


Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні  
(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки  
(повна назва кафедри)

  
01.12.23 р.


**Пояснювальна записка**  
до кваліфікаційної роботи магістра

рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень  
(другий (магістерський) рівень)

на тему Аналіз сучасного стану та напрямів вдосконалення переробки металевих відходів жароміцних нікелевих сплавів

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1362-мкм-3

Діденко Л.М.  
(ПІБ)

  
(підпис)

спеціальності

136 Металургія  
(шифр і назва)

спеціалізація

(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

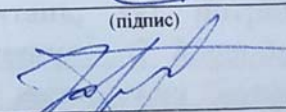
Металургія кольорових металів  
(шифр і назва)

Керівник Нестеренко Т.М.  
(прізвище та ініціали)

  
(підпис)

Рецензент

Бондаренко Ю.В.  
(прізвище та ініціали)

  
(підпис)

Запоріжжя - 2023 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ім Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки

Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень  
другий (магістерський) рівень

Спеціальність 136 Металургія  
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма Металургія кольорових металів  
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри МТЕТБ  
Ю.О. Белоконь

“ 07 ” 05 2023 року

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТУ

Діденко Лідія Миколаївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Аналіз сучасного стану та напрями вдосконалення переробки металевих відходів жароміцних нікелевих сплавів

керівник роботи (проекту) Нестеренко Тетяна Миколаївна, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “01” 05 2023 року № 634-с

2. Строк подання студентом роботи (проекту) 01.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи (проекту) Металеві відходи лиття і брак авіаційних лопаток із жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВИ

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Реферат. Зміст. Вступ. 1 Аналітична частина. 2 Методика дослідження. 3 Дослідницька частина. 4 Охорона праці та техногенна безпека. Висновки. Перелік джерел посилання. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)  
Презентаційний матеріал на 14 слайдах (на 14 сторінках)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата
		завдання прийняв
Аналітична частина	Нестеренко Т.М., доцент	<i>Мещ</i> 01.12.2023
Методика дослідження	Нестеренко Т.М., доцент	<i>Мещ</i> 01.12.2023
Дослідницька частина	Нестеренко Т.М., доцент	<i>Мещ</i> 01.12.2023
Охорона праці та техногенна безпека	Нестеренко Т.М., доцент	<i>Мещ</i> 01.12.2023
Нормоконтроль	Белоконь Ю.О., завідувач кафедри	<i>Ю.О.</i> 01.12.2023

7. Дата видачі завдання 01.05.2023

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вступ	до 30.11.2023	Виконано
2	Реферат	до 30.11.2023	Виконано
3	Аналітична частина	до 30.06.2023	Виконано
4	Методика дослідження	до 19.11.2023	Виконано
5	Дослідницька частина	до 19.11.2023	Виконано
6	Охорона праці та техногенна безпека	до 26.11.2023	Виконано
7	Висновки	до 26.11.2023	Виконано
8	Графічна частина	до 30.11.2023	Виконано

Студент

*Д.В.*  
(підпис)

Л.М. Діденко

(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)

*Мещ*  
(підпис)

Т.М. Нестеренко

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна магістерська робота: 113 с., 30 табл., 17 рис., 40 джерел, 4 додатки, 2 публікації.

ВИЛИВОК, ЖАРОМІЦНИЙ НІКЕЛЕВИЙ СПЛАВ, СПРЯМОВАНА КРИСТАЛІЗАЦІЯ, МЕТАЛЕВІ НІКЕЛЕВІ ВІДХОДИ, ПЛАВЛЕННЯ, МІКРОСТРУКТУРА.

Об'єкт дослідження – процес виплавлення жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВИ із застосуванням металевих нікелевих відходів власного виробництва.

Предмет дослідження – вплив кількості металевих нікелевих відходів на якість і властивості металу в отриманих виливках зі сплаву ЖС26-ВИ.

Мета роботи – проаналізувати технології та обладнання для виплавлення жароміцних нікелевих сплавів із залученням до шихти металевих відходів жароміцних нікелевих сплавів власного виробництва.

Методи дослідження – спектральний аналіз, хімічний аналіз для визначення масової частки елементів у нікелевих сплавах і виливках; дослідження кристалографічної орієнтації монокристалічних зразків нікелевих сплавів; випробування зразків нікелевих сплавів на тривалу міцність; випробування зразків нікелевих сплавів на короткочасне розтягування.

Одержані наслідки та їх новизна – експериментальними дослідженнями підтверджено доцільність та економічність додавання 50 % сплаву ЖС26-ВИ, отриманого шляхом електронно-променевого переплавлення нікелевих металевих відходів власного виробництва, у шихту для виготовлення виливків методом ВШСК. Властивості зразків, отриманих із додаванням до шихти 100 % та 50 % сплаву ЖС26-ВИ, виготовленого шляхом електронно-променевого переплавлення нікелевих металевих відходів власного виробництва, задовольняють нормативним вимогам на сплав ЖС26-ВИ та деталі (лопатки).

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ВШСК – високошвидкісна спрямована кристалізація;

ГТД – газотурбінний двигун;

ГПР – гранично припустимий рівень;

ЕПП – електронно-променевого переплавлення;

ЕШП – електрошлакове переплавлення;

ЖС26-ВИ (ЕПП) – сплав ЖС26-ВИ, виготовлений шляхом електронно-променевого переплавлення металевих нікелевих відходів власного виробництва;

КГО – кристалографічна орієнтація;

НДР – науково-дослідницька робота;

ТУ – технічні умови;

$1 \text{ кгс/см}^2 = 98066,5 \text{ Па}$ ;

$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Па}$ .

## ЗМІСТ

Вступ.....	9
1 Аналітична частина.....	12
1.1 Склад, властивості та використання нікелю.....	12
1.2 Класифікація та характеристика нікелевих сплавів.....	14
1.2.1 Класифікація нікелевих сплавів.....	14
1.2.2 Жароміцні нікелеві сплави та їх особливості.....	19
1.3 Нікелеві відходи та технології їх переробки.....	23
1.4 Технологія виплавки нікелевих сплавів.....	27
1.4.1 Особливості виплавлення ливарних нікелевих сплавів.....	27
1.4.2 Виплавлення монокристалічних нікелевих сплавів.....	33
1.5 Напрями ресурсозбереження нікелевих сплавів.....	38
Висновки.....	39
2 Методика дослідження.....	40
2.1 Характеристики вихідних матеріалів і отриманих продуктів.....	40
2.2 Характеристика обладнання для виплавлення лопаток із жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВИ.....	41
2.3 Методика дослідження виплавлення лопаток із жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВИ із застосуванням металевих нікелевих відходів власного виробництва.....	49
2.4 Методика визначення хімічного складу зразків нікелевих сплавів....	51
2.5 Методика дослідження кристалографічної орієнтації монокристалічних зразків нікелевих сплавів.....	53
2.6 Методика випробування зразків нікелевих сплавів на тривалу міцність.....	54
2.7 Методика випробування зразків нікелевих сплавів на короткочасне розтягування.....	55
Висновки.....	55
3 Дослідницька частина.....	56

3.1 Отримання відповідальних виливків із спеціальних жароміцних сплавів методом ВШСК на установці УВНК-8П.....	56
3.2 Дослідження хімічного складу і структури зразків сплаву ЖС26-ВИ (ЕПП).....	60
3.3 Дослідження механічних властивостей зразків сплаву ЖС26-ВИ (ЕПП).....	64
3.4 Дослідження зламів у місцях руйнування зразків після випробування механічних властивостей зразків.....	68
3.5 Дослідження хімічного складу виливків сплаву ЖС26-ВИ (ЕПП)...	71
3.6 Організація виконання науково-дослідницької роботи.....	72
3.6.1 Планування етапів науково-дослідницької роботи.....	72
3.6.2 Визначення трудомісткості виконання НДР.....	72
3.6.3 Визначення числа виконавців НДР.....	74
3.6.4 Розрахунок тривалості етапів НДР.....	74
3.6.5 Побудова стрічкового графіка проведення науково-дослідницької роботи.....	75
3.7 Розрахунок кошторису витрат на проведення дослідження.....	77
3.7.1 Розрахунок витрат на основні матеріали.....	77
3.7.2 Розрахунок витрат на амортизацію обладнання.....	78
3.7.3 Розрахунок витрат на електроенергію.....	79
3.7.4 Розрахунок заробітної плати й відрахувань.....	80
3.7.5 Накладні витрати.....	82
3.7.6 Зведений кошторис витрат на проведення науково-дослідницької роботи.....	83
Висновки.....	84
4 Охорона праці та техногенна безпека.....	85
4.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на дослідника в металургійній лабораторії.....	85
4.2 Заходи щодо усунення шкідливих і небезпечних факторів виробничого середовища.....	87

4.3 Виробнича санітарія.....	89
4.4 Електробезпека.....	91
4.5 Заходи пожежної безпеки.....	96
Висновки.....	97
Загальні висновки.....	98
Перелік джерел посилання.....	100
Додаток А. Тези на III Всеукраїнську науково-практичну конференцію за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів розвитку регіонів України» (17-20 жовтня 2023 року).....	104
Додаток Б. Тези на Міжнародну науково-технічну конференцію «MININGMETALTECH 2023 – Гірничо-металургійний комплекс: інтеграція бізнесу, технологій та освіти» (29-30 листопада 2023 р.).....	107
Додаток В. Грамота за II місце у роботі III Всеукраїнської науково-практичної конференції за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України».....	110
Додаток Г. Сертифікат за доповідь на Міжнародній науково-технічній конференції «MININGMETALTECH 2023 – Гірничо-металургійний комплекс: інтеграція бізнесу, технологій та освіти».....	112



## ВСТУП

Вторинна переробка та утилізація матеріалів є головною з глобальних ініціатив, спрямованих на створення суспільства сталого розвитку. Як зазначено у сформульованих ООН «Мета у сфері сталого розвитку» – сімнадцяти цілях, спрямованих на перетворення нашого світу, відповідальне споживання та виробництво покладено в основу економіки замкнутого циклу та відіграють критично важливу роль у протидії зміні клімату [1,2].

Зростання використання нікелю у багатьох важливих технологіях призвело до сталого зростання попиту на цей метал протягом цілого ряду десятиліть. Такий зростаючий попит призвів до прагнення збільшити рівень переробки відходів нікелю, щоб доповнити його виробництво з рудної сировини [2]. Тому вдосконалення переробки відходів виробництва нікелю з отриманням якісного металу або нікелевого сплаву є актуальним завданням.

Розвиток багатьох галузей машинобудування й перш за все сфери авіаційного кластеру висуває нові завдання з підвищення якості, надійності та довговічності деталей, що працюють за високих температур і напружень у сучасних газотурбінних двигунах (ГТД). Вирішення цих завдань призводить до зростання вимог до експлуатаційних і технологічних властивостей ливарних жароміцних сплавів, використаних під час виробництва деталей ГТД і, зокрема лопаток турбіни як виробів, що виготовляються масово. Тому виникала потреба у нових сплавах з більшими високотемпературними характеристиками. В останні роки активно опрацьовуються жароміцні монокристалічні сплави.

Турбінні лопатки сучасних як авіаційних, так і силових наземних установок, виготовляють, як правило, з жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВИ. Виливки з цього сплаву виготовляються шляхом високошвидкісної спрямованої кристалізації на установках типу УВНК-8П. Сплав ЖС-26ВИ відрізняється дуже складною системою легування і, відповідно, високою вартістю. Сучасні економічні умови вимагають зниження собівартості будь-

якого виробу зі збереженням рівня його експлуатаційних властивостей та надійності.

При відливанні турбінних лопаток авіаційних двигнів методом лиття за моделями, що виплавляються, накопичується значна кількість металевих нікелевих відходів у вигляді технологічних відходів, до яких належать відходи ливникових систем і браковані лопатки. У виробництві пряме застосування у шихті таких відходів без попереднього їх очищення спричинює накопичення неметалевих включень у виливках, внаслідок чого погіршуються властивості сплаву, що виплавляють, та провокується утворення дефектів у виливках. Крім того, після видалення у лужних розчинах керамічних стрижней на внутрішній поверхні бракованих лопаток залишаються сліди алюмінатів натрію та калію. Отже, залучення у виробництво металевих відходів нікелю та сплавів на його основі з отриманням якісного металу або сплаву є актуальним завданням.

*Мета роботи* – проаналізувати технології та обладнання для виплавлення жароміцних нікелевих сплавів із залученням до шихти металевих відходів жароміцних нікелевих сплавів власного виробництва.

*Завдання дослідження:*

1. Проаналізувати технології та обладнання, що застосовують для виплавлення жароміцних нікелевих сплавів із залученням до шихти металевих відходів жароміцних нікелевих сплавів власного виробництва.

2. Експериментально дослідити технологію виплавлення жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВИ із залученням до шихти металевих відходів жароміцних нікелевих сплавів власного виробництва.

3. Експериментально дослідити хімічний склад і механічні властивості нікелевого сплаву ЖС26-ВИ на зразках, виготовлених із додаванням до складу шихти металевих відходів жароміцних нікелевих сплавів власного виробництва.

*Об'єкт дослідження* – процес виплавлення жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВИ із застосуванням металевих нікелевих відходів власного виробництва.

*Предмет дослідження* – вплив кількості металевих нікелевих відходів на якість і властивості металу в отриманих виливках зі сплаву ЖС26-ВИ.

*Наукова новизна:*

Експериментальними дослідженнями підтверджено доцільність та економічність додавання 50 % сплаву ЖС26-ВИ, отриманого шляхом електронно-променевого переплавляння нікелевих металевих відходів власного виробництва, у шихту для виготовлення виливків методом ВШСК. Властивості зразків, отриманих із додаванням до шихти 100 % та 50 % сплаву ЖС26-ВИ, виготовленого шляхом електронно-променевого переплавляння нікелевих металевих відходів власного виробництва, обох варіантів виливків задовольняють нормативним вимогам на сплав ЖС26-ВИ та деталі (лопатки). За результатами випробувань на короткочасне розривання зразків, отриманих із залученням нікелевих металевих відходів, встановлено, що властивості таких зразків перевищують встановлені норми.

*Практичне значення:*

1. Експериментально встановлено, що для виготовлення якісних виливків можна застосовувати обидва варіанти шихтових композицій, до складу яких залучають сплав ЖС26-ВИ (ЕПП), отриманий шляхом електронно-променевого переплавлення металевих нікелевих відходів власного виробництва.

2. Варіант шихти для отримання виливка із сплаву ЖС26-ВИ із додавання 50 % металевих відходів вихідного сплаву має найбільш оптимальне поєднання властивостей при короткочасному розриванні та тривалої міцності.

3. Мікроструктура сплаву ЖС26-ВИ, отриманого із додаванням нікелевих відходів, суттєво не відрізняється від структури сплаву ЖС26-ВИ, отриманого методом вакуумно-індукційного переплаву та являє собою  $\gamma$ -твердий розчин, зміцнений  $\gamma$ -фазою і карбідами. У міждендритних просторах наявні значні кількості  $\gamma'$ -евтектики. У литому стані спостерігається нерівномірність щодо дисперсності та розподілу  $\gamma'$ -фази.

## 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Склад, властивості та використання нікелю

Чистий нікель – метал світло-сріблястого кольору. Його поверхня має дуже високу відбивну здатність. Нікель володіє також достатньо високою міцністю і пластичністю, добре обробляється в гарячому і холодному станах. Після оброблення його тиском можна отримати лист завтовшки до 0,02 мм або дріт діаметром до 0,01 мм [3]. Нікель до температури 357,6 °С виявляє магнітні властивості, його температура плавлення становить 1455 °С, кипіння – 2730°С, густина – 8900 кг/м<sup>3</sup> [4-7].

У хімічному відношенні нікель належить до малоактивних металів, володіє високою корозійною стійкістю в атмосфері повітря, морській воді, не руйнується у воді та багатьох агресивних середовищах (наприклад, лугах). За підвищеної температури (500 °С і більше) окислюється досить енергійно.

Світові ресурси нікелю за даними Геологічної служби США оцінюють близько 600 млн. т, щорічне видобування з надр – 60 млн. т [1]. У рудах нікель знаходиться у складі хімічних сполук разом з кобальтом, арсеном, залізом, сіркою та ін. У сульфідних мідно-нікелевих рудах міститься від 0,3 % до 5,5 % нікелю. В окислених нікелевих рудах, що надходять на переробку, вміст нікелю складає від 0,9 % до 1,5 % [4]. Виготовлення нікелю з природних руд є трудомістким процесом.

Металургічна промисловість виготовляє декілька марок електролітичного нікелю, що відрізняються вмістом домішок (табл. 1.1). Найбільш шкідливими домішками нікелю є сірка, кисень, вуглець. Ці домішки розчинюються в рідкому нікелі, а при кристалізації виділяються як евтектики Ni–NiS, Ni–NiO, Ni–C (графіт). Евтектика Ni–NiS плавиться за температури 645 °С та спричинює гарячеламкість металу під час обробки тиском [3,5]. Евтектики Ni–NiO, Ni–C істотно погіршують пластичність нікелю.

Хімічний склад електролітичного нікелю за ДСТУ 849 надано в табл.1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад нікелю за ДСТУ 849-2008

Марка	Ni, % не менше	Co, % не менше	Масова частка домішки, % не більше			
			C	Mg	Al	Si
1	2	3	4	5	6	7
H-0	99,985	0,005	0,005	0,001	0,001	0,001
H-1y	99,92	0,10	0,01	0,001	–	0,002
H-1	99,92	0,10	0,01	0,01	–	0,002
H-2	99,65	0,15	0,002	–	–	0,002
H-3	97,9	0,70	0,10	–	–	–
H-4	96,9	0,70	0,15	–	–	–

Продовження таблиці 1.1

Марка	Масова частка домішки, % не більше					
	P	S	Mn	Fe	Cu	Zn
1	8	9	10	11	12	13
H-0	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,0005
H-1y	0,001	0,001	–	0,01	0,015	0,0008
H-1	0,01	0,001	–	0,01	0,020	0,001
H-2	–	0,003	–	0,04	0,040	0,005
H-3	–	0,03	–	–	0,60	–
H-4	–	0,04	–	–	1,00	–

Продовження таблиці 1.1

Марка	Масова частка домішки, % не більше					
	As	Cd	Sn	Sb	Pb	Bi
1	14	15	16	17	18	19
H-0	0,0005	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003
H-1y	0,001	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
H-1	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
H-2	–	–	–	–	–	–
H-3	–	–	–	–	–	–
H-4	–	–	–	–	–	–

У чистому стані нікель використовують для захисного і декоративного покриття заліза та інших металів, для виготовлення лужних акумуляторів та як катализатор різних хімічних процесів. Нікель використовують для виготовлення різних сплавів і сталей зі спеціальними властивостями. Відомо понад 3000 сплавів, що містять нікель [3]. Так, у нафтопереробних, нафтохімічних, фармацевтичних та інших промислових процесах використовують нікелеві катализатори, у яких міститься від 3 % до 80 % нікелю [7]. Вважають, що кожного року в світі утворюється близько 150 тис. т відпрацьованих катализаторів.

Структура використання нікелю у промислово-розвинених країнах така [8], %: нержавіючі та жароміцні сталі – 30-50, конструкційні сталі – 10-15, сплави на нікелевій основі – 16-20, захисне і декоративне покриття – 10-18, чавунне і сталеве литво – 10-12, інші споживачі – 8-10.

## **1.2 Класифікація та характеристика нікелевих сплавів**

### **1.2.1 Класифікація нікелевих сплавів**

Промислові нікелеві сплави класифікують за хімічним складом і за областю застосування. За застосуванням сплави поділяють на жароміцні, жаростійкі, корозійностійкі і спеціальні (з особливими фізичними властивостями). Хімічний склад деяких нікелевих сплавів приведено в таблиці 1.2.

За хімічним складом нікелеві сплави можна поділити на п'ять груп [9]:

- 1) сплави на основі систем нікель–мідь, нікель–мідь–силіцій, нікель–мідь–олово, нікель–мідь–свинець та інші;
- 2) ніхроми;
- 3) сплави на основі системи нікель–молібден;
- 4) подвійні сплави нікелю з силіцієм, берилієм, алюмінієм і титаном;
- 5) складнолеговані жароміцні сплави.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад деяких нікелевих сплавів [3,8,9]

Сплав	Масова частка елемента*, %				
	Cr	Fe	C	Co	Ti
1	2	3	4	5	6
HM28Ж2,5Мц1,5 (монель)	–	2,0-0	–	–	–
Нікелева бронза	–	0,5-1,0	–	–	–
X20H80	20,0-23,0	–	–	–	–
X15H75Ж	15,0	5,0	–	–	–
ЖС3	14,0-18,0	–	0,11-0,16	–	1,6-2,3
ЖС6К	10,5-12,5	–	0,13-0,20	4,0-5,0	2,5-3,0
ЖС26	4,3-5,6	–	0,13-0,18	8,0-10,0	0,8-1,2
BT36Л	10,0-22,0	–	–	–	0,4-2,7
XH73МБТЮ (EN698)	13,0-16,0	–	0,08	–	2,35-2,75
XH55ВМТФКЮ (EI929)	9,0-12,0	–	0,12	12,0-16,0	1,4-2,0
Примітка: * Нікель – основа					

Продовження таблиці 1.2

Сплав	Масова частка елемента*, %				
	Cu	Al	W	Mo	інші
1	7	8	9	10	11
HM28Ж2,5Мц1,5 (монель)	27,0-29,0	–	–	–	1,2-1,8 Mn
Нікелева бронза	33,0-43,0	–	–	–	5,0-10,0 Sn 1,0 Zn 6,0-10,0 Pb
X20H80	20,0-23,0	–	–	–	0,4-1,5 Si
X15H75Ж	–	–	–	–	–
ЖС3	–	1,6-2,2	4,5-6,5	3,0-4,5	0,2-0,8 V
ЖС6К	–	5,0-6,0	4,5-5,5	3,5-4,5	–
ЖС26	–	5,5-6,2	0-12,0	0-2,0	0-1,5 Fe
BT36Л	–	3,5-5,2	0-9,0	0-4,5	0-1,1 V
XH73МБТЮ (EN698)	–	1,3-1,7	–	2,8-3,2	1,8-2,2 V
XH55ВМТФКЮ (EI929)	–	3,6-4,5	4,5-6,5	4,0-6,0	0,1 B

Сплави першої групи відрізняються високою стійкістю в багатьох реагентах (морська вода, сульфатна і органічні кислоти, розчини лугів, атмосфера пари при 350–450 °С), хорошими антифрикційними властивостями і стабільністю механічних властивостей при підвищених температурах [8]. Антифрикційні властивості покращують шляхом легування свинцем, а твердість – додаванням силіцію.

Монель (НМЖМц 28–2,5–1,5) і нікелеві бронзи – найбільш поширені сплави цієї групи. Виливки з монелей застосовують в нафтохімічному машинобудуванні для виготовлення клапанів, робочих коліс і корпусів насосів, втулок, кранів і інших деталей, що працюють в агресивних середовищах, в харчовому машинобудуванні і суднобудуванні. Нікелеві бронзи використовують для виготовлення литих втулок, корпусів відцентрових насосів, кілець, що ущільнюють, корозійностійких підшипників і інших деталей. Оптимальне відношення нікелю до олова в цих сплавах, що обмежує втрату пластичності при старінні, дорівнює 10 : 1 [4,9].

Для сплавів другої групи характерними є хороша стійкість проти окиснення і високі механічні властивості при підвищеній температурі. Їх широко використовують майже до температури 1000-1100 °С [3,9].

Сплави нікелю з хромом отримали назву ніхромів (Х10Н90, Х20Н80, Х30Н70, Х40Н60, Х50Н50 та ін.). Подвійні ніхроми і хромелі застосовують в техніці як деформовані напівфабрикати і дуже рідко використовують для фасонного лиття. Виливки виготовляють із залістистих ніхромів (ніконелей). Завдяки високій жаростійкості у середовищі окислювальних і відновних газів, виливки з цих сплавів можуть витримувати багаторазове нагрівання і охолодження без тріщин і викривлення. Їх широко застосовують для пічної арматури, захисних трубок пірометрів, деталей цементацийних установок, як нагрівальні елементи електричних печей опору та ін. [9,10].

Нікельмолібденові і більш складнолеговані сплави третьої групи добре протистоять дії неорганічних кислот і рідкого хлору. Деякі зі сплавів (з 30 % Мо і 5 % Fe) дуже стійкі у соляній кислоті будь-якої концентрації при високих



температурах [9,11,12]. Виливки зі сплавів цієї групи добре заварюються і зварюються електродами того самого складу, мають підвищену жароміцність і стійкість проти ерозії. Їх широко застосовують в хімічному машинобудуванні.

Подвійні сплави нікелю з берилієм, алюмінієм, титаном і силіцієм мають хорошу корозійну стійкість у ряді агресивних середовищ, добре чинять опір зносу (Ni–Si і Ni–Be). Виливки зі сплавів Ni–Si можна піддавати зварюванню. Сплави цієї групи застосовуються виготовлення важко навантажених деталей, що працюють на стирання при високих температурах.

Жароміцні сплави – найбільш важлива група сплавів на основі нікелю. До них відносяться складнолеговані ливарні сплави серії ЖС, ВЖЛ (ЖС3, ЖС6, ЖС6К, ЖС6У, ВЖЛ12, ЖС26, ЖС32, ЖС40 та ін.) і деформівні. Вони широко використовуються в сучасних газотурбінних двигунах. З жароміцних нікелевих сплавів виготовляють робочі лопатки і диски турбіни, що направляють лопатки, камери згорання газотурбінних двигунів, тобто деталі, що сприймають комплексну дію теплових ударів, великих відцентрових сил, окислювачів, високих температур і навантажень. Використання сучасних складнолегованих жароміцних нікелевих сплавів дозволило підвищити температуру газів на вході в турбіну з 800 °С до 1100 °С, що привело до значного підвищення потужності, зменшення витрати палива, збільшення ресурсу і надійності роботи двигунів.

За хімічним складом жароміцні сплави (табл. 1.2) відносяться до складнолегованих. Основними легуючими елементами є хром (10-25 %), алюміній (0,5-6,0 %), титан (1,0-3,0 %) [3,4].

Корозійностійкі сплави на основі нікелю не володіють жаростійкістю і жароміцністю. Нікель та мідь, що входять до складу таких сплавів, мають високу пластичність при низьких міцнісних характеристиках. Це заважає використанню корозійностійких сплавів як конструкційних матеріалів. Проте при визначеному співвідношенні концентрацій нікелю і міді підвищується міцність та твердість сплавів при збереженні їхньої пластичності та корозійної стійкості. Максимальну міцність і твердість має бінарний сплав, що містить 50 % нікелю та 50 % міді. Додаткове легування мідно-нікелевих сплавів іншими

металами підвищує механічні характеристики та надає сплавам спеціальні експлуатаційні властивості.

Мельхіор марки МН19 використовують для виготовлення художніх виробів та декоративного посуду, а сплав МН30Ж1Мц1 – для одержання трубної арматури, яка корозійностійка в морській воді. Нейзильбер марки МН15Ц20 – це сплав на основі міді, що містить 15 % нікелю і 20 % цинку, має сріблястий колір, не окислюється на повітрі, стійкий у розчинах солей і органічних кислотах [4,8]. Тому цей сплав використовують для виготовлення хімічного посуду та спеціальних корозійностійких виробів.

Сплав монель НМ28Ж2,5Мц1,5 має підвищені зносостійкість, пластичність, міцність та корозійну стійкість у кислотах і лугах. Такий сплав широко застосовується в хімічному машинобудуванні та у виробництві монет.

Кукаль марки МН13А13 є сплавом на основі міді, що містить по 13 % нікелю і алюмінію. Кукаль при гартуванні від температури 900-1000 °С і подальшому старінні за температури 500-600 °С зміцнюється дисперсійною фазою NiAl [9]. Внаслідок термічної обробки за вказаними режимами одержують корозійностійкий сплав із високими міцністю ( $\sigma_b = 640-700$  МПа) та пластичністю ( $\delta = 50$  %,  $\Psi = 67$  %) [8,11].

Нікелева бронза марки Бр08Ц1Ж1Н52 відрізняється високою корозійною стійкістю в агресивних середовищах. Використовуються також багатокomпонентні нікелеві сплави з підвищеним вмістом молібдену, що отримали назву хастелой. Існують три види таких сплавів:

- хастелой А (ЕІ 450Л) НМо21Ж19Мц3К;
- хастелой В (ЕІ 461Л) НМо28Ж6Мц3ХВдК;
- хастелой С марки НМо15Ж6Х16Мц1Вф4К, які володіють високою корозійною стійкістю в агресивних середовищах за підвищених температур [6,8,9]. З них виготовляють арматуру, ванни для збереження та транспортування сульфатної або соляної кислот.

Сплави зі спеціальними властивостями на основі нікелю застосовують переважно в електротехніці. Копель марки МН43Мц0,5, константан марки

МН40Мц1,5, хромель марок НХ9 і НХ9,5 та алюмель марки НМцАК використовують для виготовлення термоелектричних та компенсаційних дротів у контрольно-вимірювальній техніці. З таких корозійностійких сплавів у парі між собою або з міддю виготовляють термоелектричні перетворювачі (термопари), що відрізняються високою чутливістю до зміни температури в інтервалі 300-900 °С [3,5,6,10].

Нікель-кремнієвий сплав марки НК0,2 та нікель-марганцеві сплави НМц2,5 і НМц5 відрізняються низькою пружністю пари і короткочасною стійкістю до електричної дуги. Такі сплави застосовують в електролампах та для виготовлення свічок запалювання у двигунах внутрішнього згорання.

Сплав нікелю з залізом, що містить 36 % Ni, 64 % Fe, називають інвар, володіє дуже малим (на порядок менший, ніж у заліза) коефіцієнтом термічного розширення. Інвар використовують для виготовлення маятників у годинниках і в точних вимірювальних приладах [11]. Пермалой марки Н80Мо4Ж16 і суперпермалой Н79Мо5Ж16 мають низьку коерцитивну силу та залишкову намагніченість. Тому їх застосовують для виготовлення сердечників у високочастотних дроселях, трансформаторах і радіоелектроніці.

## **1.2.2 Жароміцні нікелеві сплави та їх особливості**

### **1.2.2.1 Склад і властивості жароміцних нікелевих сплавів**

Жароміцні нікель-хромові сплави належать до складнолегованих ливарних та деформівних сплавів. Вироби з таких сплавів мають підвищений ресурс роботи в умовах агресивних середовищ та високих температур (лопатки та диски авіаційних турбін, камери згорання в реактивних двигунах та ін.). Жароміцні сплави, крім нікелю і 14-23 % хрому, додатково містять 6-8 % легувальних елементів [4-6,11]. До цієї групи відносять відомі вітчизняні та закордонні марки нікелевих сплавів ВЖЛ10, ЖС-3Д, ЕІ-765Л, Німокаст 80,

Німокаст 90, Німонік 90, Німонік 95 та ін. Від ливарних нікелевих сплавів не завжди вимагається висока пластичність. Тому концентрація легувальних елементів у них може бути більшою, ніж у деформівних сплавах.

### 1.2.2.2 Жароміцні сплави для монокристалічного лиття

Для забезпечення високого рівня жароміцних властивостей при виготовленні робочих лопаток сучасних ГТД в Україні та за кордоном використовується технологія спрямованої кристалізації, що забезпечує отримання в лопатках монокристалічної структури (без меж зерен) із заданою кристалографічною орієнтацією.

В галузі створення нікелевих жароміцних сплавів у світовій практиці простежується тенденція підвищення рівня жароміцних властивостей ливарних сплавів за рахунок складнішого легування. В даний час як легуючі елементи почали використовувати дорогі Re і Ru. Використання Re і Ru як легуючих елементів подорожчає такі сплави, проте це доцільно внаслідок помітного підвищення їхньої працездатності та ресурсу [12-16].

Особливість монокристалічної структури – відсутність зерномежового зміцнення, тому в сплавах, розроблених для монокристалічного лиття, як правило, відсутні елементи (Hf, Zr), що утворюють карбіди і відповідають за зерномежове зміцнення, а вуглець зведений до технологічно можливого мінімуму (0,002-0,004 %). Сплави мають занижену масову частку хрому (до 4-6 %), тому для підвищення жаростійкості їх легують в невеликих концентраціях Hf або Y, які утворюють захисні оксидні плівки відповідно  $HfO_2$  і  $Y_2O_3$  [12,13].

Монокристалічні жароміцні сплави I покоління (ЖС30М, ЖС40, Rene N4, PWA-1480 та інші), які не містять реній, мають близько 60 % об'ємних  $\gamma'$ -фази. Порівняно зі сплавами із спрямованою структурою в них більш високі температури солідусу і сольвусу для  $\gamma'$ -фази [14].

Сплави II покоління містять Re до 3 %, об'ємна частка  $\gamma'$ -фази в них зросла до 65-74 % (ЖС36, Rene N5, PWA-1484 та інші). В 90-х роках XX ст. за

кордоном розроблено жароміцні сплави III покоління (Rene N6, CMSX-10), які містять Re до 6 % [15].

Для двигунів літаків V покоління ВІАМом (росія) була розроблена високоградієнтна технологія отримання монокристалічних сплавів, яка дозволила створити сплави із вмістом Re до 10 % (так, сплав ЖС50 містить 6 % Re; ЖС55 – 9 % Re [16-18]).

Відповідальні виливки для силових установок енергетичного та авіаційного машинобудування виготовляються з дорогих складнолегованих жароміцних нікелевих сплавів. Жароміцний нікелевий сплав ЖС26-ВИ поширено застосовують для виготовлення турбінних лопаток сучасних ГТД. Даний сплав відрізняється дуже складною системою легування і, відповідно, високою вартістю (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Хімічний склад деяких монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів [12-16]

Сплав	Масова частка елемента, %										
	Cr	Ti	Mo	W	Re	Ta	Al	Co	Nb	Hf	інші
ЖС32-ВИ	5,0	–	1,0	8,3	4,0	4,0	6,0	9,0	1,5	–	0,15 С, 0,02 В
ЖС26-ВИ	5,0	1,0	1,1	11,7	–	–	5,8	9,0	1,6	–	0,12 С, 0,015 В, 1,0 V
CMSX-10	2,0	0,2	0,4	5,0	6,0	8,0	5,7	3,0	0,1	0,03	–
TMS-138	3,2	–	2,8	5,9	5,0	5,6	5,9	5,8	–	0,1	2,0 Ru
TMS-162	2,9	–	3,9	5,8	4,9	5,6	5,8	5,8	–	0,1	6,0 Ru
Примітка. Ni – основа											

Механічні властивості сплаву ЖС26-ВИ за температури 20 °С та тривала міцність матеріалу лопатки, що випробувана на зразках виливків, отриманих методом ВШСК за технологією відповідної деталі приведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Механічні властивості сплаву ЖС26-ВИ за температури 20 °С та тривала міцність матеріалу лопатки, отриманої методом ВШСК

Механічні властивості сплаву за температури 20°С		Тривала міцність за температури 975 °С	
показник	значення	показник	значення
Тимчасовий опір $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> (кг/мм <sup>2</sup> ), не менше	830 (85)	Постійно додана напруга $\sigma$ , Н/мм <sup>2</sup> (кг/мм <sup>2</sup> )	255 (26)
Відносне подовження $\delta$ , %, не менше	6	Час до руйнування $\tau$ , годин, не менше	40
Примітка – Випробування на тривалу міцність виконувати до руйнування зразків.			

Підвищення параметрів робочого процесу, посилення умов роботи деталей двигуна та вимога до мінімізації маси змушують застосовувати для дисків компресорів та турбін найбільш складнолеговані сплави з високими характеристиками жароміцності. Зростання жароміцності сплавів у різних генераціях конструкцій ГТД наведено на рис.1.1.

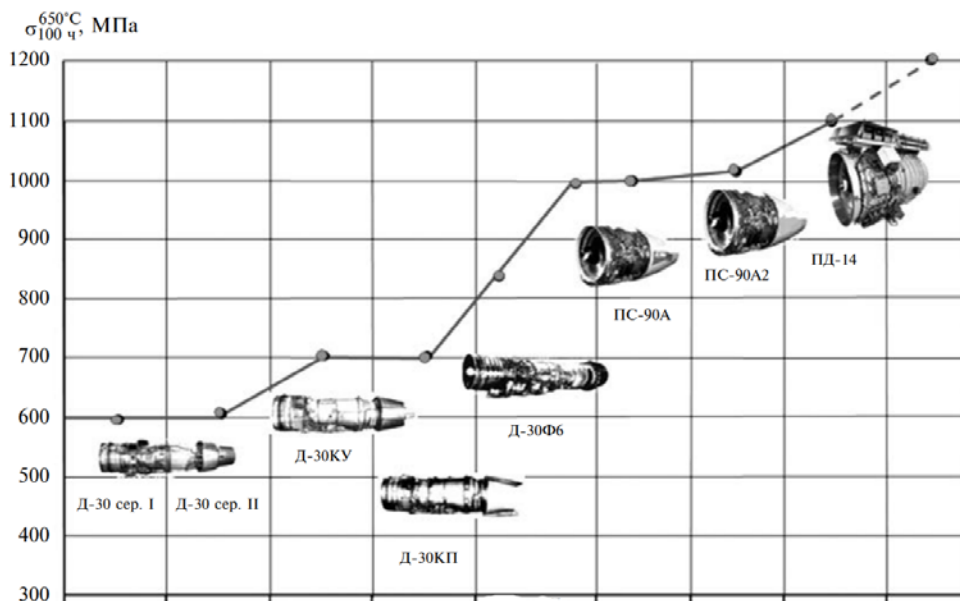


Рисунок 1.1 – Динаміка зростання жароміцності нікелевих сплавів, застосованих для виготовлення газотурбінних авіадвигунів [12]

Для виготовлення авіаційних лопаток розроблено відповідні технологічні процеси, створено унікальні промислові установки ПМП-2, ПМП-4, УВНК-8П та інші, розроблено спеціальні жароміцні сплави сплави ЖС26, ЖС32, ЖС36, ЖС40 та інші. Лопатки з монокристалічною структурою володіють підвищеними міцністними властивостями, що дозволяє підвищити ресурс експлуатації виробів у 2-3 рази порівняно зі звичайним технологічним процесом, що дозволяє отримувати лопатки з рівновісною структурою.

### 1.3 Нікелеві відходи та технології їх переробки

Зростання використання нікелю у багатьох важливих технологіях призвело до сталого зростання попиту на цей метал протягом цілого ряду десятиліть [1,2]. Такий зростаючий попит призвів до прагнення збільшити рівень переробки відходів нікелю, щоб доповнити його виробництво з рудної сировини (рис. 1.2). Тому вдосконалення переробки виробництва відходів нікелю з отриманням якісного металу або сплаву є актуальним завданням.

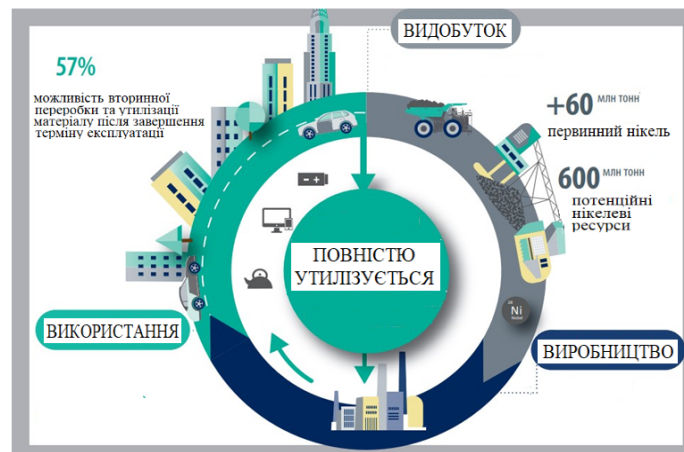


Рисунок 1.2 – Оборот нікелевих ресурсів [19]

У нафтопереробних, нафтохімічних, фармацевтичних та інших промислових процесах використовують нікелеві каталізатори, вміст нікелю у яких знаходиться в межах від 3 % до 80 % [4]. Вважають, що кожного року в світі утворюється близько 150 тис. т відпрацьованих каталізаторів.

Ресурсозбереження, яке є одним із завдань, поставлених перед вітчизняною промисловістю, можна вирішити комплексним використанням наявних джерел сировини, створенням безвідходних виробництв та технологій.

До відходів нікелевої промисловості відносяться шлаки, які повторно повертаються в металургійні процеси до максимального вилучення кольорових металів і лише після цього переходять у відвальні [5,21]. Тому нікельвмісні шлаки в процесі переробки є і вторинною сировиною, і відходами.

Шлами електролітичного рафінування нікелю є одним із основних джерел отримання платинових металів. Шлам електролізу металевих анодів, що утворюється на різних заводах, зазвичай містить 30–35 % Ni, від 0,1 % до 2 % платинових металів [3,4]. Тому переробленню шламів приділяють велику увагу. Зі шламів електролізу сульфідних анодів отримують, крім того, селен і елементарну сірку.

Шлами, що містять нікель, переробляють за різними технологічними схемами, що враховують специфіку кожного шламу. Зазвичай спочатку шлам обпалюють для окиснення сульфідів. Огарок піддають вилуговуванню в сульфатній кислоті, при цьому в розчин переходять нікель, залізо, частково мідь. Твердий залишок від вилуговування переплавляють з відновником в печах, і отриманий металевий сплав, що містить в основному мідь і платиноїди, відливають в аноди і піддають електролізу в розчині сульфатної кислоти.

Шлам сульфідних анодів містить близько 97 % елементарної сірки, 1,3 % Ni, 0,3 % Cu, 0,6 % Fe, 0,15 % Se (в елементарному стані). Шлам плавлять в котлах за температури близько 135 °С, отриманий розплав фільтрують на фільтрах, що обігриваються парою [2,4,20]. У фільтрат переходить до 95 % елементарних сірки та селену, сульфіди та платиноїди залишаються у залишку. Фільтрат піддають дробової дистиляції для поділу сірки та селену, які є супутніми продуктами переробки шламів. Залишок від фільтрації містить близько 50 % сірки, решта – метали. Цей залишок переплавляють і відливають на аноди. Ці, так звані, вторинні сульфідні аноди містять близько 50 % Ni, 20 %



Cu, 2 % Fe та 20–25 % сірки [2]. Їх піддають електролізу в тих самих умовах, що і вихідні, первинні сульфідні аноди.

Сплави на нікелевій основі і нікельвмісні сталі відіграють важливу роль у джерелі відновлюваної енергії, що розвивається, відомому як геліотермальні електростанції та електростанції, що працюють на концентрованій сонячній енергії (рис.1.3). Використання таких сплавів запобігає руйнуванню матеріалів та зниженню витрат на повне заміщення обладнання в проектах з розрахунковим терміном експлуатації до 40 років і більше [21].

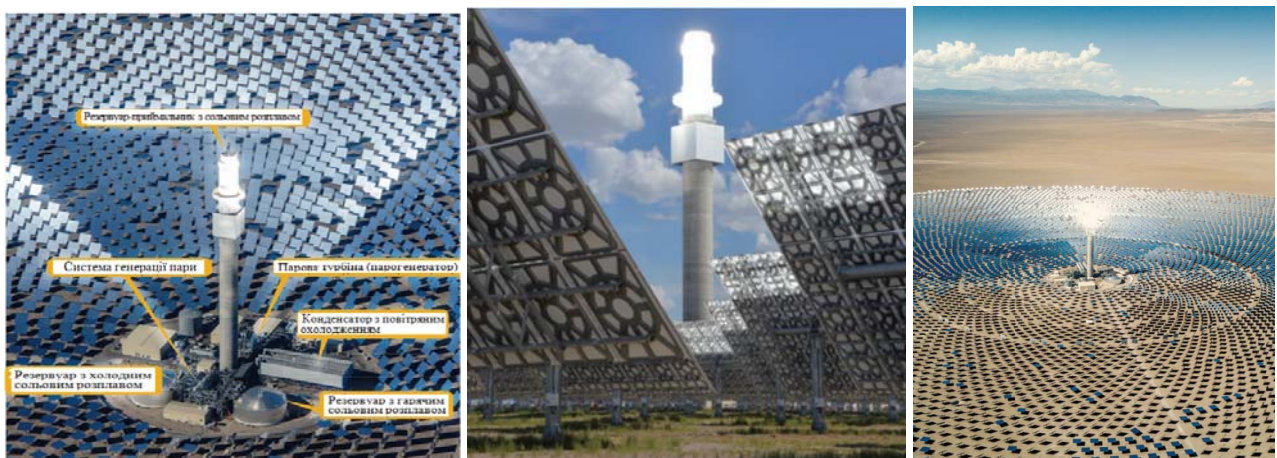


Рисунок 1.3 – Геліотермальна електростанція та електростанція Crescent Dunes (штат Невада, США) [21]

Глобальна тенденція до електрифікації транспорту продовжує набирати обертів, при цьому за останні роки у Китаї, Європі та Північній Америці було відзначено постійне зростання інвестицій у напрямки, пов'язані з акумуляторними батареями [2]. Попит на нікель для виробництва акумуляторних батарей через високі темпи зростання продажу електромобілів має стійку тенденцію зростання. Отже, по завершенні терміну експлуатації зростатиме кількість відпрацьованих акумуляторних нікельвмісних батарей, які потрібно утилізувати і повернути нікель в оборот.

Технологія переробки відпрацьованих каталізаторів на феросплави, які використовують далі для виробництва нержавіючої сталі, запроваджена компанією Tetronics International на двох власних промислових підприємствах

[6]. Феросплави отримують шляхом плазмово-дугового плавлення за постійного струму з додаванням як розкислювач коксу або антрациту. Враховуючі зростання обсягів нафтохімічних каталізаторів, що надходять на переробку, компанія прогнозує збільшення виробничих потужностей.

У промислових умовах металеві відходи нікелю зазвичай підшихтовують під час пірометалургійної переробки рудної і вторинної сировини [7]. Проте за таких умов деякі легуючі кольорові метали (наприклад, реній), що входять до складу нікелевих сплавів, повністю втрачаються з різними продуктами переробки (гази, що відходять, шлак тощо).

Для переробки кускових відходів жароміцних нікелевих сплавів, що містять Re, W, Ta та інші кольорові метали, опрацьовується електрохімічний процес, що складається з анодного окислення в кислому електроліті при накладенні постійного електричного струму (щільність струму  $250-300 \text{ mA/cm}^2$ ) з метою інтенсифікації [20-24]. Кислий розчин містить  $150 \text{ г/дм}^3 \text{ H}_2\text{SO}_4$  і  $50 \text{ г/л HCl}$  при та температурі  $20-40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Основна частина Re (більше 80 %), W, Ta, Nb (близько 99 %) переходить у тверду фазу (анодний кек). Ni, Co та деякі кольорові метали (Al, Cr) накопичуються в кислому розчині електроліту. Переробка одержаних прекурсорів з отриманням відповідних товарних продуктів відбувається шляхом вилуговування, осадження малорозчинних сполук тощо.

Створення нових авіаційних апаратів воєнного та цивільного призначення, в тому числі надзвукового перевезення пасажирів, неможливо без авіаційних газотурбінних двигунів. Розробники авіаційних двигунів намагаються підвищити температуру газу на вході газу в турбіну. Тому виникла потреба у використанні жароміцних нікелевих сплавів низької щільності для виготовлення лопаток двигунів. Під час виготовлення лопаток для авіаційних двигунів та після експлуатації двигунів утворюється значна кількість металевих нікелевих відходів – відходи та повернення ливникових систем, браковані та відпрацьовані лопатки. Такі металеві відходи нікелевих сплавів є багатоконпонентними системами, що містять до 12 легуючих і мікролегуючих

елементів [1,2,21]. Тепер створюються ресурсозберігаючі технології рафінувального вакуумного переплавлення відходів, що утворюються, таких нікелевих сплавів, які дозволять повністю повернути відходи жароміцних нікелевих сплавів у виробництво сплавів, що не поступаються сплавам, виготовленим з первинної нікелевої сировини.

#### **1.4 Технологія виплавки нікелевих сплавів**

Найважливішою умовою реалізації високих технічних і технологічних властивостей високоякісних ливарних нікелевих сплавів є технологія їх виробництва. Вона має забезпечити такі показники, як стабільність хімічного складу матеріалу у мінімально вузьких межах легування; ультранизький вміст шкідливих домішок (вуглецю, сірки, кисню, азоту), домішок кольорових металів (свинцю, вісмуту, срібла, телуру, талію та ін.) та неметалевих включень; щільну, з мінімальною кількістю дефектів усадки, будову отриманих литих пруткових (шихтових) заготовок; високий вихід придатного металу [22].

##### **1.4.1 Особливості виплавлення ливарних нікелевих сплавів**

Нікелеві сплави мають високу температуру плавлення і схильні до інтенсивної взаємодії з газами пічної атмосфери. Рідкий нікель розчиняє при 1600 °С до 0,5 % кисню, близько 2,5 % вуглецю і до 43 см<sup>3</sup> на 100 г водню [2-5]. Виділення водню при кристалізації є основною причиною газової пористості у виливках. При взаємодії з парами води відбувається одночасне забруднення нікелю киснем і воднем.

Нікель плавлять під шаром флюсу, щоб уникнути взаємодії з газами. Як флюс застосовують скло (пляшковий бій), плавииковий шпат, вапно, мелений магнезит зі склом та ін. Неприпустимо застосування деревного вугілля та гіпсу. Флюс беруть в кількості 5-10 % від маси шихти [9,12]. Він має покривати поверхню розплаву шаром завтовшки 10-15 мм.

В більшості випадків для плавлення використовують індукційні каналні і тигельні печі, які дозволяють швидко досягати потрібної температури і форсовано проводити процес. Значно рідше застосовують дугові печі. Для виплавлення нікелю, що використовують у вакуумній техніці, застосовують вакуумні індукційні тигельні печі при залишковому тиску 0,66 Па.

Футеровка плавильних печей основна або нейтральна. Черинь індукційних каналних печей із залізним сердечником набивають вогнетривкою масою, що складається з 98 % плавленого магнезиту і 2 % бури або борної кислоти. Для футеровки індукційних тигельних печей застосовують суміш, яка складається з 80 % магнезиту, 8 % рідкого скла і 12 % води [3.4,9].

Як шихтові матеріали під час плавлення чистого нікелю використовують катодний нікель Н0 і Н1, гранули нікелю і крупні нікелеві відходи власного виробництва в кількості, що не перевищує 50 % від маси шихти. Неприпустимо використовувати катодні листи з наростами на поверхні.

Спочатку в піч завантажують відходи, поверхню яких засипають флюсом. Після розплавлення металу відразу або частинами вводять катодний нікель. Листи нікелю заздалегідь розрізають на куски розміром 150x150 мм, просушують, а в деяких випадках (при великому вмісті водню) відпалюють. Плавку проводять у форсованому режимі, не допускаючи перегрівання розплаву.

При температурі розплаву 1500-1600 °С його очищають від кисню і сірки. Для цього в розплав вводять розкислювачі і десульфуризатори [2-5]. Характерною особливістю плавлення чистого нікелю є застосування комплексного розкислювача (вуглецю, силіцію, мангана, магнію). Основним розкислювачем є вуглець [9].

Після розкислювання розплав перемішують нікелевою мішалкою, витримують протягом декількох хвилин і при 1550-1650 °С заливають у форми. Щоб уникнути попадання флюсу в порожнину форми його згущують. Для цього на поверхню розплаву засипають мелений магнезит в кількості 0,2 % від маси шихти [3-5].

Під час плавлення чистого нікелю забруднені і змішані відходи нікелю

від різних плавок не використовують в шихті. Ці відходи переплавляють окремо. До плавлення всю шихту обдувають повітрям для видалення забруднень. В деяких випадках відходи протирають гасом. Плавлення проводять в індукційній канальній печі із залізним сердечником під тонким шаром флюсу (скляного бою). Домішки видаляють шляхом окиснення. Для цього поверхню розплаву частково звільняють від флюсу. Для прискорення окиснення в розплав вводять оксид нікелю або нікель з великим вмістом кисню. Домішки вигорають в наступному порядку: силіцій, магній, манган, цинк і вуглець. Кінець окиснення визначають по іскрінню металу і зламу проби. Подальше розкислення нікелю проводять лігатурою Ni–Mg, а при необхідності силіцієм і лігатурою Ni–C. Лігатуру Ni–Mg в кількості 0,06 % додають загорнутою в нікелеву фольгу при температурі розплаву 1550-1600 °C [4,5].

Ступінь розкислення визначають за допомогою технологічної проби. Для цього відливають злиток діаметром 20-22 мм в графітову виливницю. Якщо метал дає нормальну усадку, він готовий для розливання. Якщо метал «зростає», його додатково розкислюють лігатурою Ni–Mg, кількість якої беруть в два рази меншою, ніж при першому розкислюванні. Далі знову відливають пробу. При сильному окисненні металу киснем повне відновлення його проводять комплексним розкислювачем – вуглецем, силіцієм, магнієм.

Технологія плавлення жаростійких і корозійностійких нікелевих сплавів, а також жароміцних сплавів деяких марок, що використовують для виготовлення маловідповідальних деталей, аналогічна технології плавлення чистого нікелю. Сплави виготовляють у відкритих індукційних тигельних і канальних печах, електродугових печах.

Плавлення нікелевих сплавів на повітрі супроводжується окисненням і інтенсивним насиченням розплаву воднем. Ці процеси зумовлюють забруднення розплаву твердими нерозчинними включеннями оксидів летких компонентів ( $TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $BeO$  та ін.) і утворення газових раковин і пористості у виливках.

Для захисту розплаву від інтенсивної взаємодії з газами застосовують

флюси систем  $\text{CaO-CaF}_2$ ,  $\text{CaF}_2\text{-MgF}_2$ ,  $\text{MnO}_2\text{-NiO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , витрата яких складає 2-5 % від маси розплаву [2,3]. За допомогою флюсів неможливо повністю виключити розчинення водню, тому однієї з найважливіших операцій під час виплавки нікелевих сплавів є рафінування їх від розчинених газів. Цю операцію здійснюють наведенням окислювального шлаку ( $\text{MnO}_2 + \text{CuO} + \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{SiO}_2$ ) або продуванням інертними газами (аргоном або гелієм). При виплавці більшості нікелевих сплавів перевага віддається окислювачам. Необхідну кількість окислювача визначають залежно від вмісту в розплаві водню. Вміст водню рідко перевищує 1-2 % від маси розплаву [5,9]. Перед додаванням легуючих компонентів, які створюють тверді нерозчинні оксиди, нікель розкислюють манганом, вуглецем, силіцієм і магнієм окремо або спільно. Як розкислювачі використовують також титан і силікокальцій.

Для подрібнення зерна виливок і підвищення рівня їх експлуатаційних властивостей деякі жароміцні сплави модифікують присадками 0,01-0,03 % бору і 0,03-0,10 % цирконію.

Під час виплавлення нікелевих сплавів в електродугових печах першим завантажують нікель і кускові відходи. Далі під електроди вводять шлакуючу суміш (вапно з плавиковим шпатом в співвідношенні 1:1) в кількості 3-5 % від маси шихти. Суміш завантажують невеликими порціями (по 3-5 кг) для захисту розплаву від насичення вуглецем і воднем. Після розплавлення вводять лігатури і чисті метали (молібден, ніобій, вольфрам та інші) і нагрівають розплав до повного розчинення тугоплавких елементів [4]. Потім відбирають пробу на хімічний аналіз, і розплав рафінують і розкислюють. Для цього використовують розкислюючі суміші (вапно з алюмінієвим порошком в співвідношенні 1:1), які вводять з розрахунку 3-4 кг/т розплаву, додають невеликими порціями 0,25 % маргана, 0,3-0,5 % алюмінію і 0,01-0,15 % титану. При необхідності здійснюють продування розплаву інертним газом або наводять окислювальний шлак. Перед розливанням в розплав вводять присадки церію і бору.

Ніхроми, в основному, виплавляють в електродугових печах. Для

видалення водню, що поглинається розплавом, в кінці плавки наводять окислювальний шлак, який спричиняє кипіння ванни. Розчинений водень може бути видалений також продуванням розплаву аргоном. Відомо, що додавання цирконію (до 1 %) зменшує схильність ніхромів до поглинання водню. Основна умова під час плавлення ніхромів – запобігання забрудненню розплаву сіркою і вуглецем, які різко знижують експлуатаційні властивості сплавів.

Технологія виплавлення сплавів типу хастеллой (Ni–Mo–Fe, Ni–Mo–Cr–Fe, Ni–Si) аналогічна приготуванню ніхромів. Ці сплави через значний вміст молібдену менш схильні до поглинання водню. Сплави Ni–Si виготовляють за технологією, що використовується під час плавлення монель-металу.

Технологія виплавлення сплавів в індукційних тигельних печах аналогічна технології, що використовують під час виплавлення в електродугових печах. Як суміш, що шлакує, використовують суміш із 70 % вапна і 30 % плавикового шпату, яку додають на поверхню шихти в кількості 3-4 % від її маси [4,5]. Розплав розкислюють порошком алюмінію (витрата 2 кг/т) або манганом і титаном.

Монель-метал краще всього плавити в індукційних печах, оскільки в цьому випадку майже повністю можна уникнути насичення розплаву воднем. Як флюс використовують скло або суміш фторидів кальцію і магнію. При виготовленні сплаву з чистих металів і власних відходів спочатку завантажують нікель, мідь, залізо, відходи та ін. Після повного розплавлення завантажених матеріалів температуру розплаву піднімають до 1450-1500 °С і вводять манган. Для розкислювання розплаву використовують лігатуру Ni–C. Вуглець зазвичай вводять в кількості 0,1-0,15 % [2]. Після нетривалої витримки перед початком розливання додають до 0,3 % магнію.

Сплави Ni–Ti і Ni–Be (3 %) виготовляють в індукційних тигельних печах. Спочатку під шаром флюсу (скло, вапно) розплавляють нікель, далі розплав перегрівають до 1600 °С і рафінують силіцієм і манганом в кількості 0,1 % від маси шихти. Титан і берилій додають далі лігатурами або в чистому вигляді.

Розплав ретельно перемішують, витримують протягом 5-10 хвилин і заливають у форми.

Серед усіх сплавів на основі нікелю найбільш складними у приготуванні є термоелектродні сплави – хромель і алюмель. Складність полягає в необхідності дотримувати вузькі інтервали за хімічним складом, оскільки термоелектрорушійна сила (термoe.д.с.) у істотно залежить від хімічного складу. Термоелектродні сплави, як правило, готують в індукційних каналних печах з магнезитовою футеровкою. Для цих сплавів також можна застосовувати й тигельні печі, в тому числі і вакуумні.

Для виготовлення сплаву хромель приймають наступний порядок завантаження і розплавлення шихти. В рідку ванну вводять велику частину хрому, не довантажуючи 1-2 кг для подальшого коректування складу сплаву за результатами визначення термoe.д.с. [5,9]. Потім завантажують нікель і відходи. Одночасно засипають флюс в кількості 10 % від маси металу. Розплавлення шихти здійснюють по можливості у форсованому режимі. Для розкислення сплаву вводять 0,12-0,15 % мангана і 0,06 % магнію. Коректування складу сплаву за вмістом хрому виконують за результатами визначення термoe.д.с.

Виплавлення інших термоелектродних сплавів здійснюють аналогічним чином. Деяка відмінність в технології плавлення полягає в порядку завантаження складових шихти і розкислення сплавів. Під час виплавлення алюмелю і копелю спочатку завантажують нікель, відходи і флюс, потім алюміній, силіцій і манган. Оскільки всі ці сплави містять манган, розкислювання їх проводять магнієм, який додають в кількості 0,03 % при приготуванні алюмелю і 0,10 % під час виплавлення копелю [7,8]. Перед розливанням сплави коректують на вміст мангана за результатами визначення термoe.р.с.

Технологія виплавлення подвійних (Ni–Cr) і потрійних (Ni–Cr–Fe) ніхромів мало відрізняється від технології приготування хромелю. Розкислюють ці сплави манганом, титаном і силікокальцієм у кількості 0,1-0,15 % [5].



Сучасні жароміцні сплави містять 8–12 % легувальних елементів, низка елементів наявні в сплаві як домішки. Частина цих елементів (алюміній, титан та ін.) при плавленні на повітрі інтенсивно окислюється з утворенням оксидних плівок, що забруднюють метал і погіршують механічні властивості, є джерелом передчасного руйнування деталей. Плавленням на повітрі неможливо знизити вміст домішок (наприклад, силіцію, сірки тощо) до нормативного рівня. Тому для отримання виливків із сучасних жароміцних сплавів використовують пічні агрегати, в яких виплавлення нікелевого сплаву та його заливання у форми здійснюється у вакуумі. У вакуумних індукційних печах можна виплавити жароміцні нікелеві сплави практично будь-якого хімічного складу. В печах цього типу безперервної та періодичної дії плавлення та розливання металу відбувається при тиску 0,13-13,0 Па [11-16].

Виготовлення злитків з жароміцних сплавів дуплекс-процесом, який останнім часом набув найбільшого поширення, передбачає плавлення металу або на повітрі в дуговій печі, або у вакуумних індукційних тигельних печах з подальшим переплавленням його у вакуумних електродугових печах з електродом, що витрачається. Перспективними для жароміцних сплавів є різні варіанти дуплекс-процесу, в яких застосовуються електронно-променево, електрошлакове та плазмове плавлення.

#### **1.4.2 Виплавлення монокристалічних нікелевих сплавів**

Для забезпечення високого рівня жароміцних властивостей при виготовленні робочих лопаток сучасних ГТД в Україні та за кордоном використовується технологія спрямованої кристалізації, що забезпечує отримання в лопатках монокристалічної структури (без меж зерен) із заданою кристалографічною орієнтацією [25-29].

Однак навіть ця сучасна технологія не може вирішити всі проблеми, пов'язані з формуванням у виливках структури з великими дендритними та фазовими складовими, а також зі значною дендритною ліквідацією та

міждендритною пористістю, викликаними низьким температурним градієнтом на фронті росту та невисокою швидкістю охолодження в умовах існуючого промислового обладнання [10].

У зв'язку з цим для зменшення дендритної ліквідації при виробництві монокристалічних лопаток ГТД використовують складну пов'язану з можливим плавленням евтектичних фаз тривалу високотемпературну гомогенізацію, що вимагає спеціалізованого вакуумного обладнання. Зазвичай після високотемпературної термічної обробки в міждендритному просторі в місцях розчинення частинок евтектичної фази спостерігається поява пор у вигляді порожнин сферичної форми розміром 10-15 мкм, при цьому об'ємна частка пор збільшується в 10 разів.

Для вирішення проблеми суттєвого підвищення якості структури, забезпечення її однорідності, зменшення дендритної ліквідації, пористості, виключення утворення ливарних дефектів у вигляді струменевої смужкості розроблено новий процес високоградієнтної спрямованої кристалізації жароміцних сплавів (температурний градієнт 150-200 °C/см) [10].

Позитивний ефект високоградієнтної спрямованої кристалізації полягає у суттєвому зменшенні розміру рідкотвердої області на фронті кристалізації (рис. 1.4), що забезпечує підживлення розплавом основ дендритів, а це зменшує міждендритну пористість. Підвищення температурного градієнта зумовлює отримання більш однорідної, тонкодендритної структури з меншою відстанню між осями дендритів, меншим розміром евтектичних фаз, у 1,5 раза меншою дендритною ліквідацією [20]. Останнє дуже важливо для сучасних ренійвмісних сплавів, оскільки реній має малу дифузійну рухливість і навіть тривала високотемпературна гомогенізація (за температур більше 1300 °C і протягом понад 20 год) не забезпечує усунення ліквідації ренію всередині дендритних осередків.

В монокристалічних виливках границі зерен, тобто можливі місця зародження тріщини і руйнування, відсутні. Подрібнення частинок  $\gamma'$ -фази, поліпшення їх розподілу і, як наслідок, підвищення експлуатаційних

характеристик, досягають за допомогою гомогенізації [25]. Також створення в ГЦК-сплавах низько модульної кристалографічної структури в напрямку кристалізації, забезпечує високі механічні властивості та підвищує опір термічній втомі лопаток газових турбін.

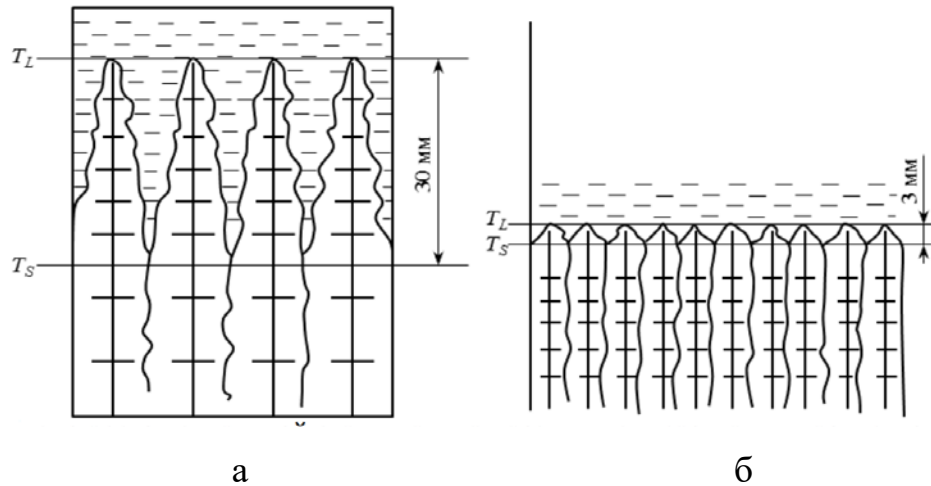


Рисунок 1.4 – Схема фронту кристалізації в умовах дендритного зростання при спрямованій кристалізації з температурним градієнтом  $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{см}$  (а) та  $200\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{см}$  (б) [20]

Для отримання у виливках монокристалічної структури в рідині біля границь розділу «*m-p*» необхідно підтримувати позитивний температурний градієнт впродовж усього процесу кристалізації. Вимоги до матеріалу виливниці та вакууму, а також до режимів постачання і регулювання енергії в процесі монокристалічної кристалізації є більш жорсткими порівняно з методами стовпчастої кристалізації. При цьому процес тверднення триває довше і, отже, створюється більше умов для взаємодії між металом і виливницею. До оптимальних умов отримання монокристалічної структури належать [26,27]:

- плоский фронт росту кристалізації в макроскопічному масштабі;
- положення фронту кристалізації відносно нагрівача повинно бути незмінним.

Для отримання монокристалічних лопаток для газотурбінних двигунів у промисловості використовують два основні методи:

- беззатравочні методи, до яких відносять метод селекторів (кристаловідводів) – з декількох утворених стовбчастих кристалів для подальшого росту обирається тільки один [26];

- метод затравок – монокристалева заготовка (затравка) з необхідною кристалографічною орієнтацією встановлюється в нижній частині ливарної форми [27].

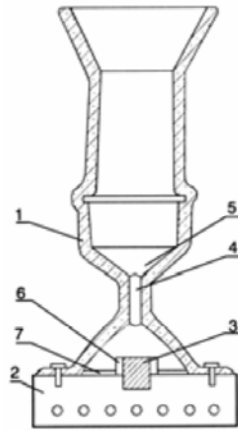
Ці методи мають багато технологічних варіантів, проте засновані на принципі методу Бріджмена: охолодження нижньої частини форми і підігрівання її в зоні вище лінії фронту кристалізації сплаву [10]. Устаткування для отримання спрямованої кристалізованих і монокристалічних виливків принципово не відрізняються.

Метод затравки. Процес формування монокристалічної виливки складається з таких трьох стадій: зародження монокристалічної структури; підведення структури до порожнини форми, яка використовується для отримання виливка; формування монокристалічного виливка.

Ливарну форму без днища встановлюють на водоохолоджувальний холодильник, в якому є спеціальне поглиблення для затравки циліндричної форми (рис. 1.5). Над затравкою діафрагма сполучається з конусом. При заливанні розплаву торець затравки підплавляється і монокристалічна структура передається до виробу. Кристали зростають як від затравки, так і від поверхні холодильника. Один кристал, що зростає від затравки, входить у діафрагму, а решта кристалів відсікається.

Для забезпечення контакту розплаву з торцем, надійності передачі структури та сповільнення зародження та зростання кристалів від поверхні холодильника затравку виготовляють з керамічною оболонкою, а на поверхні холодильника розташовують керамічну пластину.

Основною вимогою до матеріалу затравок є досконала його структура із строго регламентованим кристалографічним орієнтуванням, що досягається за допомогою спеціальних технологій [28]. Затравки поділять на дві групи [29].



1 – керамічна форма; 2 – холодильник; 3 – затравка; 4 – діафрагма;  
5 – конус; 6 – керамічна оболонка; 7 – керамічна пластина

Рисунок 1.5 – Схема ливарної форми для отримання монокристалічної лопатки від затравки [27]

До першої групи відносять затравки, що працюють в режимі підплавлення. Виготовляють затравки з того самого нікелевого сплаву, що й виливки, а також із сплавів системи Ni–W та чистого нікелю. Верх затравки розплавлюється на глибину 5-10 мм, а низ залишається нерозплавленим.

Затравки другої групи працюють в режимі розчинення. У такому разі температура плавлення затравки має бути вищою за температуру плавлення сплаву виливка. Для виготовлення затравок використовують чистий нікель, сплави системи Ni–W з температурою плавлення до 1510 °С, сплав Ni–Re з температурою плавлення до 1610 °С. Найчастіше використовують затравку із сплаву Ni–W, що містить 33% W, має температуру плавлення близько 1510 °С та інтервал кристалізації близький до нуля [28,29]. При заливанні розплав відбувається змочування і розчинення торця затравки розплавом основного сплаву і структура затравки передається основному сплаву. Висота затравки залежить від швидкості розчинення. Мінімальна висота становить 0,6-1,0 мм; для зручності роботи їх висота вибирається 2,0-2,5 мм [28].

Таким чином, метод затравок є більш трудомісткий порівняно з беззатравочними методами. Проте метод затравок дозволяє отримувати монокристали будь-яких заданих орієнтувань як в аксіальному, так і

азимутному напрямках.

### **1.5 Напрями ресурсозбереження нікелевих сплавів**

Жароміцні нікелеві сплави типу ЖС відрізняються дуже складною системою легування і, відповідно, високою вартістю. Сучасні економічні умови вимагають зниження собівартості будь-якого виробу із збереженням рівня його експлуатаційних властивостей та надійності.

Одним із напрямів ресурсозбереження є розробка нових сплавів, що відповідають не лише високим експлуатаційним, але й економічним вимогам. При цьому мають високу корозійну стійкість, внаслідок чого на лопатки не потрібно додатково наносити корозійне покриття [15,26]. Однак створення нових сплавів з новим хімічним складом, властивостями і підвищеними характеристиками порівнянно із застосованими сплавами є досить тривалим й витратним процесом, оскільки тісно пов'язано зі створенням нових технологій, вибиранням нового устаткування тощо, також на цьому шляху можливо трапляння невдалих випробувань, коли очікувані результати не виправдовуються.

Іншим перспективним шляхом зниження вартості виливків із жароміцних нікелевих сплавів є використання в шихті технологічних відходів власного виробництва.

#### **Висновки.**

1. Проаналізовано технології переробки відходів виробництва і споживання нікелю із залученням їх у замкнутий цикл. Встановлено, що технології рафінувального вакуумного переплавлення металевих відходів нікелевих сплавів, що утворюються, дозволять повернути відходи жароміцних нікелевих сплавів у виробництво сплавів, що не поступаються сплавам, виготовленим з первинної нікелевої сировини.

2. Проаналізовано технологічні особливості виплавлення нікелевих сплавів. Встановлено, що останнім часом для виготовлення злитків з

жароміцних сплавів поширення отримала схема дуплекс-процесу. Перспективними для жароміцних нікелевих сплавів є різні варіанти дуплекс-процесу, в яких застосовуються електронно-променеве, електрошлакове та плазмове плавлення. У вакуумних індукційних печах можна виплавити жароміцні нікелеві сплави практично будь-якого хімічного складу.

3. Проаналізовано технології та обладнання, що застосовують для виплавлення жароміцних нікелевих сплавів із залученням до шихти металевих відходів жароміцних нікелевих сплавів. Встановлено, що для виготовлення авіаційних лопаток розроблено відповідні технологічні процеси, створено унікальні промислові установки ПМП-2, ПМП-4, УВНК-8П та інші, розроблено спеціальні жароміцні сплави ЖС26, ЖС32, ЖС36, ЖС40 та інші. Лопатки з монокристалічною структурою володіють підвищеними міцністними властивостями, що дозволяє підвищити ресурс експлуатації виробів у 2-3 рази порівняно зі звичайним технологічним процесом, що дозволяє отримувати лопатки з рівновісною структурою.

4. Проаналізовано особливості технології отримання монокристалічних нікелевих виливків. Встановлено, що затравку виготовляють із сплавів системи Ni-W, чистого нікелю та з того самого нікелевого сплаву, що й виливки. Як середовище для кристалізації монокристалічних нікелевих виливків використовують рідкий алюміній.

*Завдання для експериментального дослідження:*

1. Експериментально дослідити технологію виплавлення жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВИ із залученням до шихти металевих відходів жароміцних нікелевих сплавів власного виробництва.

2. Експериментально дослідити хімічний склад і механічні властивості нікелевого сплаву ЖС26-ВИ на зразках, виготовлених із додаванням до складу шихти металевих відходів жароміцних нікелевих сплавів власного виробництва.

## 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Характеристики вихідних матеріалів і отриманих продуктів

У якості металевих відходів жароміцних нікелевих сплавів для дослідження використовуються технологічні відходи власного виробництва авіаційних лопаток із нікелевого сплаву ЖС26-ВИ: забраковані виливки та елементи литникової системи – колектори, чаши, прибутки, стояки (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Металеві відходи жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВИ

Розрізняють такі різновиди технологічних відходів:

– первинне повернення – повернення першого переплаву вихідного сплаву;

– вторинне повернення – повернення переплаву вихідного сплаву та первинного повернення.

Первинне повернення маркують червоною незмивною водою фарбою, а вторинний – синьою незмивною водою фарбою.



Вимоги до технологічних відходів як шихтового матеріалу:

- кожний вид відходів має містити повернення тільки відповідного виду, тобто первинне – тільки первинні, вторинне – тільки вторинні;
- відповідати марці сплаву за хімічним складом згідно ТУ 1-92-177 (табл 2.1) та за механічними властивостями і випробуваннями на тривалу міцність встановленим вимогам (табл. 2.2);
- відповідати вимогам за вмістом вуглецю у шихтовій заготовці, що зазначається технологічним процесом плавлення шихтових матеріалів;
- не повинен містити включення керамічних стрижней, оболонок, продуктів вилуговування або травлення;
- мати відповідне маркування і відмітні мітки (для сплаву ЖС26-ВИ – 6 надрізів).

Таблиця 2.1 – Хімічний склад зразків, що досліджуються, із жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВИ

Сплав	Масова частка елемента, %											
	C	Cr	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	V	Ta	Re	B
ЖС26-ВИ	0,12	5,0	9,0	5,8	1,0	1,1	11,7	1,6	1,0	–	–	0,015
Примітка. Ni – основа												

## 2.2 Характеристика обладнання для виплавлення лопаток із жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВИ

Для відпрацювання промислової технології отримання лопаток для авіаційних ГТД, силових енергетичних установок та відповідальних виливків інших деталей із спеціальних жароміцних сплавів застосовують вакуумну установку УВНК-8П (рис. 2.2) для високошвидкісної спрямованої кристалізації при високих термічних градієнтах.

Установка УВНК-8П є установкою напівбезперервної дії. Установки даного типу призначені для застосування на дослідних виробництвах для отримання експериментальних виливків та машинобудівних заводах.

Таблиця 2.2 – Механічні властивості сплаву ЖС26-ВИ за температури 20 °С та тривала міцність матеріалу лопатки, що випробується на зразках виливки, отриманих методом ВШНК за технологією відповідної деталі

Механічні властивості сплаву за температури 20°С		Тривала міцність за температури 975 °С	
показник	значення	показник	значення
Тимчасовий опір $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> (кг/мм <sup>2</sup> ), не менше	830 (85)	Постійно додана напруга $\sigma$ , Н/мм <sup>2</sup> (кг/мм <sup>2</sup> )	255 (26)
Відносне подовження $\delta$ , %, не менше	6	Час до руйнування $\tau$ , годин, не менше	40
Примітка – Випробування на тривалу міцність виконувати до руйнування зразків.			



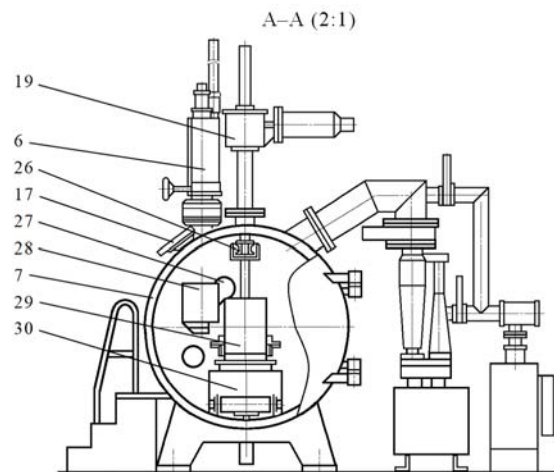
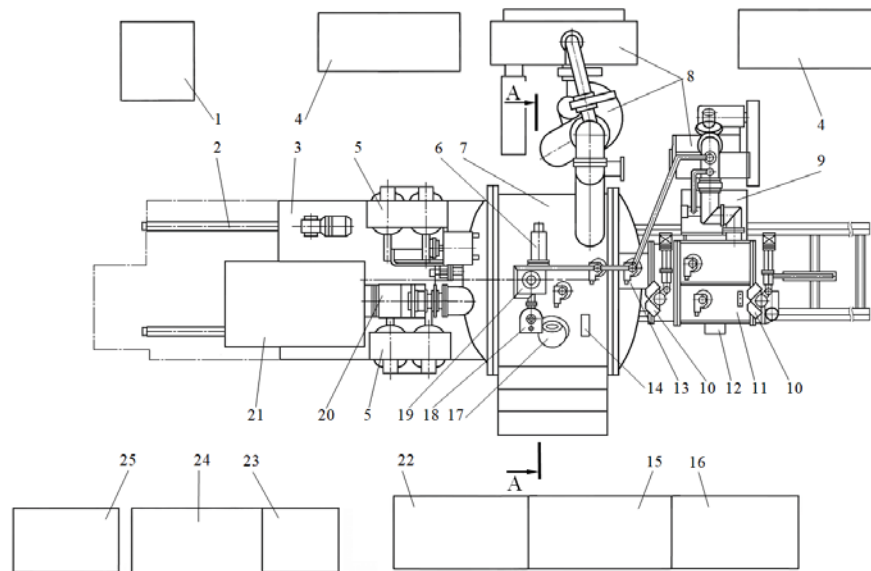
Рисунок 2.2 – Загальний вигляд установки УВНК-8П

Основні характеристики установки УВНК-8П наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Основні характеристики установки УВНК-8П [25]

№ п/п	Показники	Значення
1	Потужність живильної мережи, кВт	380
2	Потужність установки, кВт:	
	– установлена	360
	– споживана (максимальна)	250
3	Робоче середовище у плавильній камері:	
	– вакуум, Па (мм рт. ст.), не нижче	665 ( $5 \cdot 10^{-3}$ )
	– інертний газ (аргон), Па (мм рт. ст.), не більше	$3 \cdot 10^4$ (300)
4	Об'єм тиглю, кг	6
6	Об'єм кристалізатора, кг	80±5
7	Температура (максимальна), °С:	
	– металу у тиглі	1700
	– у електропечи підігріву форм	1700
	– кристалізатора	800
8	Максимальні розміри робочого простору печі підігріву форм (ширина, довжина, висота), м	0,13×0,35×0,85
9	Швидкість вертикального переміщення форм, мм/хв:	
	– під час кристалізації	1–10
	– при зворотному русі	2–170
10	Швидкість горизонтального переміщення форм, мм/хв	1500±10
11	Витрата охолоджуючої води, м <sup>3</sup> /год	4 – 6
12	Тиск охолоджуючої води, кг/см <sup>2</sup>	1,5 – 2,5
13	Рівень шуму, дБ, не більше	70 – 75
14	Габаритні розміри (довжина, ширина, висота), м	5,5x3,0x3,5
15	Маса установки, кг	3500

Принципову схему установки УВНК-8П приведено на рис. 2.3.



1 – силова шафа; 2 – рейкова колія; 3 – відкотний блок;  
 4 – система водоохолодження; 5 – пічний трансформатор;  
 6 – завантажувальний пристрій; 7 – плавильна камера;  
 8 – вакуумна система; 9 – маслосистема; 10 – двері шлюзової камери; 11 – шлюзова камера; 12 – пульт керування механізмами;  
 13 – механізм горизонтального переміщення; 14 – дублювальний пульт;  
 15 – шафа керування; 16 – шафа з електро-апаратурою;  
 17 – оглядове вікно; 18 – механізм повороту двері; 19 – механізм вертикального переміщення;  
 20 – шинопровід; 21 – конденсаторна батарея; 22 – пірометрична шафа № 1; 23 – пірометрична шафа №2;  
 24 – тиристорний перетворювач частоти; 25 – розділовий трансформатор;  
 26 – каретка; 27 – кронштейн; 28 – індукційна піч; 29 – електропіч підігріву форм; 30 – кристалізатор

Рисунок 2.3 – Принципова схема установки УВНК-8П [25]

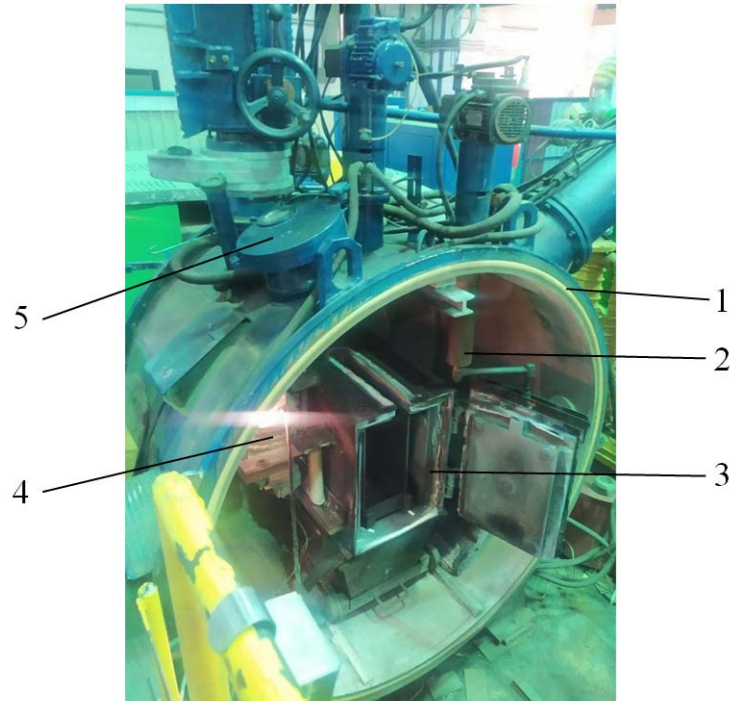
Установка УВНК-8П (рис. 2.2) складається з декількох функціональних вузлів:

- плавильна камера, в якій розміщені індукційна плавильна піч, піч підігріву форм та кристалізатор з рідкометалічним алюмінієм;
- плавильна камера, в якій розміщені індукційна плавильна піч, піч підігріву форм та кристалізатор з рідкометалевим алюмінієм;
- відкатний блок – візок з кришкою, в якій розміщені конденсаторна батарея, пічні трансформатори, коаксіальний струмопровід та кронштейни для кріплення печей;
- механізм вертикального переміщення, що забезпечує подачу блоку форм із зони нагріву та заливання в зону кристалізації із заданою постійною швидкістю;
- вакуумна система для створення в плавильній та шлюзовій камерах робочого середовища (вакуум  $665 \cdot 10^{-3}$  Па ( $5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.) або аргон з тиском  $2 \cdot 10^4$  Па (200 мм рт. ст.));
- електрочастина, призначена для живлення та керування установкою;
- система водоохолодження, призначена для запобігання перегріву вузлів установки та забезпечення заданого температурного режиму роботи.

Система комп'ютерного керування установкою забезпечує точне підтримання, регулювання, візуалізацію та зберігання всіх технологічних параметрів роботи установки (температури нагріву печей (плавильної та підігріву форм), кристалізатора; температуру та об'єм охолоджувальної води; тиск та вакуум робочого середовища (повітря); тиск та об'єм аргону та ін.), дозволяє виконувати коригування технологічних параметрів за потреби.

**Плавильна камера** (рис. 2.4) є горизонтальним водоохолоджуваним циліндром із двома торцевими кришками. До задньої торцевої кришки на кронштейнах кріпляться піч підігріву форм та індукційна плавильна піч із системою струмопідведення. До передньої кришки кріпиться шлюзова камера, що служить для завантаження та вивантаження без порушення робочого середовища в плавильній камері. У верхній частині камери розміщуються

направляюча для встановлення каретки та патрубки, через які приєднуються: механізми вертикального та горизонтального переміщення каретки, механізм повороту дверей, завантажувальний пристрій та патрубок з оглядовим вікном.



- 1 – плавильна камера; 2 – механізм повертання дверей;  
 3 – піч підігрівання форм; 4 – індукційна піч;  
 5 – патрубок із оглядовим вікном

Рисунок 2.4 – Плавильна камера установки УВНК-8П під час технологічного огляду

На бічній поверхні камери розміщено патрубки для встановлення оглядових вікон, термопарних ввідів вакуумної системи та запобіжного клапана. У нижній частині плавильної камери знаходяться рейковий шлях для переміщення чавунного кристалізатора з рідкометалевим алюмінієм та гідроциліндр, який піднімає кристалізатор для ущільнення зазору з піччю підігріву форм. Гідроциліндр наводиться в дію насосом. Плавильна камера кріпиться до фундаменту чотирма болтами.

**Шлюзова камера** призначена для передачі в плавильну камеру блоку форм для заливки сплавом та вивантаження готових виробів без порушення її

робочого середовища. Шлюзова камера складається з перехідної камери, вакуумного затвора, камери, задньої стінки, вакуумної системи, електроустаткування, гідростанції та системи водоохолодження.

**Індукційна плавильна піч** з плавильним комплектом (плавильний тигель та охоронна склянка) призначена для плавки мірної шихтової заготовки та стабілізації її в рідкому стані. Піч встановлена на кронштейні, який кріпиться до зовнішньої труби коаксіального струмопідводу. Поворот печі для зливу металу здійснюється механізмом із електроприводом постійного струму.

**Кристалізатор** призначений для розплавлення алюмінію та являє собою чавунну ємність для занурення блока форм (оболонки із залитим розплавом) для кристалізації виробів.

**Піч підігрівання форм** (рис.2.4) призначена для створення температурного режиму оболонкам, встановлена на кронштейні, який кріпиться до кришки відкатного блоку. Піч двозонна прямокутної форми з робочим простором з розмірами 0,35x0,13 м і висотою 0,35 м. Перша зона печі утворена двома бічними зигзагоподібними плоскими графітовими нагрівачами. Друга зона утворена двома фігурними графітовими нагрівачами, які включено послідовно. Висота другої зони складає 0,50 м. Встановлена потужність підігріву печі форм 200 кВт, максимальна робоча температура 1700 °С [25]. Підведення живлення здійснюється через водоохолоджувані струмопідведення від понижуючих трансформаторів типу ОСУ 100.

У нагрівачі печі підігріву форм передбачені дві зони – верхня та нижня, кожна з яких має окреме живлення від відповідного трансформатора через автоматичні вимикачі та регулятори напруги. Кожна зона нагрівача має самостійне регулювання температури.

**Термопари занурення** призначені для вимірювання температури металу в тиглі плавильної індукційної печі. Термопара поєднана із завантажувальним пристроєм та переміщається за допомогою рейкового механізму. Сигнал від термопари надходить в автоматичний потенціометр РІ. Температура форми

вимірюється термопарами занурення та записується відповідним потенціометром.

**Вакуумна система** установки УВНК складається з вакуумних систем плавильної та шлюзової камер та вакуумно-газової системи, що включає насоси, трубопроводи, засувки та систему вимірювання глибини вакууму. Вакуумно-газова система призначена для створення робочого середовища в плавильній камері: вакуум  $133 \cdot 10^{-3}$  Па ( $1 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.) або аргон з тиском  $(2-3) \cdot 10^4$  Па (200–300) мм рт. ст.).

Вакуумна система шлюзової камери складається з форвакуумного насоса НВЗ-150, плоского вакуумного затвора ЗВЕ-150, автоматичного клапана ДУ-160, байпасної лінії з клапаном ДУ-25, сільфона та системи трубопроводів.

Вакуумна система плавильної камери складається з форвакуумного насоса НВЗ-100, бустерного насоса НВБМ-2,5; трьох плоских вакуумних затворів (один ЗВЕ-250, два ЗВЕ-150), автоматичного клапана ДУ-100, системи трубопроводів, рампи РН-1н нагнітання інертного газу та моновакуумметра ЕКВМ-1. Бустерний насос приєднується до плавильної камери через пастку, що охолоджується, і вакуумний затвор ЗВЕ-250, а до форвакуумного насоса бустерний насос приєднується вакуумний затвор ЗВЕ-150, автоматичний клапан і сільфон. Автоматичний клапан перекидає форвакуумну лінію у разі відключення форвакуумного насоса від мережі.

**Система оборотного водоохолодження** установки складається із систем водоохолодження плавильної та шлюзової камер, конденсаторної батареї та тиристорного джерела. Система водоохолодження призначена для охолодження елементів конструкції установки та її комплектуючих вузлів. Подача води здійснюється з цехової мережі до колекторів конденсаторної батареї, плавильної та шлюзової камер, тиристорного перетворювача частоти. Наявність води у кожному колекторі фіксується відповідним електроконтактним манометром. З колектора плавильної камери вода надходить на охолодження наступних елементів установки: індуктора, контактної струмопідведення, штока механізму переміщення блоку форм, корпусу плавильної камери,



рідкометалічного кристалізатора, форвакуумного та бустерного насосів, печі підігріву форм та тиристорних регуляторів. Охолодження індуктора та печі підігріву форм контролюється за допомогою реле протікання та електроконтактних термометрів, а охолодження насоса та кристалізатора – за допомогою реле протікання. Припинення подачі води призводить до вимкнення цих елементів.

**Електроустаткування** установки УВНК розміщується: у шафі управління, силовій та пірометричних шафах, тиристорному перетворювачі та шафі з електроапаратурою. Органи управління обладнанням розміщені у шафі управління, на пультах управління та на пульті управління механізмами.

**Конденсаторна батарея**, що складається з десяти конденсаторів, призначена для компенсації реактивної потужності.

Для контролю режимів плавки встановлено контрольно-вимірювальні прилади: ватметр РW-33, фазометр РУ, амперметр РАJ, вольтметр РVІ. Живлення електровимірювальних приладів здійснюється від трансформаторів напруги TVI та струму ТАІ.

### **2.3 Методика дослідження виплавлення лопаток із жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВИ із застосуванням металевих нікелевих відходів власного виробництва**

Заготівки сплавів ЖС26-ВИ і ЖС26-ВИ (ЕЛП) поставляються заводом-постачальником у вигляді прутків або мірної заготівки діаметром 90 мм.

Кожну заготовку вихідної плавки, що надійшла з сертифікатом, перевіряють спектральним аналізом на аналізаторі Expert 02L на відповідність марці сплаву ЖС26-ВИ. При позитивних результатах перевірки одна із заготовок надається на виконання вхідного контролю вихідного сплаву шляхом вилівки зразків для механічних випробувань та взяття стружки для перевірки складу хімічним аналізом.

При позитивних результатах вхідного контролю (спектрального та хімічного аналізу, жароміцних та механічних випробувань) вихідна плавка запускається у виробництво. Далі проводиться порізка заготовки на відріжному верстаті вулканітом на шматки довжиною 65 мм, що відповідає вагам (масі шматків), що зазначені у подетальній технології. На шматках вихідної заготовки наноситься відмітне маркування, що відповідає даній марці сплаву, так, для сплаву ЖС26-ВИ вулканітовим колом наноситься 6 надрізів глибиною 2 мм. На торці різання кожного шматка ударним тавром наноситься номер вихідної плавки.

Шматки наважки вихідного сплаву і відходів піддають візуальному огляду. На поверхнях не допускаються оксидні плівки, шлакові включення, включення кераміки та стороннього металу. За наявності таких включень їх повністю видаляють на наждачно-точильному верстаті з подальшим очищенням шляхом галтування в галтувальних барабанах або обдування електрокорундом в закритих камерах.

Далі проводиться зважування наважок на атестованих вагах, точність зважування становить  $\pm 0,2$  кг. Розміри та вага заготовок шихтових матеріалів зазначаються подетальними технологіями.

Перед завантаженням змінна партія наважок шихтових матеріалів перевіряється на чистоту поверхні, на відповідність маси та співвідношення вихідного сплаву та нікелевих відходів вимогам технологічного процесу, на відповідність марці сплаву на вигляд (маркуванням і відмітним міткам, зразкам). Не допускаються до завантаження вологі шихтові матеріали зі слідами корозії та наявністю кераміки. За необхідності проводиться підшихтування сплаву вуглецем, для чого виконується розрахунок потрібного вмісту вуглецю в шихті і визначається недостатня кількість вуглецю.

Мірна заготовка шихтова завантажується в індукційну плавильну піч через завантажувальний пристрій установки УВНК-8П.

Після отримання виливків лопаток методом ВШСК на установці УВНК-8П блок виливків піддають термостатуванню, охолодженню і виконують

обробку виливків: звільнення виливків від керамічної оболонки вибиванням, обдування електрокорундом, відрізання виливків від литникової системи, зачищення.

Очищені виливки піддають травленню для контролю макроструктури. Макроструктура зразків має бути монокристалічною або спрямованою (кількість кристалів від 2 до 8 одиниць), допустимий нахил меж кристалів щодо поздовжньої осі зразка не більше  $10^\circ$ . Контроль кристалографічної орієнтації (КГО) виконують на дифрактометрі ДРОН-3М за методикою,

Після термообробки зразки виливок (рис. 2.5) видаються на дослідження механічних властивостей та випробування тривалої міцності.



Рисунок 2.5 – Виливок лопаток, отриманий методом ВШСК

#### **2.4 Методика визначення хімічного складу зразків нікелевих сплавів**

Кількісним спектральним аналізом нікелевих сплавів визначається вміст масової частки хрому, алюмінію, титану, заліза, молібдену, вольфраму, ванадію, ніобію, кобальту, силіцію, марганцю, танталу, ренію, гафнію у зразках сплаву.

Масову частку основних легуючих елементів и домішок визначають за градуїровочними графіками, створеними для стандартних зразках.

Градуїровочні графіки будуються у координатах  $n - c$ , де  $n$  – показання вихідного вимірювального пристрою;  $c$  – масова частка елемента у пробі.

Метод спектрального аналізу заснований на функціональній залежності відносної інтенсивності аналітичної пари спектральних ліній від величини масової частки елемента у пробі (зразку). Аналіз виконують за допомогою аналізатора сплавів Expert 02L.

Портативний спектрометр Expert 02L призначений для швидкого дослідження зразків речовин. Може працювати при низьких температурах в діапазоні від  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  і відносній вологості. Конструкція аналізатора передбачає дистанційне керування блоком виміру через заводо захищений радіоканал. Для забезпечення стабільного зв'язку прилад повинен знаходитися на місцевості в межах видимості на відстані не більше 50 м або в лабораторії.

Характеристики спектрального аналізатора сплавів Expert 02L:

- визначення хімічних елементів від магнію до урану;
- проведення автоматичної кількісної оцінки вмісту вуглецю, в діапазоні від 0,15 % до 4,0 % у відбілених чавунах та низьколегованих сталях (з вмістом нікелю менше 1,5 %);
- вимірюваний вміст елемента у діапазоні від 0,005 ppm до 100 ppm;
- межі виявлення елементів 1–10 ppm;
- тривалість аналізу від 2 с до 20 с;
- аналіз складу наночарів;
- ідентифікація марки сплавів;
- оцінка складу неметалічного речовини у вигляді таблиці хімічних сполук по заданих користувачем формулах;
- експертиза шляхом прямого порівняння спектрів різних зразків.

## 2.5 Методика дослідження кристалографічної орієнтації монокристалічних зразків нікелевих сплавів

Кристалографічна орієнтація визначається на монокристалічних зразках, у якості яких використовують стартові конуси деталей, затравки, теплети, вирізані з пера робочих лопаток, перпендикулярно до осі Z та ін. Зразки повинні бути протравленими до помітної дендритної структури (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд зразка нікелевого сплаву

Кристалографічні параметри визначають рентгеноструктурним методом на дифрактометрі ДРОН-3 (рис. 2.7).



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд дифрактометра ДРОН-3

Автоматичний рентгенівський дифрактометр ДРОН-3 призначений для дослідження загального характеру структури кристалів (фазовий склад, середній розмір зерен, механічні напруження, текстура, орієнтування зерен, якісний фазовий аналіз); отримання повного набору інтегральних інтенсивностей відбивання від монокристалів; визначення орієнтації зрізів монокристалів; вимірювання шорсткості (середньо-квадратичної) поверхні зразка; дослідження текстури кристалів різних кристалічних матеріалів. Дифрактометр має пристрої для управління рухом та запису інтенсивності рентгенівського випромінювання на комп'ютері.

Основні технічні характеристики дифрактометра ДРОН-3 [25]:

- потужність рентгенівської трубки – від 2 кВт до 60 кВт;
- прискорююча напруга – від 20 кВ до 50 кВ;
- діапазон регулювання струму анода рентгенівської трубки – від 5 мА до 40 мА;
- крок кутового переміщення детектора – не менше  $0,005^\circ$ ;
- діапазон кутів  $\Theta$ : від  $0^\circ$  до  $167^\circ$ .

## **2.6 Методика випробування зразків нікелевих сплавів на тривалу міцність**

Випробування зразків нікелевих сплавів на тривалу міцність виконуються згідно ДСТУ 10145 «Метали. Метод и випробування на тривалу міцність», що встановлює метод випробування на тривалу міцність чорних і кольорових металів та сплавів при температурі до  $1200^\circ\text{C}$ . Сутність методу полягає у доведенні зразка до руйнування під дією постійного навантаження, що розтягує, при постійній температурі.

В результаті випробування визначають межу тривалої міцності, тобто напругу, що спричинює руйнування металу за певний час випробування при постійній температурі, або (при прийнятно-здавальних та інших контрольних випробуваннях) встановлюють контрольну характеристику – час до руйнування

при заданій напрузі, яка дорівнює або перевищує норму часу, зазначену у стандартах або технічних умовах на металопродукцію.

## **2.7 Методика випробування зразків нікелевих сплавів на короткочасне розтягування**

Випробування зразків нікелевих сплавів на короткочасне розтягування виконуються згідно ДСТУ 1497 «Метали. Метод и випробування на розтягування».

Стандарт встановлює методи статичних випробувань на розтягування чорних і кольорових металів та виробів з них з номінальним діаметром або найменшим розміром у поперечному перерізі 3,0 мм та більше, для визначення при температурі  $(20\pm 5)$  °С характеристик механічних властивостей: межі пропорційності; модуля пружності; фізичної межі плинності; умовної межі плинності; тимчасового опору; відносного рівномірного подовження; відносного подовження після розриву; відносного звуження поперечного перерізу після розриву.

### **Висновки.**

1. Наведено характеристики вихідних матеріалів та обладнання для виплавлення лопаток жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВИ.

2. Описано методику дослідження виплавлення лопаток із жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВИ, методики визначення хімічного складу, структури та механічних властивостей зразків лопаток.

### 3 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

#### 3.1 Отримання відповідальних виливків із спеціальних жароміцних сплавів методом ВШСК на установці УВНК-8П

Турбінні лопатки сучасних як авіаційних, так і силових наземних установок, виготовляють, як правило, з жароміцного нікелевого сплаву ЖС26-ВИ. Виливки з цього сплаву виготовляються шляхом високошвидкісної спрямованої кристалізації на установках типу УВНК-8П. Сплав ЖС-26ВИ відрізняється дуже складною системою легування і, відповідно, високою вартістю. Сучасні економічні умови вимагають зниження собівартості будь-якого виробу зі збереженням рівня його експлуатаційних властивостей та надійності.

При відливанні турбінних лопаток авіаційних двигнів методом лиття за моделями, що виплавляються, накопичується значна кількість металевих нікелевих відходів власного виробництва у вигляді технологічних відходів, до яких належать відходи ливникових систем і браковані лопатки. У виробництві пряме застосування у шихті таких відходів без попереднього їх очищення спричинює накопичення неметалевих включень у виливках, внаслідок чого погіршуються властивості сплаву, що виплавляють, також провокує утворення дефектів у виливках. Крім того, після видалення у лужних розчинах керамічних стрижней на внутрішній поверхні бракованих лопаток залишаються сліди алюмінатів натрію та калію. Тому для залучення у виробництво металевих нікелевих відходів власного виробництва жароміцних нікелевих сплавів і отримання якісного металу опрацьовуються спеціальна високоградієнтна технологія спрямованої кристалізації та спеціальне обладнання для виплавлення монокристалічних турбінних лопаток.

Принципова технологічна схема процесу виготовлення лопаток турбини газтурбінного двигуна (ГТД) із залученням до шихти нікелевих відходів власного виробництва приведена на рис. 3.1.



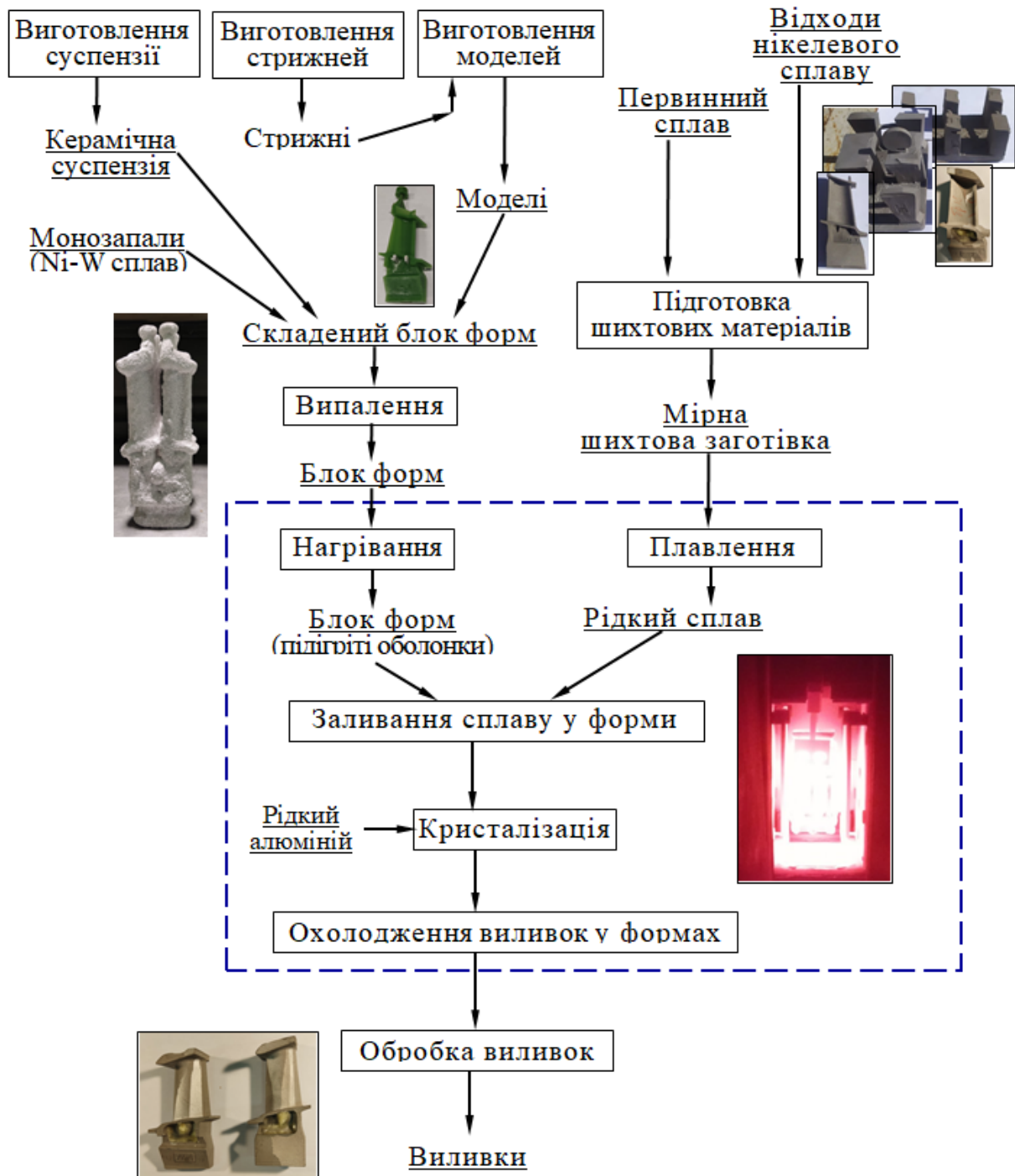


Рисунок 3.1 – Принципова технологічна схема процесу виготовлення лопаток турбини ГТД

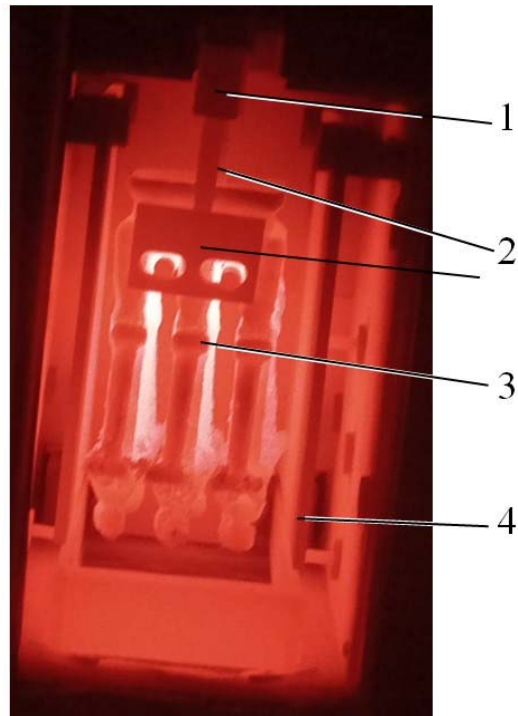
Попередньо складений блок форм відповідальних виливків підвішується на каретку та за допомогою механізму горизонтального переміщення через шлюзову камеру заковчується в електропіч підігріву форм (рис. 2.4). Після чого

електропіч закривається торцевими дверима за допомогою механізму повороту дверей.

Мірна заготовка шихтова завантажується в індукційну плавильну піч через камеру завантаження шихти, використовуючи трипелюстковий контейнер завантажувального пристрою. Початкове завантаження шихти здійснюється вручну.

Шлюзова камера приєднується до плавильної камери через перехідну камеру чотирма відкидними затискачами. У камері створюється робоче середовище – вакуум  $133 \cdot 10^{-3}$  Па ( $1 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст.) і потім вмикаються нагрівач печі підігріву форм і нагрівач рідкометалевого кристалізатора. Нагрівання печі та кристалізатора виконуються за заданими технологічним процесом режимами з відповідною швидкістю нагріву та часом витримки при заданих температурах. При досягненні температури алюмінію  $360\text{--}400$  °С вмикається індуктор для нагрівання мірної шихтової заготовки за заданим технологічним режимом і виконується розплавлення шихти та розігрівання розплаву до температури заливки у форми. При досягненні температури алюмінію  $800$  °С у кристалізаторі та заданої температури в печі підігрівання форм відкриваються передні торцеві двері печі підігрівання форм (у плавильній камері) та вакуумний затвор шлюзової камери, каретка з блоком форм переміщується за допомогою механізму горизонтального переміщення зі шлюзової камери у піч підігріву форм. Закриваються двері печі підігріву форм та вакуумний затвор, вмикається нагрівач печі підігріву форм і виконується підйом температури печі із заданою швидкістю до температури  $1500$  °С. При температурі вище за  $1520$  °С вмикається подача інертного газу (аргону) у камеру. Аргон напускається до тиску  $200$  мм рт. ст. [10,25]. Форма кристалізатора за заданою програмою розігривається до температури  $1600$  °С.

Заливання розплавленого сплаву в нагріті форми (рис 3.2) здійснюється при температурі розплаву  $(1520 \pm 10)$  °С. Час заливання розплаву у форми визначається технологічним процесом для конкретної марки сплаву.



- 1 – тигель; 2 – розплав; 3 – блок форм;  
4 – піч підігріву форм

Рисунок 3.2 – Заповнення блоку форм розплавом

Після закінчення заливання розплаву починається процес спрямованої кристалізації шляхом опускання керамічного блоку форм із залитим розплавом у кристалізатор з рідкометалічним алюмінієм із температурою 800 °С [10,25]. Глибина занурення та швидкість зпускання блоку форм задаються подетальними технологіями та підтримуються з точністю  $\pm 10\%$ . Відразу після закінчення процесу кристалізації піч підігрівання форм вимикається та виконується її охолодження (із заданою швидкістю) до температури стабілізації та витримка блоку форм з виливками. Після закінчення часу стабілізації виливків блок форм (оболонок з виливками) з максимальною швидкістю піднімається вгору у вихідне положення, відкриваються передні торцеві двері печі підігрівання форм (у плавильній камері) і вакуумний затвор шлюзової камери, каретка з блоком форм переміщається за допомогою механізму горизонтального переміщення в шлюзову камеру, де також відбувається витримка блоку форм з виливками. Потім передні торцеві двері печі

підігрівання форм (плавильної камери) і вакуумний затвор шлюзової камери закриваються, виконується розгерметизація шлюзової камери (подача повітря). Після вирівнювання тиску робочого середовища в шлюзовій камері з атмосферним відкривають задні торцеві двері плавильної камери, і каретка з блоком форм (виливків) викочується за допомогою механізму горизонтального переміщення зі шлюзової камери, каретка звільняється блоку форм із виливками і завантажується новий блок форм [25]. Після цього процес повторюється.

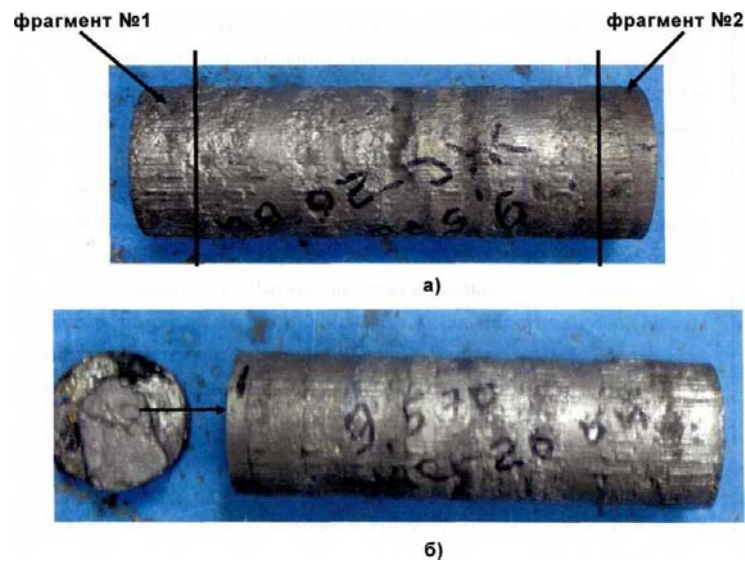
Для технологічного огляду плавильної камери та електропечей відкатний блок та шлюзова камера відкочуються у протилежні боки на відстань до 1 м.

### **3.2 Дослідження хімічного складу і структури зразків сплаву ЖС26-ВИ (ЕПП)**

Для переробки металевих нікелевих відходів жароміцного сплаву ЖС26-ВИ, які є металевими технологічними поверненнями власного виробництва, і використання їх у складі шихтової мірної заготовки виконано рафінування відходів переплавленням за електронно-променевою технологією [27]. Заготовку сплаву, отриману за такою підготовкою, умовно позначимо як ЖС26-ВИ (ЕПП). Зовнішній вигляд такої заготовки, що досліджується, нікелевого сплаву приведено на рис. 3.3.

Від двох торців штанги були відрізані темплети (№ 1 і № 2) завтовшки близько 10 мм, на яких зроблено такі дослідження:

- визначення хімічного складу спектральним методом на приладі Expert O2L;
- визначення вмісту вуглецю хімічним способом;
- мікроаналіз матеріалу для оцінювання якості мікроструктури та наявності ливарних дефектів.



- а) цельнолита заготовка;  
 б) заготовка з відрізнаним фрагментом

Рисунок 3.3 – Загальний вигляд заготовки сплаву ЖС26-ВИ (ЕПП)

Хімічний склад визначався на кожному темплеті (позначено № 1 і № 2), що відповідає верхній та нижній зонам виливки. На темплеті № 1 здійснено контроль хімічного складу у трьох зонах: у серцевині темплету та на двох діаметрально розташованих периферійних ділянках (рис. 3.4, точки 1, 2, 3).

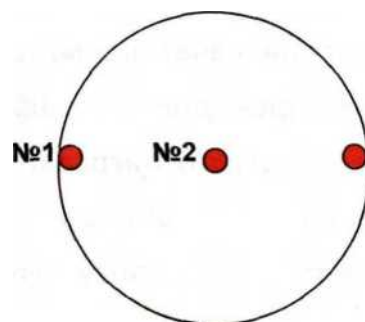


Рисунок 3.4 – Схема зон проведення спектрального аналізу на темплеті 1

Мікроаналіз виконували на оптичному мікроскопі OLYMPUS IX70 на темплетях №№ 1,2. Дослідження виконували спектральним методом на приладі

Expert O2L. Результати спектрального аналізу відрізаного фрагмента заготовки сплаву наведено у табл.3.1.

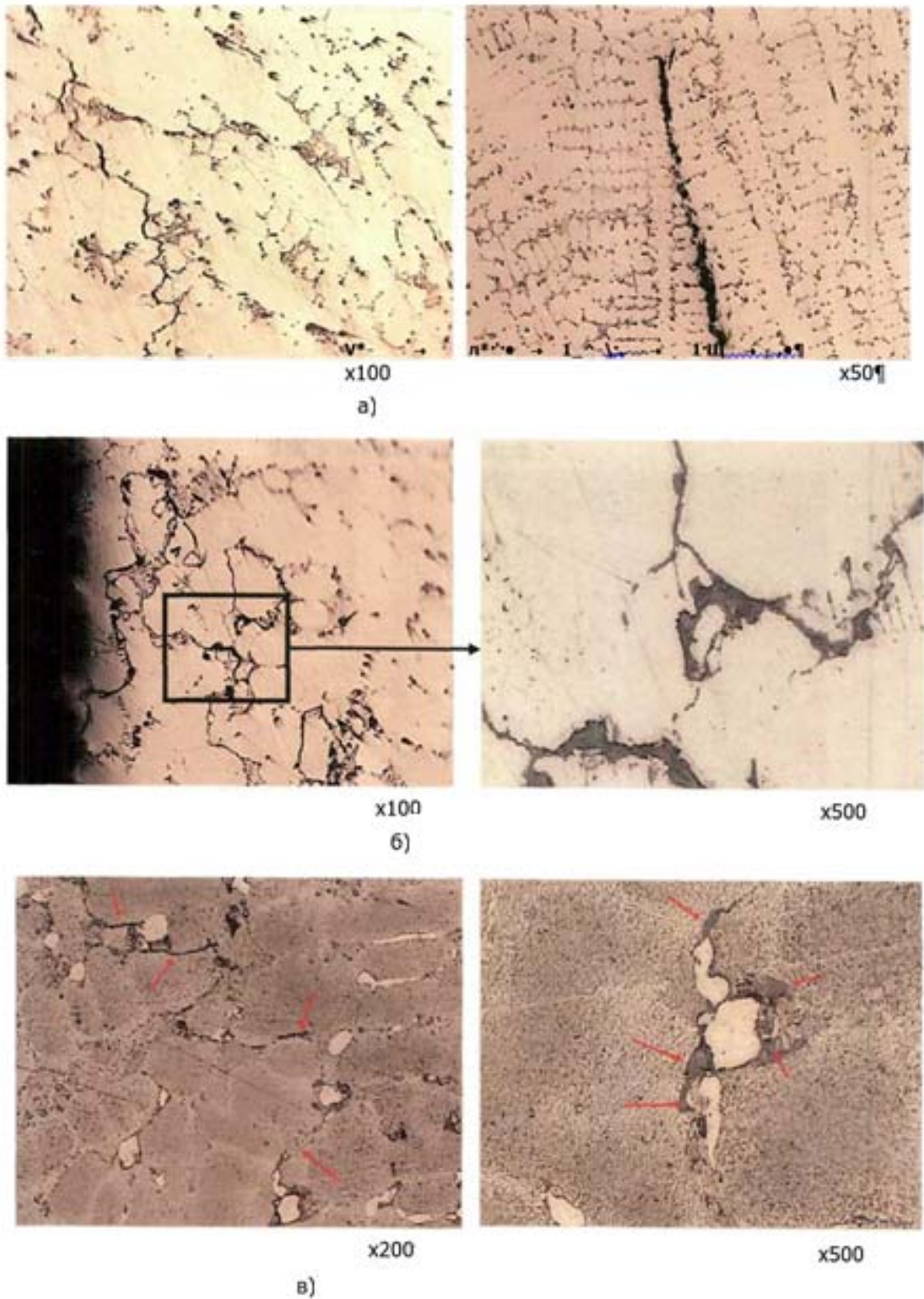
Таблиця 3.1 – Результати визначення хімічного складу відрізаного фрагмента заготовки сплаву

Зразки		Масова частка елементів, %									
		Al	Ti	V	Cr	Fe	Co	Ni	Nb	Mo	W
Темплет 1		5,88	0,82	1,12	4,30	0,50	9,43	Осн.	1,8	1,07	12,08
Темплет 2		5,92	0,62	1,17	4,416	0,46	9,50	Осн.	1,8	1,09	12,33
Фрагмент 1	т.1	5,80	0,70	1,19	4,70	0,60	9,60	Осн.	1,7	1,1	12,2
	т.2	5,80	0,76	1,17	4,90	0,60	9,50	Осн.	1,7	1,1	12,12
	т.3	5,98	0,76	1,14	4,80	0,60	9,40	Осн.	1,7	1,1	12,07
Сертифікат		5,5-6,2	0,8-1,2	0,8-1,2	4,3-5,6	<1,2	8-10	Осн.	1,4-1,8	0,8-1,4	10,0-12,5

З таблиці 3.1 видно, що хімічний склад темплетів відповідає вимогам норм Сертифікату [20] та вказує на хімічну макроднорідність злитка.

Контроль вмісту вуглецю показав, що у верхній частині злитка знаходиться в межах 0,125 %, у нижній – 0,13 %, що відповідає вимогам Сертифікату (0,13-0,18 %). Коливання вмісту вуглецю в межах одного фрагмента становить трохи більше 0,05 %.

Мікроаналіз зразків, вирізаних із вилівка переплавленого сплаву ЖС26-ВИ (ЕПП), показав, що мікроструктура сплаву характерна для сплаву ЖС26-ВИ у нетермообробленому стані, наявна нерівномірність у дисперсності та розподілі  $\gamma'$ -фази (рис. 3.5).



а – тріщини у злитку; б – плівки у злитку;

в – окислення по межах зерен

Рисунок 3.5 – Дефекти у структурі заготовки сплаву ЖС26-ВИ (ЕПП)

### 3.3 Дослідження механічних властивостей зразків сплаву ЖС26-ВИ (ЕПП)

Із використанням заготовки сплаву ЖС26-ВИ (ЕПП), який отримано шляхом електронно-променевого переплавлення металевих технологічних відходів власного виробництва, виготовлено для дослідження два варіанти шихтових композицій:

- із 50 % вихідного сплаву ЖС26-ВИ та 50 % сплаву ЖС26-ВИ (ЕПП);
- із 100 % сплаву ЖС26-ВИ (ЕПП),

та отримано виливки методом ВШСК. Виливки зразків пройшли всі технологічні операції та види контролю, передбачені технологічним процесом.

Під час контролю макроструктури зразків встановлено, що:

1) з 9 одиниць виливків, отриманих із 100 % сплаву ЖС26-ВИ (ЕПП), що надійшли на контроль, придатними за макроструктурою визнано 8 одиниць, з них 5 одиниць мають монокристалічну структуру та 3 одиниці НК-структуру, брак – 1 одиниця. Вихід придатного матеріалу за макроструктурою становив 89 %.

2) з 9 одиниць, отриманих з використанням 50 % вихідного сплаву та 50 % ЖС26-ВИ (ЕПП), що надійшли на контроль, придатними за макроструктурою визнано 9 одиниць, з них 8 одиниць мають монокристалічну структуру та 1 одиниця НК-структуру. Вихід придатного матеріалу за макроструктурою складав 100 %.

Усі виливки зразків з монокристалічною структурою мають відхилення від заданої КГО [001] до  $5^\circ$ , що відповідає вимогам технологічного процесу.

Виготовлено та видано на випробування зразки. Проведено дослідження властивостей зразків, отриманих плавленням обох варіантів шихтових композицій, на:

- $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ,  $\psi$  при кімнатній температурі;
- час до руйнування при температурі  $975^\circ\text{C}$  та навантаженні  $26\text{ кг/мм}^2$ .

Результати випробування зразків лопаток, відлитих із двох варіантів ших-



ти з додаванням у шихту переплавлених відходів власного виробництва, наведено у табл. 3.2, табл.3.3 і табл. 3.4.

Таблиця 3.2 – Результати випробування механічних властивостей зразків сплаву ЖС26-ВИ (ЕПП) за кімнатної температури

Склад шихти	Стан зразка	Номер зразка, характер мікроструктури, кут відхилення від [001]	Механічні властивості			
			$\sigma_B$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
100 % ЖС26-ВИ (ЕПП)	Виливок	И1, нк 1°	101,6	71,9	13,1	16,1
		И2, нк 1°	90,6	69,9	20,6	
		Середнє	96,1	70,9	16,8	16
	Після термообробки	И5, м 4°	119,4	71,1	15,4	15,9
		И6, м 3°	114,9	73,9	12,2	-
		И7, м 2°	115,5	70,9	12,6	-
		И8, м 3°	106,9	66,9	17,1	17,7
		Середнє	114	70,8	14,3	16,8
50 % ЖС26-ВИ (ЕПП) та 50 % вихідного ЖС26-ВИ	Виливок	И10, м 3°	118,6	84,5	11,1	12,5
		И11, м 5°	117,6	84,1	11	11,6
		И12, м 2°	111,5	83,2	11	12,9
		Середнє	116,1	84,0	11	12
	Після термообробки	И13, м 5°	114,8	82,2	11,2	-
		И14, м 1°	115,5	83,3	12,4	15
		И15, м 3°	115,8	81,6	12,2	-
		И16, м 5°	106,3	76,9	13,7	-
	И17, м 2°	113,9	80,3	13,1	16,5	
	Середнє	113,3	79,2	12,5	15,7	
ТУ на деталь	Виливок		255		≥ 6	
ТУ1-92-177-91	Після термообробки		≥ 85		≥ 8	
Примітка: И1-И17 – індивідуальні номери зразків; нк – зразок має мікроструктуру зі спрямованою кристалізацією; м – зразок має монокристалічну мікроструктуру						

На підставі аналізу даних, наведених у таблицях 3.2 – таблицях 3.4 встановлено, що:

1) властивості зразків обох варіантів виливків задовольняють вимогам ТУ1-92-177-91 на сплав ЖС26-ВИ та вимогам ТУ на деталь (турбінну лопатку),

Таблиця 3.3 – Результати випробування тривалої міцності матеріалу лопаток, виготовлених із різних шихт сплаву ЖС26-ВИ

Склад шихти	Стан зразка	Номер зразка, характер мікроструктури, кут відхилення від [001]	Тривала міцність, год
100 % ЖС26-ВИ (ЕПП)	Виливок	ИЗ, м 2°	78 год 20 хв
		И1, нк 1°	67 год 40 хв
		Середнє	73 год
	Після термо-обробки	И5, м 4°	76 год
		И6, м 3°	77 год
		И9, м 1°	77 год 15 хв
		И8, м 3°	71 год 45 хв
		Середнє	75 год 30 хв
50 % ЖС26-ВИ (ЕПП) та 50 % вихідного ЖС26-ВИ	Виливок	И10, м 3°	74 год 50 хв
		И11, м 5°	66 год 40 хв
		И12, м 2°	75 год 20 хв
		Середнє	72 год 50 хв
	Після термо-обробки	И13, м 5°	81 год 30 хв
		И14, м 1°	96 год 50 хв
		И15, м 3°	90 год 50 хв
		И16, м 5°	102 год 35 хв
		И17, м 2°	92 год 50 хв
		Середнє	92 год 48 хв
ТУ на деталь	Виливок		≥ 40
ТУ1-92-177-91	Після термо-обробки		≥ 40
Примітка: И1 - И17 – індивідуальні номери зразків; нк – зразок має мікроструктуру зі спрямованою кристалізацією; м – зразок має монокристалічну мікроструктуру. Час руйнування визначено при напрузі 26 кг/мм <sup>2</sup> та температурі 975°С.			

а за характеристиками випробування при короткочасному розриві значно вищі за норми;

2) на зразках зі 100 % сплаву ЖС26-ВИ (ЕПП) після термообробки незначно піднявся рівень властивостей межі міцності на розрив  $\sigma_B$ , тимчасового опору  $\sigma_{0,2}$  при кімнатній температурі та тривала міцність. При цьому відносне подовження виявилось дещо нижчим, а відносне звуження залишилося на тому самому рівні.

Таблиця 3.4 – Усереднені результати випробування механічних властивостей зразків із сплаву ЖС26-ВИ після ЕПП та з додаванням технологічних відходів власного виробництва

Умови виплавлення зразка	Стан зразка	Механічні властивості				
		Характер мікроструктури	Межа міцності на розрив $\sigma_B$ , кг/мм <sup>2</sup>	Тимчасовий опір $\sigma_{0,2}$ , кг/мм <sup>2</sup>	Відносне подовження $\delta$ , %	Подовження під час розриву $\Psi$ , %
100 % ЖС26-ВИ (ЕПП)	Виливок, нк	Середнє	96,1	70,9	16,8	16,0
	Після термообробки	Середнє	114	70,8	14,3	16,8
50 % ЖС26-ВИ (ЕПП) + 50 % вих. ЖС26-ВИ	Виливок, нк	Середнє	116,1	84,0	11	12
	Після термообробки	Середнє	113,3	79,2	12,5	15,7
ТУ на деталь	Виливок, нк		255		$\geq 6$	
ТУ1-92-177-91	Після термообробки		$\geq 85$		$\geq 8$	

Таблиця 3.5 – Усереднені результати випробування тривалої міцності зразків із сплава ЖС26-ВИ після ЕПП та з додаванням технологічних відходів власного виробництва

Умови виплавлення зразка	Стан зразка	Тривала міцність
		Час до руйнування зразків під дією постійно доданої наруги $\sigma = 26 \text{ кг/мм}^2$ при температурі $975 \text{ }^\circ\text{C}$ , годин
100 % ЖС26-ВИ (ЕПП)	Виливок, нк	73 год
	Після термообробки	75 год 30 хв
50 %ЖС26 ВИ (ЕПП) + 50 % вих. ЖС26-ВИ	Виливок, нк	72 год 50 хв
	Після термообробки	90 год 48 хв
ТУ на деталь	Виливок, нк	$\geq 40$ год
ТУ1-92-177-91	Після термообробки	$\geq 40$ год

### 3.4 Дослідження зламів у місцях руйнування зразків після випробування механічних властивостей зразків

Після випробування на зразках виконано такі дослідження:

- вивчення зламів за місцем руйнування під бінокулярним мікроскопом;
- мікроаналіз матеріалу на якість мікроструктури та наявності ливарних дефектів;

- визначення хімічного складу спектральним методом за основними елементами, крім вуглецю, для кожного варіанта виливків (на розривних зразках).

Мікроаналіз проводився на поздовжніх зразках у зоні руйнування із

застосуванням оптичного мікроскопа OLYMPUS IX70.

Дослідження зламів у місцях руйнування зразків під час випробування на розривання при кімнатній температурі та тривалу міцність проведено при температурі 975 °С і навантаженні 26 кг/мм<sup>2</sup>. Вигляд зламів наведено на рис. 3.6.

**а)****б)****в)****г)**

а – зразок И16, м 5; б – зразок И1, нк 1°;

в – зразок И16, м 5°; г – зразок И5, м 4°

Рисунок 3.6 – Злами у місцях руйнування зразків під час випробування на тривалу міцність (а, б) та розривання (в, г)

За результатами дослідження зламів зразків (табл. 3.6) встановлено, що руйнування зразків сталося в межах розрахункової довжини.

Таблиця 3.6 – Результати аналізу мікроструктури зразків із сплаву ЖС26-ВИ після ЕПП та з додаванням технологічних відходів власного виробництва

Умови плавлення зразка	Час до руйнування зразка, год	Зона зразка, що пошкоджена поперечними мікротріщинами, мм (рахуючи від злому)
Зразок И12, м 2° (50 % ЖС26-ВИ (ЕПП) + 50 % вихідного сплаву ЖС26-ВИ), виливок	75	1,6
Зразок И13, м 5° (50 % ЖС26-ВИ (ЕПП) + 50 % вихідного сплаву ЖС26-ВИ), після термообробки (з мінімальною жароміцністю)	81	0,8
Зразок И16, м 5° (50 % ЖС26-ВИ (ЕПП) + 50 % вихідного сплаву ЖС26-ВИ), після термообробки (з мінімальною жароміцністю)	102	3,4

Злами зразків після руйнування ідентичні для обох варіантів виливок, мають дрібнокристалічну будову без вираженої дендритності, типову для жароміцних випробувань. Виражених вогнищ руйнування, як і зон долому, немає, будова зламів однакова у всьому перерізі руйнації. Злами окислені до темно-коричневого кольору, оксидних включень чи інших ливарних дефектів не виявлено. Суттєвої різниці у будові зламів на зразках з високою живучістю та зниженою не виявлено (рис.3.6, а і б).

Злами зразків після випробування із руйнуванням є аналогічними для обох варіантів виливків, типовими для руйнування зразків з КГО [001], оксидних включень або інших ливарних дефектів не виявлено (рис.3.6, в і г).

Аналізом мікроструктури жароміцних зразків суттєвої різниці в мікроструктурі зразків, відлитих з 100 % ЖС26-ВИ (ЕПП) та у разі додавання до шихти 50 % вихідного сплаву ЖС26-ВИ не виявлено.

У литому стані структура характеризується неоднорідністю в

дисперсності та розподілі  $\gamma'$ -фази – більшою у міждендритних просторах порівняно з осями дендритів. У міждендритних областях є велика кількість  $\gamma$ -евтектики. Після термообробки структура істотно не змінилася, зокрема нерівномірність дисперсності  $\gamma'$ -фази залишилася практично на тому ж рівні. Після термообробки різниця у дисперсності  $\gamma'$ -фази дещо вирівнюється.

### 3.5 Дослідження хімічного складу виливків сплаву ЖС26-ВИ (ЕПП)

Спектральним аналізом хімічного складу металу виливків лопаток, отриманих методом високошвидкостної спрямованої кристалізації (ВШСК), встановлено, що хімічний склад обох варіантів виливків за основними елементами відповідає вимогам Сертифіката на сплав ЖС26-ВИ. Суттєвої різниці між варіантами шихтових композицій з додаванням різної кількості технологічних відходів власного виробництва не виявлено (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Порівняння результатів хімічного складу виливків турбінних лопаток, виплавлених із різних шихтових композицій

Тип зразка	Масова частка елемента, %									
	Al	Ti	V	Cr	Fe	Co	Ni	Nb	Mo	W
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
100 % ЖС26-ВИ (ЕПП), виливок	5,7	1,07	0,95	4,50	0,14	8,60	Осн.	1,76	1,06	12,75
100 % ЖС26-ВИ (ЕПП), після термо-обробки	6,1	0,90	1,10	4,25	0,17	8,65	Осн.	1,72	1,04	11,60
50% ЖС26-ВИ (ЕПП) + 50% вихідного сплаву, виливок	5,7	0,95	0,98	4,30	0,10	8,65	Осн.	1,77	1,02	11,73
50 % ЖС26-ВИ (ЕПП) + 50 % вихідного сплаву, після термообробки	5,7	0,96	1,06	4,40	0,14	8,66	Осн.	1,68	0,96	11,72

Продовження таблиці 3.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ТУ 1-92-177-91	5,6– 6,1	0,8– 1,2	0,8– 1,2	4,3– 5,3	≤0,5	8,7– 9,3	Осн.	1,4– 1,8	0,8– 1,2	11,2– 12,0
Примітка: Вуглець на даних зразках не спостерігали										

### 3.6 Організація виконання науково-дослідницької роботи

#### 3.6.1 Планування етапів науково-дослідницької роботи

Планування науково-дослідницької роботи (НДР) включає визначення складу та послідовності виконання етапів і робіт по них, їх трудомісткості, тривалості і календарних строків виконання [30,31].

У проведенні дослідження з виплавлення лопаток із сплаву ЖС26-ВИ з додаванням нікелевих відходів власного виробництва можна виділити наступні етапи, наведені в таблиці 3.8.

#### 3.6.2 Визначення трудомісткості виконання НДР

Для визначення трудомісткості запланованих робіт найбільш часто застосовується метод імовірних оцінок. Його суть полягає в тому, що безпосередній виконавець робіт оцінює максимальну  $T_{\max i}$  і мінімальну  $T_{\min i}$  трудомісткість роботи. На основі цих оцінок визначається очікувана трудомісткість  $T_{\text{оч}i}$  (чол·днів) робіт за формулою [30]:

$$T_{\text{оч}i} = \frac{3T_{\min i} + 2T_{\max i}}{5}, \quad (3.1)$$

де  $T_{\max i}$  – максимальна трудомісткість роботи;

$T_{\min i}$  – мінімальна трудомісткість роботи;



$T_{оч\ i}$  – очікувана трудомісткість.

Таблиця 3.8 – Етапи НДР з дослідження з виплавлення лопаток із сплаву ЖС26-ВИ з додаванням нікелевих відходів власного виробництва

Номер етапу	Етап НДР	Зміст етапу
1	Літературний огляд і постановка задачі	1.1 Видача завдання. 1.2 Збір, вивчення, аналіз інформації по вітчизняним й закордонним джерелам. 1.3 Узгодження й твердження мети й завдання дослідження. 1.4 Виявлення можливих напрямків дослідження. 1.5 Затвердження програми дослідження. 1.6 Вибір состава виконавців.
2	Теоретичні дослідження	Розробка методики дослідження
3	Експериментальні дослідження	Проведення досліджень з виплавлення лопаток із сплаву ЖС26-ВИ з додаванням нікелевих відходів власного виробництва
4	Узагальнення й оцінка результатів дослідження	4.1 Аналіз й обробка експериментальних даних 4.2 Виконання графічної частини
5	Завершальний	5.1 Приймання дослідницької роботи 5.2 Захист дослідницької роботи

Визначаємо трудомісткість першого етапу:

$$T_{оч1} = \frac{3 \cdot 7 + 2 \cdot 10}{5} = 8 \text{ чол.} \cdot \text{днів.}$$

Визначаємо трудомісткість другого етапу:

$$T_{оч2} = \frac{3 \cdot 6 + 2 \cdot 8}{5} = 7 \text{ чол.} \cdot \text{днів.}$$

Визначаємо трудомісткість третього етапу:

$$T_{\text{оч}3} = \frac{3 \cdot 22 + 2 \cdot 26}{5} = 24 \text{ чол.} \cdot \text{днів.}$$

Визначаємо трудомісткість четвертого етапу:

$$T_{\text{оч}4} = \frac{3 \cdot 8 + 2 \cdot 10}{5} = 9 \text{ чол.} \cdot \text{днів.}$$

Визначаємо трудомісткість п'ятого етапу:

$$T_{\text{оч}5} = \frac{3 \cdot 4 + 2 \cdot 7}{5} = 5 \text{ чол.} \cdot \text{днів.}$$

### 3.6.3 Визначення числа виконавців НДР

У таблиці 3.9 наведена кількість виконавців необхідних для виконання НДР.

Таблиця 3.9 – Кількість виконавців НДР

Номер етапу	Виконавець НДР	Кількість виконавців
1	Дослідник	1
2	Дослідник, провідний інженер	2
3	Дослідник, провідний інженер, старший науковий співробітник, лаборант-вимірник	4
4	Дослідник, провідний інженер	2
5	Дослідник	1

### 3.6.4 Розрахунок тривалості етапів НДР

Тривалість етапів дослідження  $t_{\text{оч}i}$  розраховується за формулою:

$$t_{\text{оч}i} = \frac{T_{\text{оч}i}}{P_i \cdot K_{\text{ВН}}}, \quad (3.2)$$

де  $T_{\text{оч}i}$  – очікувана трудомісткість виконання даної роботи, чол.-днів;

$P_i$  – кількість виконавців, чол.;

$K_{\text{вн}}$  – коефіцієнт виконання норми,  $K_{\text{вн}}=0,95$ .

Тривалість 1 етапу:

$$t_{\text{оч1}} = \frac{8}{1 \cdot 0,95} = 8,42 \approx 8 \text{ дн.}$$

Тривалість 2 етапу:

$$t_{\text{оч2}} = \frac{7}{2 \cdot 0,95} = 3,68 \approx 4 \text{ дн.}$$

Тривалість 3 етапу:

$$t_{\text{оч3}} = \frac{24}{4 \cdot 0,95} = 6,32 \approx 6 \text{ дн.}$$

Тривалість 4 етапу:

$$t_{\text{оч4}} = \frac{9}{2 \cdot 0,95} = 4,74 \approx 5 \text{ дн.}$$

Тривалість 5 етапу:

$$t_{\text{оч5}} = \frac{5}{1 \cdot 0,95} = 5,26 \approx 5 \text{ дн.}$$

### **3.6.5 Побудова стрічкового графіка проведення науково-дослідної роботи**

При невеликій кількості робіт з етапів і виконавців, основним документом планування виконання НДР є стрічковий графік.

Відрізком горизонтальної прямої показується тривалість етапу роботи від першого до останнього дня роботи. За розрахованими даними будемо стрічковий графік, що наведений у табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Стрічковий графік проведення науково-дослідної роботи

Етапи	Трудомісткість, чол. днів	Кількість виконавців, чол.	Тривалість етапів, днів	Виконання робіт у робочі дні																												
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
1	8	1	8	■	■	■	■	■																								
2	7	2	4					■	■																							
3	24	4	6							■	■	■	■	■	■	■	■	■														
4	9	2	5																	■	■	■	■	■								
5	3	1	3																							■	■	■	■	■	■	■

Загальна тривалість робіт склала 28 днів.

### 3.7. Розрахунок кошторису витрат на проведення дослідження

Кошторисну калькуляцію складають на весь обсяг робіт по темі. Для визначення витрат для проведення дослідження необхідно розрахувати:

- витрати на основні матеріали;
- витрати на заробітну плату;
- витрати на амортизацію використаного обладнання;
- витрати на електроенергію;
- накладні витрати.

#### 3.7.1 Розрахунок витрат на основні матеріали

У дану статтю включаються всі витрати на придбання матеріалів, покупних виробів і напівфабрикатів, необхідних для безпосереднього виконання роботи з теми.

Транспортно-заготівельні витрати  $S_{ТЗ}$  становлять 2 % від суми основних матеріалів і розраховуються по формулі:

$$S_{ТЗ} = \frac{\sum S_M \cdot 2}{100}, \quad (3.3)$$

де  $S_M$  – витрати на основні матеріали, грн.

$$S_{ТЗ} = \frac{24150,00 \cdot 2}{100} = 483,00 \text{ грн.},$$

де 24150,00 – сума витрат на основні матеріали, грн.

Витрати на основні матеріали при виконанні НДР показано в таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Розрахунок вартості матеріалів по НДР

Найменування матеріалів	Одиниця виміру	Кількість	Ціна за кг, грн	Усього витрат, грн
Алюміній	кг	80,0	180,00	14400,00
Нікелеві відходи	кг	9	760,00	6840,00
Нікель	кг	3,0	970,00	2910,00
Транспортно-заготівельні витрати				483,00
Разом				24633,00

### 3.7.2 Розрахунок витрат на амортизацію обладнання

Витрати на амортизацію  $S_{ам}$  використаного при дослідженнях обладнання визначаються за формулою:

$$S_{ам} = \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_{амі}}{100} \cdot K_i \cdot \frac{T_{др}}{T_p}, \quad (3.4)$$

де  $\alpha_{амі}$  – норма амортизаційних відрахувань для даного виду обладнання або приладу приймаємо 15 %;

$K_i$  – вартість обладнання або приладу  $i$ -го виду, грн;

$T_{др}$  – тривалість використання даного  $i$ -го виду обладнання або приладу в дослідницькій роботі, години;

$T_p$  – можливе число годин використання обладнання або приладів на протязі року.

При однозмінній роботі  $T_p$  приймається 2000 годин.

Розрахунок витрат на амортизацію обладнання й приладів наведений в таблиці 3.12.

Таблиця 3.12 – Витрати на амортизацію обладнання

Найменування обладнання	Кількість одиниць	Ціна за одиницю, грн.	Норма амортизації, %	Тривалість використання, год.	Усього, грн.
Установка УВНК-8П	1	4200000	15	24	7560,00
Мікроскоп	1	340000	15	10	255,60
Набір плавильного допоміжного інструмента	5	27000	15	24	48,60
Разом					7863,60

### 3.7.3 Розрахунок витрат на електроенергію

Вартість електроенергії  $S_e$  витраченої на проведення дослідження визначають за формулою:

$$S_e = \sum_{i=1}^N T_e \cdot N_{ci} \cdot T_{vi} \cdot m_i, \quad (3.5)$$

де  $T_e$  – тариф за кожен споживаний кВт/годину, грн;

$N_{ci}$  – середня споживана потужність  $i$ -го виду обладнання, кВт;

$T_{vi}$  – час використання  $i$ -го виду обладнання або приладу, година/цикл;

$m_i$  – кількість обладнання  $i$ -го виду, примірників.

Тариф за 1 кВт електроенергії з урахуванням ПДВ становить 2,70 грн.

Розрахунок витрат на електроенергію та природний газ наведений у таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Витрати на електроенергію та природний газ

Найменування обладнання	Кількість одиниць	Потужність, кВт	Число годин використання, год.	Тариф за 1кВт-год, грн.	Усього витрат, грн.
Установка УВНК-8П	1	250,0	24	2,70	16200,00
Мікроскоп	5	0,7	24	2,70	45,36
Разом					16245,36

### 3.7.4 Розрахунок заробітної плати й відрахувань

У розрахунок заробітної плати входять наступні статті: основна заробітна плата наукових, інженерно-технічних і допоміжних працівників, зайнятих виконанням робіт з теми; додаткова заробітна плата, що включає виплати по оплаті чергових і додаткових відпусток, на виконання державних і суспільних доручень, винагороди.

Величина заробітної плати по темі може бути розрахована за формою представленої в таблиці 5.7.

Таблиця 3.14 – Величина заробітної плати

Виконавець	Кількість, чол.	Оклад, грн.	Тривалість, дні	Оплата праці, грн.
Провідний інженер	1	18400	15	13142,86
Лаборант	1	13700	6	3914,29
Старший науковий співробітник	1	19800	6	5657,14
Разом				22714,29

Заробітна плата виконавців НДР  $Z_{\text{осн}}$  розраховується за формулою:

$$Z_{\text{осн}} = \frac{Z_{\text{окл}}}{T_{\text{міс}}} \cdot T_{\text{ет}}, \quad (3.6)$$

де  $Z_{\text{окл}}$  – посадовий оклад, грн;

$T_{\text{міс}}$  – кількість робочих днів у місяці, днів;

$T_{\text{ет}}$  – тривалість певного етапу, днів.

Заробітна плата провідного інженера  $Z_{\text{осн}}^{\text{і-к}}$ :

$$Z_{\text{осн}}^{\text{і-к}} = \frac{18400}{21} \cdot 15 = 13142,86 \text{ грн.}$$

Заробітна плата лаборанта-технолога  $Z_{\text{осн}}^{\text{л-в}}$ :



$$Z_{\text{осн}}^{\text{л-т}} = \frac{13700}{21} \cdot 6 = 3914,29 \text{ грн.}$$

Заробітна плата старшого наукового співробітника  $Z_{\text{осн}}^{\text{пл.}}$ :

$$Z_{\text{осн}}^{\text{с.н.с.}} = \frac{19800}{21} \cdot 6 = 5657,14 \text{ грн.}$$

Премія  $Z_{\text{пр}}$  становить 20 % від основної заробітної плати і розраховується за формулою:

$$Z_{\text{пр}} = \frac{Z_{\text{осн}} \cdot 20}{100}. \quad (3.7)$$

Премія виконавців НДР:

$$Z_{\text{пр}}^{\text{i-к}} = \frac{13142,86 \cdot 20}{100} = 2628,57 \text{ грн.};$$

$$Z_{\text{пр}}^{\text{л-т}} = \frac{3914,29 \cdot 20}{100} = 782,86 \text{ грн.};$$

$$Z_{\text{пр}}^{\text{с.н.с.}} = \frac{5657,14 \cdot 20}{100} = 1131,43 \text{ грн.}$$

Загальна заробітна плата виконавців НДР розраховується по формулі:

$$Z_{\text{заг}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{пр}} + Z_{\text{дод}}, \quad (3.8)$$

де  $Z_{\text{дод}}$  – додаткова заробітна плата виконавців (10 % від  $(Z_{\text{осн}} + Z_{\text{пр}})$ ).

$$Z_{\text{заг}} = 22714,29 + 2725,71 = 25440,00 \text{ грн.}$$

Нарахування на фонд оплати праці  $Z_{\text{нар}}^{\text{ФОП}}$  становить 37,5 %:

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ФОП}} = \frac{Z_{\text{заг}} \cdot 37,5}{100}. \quad (3.9)$$

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ФОП}} = \frac{25440,0 \cdot 37,5}{100} = 9540,00 \text{ грн.}$$

З них:

– у фонд державного соціального страхування  $Z_{\text{нар}}^{\text{ФДСС}}$  становить 2,5 %:

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ФДСС}} = \frac{Z_{\text{заг}} \cdot 2,5}{100}. \quad (3.10)$$

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ФДСС}} = \frac{25440,0 \cdot 2,5}{100} = 636,00 \text{ грн.};$$

– у пенсійний фонд  $Z_{\text{нар}}^{\text{ПФ}}$  становить 32 %:

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ПФ}} = \frac{Z_{\text{заг}} \cdot 32,0}{100}. \quad (3.11)$$

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ПФ}} = \frac{25440,0 \cdot 32,0}{100} = 8140,80 \text{ грн.};$$

– у фонд безробіття  $Z_{\text{нар}}^{\text{ФБ}}$  становить 1,5 %:

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ФБ}} = \frac{Z_{\text{заг}} \cdot 1,5}{100}. \quad (3.12)$$

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ФБ}} = \frac{25440,0 \cdot 1,5}{100} = 381,60 \text{ грн.};$$

– у фонд соціального страхування від нещасного випадку  $Z_{\text{нар}}^{\text{ФНВ}}$  становить 1,5 %:

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ФНВ}} = \frac{Z_{\text{заг}} \cdot 1,5}{100}. \quad (3.13)$$

$$Z_{\text{нар}}^{\text{ФНВ}} = \frac{25440,0 \cdot 1,5}{100} = 381,60 \text{ грн.}$$

### 3.7.5 Накладні витрати

Накладні витрати  $H_{\text{в}}$  становлять 40 % від фонду оплати праці:

$$H_{\text{в}} = \frac{Z_{\text{заг}} \cdot 40}{100}. \quad (3.14)$$

$$H_{\text{в}} = \frac{25440,0 \cdot 40}{100} = 10176,00 \text{ грн.}$$

### 3.7.6 Зведений кошторис витрат на проведення науково-дослідної роботи

Кошторис витрат на науково-дослідну роботу визначається на весь обсяг виконаних робіт.

Кошторис витрат наведений у таблиці 3.15.

Таблиця 3.15 – Кошторис витрат на проведення науково-дослідної роботи

Статті витрат	Усього витрат	
	грн.	%
1. Витрати на матеріали	24633,00	26,23
2. Основна заробітна плата	22714,29	24,19
3. Додаткова заробітна плата	2725,71	2,90
4. Нарахування на фонд оплати праці (37,5 %):	9540,00	10,17
– на держ. соцстрах (2,5 %)	636,00	0,68
– пенсійний фонд (32 %)	8140,80	8,67
– у фонд безробіття (1,5 %)	381,60	0,41
– у фонд соц. страхування від нещасного випадку (1,5 %)	381,60	0,41
5. Амортизаційні відрахування	7863,60	8,37
6. Витрати на електроенергію	16245,36	17,30
7. Накладні витрати	10176,00	10,84
Разом	93897,96	100,00

Для проведення науково-дослідної роботи побудовано стрічковий календарний план. Загальна тривалість виконання науково-дослідної роботи склала 28 днів. Розраховано зведений кошторис витрат на проведення науково-дослідницької роботи. Загальні витрати на проведення роботи склали 93897,96 грн.

## **Висновки.**

1. Властивості зразків обох варіантів виливків задовольняють вимогам ТУ1-92-177-91 на сплав ЖС26-ВИ та ТУ на деталі (лопатки). За результатами випробувань на короткочасне розривання зразків, отриманих із залученням нікелевих металевих відходів, встановлено, що властивості таких зразків перевищують встановлені норми.

2. Варіант шихтової композиції отримання вилівка із сплаву ЖС26-ВИ із додавання 50 % відходів вихідного сплаву має найбільш оптимальне поєднання властивостей при короткочасному розриванні та тривалій міцності.

3. Мікроструктура сплаву ЖС26-ВИ, отриманого із додаванням нікелевих відходів, суттєво не відрізняється від структури сплаву ЖС26-ВИ, отриманого методом вакуумно-індукційного переплаву та являє собою  $\gamma$ -твердий розчин, зміцнений  $\gamma$ -фазою і карбідами. У міждендритних просторах наявні значні кількості  $\gamma'$ -евтектики. У литому стані спостерігається нерівномірність щодо дисперсності та розподілу  $\gamma'$ -фази.

4. За результатами спектрального аналізу складу металу виливків турбінних лопаток, отриманих методом ВШСК, встановлено, що хімічний склад виливків, виготовлених із обох варіантів шихтових композицій, по основним елементам відповідає вимогам Сертифіката на сплав ЖС26-ВИ, суттєвої різниці між зразками не виявлено.

5. Експериментальними дослідженнями встановлено, що для виготовлення якісних виливків можна застосовувати обидва варіанти шихтових композицій, до складу яких залучають сплав ЖС26-ВИ (ЕПП), отриманий шляхом електронно-променевого переплавлення технологічних відходів власного виробництва.

## **4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА**

### **4.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих чинників, що впливають на дослідника в металургійній лабораторії**

Під час роботи в приміщенні металургійної лабораторії на людину можуть негативно впливати такі небезпечні та шкідливі виробничі чинники: а) небезпека ураження електричним струмом; б) підвищена або знижена температура повітря; в) наявність у повітрі робочої зони аерозолів металів (нікель, алюміній, оксид нікелю, оксид алюмінію); г) виробничий шум; д) підвищений рівень тепловиділення; е) наявність обертових і рухомих частин механізмів; є) недостатня освітленість робочого місця.

Під час дослідження виплавлення лопаток із сплаву ЖС26-ВИ з додаванням нікелевих відходів власного виробництва на установці УВНК-8П основними потенційними небезпеками є ураження електричним струмом. Джерелами прихованої небезпеки дії електричного струму є електроустановки. Робота електротермічного устаткування створює небезпеку теплового ураження.

Основними шкідливими чинниками під час дослідження виплавлення лопаток із сплаву ЖС26-ВИ з додаванням нікелевих відходів власного виробництва, є тепло- і газовиділення, а також неіонізуюче випромінювання. Найбільша кількість теплоти виділяється під час плавлення шихти, підігрівання блоку форм у електропечі підігрівання форм, заливання нікелевого розплаву у блок форм, розплавлення алюмінію у кристалізаторі, менша кількість тепловиділень – під час кристалізації та охолодження виливків-лопаток.

Джерелом інтенсивних тепловиділень є плавильна камера установки УВНК-8П. При проведенні експерименту температура у печі не більше 1600 °С, проте завдяки вогнетривкої кладки і кожуху печі температура поверхні печі складає близько 20 °С.

Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів та карта умов праці для робочого місця дослідника з виплавлення лопаток із сплаву ЖС26-ВИ із додаванням нікелевих відходів власного виробництва, надано в табл. 4.1 [32-35].

Таблиця 4.1 – Оцінка чинників виробничого та трудового процесу

№	Чинники виробничого середовища і процесу праці	Нормативне значення	Фактичне значення	III клас: шкідливі і небезпечні умови			Тривалість дії чинників за зміну, %
				I ступінь	II ступінь	III ступінь	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м <sup>3</sup>						
	2 клас безпеки:						
	нікель	0,5	0,3	–	–	–	35
	оксид нікелю	0,5	0,2	–	–	–	35
	3 клас безпеки:						
	алюміній	2,0	1,2	–	–	–	65
	оксид алюмінію	2,0	0,7	–	–	–	65
2	Шум, дБА	70	82	12			70
3	Неіонізуючі випромінювання: - діапазон промислової частоти, кВ/м	20	20	–	–	–	35
4	Мікроклімат в приміщенні:						
	- температура повітря, °С	18	24	–	6	–	85
	- швидкість руху повітря, м/с	0,5	0,4	–	–	–	85
	- відносна вологість повітря, %	40-60	50	–	–	–	85
5	Категорія важкості і напруженість праці	Категорія праці – середньої важкості, категорія напруженості праці – напружена					

Перевищення гранично допустимого рівня (ГДР) шуму викликає у людини підвищену втому, дратівливість. Тривалий вплив підвищеного шуму з часом може викликати ослаблення слуху. У металургійній лабораторії ГДР

еквівалентного шуму становить 70 дБА [33]. Оскільки на робочому місці фактичний рівень шуму перевищує ГПР необхідно застосовувати засоби захисту органів слуху (вкладиші протишумні або навушники).

Таким чином, проведений аналіз шкідливих і небезпечних факторів дозволяє зробити висновок про перевищення нормативного показнику по рівню шуму і температурі повітря. Показники концентрації аерозолів алюмінію, оксиду алюмінію, нікелю, оксиду нікелю не перевищують нормативних показників, їх дія відбувається протягом незначної тривалості зміни. Все це дозволяє віднести умови праці в металургійній лабораторії під час дослідження виплавлення лопаток із сплаву ЖС26-ВИ з додаванням нікелевих відходів власного виробництва до середньої важкості до Па класу. За категорією напруженості праці робоче місце слід вважати з напруженою працею.

#### **4.2 Заходи щодо усунення шкідливих і небезпечних факторів виробничого середовища**

При дослідженні особливостей виплавлення лопаток із сплаву ЖС26-ВИ з додаванням нікелевих відходів власного виробництва, для приготування нікелевих сплавів, робота, яка проводиться, пов'язана з використанням і виділенням шкідливих речовин, наявністю і використанням електричного струму, експлуатацією обладнання з підвищеною температурою. Невиконання правил безпеки може привести до отруєння шкідливими газами, травмам, ураженню електричним струмом, термічним і хімічним опікам.

Перелік шкідливих речовин, що використовуються при дослідженні, зведений у табл. 4.1. Аерозолі металів (нікелю, алюмінію та їх оксиди) проникають в організм людини крізь дихальні шляхи, шкіряні та слизові покриви. Алюміній та його оксид спричиняють на організм людини фіброгенну дію. Нікель та його оксид є алергенами, спричиняють на організм людини канцерогенну дію [32-35].

Для захисту і попередження від шкідливої дії аерозолів вказаних вище речовин слід застосовувати засоби індивідуального захисту, виконувати правила гігієни і працювати під припливно-витяжною вентиляцією.

Перелік небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які трапляються при проведенні дослідження виплавлення лопаток із сплаву ЖС26-ВИ з додаванням нікелевих відходів власного виробництва, надано в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Перелік небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Найменування шкідливого виробничого фактору	Параметр (норма)	Значення параметра на робочому місці	Характер дії на організм людини	Засоби захисту
Електричний струм	0,01А	Опір заземлення має бути не більше 10 Ом, опір ізоляції по паспорту на устаткування	Електрошок, електротравма, електроудар, термічні опіки тіла, зупинка роботи серця і дихання	Діелектричні рукавиці
Шум	70 дБА	82 дБА	Підвищена втома, дратливість, ослаблення слуху	Вкладиші протишумні або навушники
<p>Джерело: Індукційна тигельна піч, електропіч підігрівання форм, кристалізатор.            Заходи запобігання: Корпуси печей мають бути надійно заземленими.            Строго стежити за станом електроізоляції і заземлення устаткування.            Всі поверхні устаткування мають бути чистими і сухими.</p>				

Для поліпшення умов праці і захисту працюючих від теплової дії та виділення пічних газів передбачено наступні заходи: теплоізоляція, механічна вентиляція, природна аерація, спецодяг і засоби індивідуального захисту дослідників.

Для захисту від дії шкідливих хімічних речовин під час дослідів передбачена механічна вентиляція та природна аерація. На роботах зі шкідливими умовами праці, а також в особливих температурних умовах



повинні бути використаними засоби індивідуального захисту (халат, нарукавники, рукавиці гумові, рукавиці бавовняні, захисні окуляри).

### 4.3 Виробнича санітарія

Мікроклімат визначається сукупністю фізичних параметрів повітряного середовища, таких як температура, швидкість руху, вологість і барометричний тиск повітря, температура поверхонь, що оточують людину, та інтенсивність інфрачервоного випромінювання. Кількість теплоти, що утворюється в організмі людини, залежить від фізичних навантажень, а рівень тепловіддачі – від мікрокліматичних умов, переважно температури повітря.

Згідно з категорії виконуваних робіт, важкості та характеристикою приміщення щодо надлишку тепловипромінювання, з урахуванням періоду року встановлюють значення показників мікроклімату, базуючись на вимогах санітарних норм зведених в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Нормовані величини температури, відносної вологості і швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень [32-35]

Період року	Категорія робіт	Температура, °C					Відносна вологість, %		Швидкість руху, м/с	
		Оптимальна	Допустима				Оптимальна	Допустима на робочих місцях постійних і непостійних, не більш	Оптимальна	Допустима на робочих місцях постійних і непостійних
			верхня межа		нижня межа					
			на робочих місцях							
постійних	непостійних	постійних	непостійних							
Холодний	Легка	21-23	24	25	20	17	40-60	75	0,1	не більше 0
Теплий	Легка	22-24	28	30	21	19	40-60	60 (при 27 °C)	0,2	0,1-0,3

Освітлення виробничих приміщень. Вплив світла спостерігається на функцію зору та на діяльність організму в цілому (посилюється обмін речовин, збільшується поглинання кисню і виділення вуглекислого газу). Недостатня або надмірна освітленість, нерівномірність освітлення в полі зору втомлює очі, призводить до зниження продуктивності праці; при цьому зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. Надмірна яскравість джерел світла може спричинити головний біль, різь в очах, розлад гостроти зору; світлові відблиски – тимчасове засліплення.

Залежно від джерела світла виробниче освітлення може бути природним, штучним і суміщеним, при якому недостатнє за нормами природне освітлення доповнюється штучним [35]. Для створення сприятливих умов зорової роботи для виконання роботи середньої точності використовуємо такі норми освітлення, які зазначені в табл. 4.4 і табл. 4.5.

Таблиця 4.4 – Нормовані значення природного освітлення для виробничих процесів за СНіП І-4-79

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкту для розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Коефіцієнт природного освітлення $e_n$ , %	
			При верхньому і комбінованому освітленні	При звичайному освітленні
Середньої точності	0,5-0,1	IV	3,6	1,4

Таблиця 4.5 – Норми освітлення штучним світлом за СНіП ІІ-4-79

Характеристика роботи	Розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд роботи	Під-розряд роботи	Контраст об'єкта з фоном	Фон	Найменше освітлення, Лк			
						При газорозрядних		При лампах розжарювання	
						Комбіноване	Загальне	Комбіноване	Загальне
Середньої точності	0,5-1	IV	Г	Великий	Світлий	300	150	300	100

Вентиляція є сукупністю заходів і пристроїв, необхідних для забезпечення заданої якості повітряного середовища в робочих приміщеннях. В

умовах виробництва вентиляція може бути: природна та механічна (за способом переміщення повітря), місцева та загальна (за формою організації повітрообміну). Вентиляційні установки можуть бути витяжними, що призначені для видалення повітря, та припливними, які здійснюють подачу повітря [33,34].

Повітрообмін при природній вентиляції відбувається за рахунок різниці температур, а отже, і питомої маси повітря всередині виробничого приміщення і поза ним. Природна вентиляція виробничих приміщень може бути неорганізованою (провітрювання) і організованою (аерація). На відміну від природної механічна дозволяє виробляти попередню обробку припливного повітря (зволоження, нагрівання або охолодження і очищення). Загальна вентиляція застосовується коли шкідливі речовини, надлишкова теплота і волога виділяються розосереджено по всьому робочому приміщенню і видалити їх за допомогою місцевих відсмоктувань технічно не можливо, а також в тих випадках, коли необхідно розбавити до ГДК залишки повітря, що не видаляється місцевими відсмоктуваннями. Рециркуляція повітря в системах припливно-витяжної вентиляції застосовується в холодну і перехідну пору року. При рециркуляції частина повітря, що видаляється з приміщення після відповідного очищення від шкідливих речовин, знову прямує в приміщення.

#### **4.4 Електробезпека**

Приміщення металургійної лабораторії згідно Правил будови електроустановок (ПБЕ) можна віднести до 1 класу – без підвищеної небезпеки ураження струмом (сухе, безпилоче, з нормальною температурою повітря, ізольованими підлогами і малим числом заземлених приладів). На робочому місці дослідника з усього обладнання лабораторії металевим є індукційна тигельна піч, електропіч підігрівання форм, кристалізатор, корпуси установки УВНК-8П.

Основними причинами поразки дослідника електричним струмом у металургійній лабораторії можуть бути: а) дотик до металевих неструмоведучих частин печі, які можуть опинитися під напругою в результаті пошкодження ізоляції; б) заборонене використання непромислових електричних приладів, таких як електричні чайники, обігрівачі.

Для освітлення металургійної лабораторії і живлення устаткування використовують найчастіше змінний електричний струм напругою 220-380 В. Змінний струм напругою більше 42 В небезпечний, силою струму 0,1 А і вище смертельний. Для мережі загального освітлення допускається напруга не вище 220 В. В приміщеннях з підвищеною небезпекою, а також особливо небезпечних приміщень напруга для переносних освітлювачів і ручного інструменту не повинна перевищувати 12 В [35-38].

Тягар поразки електричним струмом залежить від сили струму, електричного опору тіла людини, тривалості протікання струму через тіло, роду та частоти струму, індивідуальних властивостей людини, умов довкілля. Основний чинник, що обумовлює той або інший ступінь ураження людини – сила струму. Для характеристики його дії на людину встановлено три критерії (табл. 4.6).

Таблиця 4.6 – Середні значення порогових струмів [37]

Струм	Значення струму		
	пороговий відчутний, мА	пороговий невідпускаючий, мА	порогово-фібриляційний, мА
Змінний частотою 50 Гц	0,5-1,5	6-10	50-100
Постійний	5,0-20	50-80	300

Основними заходами запобігання ураження електричним струмом в металургійній лабораторії є захист від дотику до частин електрообладнання, що знаходяться під напругою, застосування малих напруг, подвійна ізоляція, захисне заземлення і відключення, спеціальні засоби захисту (гумовий килимок), а також організаційні заходи.

Основними організаційними заходами запобігання ураження електричним струмом є інструктаж і навчання безпечним методам праці,

перевірка знань правил безпеки та інструкцій відповідно до виконуваної роботи. Проведення позапланового і планового ремонту електроприладів виконуються електротехнічним персоналом, які відповідають за обслуговування та ремонтні роботи. Якщо ремонт проводиться на струмоведучих частинах, що знаходяться під напругою, тоді роботу виконують не менш як дві особи із застосуванням електрозахисних засобів.

Усі електрощітки, зборки повинні постійно знаходитись з закритому положенні і не захаращувати сторонніми предметами. Струмopовідні частини устаткування, які знаходяться під високою напругою, повинні бути заземлені.

**Розрахунок захисного заземлення.** В металургійній лабораторії пропонується застосувати захисне заземлення для забезпечення захисту від ураження електричним струмом при дотику до металевих неструмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою у результаті пошкодження ізоляції. Захисне заземлення призначено для створення між корпусом установки УВНК-8П, до складу якої належать індукційна тигельна піч, електропіч підігрівання форм, кристалізатор та ін. і землею електричного з'єднання досить малого опору, щоб у разі замикання на землю при дотику людини через його тіло пройшов струм малої величини, безпечний для організму [35-38].

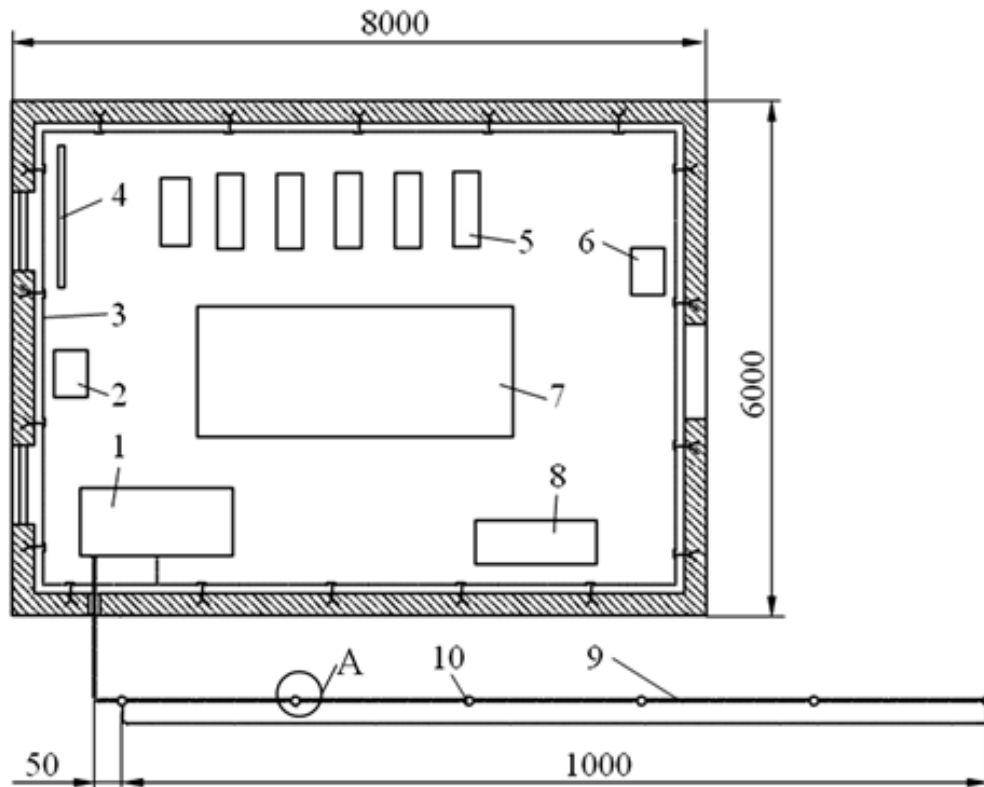
Заземлення установки УВНК-8П та її складових частин забезпечено підведенням заземлювальної жили до живильних розеток. Опір заземлення становить 4 Ом згідно ПБЕ для електроустановок до 1000 В [38].

Виконаємо розрахунок захисного заземлення для металургійної лабораторії, у якій розташована установка УВНК-8П з напругою 380/220 В (рис. 4.1).

Вибираємо заземлювальний пристрій, який застосовується при малих струмах замикання на землю, зокрема в установках до 1000 В.

Заземлювач передбачається виконати з вертикальних труб  $l=2$  м із зовнішнім діаметром  $d=0,05$  м, верхні кінці яких з'єднуються між собою за допомогою горизонтального електрода – сталевий смуги перетином 4x40 мм, покладеної в землю на глибині  $t=1,8$  м. Питомий опір ґрунту  $\rho=40$  Ом·м.

Коефіцієнт сезонності для вертикального заземлювача дорівнює  $\psi=1$ .  
 Нормативний опір заземлювача становить 4 Ом.



1 – силова шафа; 2 – пульт керування; 3 – внутрішній контур заземлення; 4 – дошка; 5 – система водоохолодження; 6 – пульт дублюючий; 7 – установка; 8 – шафа з електроапаратурою; 9 – сполучна смуга; 10 – заземлювач

Рисунок 4.1 – Схеми розташування заземлювачів групового заземлення

Визначаємо розрахунковий питомий опір ґрунту для заглибленого вертикального заземлювача [38]:

$$\rho_p = \psi \cdot \rho = 1 \cdot 40 = 40 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Опір растіканню струму одиночного вертикального заземлювача, заглибленого в землю на 1,8 м визначаємо за формулою:

$$R_{\text{од}} = \frac{\rho_p}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[ \ln \frac{2 \cdot l}{d} + 0,5 \ln \frac{4 \cdot t + 1}{4 \cdot t - 1} \right]. \quad (4.1)$$

Тоді за формулою (5.1), отримаємо

$$R_{од} = \frac{40}{2 \cdot 3,14 \cdot 2} \left[ \ln \frac{2 \cdot 2}{0,05} + 0,5 \ln \frac{4 \cdot 1,8 + 2}{4 \cdot 1,8 - 2} \right] = 14,86 \text{ Ом.}$$

Орієнтовна кількість вертикальних заземлювачів складе

$$n = \frac{R_{од}}{R_{н} \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} = \frac{14,86}{4 \cdot 0,74 \cdot 0,9} = 5,58 \approx 6 \text{ шт.}$$

Знаходимо відношення відстані між заземлювачами до їх довжини:

$$A = a/l = 2/2 = 1.$$

Коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів становить  $\eta_B=0,7$  та горизонтальних заземлювачів  $\eta_r=0,74$  [36,38].

Визначаємо опір растріканню струму групи вертикальних заземлювачів

$$R_B = \frac{R_{од}}{n \cdot \eta_B} = \frac{14,86}{6 \cdot 0,7} = 3,5 \text{ Ом.}$$

Довжину горизонтальної сполучної смуги визначаємо за формулою:

$$L_r = a \cdot (n - 1). \quad (4.2)$$

Отже, за формулою (4.2) отримаємо:

$$L_r = 2 \cdot (6 - 1) = 10 \text{ м.}$$

Коефіцієнт сезонності для горизонтального заземлювача при довжині смуги 10 м становить  $\psi_r=2,5$ .

Розрахунковий питомий опір ґрунту для горизонтального заземлювача:

$$\rho_r = \psi_r \cdot \rho = 2,5 \cdot 40 = 100 \text{ Ом.}$$

Опір горизонтальної смуги шириною  $b=0,04$  м, заглибленої в землю на 1,8 м становить:

$$R_r = \frac{\rho_r}{2 \cdot \pi \cdot l_r \cdot \eta_r} \cdot \ln \left[ \frac{2 \cdot l_r^2}{b \cdot t} \right]. \quad (4.3)$$

Тоді за формулою (4.3)

$$R_r = \frac{100}{2 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 0,74} \cdot \ln \left[ \frac{2 \cdot 10^2}{0,04 \cdot 1,8} \right] = 17,06 \text{ Ом.}$$

Опір заземленню в цілому дорівнює

$$R_3 = \frac{R_B \cdot R_r}{R_B + R_r} = \frac{3,5 \cdot 17,06}{3,5 + 17,06} = 2,9 \text{ Ом.}$$

Отриманий опір заземлювачів не перевищує номінальний (4 Ом), що відповідає вимогам ПБЕ [38]. Розташовуємо 6 заземлювачів в ряд на відстані 2 м один від одного.

#### 4.5 Заходи пожежної безпеки

Пожежна безпека об'єкту повинна забезпечуватися системами запобігання пожежі і протипожежному захисту, у тому числі організаційно-технічними заходами. Для попередження пожеж і обмеження розповсюдження вогню передбачають необхідну вогнестійкість будівель [35,39,40]. Згідно з ОНТП 24-86 приміщення відноситься до категорії В по вибухопожежній і пожежній небезпеці (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Категорія приміщень вибухопожежної та пожежної небезпеки за ОНТП 24-86

Категорія	Конструктивні характеристики
В	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ТГРiГР з <math>T_{сп} &gt; 61</math> °С;</li> <li>- Пил і волокна з НМС <math>&gt; 65</math> г/м<sup>3</sup>;</li> <li>- ТР, пальні і важко горючі речовини і матеріали;</li> <li>- Речовини при взаємодії з Н<sub>2</sub>О; О<sub>2</sub> і один з одним без наслідків.</li> </ul>

Ступінь вогнестійкості за СНіП 2.09.02-85 П–І, його характеристика надана в табл. 4.8. Необхідний ступінь вогнестійкості виробничих будівель визначається залежно від категорії вибухопожежної небезпеки, площі і поверхні будівлі [39].

Для гасіння пожеж в металургійній лабораторії використовується вуглекислотний вогнегасник ОУ-5, ВВК-1,4, ВВК-3,5 та ручний пожежний інструмент – сокири, гаки, ломи, відра, лопати, ножиці для різання металу. Вуглекислотний вогнегасник призначений для гасіння при спалахі горючих і тліючих матеріалів усіх видів, а також електроустановок, що знаходяться під напругою до 1000 В, з відстані 1,5 м. Інструмент розміщується на видному і доступному місці на стендах.



Таблиця 4.8 – Конструктивні характеристики будівель залежно від їх ступеня вогнестійкості за СНіП 2.01.02–85

Ступінь вогнестійкості	Конструктивні характеристики
I	Будівлі з несучими і огорожуючими конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону з застосуванням листових і плиткових негорючих матеріалів.

Усі легкозаймисті рідини повинні берегатися в зачинених металевих ящиках, реактиви в зачинених шафах. Заборонено залишати без догляду включені схеми і устаткування.

Для швидкого виявлення та повідомлення про місце виникнення пожежі в лабораторії є автоматична пожежна сигналізація АДС (автоматичний димовий сповіщувач) і автоматична система пожежогасіння. Необхідними заходами для запобігання пожежі є своєчасний ремонт електроприладів, якісне виправлення поломок, не використання несправних приладів, протипожежний інструктаж, на якому працівники ознайомлюються з правилами протипожежної безпеки та використання первинних засобів пожежогасіння.

### **Висновки.**

Умови праці дослідника в металургійній лабораторії під час дослідження виплавлення лопаток із нікелевого сплаву ЖС26-ВИ з додаванням нікелевих відходів власного виробництва слід віднести до середньої важкості до ІІа класу. За категорією напруженості праці робоче місце дослідника слід вважати з напруженою працею.

Виконано розрахунок захисного заземлення металургійної лабораторії, у якій розташована установка УВНК-8П. Вибрано заземлювальний пристрій, який складається з 6 заземлювачів, розташованих в ряд на відстані 2 м один від одного.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано технології переробки відходів виробництва і споживання нікелю із залученням їх у замкнутий цикл. Встановлено, що технології рафінувального вакуумного переплавлення металевих відходів нікелевих сплавів, що утворюються, дозволяють повернути відходи жароміцних нікелевих сплавів у виробництво сплавів, що не поступаються сплавам, виготовленим з первинної нікелевої сировини.

2. Проаналізовано технологічні особливості виплавлення нікелевих сплавів. Встановлено, що останнім часом для виготовлення злитків з жароміцних сплавів поширення отримала схема дуплекс-процесу. Перспективними для жароміцних нікелевих сплавів є різні варіанти дуплекс-процесу, в яких застосовуються електронно-променеве, електрошлакове та плазмове плавлення. У вакуумних індукційних печах можна виплавити жароміцні нікелеві сплави практично будь-якого хімічного складу.

3. Проаналізовано технології та обладнання, що застосовують для виплавлення жароміцних нікелевих сплавів із залученням до шихти металевих відходів жароміцних нікелевих сплавів. Встановлено, що для виготовлення авіаційних лопаток розроблено відповідні технологічні процеси, створено унікальні промислові установки ПМП-2, ПМП-4, УВНК-8П та інші, розроблено спеціальні жароміцні сплави ЖС26, ЖС32, ЖС36, ЖС40 та інші. Лопатки з монокристалічною структурою володіють підвищеними міцністними властивостями, що дозволяє підвищити ресурс експлуатації виробів у 2-3 рази порівняно зі звичайним технологічним процесом, що дозволяє отримувати лопатки з рівновісною структурою.

4. Проаналізовано особливості технології отримання монокристалічних нікелевих виливків. Встановлено, що затравку виготовляють із сплавів системи Ni-W, чистого нікелю та з того самого нікелевого сплаву, що й виливки. Як середовище для кристалізації монокристалічних нікелевих виливків слід використовувати рідкий алюміній.

5. Експериментально досліджено механічні властивості на зразках, що виготовлені із застосуванням технологічних відходів жароміцного сплаву ЖС26-ВИ.

6. Експериментально встановлено, що для виготовлення якісних виливків можна застосовувати обидва варіанти шихтових композицій, до складу яких залучають сплав ЖС26-ВИ (ЕПП), отриманий шляхом електронно-променевого переплавлення технологічних відходів власного виробництва.

7. Властивості зразків обох варіантів виливок задовольняють нормативним вимогам на сплав ЖС26-ВИ та деталі (лопатки). За результатами випробувань на короткочасне розривання зразків, отриманих із залученням нікелевих металевих відходів, встановлено, що властивості таких зразків перевищують встановлені норми.

8. Варіант отримання виливка із сплаву ЖС26-ВИ із додаванням 50 % відходів вихідного сплаву має найбільш оптимальне поєднання властивостей при короткочасному розриванні та тривалої міцності.

9. Мікроструктура сплаву ЖС26-ВИ, отриманого із додаванням нікелевих відходів, суттєво не відрізняється від структури сплаву ЖС26-ВИ, отриманого методом вакуумно-індукційного переплаву та є  $\gamma$ -твердим розчином, зміцненим  $\gamma$ -фазою і карбідами.

10. Хімічний склад обох варіантів виливків по основним елементам відповідає вимогам Сертифіката на сплав ЖС26-ВИ, суттєвої різниці між шихтовими композиціями не виявлено.

11. Для проведення науково-дослідної роботи побудований стрічковий календарний план. Розраховано зведений кошторис витрат на проведення науково-дослідницької роботи. Загальні витрати на проведення роботи склали 93897,96 грн.

12. Проведений аналіз шкідливих і небезпечних факторів в металургійній лабораторії під час дослідження виплавлення лопаток із нікелевого сплаву ЖС26-ВИ з додаванням нікелевих відходів власного виробництва. Виконано розрахунок захисного заземлення металургійної лабораторії, у якій розташована установка УВНК-8П, вибрано заземлювальний пристрій.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Mudd Jowitt. A detailed assessment of global nickel resource trends and endowments. *Economic Geology*. 2014. V. 109. P. 1813–1841.
2. Діденко Л.М., Нестеренко Т.М. Технології переробки відходів нікелю. *Актуальні питання сталого розвитку науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України* : матеріали III Всеукр. наук.-практ. конф. за участю молодих науковців, м.Запоріжжя, 17-20 жовт. 2023 р. Запоріжжя : ЗНУ, 2023. С. 682–683.
3. Грицай В. П., Бредихін В. М., Червоний І. Ф., Пожуєв В. І. *Металургія кольорових металів* : підручник. Ч. 5 : *Металургія важких металів* ; Кн. 2. *Технологія міді та нікелю*. Запоріжжя : ЗДІА, 2011. 448 с.
4. Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могилатенко В. Г. *Технологія одержання металів та сплавів для ливарного виробництва* : навч. посіб. Київ : Видавничий дім «Вініченко», 2016. 224 с.
5. Пожуєв В. І., Іващенко В. І., Червоний І. Ф., Грицай В. П. *Металургія кольорових металів*. Ч.1. *Сировинні ресурси і виробництво* : підручник / за ред. д.т.н., проф. І. Ф. Червоного. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 334 с.
6. *Металургія кольорових металів*. Ч.2. *Збагачення руд кольорових металів* : підручник / В. О. Смирнов та ін. ; за заг. ред. д.т.н., проф. І. Ф. Червоного. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 322 с.
7. Любич О. Й., Пчелінцев В. О. *Фізичні основи металургії кольорових і рідкоземельних металів* : навч. посіб. Суми : Вид-во СумДУ, 2009. 226 с.
8. *Основи металургійного виробництва металів і сплавів* : підручник / Д. Ф. Чернега та ін. ; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ : Вища школа, 2006. 503 с.
9. Нестеренко Т. М. *Виробництво сплавів кольорових металів* : метод. вказівки до самостійної роботи та тестування. Запоріжжя: ЗДІА, 2012. 121 с.
10. Reed R.C. *The superalloys. Fundamentals and Applications*. Cambridge : University Press. 2006. 372 p.

11. Гнатенко О. В., Гайдук С. В., Наумик В. В., Лунев В. В. Розробка економнолегованого жароміцного сплаву для відповідальних виливків. *Перспективні технології, матеріали та обладнання у ливарному виробництві : матеріали III міжнарод. науково-техн. конф., м. Краматорськ, 19-20 жовт. 2011 р. Краматорськ, 2011. С. 38-39.*

12. Tsivirko É. I., Zhemanyuk P. D., Naumik V. V., Lunev V. V. Crystallization processes, structure and properties of castings from high-temperature nickel alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 2001. V. 43(9-10). P. 382-386.

13. Ливарний жароміцний нікелевий сплав: патент 129076 Україна: МПК6 C22C 19/00; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 4 с.

14. Matsugi K., Murata Y., Morinaga M., Yukawa N. Realistic Advancement for Nickel-based Single Crystal Superalloys by the d-electrons Concept. *Superalloys : Int. Symposium*. 1992. P. 307–316

15. Mc Vay R.V., William P., Meier G. H., Pettit F.S. Oxidation of Low Sulfur Single Crystal Nickel-base Superalloys. *Superalloys*. 1992. P. 807.

16. Niskel's hidden green potential. *Mining Magazine : eMagazine*. 2021. April. P. 22–24.

17. Гайдук С. В., Кононов В. В., Федорченко Ю. М., Гайдук О. С. Високотемпературна корозія монокристалів нікелевих сплавів, що містять тантал. *Вісник двигунобудування*. 2007. № 1. С. 150–154.

18. ДСТУ 3211:2009. Брухт і відходи кольорових металів і сплавів. Загальні технічні умови. Видання офіційне. Київ : Держспоживстандарт України, 2011. 76 с.

19. Mudd Jowitt. A detailed assessment of global nickel resource trends and endowments. *Economic Geology*. 2014. V. 109. P. 1813–1841.

20. Sato A., Harada H., Yada H., Kawagishi K. A 5th Generation SC Superalloy with Balanced High Temperature Properties and Processability. *Superalloys 2008 : Proceedings of the Eleventh International Symposium on Superalloys by TMS, USA., Pennsylvania : TMS, 2008. P. 131–138.*

21. Johnson Tim. Is it time to recycle more nickel? *Stainless Steel World Publisher*. 2017. June. P. 20–21. URL: <https://stainless-steel-world.net/is-it-time-to-recycle-more-nickel/> (дата звернення: 30.09.2023).

22. Переробка та відновлення дорогоцінних металів. Переробка нікелевого каталізатора. URL: <https://www.metalandcatalyst.com> (дата звернення: 30.09.2023).

23. Нестеренко Т.М., Нестеренко О.М., Діденко Л.М. Сучасні тенденції вдосконалення переробки металевих відходів нікелю та його сплавів. *MININGMETALTECH 2023 – Гірничо-металургійний комплекс : інтеграція бізнесу, технологій та освіти* : збірка тез Міжнар. науково-техн. конференції , м. Ріга, 29-30 листопада 2023 р. URL: <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/384/10463/21887-1-2023>

24. Металургія кольорових металів. Ч.7. Вторинна металургія кольорових металів : підручник / В. М. Бредихін та ін. ; за заг. ред. д.т.н., проф. І. Ф. Червоного. Запоріжжя : ЗДІА, 2009. 454 с.

25. Стенд і експериментальна установка для дослідження радіальних і осьових опор ротора / В. М. Доценко та ін. *Вісник двигунобудування*. 2003. № 1. С. 81–83.

26. Versnyder F. F., Guard R. W. Directional Grain Structure for High Temperature Strength. *Trans. ASM*. 1960. V. 52. P. 485–493.

27. Грабовський В. Я., Лисиця О. В. Новітні технології заготівельного виробництва : навч. посіб. Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. 112 с.

28. Sarioglu C., Stinner C., Blanchere J. R., Meier G. H. The Control of Sulfur Content in Nickel-base, Single Crystal Superalloys and its Effect on Cyclic Oxidation Resistance. *Superalloys*. 1996. P. 71–80.

29. ASTM E1019–11. Standard Test Method for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen and Oxygen in Steel, Iron, Nickel and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques. USA, 2011. 27 p.

30. Тюріна Н. М., Ведерніков М. Д., Капінос Г. І. Економіка промислового підприємства : підручник. Львів : Новий Світ-2000, 2008. 311 с.

31. Іващенко О. М. Методичні рекомендації до виконання організаційно-економічної частини дипломного проекту : метод. вказівки. Запоріжжя : ЗДІА, 2004. 31 с.
32. Охорона праці : навч. посіб. / Я. І. Бедрій та ін. Львів : Афіша , 1997. 258 с.
33. Гандзюк М. П., Желібо Е. П., Халимовський М. О. Основи охорони праці : підручник. Київ : Каравела, 2005. 393 с.
34. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник. Львів : Афіша, 2002. 318 с.
35. Кожемякін Г. Б., Рижков В. Г., Белоконь К. В. Охорона праці та техногенна безпека : метод. вказівки до виконання розділу магістерських робіт. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 48 с.
36. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. Київ : Держгірпромнагляд України, 2001. 17 с.
37. НАПБ Б.03.002-2007. Норми визначення категорії приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Київ : Держгірпромнагляд України, 2007. 11 с.
38. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. Київ : Держгірпромнагляд України, 2001. 17 с.
39. ДСТУ 3855-99. Пожежна безпека. Визначення пожежної небезпеки матеріалів та конструкцій. Терміни та визначення. Київ : Держспоживстандарт України, 1999. 24 с.
40. ДСТУ 2272-2006. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 28 с.

**ДОДАТОК А**

**ТЕЗИ НА ІІІ ВСЕУКРАЇНСЬКУ НАУКОВО-ПРАКТИЧНУ  
КОНФЕРЕНЦІЮ ЗА УЧАСТЮ МОЛОДИХ НАУКОВЦЕВ  
«АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ СТАЛОГО НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО  
ТА СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ  
РЕГІОНІВ УКРАЇНИ» (17-20 жовтня 2023 року)**



**Міністерство освіти і науки України**  
**Запорізький національний університет**  
**Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потєбні**



**ІІІ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗА  
УЧАСТЮ МОЛОДИХ НАУКОВЦІВ  
«АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ СТАЛОГО НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ТА  
СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ»**

**17-20 жовтня 2023 року**



УДК 669.243

Нестеренко Т.М., к.т.н., доц., Діденко Л.М., магістрант 2 курсу,

Науковий керівник – к.т.н., доцент Нестеренко Т.М.

**ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ НІКЕЛЮ**

*Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потембі Запорізького національного університету, кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*

Вторинна переробка та утилізація матеріалів є головною з глобальних ініціатив, спрямованих на створення суспільства сталого розвитку. Як зазначено у сформульованих ООН «Мета у сфері сталого розвитку» – сімнадцяти цілях, спрямованих на перетворення нашого світу, відповідальне споживання та виробництво покладено в основу економіки замкнутого циклу та відіграють критично важливу роль у протидії зміні клімату [1].

Зростання використання нікелю у багатьох важливих технологіях призвело до сталого зростання попиту на цей метал протягом цілого ряду десятиліть. Такий зростаючий попит призвів до прагнення збільшити рівень переробки відходів нікелю, щоб доповнити його виробництво з рудної сировини. Тому вдосконалення переробки виробництва відходів нікелю з отриманням якісного металу або сплаву є актуальним завданням.

Мета роботи – проаналізувати технології переробки відходів виробництва та споживання нікелю.

До відходів нікелевої промисловості відносяться шлаки, які погортно повертаються в металургійні процеси до максимального вилучення кольорових металів і лише після цього переходять у відвали. Тому нікельвімісні шлаки в процесі переробки є і вторинною сировиною, і відходами.

Шлами електrolітичного рафінування нікелю є одним із основних джерел отримання платинових металів. Шлам електrolізу металевих анодів, що утворюється на різних заводах, зазвичай містить 30–35 % Ni, від 0,1 % до 2 % платинових металів. Тому переробці шламів приділяють велику увагу. Зі шламів електrolізу сульфідних анодів отримують, крім того, селен і елементарну сірку.

Шлами, що містять нікель, переробляють за різними технологічними схемами, що враховують специфіку кожного шламу. Зазвичай спочатку шлам обробляють для окиснення сульфідів. Огарок піддають вилучуванню в сульфатній кислоті, при цьому в розчин переходять нікель, залізо, частково мідь. Твердий залишок від вилучування переплавляють з відновником в печах, і отриманий металевий сплав, що містить в основному мідь і платиноїди, відливають в аноди і піддають електrolізу в розчині сульфатної кислоти.

Шлам сульфідних анодів містить близько 97 % елементарної сірки, 1,3 % Ni, 0,3 % Cu, 0,6 % Fe, 0,15 % Se (в елементарному стані). Шлам плавлять в котлах за температури близько 135 °С, отриманий розплав фільтрують на фільтрах, що обгріваються паром. У фільтрат переходить до 95 % елементарних сірки та селену, сульфідні та платиноїди залишаються у залишку.

Фільтрат піддають дробовій дистилляції для поділу сірки та селену, які є супутніми продуктами переробки шламів. Залишок від фільтрації містить близько 50 % сірки, решта – метали. Цей залишок переплавляють і відливають на аноди. Ці, так звані, вторинні сульфідні аноди містять близько 50 % Ni, 20 % Cu, 2 % Fe та 20–25 % сірки [2]. Їх піддають електrolізу в тих самих умовах, що і вихідні, первинні сульфідні аноди.

Сплави на нікелевій основі і нікельвімісні сталі відіграють важливу роль у джерелі відновлюваної енергії, що розвивається, відомому як геліотермальні електростанції та електростанції, що працюють на концентрованій сонячній енергії. Використання таких сплавів запобігає руйнуванню матеріалів та значенню виграт на повне заміщення обладнання в проєктах з розрахунковим терміном експлуатації до 40 років і більше [3].

Глобальна тенденція до електрифікації транспорту продовжує набирати оберти, при цьому за останні роки у Китаї, Європі та Північній Америці було відзначено постійне зростання інвестицій у напрямки, пов'язані з акумуляторними батареями [3]. Попит на нікель для виробництва акумуляторних батарей через високі темпи зростання продажу електромобілів має стійку тенденцію зростання.

Під час виготовлення лопаток для авіаційних двигунів та після експлуатації двигунів утворюється значна кількість металевих нікелевих відходів – відходи повернення та ливникових систем, браковані та відпрацьовані лопатки. Такі відходи нікелевих сплавів є багатокомпонентними системами, що містять до 12 легуючих і мікролеуючих елементів. Тепер створюються ресурсозберігаючі технології рафінувального вакуумного переплавлення відходів таких нікелевих сплавів, що утворюються, які дозволять повністю повернути відходи жароміцних нікелевих сплавів у виробництво сплавів, що не поступаються сплавам, виготовленим з первинної нікелевої сировини.

Висновки.

1. Проаналізовано технології переробки відходів виробництва і споживання нікелю із залученням їх у замкнутий цикл.
2. Виявлено напрямки вдосконалення переробки металевих відходів нікелю на якісний метал.

**Список використаних джерел**

1. Mudd Jowitt. A detailed assessment of global nickel resource trends and endowments. *Economic Geology*. 2014. V. 109. P. 1813–1841.
2. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: підручник / Д. Ф. Чернета та ін.; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ: Вища школа, 2006. 503 с.
3. Johnson Tim. Is it time to recycle more nickel? *Stainless Steel World Publisher*. 2017. June. P. 20–21. URL: <https://stainless-steel-world.net/is-it-time-to-recycle-more-nickel/> (дата звернення: 30.09.2023).

ДОДАТОК Б

**ТЕЗИ НА МІЖНАРОДНУ НАУКОВО-ТЕХНІЧНУ КОНФЕРЕНЦІЮ  
«MININGMETALTECH 2023 – ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ  
КОМПЛЕКС: ІНТЕГРАЦІЯ БІЗНЕСУ, ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОСВІТИ»  
(29-30 листопада 2023 р.)**

**MODERN TRENDS IN IMPROVING THE PROCESSING  
OF NICKEL METAL WASTE AND ITS ALLOYS**

**СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПЕРЕРОБКИ  
МЕТАЛЕВИХ ВІДХОДІВ НІКЕЛЮ ТА ЙОГО СПЛАВІВ**

**Nesterenko T.M.**

*PhD (Engineering), Associate  
Professor, Zaporizhzhia National  
University, Zaporizhzhia, Ukraine*

**Nesterenko T.M.**

*к.т.н., доцент, Запорізький  
національний університет,  
м. Запоріжжя, Україна*

International scientific conference

**Nesterenko O.M.**

*Researcher, Zaporizhzhia Machine-  
Building Design Bureau PROGRESS  
State Enterprise named after  
Academician A.G. Ivchenko,  
Zaporizhzhia, Ukraine*

**Nesterenko O.M.**

*науковий співробітник,  
ДП «Запорізьке машинобудівне  
конструкторське бюро «Прогрес»  
імені академіка О.Г. Івченка,  
м. Запоріжжя, Україна*

**MININGMETALTECH 2023 – THE MINING  
AND METALS SECTOR: INTEGRATION  
OF BUSINESS, TECHNOLOGY  
AND EDUCATION**

November 29–30, 2023

Volume 1

Світові ресурси нікелю оцінюють близько 600 млн. т за даними Геологічної служби США, щорічне видобування з надр – 60 млн. т [1, с. 1813–1841]. У рудах нікель знаходиться у складі хімічних сполук разом з кобальтом, арсеном, залізом, сіркою та ін. У сульфідних мінеральних рудах міститься від 0,3 % до 5,5 % нікелю. В окислених нікелевих рудах, що надходять на переробку, вміст нікелю складає від 0,9 % до 1,5 % [2, с. 162–163]. Виготовлення нікелю з природних руд є трудомістким процесом.

Нікель використовують для виготовлення різних сплавів і сталей зі спеціальними властивостями. Відомо понад 3000 сплавів, що містять нікель [3, с. 349]. Так, у нафтопереробних, нафтохімічних, фармацевтичних та інших промислових процесах використовують нікелеві катализатори, вміст нікелю у яких знаходиться в межах від 3 % до 80 % [4]. Вважають, що кожного року в світі утворюється близько 150 тис. т відпрацьованих катализаторів.

Ресурсозбереження, яке є одним із завдань, поставлених перед вітчизняною промисловістю, можна вирішити комплексним використанням наявних джерел сировини, створенням безвідходних виробництв та технологій.

У промислових умовах металеві відходи нікелю зазвичай підсихтовують під час пірометалургійної переробки рудної і вторинної сировини [5, с. 337, 364]. Проте за таких умов деякі легуючі кольорові метали (наприклад, реній), що входять до складу нікелевих сплавів, повністю втрачаються з різними продуктами переробки (гази, що відходять, шлак тощо).

Технологія переробки відпрацьованих катализаторів на феросплави, які використовують далі для виробництва нержавіючої сталі, запроваджена компанією Tetronics International на двох власних промислових підприємствах [6]. Феросплави отримують шляхом плазмово-дугового плавлення за постійного струму з додаванням як розкислювач коксу або антрациту. Враховуючі зростання обсягів нафтохімічних катализаторів, що надходять на переробку, компанія прогнозує збільшення виробничих потужностей.

Створення нових авіаційних апаратів воєнного та цивільного призначення, в тому числі надзвукового перевезення пасажирів, неможливо без авіаційних газотурбінних двигунів. Розробники авіаційних двигунів намагаються підвищити температуру газу на вході газу в турбину. Тому виникла потреба у використанні жароміцних нікелевих сплавів низької щільності для виготовлення лопаток двигунів. Під час виготовлення лопаток та після експлуатації двигунів утворюється значна кількість металевих нікелевих відходів: відходи повернення та ливникових систем, браковані та відпрацьовані лопатки. Такі відходи нікелевих сплавів є багатоконпонентними системами, що містять до 12 легуючих і мікролегуючих елементів. Попереднє очищення нікелевих відходів електронно-променевим переплавленням усуває неметалеві вclusions у виливках, які погіршують властивості сплавів, та запобігає появі дефектів під час лиття, що утворюються у разі прямого залучення таких металевих відходів до складу шихти.

#### Перелік використаних джерел

1. Mudd Jowitt. A detailed assessment of global nickel resource trends and endowments. *Economic Geology*. 2014. V. 109. P. 1813–1841.
2. Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могилатенко В. Г. Технологія одержання металів та сплавів для ливарного виробництва : навч. посіб. Київ : Видавничий дім «Вінніченко», 2016. 224 с.

3. Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підручник / Д. Ф. Чернега та ін. ; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ : Вища школа, 2006. 503 с.

4. Переробка та відновлення дорогоцінних металів. Переробка нікелевого катализатора. URL: <https://www.metalandcatalyst.com> (дата звернення: 30.09.2023).

5. Грицай В. П., Бредихін В. М., Червоний І. Ф., Пожуєв В. І. Металургія кольорових металів : підручник. Ч. 5 : Металургія важких металів ; Кн. 2. Технологія міді та нікелю. Запоріжжя : ЗДІА, 2011. 448 с.

6. Johnson Tim. Is it time to recycle more nickel? *Stainless Steel World Publisher*. 2017. June. P. 20–21. URL: <https://stainless-steel-world.net/is-it-time-to-recycle-more-nickel/> (дата звернення: 30.09.2023).

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-28>

#### ASPECTS OF THE DEVELOPMENT OF THE METHOD FOR DETERMINING RESIDUAL STRESSES IN THE METAL OF WELDED STRAIGHT PIPES OF LARGE DIAMETER

#### АСПЕКТИ З РОЗВИТКУ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У МЕТАЛІ ЗВАРНИХ ПРЯМОШОВНИХ ТРУБ ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРА

**Ovsianukov V. V.**

*PhD student by specialty 136 «Metallurgy», SHEI Pryazvakiy State Technical University; Technical Director, «UKRTRUBOIZOL» LLC, Dnipro, Ukraine*

**Овсянников В.В.**

*аспірант за спеціальністю 136 «Металургія», ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»; директор технічний, ТОВ «УКРТРУБОІЗОЛ», м. Дніпро, Україна*

В Україні на підприємстві ТОВ НВП «Укртрубоізол» за період 2019 по 2022 р.р. встановлено і введено в експлуатацію обладнання сучасного виробництва сталевих зварних прямошовних труб діаметром від 406,4 мм до 1422 мм у тому числі для магистральних нафто- і газопроводів. Це обладнання включає всі необхідні стани для забезпечення технології виробництва труб з вимогами нормативної

ДОДАТОК В

**ГРАМОТА ЗА II МІСЦЕ У РОБОТІ III ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ  
НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ ЗА УЧАСТЮ  
МОЛОДИХ НАУКОВЦЕВ «АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ СТАЛОГО  
НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ТА СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОГО  
РОЗВИТКУ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ»**



ДОДАТОК Г

**СЕРТИФІКАТ ЗА ДОПОВІДЬ НА МІЖНАРОДНІЙ  
НАУКОВО-ТЕХНІЧНІЙ КОНФЕРЕНЦІЇ  
«MININGMETALTECH 2023 – ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ  
КОМПЛЕКС: ІНТЕГРАЦІЯ БІЗНЕСУ, ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОСВІТИ»**



TSC-2930071-MIP dated 30.11.2023

**CERTIFICATE** **mip** metinvest  
polytechnic

*Lidia DIDENKO*

*for Participation in the International scientific-technical conference*

**MININGMETALTECH 2023 - The mining  
and metals sector: integration of business,  
technology and education**

**November 29-30, 2023**

*Total: 15 hours – 0.5 ECTS credit*



**Oleksandr POVAZHIN, M.**  
Doctor of Economics, Professor  
Rector of LLC "TECHNICAL UNIVERSITY  
"METINVEST POLYTECHNIC"