

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

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

**Кафедра фізичного матеріалознавства та термічної обробки**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Мирослав КАРПЕЦЬ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2022 р.

**Дипломна робота**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Металофізичні процеси та їх  
комп'ютерне моделювання»  
спеціальності 132 «Матеріалознавство»**

**на тему: «Вплив високочастотної поверхневої механічної обробки тертям на  
структуру та механічні властивості поверхні титанового сплаву ВТ6»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ФМ-п91

Глущенко Олександр Олександрович \_\_\_\_\_

Керівник:

доц. к.т.н. Бурмак Андрій Петрович \_\_\_\_\_

Консультант з розділу охорони праці:

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

Консультант з економічно-організаційного розділу

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

Консультант з нормоконтролю:

ас. Шаповалова Н. А. \_\_\_\_\_

Рецензент:

к.т.н., доц. каф. ВТМіПМ Биба Є.Г. \_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2022 року

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

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Мирослав КАРПЕЦЬ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломну роботу студенту**

**Глуценка Олександра Олександровича**

1. Тема роботи: «Вплив високочастотної поверхневої механічної обробки тертям на структуру та механічні властивості поверхні титанового сплаву ВТ6», керівник роботи Бурмак Андрій Петрович доц. к.т.н., затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_ 2022 р. №
2. Термін подання студентом роботи \_\_\_\_\_
3. Вихідні дані до роботи: аналіз літературних джерел та результати дослідження
4. Зміст роботи: літературний огляд, матеріали та методи дослідження, результати експерименту та їх обговорення, організаційно-економічна частина, охорона праці та економічна частина.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) : мікроструктура , зміна твердості.

6. Консультанти розділів роботи\*

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

7. Дата видачі завдання 02.05.2022 року

---

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Літературний огляд	02.05. – 16.05.2022р.	
2	Матеріал досліджень	16.05. – 24.05.2022р.	
3	Методика високочастотної поверхневої обробки	16.05. – 24.05.2022р.	
4	Методика вимірювання мікротвердості за Віккерсом	16.05. – 24.05.2022р.	
5	Методика оптичної мікроскопії	16.05. – 24.05.2022р.	
6	Рентгеноструктурний аналіз	16.05. – 24.05.2022р.	
7	Результати та їх обговорення	24.05. – 27.05.2022 р.	
8	Економічна частина	01.06. – 09.06.2022 р.	
9	Охоронна праці	09.06. – 18.06.2022 р.	
10	Висновок	18.06. – 21.06.2022 р.	

Студент

Олександр ГЛУЩЕНКО

Керівник роботи

Андрій БУРМАК

## РЕФЕРАТ

Звіт з практики 73 сторінок, 22 рисунка, 52 літературних джерел.

МІКРОСТРУКТУРА, МІКРОТВЕРДІСТЬ, ВИСОКОЧАСТОТНА  
ПОВЕРХНЕВА МЕХАНІЧНА ОБРОБКА (ВПМО) ТЕРТЯМ,  
РЕНТГЕНОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ, ТИТАНОВИЙ СПЛАВ ВТ6

**Об'єкт дослідження:** модифікований поверхневий шар титанового сплаву ВТ6 сформований високочастотною поверхневою механічною обробкою тертям.

**Предмет дослідження:** процеси структурно-фазових перетворень в поверхневому шарі титанового сплаву ВТ6 під час високочастотної поверхневої механічної обробки тертям.

**Мета роботи:** дослідити еволюцію мікротвердості та морфології поверхні титанового сплаву ВТ6 після високочастотної ударної обробки на спеціально виготовленому SMAT пристрої з використанням високотехнологічного цифрового ультразвукового обладнання.

**Методи дослідження:** вимірювання мікротвердості за методом Віккерса, оптична мікроскопія, рентгеноструктурний аналіз.

Результати досліджень та їх новизна – досліджено можливість формування зміцнених шарів в титановому сплаві ВТ6 за допомогою високочастотної поверхневої механічної обробки тертям високоміцних композиційних покриттів деформаційного походження високими механічними властивостями.

## ABSTRACT

Practice report 73 pages, 22 figures, 52 references.

MICROSTRUCTURE, MICROHARDNESS, SURFACE MECHANICAL FRICTION TREATMENT (SMAT), X-RAY STRUCTURE ANALYSIS, TITANIUM ALLOY Ti-6Al-4V

**Object of research:** modified surface layer of titanium alloy Ti-6Al-4V is formed by high-frequency surface friction machining.

**Subject of research:** processes of structural-phase transformations in the surface layer of titanium alloy Ti-6Al-4V during high-frequency surface mechanical friction treatment.

**Objective:** to investigate the evolution of microhardness and morphology of the surface of titanium alloy Ti-6Al-4V after high-frequency shock treatment on a specially manufactured SMAT device using high-tech digital ultrasonic equipment.

**Research methods:** measurement of microhardness by the Vickers method, optical microscopy, X-ray diffraction analysis.

Research results and their novelty - the possibility of forming reinforced layers in titanium alloy Ti-6Al-4V by high-frequency surface machining by friction of high-strength composite coatings of deformation origin with high mechanical properties was investigated.

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ .</b>	<b>8</b>
<b>ВСТУП</b> .....	<b>9</b>
<b>1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД</b> .....	<b>11</b>
1.1. Класифікація титанових сплавів .....	11
1.2. Вплив інтенсивної пластичної деформації на структуру і властивості титанових сплавів .....	13
1.3. Висновки до розділу 1 .....	18
<b>2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ</b> .....	<b>19</b>
2.1. Матеріал дослідження .....	19
2.2. Методика високочастотної поверхневої механічної обробки.....	19
2.3. Методика вимірювання мікротвердості за Віккерсом .....	20
2.4. Методика оптичної мікроскопії .....	26
2.5. Рентгеноструктурний аналіз. ....	30
2.6. Висновки до розділу 2 .....	34
<b>3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ</b> .....	<b>35</b>
3.1. Результати отримання мікротвердості сплаву .....	35
3.2. Результати отримання морфологічної поверхні сплаву .....	36
3.3. Результати отримання рентгеноструктурного аналізу сплаву	38
3.4. Висновки до розділу 3.....	41
<b>4 ОРГАНІЗАЦІЙНО – ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b> .....	<b>42</b>
4.1. Науково-технічна актуальність НДР .....	42
4.2. Розрахунок витрат на проведення НДР .....	43
4.2.1. Витрати на оплату праці .....	44
4.2.2. Єдиний соціальний внесок .....	45
4.2.3. Матеріали необхідні для проведення дослідження .....	46
4.2.4. Енергоносії для проведення досліджень .....	46
4.2.5. Витрати на спеціальне обладнання .....	47
4.2.6. Вартість послуг сторонніх організацій .....	47

4.2.7. Витрати на службові відрядження .....	47
4.2.8. Інші непрямі невраховані витрати .....	48
4.2.9. Накладні витрати .....	48
4.2.10. Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми .....	49
4.3. Науково-технічна ефективність НДР .....	49
4.4. Висновки до розділу 4 .....	53
<b>5 ОХОРОНА ПРАЦІ .....</b>	<b>54</b>
5.1. Аналіз параметрів приміщення .....	54
5.2. Мікrokлімат робочої зони .....	55
5.3. Аналіз освітлення в приміщенні лабораторії .....	57
5.3.1. Розрахунок характеристик природнього освітлення .....	57
5.3.2. Розрахунок параметрів штучного освітлення .....	58
5.4. Аналіз небезпечних чинників в приміщенні лабораторії .....	59
5.4.1. Аналіз шуму та вібрацій .....	50
5.4.2. Аналіз небезпек при роботі з приладом SMAT .....	50
5.4.3. Безпека при роботі з електричними приладами .....	51
5.4.4. Виробничі випромінювання .....	52
5.5. Організація робочого місця .....	52
5.6. Пожежна безпека .....	54
5.7. Висновки до розділу 5 .....	55
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>56</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>58</b>

**ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ**

ВПМО – високочастотна поверхнева механічна обробка

ЕСАР – стиснення під прямим кутом

ПД – інтенсивна пластична деформація

АДО – апертурна діафрагма

К – конденсор

О – оптична лінза

ОБ – об'єктив

ОК – окуляр

ОЦК – об'ємноцентрована кубічна ґратка

ПДО – польова діафрагма

С – освітлювач

Х – зразок



## ВСТУП

Одним з найбільш широко використовуваних конструкційних матеріалів є титан і титанові сплави [1, 2], які широко застосовуються в аерокосмічній [3], автомобільній [4], кораблебудівній [5, 6] та біомедичній інженерії [7, 8] завдяки своїм характеристикам, таким як, високе співвідношення міцності та ваги, високій міцності та корозійній стійкості, біологічній сумісності, відносно низькому модулю пружності [9]. Проте добре відомо, що титан і титанові сплави мають відносно низьку твердість і низькі показники тертя та зносу, що обмежує їх впровадження та застосування, особливо в місцях де активно відбувається зношування [10 – 12]. Наприклад, низький опір зношуванню титану та його сплавів зменшує термін служби біологічних імплантатів [13]. А втомне руйнування легко відбувається в умовах циклічного змінного навантаження, наприклад, під час роботи лопастей вентилятору авіаційних двигунів [14]. В основному це було пов'язано з тим, що титан і його сплави мають відносно низьку міцність на зсув і коефіцієнт зміцнення. Крихка поверхня легко деформується та розшаровується в умовах зсувної деформації [11, 15]. Крім того, титан та його сплави мають високу пластичність і хімічну активність, що може призвести до серйозних руйнувань на поверхні матеріалу за рахунок адгезійного формування хімічних сполук [16].

Тому підвищення трибологічних та механічних характеристик титану та його сплавів за допомогою різних методів модифікації поверхні є актуальним питанням сучасного матеріалознавства та машинобудування. При цьому значний інтерес представляють нові технології обробки металевих поверхонь, засновані на створенні нанокристалічної структури в поверхневих шарах [11]. Оскільки наноструктуровані матеріали створюються шляхом інтенсивної пластичної деформації (ПД), розміри зерен в таких матеріалах зменшуються в напрямку від об'єму кристала і до поверхні [16, 17]. Такі матеріали мають велику кількість приповерхневих дефектів,

утворених внаслідок ПД. Існує цілий ряд методів модифікації поверхні конструкційних матеріалів, такі як: механічна обробка тертям, кручення під високим тиском, стиснення під прямим кутом (ЕСАР), поверхнева механічна обробка тертям (SMAT) [16 - 22], ультразвукова ударна обробка [16, 17].

Найбільш високими технологічними можливостями володіють методи ПД, які засновані на використанні ультразвукових коливань [10].

## 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Класифікація титанових сплавів

Титан – це метал сріблясто білого кольору, його сплави з успіхом використовуються в металургії, хімічній, нафтохімічній і целюлозно-паперовій промисловості. Доцільність використання титану в цих областях промисловості обумовлена його надзвичайних характеристик.

Титан – є IV елементом періодичної системи Д. І. Менделєєва, має досить високу температуру плавлення  $-1668\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Пластичний (чистий Ti) –  $\psi = (70 - 80)\%$ , високоміцний –  $\sigma_B = (200 - 250)\text{ МПа}$ . Має високу в'язкість. При щільності  $4505\text{ г/см}^3$  займає місце між залізом та алюмінієм. Зі своїх характеристик має високу корозійну стійкість, за рахунок утворення на поверхні щільної оксидної плівки [18, 19].

Титанові сплави можливо розділити на три великі групи:

1) конструкційні і високоміцні титанові сплави – тверді розчини, що дозволяє їм забезпечувати оптимальне співвідношення характеристик міцності і пластичності;

2) жароміцні титанові сплави – тверді розчини з великою кількістю хімічної сполуки, що забезпечує їм підвищену жароміцність при мінімальному зниженні пластичності;

3) титанові сплави на основі хімічної сполуки – представляють як жароміцний матеріал з низькою щільністю, здатний конкурувати з жароміцними Ni сплавами в певному температурному інтервалі.

С.Г. Глазунов і В.І. Моїсєєв класифікують [20, 21] їх за різними ознаками. Найбільш поширена класифікація сплавів по фазовому складі у відпаленому стані. Вона включає:

- $\alpha$ -сплави, структура яких представлена  $\alpha$ -фазою;
- псевдо- $\alpha$ -сплави, структура яких представлена  $\alpha$ -фазою і невеликою кількістю  $\beta$ -фази або інтерметалідів (не більше 5 %);

- ( $\alpha + \beta$ )-сплави, структура яких представлена  $\alpha$ - і  $\beta$ -фазами;
- сплави цього типу також можуть містити невелику кількість інтерметалідів;
- псевдо-  $\beta$ -Ті сплави (структура – невелика кількість  $\alpha$ -фази +  $\beta$ -фаза);
- $\beta$ -сплави, структура яких представлена термодинамічно стабільною  $\beta$ -фазою;
- сплави на основі інтерметалідів.

В.А. Ліванов і Б.А Колачев [22, 23] запропонували класифікацію титанових сплавів за структурою в загартованому стані. Ця класифікація включає в себе:

- сплави мартенситного класу, структура яких після гартування з температур вище А, представлена мартенситом  $\alpha'$  або  $\alpha''$ ;
- сплави перехідного класу, структура яких після гарту з температур вище Л представлена мартенситом  $\alpha'$  ( $\alpha''$ ) і  $\beta$ -фазою;
- $\beta$ -сплави, структура яких після гарту представлена  $\beta$ -фазою.

Титанові  $\alpha$ -сплави термічно не зміцнюється; єдиний вид їх термічної обробки – це зняття нагартовки шляхом повного або неповного відпалу для зняття залишкових напружень. З  $\alpha$ -сплавів найбільш широко застосовують. Ті–6Al–4V (хімічний склад наведений в табл. 1.1). Його виробляють практично у всіх країнах світу. Цей сплав з зниженим вмістом домішок впровадження мало схильний до хладноломкості і його застосовують до температури рідкого водню [15].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад сплаву Ті–6Al–4V [23]

Елемент	Ti	Al	Sn	Fe	O	C	N	H	інші
Вміст, ат.%	90-94	4-6	2-3	$\leq 0.5$	$\leq 0.2$	$\leq 0.1$	$\leq 0.03$	$\leq 0.015$	$\leq 0.35$

Псевдо- $\alpha$ -сплави можливо поділити на дві групи: а) маломіцні високотехнологічні; б) високожароміцні супер  $\alpha$ -сплави.

Сплави першої групи добре зварюються всіма видами зварювання, тому що в складі містять невелику кількість алюмінію і малі концентрації  $\beta$ -стабілізаторів, що дозволяє зберегти при обробці тиском високу технологічність, близьку до технологічності чистого титану. Псевдо  $\alpha$ -сплави термічно не зміцнюється, їх застосовують в промисловості у відпаленому стані.

Основними недоліками високотехнологічних мало легованих псевдо  $\alpha$ -сплавів є велика схильність до водневої крихкості та невисока міцність.

## **1.2 Вплив інтенсивної пластичної деформації на структуру і властивості титанових сплавів**

На сьогодні існує цілий ряд методів модифікації поверхні конструкційних матеріалів, такі як: механічна обробка тертям, кручення під високим тиском, стиснення під прямим кутом (ЕСАР), поверхнева механічна обробка тертям (SMAT) [24 – 26], ультразвукова ударна обробка [24, 25].

Найбільш високими технологічними можливостями володіють методи ПД, які засновані на використанні ультразвукових коливань [19]. Зазначимо кілька вдалих прикладів модифікації поверхні комерційно чистого титану та титанових сплавів.

Так, в роботі [27] було розглянута техніка ультразвукової модифікації поверхні нанокристалів на титанах та титанових сплавах для покращення їх трибіологічної та інших властивостей. Піддававши титан та його сплави техніці UNSM, утворювалися на поверхні шари сильної пластичної деформації та уточнювався розмір зерен. При цьому твердість поверхні та залишкова напруга були значно покращені, з чого покращилися втомні та інші властивості матеріалу.

Техніка UNSM безперечно є найпопулярнішою але основним недоліком є те, що неможливо контролювати шорсткість поверхні матеріалу.

Шорсткість поверхні - значно впливає на якість матеріалу. Шорсткість поверхні для титану та його сплаву після обробки може мати дві умови:

- шорсткість збільшується;
- шорсткість зменшується.

Зазвичай коли шорсткість поверхні збільшується це вигідно для матеріалу, тому що у разі його поганого стану можливо буде провести обробку (полірування) для досягнення кращої шорсткості.

Після обробки UNSM на матеріалі будуть спричинені пластикові пошкодження та втрати, що призведе до гальванічної корозії та втрата втоми, що ускладнює істотне поліпшення поверхневих характеристик матеріалу. Для усунення недоліків, які приносять техніка UNSM можливо ввести електричний імпульсну технологію. Але не кожену технологію можливо застосовувати до всіх ситуацій, тому необхідно вибрати відповідний процес обробки відповідно до ситуації, а не сліпо вибирати кілька процесів для модифікації поверхні матеріалу.

В роботі [28] матеріал, що досліджувався на вплив поверхневої нанокристалізації на корозійну поведінку був титановий сплав Ti-6Al-4V.

В даній роботі використовували метод обробки поверхні механічним стиранням (SMAT), заснований на вібрації і переміщенні сферичної дробини за допомогою ультразвукового генератора енергії.

У цьому експерименті SMAT проводили на повітрі з частотою вібрації 20 кГц з використанням кульок 100 Cr<sub>6</sub>. Для обробки сплаву Ti-6Al-4V використовуються дві умови SMAT:

SMAT1:  $\tau = 15$  хв. Діаметр кульок  $d = 2$  мм.

SMAT2:  $\tau = 20$  хв. Діаметр кульок  $d = 3$  мм.

Випробування мікротвердості були проведені до та після обробки SMAT для достовірної інформації щодо впливу SMAT на механічні властивості поверхні.

На рис. 1.1 показана зміна твердості поверхні після навантаження SMAT. Порівнявши отримані результати, можна побачити, що зразки, оброблені SMAT, мають максимальну твердість у порівнянні з необробленим зразком. З отриманих даних ми дійсно можемо сказати, що зразок (SMAT2) має максимальну твердість порівняно з необробленим зразком. Обумовлюється це тим, що після обробки на поверхні сплаву утворюється нанокристалічний шар.

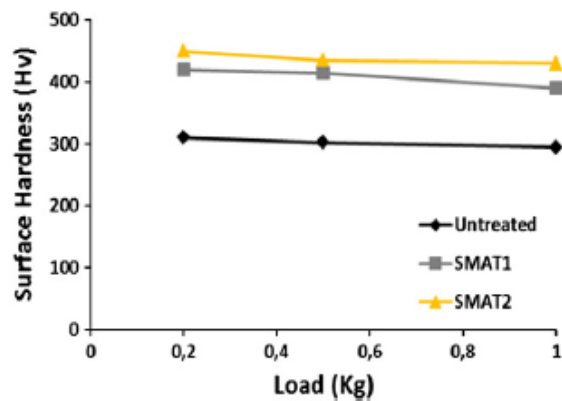
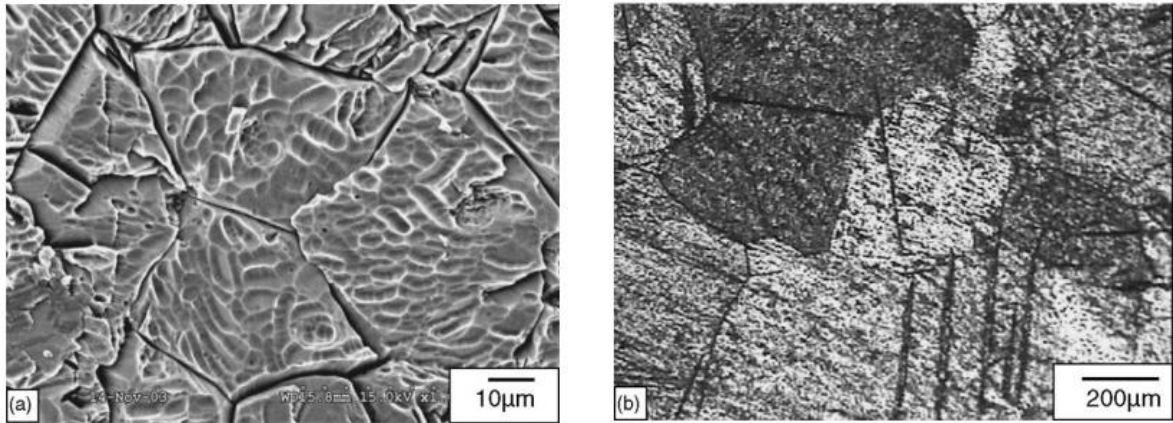


Рисунок 1.1 – Зміна твердості сплаву Ti–6Al–4V при різних прикладених навантаженнях [28]

Ці результати добре узгоджуються з результатами, отриманими в літературі [29, 30].

В роботі [31] досліджували як змінюється твердість  $\alpha$  та  $\beta$  – чистого титану з різними розмірами зерен. Взявши два бруска чистого Ti невеликих розмірів, піддали термічній обробці. В результаті нагрівання бруска у повітряній печі до 750 °C протягом від 1 години до 240 годин, а потім гасіння на водяній бані 25 °C, отримали такі результати (рис. 1.2).

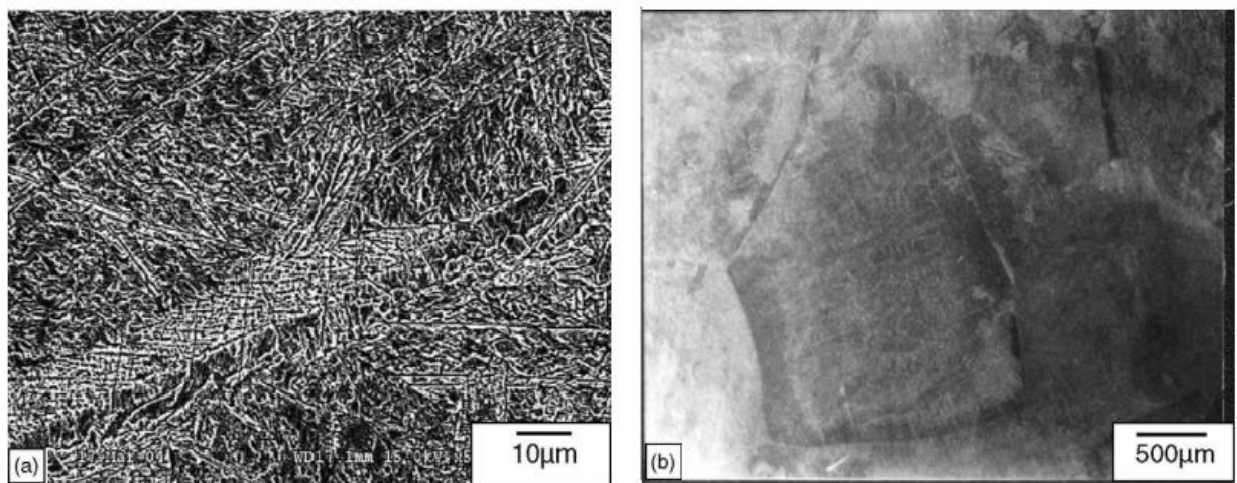


а

б

Рисунок 1.2 – Мікрофотографії  $\alpha$ -Ті для зразків, термічно оброблених при 750 °С протягом 1 год (а), і 240 год (б), (травлений зразок) [31]

Аналогічно отримали зразки з різними розмірами зерен  $\beta$ -Ті, нагріваючи брусок до 1000 °С протягом (1 – 240) год і гартували у воді. Отримані результати наведені на рисунку 1.3.



а

б

Рисунок 1.3 – Мікрофотографії  $\beta$ -Ті для зразків, термічно оброблених при 1000 °С протягом 1 год (а), 240 год (б) [31]

Твердість в  $\alpha$  – і  $\beta$  – Ті після різного часу нагрівання представлено на рисунку 1.4. Добре бачимо, що зразок  $\alpha$  – Ті зменшується спочатку швидко, потім зі збільшенням часу нагрівання при 750 °С. З отриманих результатів



твердості та розміру зерен (рис. 1.4 і 1.5), можливо побачити, що зразок  $\alpha$  – Ti з більшим розміром зерна має низьку твердість порівняно з малим розміром зерна. Цей висновок підтверджується з відомим посиланням механізму через уточнення зерна [33, 34].

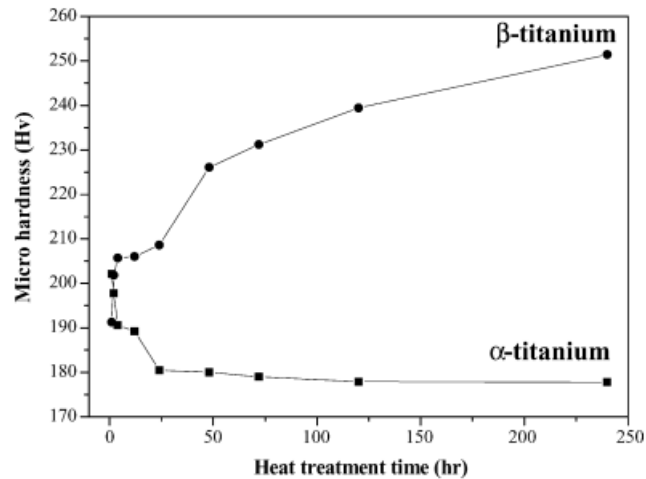


Рисунок 1.4 – Зміна мікротвердості зразків  $\alpha$ -Ti і  $\beta$ -Ti після нагрівання при 750 °C і 1000 °C протягом різного часу після загартування [31]

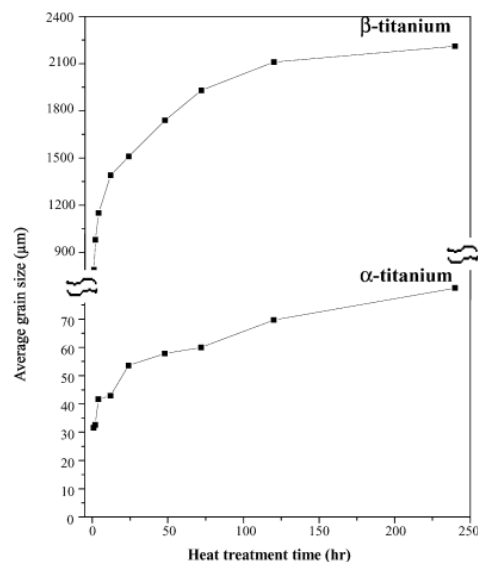


Рисунок 1.5 – Розміри зерен  $\alpha$ -Ti і  $\beta$ -Ti зразків після термічної обробки при 750 °C і 1000 °C протягом різного часу, потім гартування [31]

На відміну від  $\alpha - \text{Ti}$ , твердість  $\beta - \text{Ti}$  збільшується зі збільшенням часу нагрівання. Навіть коли у зразка  $\beta - \text{Ti}$  зерна більше, твердість зразка набагато вище, ніж у  $\alpha - \text{Ti}$ .

### **1.3 Висновки до розділу 1**

За результатами аналізу літературних джерел, в яких розглянуто вплив інтенсивної пластичної деформації на механічні характеристики та структуру титану та сплавів на його основі можна зробити наступні висновки:

1. Методи інтенсивної пластичної деформації дозволяють впливати на структуру, підвищення ресурсу, механічні та фізико-хімічні властивості титанових сплавів.

2. Твердість в  $\alpha - \text{Ti}$  збільшується за рахунок подрібнення зерен,  $\beta - \text{Ti}$  - за рахунок утворення мартенситу в подовжених планкових конструкціях.

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Матеріал дослідження

В якості матеріалу для дослідження обрано зразки титанового сплаву ВТ6 (система Ti–6Al–4V). Для досліджень використовувались зразки у вигляді пластин діаметром 20 мм і товщиною 3 мм ( $\pm 0,5$  мм), одержані різанням прутків перпендикулярно напрямку прокатки. Перед обробкою зразки відпалювались у вакуумі ( $P = 10^{-3}$  Па) за температури 700 °С впродовж 2 годин і охолоджувались разом з піччю. У вихідному стані титановий сплав ВТ6 складається із  $\alpha$  (ГЦП)-фази та  $\beta$  (ОЦК)-фази.

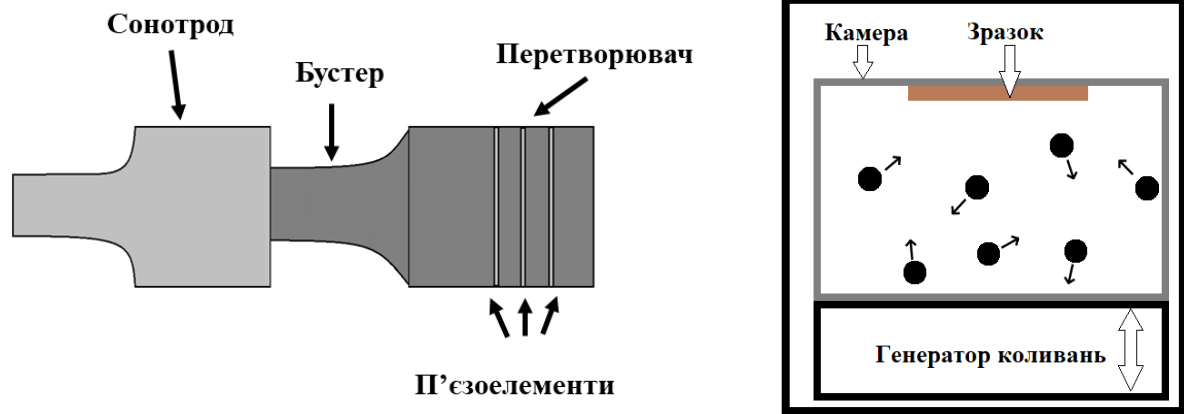
### 2.2 Методика високочастотної поверхневої механічної обробки

Оброблення зразків проводилась на повітрі за допомогою виготовленого SMAT пристрою, який дозволяє проводити високочастотну ударну обробку поверхні кульками з нержавіючої сталі діаметром 2 мм [24]. Цей пристрій складається з цифрового електронного генератора [25], ультразвукової коливальної системи (рис. 2.1, а) та камери для обробки зразків (рис. 2.1, б).

Амплітуда ультразвукових механічних коливань складала  $A = 50$  мкм, тривалість обробки – від 30 с до 120 с.

До складу ультразвукової коливальної системи входять: ультразвуковий п'єзокерамічний перетворювач, трансформатор коливальної швидкості (бустер) і концентратор (сонотрод).

Перетворювач конвертує високочастотну електричну енергію в потужні ультразвукові механічні коливання, з високим коефіцієнтом ефективності, які через бустер трансформуються сонотроду. Підсилені та концентровані ультразвукові коливання, з частотою близько 20 кГц, передаються металевим кулькам і призводять їх до хаотичного руху в обмеженому обсязі повітряного середовища дослідної камери. За рахунок енергії удару кульок між поверхням сонотроду та зразком відбувається інтенсивна пластична



а – ультразвукової коливальної система      б - камери обробки зразків

Рисунок 2.1 – Схематичне зображення SMAT пристрою [26]

деформація поверхневого шару останнього, що призводить до зміни його фізичних властивостей та наведено залишкові напруги стискання [24, 25].

Для зниження дисипативних втрат під час вібрацій та високої міцності робочої поверхні сонотрод пристрою виготовлено з титану VT22.

Електронний генератор, з повністю цифровим керуванням, здійснює живлення п'єзокерамічного перетворювача. В схемі генератора використано сучасні мікропроцесорні технології: DDS - синтез частоти, цифрове фазове автопідстроювання резонансного режиму з автоматичним налаштуванням під конкретну акустичну систему. Генератор має можливість регулювання та стабілізацію амплітуди ультразвукових механічних коливань в межах від 5 % до 100 % та встановлення часу роботи за допомогою цифрового таймера від 0,01сек до 30,0 хв. Напруга живлення генератора – 220 В, а вихідна потужність – до 2000 Вт [26].

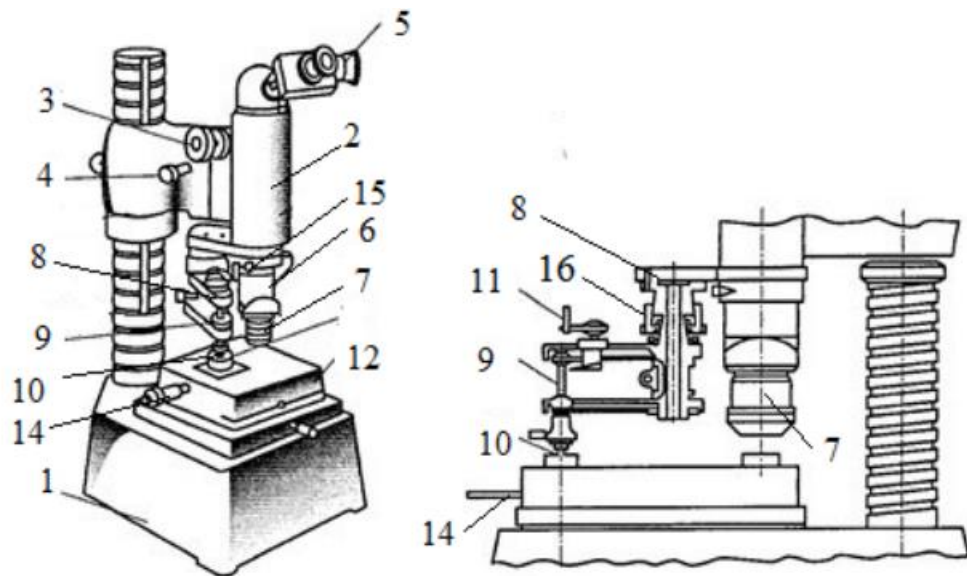
### 2.3 Методика вимірювання мікротвердості за Віккерсом

Вимірювання мікротвердості проводилось на приладі ПМТ-3 за методом Віккерса на поверхні зразків при навантаженні 100 г. Індентор даного приладу – алмазна пірамідка.

Розглянемо принципову схему мікротвердоміру ПМТ-3 (рис.2.2).

Прилад складається з основи зі штативом **1**, на якому закріплений мікроскоп з тубусом **2**, що переміщується вгору і вниз за допомогою макрометричного гвинта **3** і мікрометричного гвинта **4**. Ціна поділки барабанчика мікрогвинта дорівнює 0,002 мм. На верхній кінець тубуса надітий окулярний мікрометр **5**. Окуляр МОВ–1-15 збільшує в 15 разів.

Вся оптична система мікроскопу з освітлювачем **6** та об'єктивом **7** монтується в нижній частині тубуса. Освітлювачем є лампочка напругою 6 В, що живиться від електромережі через трансформатор. Для проглядання мікрошліфа прилад забезпечили двома об'єктивами для збільшення в 478 і 135 разів. З тубусом мікроскопу з'єднаний навантажувальний блок **8**.



- 1 – основа зі штативом; 2 – тубус; 3 – макрометричний гвинт;  
 4 – мікрометричний гвинт; 5 – окулярний мікрометр; 6 – освітлювач;  
 7 – об'єktiv; 8 – навантажувальний блок; 9 – стрижень для навантажувачів;  
 10 – інденитор; 11 – ручка навантаження; 12 – предметний столик;  
 13 – регулювальні гвинти; 14 – ручка повороту предметного столика;  
 15 – центрувальні гвинти; 16 – тарувальний пристрій

Рисунок 2.2 – Принципова схема приладу ПМТ-3 для вимірювання мікротвердості [32]

В ньому є стрижень для розміщення навантажувачів **9**, внизу якого закріплений тримач з індентором **10**. Робоче навантаження створюється навантажувачами, які по одному, або одразу декілька можна одягати на навантажувальний стрижень. Піднімання та опускання навантаженого індентора виконується за допомогою ручки **11**. Навантаження здійснюється протягом (15-30) с, а потім плавно знімається.

Зразок який досліджується розміщується на столику **12**, закріплений двома гвинтами **13** дозволяючи переміщувати в двох перпендикулярних напрямках, для забезпечення пересуви мікрошліфа і вибрати на ньому ділянку на якій необхідно виміряти мікротвердість. Дану ділянку необхідно розмістити в середині поля зору мікроскопа – точно у вершині кута нерухомої сітки окуляра.

За допомогою ручки **14** столик зі зразком можна повертати таким чином, щоб зразок потрапив під індентор, чи під окуляр мікроскопу. Важливо перед поворотом столика, необхідно обов'язково перевірити, що індентор піднятий для запобігання поломки. За допомогою центрувальних гвинтів **15** в процесі юстування можливо правильно розташувати мікроскоп по відношенню до навантажуючого пристрою.

Переваги методики:

- можна визначити твердість окремих структурних складових матеріалу або тонких прошарків;
- геометрична подібність відбитків індентора при будь-яких навантаженнях;
- можливість співставлення результатів з отриманими за іншими методиками;
- висока точність.

Недоліки методики:

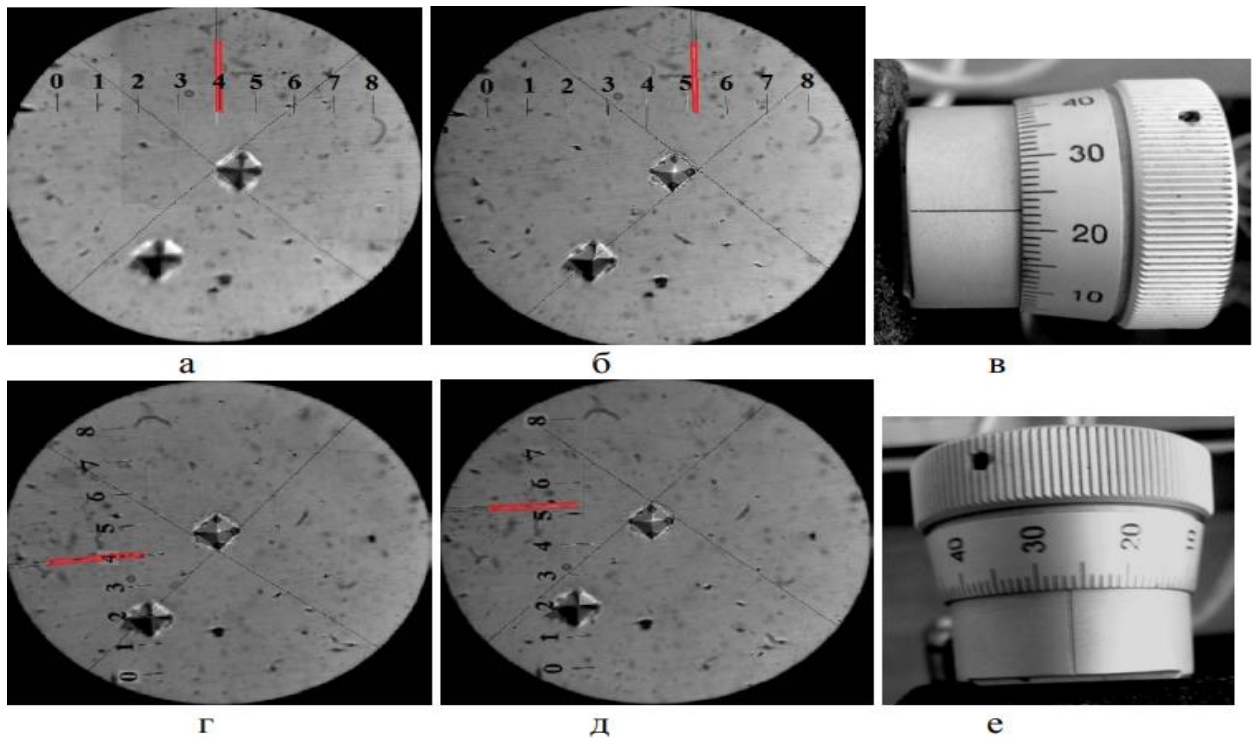
- високі вимоги до стану поверхні;
- необхідність проведення великої кількості вимірів для усереднення результатів;

- тривалий загальний час проведення досліджень;
- вплив зовнішніх вібрацій;
- можлива зміна будови приповерхневого шару при підготовці до вимірювань.

Для розрахунку мікротвердості спочатку обертають регульовальні гвинти **13** підводячи відбиток до косинця нерухомої сітки так, щоб вершина косинця співпала з лівим кутом відбитка, а пунктирні лінії співпали з гранями лівої частини відбитка (рис. 2.3, а). Після цього обертанням мікрометричного барабанчика окуляра «на себе» підводять вершину косинця рухомої сітки до протилежного кута відбитка. Тоді пунктирні лінії косинця рухомої сітки поєднуються з гранями правої частини відбитка (рис. 2.3, б). При такому положенні шкали окуляр-мікрометра вказують довжину діагоналі відбитка. Відлік кількості повних поворотів барабанчика проводиться по цифрах, які видно в полі зору, а долей – по показанням барабанчику окулярного мікрометра (рис. 2.4, в).

Для визначення ціни поділки шкали барабанчика необхідно знати збільшення об'єктиву. Його можна дізнатися, знаючи фокусну відстань, позначену на об'єктиві та використав дані табл. 2.2.

Також збільшення можна знайти користуючись об'єкт-мікрометром. Для цього обирають два штриха об'єкт-мікрометра, що лежать на деякій відстані один від одного в центральній частині шкали. Сумістив перехрестя з першим з них, а потім з другим, знаходять різницю між показаннями барабанчика.



а – в – вимірювання горизонтальної діагоналі, розмір якої становить 123 поділки шкали барабанчика, г – е – вимірювання вертикальної діагоналі, розмір якої становить 126 поділок шкали барабанчика

Рисунок 2.3 – Методика вимірювання діагоналі відбитка індентора [33]

Таблиця 2.2 – Характеристики окулярів для візуального спостереження [33]

Тип	Збільшення	Фокусна відстань, мм	Лінійне поле зору, мм
Гюйгенса	10х	25	14
Гюйгенса з перехрестям	10х	25	14
Ортоскопічний	12,5х	20	16
Компенсаційний	15х	16,6	11
Компенсаційний	25х	12,6	9

Оскільки ціна поділки об'єкт-мікрометра та окуляра однакова - 0,01 мм, а барабанчик має 100 поділок, то лінійне збільшення об'єктива визначається за формулою:



$$U_{об} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (2.1)$$

де  $n_1$  – кількість поділок барабанчика,

$n_2$  – кількість поділок шкали об'єкт мікрометра.

Ціна поділки барабана гвинтового окуляр-мікрометра  $E$  визначається за наступною формулою:

$$E = \frac{T \cdot Z}{A}, \quad (2.2)$$

де  $T$  – число поділок об'єкт-мікрометра,

$Z$  – ціна поділки об'єкт-мікрометра,

$A$  – різниця відліку окулярного мікрометра.

Значення мікротвердості  $Hv$  розраховувалось за формулою:

$$Hv = \frac{1,854P}{C^2}, \text{ ГПа}, \quad (2.3)$$

де  $P$  – навантаження в грамах,

$C$  – діагональ відбитку.

За значеннями величини мікротвердості  $Hv$  з урахуванням табличного значення коефіцієнту Пуассона ( $\nu=0,35$ ) та експериментально визначеного модулю Юнга ( $E$ ) розраховано межу текучості  $\sigma_{0.2}$  (2.4) [34], характеристику пластичності  $\delta_H$  (2.5) [35] та межу міцності  $\sigma_S$  (2.6) [36]:

$$0,33Hv \approx \sigma_{0,2}, \quad (2.4)$$

$$\delta_H = 1 - 14,3(1 - \nu - 2\nu^2) HV/E, \quad (2.5)$$

$$\sigma_S = HV / (0,28 + 0,6 \ln[3E / (4 + \nu)\sigma_{0,2}]). \quad (2.6)$$

## 2.4 Методика оптичної мікроскопії

Металографічний мікроскоп застосовується для вивчення внутрішньої будови об'єкта у відбитому світлі. Це основний прилад для виконання мікроструктурного аналізу матеріалів. В залежності від складності мікроскопу в ньому може бути реалізовано один або одразу декілька дослідження об'єкту. Найчастіше в металографічних мікроскопах застосовують світле поле, темне поле, поляризоване світло.

За конструкцією металографічні мікроскопи діляться на два види:

- прямі мікроскопи;
- інвертовані мікроскопи.

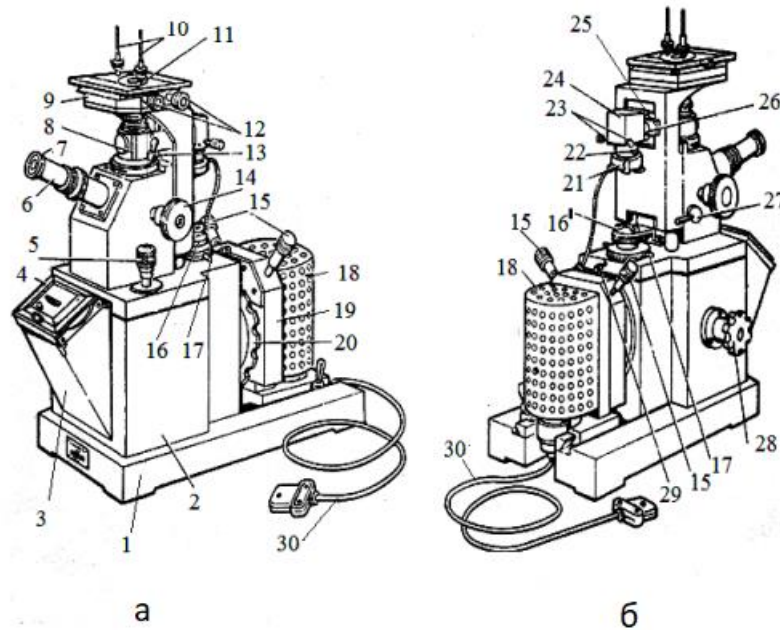
Дослідження морфології поверхні проведено на інвертованому оптичному мікроскопі МИМ-7 при збільшенні ( $\times 200$  –  $\times 500$ ) крат.

На рис. 2.4 наведено загальний вигляд мікроскопа МИМ-7, та позначені елементи їх конструкції. Будь-який металографічний мікроскоп складається з трьох систем: 1) механічної, 2) освітлювальної, 3) оптичної.

До механічної частини належать основа, корпус, тубус, револьверна головка для швидкої зміни об'єктивів, макрометричний та мікрометричний гвинти, предметний столик з фіксаторами для зразків.

В освітлювальну систему мікроскопа включають джерело світла, серію лінз, світлофільтрів і діафрагм. Джерелом світла є електрична лампа (17 В), що включається в мережу через понижувальний трансформатор.

До оптичної системи входять об'єктив, окуляр та ряд допоміжних оптичних елементів: дзеркала, призми, тощо.

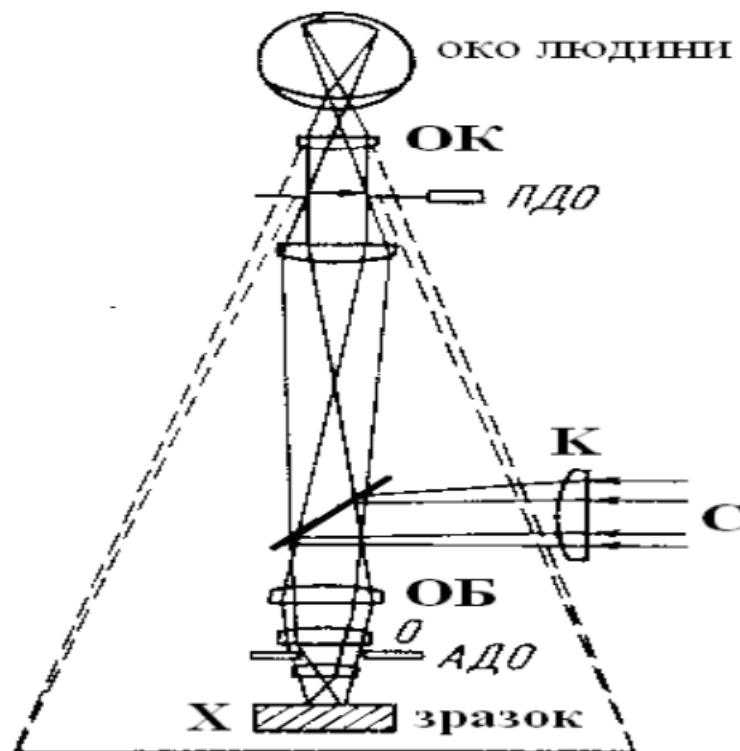


а – фронтальна сторона, б – зі сторони освітлювача

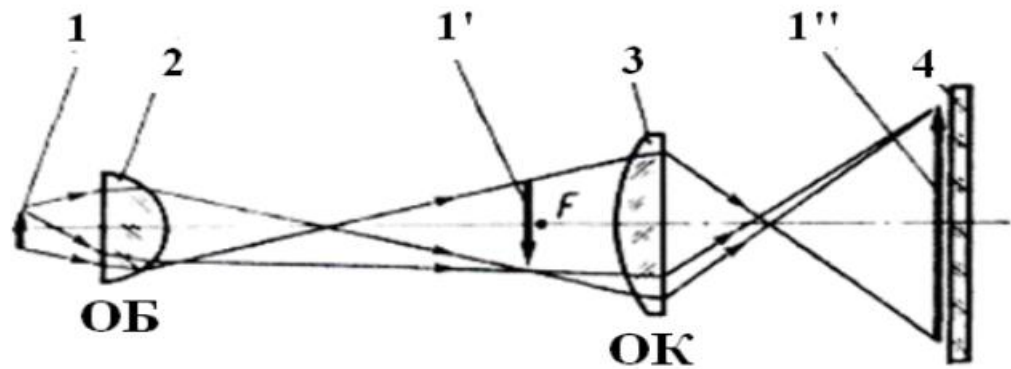
1 – основа, 2 – корпус, 3 – фотокамера, 4 – рамка з матовим склом,  
 5 – мікрометричний гвинт, 6 – візуальний тубус, 7 – окуляр,  
 8 – ілюмінаторний тубус, зверху якого розташовують об'єктив,  
 9 – предметний столик, 10 – тримачі зразка, 11 – змінні підкладки під зразки з  
 отворами різного діаметру, 12 – гвинти переміщення предметного столика,  
 13 – рукоятка вмикання діафрагми темного поля, 14 – макрометричний гвинт,  
 15 – центрувальні гвинти освітлювача, 16 – апертурна діафрагма, 16' – кільце  
 для зміни розміру апертурної діафрагми, 17 – гвинт для зсуву апертурної  
 діафрагми при створенні косоного освітлення, 18 – освітлювач в кожусі,  
 19 – тримач ліхтаря освітлювача, 20 – ручка світофільтрів, 21 – фотозатвор,  
 22 – польова діафрагма, діаметр якої змінюють за допомогою повороту  
 повідка, 23 – центрувальні гвинти польової діафрагми, 24 – кожух з  
 пентапризмою, 25 – лінза темного поля, 26 – рамка с лінзою для роботи в  
 світлому й темному полі, 27 – стопорний пристрій для макрогвинта,  
 28 – рукоятка для повороту барабану з трьома фото окулярами, 29 – гвинт  
 для фіксації повороту апертурної діафрагми, 30 – шнур електропостачання

Рисунок 2.4 – Загальний вигляд металографічного мікроскопу МІМ-7 [33]

На рис. 2.5 наведено схему формування зображення структури зразка (X) в оптичному мікроскопі. Основними елементами мікроскопу є об'єктив (ОБ) й окуляр (ОК), які є складною системою лінз, освітлювач (С) та конденсор (К). Об'єкт, що досліджується розміщується перед об'єктивом на відстані від однієї до двох фокусних відстаней об'єктива  $f_{об}$ , а світло від джерела падає на зразок вертикально. Відбиті від поверхні зразка промені потрапляють в об'єктив й далі в окуляр. Об'єктив формує дійсне перевернуте та збільшене зображення 1' (див. рис.2.6).



ОК – окуляр, ПДО – польова діафрагма, К – конденсор, С – освітлювач,  
 ОБ – об'єктив, О – оптична лінза, АДО – апертурна діафрагма, X – зразок  
 Рисунок 2.5 – Принципова оптична схема металографічного мікроскопу [33]



1- об'єкт, 1' – зображення, яке формує об'єктив, 1'' – зображення, яке формує окуляр, 2 – об'єктив (ОБ), 3 – окуляр (ОК), 4 – екран, F – передній фокус окуляра

Рисунок 2.6 – Принципова схема формування зображення в оптичному мікроскопі при фотографуванні [33]

При візуальному спостереженні об'єкту 1 мікроскоп настроюють так, щоб 1' знаходилося безпосередньо за переднім фокусом окуляра F. В цьому випадку окуляр працює як лупа та формує уявне перевернуте та збільшене зображення. Проходячи крізь око людини, промені від нього створюють на сітківці ока дійсне зображення. Зазвичай зображення, сформоване окуляром, розташовують на відстані найкращого бачення ока (~ 250 мм).

Якщо зсунути окуляр, щоб 1' опинився перед переднім фокусом окуляра F, то тоді окуляр буде працювати як проекційна система та сформує дійсне пряме та збільшене зображення. Його й спостерігає дослідник на екрані 4. Загальне збільшення об'єкту, що досягається в металографічному мікроскопі дорівнює добутку збільшення об'єктиву на збільшення окуляру. Для створення зображення високої якості застосовують спеціальні діафрагми, що обмежують світлові промені (див. рис. 2.6), – апертурну (АДО) та польову (ПДО).

## 2.5 Рентгеноструктурний аналіз

В основу рентгеноструктурного аналізу покладено явище дифракції рентгенівських променів на кристалічній ґратці відкрите в 1912 р. М. Лауе і його колегами В. Фрідріхом та П. Кніппінгом у вигляді так званого інтерференційного рівняння Лауе, яке у векторній формі має вид:

$$(S-S_0)/\lambda=H, \quad (2.7)$$

де  $S_0$  – одиничний вектор падаючого променя;

$S$  – одиничний вектор променя, розсіяного в напрямку інтерференції;

$\lambda$  – довжина хвилі;

$H$  – вектор, перпендикулярний до деякого сімейства площин  $(hkl)$  в оберненій ґратці кристалу, причому довжина його пов'язана з міжплощинною відстанню цього сімейства  $(d_{hkl})$  співвідношенням  $|H|=n/d_{hkl}$ , де  $n$  – ціле число (порядок відбиття).

За допомогою оберненої ґратки легко проаналізувати виникнення дифракційних піків у випадку монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda$ . Якщо  $S_0$  та  $S$  вектори падаючого та дифрагованого пучків в оберненому просторі, то сукупність кінців векторів оберненої ґратки, які становлять різницю ходу цих пучків, лежатиме на сфері радіусом  $\lambda^{-1}$ . Ця сфера називається сферою відбиття або сферою Евальда (рис. 2.7) [37].

Умовою виникнення дифракційного піка з індексами  $hkl$  є перетин сферою Евальда вектора  $H_{hkl}$  оберненої ґратки. Вектори  $S/\lambda$ ,  $S_0/\lambda$  і  $H$  утворюють векторний трикутник  $\Delta OSS_0$  (рис. 2.7), кут між векторами  $S$  і  $S_0$  називається кутом розсіювання  $(2\theta)$ . Виходячи з векторного рівняння (2.7), шляхом простого геометричного розгляду  $\Delta OSS_0$  можна отримати скалярне рівняння:

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

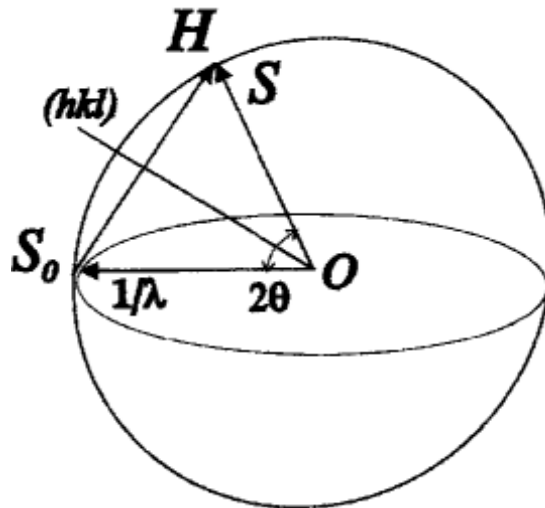


Рисунок 2.7 – Сфера Евальда радіусом  $\lambda^{-1}$  в оберненій ґратці [37]

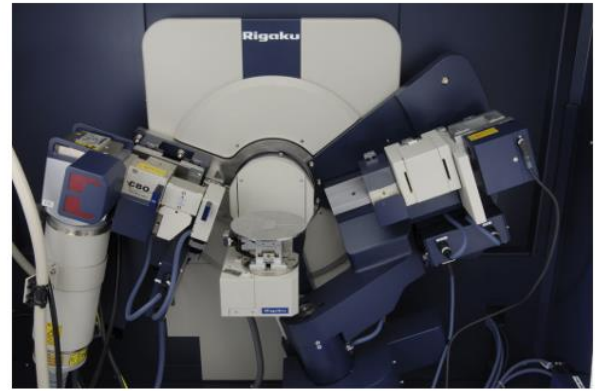
Виходячи з припущення, що рентгенівські промені можуть відбиватися від кристалографічних площин аналогічно відбиттю видимого світла від дзеркальних поверхонь з виконанням законів геометричної оптики, російський вчений Вульф і, незалежно від нього, англійці батько і син Брегг вивели це скалярне рівняння в 1913 році, яке одержало назву рівняння Вульфа-Брегга.

На основі цього рівняння базується принцип роботи всіх, дифрактометрів, в тому числі, і Ultima IV (рис. 2.8).

Перелік основних технічних характеристик дифрактометра Ultima IV та стандартних програм і їх функціональних можливостей приведено в табл. 2.3. та табл. 2.4.



а



б

Рисунок 2.8 – Дифрактометр Ultima IV (а) та його гоніометр (б)  
(радіус 285 мм) [39]

Таблиця 2.3 – Основні технічні характеристики дифрактометра  
Ultima IV [39]

Геометрія гоніометра	Вертикальна $\theta/\theta$ (зразок знаходиться нерухомо в горизонтальному положенні)
Геометрія зйомки	ВВ – Брегга-Брентано, РВ-паралельнопучкова
Осі сканування	$\theta_D$ , $\theta_S$ , $T_s$ , (висота трубки), $Z_s$ (висота щілини DS)
Метод сканування	$\theta_D/\theta_S$ – незалежне або узгоджене
Діапазон сканування	$\theta_D/\theta_S$ пов'язані – $(3 - 162)^\circ$
Радіус	285 мм
Рентгенівський генератор	Максимальна потужність 3 кВт
Рентгенівська трубка: Cu/Co анод	Нормальний фокус $1.0 \times 10 \text{ мм}^2$ Тонкий фокус $0.4 \times 8 \text{ мм}^2$
Сцинтиляційний детектор	Лінійність: 700000 імп/с
Монохроматор на дифрагованому пучку	Кристал: графіт (002) - зігнутий/плоский для ВВ/РВ геометрії зйомки відповідно.



Таблиця 2.4 – Перелік основних стандартних програм дифрактометра Ultima IV [39]

Програмний додаток	Функції
Встановлення параметрів системи (Rigaku control panel)	Зміна конфігурації системи
Управління джерелом рентгенівського випромінювання (XG Operation)	Управління заслонкою , управління напругою і струмом, вивід трубки на робочий режим
Ручний режим вимірювання (Manual Measurement)	Ручне управління всіма осями, приставками і детектором
Автоматичне юстування (Automatic Alignment)	Автоматичне юстування гоніометра і приставок, налаштування параметрів детектора.
Стандартні вимірювання (Standard Measurement)	Проведення стандартних $\theta/2\theta$ вимірювань
Пошук піків (Peak Search)	Обробка вихідних даних і пошук піків
Відображення групового графіка (Multiple Record)	Відображення даних з декількох файлів
Розрахунок інтегральної інтенсивності (Integral Intensity)	Визначення інтегральної інтенсивності
Файловий менеджер (File Manager)	Відображення та редагування параметрів вимірювань
Конвертер даних (Binary – ASCII conversion)	Перекодування даних з бінарного формату RINT в ASCII RINT формат і текстовий формат

Рентгеноструктурний фазовий аналіз проведено з використанням дифрактометру Rigaku Ultima IV, з графітовим монохроматором, у мідному випромінюванні ( $\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 0,15418$  нм) з використанням схеми фокусування за Бреггом-Брентано. Умови проведення досліджень: інтервал кутів  $2\Theta = 20^\circ - 120^\circ$ ; крок зйомки –  $0,04^\circ$ ; час витримки в точці – 2 с; тривалість зйомки одного зразка – 90 хв.

Аналіз отриманих рентгенівських спектрів та проведення кількісного та якісного фазового аналізу здійснено з використанням програмного забезпечення PDXL, міжнародної бази даних дифракції ICDD (PDF-2) та відкритої бази кристалографічних даних COD. Розрахунок розміру областей когерентного розсіяння (ОКР) та ступеня деформації кристалічної ґратки проведено за методом Холдера-Вагнера [38]. Кількісний фазовий аналіз проведений методом RIR, який полягає у порівнянні відношення інтенсивностей найбільш сильних рефлексів фази і корунду в їх суміші з масовими частками.

## **2.6 Висновки до розділу 2**

Високочастотна обробка поверхні за технологією SMAT збільшує мікротвердість поверхні завдяки нержавіючим сталевим кульками.

Мікротвердомір ПМТ-3 являє собою мікроскоп, призначений для вимірювання мікротвердості металів, скла, абразивів, кераміки, мінералів та інших матеріалів.

Металографічний вертикальний мікроскоп МІМ-7 використовується для спостереження і фотографування мікроструктури металів при звичайному освітленні в яскравих і темних полях і поляризованого світла в яскравих полях. Набір лінз і окулярів забезпечує збільшення мікроскопа від 60х до 1440х для візуального спостереження та фотографування від 70х до 1350х.

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1 Результати отримання мікротвердості сплаву

За допомогою SMAT пристрою проводили обробку зразків на повітрі, високочастотну ударну обробку поверхні кульками зроблених із нержавіючої сталі діаметром 2 мм. Використовувалась амплітуда ультразвукових механічних коливань  $A = 50$  мкм. Тривалість обробки – від 30 с до 120 с.

На рис. 3.1 наведено мікротвердість титанового сплаву ВТ6 після ВПМО тертям різної тривалості. У вихідному стані мікротвердість становить 3,28 ГПа. Максимальне зростання мікротвердості до  $\sim 4,3$  ГПа і фіксується за тривалості обробки 60 с. Подальше збільшення часу обробки призводить до початку релаксаційних процесів і відповідного зменшення мікротвердості.

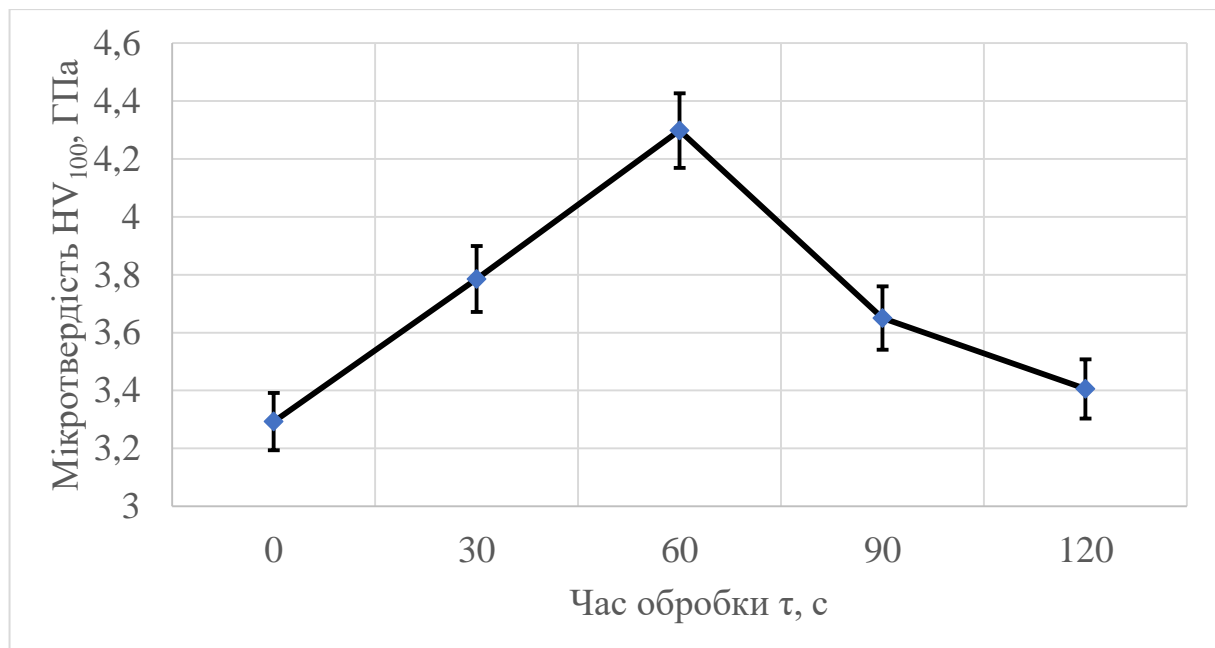


Рисунок 3.1 – Зміна мікротвердості в сплаві ВТ6 після ВПМО тертям

В таблиці 3.1 наведено розраховані за значеннями мікротвердості механічні характеристики (границя плинності, границя міцності та характеристика пластичності) поверхні зразків титанового сплаву ВТ6 у

вихідному стані та після високочастотної поверхневої механічної обробки тертям різної тривалості.

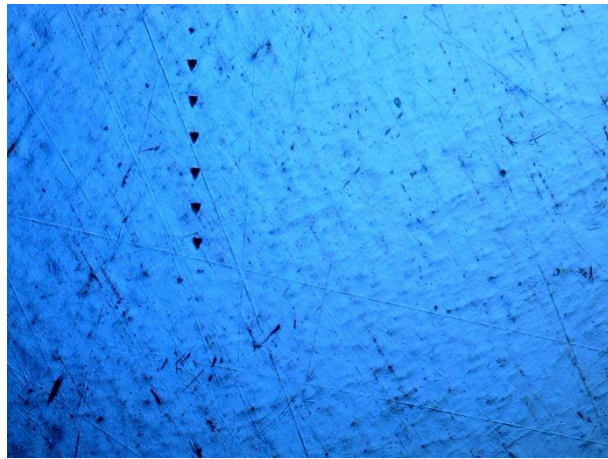
Таблиця 3.1 – Механічні властивості поверхні сплаву ВТ6 після ВПМО тертям на повітрі ( $\delta_H$  – характеристики пластичності,  $\sigma_{0,2}$  – межа текучості,  $\sigma_s$  – межа міцності)

Характеристика	Тривалість ВПМО, с				
	0	30	60	90	120
$\delta_H$ , ГПа	0,81	0,78	0,75	0,78	0,80
$\sigma_{0,2}$ , ГПа	9,88	11,36	12,89	10,95	10,22
$\sigma_s$ , ГПа	2,15	2,61	3,13	2,48	2,25

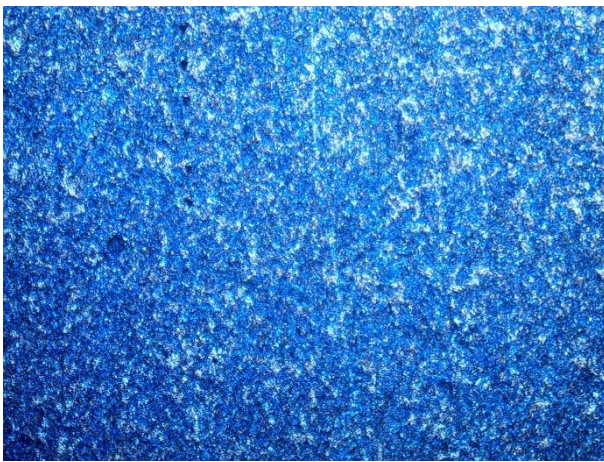
Експериментальні результати свідчать, що високочастотна поверхнева механічна обробка тертям обумовлює зміцнення поверхневих шарів зразків сплаву ВТ6 вже після 60 с обробки.

### 3.2 Результати отримання морфологічної поверхні сплаву

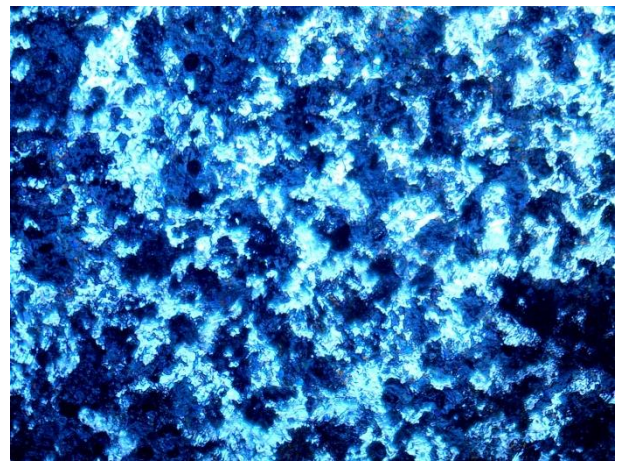
На рис. 3.2 наведено морфологію поверхні сплаву ВТ6 у вихідному стані та після високочастотної поверхневої механічної обробки тертям. В процесі зміцнюючої обробки морфологія поверхні сплаву ВТ6 стає більш розвиненою за рахунок механохімічної реакції взаємодії титану з киснем і формується оксидна плівка (рис. 3.2, в-д).



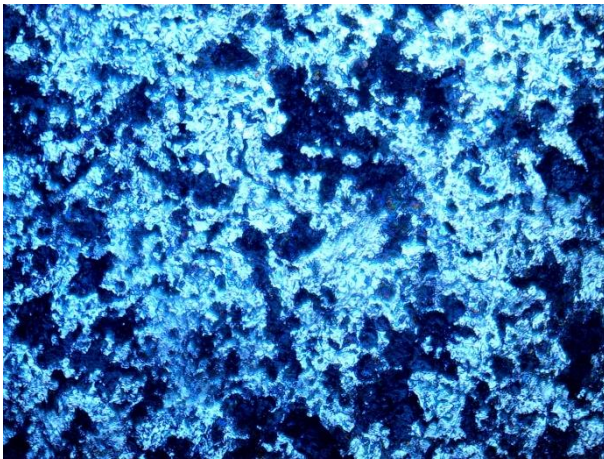
*a*



*б*



*в*



*г*



*д*

*a* – вихідний стан; *б* –  $\tau = 30$  с; *в* –  $\tau = 60$  с; *г* –  $\tau = 90$  с; *д* –  $\tau = 120$  с

Рисунок 3.2 – Морфологія поверхні тита нового сплаву ВТ6 у вихідному стані та після високочастотної поверхневої механічної обробки тертям ( $A=50$  мкм)

### 3.3 Результати отримання рентгеноструктурного аналізу сплаву

Рентгеноструктурні дослідження показали (рис. 3.3.), що сплав ВТ6 у вихідному стані є двофазним, з більшою кількістю об'ємної частки  $\alpha$ (ГЦП)-фази.

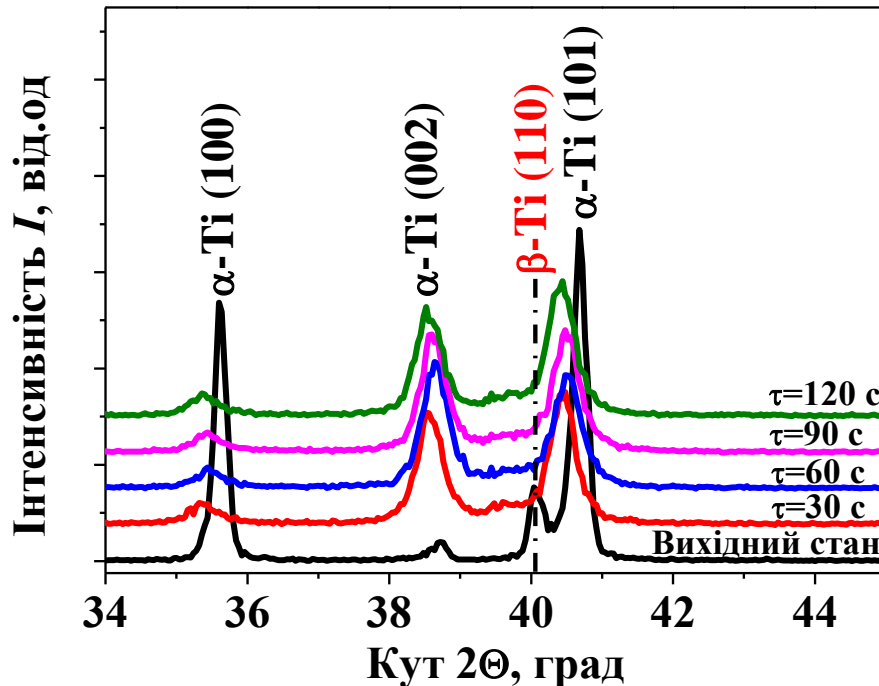


Рисунок 3.3 – Зміна положення дифракційних максимумів (100), (002), (101)  $\alpha$ -Ті після високочастотної поверхневої механічної обробки тертям різної тривалості

Оцінювання співвідношення інтегральних інтенсивностей від  $\alpha$ - і  $\beta$ -фаз показало, що об'ємна частка  $\beta$ (ОЦК)-фази у вихідному стані сплаві складає близько 17 %. Після ВПМО на повітрі впродовж 60 с – об'ємна частка  $\beta$ -фази зменшується до 5 %, а після оброблення тривалістю 120 с – 8 % (рис. 3.4). Високочастотна поверхнева механічна обробка тертям на повітрі обумовлює зміщення дифракційних ліній в бік менших кутів із значним їхнім розширенням. Виявлений зсув дифракційних максимумів пов'язаний із збільшенням параметру кристалічної ґратки  $\alpha$ -титану та макронапруженнями, які виникають внаслідок спричиненої ВПМО

деформацією. Відомо, що втілений кисень може викликати розширення гексагональної ґратки  $\alpha$ -титану і зміщення дифракційних максимумів [39].

Найсильніше цей ефект проявляється в приповерхневих шарах і зменшується із зростанням глибини проникнення рентгенівського променя. Також видно, що в результаті ВПМО знижується висота дифракційного максимуму (101)  $\alpha$ -Ті сплаву ВТ6, а інтенсивність максимуму (002), навпаки, сильно зростає по відношенню до інтенсивності інших максимумів. Причиною розширення ліній є зменшення розміру областей когерентного розсіяння та збільшення ступеню деформації кристалічної ґратки.

За даними рентгеноструктурного аналізу розраховано розмір областей когерентного розсіяння, ступінь деформації кристалічної ґратки, параметр кристалічної ґратки та кількісний фазовий склад сплаву ВТ6 після високочастотної поверхневої механічної обробки тертям (рис. 3.4 – 3.6).

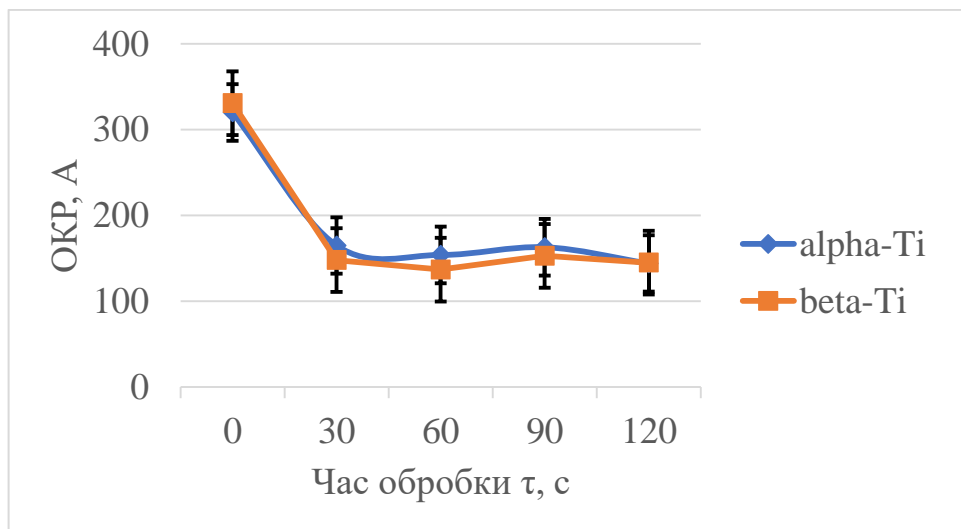


Рисунок 3.4 – Розмір областей когерентного розсіяння  $\alpha$ -Ті та  $\beta$ -Ті після високочастотної поверхневої механічної обробки сплаву ВТ6 тертям на повітрі

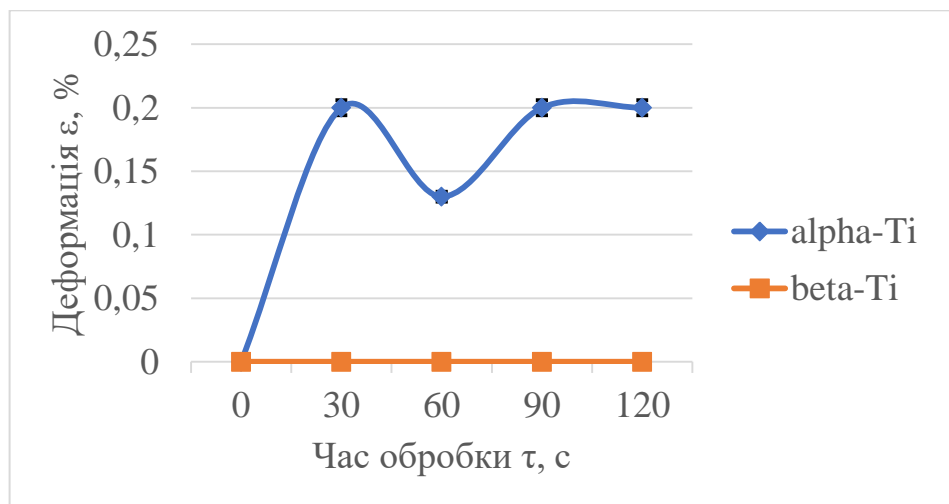


Рисунок 3.5 – Ступінь деформації кристалічної ґратки  $\alpha$ -Ті та  $\beta$ -Ті після високочастотної поверхневої механічної обробки сплаву ВТ6 тертям на повітрі

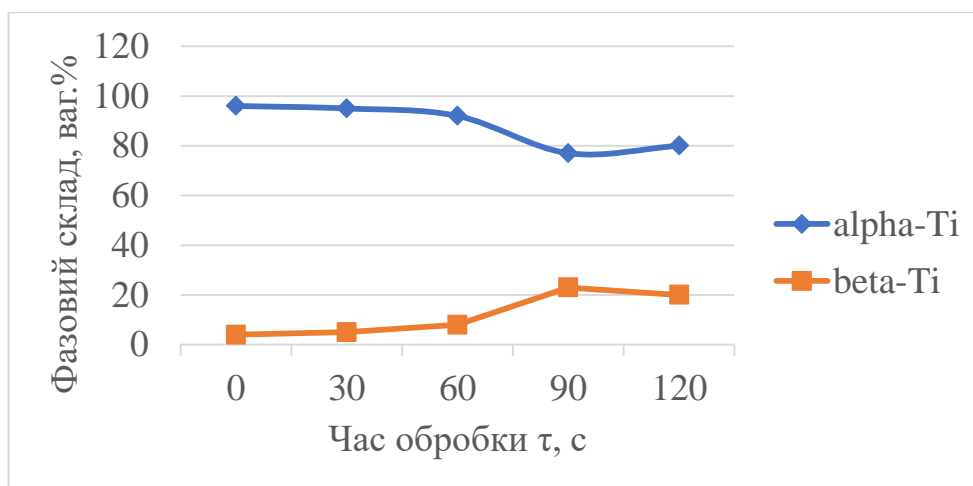


Рисунок 3.6 – Кількісний фазовий склад  $\alpha$ -Ті та  $\beta$ -Ті після високочастотної поверхневої механічної обробки сплаву ВТ6 тертям на повітрі

В процесі обробки відбувається зменшення розміру кристалітів  $\alpha$ -Ті та  $\beta$ -Ті (рис. 3.4). У вихідному стані розмір ОКР  $\alpha$ -Ті та  $\beta$ -Ті становить 660 нм та 550 нм, відповідно. Збільшення тривалості обробки супроводжується монотонним зменшенням розміру кристалітів і за тривалості обробки 120 с цей параметр становить  $\sim 160$  нм для обох фаз.



Ступінь деформації кристалічної ґратки  $\alpha$ -Ті та  $\beta$ -Ті у вихідному стані становить 0,25% (рис. 3.5). Із збільшенням тривалості обробки до 60 с він досягає максимальних значень для  $\alpha$ -Ті та  $\beta$ -Ті і становить 0,62 % і 0,49 %, відповідно. Отримані залежності зміни ступеню деформації кристалічної ґратки задовільно корелюють із значеннями мікротвердості за Віккерсом (рис. 3.1), що свідчить про значний вплив даного фактору на механічні властивості.

### 3.4 Висновки до розділу 3

1. Встановлено залежність між мікротвердістю, ступенем еквівалентної деформації поверхневих шарів і їх структурно-фазовим станом після інтенсивної пластичної деформації за допомогою такої обробки впродовж різного часу.

2. Максимальне зростання мікротвердості до 4,3 ГПа фіксується після 60 с обробки. Саме для цього випадку спостерігається максимальне значення ступеню деформації кристалічної ґратки  $\alpha$ - і  $\beta$ -фаз сплаву ВТ6 – 0,62% і 0,49%, відповідно.

3. Показано, що інтенсивна пластична деформація поверхні за умов високочастотної поверхневої механічної обробки тертям сприяє подрібненню кристалітів  $\alpha$ - і  $\beta$ -фаз сплаву ВТ6 з 660 нм та 550 нм до 160 нм, відповідно.

## 4 ОРГАНІЗАЦІЙНО – ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Однією із частин пояснювальної записки бакалавра є економічний розділ, зміст якого визначається напрямом наукового дослідження та очікуваними результатами бакалаврської роботи.

Рекомендується наступна структура економічного розділу:

- a. Науково-технічна актуальність теми досліджень;
- b. Розрахунок витрат на проведення НДР;
- c. Науково-технічна ефективність НДР.

У випадках, коли завдання бакалаврської роботи включає, поряд з елементами науково-дослідницького характеру, також елементи розробки технологічних рішень або проектування виробничого об'єкту, структура економічної частини може бути змінена при погодженні з науковим керівником та консультантом з економічної частини.

### 4.1 Науково-технічна актуальність НДР

Титан і його сплави використовуються в різних сферах нафтохімічній, целюлозно-паперовій та хімічній промисловості [40]. Використання титану в даних промисловості обумовлена його надзвичайно великою стійкістю в хлорвмістних окислюючих середовищах, в яких майже всі металічні матеріали підлягають корозії того чи іншого виду. Нажаль, титан і сплави на його основі мають недостатню мікротвердість. Одним з шляхів вирішення даної проблеми є високочастотна поверхнева механічна обробка тертям, яка здатна за допомогою вібрації та переміщенням сферичних кульок підвищити мікротвердість сплаву.

В якості матеріалу для дослідження обрано зразки титанового сплаву ВТ6, хімічний склад та механічні властивості який наведені в таблиці 4.1. Зразки у вигляді пластин діаметром 20 мм і товщиною 3 мм ( $\pm 0,5$  мм), одержані різанням прутків перпендикулярно напрямку прокатки. Перед обробкою зразки відпалювались у вакуумі ( $P = 10^{-3}$  Па) за температури

700°C впродовж 2 годин і охолоджувалися разом з піччю. У вихідному стані титановий сплав ВТ6 складається із  $\alpha$  (ГЦП)-фази та  $\beta$  (ОЦК)-фази.

Таблиця 4.1 – Хімічний склад і механічні властивості сплаву ВТ6 [23]

Елемент	Ti	Al	Sn	Fe	O	C	N	H	інші
Вміст, ат.%	90-94	4-6	2-3	$\leq 0.5$	$\leq 0.2$	$\leq 0.1$	$\leq 0.03$	$\leq 0.015$	$\leq 0.35$
$\sigma_{0.2}$ , ГПа [34]	0,78								
$\delta_H$ , ГПа [35]	11,06								
$\sigma_s$ , ГПа [36]:	2,52								

При підвищенні зносостійкості поверхневих шарів з'являється можливість отримати новий матеріал з покращеними характеристиками. Таким чином існує можливість підвищити комплекс властивостей сплаву ВТ6 за допомогою високочастотної поверхневої механічної обробки тертям.

## 4.2 Розрахунок витрат на проведення НДР

Розрахунок усіх витрат організації-виконавця НДР, пов'язаних з виконанням теми, дає можливість встановити її собівартість або кошторисну вартість. Кошторис розробляє виконавець робіт на основі календарного плану проведення досліджень і затверджує замовник або орган, що забезпечує фінансування робіт. Як правило, кошторис складається до початку виконання робіт і тому називається плановим.

Методичні поради щодо встановлення величини витрат на проведення робіт по темі в розрізі типових статей кошторисної вартості (калькуляції собівартості) НДР наводяться нижче.

### 4.2.1 Витрати на оплату праці

Витрати за цією статтею включають заробітну плату безпосередніх виконавців проекту, а заробітну плату адміністративного персоналу та працівників науково-дослідних інститутів включаються до кошторисної вартості проекту через статтю «Непрямі витрати». Крім того, важливо зазначити, що проекти, які фінансуються з державного бюджету, не зараховуються до прибутку, тому ці витрати включають лише базову заробітну плату (без урахування премій та інших виплат прибутку).

Витрати на оплату праці розраховуються на основі даних про трудомісткість окремих робіт за темою (табл. 4.2) та заробітної плати їх безпосередніх виконавців (табл. 4.3).

Загальна трудомісткість робіт, які виконує безпосередньо студент (інженер-дослідник), визначається курсами відповідного напрямку підготовки.

Таблиця 4.2 – Трудомісткість робіт по темі

Найменування робіт по темі дослідження	Трудомісткість за виконавцями, людиноднів		
	Доцент кафедри	Молодший науковий співробітник	Лаборант
1	2	3	4
Уточнення та конкретизація завдань по темі дослідження	1	1	–
Аналіз науково-технічних публікацій з теми	5	6	–
Розробка методики проведення роботи	3	5	–
Підготовка устаткування для проведення експериментів	–	1	1
Виготовлення зразків	–	2	1
Вимірювання мікротвердості	–	2	1
Вимірювання оптичної мікроскопії	–	3	1
Рентгеноструктурний аналіз	–	3	1
Опрацювання результатів	3	5	–
Разом за виконавцями теми	12	28	5

Помножте середньоденну заробітну плату кожної категорії виконавців на відповідну планову трудомісткість, щоб розрахувати плановий фонд заробітної плати для всіх виконавців. У таблиці 4.3 узагальнено розрахунки фонду оплати праці за цією темою.

Денна заробітна плата визначається як відношення місячної заробітної плати до умовних місяців (21,2 дня для НДДКР із п'ятиденним робочим тижнем).

Таблиця 4.3 – Розрахунок витрат на оплату праці

Посада виконавців теми	Планова трудомісткість, люд-днів	Заробітна плата, грн		
		Посадовий місячний оклад	Середньоденна зарплата	Усього за виконавцями
Доцент кафедри	12	10 982,34	518,03	6 216,36
Молодший науковий співробітник	28	2 550	120,28	3 367,92
Лаборант	5	6 766	319,15	1 595,75
Разом оплата праці з теми				11 180,03

#### 4.2.2 Єдиний соціальний внесок

Єдиний соціальний внесок (ЄСВ) – це обов'язкове відрахування на загальнодержавне соціальне страхування. З 1 січня 2016 р. ставка ЄСВ складає 22 %. Базою для нарахування ЄСВ слугують загальні витрати на оплату праці по темі (підсумок по табл. 4.3).

$$\text{ЄСВ} = \text{ЗП} \cdot 0,22 \quad (4.1)$$

де ЗП – загальні витрати на оплату праці по темі.

Наразі ЄСВ буде становити:

$$\text{ЄСВ} = 11\,180,03 \cdot 0,22 = 2\,549,6 \text{ грн.}$$

### 4.2.3 Матеріали, необхідні для проведення дослідження

У цій роботі розглядається вартість усіх видів матеріалів, необхідних для дослідження, за вирахуванням вартості відходів, що підлягають переробці.

Предмет науково-дослідної роботи, проведеної в Інституті металургії та зварювання. Є. А. Патона, по-перше, передбачає використання шихти, термообробку технічних матеріалів, хімічну термічну обробку та нанесення спеціальних покриттів, хімічних реагентів, витратних матеріалів оргтехніки та ін.

Розрахунки зведені в таблицю в таблиці 4.4

Таблиця 4.4 – Розрахунки витрат на матеріали

Найменування матеріалу	Стандарт, технічні умови	Одиниця виміру	Кількість	Ринкова ціна за одиницю, грн.	Сума, грн.
Титанові пластини ВТ6	ГОСТ 19807-74	кг	1	1 200	1 200
Загальні витрати на матеріали					1 200

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

$$T_v = 1\,200 \cdot 0,1 = 120 \text{ грн.}$$

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

$$B_m = 120 + 1\,200 = 1320 \text{ грн.}$$

### 4.2.4 Енергоносії для проведення досліджень

Витрати на енергоносії розраховуються лише в тому випадку, якщо дослідження на цю тему пов'язані з плавленням, покриттям зразків або виробів, та потребують значних витрат енергії, особливо електроенергії.

В інших випадках витрати на енергоносії опосередковано й автоматично включаються до програмного бюджету суб'єкта через статтю «Накладні витрати».

#### **4.2.5 Витрати на спеціальне обладнання**

До цієї статті витрат входить вартість придбання, транспортування та монтажу спеціальних установок для проведення досліджень; приладів; стендів; спеціального оснащення та інших засобів, які необхідні тільки для даної НДР.

Вартість придбання універсального дослідницького обладнання приладів, засобів автоматизації проведення досліджень та інших основних засобів включається у загальні витрати кожної із тем, що виконуються організацією, через статтю «Накладні витрати».

#### **4.2.6 Вартість послуг сторонніх організацій**

Ці витрати встановлюють за договорами з організаціями, які виготовляють випробувальні стенди, зразки та оснащення, необхідні для виконання теми. В дану статтю включають також вартість оренди дослідницьких установок, які відсутні в організації, що виконує цю тему.

#### **4.2.7 Витрати на службові відрядження**

Дані витрати складаються із фактичних витрат на службові відрядження штатних працівників, зайнятих виконанням НДР: витрат на проїзд до місця відрядження і назад; витрат на проживання у готелі; добових витрат, які розраховуються на кожний день перебування у відрядженні, враховуючи час перебування в дорозі, та деякі інші.

#### 4.2.8 Інші прямі неврахована витрати

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

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

Наразі  $I_B$  буде становити:

$$I_B = (11\,180,03 + 2\,459,6 + 1\,320) \cdot 0,1 = 1\,495,96 \text{ грн.}$$

#### 4.2.9 Накладні витрати

Непрямі витрати включаються до кошторисної вартості проекту пропорційно витратам на оплату праці основного виконавця або до прямих витрат на науково-дослідний проект, відповідно до стандартів організації, що виконує дослідження.

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

Розглянемо варіант розрахунку накладних витрат пропорційно сумі прямих витрат на рівні 20 %.

$$H_B = (ЗП + ЄСВ + V_M + I_B) \cdot 0,2, \quad (4.3)$$

Наразі  $H_B$  буде становити:

$$H_B = (11\,180,03 + 2\,459,6 + 1\,320 + 1\,495,96) \cdot 0,2 = 3\,291,11 \text{ грн.}$$



#### 4.2.10 Розроблення планової калькуляції кошторисної вартості теми

Планова калькуляція проведення досліджень по темі складається на підставі виконаних розрахунків та нормативних даних (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Планова калькуляція кошторисної вартості НДР

Найменування статей витрат	Сума, грн	Обґрунтування
1	2	3
1.Витрати на оплату праці	11 180,03	Відповідно до розрахунків
2.Єдиний соціальний внесок	2 459,6	22,0 % від загальних витрат на оплату праці
3.Матеріали для проведення досліджень	1 320	Відповідно до розрахунків
4.Енергоносії для проведення досліджень	–	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
5.Спецобладнання для наукових цілей	–	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
6.Вартість послуг сторонніх організацій	–	За договором із сторонніми організаціями (у нашому випадку включаються у статтю накладні витрати)
7.Витрати на службові відрядження	–	Відповідно до розрахунків (у нашому випадку не передбачено)
8.Інші невраховані прямі витрати по темі	1 495,96	10 % від суми прямих розрахованих витрат по темі
9.Накладні витрати	3 291,11	Відповідно до нормативів організації-виконавця теми (у нашому випадку 20 % від суми прямих витрат)
10.Усього витрат по темі	19 746,7	Сума попередніх статей

#### 4.3 Науково-технічна ефективність НДР

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

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

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

Коефіцієнт  $K_1$  може приймати наступні значення:

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

Коефіцієнт  $K_2$  може приймати такі значення:

- а) результати розробки можна використати тільки в даному підрозділі – 1 бал;
- б) результати розробки можуть бути використані тільки однією організацією – 3 бали;
- в) результати розробки можуть бути використані декількома організаціями – 5 балів.
- г) результатами розробки можуть користуватися в масштабах однієї галузі – 8 балів;
- д) розробки можуть користуватися у різних галузях – 10 балів.

Коефіцієнт  $K_3$  може приймати такі значення:

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

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

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

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

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

Коефіцієнт  $K_4$  може приймати такі значення:

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

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

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

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

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

Загальна бальна оцінка (Б) вираховується перемноженням коефіцієнтів.

$$B = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \quad (4.4)$$

В нашому випадку бальна оцінка ефективності згідно табл. 4.6 становить:

$$B = 3 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 3 = 135$$

Таблиця 4.6 – Бальна оцінка ефективності НДР

Показник оцінки ефективності НДР	Умовне позначення показника	Характеристики даної роботи	Кількість балів
1. Важливість розробки	$K_1$	робота виконується за угодою про науково-технічне співробітництво	3
2. Можливість використання результатів розробки	$K_2$	результати розробки можуть бути використані декількома організаціями	5
3. Теоретична значимість та рівень новизни розробки	$K_3$	під час виконання роботи отримана нова інформація, яка доповнює уявлення про сутність досліджуваних процесів	3
4. Складність дослідження	$K_4$	роботу виконує один підрозділ, витрати від (10 000 – 50 000) гривень	3

Умовний ефект НДР розраховується за формулою:

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

де 500 – умовна вартість одного балу;

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

$V_{\text{НДР}}$  – сумарні витрати на виконання НДР (підсумок табл. 4.5);

У нашому прикладі умовний ефект виконання НДР буде становити:

$$E_{\text{НДР}} = 500 \cdot 135 - 0,21 \cdot 19746,7 = 63\,353 \text{ грн.}$$

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

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

У нашому прикладі  $E_e$  буде становити:

$$E_e = \frac{63\,353}{19746,7} = 3,20$$

Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 3,20 (перевищує одиницю), що свідчить про доцільність її виконання.

#### **4.4 Висновки до розділу 4**

При аналізі та оцінці фінансового стану НДР виявлено, що такі показники, як операційна діяльність, рентабельність і платоспроможність, відповідали нормативним значенням і демонстрували позитивну динаміку. Це свідчить про платоспроможність НДР.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

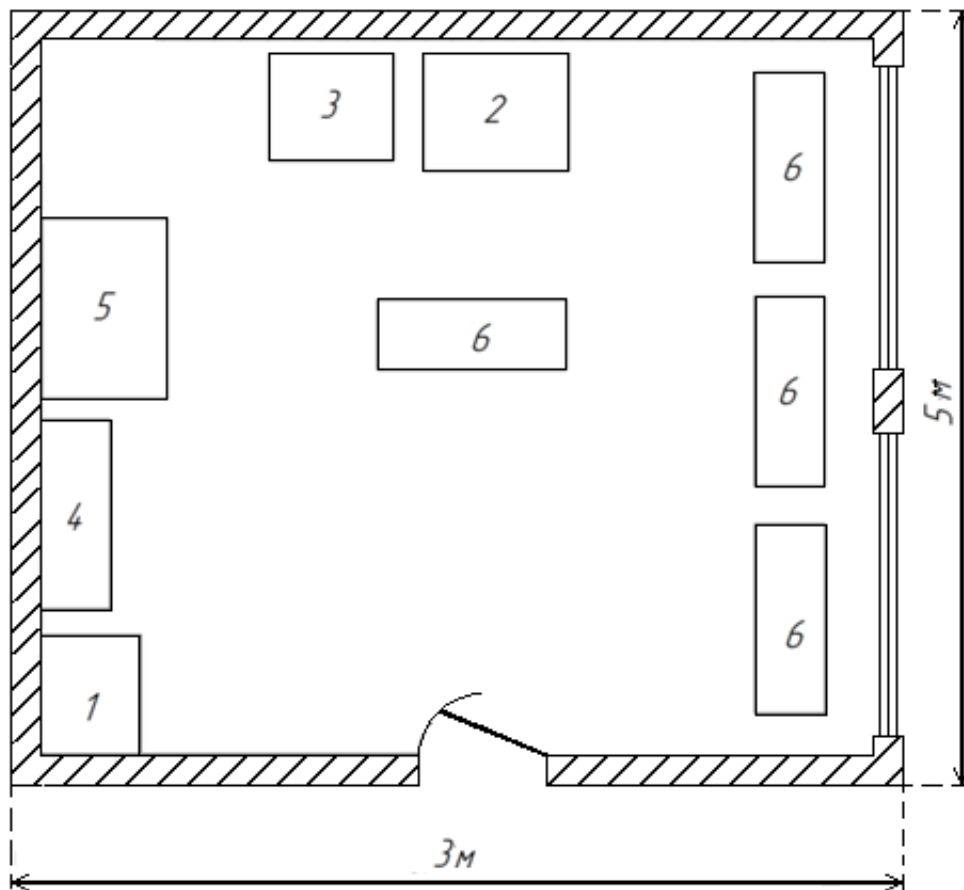
Важливою частиною організації виробничого процесу підприємства є охорона праці. Основним завданням охорони праці є розробка методів і засобів захисту працівників від можливих загроз і небезпек на виробництві, а також попередження нещасних випадків та ліквідації їх наслідків на виробництві. В Україні право людей на безпечні умови праці гарантується Конституцією, Законом України «Про охорону праці», а також законодавчими та нормативними актами.

Метою цього розділу є аналіз умов праці в науково-дослідній роботі, виявлення можливих загроз і шкідливих факторів, розробка методів та їх усунення. У цій дослідницькій роботі досліджено вплив високо частотної механічної обробки на титановий сплав ВТ6 на універсальному приладі SMAT.

### 5.1 Аналіз параметрів приміщення

Науково-дослідна робота виконувалась у лабораторії термічної обробки схема наведена на рисунку 5.1.

Приміщення лабораторії має наступні параметри: розміри кімнати (5×3) метрів, висота стелі – 2,7 метрів, площа приміщення складає 15 м<sup>2</sup>, об'єм приміщення складає 113,4 м<sup>3</sup>. У лабораторії працює дві людини, тож на кожного працівника припадає 21 м<sup>2</sup> площі та 56,7 м<sup>3</sup> об'єму, що відповідає санітарним нормам згідно ДсанПіН 3.32-007-98 [41].



1 – шафа; 2 – SMAT установка (робоче місце); 3 – комп’ютер; 4 – шафа для зразків; 5 – стіл для підготовки зразків; 6 – робочий стіл

Рисунок 5.1 – Схема лабораторії термічної обробки

## 5.2 Мікроклімат робочої зони

Важливою частиною робочого середовища є повітря в робочій зоні, від якого залежить самопочуття та продуктивність працівників. Якість повітря може бути основною причиною захворювань і має серйозний вплив на здоров’я. Тому стан повітря в робочому приміщенні постійно контролюється і перевіряється. Для цього визначають умови мікроклімату та вміст шкідливих речовин.

Умови мікроклімату – це певний набір параметрів, які визначають умови повітря в робочій зоні. До параметрів мікроклімату належать [42]:

- температуру повітря (°C),

- відносну вологість повітря (%),
- швидкість руху повітря (м/с),
- інтенсивність теплового (інфрачервоного) опромінювання (Вт/м<sup>2</sup>) від поверхонь обладнання та активних зон технологічних процесів.

Всі роботи, які виконуються на підприємствах чи у лабораторіях поділяють на категорії залежно від енерговитрат організму для виконання даної роботи. Для кожної категорії встановлено свої допустимі мікрокліматичні вимоги згідно ДСН 3.3.6.042-99 [43].

Роботу, що проводилася у приміщенні даної лабораторії можна віднести до категорії робіт середньої важкості – II. Ця робота пов'язана з ходінням, переміщенням невеликих (до 1 кг) виробів, предметів у положенні стоячи або сидячи, які потребують незначного фізичного напруження. За такого навантаження енерговитрати організму людини становлять (160 - 210) ккал/год [43]. Параметри мікроклімату лабораторії наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату [43]

Категорія робіт середньої важкості IIa			
Період року	Температура, °С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с
Холодний	18 - 20	40 - 60	0,2
Данні вимірювань	19	60	0,2
Теплий	21 - 23	40 - 60	0,3
Данні вимірювань	23	60	0,3
Висновки	Задовольняє вимогам	Задовольняє вимогам	Задовольняє вимогам



Згідно результатів вимірювання мікроклімату, лабораторія відповідає оптимальним санітарним нормам та є безпечною для виконання робіт.

### 5.3 Аналіз освітлення в приміщенні лабораторії

Важливим фактором забезпечення комфортних умов праці є освітлення робочого місця. Правильно розміщене освітлення позитивно впливає на нервову систему працівника, дозволяючи бути більш зосередженим і зосередженим.

У лабораторії використовується комбіноване освітлення, при якому природне освітлення доповнюється штучним. Природне освітлення забезпечується бічними віконними прорізами, а штучне — люмінесцентними лампами ЛБ-40. Категорія роботи, що виконується в лабораторії, відноситься до середньої точності (четвертий розряд візуальної роботи).

#### 5.3.1 Розрахунок характеристик природнього освітлення

Природне освітлення характеризується коефіцієнтом природного освітлення (КПО). КПО для виробничо-лабораторних ділянок визначається мінімальним розміром відмітного об'єкта, характеристиками наочної роботи та категорією наочної роботи.

Нормоване значення КПО ( $e_n$ ) для нашого приміщення можна розрахувати за формулою:

$$e_n = e_n \cdot m_n, \quad (5.1)$$

де  $e_n$  – значення КПО для робіт середньої точності,

$m_n$  – коефіцієнт світлового клімату [44].

Природне світло потрапляє в приміщення через вікна, які розташовані на південній стороні кімнати. Для південної орієнтації  $m_n$  становить 0,85, а

значення КПО для робіт середньої точності складає 1,5 %. Підставляючи коефіцієнти у формулу 5.1, отримуємо значення КПО для лабораторії:

$$e_n = 1,5 \cdot 0,85 = 1,275$$

З розрахунків можна зробити висновок, що тривала робота в такому освітленні може призвести до погіршення зору, головного болю та інших професійних захворювань у працівників. Тому природне освітлення слід доповнити штучним.

### 5.3.2 Розрахунок параметрів штучного освітлення

В лабораторії створено штучне освітлення за допомогою 12 люмінесцентних ламп типу ЛБ-40. Існує кілька методів розрахунку параметрів освітлення: метод питомої потужності, метод розрахунку використання світлового потоку та точковий метод. У цій статті ми розраховуємо використання світлового потоку.

Розрахункове рівняння для визначення нормованої освітленості має наступний вигляд [45]:

$$E = \frac{F \cdot N \cdot n \cdot \eta}{K \cdot S \cdot Z}, \quad (5.2)$$

де  $F$  – світловий потік;

$E$  – нормована освітленість, лк;

$S$  – площа приміщення, що освітлюється, м<sup>2</sup>;

$K$  – коефіцієнт запасу,

$Z$  – коефіцієнт нерівномірності освітлення;

$N$  – кількість світильників;

$n$  – кількість ламп у світильнику;

$\eta$  – коефіцієнт використання світлового потоку.

Світловий потік  $F$  для ламп типу ЛБ – 40 становить 3200 лм, коефіцієнт запасу складає 1,5, коефіцієнт нерівномірності – 1,1. В лабораторії знаходиться 6 світильників, у кожному по дві лампи, коефіцієнт використання світлового потоку  $\eta = 0,56$ . Підставивши необхідні значення у формулу 5.2, отримаємо наступне значення нормованої освітленості:

$$E = \frac{F \cdot N \cdot n \cdot \eta}{K \cdot S \cdot Z} = \frac{3200 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 0,56}{1,5 \cdot 42 \cdot 1,1} = 310 \text{ лк}$$

За даними ДБН В.2.5–28–2006 норма освітленості робочого приміщення становить 300 лк. Розрахована нормована освітленість відповідає нормі, тож штучне освітлення є достатнім для даної лабораторії.

#### 5.4 Аналіз небезпечних чинників в приміщенні лабораторії

У процесі виконання науково-дослідної роботи в приміщенні лабораторії виявлені такі фактори, які можуть становити загрозу:

- безпека ураження електричним струмом,
- шум та вібрації,
- безпека при роботі з вакуумною установкою.

Для попередження нещасних випадків та ситуацій, які можуть призвести до травм, кожен працівник лабораторії отримав інструкції з техніки безпеки.

У таблиці 5.2 наведено перелік можливих шкідливих факторів і можливих небезпек на місці дослідження.

Таблиця 5.2 – Шкідливі фактори при виконанні НДР

Операція	Устаткування	Потенційні небезпеки
Підготовка зразків	Алмазний різак	Травмування

Відпал зразків	Установка SMAT	Ураження електричним струмом, опіки, шум, вібрації
Обробка результатів	Комп'ютер	Ураження електричним струмом

#### 5.4.1 Аналіз шуму та вібрацій

Під час роботи вакуумного пристрою внутрішній вакуум підтримується за рахунок роботи дифузійного насоса і попереднього вакуумного насоса. Саме робота цих насосів створює основний шум і вібрацію. Тривалий шум може негативно впливати на нервову систему і може призвести до втрати слуху, емоційного та психологічного виснаження. Залежно від рівня шуму (поріг больової чутливості  $I = 120$  дБА) людина може отримати фізичну травму та втратити слух.

У лабораторії термічної обробки рівень шуму складає 52 дБА, що є допустимим згідно ДСН 3.3.6.037-99 [46].

При роботі установки також присутні вібрації – механічні коливання обладнання, а саме дифузійного та форвакуумного насосів. Задля мінімізації цих коливань насоси установлені на гумових підставках – віброізоляторах та окремому фундаменті. Такі заходи забезпечують допустимий рівень вібрації згідно санітарним нормам мікроклімату [43].

#### 5.4.2 Аналіз небезпек при роботі з приладом SMAT

Робота з приладом для високочастотної поверхневої механічної обробки потребує певних знань та навичок. Прилад має генератор для живлення приладу енергією 220 В.

Пошкодження генератора може призвести згорання перегрівання п'єзоелементів, короткого замикання та ураження електричним струмом. Тому при пошкодженні генератора слід негайно вимкнути установку.

При початку роботи з установкою необхідно звертати увагу на цілісність кабелів живлення, після чого можна приступати до роботи. Категорично забороняється заходити та торкатися задньої сторони установки при її роботі.

Вимкнення установки відбувається в наступній послідовності:

- відключення струму, завдяки якому відбувається постачання напруги,
- вимкнення установки.

### **5.4.3 Безпека при роботі з електричними приладами**

Електробезпека – це сукупність технічних та організаційних заходів для забезпечення захисту робітників від небезпеки ураження електричним струмом.

Електротравма – травма, яка є наслідком ураження електричним струмом від неізольованих дротів, підключених до мережі чи від ураження блискавкою. Внаслідок такої травми в організмі людини відбуваються важкі зміни, які часто можуть приводити до смерті [47].

Існує три категорії приміщень в залежності від можливості ураженні електричним струмом [47]:

- приміщення без підвищеної небезпеки;
- приміщення з підвищеною небезпекою;
- особливо небезпечні приміщення.

Для особливо небезпечних приміщень характерні такі умови: висока відносна вологість повітря (близько 100 %), хімічно або біологічно активне середовище. Такі фактори негативно впливають на частини устаткування, які проводять струм та на ізолюючі конструкції.

Приміщення можна віднести до категорії підвищеної небезпеки за однієї з наступних умов: протягом тривалого часу відносна вологість є вищою за 75 % або температура робочої зони вище за 35 °С, в приміщенні струмопровідна підлога або є можливість випадково доторкнутися до

металевих частин устаткування, які заземлені і частин, що можуть бути під напругою [47].

У лабораторії термічної обробки небезпеку ураження електричним струмом несуть комп'ютери для обробки результатів експериментів та установка SMAT. Дана лабораторія є приміщенням підвищеної небезпеки, оскільки є можливість одночасно торкнутися металевих частин конструкції будівлі, які з'єднанні з землею та до тильної сторони установки. При вході в лабораторію знаходиться щиток для відключення електрики у разі нещасного випадку.

Всі електричні прилади та установка SMAT у нормальному робочому режимі ізолювані, що забезпечує захист від ураження електричним струмом. Робочі місця в лабораторії розташовані таким чином, щоб запобігти одночасному доторканню до корпусу установки та інших електричних приладів.

#### **5.4.4 Виробничі випромінювання**

Промислові радіаційні дані регламентуються таким документом: «Український стандарт радіаційної безпеки (НРБУ-97)» [48].

Термічна обробка зразка передбачає використання комп'ютера для обробки результатів дослідження. При використанні електронного комп'ютера ультрафіолетове випромінювання, електростатичні поля та рентгенівське випромінювання можуть впливати на організм людини. Робота за комп'ютером також може викликати сильне навантаження на очі.

Для запобігання впливу випромінювання побутових приладів нормою потужності експозиційної дози рентгенівського випромінювання встановлено не більше 100 мкР/год згідно з DSP 6.177-2005-09-02 [49].

Через тривалий час обробки експериментальних даних на комп'ютері рекомендується, щоб загальний час на моніторі за кожну зміну не перевищував 4 год.

## 5.5 Організація робочого місця

Організація праці на виробництві — це система заходів щодо забезпечення ефективного використання знарядь і предметів праці в процесі праці [42].

Робоче місце - це простір, де працюють співробітники. Відповідно до ДСанПіН 3.3.2.007-98 і НПАОП 0.00-1.28-10, з метою максимального підвищення продуктивності праці працівників і збереження їх здоров'я на виробництві дотримуються норми організації праці.

Виходячи з цих норм, виберіть робоче положення (вільне, стоячи або сидячи). Робочий простір організовано відповідно до обраного місця роботи, з оптимальним графіком роботи та відпочинку працівників.

Для даної дослідницької роботи було обрано положення сидячи, оскільки основна частина роботи виконується за допомогою комп'ютера. При роботі з ПК робоче місце повинно мати такі характеристики (рисунок 5.2):

- висота столу 800 мм – 900 мм;
- ширина столу 1000 мм – 1400 мм;
- глибина столу 800 мм – 1000 мм;
- місце для ніг: висота– 600 мм, ширина– 500 мм, глибина (на рівні колін) – 450 мм, глибина (на рівні витягнутої ноги) – 650 мм,;
- відстань від екрана ПК до очей користувача – 600 мм,
- клавіатура на відстані 300 мм від краю столу,
- коефіцієнт відбиття поверхні робочого столу – 0,6 [50].

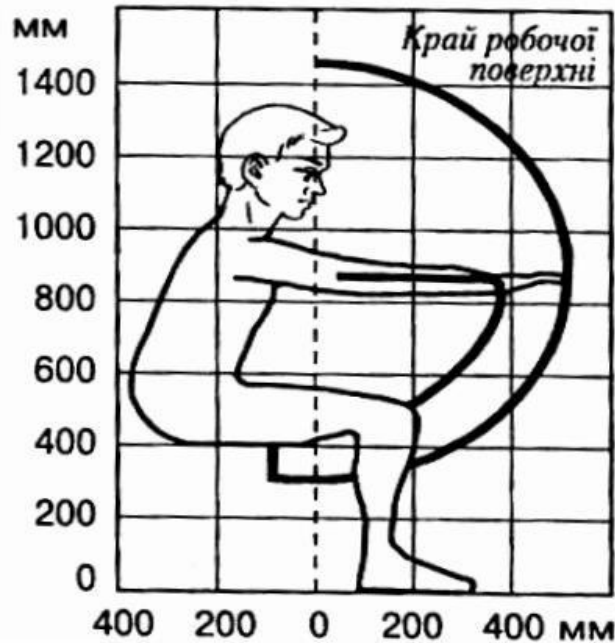


Рисунок 5.2 – Робоча зона працівника [50]

Організація робочих місць у лабораторії вакуумно-термічної обробки відповідає санітарним нормам і забезпечує комфортні умови для працівників.

### 5.6 Пожежна безпека

Згідно з НАПБ Б.03.002-2007 [52] лабораторія належить до категорії «Г», в лабораторії присутні негорючі речовини та матеріали в гарячому, розжареному стані, при обробці яких виділяється теплота. Виникнення пожежі в лабораторії може відбутися лише на електроустановці. Пожежі, які виникають на електроустановках відносяться до класу «Е». При виникненні на працюючій установці пожежі, її необхідно гасити галоїд вуглеводним або вуглекислотним вогнегасником.

Для забезпечення пожежної безпеки у лабораторії є система пожежної сигналізації, а співробітників можна оповістити скориставшись внутрішнім зв'язком, всі небезпечні частини обладнання ізолювані, а горючі речовини знаходяться у герметичних емкостях.

У разі виникнення пожежі всі співробітники мають покинути приміщення шляхами, визначеними планом евакуації (рис. 5.3).



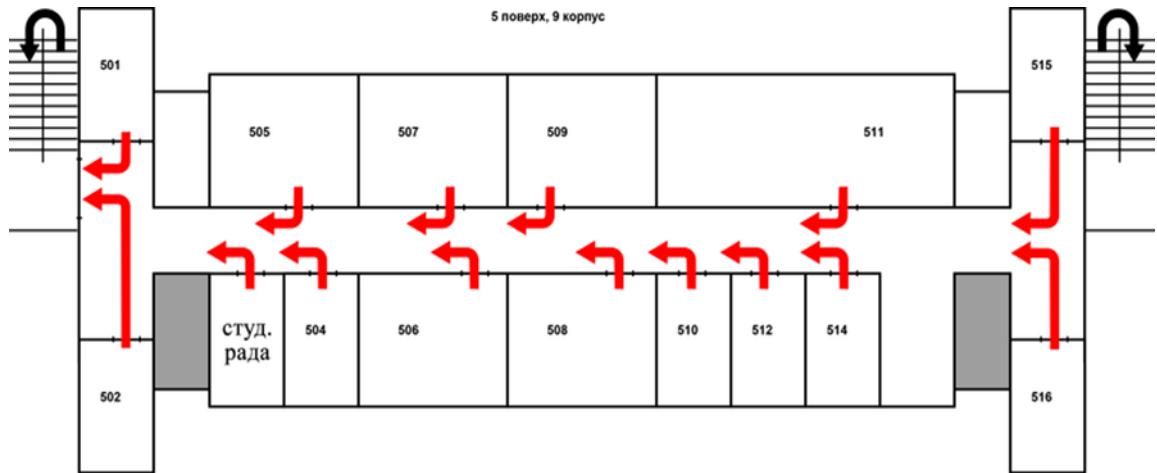


Рисунок 5.3 – План евакуації з будівлі

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

### 5.7 Висновок до розділу 5

Провели аналіз потенційних небезпек, які можуть виникнути під час лабораторних робіт з термічної обробки. Використання SMAT пристрою вимагає належної підготовки працівників та знань, щоб уникнути можливих надзвичайних ситуацій та їх наслідків.

## ВИСНОВКИ

1. Показано можливість підвищення мікротвердості поверхневих шарів титанового сплаву VT6 високочастотною поверхневою механічною обробкою тертям на повітрі за кімнатної температури.

2. Встановлено залежність між мікротвердістю, ступенем еквівалентної деформації поверхневих шарів і їх структурно-фазовим станом після інтенсивної пластичної деформації за допомогою такої обробки впродовж різного часу.

3. Максимальне зростання мікротвердості до 4,3 ГПа фіксується після 60 с обробки. Саме для цього випадку спостерігається максимальне значення ступеню деформації кристалічної ґратки  $\alpha$ - і  $\beta$ -фаз сплаву VT6 – 0,62% і 0,49%, відповідно.

4. Показано, що інтенсивна пластична деформація поверхні за умов високочастотної поверхневої механічної обробки тертям сприяє подрібненню кристалітів  $\alpha$ - і  $\beta$ -фаз сплаву VT6 з 660 нм та 550 нм до 160 нм, відповідно.

5. Коефіцієнт умовної економічної ефективності науково-дослідної роботи становить 3,20, що свідчить про доцільність дослідження.

6. Охорона праці є важливою під час будь якого НДР. Тому провівши аналіз потенціальних небезпек можемо сказати, що робота за приладом SMAT потребує належної підготовки працівника та знань. Щоб запобігти аварійних ситуацій під час роботи.

7. Визначено, що рівень освітлювання достатньо для даної лабораторії. Рівень шуму та вібрації під час роботи відповідають санітарним нормам.

## CONCLUSIONS

1. The possibility of increasing the microhardness of the surface layers of the titanium alloy Ti-6Al-4V by high-frequency surface machining by friction in air at room temperature is shown.

2. The relationship between microhardness, the degree of equivalent deformation of surface layers and their structural-phase state after intense plastic deformation by such treatment for different times is established.

3. The maximum increase in microhardness to 4.3 GPa is recorded after 60 s of treatment. It is for this case that the maximum value of the degree of deformation of the crystal lattice of the  $\alpha$ - and  $\beta$ -phases of the alloy Ti-6Al-4V is 0.62 % and 0.49 %, respectively.

4. It is shown that the intense plastic deformation of the surface under conditions of high-frequency surface friction treatment promotes the grinding of crystallites of  $\alpha$ - and  $\beta$ -phases of Ti-6Al-4V alloy from 660 nm and 550 nm to 160 nm, respectively.

5. The coefficient of conditional economic efficiency of research work is 3.20, which indicates the feasibility of research.

6. Occupational safety is important in any research. Therefore, after analyzing the potential hazards, we can say that working on the SMAT device requires proper training of the employee and knowledge. To prevent accidents during operation.

7. It is determined that the lighting level is sufficient for this laboratory. The noise and vibration levels during operation comply with sanitary standards.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Application of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) technique for surface strengthening of titanium and titanium alloys: a mini review / Ruyi Liu, Shuo Yuan, Naiming Lin, Qunfeng Zeng, Zhihua Wang, Yucheng Wu // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 11. – P. 351-377.
2. Enhanced Resistance of Ti6Al4V Alloy to High-Temperature Oxidation and Corrosion by Forming Alumina Composite Coating / B.N. Mordyuk, S.M. Voloshko, V.I. Zakiev, A.P. Burmak, V.V. Mohylko // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2021. – Vol. 30, Is.3. – P. 1780-1795.
3. Boyer R.R. Overview on the use of titanium in aerospace industry / R.R. Boyer // *Mater. Sci. Eng.* – 1996. – Vol. 213. – P. 103-114.
4. Schauerte O. Titanium in automotive production / O. Schauerte // *Adv. Eng. Mater.* – 2003. – Vol. 5. – P. 411-418.
5. Applying titanium alloys in drilling and offshore production systems / R.W. Schutz, C.F. Baxter, P.L. Boster, F.H. Fores // *JOM-the-journal-of-the-Minerals-Metals-Materials-Society*. – 2001. – Vol. 53. – P. 33-35.
6. Electrochemical corrosion and tribological evaluation of TiAl alloy for marine application / J. Cheng, F. Li, S. Zhu, Y. Yu, Z. Qiao, J. Yang // *Tribol International*. – 2017. – Vol. 115. – P. 483-492.
7. Surface modification of titanium and its alloys for biomedical application / L. Luo, Z.Y. Jiang, D.B. Wei, X.F. He // *Adv. Mater. Res.* – 2014. – Vol. 887-888. – P. 1115-1120.
8. Sidambe A.T. Biocompatibility of advanced manufactured titanium implants-a review / A.T. Sidambe // *Materials*. – 2014. – Vol. 7(12). – P. 8168-8188.
9. Veiga C. Properties and application of titanium alloys: a brief review / C. Veiga, J.P. Devim, A. Loureiro // *Rev. Adv. Mater. Sci.* – 2012. – Vol. 32(2). – P. 133-148.

10. Budinski K.G. Tribological properties of titanium alloys / K.G. Budinski // *Wear*. – 1991. – Vol. 151 (2). – P. 203-217.
11. Dry sliding wear mechanisms of the Ti6Al4V alloy / Molinari A, Straffelini G, Tesi B, Bacci // *T.Wear*. – 1997. – Vol. 208(1-2). – P. 105-112
12. Banerjee D. Perspectives on titanium science and technolog / D. Banerjee, J.C. Williams // *Acta. Mater.* – 2013. – Vol. 61(3). – P. 844-879.
13. Improvement of the biomedical properties of titanium using SMAT and thermal oxidation / M. Wen, C, Wen, P. Hodgson, Y. Li // *Colloids and Surfaces. B, Biointerfaces*. – 2013. – Vol. 116. – P. 658-665.
14. Zhang X.H. Effect of shot peening on fretting fatigue of Ti811 alloy at elevated temperature / X.H. Zhang, D.X. Liu // *Int. J Fatig.* – 2009. – Vol. 31(5). – P. 889-893.
15. Comparison of wear properties of commercially pure titanium prepared by selective laser melting and casting processes / H. Attar, K.G. Prashanth, A.K. Chaubey, et al // *Mater Lett.* – 2015. – Vol. 142. – P. 38-41.
16. Benea L. Increasing the tribological performances of Ti-6Al-4V alloy by forming a thin nanoporous TiO<sub>2</sub> layer and hydroxyapatite electrodeposition under lubricated conditions / L. Benea, E. Mardare-Danaila, J.P. Celis // *Tribol Int.* – 2014. – Vol. 78. – P. 168-175.
17. Chan H. Development of surface mechanical attrition treatment (SMAT) and electrodeposition process for generating nanostructured materials and study of their tensile properties / H. Chan // *The Hong Kong Polytechnic University*. – 2010. – P. 190.
18. Froes F. H. The Beta Titanium Alloys / F. H. Froes, H. B. Bomberger // *J. Metals*. – 1985. – July. – P. 28–32.
19. Титановые сплавы в сварных конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно–космической технике /Б. А. Колачев, Ю. С. Елисеев, А. Г. Братухин [и др.]. – М.: Издательство МАИ. – 2001. – с. 416

20. Машиностроение. Энциклопедия. Т. 2-3. Цветные металлы и сплавы / Под ред. Фридлянтера И.Н. – Раздел 2. Титан и титановые сплавы / Моисеев В.Н. – М.: Машиностроение. – 2001. – С. 272 – 353.
21. Металловедения титана и его сплавов / С.П. Белов, М.Я. Брун, С.Г. Глазунов и др. // Под ред. Глазунова С.Г. и Колачева Б.А. – М.: Металлургия. – 1932. – с. 352
22. Колачев Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. – 3-е изд. – М.: МИСиС. – 1999. – с. 416
23. Ильин А.А. Состав, структура, свойства / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин // ВИЛС-МАТИ: Москва. – 2009. – с. 520
24. Chan H. Development of surface mechanical attrition treatment (SMAT) and electrodeposition process for generating nanostructured materials and study of their tensile properties / H. Chan // The Hong Kong Polytechnic University. – 2010. – P. 190.
25. Effect of surface nanocrystallization on the corrosion behavior of Ti–6Al–4V titanium alloy / S. Jelliti, C. Richard, D. Reirant, T. Roland, M. Chemkhi, C. Demangele // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. – 224 – P. 82–87.
26. Вплив обробки поверхні за технологією smat на механічні властивості поверхневих шарів міді / С. І. Дерев'янку, В. В. Морозович, Т. А. Красовський, Ю. О. Ляшенко // Вісник Черкаського університету. Серія Фізико-математичні науки (№ 1). – 2019. – с. 60-68.
27. Application of ultrasonic nanocrystal surface modification (UNSM) technique for surface strengthening of titanium and titanium alloys: a mini review / Liu Ruyi, Yuan Shuo, Lin Naiming, et al // Journal of Materials Research and Technology. – Volume 11. – 2021. – P. 351 – 377
28. Effect of surface nanocrystallization on the corrosion behavior of Ti – 6Al – 4V titanium alloy / S. Jelliti , C. Richard , D. Reirant , et al // Surface and Coatings Technology. – Volume 224. – 2013. – P. 82 - 87

29. Villegas J. Investigation of the effects of the surface nanocrystallization and hardening (SNH) process on bulk metallic components / J. Villegas // Phd, University of Connecticut. – 2005.

30. Nanocrystallization of a nickel alloy subjected to surface severe plastic deformation / J. Tian, K. Dai, J. Villegas, et al // Mater. Sci. Eng. – Vol. 493. – 2008. P. – 176.

31. A study on the hardness variation of  $\alpha$ - and  $\beta$ -pure titanium with different grain sizes / Y. L. Kao, G. C. Tu, C. A. Huang, T. T. Liu // Materials Science and Engineering. – Vol. 398. – 2005. – P. 93-98

32. Белоцкий А.В. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Физические методы исследования металлов». Часть IV. / А.В. Белоцкий, А.Ф. Богданова, В.Г. Тиняев. - К.: КПИ, 1984. – 60 с. – С. 32 - 47.

33. Геллер Ю.А. Материаловедение (методы анализа, лабораторные работы и задачи) / Ю.А. Геллер, А.Г. Рахштадт. – М.: Металлургия. – 1975. – с. 448 – С. 23- 36, 58-67.

34. Мильман Ю.В. Характеристика пластичности, определяемая методом индентирования / Ю.В. Мильман, С.И. Чугунова, И.В. Гончарова // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (98). – 2011. – №4. – С. 182–187.

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

36. Мильман Ю.В. Влияние температуры на механические свойства объемного аморфного сплава на основе циркония / Ю.В. Мильман, А.Н. Слипенюк, В.В. Куприн, Д.В. Козырев // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (98). – 2011. – №4. – С. 85–88.

37. Горелик С. С. Рентгенографический и электронно–оптический анализ: [учеб. пособие для вузов.] / С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев. – М.: МИСИС, 1994. – 328 с. 11.

38. Бокий Г.Б. Рентгеноструктурный анализ / Г.Б. Бокий, М.А. Порай-Кошиц. – М.: Наука, 1964.

39. Бурмак А.П. Сучасні експериментальні методи аналізу низькорозмірних структур: лабораторний практикум [текст] : навч. посіб. для студ. Спеціальності 132 «Матеріалознавство», освітньої програми «Інжиніринг та комп'ютерне моделювання в матеріалознавстві» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: М.В. Карпець, С.І. Сидоренко, А.П. Бурмак. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 116 с.

40. Титановые сплавы в сварных конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно–космической технике /Б. А. Колачев, Ю. С. Елисеев, А. Г. Братухин [и др.]. –М.: Издательство МАИ, 2001. –416 с.

41. ДСанПіН 3.3.2.007-98 – Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами (ВДТ) електроннообчислювальних машин.

42. Левченко О.Г. Охорона праці та цивільний захист [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальностей 132 «Матеріалознавство» та 136 «Металургія» / О. Г. Левченко // КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 26,1 Кбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 337 с.

43. ДСН 3.3.6.042-99. – Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

44. ДБН В.2.5-28 2006 – Інженерне обладнання будинків і споруд // Природне і штучне освітлення, затверджені наказом Міністерства будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України від. – 2006. – Т. 15.



45. Москальова В.М. Охорона праці: Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення / В.М. Москальова //– Рівне: НУВГП , 2009.
46. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвучу та інфразвучу.
47. Практикум із охорони праці. Навчальний посібник / За ред. канд. техн. наук, доцента В. Ц. Жидецького. – Львів: Афіша, 2000. – 32 с.
48. НРБУ-97 – Норми радіаційної безпеки України. Розробник: Міністерство охорони здоров'я України, Комітет з питань гігієнічного регламентування, Національна комісія з радіаційного захисту населення України. Затверджено: Міністерство охорони здоров'я України, наказ від 14.07.1997 р. № 208. Введені в дію Постановою Головного державною санітарного лікаря України Першого заступника міністра охорони здоров'я 77 України від 01.12.1997 р. № 62 З доповненням: ДГН 6.6.1- 6.5.061-2000 Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000).
49. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України ДСП 6.177-2005-09-02 – [Чинний від 2005-02-02].
50. НПАОП 0.00-1.28-10 – Правила охорони праці під час експлуатації ЕОМ.
51. Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій, № 424/3717 від 30.06.1999 р.
52. НАПБ Б.03.002-2007 – Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухо пожежною та пожежною небезпекою.