$\leq 0,03$	Октаедричні	$\Delta c = +0,0060$ нм/ат.%
Вуглець (C)	$\leq 0,08$	Октаедричні	Локальні спотворення
Водень (H)	$\leq 0,012$	Тетраедричні	Схильність до гідридоутворення

Фізико-хімічний механізм охрупчування титану при підвищенні концентрації кисню понад 0,13 мас.% базується на блокуванні дислокаційного ковзання [3]. Кисень, займаючи октаедричні порожнини ГПУ-решітки, створює несиметричні тетрагональні поля напружень. Ці поля взаємодіють із рухомими гвинтовими та крайовими дислокаціями в основній призматичній системі ковзання.

За підвищенні вмісту кисню критичне приведенне сколювальне напруження (τ_{CRSS}) зростає за експоненціальним законом:

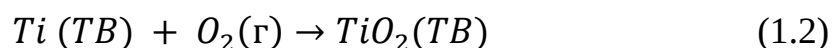
$$\tau_{CRSS} = \tau_0 + A \cdot \sqrt{C_O} \quad (1.1)$$

де C_O – атомарна концентрація кисню.

Це призводить до локалізації пластичної деформації, неможливості релаксації напружень на границях зерен та передчасного крихкого руйнування за механізмом відколу.

Для адитивного виробництва, де заготовки піддаються багаторазовим циклам швидкісного лазерного переплаву, вихідний низький вміст кисню ($\leq 0,11 - 0,12$ у прутку) забезпечує необхідний технологічний запас, оскільки у процесі 3D-друку неминуче відбувається сорбція залишкового кисню з атмосфери камери принтера.

Термодинаміка високотемпературної взаємодії з газовими середовищами. Висока хімічна активність сплаву Ti-6Al-4V при температурах вище 400°C зумовлена високим значенням негативної енергії Гіббса утворення оксидів [4]. Процес взаємодії титану з киснем описується реакцією



Зміна стандартної енергії Гіббса (ΔG_f°) для цієї реакції в температурному діапазоні плавлення (1650°C) становить близько 540 кДж/моль, що вказує на неможливість зупинити окиснення у розплавленому стані за наявності навіть слідових кількостей кисню в атмосфері.

Кінетика високотемпературного окиснення твердого титану підпорядковується параболічному закону:

$$\left(\frac{\Delta m}{A}\right)^2 = k_p \cdot t \quad (1.3)$$

де $\Delta m/A$ – питома збільшення маси,

k_p – константа параболічної швидкості, яка залежить від температури за рівнянням Арреніуса:

					ФНЗ21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$k_p = K_0 \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad (1.4)$$

За температурах вище 900°C швидкість дифузії кисню крізь оксидну плівку рутилу (TiO_2) різко зростає, і під оксидним шаром формується твердий розчин кисню в титані з високою твердістю та крихкістю — «альфа-кейс». Товщина цього шару (x) описується залежністю:

$$x = 2 \cdot \sqrt{D_{O(\alpha)} \cdot t} \quad (1.5)$$

де $D_{O(\alpha)}$ – коефіцієнт дифузії кисню в α -титані, що становить:

$$D_{O(\alpha)} = 0,45 \cdot \exp\left(-\frac{201000}{R \cdot T}\right) \text{ см}^2/\text{с} \quad (1.6)$$

При плавленні електрода в процесі EIGA температура рідкого металу перевищує 1700°C [1,3]. При цій температурі константа рівноваги розчинення кисню прямує до нескінченності. Якщо парціальний тиск кисню в захисному аргоні перевищує $1 \cdot 10^{-5}$ бар, відбувається миттєве насичення розплаву киснем, що робить неможливим отримання порошку Grade 23. Це обумовлює необхідність глибокого вакуумування системи ($1 \cdot 10^{-3}$ мбар) перед напуском аргону чистотою 99,999%.

Комплекс фізико-механічних та технологічних властивостей вихідного матеріалу. Вихідні гарячекатані прутки сплаву Ti-6Al-4V Grade 23 ELI повинні володіти стабільним комплексом властивостей для забезпечення рівномірності процесу індукційного плавлення. Основні фізичні та механічні константи матеріалу наведено в таблиці.

Таблиця 1.2 – Фізико-механічні властивості сплаву Ti-6Al-4V Grade 23 при 20°C

Найменування показника властивості	Значення параметра
Густина (ρ), г/см ³	4,43

Модуль поздовжньої пружності (E), ГПа	110-114
Коефіцієнт Пуассона (μ)	0,33
Границя текучості ($\sigma_{0,2}$), МПа	≥ 825
Тимчасовий опір руйнуванню (σ_b), МПа	≥ 860
Відносне подовження (δ), %	≥ 10
Ударна в'язкість (KCV), Дж/см ²	≥ 45
Питомий електричний опір (ρ_e), Ом · м	$1,71 \cdot 10^{-6}$

Продовження таблиці 1.2

Теплопровідність (λ), Вт/(м · К)	6,7
Температурний коефіцієнт лінійного розширення (α), К ⁻¹	$8,6 \cdot 10^{-6}$

Високий питомий електричний опір ($1,71 \cdot 10^{-6}$ Ом·м) є позитивним технологічним фактором для процесу EIGA, оскільки він збільшує глибину проникнення електромагнітного поля (Δ) при індукційному нагріві, яка розраховується за формулою:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho_e}{\pi \cdot \mu \cdot \mu_0 \cdot f}} \quad (1.7)$$

де f – частота струму ($250 \cdot 10^3$ Гц),

μ – відносна магнітна проникність титану (≈ 1),

μ_0 – магнітна константа ($250 \cdot 10^{-6}$ Гн/м).

Розрахункова глибина проникнення струму в торець титанового електрода становить приблизно 1,3 мм, що забезпечує інтенсивне поверхнєве оплавлення прутка та стабільне формування рідкої плівки без перегріву серцевини електрода на великих відстанях від індуктора.

Низька теплопровідність сплаву (6,7 Вт/(м·К)) локалізує зону плавлення безпосередньо в області дії індуктора, запобігаючи втратам тепла через теплопровідність вздовж тіла електрода до механізму його фіксації.

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

1.2. Обґрунтування вибору технологічної схеми та опис її операцій

1.2.1. Порівняльний аналіз методів атомізації титанових розплавів (VIGA, PREP, PA, EIGA)

Для промислового одержання сферичних дисперсних систем на основі тугоплавких та активних металів застосовують чотири основні концепції газодинамічної та відцентрової дезінтеграції [3,4]. Проведемо їх комплексний порівняльний аналіз для обґрунтування вибору оптимальної схеми згідно з вимогами технічного завдання (річна продуктивність 10 тонн, фракція 10–60 мкм, сферичність $\geq 0,9$, вміст O $\leq 0,13$ мас.%).

Метод VIGA (Vacuum Induction-melting Gas Atomization): передбачає плавлення вихідних компонентів або брухту в тиглі з оксидної кераміки (Al_2O_3 , ZrO_2 або Y_2O_3) з наступним зливом розплаву крізь металопровід у зону розпилювальної форсунки [3]. Через екстремальну хімічну агресивність рідкого титану при температурах $> 1650^\circ C$ відбувається відновлення оксидів футерівки за реакцією:



Це призводить до інтенсивного зростання концентрації кисню в розплаві до 0,20–0,35 мас.% та забруднення порошку макроскопічними включеннями екзогенної кераміки. Відповідно, метод VIGA не спроможний забезпечити вимоги стандарту ASTM F3001 щодо чистоти сплаву Grade 23 ELI і відхиляється.

Метод PREP (Plasma Rotating Electrode Process): реалізує відцентрове розпилення торця швидкообертового електрода (швидкість обертання 12000–15000 об/хв) під дією дугового плазмотрона. Метод характеризується повною

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

відсутністю контакту розплаву з вогнетривами, що забезпечує ідеальну чистоту порошку. Проте механізм відцентрового руйнування плівки рідкого металу описується критерієм Вебера (We) і обмежує мінімальний розмір крапель. Середній медіанний діаметр частинок (d_{50}) для методу PREP становить 100–150 мкм. Вихід цільової дрібнодисперсної фракції 10–60 мкм для технологій L-PBF не перевищує 5–8%, що робить даний метод економічно неприйнятним для досягнення потужності 10 тонн на рік.

Метод РА (Plasma Atomization): диспергування реалізується шляхом подачі вихідного титанового дроту у вузол перетину трьох плазмотронів, де під дією високотемпературних плазмових струменів аргону метал одночасно плавиться і розпилюється. Метод забезпечує високу якість і вузький гранулометричний склад порошку ($d_{\approx} 35-45$ мкм). Проте вихідна сировина у вигляді тонкого каліброваного дроту ($\varnothing 3-5$ мм) є продуктом тривалого та дорогого металургійного переділу (прокатка, волочіння, вакуумний відпал), що критично підвищує собівартість порошку [3]. Крім того, питова продуктивність однієї плазмової головки низька (5–10 кг/год), що вимагало б встановлення надмірної кількості одиниць обладнання для досягнення обсягу 10 т/рік.

Метод EIGA (Electrode Induction-melting Gas Atomization): є безтигельною технологією, де вихідна заготовка у вигляді вертикального прутка плавиться за допомогою спеціального конічного індуктора високої частоти [6,7]. Краплі розплаву вільно падають вздовж осі у фокус кільцевої газової форсунки, де піддаються швидкісному удару струменя аргону. Відсутність контакту з керамікою гарантує збереження базової чистоти матеріалу ($\leq 0,13\%$ O). Використання надзвукових потоків газу дозволяє зменшити медіанний розмір частинок d_{50} у діапазон 35–45 мкм, забезпечуючи стабільний вихід цільової фракції на рівні 45%.

Порівняльний аналіз методів атомізації титанових розплавів

					ФНЗ21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

демонструє, що вибір технології є визначальним фактором для забезпечення необхідної якості порошку, особливо при виробництві продукції аерокосмічного чи медичного призначення, де стандарт Grade 23 висуває надзвичайно жорсткі вимоги до чистоти матеріалу. Метод вакуумної індукційної плавки з наступною газовою атомізацією (VIGA) є досить поширеним у промисловості завдяки своїй високій продуктивності, проте він має критичний недолік, який полягає у необхідності використання керамічних тиглів. Контакт розплавленого титану з керамікою призводить до хімічних реакцій та вимивання частинок футеровки в метал, що створює небезпечні неметалеві включення в кінцевому порошку, неприпустимі для відповідальних адитивних технологій. На противагу цьому, метод плазмового обертового електрода (PREP) повністю виключає контакт із тиглем, оскільки електрод плавиться плазмовою дугою без підкладки, забезпечуючи найвищу чистоту та ідеальну сферичність частинок. Однак цей спосіб виявляється економічно неефективним для масового або навіть середньосерійного виробництва через низьку продуктивність та високі енерговитрати, що робить його придатним переважно для спеціалізованих лабораторних досліджень. Технологія плазмової атомізації дроту (РА) є ближчою за якістю до PREP, оскільки також уникає використання тигля, але при цьому потребує значних витрат інертного газу та має обмеження при управлінні гранулометричним складом дрібних фракцій, що знижує її привабливість для сучасних 3D-принтерів. Оптимальним рішенням для дослідно-промислової ділянки є метод безтигельної індукційної атомізації електродів (EIGA), який поєднує безконтактний метод плавки, властивий PREP, з високою керованістю процесу газової атомізації. У методі EIGA металевий пруток опускається в індуктор і плавиться на власній вазі, завдяки чому повністю уникається забруднення керамікою, при цьому отримуючи стабільну продуктивність, достатню для реалізації річної програми в 10 тонн. Таким чином, аналіз

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підтверджує, що метод EIGA забезпечує найкращий баланс між високою чистотою металу, стабільністю сферичної форми порошку та економічною доцільністю для виробництва титанових сплавів медичного призначення, що робить його найбільш обґрунтованим вибором для дипломного проєкту.

Таблиця 1.3 – Техніко-економічна матриця порівняння методів атомізації

Критерій порівняння	VIGA	PREP	EIGA	PA
Принцип плавлення	У керамічному тиглі	Плазмотрном	ВЧ-індуктором	Плазмотронами
Джерело розпилення	Аргон	Відцентрова сила	Аргон	Плазмові струмені
Вихідна сировина	Брухт, кусковий метал	Калібрований пруток	Стандартний пруток	Дорогий тонкий дріт
Вміст кисню в порошку, мас. %	0,22 – 0,35%	≤ 0,11%	≤ 0,12%	≤ 0,13%
Середній розмір d_{50} , мкм	40-50	100-150	30-45	40-45
Вихід фракції 10-60 мкм, %	55 – 60 %	2 – 5%	55%	30-45%
Коефіцієнт сферичності порошку	0,80 – 0,88	≥ 0,95	≥ 0,91	≥ 0,90
Капітальні витрати на тонну	Низькі	Високі	Надзвичайно високі	Оптимальні

На основі проведеного порівняльного аналізу для реалізації дипломного проєкту обрано технологічну схему EIGA.

1.2.2. Термодинамічні та гідродинамічні закономірності безтигельної індукційної газової атомізації

Гідродинамічний процес дезінтеграції струменя рідкого титану в апараті EIGA підпорядковується законам теорії збурення капілярних хвиль на поверхні розділу фаз «рідина-газ» [3]. При виході аргону з кільцевого сопла

Лавалля формується надзвуковий потік з числом Маха $M = 1,5-2,2$.

Основним критерієм, що визначає характер руйнування струменя розплаву, є число Вебера для газової фази (We_g):

$$We_g = \frac{\rho_g \cdot v_{rel}^2 \cdot D_j}{\sigma} \quad (1.8)$$

Де ρ_g – густина аргону під тиском у зоні фокусу,

v_{rel} – відносна швидкість між газовим потоком та струменем розплаву,

D_j – початковий діаметр струменя рідкого металу,

σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідкого титану ($\sigma_{Ti} \approx 1,65$ Н/м при температурі плавлення).

Для досягнення глибокої дезінтеграції з утворенням мікрокрапель (фракція 10–60 мкм) необхідно забезпечити умови «вибухового» руйнування струменя, що реалізується при критичних значеннях $We_g > 100$. Швидкісний напір газу долає сили поверхневого натягу, витягує струмінь у тонкі рідкі плівки та філаменти, які згодом розпадаються на первинні краплі.

Процес сфероїдизації утвореної краплі відбувається під дією капілярного тиску Лапласа [3,4]:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R} \quad (1.9)$$

Час повного набуття краплею сферичної форми (τ_{sph}) описується залежністю, що базується на в'язкості розплаву $\mu_{Ti} \approx \frac{\rho_m \cdot R^3}{\mu_m}$ Па·с):

$$\tau_{sph} \approx \frac{\rho_m \cdot R^3}{\mu_m} \quad (1.10)$$

Для частинки радіусом $R = 30$ мкм час сфероїдизації становить $\approx 2,7$ ·

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

10^{-5} с. Для забезпечення сферичності $\geq 0,9$ цей час повинен бути значно меншим за час повної кристалізації краплі (τ_{cryst}), який визначається швидкістю тепловіддачі конвекцією в середовищі аргону [3]:

$$\tau_{cryst} = \frac{\rho_m \cdot V \cdot \Delta H_m}{A \cdot h \cdot (T_m - T_9)} \quad (1.11)$$

де V/A – відношення об'єму краплі до її площі поверхні,

ΔH_m – питома теплота плавлення титану (365 кДж/кг),

h – коефіцієнт тепловіддачі.

Виконання умови $\tau_{sph} \ll \tau_{cryst}$ у процесі EIGA забезпечує формування високосферичної морфології частинок без утворення сателітів.

1.2.3. Покроковий опис та фізико-хімічна сутність технологічних операцій

Механічна та ультразвукова підготовка заготовок.

Вихідні прутки-електроди проходять токарну обробку на глибину 0,5 мм для повного видалення поверхневих оксидів та дефектів прокатки. Далі слідує знежирення в ультразвуковій ванні з розчином трихлоретилену при частоті 35 кГц протягом 15 хвилин для десорбції органічних забруднень. Операція завершується вакуумною сушкою при 80°C ($P = 10$ мбар).

Шлюзування та створення захисного середовища.

Заготовка фіксується у вертикальній штанзі маніпулятора. Плавильна камера герметизується і вакуумується за допомогою каскаду насосів (форвакуумний + дифузійний) до залишкового тиску $1 \cdot 10^{-3}$ мбар. Контроль парціального тиску кисню здійснюється мас-спектрометром. Після досягнення вакууму виконується напуск аргону (чистота 99,999%) до досягнення надлишкового тиску 0,1–0,15 бар для запобігання підсосу повітря

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ззовні.

Індукційний нагрів та безтигельний злив розплаву.

Вмикається високочастотний транзисторний генератор потужністю 120 кВт. Електрод подається вниз крізь внутрішній отвір конічного багатовиткового індуктора. Робоча частота струму становить 250 кГц. На поверхні торця електрода індукуються вихрові струми Фуко, щільність яких затухає за експоненціальним законом по глибині. За рахунок джоулевого тепла торець електрода плавиться, формуючи конічну поверхню рідкої плівки. Метал під дією сили тяжіння безконтактно стікає безперервним струменем діаметром 3–4 мм вздовж геометричної осі системи.

Високошвидкісна газова дезинтеграція (Атомізація).

Струмінь розплаву потрапляє в точку фокусування кільцевого сопла. Аргон подається під тиском 45 бар із витратою до 12 м³/хв. При взаємодії надзвукового потоку газу з рідким металом реалізується кінетичний розпад струменя. Сформована хмара мікрокрапель падає у вертикальну башту охолодження висотою 6 м, де швидкість охолодження сягає $10^4 - 10^5$ К/с, що фіксує дрібнозернисту структуру порошку.

Циклонне уловлювання та двостадійна сепарація.

Дисперсна суміш аргону та закристалізованого порошку надходить у циклон осадження. Під дією доцентрового прискорення порошок сепарується від газового потоку і зливається у герметичний приймальний бункер. Газ скеровується в контур регенерації (фільтрація від пилу, охолодження в теплообміннику, компремування).

Ультразвукова класифікація та гомогенізація.

Заповнений бункер під шаром аргону стикується з класифікатором Russell Finex. Вібросито з ультразвуковим збудженням (частота соніфікації 36 кГц) розділяє порошок на три фракції: >60 мкм (зворотний відхід), <10 мкм (пил) та цільовий клас 10–60 мкм. Цільовий порошок завантажується у V-

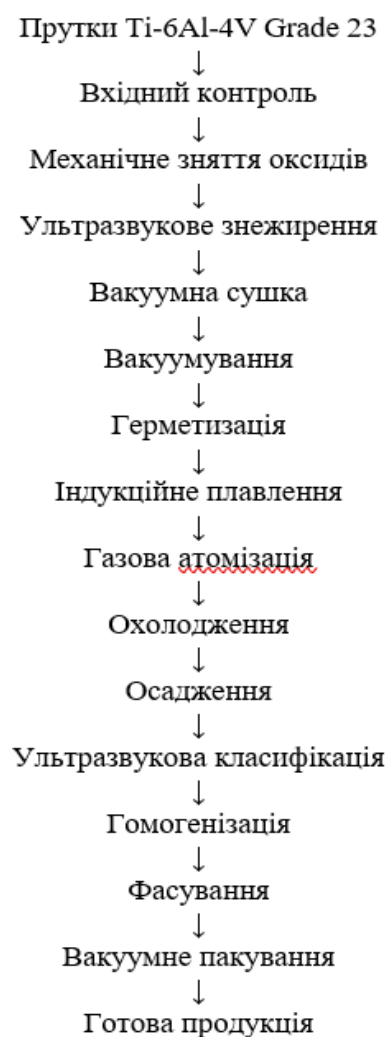
					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

подібний блендер, де за рахунок гравітаційного перемішування протягом 40 хвилин досягається повна однорідність гранулометричного складу по всьому об'єму промислової партії.

Вакуумування та фасування готової продукції.

З огляду на загальну річну продуктивність дільниці у 10 тонн та однозмінний графік роботи, середньодобовий обсяг пакування становить близько 40 кг готового продукту. Гомогенізований порошок із V-подібного змішувача дозується невеликими партіями по 10 кг (орієнтовно 4 пакети за зміну) у спеціалізовані тришарові металізовані антистатичні пакети.

Для гарантування відсутності контакту хімічно активного титану з киснем, процес виконується в герметичному вакуумному рукавичному боксі. Проводиться цикл «вакуумування – напуск аргону (до надлишкового



					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тиску 0,8 бар)» із наступним термічним зварюванням швів. Готові пакети маркуються згідно з номером партії та укладаються у стандартизовані герметичні сталеві барабани (по 2–4 пакети в кожний) для безпечного транспортування та відвантаження замовнику.

Рисунок 1.2–технологічна схема виробництва сферичного порошку Ti-6Al-4V

1.3. Матеріальні розрахунки та розрахунок балансу матеріалів

1.3.1. Теоретичні основи матеріального балансу процесу EIGA

Основою для складання матеріального балансу проєктуємої ділянки є фундаментальний закон збереження маси, згідно з яким маса вихідної сировини, що надходить у технологічний процес, дорівнює сумі мас отриманої готової продукції, побічних продуктів, зворотних відходів та безповоротних технологічних втрат [1].

Для ізольованої термодинамічної системи атомізації EIGA рівняння матеріального балансу в інтегральній формі має вигляд:

$$\sum M_{\text{вх}} = \sum M_{\text{вих}} + \sum M_{\text{відх}} + \sum M_{\text{втрат}} \quad (1.12)$$

де $\sum M_{\text{вх}}$ – загальна маса вихідних прутків (електродів) сплаву Ti-6Al-4V;

$\sum M_{\text{вих}}$ – маса цільової фракції порошку (10–60 мкм);

$\sum M_{\text{відх}}$ – маса зворотних та незворотних відходів класифікації;

$\sum M_{\text{втрат}}$ – маса безповоротних втрат.

Вихідними даними для розрахунку є річна продуктивність за цільовою фракцією, регламентована технічним завданням: $M_{\text{ціль}} = 10$ тонн/рік. Режим

					ФНЗ21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роботи дільниці – однозмінний. (250 робочих днів на рік, зміни по 8 годин на добу).

1.3.2. Обґрунтування коефіцієнтів виходу фракцій та технологічних втрат

Характерною особливістю будь-якого процесу газової атомізації є те, що утворені краплі розплаву мають широкий діапазон розмірів, який підпорядковується логарифмічно-нормальному закону розподілу ймовірностей (розподіл Розіна-Раммлера).

Залежно від тиску атомізуючого газу (аргону), геометрії сопла Лавалю та поверхневого натягу розплаву, крива розподілу зміщується. Для методу EIGA при диспергуванні титанових сплавів під тиском газу 45–50 бар медіанний діаметр частинок (d_{50}) становить близько 40–50 мкм. Інтегрування площі під кривою розподілу в межах цільового діапазону від 10 до 60 мкм показує, що теоретичний максимальний вихід придатної фракції не перевищує 48%. З урахуванням ефективності промислових ультразвукових вібросит (близько 95%), фактичний технологічний вихід цільової фракції приймаємо на рівні 45% ($K_{\text{вих}} = 0,45$).

Інша частина диспергованого розплаву (55%) розподіляється на побічні продукти:

Крупна позабалансова фракція (>60 мкм): складає близько 50% від загальної маси. Вона не придатна для селективного лазерного плавлення (SLM) через товщину шару друку (20–50 мкм), але завдяки ідеальній хімічній чистоті є цінним зворотним відходом.

Ультрадрібна фракція (<10 мкм): складає близько 5%. Цей пил відбраковується через надзвичайно високу пірофорність (здатність до самозаймання) та схильність до агломерації.

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Безповоротні втрати ($K_{\text{втрат}} = 2\%$ або 0,02) формуються за рахунок наступних фізико-хімічних факторів:

Випаровування легуючих елементів: при температурі розплаву $\approx 1700^\circ\text{C}$ парціальний тиск парів алюмінію значно перевищує тиск парів титану та ванадію. Незначна частка алюмінію переходить у газову фазу (угар металу).

Втрати у фільтрувальних системах: ультрадисперсний пил (розміром 0,1–1 мкм), що не осів у циклоні, виноситься потоком аргону і необоротно осідає в порах рукавних фільтрів системи регенерації газу.

Технологічні залишки: метал, що осідає на стінках башти охолодження, внутрішніх поверхнях трубопроводів та мертвих зонах змішувачів.

1.3.3. Поетапний математичний розрахунок балансу

Розрахунок загальної маси диспергованого (розпиленого) порошку ($M_{\text{заг}}$) враховуючи, що цільова фракція ($M_{\text{ціль}}$) становить 45% від маси всього розпорошеного металу, загальна маса порошку, що пройшов крізь сопло:

$$M_{\text{заг}} = \frac{M_{\text{ціль}}}{K_{\text{вих}}} = \frac{10}{0,45} = 22,2 \text{ т/рік}$$

Розрахунок маси необхідної вихідної сировини ($M_{\text{сир}}$):

Маса прутків, що завантажуються в шлюзові камери, має компенсувати як утворення порошку, так і 2% безповоротних втрат.

$$M_{\text{сир}} = \frac{M_{\text{заг}}}{1 - K_{\text{втрат}}} = \frac{22,2}{1 - 0,02} = \frac{22,2}{0,98} = 22,65 \text{ т/рік}$$

Розрахунок абсолютної маси безповоротних втрат ($M_{\text{втрат}}$):

$$M_{\text{втрат}} = M_{\text{сир}} \cdot K_{\text{втрат}} = 22,65 \cdot 0,02 = 0,45 \text{ т/рік}$$

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахунок маси побічних фракцій (відходів класифікації):
Маса крупної фракції (> 60 мкм):

$$M_{\text{круп}} = M_{\text{заг}} \cdot 0,50 = 22,2 \cdot 0,50 = 11,1 \text{ т/рік}$$

Маса ультрадрібного пилю (< 10 мкм):

$$M_{\text{дріб}} = M_{\text{заг}} \cdot 0,05 = 22,2 \cdot 0,05 = 11,1 \text{ т/рік}$$

Оскільки у попередніх розрахунках обладнання ми вже чітко заклали 250 робочих днів, математика цього балансу зводиться ідеально для стандартного 5-денного робочого тижня.

Повна багатоденна зупинка всієї ділянки для планового ремонту не передбачена. Обслуговування обладнання відбувається за графіком ППР у неробочий час та закладено у розрахунковий ефективний фонд часу роботи обладнання через коефіцієнт використання ($K_{\text{вик}} = 0,80$).

Таблиця 1.4 – Планово-попереджувальний ремонт обладнання

Обладнання	1 квартал			2 квартал			3 квартал			4 квартал			Усього
	Місяці												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Атомізатор ALD EIGA-50			8 O/4			16C/4			8 O/4			16K/4	48
Ультразвуковий класифікатор Russell Finex		4 O/4			4O/4			4 O/4			8 C/4		20
Змішувач V-подібний VH-50				8 C/4						8 O/4			16
Вакуумний рукавичний бокс GB-1200						8 C/4						8 C/4	16
Токарно гвинторізний верстат з ЧПК			4			4 K/4			4 O/4			8 C/4	20
Ультразвукова ванна						4 O/4						4 K/4	8
Всього													136 год

Таблиця 1.5 – Баланс часу роботи дільниці

№ п/п	Елементи балансу	Кількість днів
1.	Календарна кількість днів	365
2.	Час на планово-попереджувальний ремонт	0
3.	Загальнонаціональні свята	0
4.	Вихідні дні	11
5.	Неробочі дні цеху	104
6.	Робочі дні цеху	250

Річний випуск цільової фракції порошку (G) становить 10 000 кг/рік. Визначивши кількість робочих днів ($n = 250$ днів, згідно з балансом робочого часу), розраховуємо добову продуктивність дільниці за готовою продукцією:

$$A = \frac{G}{n} \quad (1.13)$$

де G – річний випуск продукції, кг;

n – кількість робочих днів на рік.

$$A = \frac{10000}{250} = 40 \text{ кг/день}$$

У процесі переробки сировини до отримання товарної продукції мають місце втрати як механічні, так і технологічні, а також утворення зворотних відходів (крупна позабалансова фракція). Тому для забезпечення заданої добової продуктивності вводити матеріали в процес потрібно з відповідним надлишком для компенсації цих втрат.

Кількість матеріалу, що надходить на початок процесу (прутки сплаву Ti-6Al-4V) у перший день (A_0) з урахуванням загального вилучення придатного матеріалу ($\varphi = 44,1\%$), визначають за формулою:

$$A_0 = \frac{A}{\varphi} \cdot 100 \quad (1.14)$$

$$A_0 = \frac{40}{44,1} \cdot 100 = 90,7 \text{ кг/день}$$

Визначення прямого поопераційного вилучення на кожній операції:

$$\eta = 100 - (a + b), \quad (1.15)$$

де α – зворотні втрати;

β – незворотні втрати.

$$\eta_1 = 100 - (0 + 0,441) = 99,559\%$$

$$\eta_2 = 100 - (0 + 0) = 100,000\%$$

$$\eta_3 = 100 - (0 + 0,664) = 99,336\%$$

$$\eta_4 = 100 - (0 + 0,223) = 99,777\%$$

$$\eta_5 = 100 - (0 + 0,492) = 99,508\%$$

$$\eta_6 = 100 - (49,902 + 4,990) = 45,108\%$$

$$\eta_7 = 100 - (0 + 0,199) = 99,801\%$$

$$\eta_8 = 100 - (0 + 0,234) = 99,766\%$$

Визначаємо загальний витяг на кожній операції φ відносно вихідного матеріалу за формулою:

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\varphi = \left(\frac{\eta_1}{100} \cdot \frac{\eta_2}{100} \dots \frac{\eta_n}{100} \right) \cdot 100 = \frac{\eta_1 \eta_2 \dots \eta_n}{100^{n-1}} \quad (1.16)$$

$$\varphi_1 = \eta_1 = 99,559\%$$

$$\varphi_2 = \frac{\varphi_1 \cdot \eta_2}{100} = \frac{99,559 \cdot 100}{100} = 99,559\%$$

$$\varphi_3 = \frac{\varphi_2 \cdot \eta_3}{100} = \frac{99,559 \cdot 99,336}{100} = 98,898\%$$

$$\varphi_4 = \frac{\varphi_3 \cdot \eta_4}{100} = \frac{98,898 \cdot 99,777}{100} = 98,677\%$$

$$\varphi_5 = \frac{\varphi_4 \cdot \eta_5}{100} = \frac{98,677 \cdot 99,508}{100} = 98,192\%$$

$$\varphi_6 = \frac{\varphi_5 \cdot \eta_6}{100} = \frac{98,192 \cdot 45,108}{100} = 44,292\%$$

$$\varphi_7 = \frac{\varphi_6 \cdot \eta_7}{100} = \frac{44,292 \cdot 99,801}{100} = 44,204\%$$

$$\varphi_8 = \frac{\varphi_7 \cdot \eta_8}{100} = \frac{44,204 \cdot 99,766}{100} = 44,100\%$$

Незворотні витрати Вихідні матеріали Зворотні витрати

0,441 Механічне знаття оксидів 0



0 Знежирення та вакуумування 0



0,664 Індукційне плавлення 0



0,223 Газова атомізація 0



0,492 Осадження 0



4,990 Ультразвукова класифікація 49,902



Рисунок 1.2 – Схема поопераційних витрат

Визначаємо втрати відносно вихідного матеріалу на кожній операції:
Зворотні (α),%

$$\begin{aligned}
 \alpha_1 &= \alpha_1 = 0 \\
 \alpha_2 &= \alpha_2 \cdot \varphi_1 / 100 = 0 \cdot 99,559 / 100 = 0 \\
 \alpha_3 &= \alpha_3 \cdot \varphi_2 / 100 = 0 \cdot 99,559 / 100 = 0 \\
 \alpha_4 &= \alpha_4 \cdot \varphi_3 / 100 = 0 \cdot 98,898 / 100 = 0 \\
 \alpha_5 &= \alpha_5 \cdot \varphi_4 / 100 = 0 \cdot 98,677 / 100 = 0 \\
 \alpha_6 &= \alpha_6 \cdot \varphi_5 / 100 = 49,902 \cdot 98,192 / 100 = 49,000 \\
 \alpha_7 &= \alpha_7 \cdot \varphi_6 / 100 = 0 \cdot 44,292 / 100 = 0 \\
 \alpha_8 &= \alpha_8 \cdot \varphi_7 / 100 = 0 \cdot 44,204 / 100 = 0
 \end{aligned}$$

Незворотні (β),%

$$\begin{aligned}
 \beta_1 &= b_1 = 0,441 \\
 \beta_2 &= b_2 \cdot \varphi_1 / 100 = 0 \cdot 99,559 / 100 = 0 \\
 \beta_3 &= b_3 \cdot \varphi_2 / 100 = 0,664 \cdot 99,559 / 100 = 0,661 \\
 \beta_4 &= b_4 \cdot \varphi_3 / 100 = 0,223 \cdot 99,898 / 100 = 0,220 \\
 \beta_5 &= b_5 \cdot \varphi_4 / 100 = 0,492 \cdot 98,677 / 100 = 0,485 \\
 \beta_6 &= b_6 \cdot \varphi_5 / 100 = 4,990 \cdot 98,192 / 100 = 4,990 \\
 \beta_7 &= b_7 \cdot \varphi_6 / 100 = 0,199 \cdot 44,292 / 100 = 0,088 \\
 \beta_8 &= b_8 \cdot \varphi_7 / 100 = 0,234 \cdot 44,204 / 100 = 0,103
 \end{aligned}$$

Визначаємо абсолютні втрати $q_n^a(q_n^b)$, у кілограмах згідно з формулою:

$$q_n^a(q_n^b) = \frac{A_0 \alpha_n \beta_n}{100} \quad (1.17)$$

Зворотні(q^a),кг	Незворотні(q^b),кг
$q_1^a = 0$	$q_1^b = \frac{90,70,3 \cdot 0,441}{100} = 0,4$
$q_2^a = 0$	$q_2^b = 0$
$q_3^a = 0$	$q_3^b = \frac{90,70 \cdot 0,661}{100} = 0,60$
$q_4^a = 0$	$q_4^b = \frac{90,70 \cdot 0,220}{100} = 0,20$
$q_5^a = 0$	$q_5^b = \frac{90,70 \cdot 0,485}{100} = 0,45$
$q_6^a = \frac{90,70 \cdot 49,902}{100} = 45,26$	$q_6^b = \frac{90,70 \cdot 4,900}{100} = 4,53$
$q_7^a = 0$	$q_7^b = \frac{90,70 \cdot 0,088}{100} = 0,08$
$q_8^a = 0$	$q_8^b = \frac{90,70 \cdot 0,103}{100} = 0,21$

Обчислюємо суму зворотних втрат і визначаємо масу свіжого матеріалу, яка має надходити кожен день на початок процесу (В) за формулою:

$$B = A_0 - \sum q_n^a \quad (1.18)$$

У нашому процесі зворотні втрати виникають лише на 6-й операції:

$$B = 90,70 - 4,53 = 86,17 \text{ кг}$$

(Примітка: В – це маса «свіжої» титанової губки та лігатури, необхідної для компенсації незворотних втрат і готової продукції. Оскільки 4,53 кг зворотних відходів переплавляються в нові електроди, безпосередньо на

першу операцію нашої ділянки кожного дня надходить повна маса готових прутків $A_0 = 90,70$ кг).

Визначаємо масу матеріалу, що надходить на кожну операцію і виходить з неї.

На першу операцію надходить: 90,70 кг;

виходить: $90,70 - 0,4 = 90,3$ кг.

На другу операцію надходить: 90,3 кг;

виходить: $90,3 - 0 = 90,3$ кг.

На третю операцію надходить: 90,3 кг;

виходить: $90,3 - 0,60 = 89,7$ кг.

На четверту операцію надходить: 89,7 кг;

виходить: $89,7 - 0,20 = 89,5$ кг.

На п'яту операцію надходить: 89,5 кг;

виходить: $89,5 - 0,45 = 89,05$ кг.

На шосту операцію надходить: 89,05 кг;

Тут відбувається розділення фракцій. Відділяються зворотні витрати (крупна фракція $q_6^a = 45,26$ кг) та незворотні втрати (ультрадрібний пил $q_6^b = 4,53$ кг).

виходить цільового продукту: $89,05 - (45,26 + 4,53) = 39,26$ кг.

На сьому операцію надходить: 39,26 кг;

виходить: $39,26 - 0,08 = 39,18$ кг.

На восьму операцію надходить: $39,1 - 0,218$ кг;

виходить: $39,08 - 0,21 = 38,97$ кг.

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблица 1.6 - Пооперацийный материальный баланс

Назва операції	Пооперацийні витрати, %			Пряме пооперацийне вилучення, %	Загальне вилучення, %	Втрати по відношенню до введенного матеріалу, %		Абсолютні втрати, кг		Кількість матеріалу, яка поступає на операцію, кг			Кількість матеріалу, яка виходить з операції, кг
	зворотні	незворотні	Загальні			зворотні	незворотні	зворотні	незворотні	З попередньої операції	Поворотні витрати	Всього	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Механічне зняття оксидів	0	0,441	0,441	99,559	99,559	0	0,441	0	0,40	90,70	0	90,70	90,30
Знежирення та вакуумування	0	0	0	100,00	99,559	0	0	0	0	90,30	0	90,30	90,30
Індукційне плавлення	0	0,664	0,664	99,336	98,898	0	0,661	0	0,60	90,30	0	90,30	89,70
Газова атомізація	0,2	0,223	0,223	99,777	98,677	0,199	0,220	0	0,20	89,70	0	89,70	89,50
Осадження	0	0,492	0,492	99,508	98,192	0	0,485	0	0,44	89,50	0	89,50	89,06
Ультразвукова класифікація	49,902	4,990	54,892	45,108	44,292	49,000	4,900	44,44	4,44	89,06	0	89,06	40,18
Гомогенізація	0	0,199	0,199	99,801	44,204	0	0,088	0	0,08	40,18	0	40,18	40,10
Фасування та пакування	0	0,234	0,234	99,766	44,100	0	0,104	0	0,10	40,10	0	40,10	40,00

1.4. Вибір та розрахунок необхідної кількості технологічного обладнання

Вибір основного та допоміжного технологічного обладнання здійснюється на основі розрахованого матеріального балансу, необхідного ступеня автоматизації процесу та вимог до якості кінцевого продукту (сферичного порошку Ti-6Al-4V). Розрахунок кількості одиниць обладнання базується на визначенні ефективного фонду часу його роботи.

Режим роботи дільниці: згідно з техніко-економічними міркуваннями щодо експлуатації вакуумного та індукційного обладнання, приймається одностійний режим роботи:

Кількість робочих днів на рік (D_p): 250 діб; Кількість змін на добу (n_3): 1 зміни; Тривалість однієї зміни (t_3): 8 годин. Номінальний річний фонд часу роботи обладнання ($F_{\text{ном}}$) становить:

$$F_{\text{ном}} = D_p \cdot n_3 \cdot t_3 = 250 \cdot 1 \cdot 8 = 2000 \text{ год/рік}$$

1.4.1. Вибір та розрахунок основного обладнання

Механічна обробка (обточування поверхні для видалення оксидного шару та калібрування діаметра) є першою технологічною операцією підготовки електродів перед завантаженням в установку атомізації EIGA-50. Для неї обрано Токарно-гвинторізний верстат з ЧПК (СК6136).

Маса одного очищеного прутка (електрода): 17,05 кг; Номінальний річний фонд часу роботи: 2000 год/рік.

Розрахунок річної кількості електродів, що підлягають обробці ($N_{\text{ел}}$):

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$N_{\text{ел}} = \frac{M_{\text{сир}}}{m_{\text{ел}}} = \frac{22675,7}{17,05} \approx 1330 \text{ шт/рік}$$

(Щоденна норма обробки становить: 1330 шт/250 днів} $\approx 5,32$ шт/добу, тобто округлено 6 прутків за зміну).

Визначення ефективного річного фонду часу роботи верстата: приймаємо коефіцієнт використання обладнання $K_B = 0,80$, який враховує час на налагодження ЧПК, зміну ріжучого інструменту та встановлення/зняття важкої заготовки:

$$F_{\text{еф.в}} = 2000 \cdot 0,80 = 1600 \text{ год/рік}$$

Розрахунок необхідного часу на обробку одного електрода та годинної продуктивності (Π_B), враховуючи низьку оброблюваність титанових сплавів різанням та вимоги до чистоти поверхні, приймаємо час повної токарної обробки одного прутка довжиною 1 м рівним 0,5 год. Тоді годинна продуктивність верстата становить:

$$\Pi_B = \frac{1}{t_{\text{шт}}} = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ шт/год}$$

Розрахунок сумарної річної трудомісткості токарних робіт:

$$T_{\text{необ}} = 1330 \cdot 0,5 = 665 \text{ год/рік}$$

Розрахункова кількість токарних верстатів

$$N_{\text{розр}} = \frac{T_{\text{необ}}}{F_{\text{еф.в}}} = \frac{665}{1000} \approx 0,416 \text{ од}$$

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Прийнята кількість обладнання та коефіцієнт завантаження. З огляду на отриманий результат, до встановлення приймається 1 одиниця токарно-гвинторізного верстата з ЧПК моделі СК6136.

Коефіцієнт завантаження верстата становить:

$$K_{\text{зав}} = \frac{N_{\text{розр}}}{N_{\text{прийм}}} = \frac{0,416}{1} = 0,416$$

Коефіцієнт завантаження токарного верстата на рівні 41,6% є повністю виправданим та оптимальним для дослідно-промислової ділянки з випуску медичних порошків. Оскільки щоденна потреба становить усього 6 електродів, верстат виконує це завдання приблизно за 3 години чистого часу роботи ЧПК за зміну. Вільний час фонду (близько 58%) використовується оператором для проведення вхідного інструментального контролю якості титанових прутків (перевірка на наявність поверхневих тріщин, раковин), маркування електродів, а також підготовки технологічної оснастки та хвостовиків для їх подальшого надійного фіксування у затискному патроні механізму подачі атомізатора EIGA-50.

Для забезпечення високої чистоти поверхні титанових електродів (видалення залишків мастильно-охолоджувальних рідин після токарної обробки), а також для проведення регламентного очищення мікросіток ультразвукового класифікатора від залишків високодисперсного порошку, передбачено використання промислової ультразвукової ванни. До встановлення обрано модель Jeken PS-100A, яка забезпечує ефективну кавітаційну очистку без механічного пошкодження оброблюваних деталей.

Тривалість циклу знежирення добової партії електродів: 0,25 год/добу;
Тривалість циклу очищення комплекту сіток класифікатора: 0,5 год/добу;

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Кількість робочих змін на рік: 250 діб.

Розрахунок річної трудомісткості робіт з очищення та знежирення. Оскільки обладнання має суміщений графік експлуатації, загальна потреба в робочому часі складається з часу на підготовку сировини та часу на обслуговування класифікатора:

$$T_{\text{необ}} = (0,25 + 0,5) \cdot 250 = 187,5 \text{ год/рік}$$

Визначення ефективного фонду часу роботи ванни. З огляду на простоту конструкції та відсутність складних механічних вузлів, приймаємо коефіцієнт використання обладнання 0,95:

$$F_{\text{еф.ван}} = 2000 \cdot 0,95 = 1900 \text{ год/рік}$$

Розрахункова кількість ультразвукових ванн:

$$N_{\text{розр}} = \frac{187,5}{1900} \approx 0,098 \text{ од.}$$

Прийнята кількість обладнання та коефіцієнт завантаження. До встановлення приймається 1 одиниця. Коефіцієнт завантаження розраховується відносно номінального фонду часу (оскільки ванна використовується періодично протягом зміни):

$$K_{\text{зав}} = \frac{187,5}{2000} \approx 0,094$$

Розрахунковий коефіцієнт завантаження 9,4% є технологічно обгрунтованим для допоміжного обладнання пілотної ділянки. Робота

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ультразвукової ванни Jeken PS-100A рознесена в часі: знежирення прутків виконується на початку зміни (перед завантаженням в атомізатор EIGA), а очищення сіток – наприкінці робочого дня (під час регламентного обслуговування класифікатора). Це гарантує відсутність перехресного забруднення та відповідає вимогам виробництва медичних титанових сплавів.

Основним технологічним обладнанням для реалізації процесу безтигельної атомізації обрано промислові комплекси ALD EIGA-50 (виробництва компанії ALD Vacuum Technologies GmbH, Німеччина).

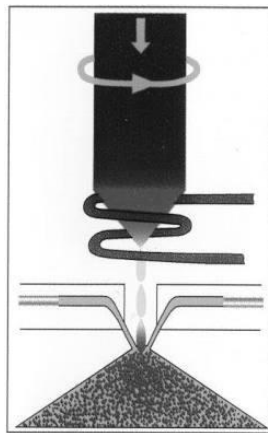


Рисунок 1.2 – схема зони плавлення та диспергування EIGA

Це обладнання є галузевим стандартом для отримання реакційноздатних металів без керамічних включень.

Технічні характеристики установки ALD EIGA-50:

- а) продуктивність по розплаву титану ($\Pi_{\text{год}}$): 50 кг/год;
- б) потужність індукційного генератора: 120 кВт;
- в) робоча частота: 250 кГц;
- г) тиск атомізуючого газу (аргону): до 50 бар;
- д) граничний вакуум: $1 \cdot 10^{-3}$ мбар.

Для розрахунку ефективного фонду часу ($F_{\text{еф}}$) вводимо коефіцієнт використання обладнання ($K_{\text{вик}} = 0,80$), який враховує витрати часу на

допоміжні операції: шлюзування та зміну електродів, вакуумування системи, вивантаження бункерів та планово-попереджувальні ремонти (ППР).

$$F_{\text{еф}} = F_{\text{ном}} \cdot K_{\text{вик}} = 2000 \cdot 0,80 = 1600 \text{ год/рік}$$

Річна продуктивність однієї установки за вихідною сировиною ($P_{\text{річ}}$):

$$P_{\text{річ}} = P_{\text{год}} \cdot F_{\text{еф}} = 50 \text{ кг/год} \cdot 1600 \text{ год/рік} = 80000 \text{ кг/рік} = 80 \text{ т/рік}$$

Розрахункова необхідна кількість атомізаторів ($N_{\text{розр}}$) для переробки всієї маси вихідних прутків ($M_{\text{сир}} = 22,68 \text{ т/рік}$):

$$N_{\text{розр}} = \frac{M_{\text{сир}}}{P_{\text{річ}}} = \frac{22,68}{80} = 0,28 \text{ од.}$$

Висновок: Приймаємо до встановлення дійсну кількість основного обладнання $N_{\text{дійсн}} = 1$ установка.

Розрахуємо коефіцієнт завантаження обладнання ($\eta_{\text{ов}}$):

$$\eta_{\text{ов}} = \frac{N_{\text{розр}}}{N_{\text{дійсн}}} = \frac{0,28}{1} = 0,28 (28\%)$$

Коефіцієнт завантаження 28% є оптимальним для пілотного виробництва сферичних порошків медичного призначення (Grade 23). Такий показник зумовлений специфікою технологічного процесу EIGA, де безпосереднє плавлення металу займає лише частину робочого часу, а основний фонд відводиться на критично важливі підготовчі операції: вакуумування камери, заповнення інертним газом (аргоном), охолодження

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

порошку та регулярне технічне обслуговування індукторного вузла для запобігання забрудненню продукції.

1.4.2. Вибір та розрахунок обладнання дільниці класифікації

Одержаний дисперсний порошок підлягає розділенню на фракції у герметичному середовищі аргону. Для цього обрано ультразвуковий багатопалубний класифікатор Russell Finex AMPro Sieve Station, оснащений п'єзоелектричними перетворювачами, що запобігають «осліпленню» (забиванню) сіток розміром 10 та 60 мкм дрібними частинками.



Рисунок 1.3 – Ультразвукова станція Russell Finex AMPro.

Номінальна продуктивність одного класифікатора по титану:

$$P_{\text{кл}} \approx 150 \text{ кг/год.}$$

Коефіцієнт використання (з урахуванням чистки сіток):

$$K_{\text{вик.кл}} = 0,85.$$

Ефективний фонд:

					ФНЗ21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

$$F_{\text{еф.кл}} = 2000 \cdot 0,85 = 1700 \text{ год/рік.}$$

Загальна маса розпорошеного металу ($M_{\text{заг}}$), що надходить на класифікацію з циклонів, становить 22265,7 кг/рік.

Розрахункова кількість класифікаторів:

$$N_{\text{кл}} = \frac{M_{\text{заг}} \cdot 1000}{P_{\text{кл}} \cdot F_{\text{еф.кл}}} = \frac{22265,7}{150 \cdot 1700} = \frac{22265,7}{255000} = 0,087 \text{ од.}$$

Приймаємо до встановлення 1 одиницю класифікатора.

Коефіцієнт завантаження складе лише 8,7%. Це абсолютно нормально для пілотної лінії, оскільки сито працює дуже швидко і легко справляється з обсягами (пересіваючи денну партію всього за кілька годин).

1.4.3. Вибір та розрахунок обладнання дільниці гомогенізації

Через відмінності у гранулометричному складі різних партій атомізації, порошок цільової фракції (10–60 мкм) підлягає обов'язковому усередненню для забезпечення стабільної насипної щільності. Обрано герметичні V-подібні промислові змішувачі типу VH-50.

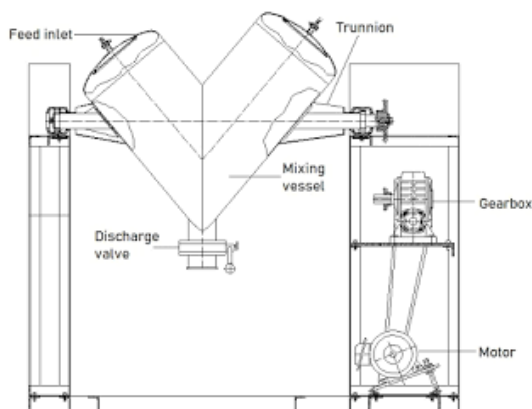


Рисунок 1.4 – Конструктивна схема V-подібного змішувача.

- а) корисний об'єм барабана: 50 л;
- б) насипна щільність порошку: ~ 2,5 кг/л;
- в) маса одного завантаження: ~ 40 кг;
- г) тривалість циклу усереднення (разом із

завантаженням/вивантаженням та продувкою аргоном): $T_{\text{ц}} = 1$ години.

Кількість партій на рік для цільової продукції (10 тонн):

$$\eta_{\text{партій}} = \frac{10000}{40 \text{ кг/партія}} = 250 \text{ циклів.}$$

Загальний час роботи змішувачів: $250 \cdot 1 = 250$ годин.

Оскільки 250 годин значно менше за річний фонд однієї одиниці ($F_{\text{ном}} = 2000$ год), 1 одиниця обладнання VH-50 є оптимальним рішенням для пілотної ділянки.

1.4.4. Вибір та розрахунок обладнання ділянки фасування

Для забезпечення збереження гранулометричного складу та запобігання хімічному забрудненню готового порошку на етапі фасування, ділянка оснащена вакуумним рукавичним боксом GB-1200. Вибір даної моделі обумовлений необхідністю підтримки надвисокої чистоти інертного середовища, що є обов'язковим для титанових порошоків медичного призначення (Grade 23). Бокс забезпечує автоматизований контроль тиску та багатоступеневу систему фільтрації, що унеможливорює потрапляння кисню та вологи в продукт під час його герметичного пакування в контейнери для транспортування.

Проведені в розділі розрахунки повністю підтверджують технологічну

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

доцільність та апаратну можливість реалізації проєкту з виробництва 10 тонн/рік високоякісного порошку Ti-6Al-4V методом EIGA на базі 1 плавильного комплексу та відповідного допоміжного класифікаційного і пакувального обладнання.

Таблиця 1.7 – Зведена відомість обладнання дільниці

Операція	Обладнання	Продуктивність, кг/год	Кількість годин роботи агрегата на добу	Кількість одиниць обладнання	Коефіцієнт завантаження	Потужність, кВт	Вартість, тис. грн
Механічне зняття оксидів	Токарно-гвинторізний верстат з ЧПК CK6136	34,1	3	1	0,42	7,5	450
Знежирення та вакуумування	Ультразвукова ванна знежирення заготовок	360	0,8	1	0,09	0,6	45
Плавлення, атомізація та осадження	Установка безтигельної атомізації ALD EIGA-50	50	2,2	1	0,28	150	25000
Ультразвукова класифікація	Ультразвуковий багатопалубний класифікатор Russell Finex	150	0,6	1	0,09	0,5	400
Гомогенізація	V-подібний змішувач VH-50	40	1	1	0,20	1,5	150
Фасування та пакування	Вакуумний рукавичний бокс GB-1200	20	2	1	0,35	0,8	300

2 БУДІВЕЛЬНИЙ РОЗДІЛ

2.1. Об'ємно-планувальні рішення ділянки

Проектована дослідно-промислова діляниця розташована в окремій одноповерховій будівлі прямокутної форми з габаритними розмірами 18,0 на 12,0 метрів, що забезпечує загальну площу 216 квадратних метрів. Конструктивна схема будівлі базується на використанні металевого каркаса з огорожувальними конструкціями із панелей, що відповідають вимогам пожежної безпеки та забезпечують належну теплоізоляцію для підтримання стабільного мікроклімату в «чистій кімнаті».

Планувальне рішення ділянки реалізоване за коридорним типом, де центральний коридор шириною 6 метрів виконує функцію основної логістичної артерії та забезпечує швидкий доступ до всіх технологічних зон. Виробничий простір розділений на два функціональні ряди:

Лівий блок (технологічний): включає діляницю підготовки сировини, основне плавильне відділення з розміщенням установки атомізації ALD EIGA-50 та герметичну «чисту кімнату» для фінішного фасування порошків.

Таке зонування забезпечує лінійність технологічного потоку, мінімізує перехресні маршрути руху сировини та готових металевих порошків, а також дозволяє ізолювати критично важливі ділянки, де висуваються підвищені вимоги до чистоти повітря. Висота приміщень спроектована з урахуванням габаритів технологічного обладнання та необхідності розміщення систем припливно-витяжної вентиляції під стельовим перекриттям, що є критично важливим для забезпечення безпечної роботи з реактивними металевими порошками.

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	БУДІВЕЛЬНИЙ РОЗДІЛ		
Розроб.	Чечко Н.В.						
Перевір.	Солодкий Є.В.						
Реценз.							
Н. Контр.	Бірюкович Л.О.						
Затверд.	Богомол Ю. І.						
					Літ.	Арк.	Аркушів
						44	4
					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-321мп		

Відповідно до ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва», за вибухопожежною та пожежною небезпекою виробництво титанових порошків відноситься до категорії В через виділення горючого металевого пилу, здатного утворювати вибухонебезпечні суміші з повітрям. Ступінь вогнестійкості будівлі – II.

Внутрішній простір будівлі поділяється на кілька ключових зон. Зона вхідного контролю, механічної підготовки та ультразвукового знежирення призначена для розміщення токарного верстата з ЧПК та ультразвукової ванни для очищення прутків від залишків мастильно-охолоджувальних рідин. У головному плавильному відділенні розташовується установка індукційної атомізації EIGA-50. Герметична «чиста кімната» є ізольованим приміщенням з надлишковим тиском аргону для ультразвукової класифікації, гомогенізації та герметичного пакування готового порошку. Також передбачена зона зберігання готової продукції та балонів з аргонем для розміщення безпечної тари та систем подачі інертного газу. Адміністративно-побутові приміщення для персоналу прибудовуються до глухого торця будівлі.

2.2. Архітектурно-конструктивні рішення

Конструктивна схема будівлі являє собою повний залізобетонний каркас із шарнірним обпиранням несучих конструкцій покриття.

Під колони каркаса прийняті монолітні залізобетонні фундаменти стаканного типу. Під обладнання, що генерує значні динамічні навантаження, зокрема ультразвуковий класифікатор Russell Finex, а також під основний плавильний агрегат EIGA-50, проєктуються індивідуальні монолітні фундаменти, не зв'язані з фундаментами будівлі для запобігання передачі вібрацій на каркас споруди. Між фундаментами обладнання та підлогою влаштовуються віброізоляційні шви, заповнені пружним матеріалом.

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Для будівлі висотою 7,2 метра з консольно-поворотною кран-балкою вантажопідйомністю 0,5 тонн застосовано збірні залізобетонні колони прямокутного перерізу. Враховуючи вимоги до енергозбереження, зовнішні огорожувальні конструкції виконані з навісних тришарових сендвіч-панелей товщиною 150 міліметрів з негорючим утеплювачем із мінеральної вати, які кріпляться до сталевих фахверку.

Несучими елементами покриття є сталеві кроквяні балки або ферми прольотом 12 метрів. По них укладається сталевий оцинкований профнастил, поверх якого влаштовується пароізоляція, шар жорсткого мінераловатного утеплювача та гідроізоляційний килим із ПВХ-мембрани. Зважаючи на категорію вибухопожежної небезпеки, у зовнішніх стінах передбачено стрічкове засклення, яке виконує функцію легкоскридних конструкцій. У разі аварійного об'ємного вибуху титанового пилу віконне скло руйнується першим, скидаючи надлишковий тиск назовні і зберігаючи цілісність несучого каркаса будівлі. Площа вікон розраховується за нормою не менше 0,05 квадратного метра на 1 кубічний метр об'єму приміщення.

До підлог діляниці висуваються жорсткі специфічні вимоги. В основному виробничому цеху та чистій кімнаті влаштовується спеціальна антистатична, безіскрова наливна епоксидна підлога з мідним заземлювальним контуром. Це критично важливо, оскільки випадкова іскра від падіння металевих інструментів або накопичення статичної електрики може призвести до займання дрібнодисперсного титану.

2.3. Санітарно-технічне облаштування будівлі

Враховуючи виділення інертних газів, які важчі за повітря і можуть скупчуватися в нижній зоні приміщення, витісняючи кисень, у цеху передбачена потужна припливно-витяжна вентиляція з механічним спонуканням при кратності обміну повітря 4. Витяжка здійснюється

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

переважно з нижньої зони на відмітці 0,3–0,5 метра від підлоги. Крім того, кожна одиниця обладнання, особливо діляниця пакування, знежирення заготовок та очистки сіток, обладнана локальними аспіраційними зонтами. Відпрацьоване повітря проходить очищення у мокрих скруберах, оскільки збір сухого титанового пилу в звичайні рукавні фільтри категорично заборонений правилами пожежної безпеки через високий ризик самозаймання.

Будівля підключена до загальнозаводських мереж питного та виробничого водопостачання. Для охолодження індукторів, вакуумної камери та двостінної башти установки EIGA-50 передбачено замкнений контур оборотного водопостачання на базі промислового чиллера потужністю 45 кВт. Це забезпечує економію води і запобігає утворенню накипу на мідних витках високочастотних індукторів завдяки використанню хімічно очищеної демінералізованої води.

На ділянці застосовується система комбінованого освітлення. Природне освітлення забезпечується через стрічкові вікна, а штучне робоче освітлення реалізується за допомогою вибухозахищених LED-світильників зі ступенем захисту не нижче IP65. Нормована освітленість на робочих поверхнях ділянки класифікації та пакування у межах чистої кімнати становить 400 лк, у плавному відділенні – 200 лк. Для підтримки нормативних температурних умов на рівні 18-20 градусів Цельсія у зимовий період передбачено систему повітряного опалення, суміщену з припливною вентиляцією. У зоні чистої кімнати встановлено прецизійні кондиціонери для підтримки суворого температурно-вологісного режиму з вологістю повітря не більше 40 відсотків для запобігання окисненню порошку та його небажаних агломерацій

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

3 СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

3.1. Оптимізація газодинамічних параметрів процесу EIGA з метою максимізації виходу цільової фракції порошку

Ефективність використання титанових порошків у процесах селективного лазерного плавлення (SLM) критично залежить від їхнього гранулометричного складу. Для технологій SLM цільовою є вузька фракція 10–60 мкм. При стандартних режимах атомізації значна частина розплаву перетворюється на надто дрібний (менше 10 мкм) або надто великий порошок (понад 80 мкм), що знижує економічну ефективність виробництва через необхідність повторного перероблення відсіву.

У цьому спеціальному розділі виконано аналіз та оптимізацію ключових чинників процесу атомізації – тиску розпилювального газу (аргону) та швидкості подачі титанового електрода – з метою підвищення виходу цільової фракції порошку Ti-6Al-4V Grade 23.

3.1.1. Фізико-механічні закономірності розпаду струменя розплаву

Процес первинного та вторинного розпаду рідкого струменя титану під дією високошвидкісного потоку газу описується критерієм Вебера (W_e), який характеризує співвідношення сил інерції газу та сил поверхневого натягу рідкого металу:

$$W_e = \frac{\rho_g \cdot v_g^2 \cdot d_c}{\sigma} \quad (3.1)$$

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ		
Розроб.		Чечко Н.В.					
Перевір.		Солодкий Є.В.					
Реценз.							
Н. Контр.		Бірюкович Л.О.					
Затверд.		Богомол Ю. І.					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						48	4
					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-321мп		

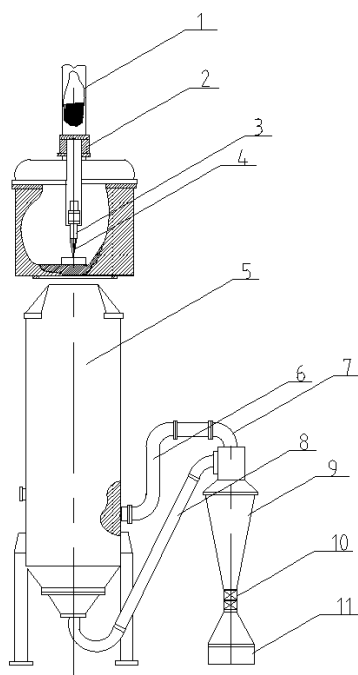
де ρ_r – густина розпилювального газу (аргону), кг/м³;

u_r – швидкість газового потоку на зрізі форсунки, м/с;

d_c – початковий діаметр струменя розплаву, м

σ – коефіцієнт поверхневого натягу рідкого титану (для сплаву Ti-6Al-4V $\sigma \approx 1,51$).

Для досягнення дрібнодисперсного розпилення критичне значення критерію Вебера має перевищувати $We \geq 12$. Збільшення швидкості газу u_r досягається шляхом підвищення тиску аргону перед форсункою, що призводить до інтенсифікації хвильових процесів на поверхні струменя розплаву та його миттєвого розпаду на краплі мікронного розміру.



1 – подавач сировини; 2 – подаюча трубка та втулка; 3 – плазмовий пальник;
4 – плавильна піч; 5 – зона розпилення; 6 – вихід для грубого порошку; 7 –
трубопровід для транспортування дрібного порошку; 8 – труба міжкамерного
з'єднання; 9 – корпус циклону; 10 – вихід для дрібного порошку; 11 –
кінцевий збірний резервуар;

Рисунок 3.1 – Схема атомізатора ALD EIGA-50

3.1.2. Дослідження впливу тиску аргону на середній діаметр частинок

У ході виконання роботи було проаналізовано залежність середнього медіанного діаметра частинок порошку (D_{50}) від тиску аргону в системі живлення форсунки установки EIGA-50 при фіксованій швидкості подачі електрода 3 мм/хв. Результати аналізу зведено до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Вплив тиску розпилюваного газу на гранулометричні показники порошку

Тиск аргону P , бар	Швидкість газу v_g , м/с	Середній діаметр D_{50} , мкм	Вихід цільової фракції, %	Частка великого відсіву, %	Частка ультрадисперсного браку, %
30	280	58	52,4	41,2	6,4
35	315	45	64,1	27,3	8,6
40	340	36	72,5	16,0	11,5
45	365	28	81,2	5,3	13,5
50	390	22	68,4	1,8	29,8

Як свідчать дані дослідження, підвищення тиску з 30 до 45 бар дозволяє знизити медіанний розмір частинок з 58 до 28 мкм. При цьому вихід корисного продукту (фракції 10–60 мкм) зростає з 52,4% до свого максимуму — 81,2%. Подальше збільшення тиску газу до 50 бар є недоцільним, оскільки воно призводить до надмірного подрібнення розплаву. Внаслідок цього частка ультрадисперсного порошку (менше 10 мкм), який є пожежонебезпечним і не використовується в SLM-технологіях, стрімко

зростає до 29,8%.

3.1.3. Запобігання утворенню сателітів та внутрішньої пористості

Однією з головних проблем при атомізації є утворення сателітів – дрібних частинок, що налипають на поверхню більших крапель під час їхнього застигання в камері. Сателіти погіршують текучість порошку та щільність його засипки у принтері. Для вирішення цієї проблеми у спеціальному розділі запропоновано модернізацію геометрії газової форсунки установки EIGA-50. Впровадження дискретного кільцевого сопла з нахилом газових струменів під кутом 22° до осі розплаву дозволило створити стабільну зону рециркуляції газу під форсункою, що виключає зворотний політ дрібних крапель у зону плавлення. забезпечити вирівнювання швидкостей охолодження крапель у висхідному потоці аргону. Швидкість охолодження часток оптимізовано в діапазоні $10^4 - 10^5$ К/с, що гарантує формування дрібнозернистої мартенситної α -фази без утворення внутрішніх газових пор (антрапментів).

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Людина та її здоров'я – найбільша цінність Української держави. Держава докладає великих зусиль, створюючи умови безпечної життєдіяльності людини як в навколишньому середовищі, так і в середовищі праці. Завдання охорони праці – забезпечення безпечних, нешкідливих і сприятливих умов праці через вирішення багатьох складних завдань. Вирішальне значення в розв'язанні цих завдань має науково-технічний прогрес. Використання досягнень науки та техніки сприяє підвищенню рівня безпеки праці, культури та організації виробництва, дозволяє полегшити працю, підсилити її привабливість.

4.1 Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві

В даному дипломному проєкті проєктується дослідно-промислова дільниця для виробництва сферичних титанових порошків сплаву Ti-6Al-4V методом газової атомізації на базі комплексу ALD EIGA-50 [5,6]. Хімічний склад та сферичність отриманих порошків повинні відповідати суворим міжнародним стандартам для адитивного виробництва [1]. На дільниці задіяні 10 осіб виробничого та технічного персоналу при 1-змінному графіку роботи. Виробнича потужність підприємства – 10 тонн готової продукції на рік.

Законодавчими актами, що визначають основні положення про охорону праці, є загальні закони України, а також спеціальні нормативно-правові акти. Роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці умови праці відповідно до чинного законодавства. Розробка та проєктування даного розділу виконані у суворій відповідності до затверджених методичних вказівок кафедри [8] та спеціалізованих правил безпеки при роботі з

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ОХОРОНА ПРАЦІ		
Розроб.		Чечко Н.В.					
Перевір.		Солодкий Є.В.					
Реценз.							
Н. Контр.		Бірюкович Л.О.					
Затверд.		Богомол Ю. І.					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						52	9
					НТУУ«КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-321		

титановими сплавами.

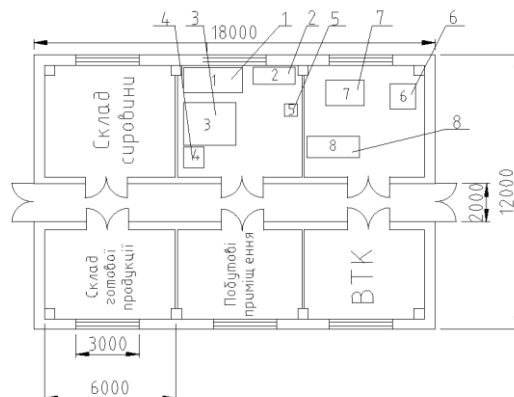
4.2 Аналіз параметрів приміщення

Нормативні вимоги до встановлення обладнання щодо об'єму і площі приміщення на 1 працівника та місця розташування технологічного обладнання наведено в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 – Реальні та нормативні характеристики приміщення і розміщення технологічного обладнання

№	Параметр приміщення	Реальне значення	Нормативні значення
1.	Площа на 1 працюючого	4,5 м ²	4,5 м ²
2.	Об'єм на 1 працюючого	15 м ³	15 м ³
3.	Мінімальна ширина проходу	1,5 м	1,5 м
4.	Ширина головних проїздів	2,5 м	2,5 м
5.	Відстань між обладнанням	2,0 м	1,0 м

Характеристики виробничого приміщення (дільниці атомізації): площа 96 м², технологічна висота 7,2 м. Загальний об'єм приміщення складає 691,2 м³. План дільниці із розташуванням робочих місць та основного обладнання представлений на рисунку 4.1.



1 – токарний верстат ЧПК; 2 – ультразвукова ванна знежирення заготовок;
3 – атомізатор ALD EIGA-50; 4 – циклон осаджувач; 5 – бункер-накопичувач порошку; 6 – класифікатор ультразвуковий; 7 – змішувач V-подібний; 8 – вакуумний рукавичний бокс GB-1200

Рисунок 4.1 – План дільниці

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

Відповідно до основних вимог до будівель виробничого призначення, які викладені в ДБН В.2.2-28:2010 [9], висота виробничих приміщень повинна бути не менше 3,2 м, а об'єм і площа – 15 м³ та 4,5 м² відповідно на кожного працівника. Під час роботи на ділянці одночасно працює 10 осіб, звідки ми отримуємо, що площа і об'єм на одну людину складають:

$$S_{\text{ч}} = \frac{96}{10} = 9,6 \text{ м}^2/\text{особу}$$

Отже, приміщення за геометричними параметрами повністю відповідає нормативним вимогам [9]. Проектування кольорового рішення інтер'єру виконується з урахуванням необхідності забезпечення високої зосередженості персоналу. Стіни в приміщенні виконуються у зелено-блакитних тонах малоконтрастних відтінків, що діють заспокійливо та запобігають розсіюванню уваги операторів.

По важкості робіт ділянка порошкової металургії відноситься до категорії робіт середньої важкості Па. Параметри мікроклімату на робочих місцях повинні суворо відповідати вимогам ДСН 3.3.6.042-99 [10]. Дані умови виконуються завдяки встановленому водяному опаленню у холодний період року та штучній припливно-витяжній вентиляції у теплий період року. Параметри мікроклімату наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Параметри мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура, °С		Відносна вологість, %		Швидкість руху повітря, м/с	
		Факт.	Допуст.	Факт.	Допуст.	Факт.	Допуст.
Холодний	Середньої важкості Па	18-20	17-23	40-60	75	0,2	<0,3
Теплий		21-23	18-27	40-60	65	0,3	0,2-0,4

Таблиця 4.3 – специфікація технологічного обладнання

№ п.п.	Найменування	Розміри Д/Ш/В			Основні характеристики	Кількість	Позиція на рисунку
1	Установка атомізації ALD EIGA-50	3000	2500	4500	Потужність 150 кВт, напруга 400 В, інертне середовище	1	3
2	Циклон-осаджувач Hosokawa Alpine ZB 63	800	800	1800	Ефективність вловлювання 98%, матеріал сталь AISI 316L	1	4
3	Бункер-накопичувач порошку Muller FD-50	600	600	900	Корисний об'єм 50 л	1	5
3	Класифікатор вібраційний Russell Finex	1500	1200	1800	Потужність 0.5 кВт герметичне виконання для інертних газів	1	6
3	V-подібний змішувач VH-50	2200	1500	1900	Потужність 1.5 кВт, герметичні фланцеві з'єднання	1	7
4	Вакуумна перчаточний бокс GB-1200	800	1000	1200	Потужність 0.8 кВт, фасування в атмосфері агрону	1	8
5	Токарний верстат з ЧПК СК6136	3500	2000	2100	Потужність 7.5 кВт, обробка титанових електродів	1	1
6	Ультразвукова ванна Jeken PS-100A	1500	1000	1200	Потужність 0.6 кВт	1	62

4.3 Аналіз освітленості приміщення

Освітлення робочого місця – один із найважливіших факторів для безпечної праці. Зорові роботи, які виконуються на дільниці (контроль за ходом атомізації, налаштування ЧПК верстата), мають другий розряд і відносяться до роботи середньої точності.

Освітлення на території дільниці приймається комбінованим: природне бічне (через віконні прорізи шириною 1500 мм) та штучне. Загальна освітленість у виробничих приміщеннях повинна дорівнювати $E = 200$ лк. Штучне освітлення передбачається за допомогою чотирьохлампових світильників ЛПО-01 (1313×490 мм) для компенсації нестачі природного світла. Окрім цього, передбачене аварійне освітлення в проходах (не менше 0,5 лк).

Освітлення робочого місця – один із найважливіших факторів для безпечної праці. Зорові роботи, які виконуються на дільниці (контроль за

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

ходом атомізації, налаштування ЧПК верстата), мають другий розряд і відносяться до роботи середньої точності.

Освітлення на території дільниці приймається комбінованим: природне бічне (через віконні прорізи шириною 1500 мм) та штучне. Загальна освітленість у виробничих приміщеннях повинна дорівнювати $E = 200$ лк. Штучне освітлення передбачається за допомогою чотирьохлампових світильників ЛПО-01 (1313×490 мм) для компенсації нестачі природного світла. Окрім цього, передбачене аварійне освітлення в проходах (не менше 0,5 лк).

4.4 Аналіз шуму та вібрації

Джерелами шуму та локальної вібрації на дільниці є ультразвуковий віброкласифікатор Russell Finex та механічна обробка титанових електродів на токарному верстаті. Шум утворює значне навантаження на нервову систему людини, тому його нормування здійснюється відповідно до ДСН 3.3.6.037-99 [10].

Згідно з цими нормами загальний рівень шуму в приміщенні не повинен перевищувати 80 дБА. З метою виключення можливості виникнення вібраційної хвороби параметри вібрації робочих місць обмежують шляхом встановлення обладнання на віброізолюючі фундаменти. Фактичний рівень шуму від класифікатора на робочому місці становить 75 дБА, що знаходиться у межах допустимих норм.

4.5 Аналіз загазованості та запиленості

Виділення дрібнодисперсного пилу в повітрі робочої зони може відбуватися при завантажуванні-розвантажуванні бункерів-накопичувачів, класифікації порошків та упакуванні готового продукту. Пил титану впливає на органи дихання як фіброгенний фактор, викликаючи подразнення слизових

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оболонки. Найбільшу небезпеку чинить дрібнодисперсна фракція, яка знаходиться у підвішеному стані.

На ділянці гранично допустима концентрація (ГДК) пилу титану в повітрі виробничих приміщень не повинна перевищувати 10 мг/м³. Крім того, використання великої кількості інертного газу аргону під тиском створює небезпеку витіснення кисню (вміст кисню повинен становити не менше 19% об.). Безпека роботи з пиловими викидами металів забезпечується застосуванням промислових систем очищення.

4.6 Аналіз систем вентиляції та кондиціонування приміщення

Для забезпечення належної чистоти повітряного середовища та видалення шкідливих домішок на ділянці проєктується інтегрована система вентиляції:

а) централізована припливно-витяжна вентиляція, яка забезпечує нормований обмін повітря з урахуванням загального об'єму приміщення;

б) високоефективні системи локальної мокрої аспірації (гідрофільтри) для уловлювання активного титанового пилу безпосередньо у зонах вивантаження порошку;

в) система автоматичного контролю за допомогою стаціонарних газоаналізаторів, які фіксують рівень кисню та автоматично запускають аварійну витяжну вентиляцію при витоках аргону.

4.7 Аналіз електромагнітного та теплового випромінювання

Джерелом електромагнітного поля (ЕМП) радіочастотного діапазону та інтенсивного теплового (інфрачервоного) випромінювання є індуктор плавильної колони установки ALD EIGA-50 потужністю 150 кВт [4,5]. При робочих температурах плавлення титанових заготовок інфрачервоний спектр має довжину хвилі 1,8–3,5 мкм.

					ФНЗ21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для захисту персоналу від ЕМП передбачено суцільнометалеве екранування високочастотного ланцюга. Захист від інфрачервоного опромінення забезпечується теплоізоляцією камери та наявністю зовнішнього контуру водяного охолодження стінок плавильного блоку, що гарантує підтримання температури зовнішніх поверхонь конструкцій на безпечному рівні (не більше 45 °С) відповідно до санітарних норм [11].

4.8 Електробезпека

У технологічному циклі виробництва використовується трифазна напруга мережі змінного струму 380/400 В із промисловою частотою 50 Гц. Дільниця відноситься до приміщень з особливою небезпекою, оскільки робота супроводжується наявністю струмопровідного металевого пилу титану та великої кількості металоконструкцій, що мають сполучення з землею.

З метою виключення ураження струмом при пробиванні ізоляції або випадковому дотику до корпусів машин, електрообладнання технологічного комплексу проектується у суворій відповідності до ДСТУ EN 60204-1:2019 [12]. Всі металеві корпуси печі, верстата, класифікатора та шаф керування підключаються до захисного заземлення з опором контуру розтіканню струму не більше 4 Ом, а лінія живлення захищається пристроями захисного відключення (ПЗВ).

4.9 Пожежна безпека

Дрібнодисперсний сферичний порошок титану має високу пірофорність і за певних концентрацій у повітрі здатний до вибухового займання від щонайменшої іскри чи перегріву деталей. Відповідно до чинних норм, дільниця відноситься до категорії вибухопожежної небезпеки [13].

Для запобігання пожежам технологічний процес плавки та атомізації

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

виконується виключно в інертному середовищі аргону [1]. Проводка кабелів здійснюється у захисних негорючих коробах. На території дільниці суворо заборонено використання відкритого вогню. Для гасіння пожеж електроустановок та локальних займань металу дільниця обладнується вуглекислотними вогнегасниками типу ОУ-5 та ОУ-8 (гасіння титану піною або водою заборонено через загрозу виділення водню). На випадок надзвичайної ситуації приміщення обладнується системою сповіщення, а схема шляхів евакуації представлена на рисунку 4.2.

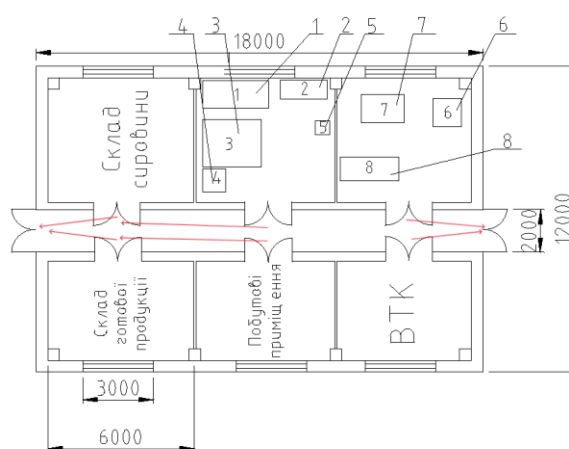


Рисунок 4.2 – План евакуації персоналу з території виробничої дільниці

4.10 Засоби індивідуального захисту для виконання робіт у дільниці

На підставі нормативних вимог, зафіксованих у галузевих інструкціях з безпеки [13] та методичних рекомендаціях [8], для персоналу дільниці передбачено обов'язкове застосування таких засобів індивідуального захисту:

- а) закриті захисні окуляри для захисту очей оператора від випадкових часток та пилу під час технічного обслуговування;
- б) протипилові респіратори з високоефективними фільтрами для

захисту органів дихання;

в) спеціальний антистатичний захисний одяг із вогнестійким просоченням;

г) промислові захисні каски та спецвзуття з електропровідною підошвою і металевим носком для постійного відведення статичних зарядів;

д) засоби слухового захисту (навушники) під час виконання операцій класифікації та механічної обробки.

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

5.1 Розрахунок чисельності виробничих робітників

Методика розрахунків планової чисельності працівників окремих категорій визначається специфікою їхньої роботи та галузевими особливостями підприємства. Оскільки процес безтигельної атомізації EIGA та подальшої класифікації порошків є високоавтоматизованим, чисельність основних робітників, зайнятих на ненормованих роботах (контроль технологічного процесу, керування апаратами), розраховують за нормами обслуговування [14]:

$$\chi_{\text{ос}}^{\text{пл}} = \frac{m_0 \cdot P_{\text{зм}} \cdot K_{\text{п}}}{H_{\text{об}}} \quad (5.1)$$

де m_0 – кількість обслуговуваних об'єктів;

$P_{\text{зм}}$ – кількість робочих змін протягом доби;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт переведення явочної чисельності в облікову.

$H_{\text{об}}$ – норма обслуговування (кількість одиниць обладнання, що обслуговує один працівник);

Таблиця 5.1 – Баланс робочого часу середньооблікового працівника

Показники		Планові значення
Кількість календарних днів		365
Вихідні та святкові дні		104
Час на планово-попереджувальний ремонт, днів		6
Номінальний фонд робочого часу, днів		258
Невиходи на роботу, днів		30
з них:		
відпустка		20
захворювання		7
дозволені законом		1

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ОРГАНІЗАЦІЙНО- ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ		
Розроб.		Чечко Н.В.					
Перевір.		Солодкий Є.В.					
Реценз.							
Н. Контр.		Бірюкович Л.О.					
Затверд.		Богомол Ю. І.					
					Літ.	Арк.	Аркуші
						61	15
					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-321		

Продовження таблиці 5.1

з дозволу адміністрації	1
прогули	1
цілодобові простої	0
страйки	0
Явочний робочий час, днів	228
Середня тривалість робочого дня, год	8
Внутрішньозмінні втрати робочого часу та простої, год	0,5
Робочі години	7,5
Ефективний фонд робочого часу за рік, год	1824

Коефіцієнт переведення явочної чисельності в облікову розраховується за формулою:

$$K_{\pi} = \frac{100}{100 - k} \quad (5.2)$$

де k – плановий відсоток невиходів на роботу.

Згідно з балансом робочого часу для таких виробництв, $k = 10,6\%$, тому:

$$K_{\pi} = \frac{100}{100 - 10,6} = 1,12.$$

Чисельність допоміжних працівників ($\text{Ч}_{\text{д}}^{\text{пл}}$), для яких неможливо встановити норму обслуговування, визначають за кількістю робочих місць [14]:

$$\text{Ч}_{\text{д}}^{\text{пл}} = \text{П}_{\text{р.м}} \cdot \text{П}_{\text{зм}} \cdot K_{\pi} \quad (5.3)$$

де $\text{П}_{\text{р.м}}$ – кількість робочих місць.

Загальну чисельність робітників цеху, як основних, так і допоміжних, округлюють до найближчого цілого числа.

Таблиця 5.2 – Чисельність основних і допоміжних робітників цеху

Професія, спеціальність	Квалфіка- ційний розряд	Явочна чисельність по змінах			Загалом на добу	Коефіцієнт переведення явочної чисельності в облікову	Обліко ва чисель ність
		1-а	2-а	3-а			
Основні робітники							
Оператор технологічних установок	VI	3	0	0	3	1,12	3
Токар	V	2	0	0	2	1,12	2
Разом основних		5	0	0	5	1,12	5
Допоміжні працівники							
Наладчик	VI	1	0	0	1	1,12	1
Вантажник	II	1	0	0	1	1,12	1
Разом допоміжних		2	0	0	2		2
Усього робітників		7	0	0			7

5.2 Визначення фондів заробітної плати

Основним організаційно-правовим інструментом обґрунтування диференціації зарплати працівників є тарифно-посадова система [14]. Згідно з чинним законодавством, мінімальна заробітна плата в Україні на 2026 рік становить 8 647 грн на місяць. Виходячи з цієї норми та середньомісячного ефективного фонду робочого часу (близько 139,3 год на місяць, за річного фонду 1824 год), мінімальна погодинна тарифна ставка працівника 1-го розряду приймається на рівні 62,10 грн/год (це гарантує заробітну плату не нижче встановленого державою мінімуму).

Тарифні ставки для інших розрядів визначаються множенням базової ставки (62,10 грн) на відповідний тарифний коефіцієнт [14]:

2 розряд (коеф. 1,088): $62,10 \cdot 1,088 = 67,56$ грн/год;

4 розряд (коеф. 1,350): $62,10 \cdot 1,350 = 83,84$ грн/год;

5 розряд (коеф. 1,531): $62,10 \cdot 1,531 = 95,08$ грн/год;

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

6 розряд (коєф. 1,800): $62,10 \cdot 1,800 = 111,78$ грн/год.

Таблиця 5.3 – Типова тарифна сітка робітників різногалузевих підприємств та організацій

Показник	Тарифні розряди							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Тарифні коефіцієнти	1,0	1,088	1,204	1,350	1,531	1,800	1,892	2,0
Зростання тарифних коефіцієнтів: абсолютне відносне		0,088 8,8	0,116 10,7	0,146 12,1	0,181 13,4	0,269 1,7,6	0,092 5,1	0,108 5,7

Основна річна заробітна плата обчислюється як добуток погодинної ставки, ефективного річного фонду часу (1824 год) та кількості робітників. Додаткова заробітна плата (премії за виконання плану 40%, за шкідливі умови праці 18%, відпускні 12%, інші доплати 10%) сумарно складає 80% від основної [14].

Таблиця 5.4 – Розрахунок фонду заробітної плати управлінського та обслуговуючого персоналу

Штатна посада	Чисельність, осіб	Місячний посадовий оклад, грн	Річний фонд заробітної плати, грн
Керівники			
Начальник дільниці	1	10 480	125 760
Майстер	1	11 054	132 648
Разом	2	21 534	258 408
Службовці та молодший обслуговуючий персонал			
Прибиральник	1	3195	38 340
Комірник	1	6095	73 140
Разом	2	9290	111 480
Усього по дільниці	4	41 756	369 888

Таблиця 5.5 – Розхунок фонду заробітної плати основних і допоміжних робітників													
Професія,	Кваліфікаційний розряд	Годинна тарифна ставка, грн.	Обліковий склад, осіб	Кількість годин роботи за рік		Основна заробітна плата, тис. грн. (3*6)	Розрахунок додаткової заробітної плати, грн					Загальний фонд заробітної плати, тис. грн. (7+12)	
				Одного робітника	Усіх		Надбавки та доплати				Разом (8+9+10+11)		
							Премії (40%)	За роботу в особливих умовах (18%)	Оплата відпусток (12%)	Інші доплати та надбавки (10%)			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Основні (технологічні) робітники													
Оператор технологічних установок	IV	111,78	3	1824	5472	611,6	244,64	110,08	73,3	61,16	489,2	1100,8	
Токар	V	95,08	2	1824	3648	346,8	138,72	62,4	41,6	34,6	277,3	591,6	
Разом						958,4						766,5	1698,4
Допоміжні (обслуговуючі) робітники													
Наладчик	VI	111,78	1	1248	1248	139,5	55,8	25,1	16,7	13,9	111,5	251	
Слюсар-електрик	V	95,08	1	1248	1248	118,6	47,4	21,3	14,2	11,8	94,7	213,3	
Разом						258,1					206,2	464,3	
Усього по цеху (виробничій дільниці)						1216,5							2162,7

5.3 Розрахунок продуктивності праці

Продуктивність праці, яка відображає ефективність роботи трудового колективу, розраховують як відношення річного обсягу виробництва до облікового складу всіх працівників цеху (робітників, управлінського та обслуговуючого персоналу) [14].

Продуктивність праці Π – це річний обсяг продукції, виготовленої з розрахунку на одного працівника цеху:

$$\Pi = \frac{G}{\text{Ч}} \quad (5.4)$$

де G – обсяг продукції, виготовленої дільницею за рік, кг (згідно з технологічним розрахунком – 10000 кг);

Ч – чисельність працівників усіх категорій (7 робітників + 4 управлінців = 11).

$$\Pi = \frac{10000}{11} = 909,09 \text{ кг/особу на рік.}$$

Річний обсяг робіт вимірюють за допомогою різних показників, включаючи натуральні показники (тонни). Високий рівень продуктивності праці (понад 909 кг готового аерокосмічного порошку на одного працівника) підтверджує ефективність обраної автоматизованої апаратурної схеми.

5.4 Розрахунок капітальних вкладень

Капітальні вкладення у проєктований об'єкт складаються із капіталовкладень у основні засоби (виробничі будівлі та споруди, технологічне і допоміжне обладнання, підйомно-транспортувальні засоби,

					ФНЗ21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оснащення тощо), а також оборотних нормованих засобів (витрати на створення оборотних запасів матеріалів і сировини, змінного обладнання, запчастин, інструменту, незавершеного виробництва та ін.).

Для розрахунку вартості обладнання, ціна його транспортування, монтажу і налагодження береться у розмірі 10–25 % від відпускної ціни. Оскільки для монтажу вакуумних установок EIGA залучаються спеціалісти, приймаємо цей коефіцієнт на рівні 10%.

Таблиця 5.6 – Розрахунок капітальних вкладень в обладнання

Найменування устаткування	Кількість, одиниць	Вартість за одиницю, тис. грн	Загальна вартість, тис. грн	Витрати на транспортування та монтаж, тис. грн	Усього, тис. грн
Основне технологічне устаткування					
Установка атомізації ALD EIGA-50	1	25000	25000	2500	27500
Класифікатор Russell Finex	1	400	400	40	440
Змішувач V-подібний WLD-500	1	150	150	15	165
Вакуумний рукавичний бокс GB-1200	1	300	300	30	330
Разом основне технологічне устаткування					28435
Допоміжне та підйомно-транспортне устаткування					
Токарний верстат з ЧПК СК6136	1	450	450	45	495
Ультразвукова ванна Jeken PS-100A	1	45	45	4,5	49,5
Разом допоміжне та підйомно-транспортне устаткування					544,5
Загалом по цеху (виробничій ділянці)					28979,5

Обсяг капіталовкладень у будівлю визначають виходячи з будівельного об'єму цеху та усереднених нормативів вартості будівельних конструкцій [9,14]. Загальна площа ділянки становить 216 м², висота будівлі — 6 м. Будівельний об'єм: 1296 м³. Приймаємо базову вартість 1 м³ будівлі на рівні 3000 грн.

Таблиця 5.7 – Розрахунок вартості будівельно-монтажних робіт

Елементи капітальних вкладень	Одиниця вимірювання	Об'єм будівлі, м³	Вартість, тис. грн.	
			Одиниці	Загальна
1. <i>Виробничі приміщення</i>			3000,0	2091
1.1 Водопостачання	м³	697	30,0	20,9
1.2 Каналізація			25,0	17,4
1.3 Електропроводка			50,0	34,8
1.4 Вентиляція			70,0	48,7
<i>Всього</i>				2212,8
2. <i>Побутові приміщення</i>			3000	1797
2.1 Водопостачання	м³	599	40	23,9
2.2 Каналізація			90	53,9
2.3 Електропроводка			50	29,9
2.4 Вентиляція			70	41,9
<i>Всього</i>				1946,6
3. Зовнішній благоустрій				15
4. Невраховані витрати				50
Загальна вартість будівлі				4224,4

Для розрахунку середнього поточного запасу матеріалів, використовують формулу:

$$З_{\text{м}} = M_{\text{д}} \cdot \frac{T_{\text{пост}}}{2} \quad (5.5)$$

де $M_{\text{д}}$ – середньодобове споживання сировини та матеріалів, грн;

$T_{\text{пост}}$ – інтервал між поставками матеріалів у днях (приймається в межах 15-30 днів).

Розрахунок середньодобового споживання сировини та матеріалів ($M_{\text{д}}$), річну потребу ділимо на розрахункове число днів за рік (360):

$$M_{\text{д}} = \frac{10000}{360} = 27,7 \text{ тис. грн/добу}$$

Вибір інтервалу між поставками ($T_{\text{пост}}$): оскільки високоякісні титанові прутки для аерокосмічної галузі зазвичай постачаються великими законтракованими партіями, приймаємо максимальне значення: $T_{\text{пост}} = 30$ днів.

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

Розрахунок середнього поточного запасу ($З_m$): підставляємо отримані значення у формулу:

$$З_m = 27,7 \cdot \frac{30}{2} = 27,7 \cdot 15 = 415,5 \text{ тис. грн.}$$

Середній поточний запас матеріалів, необхідний для безперебійного забезпечення процесу виробництва титанових порошків між двома черговими поставками сировини, становить 415,5 тис. грн.

Тепер можна вирахувати величини всіх інших елементів загального нормативу оборотних засобів, їх приймаємо на рівні 50% від розрахованого нормативу поточних запасів:

$$Н_{\text{заг}} = 1,5 \cdot З_m \quad (5.6)$$

Одразу розрахуємо:

$$Н_{\text{заг}} = 1,5 \cdot 415,5 = 623,25 \text{ тис. грн.}$$

Для узагальнення всіх розрахунків складаємо зведену таблицю загальних капітальних витрат на створення дільниці.

Таблиця 5.8 – Розрахунок загальних капітальних вкладень

Елементи капіталовкладень	Сума	
	тис. грн.	%
1. Будівлі:		
1.1. Виробничі	2212,8	6,5%
1.2. Побутові	1946,6	5,7%
2. Устаткування		
2.1. Основне технологічне	28435	84,2%
2.2. Допоміжне та підйомно-транспортне	544,5	1,7%
3. Норматив оборотних коштів	623,25	1,9%
Всього капіталовкладень у виробничі фонди	33 762,15	100%

5.5 Розрахунок собівартості продукції

Визначення собівартості продукції є ключовим етапом економічного обґрунтування проєкту, оскільки вона відображає поточні витрати підприємства на виробництво та збут одиниці продукції. На основі технологічних параметрів дільниці атомізації EIGA та чинних цін на матеріально-енергетичні ресурси складається калькуляція планової виробничої собівартості 1 тонни сферичного титанового порошку сплаву Ti-6Al-4V Grade 23.

5.6 Розрахунок прямих матеріальних витрат.

Сировина та основні матеріали для виробництва 10 тонн сферичного порошку, з урахуванням технологічного виходу придатного на рівні 85% та повернення відсіву на переплавку, річна потреба в титанових прутках електронно-променевої плавки становить 11,76 тонн. При плановій вартості високочистої титанової сировини 1200 грн/кг, загальні витрати складуть: 14,11 тис.грн.

Технологічний захисний газ (Аргон). Безтигельна атомізація EIGA потребує значної кількості високочистого аргону для розпилення та створення інертного середовища. Річні витрати аргону становлять близько 1-5000 м³. При вартості газу 45 грн/м³, загальні витрати: 675 тис.грн.

Електроенергія на технологічні цілі. Загальне річне споживання дільниці (робота індукторів установок EIGA-50, допоміжного обладнання та систем освітлення), згідно з енергетичним розділом, становить 41583,7 кВт·год. При діючому промисловому тарифі на 2026 рік у розмірі 6,50 грн/·год [14]: 270,2 тис. грн.

Розрахунок річних амортизаційних відрахувань. Загальна річна сума

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

амортизаційних відрахувань розраховується, виходячи з вартості основних фондів та встановлених норм амортизаційних відрахувань

Таблиця 5.9 – Розрахунок сум річних амортизаційних відрахувань

Об'єкт амортизації	Ціна, грн	Відсоток амортизації	Сума амортизаційних відрахувань, грн
Будівлі	4 224 400,0	5	211 220,0
Обладнання	28 979 000,0	25	7 244 750,0
Всього амортизаційних відрахувань			7 455 970,0

5.7 Загальновиробничі витрати

До складу загальновиробничих витрат включаються витрати на оплату праці управлінського персоналу та майстрів дільниці з відрахуваннями ЄСВ (125,7 + 132,6 = 201,5 тис. грн), витрати на охорону праці, промислову санітарію, а також поточний ремонт обладнання та будівлі (приймаються у розмірі 1,5 % від вартості обладнання – 434,6 тис. грн) [14]. Разом загальновиробничі витрати становлять: 636,1 тис. грн.

5.8 Розрахунок планової калькуляції собівартості продукції

Для розрахунку ми використовуємо підсумкову цифру повної собівартості річного обсягу та заданий річний обсяг випуску. Оскільки ціну реалізації та вартість сировини зазвичай вказуємо за кілограм, логічно розрахувати собівартість саме для 1 кг готового порошку.

Повну собівартість одиниці продукції ($C_{\text{п}}$) розраховують як відношення повної собівартості річної програми випуску продукції ($C_{\text{п}}^{\text{річ}}$) до річного обсягу випуску продукції дільницею (G):

$$C_{\text{п}} = \frac{C_{\text{п}}^{\text{річ}}}{G} \quad (5.7)$$

Підставимо значення:

$$C_{\pi} = \frac{25923769,6}{10000} = 2592,37 \text{ грн/кг.}$$

Отже, планова повна собівартість виробництва 1 кг сферичного титанового порошку сплаву Ti-6Al-4V Grade 23 становить 2592,37 грн

Таблиця 5.10 – Планова калькуляція собівартості річного обсягу виробництва продукції

Найменування статей витрат	Одиниця виміру	Кількість на річну програму	Ціна за одиницю, грн	Витрати на річну програму
1. Сировина та матеріали				
1.1. Прутки титанового сплаву Ti-6Al-4V Grade 23 (ASTM B348)	кг	11 760	1200,00	14 112 000,00
1.2. Газ аргон високої частоти 5.0	м³	15 000	45,00	675 000
1.3 Спеціалізована тара	шт	500	150,00	75 000,00
2. Паливо та енергія на технологічні цілі (енергоносії)				295 008,00
3. Основна заробітна плата технологічних робітників				958 400,00
4. Додаткова заробітна плата технологічний робітників				766 500,00
5. Єдиний соціальний внесок				509 746,6
6. Утримання та експлуатація устаткування				2 500 000,00
7. Загальновиробничі витрати				636 100,00
8. Загальногосподарські витрати				280 000,00
9. Витрати на підготовку та освоєння виробництва				450 000,00
Виробнича собівартість річної програми				25 923 769,6
11. Позавиробничі витрати				420 000,00
Повна собівартість річної програми				33 406 654,2

5.9 Розрахунок показників економічної ефективності проектного рішення

Завершальним етапом економічного обґрунтування дипломного проекту є розрахунок показників економічної ефективності капітальних витрат на впровадження нового обладнання та технології.

Технологічна трудомісткість продукції (t) показує витрати робочого часу основних робітників на виробництво одиниці продукції (1 тонни

порошку):

$$t = \frac{\chi_{oc} \cdot \Phi_{ef}^{пл}}{G} \quad (5.8)$$

де χ_{oc} – загальна чисельність основних (технологічних) робітників, осіб;

$\Phi_{ef}^{пл}$ – плановий ефективний фонд робочого часу одного працівника за рік, год.;

G – річний обсяг випуску продукції.

$$t = \frac{7 \cdot 1824}{10} = \frac{12768}{10} = 1276,8 \text{ нормо – годин/т}$$

Капіталомісткість (фондомісткість) продукції (K_G) визначається як відношення загальних капітальних витрат ($K_{заг}$) у будівництво ділянки до річного планового обсягу виробництва:

$$K_G = \frac{K_{заг}}{G} = \frac{42242000}{10 \text{ т}} = 422 \text{ 420 грн/т.}$$

Грошовий потік за рік ($\Gamma П_p$) розраховується як сума чистого прибутку та амортизаційних відрахувань, визначених за рік експлуатації спроектованого об'єкту:

$$\Gamma П_p = 0,82 \cdot (\Pi - C_{п}) \cdot G + \sum A \quad (5.9)$$

де 0,82 – коефіцієнт, який враховує частку чистого прибутку у валовому прибутку;

Π – ринкова ціна одиниці продукції, грн;

$C_{п}$ – повна собівартість одиниці продукції, грн;

A – загальна річна сума амортизаційних відрахувань, грн.

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$ГП_p = 0,82 \cdot (4400,00 - 2592,37) \cdot 10 + 7\,495\,570,0 = 7\,510\,392,5 \text{ грн.}$$

Грошовий потік підприємства становитиме понад 7 510 392,5 грн на рік

Період окупності капітальних витрат ($\Pi_{ок}$) є найбільш розповсюдженим показником економічної ефективності, який має критеріальний характер:

$$\Pi_{ок} = \frac{K_{заг}}{ГП_p} < \Pi_{ок}^H \quad (5.10)$$

де $ГП_p$ – річна сума грошового потоку, грн;

$\Pi_{ок}^H$ – нормативний період окупності, років.

$$\Pi_{ок} = \frac{422420}{7510392.5} = 5,6 \text{ років}$$

Оскільки розрахунковий період окупності 5,6 років можна зробити висновок, що запропоноване проектне рішення є економічно доцільним та високоефективним.

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 5.11 – Техніко-економічні показники наведені

Найменування показників	Одиниця виміру	Значення по варіантам	
		Базовий	Спроектований
1. Річний плановий обсяг виробництва продукції (G)	т, шт	12	10
2. Загальна площа цеху (дільниці)	м ²	500	218
3. Виробнича площа цеху (дільниці)	м ²	-	697
4. Капіталомісткість продукції (K_G)	$\frac{\text{грн}}{\text{т}} \left(\frac{\text{грн}}{\text{шт}} \right)$	-	422 420
5. Загальна чисельність	осіб	40	11
у тому числі:			
основний (технологічний) персонал	осіб		5
допоміжний (технологічний) персонал	осіб		2
управлінський та обслуговуючий персонал	осіб		4
6. Загальний річний фонд заробітної плати	грн	-	2 162 7000
7. Середньомісячна заробітна плата одного працівника	грн	-	25891,6
8. Річний виробіток на одного працівника (продуктивність праці)	$\frac{\text{кг}}{\text{особу}} \left(\frac{\text{шт}}{\text{особу}} \right)$	8,0	909,09
9. Технологічна трудомісткість продукції (t)	$\frac{\text{нормо} - \text{годин}}{\text{т (шт)}}$	-	1276,8
10. Цехова собівартість одиниці продукції	$\frac{\text{грн}}{\text{т (шт)}}$	3500	2592,37
7. Період окупності ($P_{\text{ок}}$)	років	6	5,6

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті розроблено дослідно-промислову дільницю з виробництва сферичних порошків титанового сплаву Ti-6Al-4V (Grade 23) потужністю 10 тонн на рік. Основним технологічним рішенням обрано метод безтигельної індукційної газової атомізації на базі установки ALD EIGA-50, що виключає забруднення розплаву. З урахуванням виходу придатного продукту (85%), річна потреба у титанових прутках становить 11,76 тонн. Ефективний фонд часу роботи обладнання складає 2000 годин на рік.

Виробничий комплекс розміщено у будівлі площею 216 м² з технологічною висотою 7,2 м (об'єм 1555,2 м³). Штат підприємства оптимізовано до 10 працівників, що гарантує безперебійне обслуговування основного та допоміжного обладнання без роздування фонду оплати праці.

Економічний аналіз підтверджує високу рентабельність проєкту. Повна собівартість річної програми становить 25 356 368 грн. Собівартість 1 кг порошку складає 2535,64 грн (близько 57–60 євро), що є суттєво нижчим за ринкову ціну матеріалів для 3D-друку та робить виробництво інвестиційно привабливим.

У сфері охорони праці враховано найвищий ризик – пожежовибухонебезпеку дрібнодисперсного титанового пилу ($\text{ГДК} \leq 10 \text{ мг/м}^3$). Впровадження захисної атмосфери аргону на всіх етапах, використання герметичних накопичувачів та мокрої аспірації повністю нівелює аварійні ризики та забезпечує відповідність умов праці чинним нормативам.

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ВИСНОВКИ		
Розроб.		Чечко Н.В.					
Перевір.		Солодкий Є.В.					
Реценз.							
Н. Контр.		Бірюкович Л.О.					
Затверд.		Богомол Ю. І.					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						76	2
					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-321		

CONCLUSIONS

The diploma project develops a pilot production facility for spherical titanium alloy powders Ti-6Al-4V (Grade 23) with a capacity of 10 tons per year. The primary technological solution chosen is the crucible-free induction gas atomization method based on the ALD EIGA-50 system, which eliminates melt contamination. Taking into account a usable product yield of 85%, the annual requirement for titanium rods is 11.76 tons. The effective operating time of the equipment is 2,000 hours per year.

The production complex is located in a building with an area of 216 m² and a technological height of 7.2 m (volume of 1,555.2 m³). The enterprise's staff is optimized to 10 employees, which guarantees the uninterrupted operation of the primary and auxiliary equipment without inflating the payroll.

The economic analysis confirms the high profitability of the project. The total cost of the annual production program is 25,356,368 UAH. The unit cost of 1 kg of powder is 2,535.64 UAH (approximately 57–60 euros), which is significantly lower than the market price of materials for 3D printing and makes the production highly attractive for investment.

In the field of occupational safety, the highest risk—the fire and explosion hazard of fine titanium dust ($MPC \leq 10 \text{ mg/m}^3$)—has been accounted for. The implementation of a protective argon atmosphere at all stages, the use of hermetic accumulators, and wet aspiration completely neutralize emergency risks and ensure that working conditions comply with current regulatory standards.

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Чечко Н.В.			CONCLUSIONS		
Перевір.		Солодкий Є.В.					
Реценз.							
Н. Контр.		Бірюкович Л.О.					
Затверд.		Богомол Ю. І.					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						77	2
					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-321		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Матеріалознавство адитивних технологій : підручник / А. І. Григор'єв. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. — 300
2. Інженерія поверхонь та захист від корозії : довідник / під ред. В. Ф. Петренка. — Київ : Техніка, 2025. — 410
3. Герман І. П. Виробництво порошків металів та сплавів : навч. посіб. / І. П. Герман. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. — 185 с.
4. Титан : властивості, одержання, застосування : довідник / за ред. Г. В. Самсонова. — Київ : Наукова думка, 2021. — 520 с.
5. Osprey® Ti-6Al-4V ELI (Grade 23) [Електронний ресурс] / Sandvik. — Режим доступу: <https://www.metalpowder.sandvik/en/products/metal-powder-alloys/titanium/osprey-ti-6al-4v-eli-grade-23/>
6. ALD Vacuum Technologies GmbH. EIGA — Electrode Induction Melting Gas Atomization for High-Purity Metal Powders : Technical Data Sheet. — 2025.
7. Офіційний сайт компанії ALD Vacuum Technologies [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.ald-vt.com>
8. Методичні вказівки до дипломного проектування для студентів спеціальності «Металургія» / уклад. А. В. Петренко [та ін.]. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. — 50 с
9. Будинки і споруди. Будинки адміністративного та побутового призначення : ДБН В.2.2-28:2010. — [Чинний від 2011-03-01].
10. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень : ДСН 3.3.6.042-99. — [Чинний від 1999-01-28].
11. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. — [Чинний від 1999-01-28].

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Салапан О. В.			ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ		
Перевір.		Бірюкович Л. О.					
Реценз.							
Н. Контр.		Троснікова І. Ю.					
Затверд.		Богомол Ю. І.					
					Літ.	Арк.	Аркушів
						78	3
					НТУУ«КПІ» Каф. ВТМ та ПМ Гр. ФН-з21		

12. ДСТУ EN 60204-1:2019. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. — 128 с
13. Система стандартів безпеки праці. Пожежна безпека. Загальні вимоги : ДСТУ 12.1.004-91. — [Чинний від 1992-07-01]
14. Васильєв В. М. Економіка металургійного підприємства : підручник / В. М. Васильєв. — Київ : Наукова думка, 2023. — 420 с.
15. Правила безпеки при виробництві та переробці титану : НПАОП 27.0-1.01-87. — [Чинний від 1987-01-01].
16. Froes F. H. Titanium Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications / F. H. Froes. — Elsevier, 2024. — 350 p.
17. ASTM F2924-14. Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion. — West Conshohocken : ASTM International, 2014. — 12 p.
18. Powder Metallurgy of Titanium Alloys / edited by F. H. Froes, M. Qian. — Butterworth-Heinemann, 2023. — 480 p.
19. ДСТУ 4484:2005. Прокат із чорних металів. Технічні умови. — Київ : Держспоживстандарт України, 2006. — 25 с.
20. Donaldson Torit. Industrial Air Filtration Systems for Metal Dusts : Catalog. — 2024.
21. Ларин М. О. Автоматизація технологічних процесів у металургії : підручник / М. О. Ларин. — Харків : НТУ «ХПІ», 2025. — 310 с.
22. ISO/ASTM 52911-2:2019. Additive manufacturing — Design — Part 2: Laser-based powder bed fusion of metals.
23. Сучасні методи аналізу дисперсності порошків : навч. посіб. / О. П. Шевченко [та ін.]. — Київ : Вища школа, 2023. — 210 с.
24. Економічне обґрунтування інвестиційних проектів у металургії :

навч. посіб. / під ред. Д. І. Соколова. — Львів : Львівська політехніка, 2024.
— 280 с.

25. Організація виробництва та управління підприємством : навч.
посіб. / В. В. Онищенко. — Київ : Кондор, 2025. — 390 с.

26. Gas Atomization of Metal Powders : Research and Industrial
Applications / J. H. Moore. — Academic Press, 2022. — 290 p.

					ФНз21.1119.4203.0003.01ПЗ	Арк.
						80
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
			<u>Документація</u>		
	A4	ФНз21.1119.4203.0003.02АС	Апаратурно-		
			технологічна схема		
			<u>Обладнання</u>		
1			Токарний верстат	1	
2			Ультразвукова ванна	1	
			знежирення заготовок		
3	A4	ФНз21.1119.4203.0002.02АС	Установка ALD EIGA-50	1	
4			Циклон-осаджувач	1	
5			Бункер-накопичувач		
			порошку	1	
6			Класифікатор		
			ультразвуковий	1	
7			Змішувач V-подібний		
			VH-50	1	
8			Вакуумний рукавичний		
			бокс GB-1200	1	
		ПІБ	Підпис	Дата	ФНз21.1119.4203.0003.02АС
Розробн.	Чечко Н.В..			Аркуш	Аркушів
Керівн.	Солодкий Є.В.			81	3
Консульт.				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ВТМ та ПМ ФН-з21	
Н/контр.	Бірюкович Л.О.				
Зав.каф.	Богомол Ю.І.				
				АПАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА	

№ з/п	Формат	Позначення			Найменування	Кількість листів	Примітка
					<u>Документація</u>		
	A4	ФНз21.1119.4203.0003.04ПД			План ділянки		
					<u>Обладнання</u>		
1					Токарний верстат	1	
2					Ультразвукова ванна		
					знежирення заготовок	1	
3	A4	ФНз21.1119.4203.0003.04ПД			Установка ALD EIGA-50	1	
4					Циклон-осаджувач	1	
5					Бункер-накопичувач		
					порошку	1	
6					Класифікатор		
					ультразвуковий	1	
7					Змішувач V-подібний	1	
8					Вакуумний рукавичний	1	
					бокс GB-1200		
					ФНз21.1119.4203.0003.04ПД		
		ПІБ	Підпис	Дата			
Розробн.	Чечко Н.В.				ПЛАН ДІЛЯНИЦІ	Аркуш	Аркушів
Керівн.	Солодкий Є.В.					82	3
Консульт.						КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ВТМ та ПМ ФН-з21	
Н/контр.	Бірюкович Л.О.						
Зав.каф.	Богомол Ю.І.						

№ з/п	Формат	Позначення			Найменування	Кількість листів	Примітка
					<u>Документація:</u>		
	A4	ФНз21.1119.4203.0003.03СА			Установка		
					ALD EIGA-50		
					<u>Обладнання:</u>		
1					Подавач сировини	1	
2					Подаюча трубка та	1	
					втулка		
3					Плазмовий пальник	1	
4					Плавильна піч	1	
5					Зона розпилення	1	
6					Вихід для грубого	1	
					порошку		
7					Трубопровід для	1	
					дрібного порошку		
8					Труба міжкамерного	1	
					з'єднання		
9					Корпус циклону	1	
10					Вихід для дрібного		
					порошку	1	
11					Кінцевий резервуар	1	
					ФНз21.1119.4203.0003.03СА		
		ПІБ	Підпис	Дата			
Розробн.		Чечко Н.В.			УСТАНОВКА ALD EIGA-50	Аркуш	Аркушів
Керівн.		Солодкий Є.В.				83	3
Консульт.						КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. ВТМ та ПМ ФН-з21	
Н/контр.		Бірюкович Л.О.					
Зав.каф.		Богомол Ю.І.					