

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний

(повне найменування інституту, назва факультету)

Фізичної матеріалознавства

(повна назва кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)

магістр

(ступінь вищої освіти (освітній ступінь))

на тему Особливості впливу температури на морфо-
логію і фазовий стан зварювальних металів
сталею

Виконав: студент II курсу, групи ІР-618м
спеціальності (напряму підготовки)

132 Термічна обробка металів
(код і назва напряму підготовки, спеціальності)

Богарова А.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник Гайрук С.В.
(прізвище та ініціали)

Рецензент Кононов В.В.
(прізвище та ініціали)

м.Запоріжжя
20 19 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет інженерно-фізичний
 Кафедра фізичної матеріалознавства
 Ступінь вищої освіти (освітній ступінь) магістр
 Спеціальність Термічна обробка металів
 (код і назва)
 Напрямок підготовки 132 - матеріалознавство
 (код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Климов О.В."13" грудня 2019 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТУ

Богаровій Анні Александрівні
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Особливості впливу машини на морфологію і фазовий склад карбидних нікелевих сплавів

керівник проекту (роботи) Гайduk Олій Васильович, д.т.н., проф. каф. ММ
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від "14" листопада 2019 року № 388

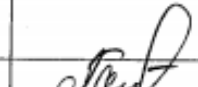
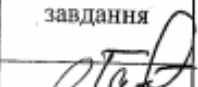
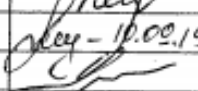
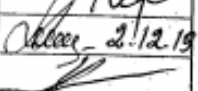
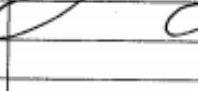
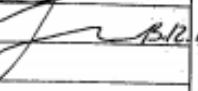
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 18 грудня 2019 року

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Клімаченко Олександр
 сплав 1-5% за масою сплаву зм1-34 з концентра-
 ційним кроком 1% та

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Сукупний стан поверхні і практичне наведення карбидних сплавів на нікелевій основі. 2. Матеріал і машина розробки. 3. Експериментальна машина. 4. Особливості впливу машини на морфологію і фазовий склад сплаву зм1-34. 5. Роль карбидної рідкості в сплаві зм1-34, який має машини в розробленій рідкості. 6. Експериментальна машина. 7. Окремі процеси в машині в подвійних сплавках. 8. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Примітки. 1. Особливості впливу машини на морфологію і фазовий склад карбидних нікелевих сплавів. 2. Кінцева стадія карбидних сплавів з їхнім м'яким елементами р+р', р'-фази і карбидної фази в машині сплав. 3. Значення карбидних нікелевих в розробленій сплавках.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	приймав виконане завдання
1-4	Гайрук С.В.		
5	Крушкова В.В.	10.02.19.	21.12.19
6	Неспарев О.В.		
	Нормокошуров Т.О. О.В.		

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1.	Судасиний стан медрії і пракмиски меду- ванне кароніумних еміаів на пікисекій атоді	10.10.2019	
2.	Матеріали і меморика досліджень	21.10.2019	
3.	Експериментальна установка. Робочий видиву матеріалу на карбоніумній фазовій еміаі ЗМТ-34	1.11.2019	
4.	Отримання експериментальної установки ЗМТ-34, 18.11.2019 матеріалу та меморика в дослідженні ріааноні.	18.11.2019	
5.	Експериментальна установка	2.12.2019	
6.	Оформлення праці та оформлення у науковий звітний еміаційний. Ріаан 6.	9.12.2019	

Студент

Керівник проекту (роботи)

(підпис) Григорук А.О.
 (прізвище та ініціали)
 (імя) Тарасюк С.В.
 (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: с. 76, 3 рис., 11 табл., 35 джерел.

Об'єкт дослідження – вплив танталу на морфологію і фазовий склад в структурі ливарного жароміцного нікелевого сплаву ЗМІ-3У.

Мета роботи – дослідити вплив танталу на формування структури, морфологію і фазовий склад в сплаві ЗМІ-3У з метою підвищення термічної стабільності фаз з метою підвищення температурної працездатності.

В дипломному проекті досліджено особливості впливу танталу в дослідженому діапазоні легування (1-5)% за масою на специфіку формування структури, топологію, морфологію і хімічний склад фаз промислового жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву ЗМІ-3У. В порівнянні з промисловим сплавом ЗМІ-3У без танталу зроблено оцінку і визначено специфіку впливу танталу на його оптимальний вміст в сплаві ЗМІ-3У відносно найбільш оптимального структурного стану, що забезпечує підвищення температурної стабільності фаз і покращення комплексу службових властивостей сплаву в умовах тривалого впливу високих температур.

ЖАРОМІЦНІ НІКЕЛІВІ СПЛАВИ, ЛЕГУВАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ,
ТАНТАЛ, КРИСТАЛІЗАЦІЯ, СТРУКТУРА, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, ФАЗА,
ТОПОЛОГІЯ, МОРФОЛОГІЯ, ХІМІЧНИЙ СКЛАД

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Сучасний стан теорії і практики легування жароміцних сплавів на нікелевій основі.....	8
1.1 Особливості експлуатації жароміцних нікелевих сплавів і вимоги до них.....	8
1.2 Структура, фазовий склад і термічна стабільність жароміцних нікелевих сплавів	10
1.3 Вплив легувальних елементів на службові характеристики жароміцних нікелевих сплавів.....	13
1.4 Особливості легування нікелевих сплавів для рівноосьової і спрямованої кристалізації та монокристалічного лиття	15
1.5 Вплив термічної обробки на структурну і фазову стабільність жароміцних сплавів на нікелевій основі	20
1.6 Перспективи щодо розвитку жароміцних нікелевих сплавів зі спрямованою і монокристалічною структурою	23
2 Матеріал і методика досліджень	26
2.1. Металографічні дослідження.....	28
2.2 Мікрорентгеноспектральний аналіз фаз	28
3 Експериментальна частина. Особливості впливу танталу на морфологію і фазовий склад сплаву ЗМІ-ЗУ.....	30
3.1. Якісний МРСА евтектики $\gamma+\gamma'$, γ' - фази та карбідної фази в литому стані.	30
4 Оцінка дендритної ліквідації в сплаві змі-Зу, легованого танталом в дослідженому діапазоні.....	39
4.1. Ступінь ліквідації легувальних елементів	39
5 Економічна частина	42

5.1 Тенденції розвитку світового ринку жароміцних нікелевих сплавів для лопаток ГТД.....	42
5.2 Техніко-економічні розрахунки.....	43
5.2.1. Характеристика продукції.....	43
5.2.2 Економічна ефективність	48
6 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	50
6.1 Аналіз потенційних небезпек.....	50
6.2 Заходи забезпечення безпеки.....	51
6.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці	56
6.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	59
6.4.1 Заходи з пожежної безпеки	59
6.4.2 Порядок проведення рятувальних та інших невідкладних робіт при аваріях на АЕС.....	60
Висновки	62
Список літератури.....	65
Додаток А.....	70

ВСТУП

Багаторічна практика показала, що більшість інноваційних розробок базується на впровадженні нових матеріалів і технологій їх виробництва. Важливу роль відіграє розробка і впровадження нових жароміцних матеріалів з покращеним комплексом службових властивостей. Тому, для успішного розвитку вітчизняної економіки необхідно підвищення конкурентної спроможності вітчизняної високотехнологічної продукції як на внутрішньому, так і зовнішньому ринках.

Підвищення потужності сучасних енергетичних установок і збільшення коефіцієнту корисної дії (ККД) можливе лише при підвищенні початкової температури газу на вході в турбіну. Тому, підвищення робочих температур працездатності нових матеріалів для перспективних газотурбінних установок є актуальним питанням.

Розробка жароміцних матеріалів нового покоління як для авіаційних двигунів, так і наземних газотурбінних установок зв'язується, в першу чергу, з отриманням лопаток з нових сучасних жароміцних нікелевих сплавів, здатних працювати при більш високих температурах і напругах в агресивних корозійних середовищах. Підвищення робочих температур на робочих лопатках зробило актуальною задачею дослідження структури розробляємих сплавів нового покоління з більш високим комплексом властивостей за рахунок легування перспективними елементами.

Розробка нових сплавів або удосконалення (модернізація) серійних промислових сплавів – це комплексна науково-технічна задача (матеріалознавча, технологічна, конструкторська), яка повинна враховувати всі сучасні технологічні можливості.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕОРІЇ І ПРАКТИКИ ЛЕГУВАННЯ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ НА НІКЕЛЕВІЙ ОСНОВІ

В даний час жароміцні нікелеві сплави широко застосовуються в якості матеріалу лопаток авіаційних, судових двигунів і приводних стаціонарних ГТУ і є перспективними для проєктованих пікових газотурбінних установок [2]. Найважливішу роль у формуванні високого комплексу механічних властивостей жароміцних нікелевих сплавів, поряд з легуванням, грає структурний фактор - формування структури різними методами кристалізації. При цьому перевагою сплавів спрямованої кристалізації, в порівнянні зі сплавами рівноосьової кристалізації, є відсутність поперечних границь зерен, розташованих перпендикулярно до діючого навантаження, що помітно підвищує їх жароміцність і пластичність та знижує темп знеміцнення [3].

1.1 Особливості експлуатації жароміцних нікелевих сплавів і вимоги до них

Специфіка умов роботи лопаток газових турбін визначає характер вимог щодо матеріалів, з яких вони виготовляються. Залежно від призначення лопаток (соплові або робочі) вимоги до рівня тих чи інших властивостей жароміцних нікелевих сплавів різні. Так, до матеріалу робочих лопаток висуваються жорсткі вимоги щодо працездатності в широкому діапазоні температур: висока короткочасна і тривала міцність у поєднанні із пластичністю при високому опорі високотемпературної повзучості; структурна стабільність і корозійна стійкість [4]. Тому, однією із важливих вимог, що пред'являються до сплавів, призначених для виготовлення робочих

лопаток газових турбін є високий рівень жароміцності і поверхневої стабільності, а також термодинамічної стабільності загальної структури і окремих фаз.

До матеріалів робочих лопаток газових турбін висуваються багато жорстких вимог щодо опору статичному і циклічному руйнуванню, малої схильності до крихких руйнувань, низької чутливості до експлуатаційних перегрівів, втомної міцності при робочих температурах, мінімальної швидкості росту тріщин, технологічними характеристиками, які забезпечують підвищення виходу годних лопаток за макроструктурою при отриманні їх методом спрямованої (моно) кристалізації, термодинамічну структурну стабільність та економічне обґрунтування [3, 4, 5].

Необхідною умовою високої експлуатаційної надійності деталей ГТД і ГТУ є стабільність як зовнішньої поверхні, так і внутрішньої структурної стабільності фаз при впливі високих температур. Хоча на робочі лопатки наносять різні захисні покриття, проте, опір газовій і сольовій корозії сплаву - основи має велике значення для реалізації жароміцності. Як показав досвід, швидкість окислення на порядок нижче швидкості ВТК при одній і тій же температурі. Тому процеси, які «контролюють» ресурс роботи деталей гарячої частини ГТУ при постійних температурно - силових параметрах, є ВТК, яка приводить до пошкодження робочих лопаток і передчасного прискореного виходу з ладу лопаткового апарату [3].

Відомо [6], що висока корозійна стійкість забезпечується наявністю в складі сплаву не менше 20% хрому. Однак, такий вміст хрому в сплаві в поєднанні з алюмінієм, титаном, вольфрамом, молібденом, ніобієм, танталом, гафнієм, може викликати утворення крихких топологічно щільноупакованих фаз (ТЩУ), типу σ -, μ -, η -, які різко знижують працездатність сплаву.

З точки зору економічних підходів, важливою вимогою до матеріалів лопаток є можливість їх багаторазового використання після періодичного відновлення структури і властивостей термічною обробкою.

До жароміцних нікелевих сплавів, призначених для спрямованої (моно) кристалізації, пред'являються більш жорсткі вимоги, ніж до сплавів рівноосьової кристалізації за вмістом шкідливих домішок кольорових металів, джерелом яких є вихідні шихтові матеріали, а також газових домішок, зокрема, кисню та азоту, які є джерелом неметалічних включень оксидів і нітридів. Так, як багато з перерахованих вище вимог несумісні між собою, то для задоволення всіх специфічних вимог деталі газових турбін виготовляють з різних класів жароміцних сплавів із застосуванням різних покриттів та технологічних прийомів. Тому, складний хімічний і фазовий склад сплавів є наслідком численних та суперечливих вимог, які слід комплексно враховувати. Таким чином, подальший розвиток сучасних вітчизняних жароміцних нікелевих сплавів пов'язаний з розробкою нових композицій, які повинні відповідати всім цим вимогам. При цьому, слід враховувати економічну доцільність (вартість сплаву, дефіцитність легувальних елементів і ін.) [4, 5, 7-11, 12, 13, 14].

1.2 Структура, фазовий склад і термічна стабільність жароміцних нікелевих сплавів

За умовами роботи жароміцні сплави можна розділити на 3 групи:

- сплави, які піддаються значним, але короткочасним механічним навантаженням в умовах високих температур;
- сплави, які знаходяться під меншим навантаженням більш тривалий час при високих температурах;
- сплави, які призначені для роботи в умовах високих температур і великих навантажень протягом тривалого часу.

Залежно від цього істотно змінюються вимоги до структури сплаву. Наприклад, будь-яка причина, що обумовлює термічну нестійкість структури

сплаву під час експлуатації, викликає прискорення процесів високотемпературної повзучості і руйнування. Тому сплави, які призначені для тривалої служби, піддаються спеціальній стабілізуючій обробці, яка, хоча і може привести до деякого зниження міцності при короткочасному навантаженні, робить сплав більш стійкішим до тривалої дії навантажень.

Жароміцні сплави класифікують також, за їх основою: нікелеві, залізні, кобальтові, титанові тощо. Назва за основою дає уявлення про інтервал робочих температур, який залежно від прикладених навантажень і тривалості їх дії складає 0,4...0,8 від температури плавлення основи.

В залежності від призначення жароміцні сплави виготовляють з підвищеним опором до втоми і корозії, з малою чутливістю до надрізів, термостійкі для експлуатації при значних, але короткочасних навантаженнях та ін. Наприклад, жароміцні сплави, що використовуються у космічній техніці, повинні мати низьку випаровуваність.

В залежності від схеми легування, методу виплавки і режиму термічної обробки, в структурі жароміцних нікелевих сплавів можуть утворюватися різні фази. При цьому, вплив цих фаз на характеристики жароміцності неоднозначний. Великий вплив на характеристики міцності надає основна зміцнювальна інтерметалідна γ' - фаза на основі Ni_3Al , поведінка якої при високих температурах і тривалих витримках визначає працездатність сплаву в цілому.

Чим більше різниця параметрів ґраток γ - твердого розчину і γ' - фази, незалежно від знака, тим менше час до руйнування сплаву при заданій температурі і навантаженні. При цьому, титан, ніобій, і особливо тантал, збільшують розмірну невідповідність (Δa - місфіт) між параметрами ґраток γ - твердого розчину і γ' - фази. Дані елементи, входячи до складу γ' - фази, збільшують період її ґратки.

Жароміцність сплавів, дисперсійно зміцнених когерентними з γ - твердим розчином виділеннями впорядкованої γ' - фази, залежить від

дисперсності частинок і їх об'ємної частки, а також морфології, розподілу, кінетики зміни структури і термодинамічної стійкості системи $\gamma + \gamma'$, аж до температури $0,8 t_{пл}$. При цьому, тантал, збільшуючи об'ємну частку γ' - фази, також входить до її хімічного складу в досить великих концентраціях, і одночасно входить до складу γ - твердого розчину, гальмуючи дифузійні процеси, зокрема, коагуляцію γ' - фази. Практика показала, що жароміцність сплавів значно підвищується при об'ємній частці γ' - фази більше 50%.

Велике значення в механізмі зміцнення нікелевих сплавів грають карбіди типу MC, які утворюються із рідини і розташовуються між осями дендритів, що обумовлює їх специфічну морфологію. В роботах [7, 8] показано, що всі γ' - утворювальні елементи (титан, ніобій, тантал, гафній) здатні також утворювати карбіди типу MC, і в залежності від системи легування жароміцних нікелевих сплавів, об'ємна частка карбідів може становити (1,5 - 2,5%).

В структурі жароміцних нікелевих сплавів можуть бути присутніми тверді і крихкі інтерметалідні фази типу Ni_3Ti , Ni_3Nb , Ni_3Ta (η - фаза), які можуть утворюватися при підвищеній концентрації титану, ніобію або танталу відповідно, а також ТЩУ - фази типу σ - і μ -, умови утворення яких визначаються схемою легування сплавів, особливо вмістом хрому, а також сумарним вмістом важкотопких компонентів. Ці фази не є ефективними зміцнювачами, в порівнянні із γ' - фазою і карбідами, тому що виділяються у вигляді пластин або голок. Виділення цих фаз негативно впливає на ряд важливих характеристик: різко знижують показники міцності, особливо пластичності сплавів, що приводить до передчасного руйнування матеріалу при високих температурах і [9, 11, 15].

Дослідження структури і фазового складу постійно супроводжують весь період розробки жароміцних нікелевих сплавів. Вплив кожного легувального елемента на зміцнення γ - твердого розчину, а також на склад і кількість фаз, які утворюються, параметри їх кристалічних ґраток інші

важливі характеристики дуже складний і не завжди однозначний. Проте, результати вивчення фазового складу дають підставу говорити про деякі загальні тенденції та закономірності.

У роботі [4] показано, що ускладнення хімічного складу сплаву викликає зміну у співвідношенні γ - і γ' - фаз, а також перерозподіл елементів між ними. При цьому хром впливає на розчинність титану, ніобію, танталу в γ - твердому розчині і γ' - фазі. Знеміцнення жароміцних нікелевих сплавів зі спрямованою (моно) структурою відбувається внаслідок перерозподілу легувальних елементів поблизу границь фаз, що відноситься до найбільш дифузійно рухомих елементів - алюмінію, титану, хрому, а також домішок, які сприяють процесу прискорення коагуляції основної зміцнюючої γ' - фази і зменшення її кількості.

1.3 Вплив легувальних елементів на службові характеристики жароміцних нікелевих сплавів

Використання перспективних легувальних елементів, таких як, ніобій, гафній, тантал, реній і інших дефіцитних металів, підвищує характеристики температурної працездатності і жароміцність нікелевих сплавів, але при цьому значно збільшують їх вартість. Тому промислове використання таких сплавів повинно визначатися, в першу чергу, економічною доцільністю.

З метою підвищення жароміцності нікелевих сплавах, рекомендується вміст хрому не більше (6-10%) і збільшення концентрації γ - твердорозчинних зміцнювачів (вольфрам, молібден, реній), а також γ' - утворюючих елементів (алюмінію, титану, ніобію, гафнію, танталу), які, взаємодіючи з нікелем, утворюють складнолеговану γ' - фазу на основі Ni_3Al , що і забезпечує основний зміцнювальний ефект. Але ці елементи можуть викликати структурну неоднорідність (евтектичні виділення) і негативно впливати на

показники жароміцності, особливо пластичності, сплавів цього класу (тантал - в меншій мірі).

Задовільні значення поверхневої стабільності можуть бути досягнуті при вмісті хрому (12 - 16%) і оптимальному легуванні іншими елементами. Збільшення в складі вмісту хрому до 20% і більше не приводить до помітного поліпшення параметрів корозійної стійкості. При цьому, для отримання високих властивостей міцності і необхідної корозійної стійкості співвідношення вмісту титану до алюмінію повинно бути $Ti / Al > 0,7 - 1,0$ [6].

На цей час відомо, що традиційний метод оптимізації міцності жароміцних нікелевих сплавів для роботи за температур 1000°C і вище, є збільшення об'ємної частки γ' - фази, за рахунок підвищення сумарної концентрації γ' - утворювальних елементів при збалансованому легуванні γ - твердого розчину молібденом, вольфрамом або ренієм.

Для підвищення міцності нікелевих сплавів, в якості легувальних елементів широко застосовують гафній, цирконій, ніобій, а також тантал, які більшою мірою концентруються в γ' - фазі, ніж у γ - твердому розчині. При цьому, дані елементи присутні і в карбідах різних типів MC, M_6C , $M_{23}C_6$, покращуючи їх морфологію і підвищуючи термічну стабільність [9].

В роботах [9, 11] вказується, що в структурі жароміцних нікелевих сплавах карбіди типу MC є найбільш міцними і стабільними фазами. Однак, до складу карбідів різних типів в реальних сплавах входять не тільки основні карбідоутворювальні елементи (титан, ніобій, тантал, гафній, хром), але також і інші елементи - вольфрам, молібден, кобальт і ін.. За рахунок цього, в карбідах можуть послаблюватися сили зв'язку, і можливі реакції розпаду, що приводить до утворення карбідів інших типів, при цьому характеристики міцності можуть бути нестабільними.

Дослідники [8, 9] визначають, що до теперішнього часу інформації про вплив легувальних елементів на хімічний склад γ' - фази в жароміцних нікелевих сплавах недостатньо. Разом з тим, показано, що більше половини

алюмінію може бути заміщено титаном, і що невелика частина хрому, кобальту, вольфраму та інших елементів, що містяться в сплаві, може бути в хімічному складі γ' - фази. Також показано, що більше половини загальної кількості ніобію і танталу входить до складу γ' - фази (30 – 33)% за масою до складу γ - твердого розчину і (0,2 - 0,3%) міститься в карбо-нітридних фазах типу Nb(C, N), Ta(C, N), але кількісного зв'язку між загальним складом сплаву і хімічним складом основної зміцнювальної γ' - фази поки що не встановлено.

Оптимальні службові характеристики для робочих температур 800-850⁰С в жароміцних нікелевих сплавах досягаються при співвідношенні елементів, що визначається умовою:

$$11,2 \leq (\text{Ti}\% + \text{Al}\% + \text{Nb}\% + 0,5\text{Ta}\% + 0,2\text{Cr}\%) \leq 11,4.$$

Безперервне підвищення жароміцності нікелевих сплавів, за рахунок подальшого збільшення вмісту важкотопких елементів, може приводити до виділення в їх структурі надлишкових шкідливих ТЩУ - фаз типу σ -, μ -, η -, несприятливої морфології, внаслідок чого знижується як структурна і фазова стабільність, так і службові характеристики.

1.4 Особливості легування нікелевих сплавів для рівноосьової і спрямованої кристалізації та монокристалічного лиття

Міжнародний досвід [7, 8, 11] показує, що легування жароміцних нікелевих сплавів, які призначені для отримання литих деталей методом спрямованої кристалізації або лиття з монокристалічною структурою має свої специфічні особливості, які необхідно враховувати при розробці хімічних

складів, як нових композицій, так і удосконалення (модернізації) складів відомих промислових марок.

В роботах дослідників [4, 9, 15] визначається, що підвищення вмісту в складі сплаву більш сильних γ' - утворюючих елементів, ніж вольфрам, таких як титан, ніобій, тантал або гафній, приводить до заміщення вольфраму в складі γ' - фази і виділенню його у вигляді самостійних фаз на його основі (α_w). Тантал є найбільш сильний зміцнювач γ' - фази, ніж титан і ніобій, як при кімнатній, так і при підвищених температурах. Тому, вважається, що тантал не тільки підвищує міцність часток γ' - фази, але і підвищує температуру їх розчинення у γ - твердому розчині. З метою підвищення термічної стабільності карбідної фази і стабілізації структури жароміцних нікелевих сплавів, призначених для отримання виливків методом спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття, необхідно в їхньому складі знижувати вміст вуглецю, в порівнянні з його вмістом в складі сплавів, призначених для рівноосьової кристалізації.

У таблиці 1.1 наведені хімічні склади відомих зарубіжних та вітчизняних промислових нікелевих сплавів, призначених для отримання виливків різними методами кристалізації [6, 7, 8, 9, 11].

Таблиця 1.1 – Хімічний склад жароміцних нікелевих сплавів [7-10]

Марка сплаву	Середній вміст елементу, % за масою												
	C	Cr	Al	Ti	M o	W	Co	Nb	Ta	Zr	B	Hf	Re
Рівноосьова кристалізація													
ЖС6-К	0,16	11,5	5,5	2,8	4,0	5,0	4,5	-	-	0,04	0,020	-	-
ЖС6-У	0,17	9,0	5,8	2,5	1,9	10,3	9,7	1,0	-	0,05	0,015	-	-
ВЖЛ-12У	0,17	9,5	5,4	4,4	3,0	1,4	14,0	0,7	-	0,02	0,035	V- 0,7	
ЧС70-ВИ	0,10	16,0	3,0	5,5	2,0	4,2	14,0	0,5	-	-	0,015	-	-
ЗМИ-3У	0,12	13,3	3,3	4,8	0,8	7,3	5,0	-	-	-	0,015	-	-

Продовження таблиці 1.1

ЦНК-21	0,08	21,0	2,5	3,4	1,5	2,3	10,8	0,7	-	-	0,012	-	-
Rene-80	0,17	14,0	3,0	5,0	4,0	4,0	9,5	-	-	-	-	-	-
IN-738 LC	0,11	16,0	3,5	3,5	1,7	2,6	8,5	0,8	1,7	0,05	0,010	-	-
IN-792	0,08	12,5	3,5	4,1	1,9	3,8	9,0	-	3,9	0,04	0,015	-	-
IN-939	0,15	22,5	1,9	3,7	-	2,0	19,0	1,0	1,4	0,09	0,009	-	-
Спрямована кристалізація													
ЖС26-ВІ	0,13	4,4	5,9	0,9	1,1	11,9	8,5	1,7	-	0,05	0,015	V- 0,9	
ЖС32-ВІ	0,15	4,9	5,9	-	1,0	8,5	9,0	1,6	4,0	-	0,015	-	4,0
ЦНК-7	0,09	14,7	3,7	4,2	0,6	7,2	9,0	-	-	-	0,010	-	-
ЖСКС-1	0,10	14,0	4,0	4,0	2,0	4,0	9,0	1,0	0,5	-	0,015	-	-
PWA-1422	0,14	9,0	5,0	2,0	-	12,0	10,0	1,0	-	0,05	0,015	1,5	-
CM186LC	0,07	6,0	5,7	0,7	0,5	8,0	9,0	-	3,0	0,05	0,015	1,4	3,0
Rene-142	0,12	6,6	6,2	-	1,5	4,9	12,0	-	6,4	0,03	0,015	1,5	2,8
IN-792 LC	0,08	12,5	3,4	3,5	1,8	4,1	9,0	-	4,1	0,02	0,015	1,0	-
DS-16	0,06	16,0	3,5	3,5	3,0	-	5,0	-	3,5	0,01	0,015	1,0	-
DSGTD-111	0,10	14,0	3,0	5,0	1,5	3,7	9,4	-	3,0	0,05	0,010	0,1	-
Монокристалічна кристалізація													
ЖС-30М	-	7,0	5,1	1,8	0,6	11,7	7,5	1,1	-	-	-	0,1	-
ЖС-36	-	4,0	5,8	1,1	1,2	11,7	9,0	1,1	-	-	-	-	2,0
ЖС-40	-	6,3	5,3	-	4,2	7,0	0,5	0,2	7,0	-	-	-	-
ЦНК-8М	-	12,3	4,1	4,5	-	6,7	8,8	-	-	-	-	-	-
ЖСКС-2	-	13,5	4,1	3,8	2,0	4,1	9,5	-	2,0	-	-	-	1,0
Rene-N6	0,05	4,2	5,7	-	1,4	6,0	12,5	-	7,2	-	0,004	-	5,4
SC-16	-	16,0	3,5	3,5	3,0	-	-	-	3,5	-	-	-	-
PWA1483	0,07	12,0	3,6	4,1	1,9	3,8	9,0	-	5,0	-	0,003	-	-

Продовження таблиці 1.1

Марка сплаву	Середній вміст елементу, % за масою												
	C	Cr	Al	Ti	Mo	W	Co	Nb	Ta	Zr	B	Hf	Re
CMSX-11B	-	12,5	3,6	4,2	0,5	5,6	7,0	-	5,0	-	0,002	-	-
CMSX-11C	-	14,9	3,4	4,2	0,4	4,5	3,0	-	5,0	-	0,002	-	-

Аналіз хімічних складів показав, що на відміну від сплавів для рівноосьової кристалізації, сплави, які призначені для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття містять тантал в широкому діапазоні легування (4 - 12%), що можна пояснити різним вмістом в цих сплавах хрому, який обмежує розчинність танталу в нікелевій матриці (див. табл. 1.1).

Слід зазначити, що швидкий прогрес в області підвищення жароміцності нікелевих сплавів для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття було досягнуто за рахунок легування їх танталом, який раніше у вітчизняних сплавах, призначених для лиття із рівноосьовою структурою, не застосовувався. Зниження концентрації зернограничних зміцнювачем, таких як вуглець, бор, цирконій, приводить до помітного підвищення температури солідусу t_s - початку плавлення сплаву. При цьому повне розчинення γ' - фази з помітним розчиненням нерівноважних фаз стає можливим без локального оплавлення евтектики $\gamma + \gamma'$. Сплави для монокристалічного литва типу «Rene» містять невеликі концентрації вуглецю і бору. Дослідники [7, 8] вважають, що повне виключення цих елементів з хімічного складу приводить до зниження довговічності зразків, а введення цих елементів в невеликих концентраціях (до 0,05%) є необхідним для підвищення довговічності за рахунок зміцнення малокутових границь субзерен.

Багатьма дослідниками [5, 7-11] вважається, що алюміній, титан, молібден, вольфрам, ніобій, тантал, гафній, цирконій підвищують термічну стабільність γ' - фази, за рахунок підвищення температури її розчинення в твердому розчині, а кобальт, хром, вуглець, бор, ванадій, навпаки її знижують. Практика показала, що між жароміцністю і температурою розчинення основної зміцнювальної γ' - фази існує досить жорстка кореляція. Тому, при розробці нових складів сплавів та удосконаленні складів відомих промислових марок, цей параметр треба оптимізовувати для конкретного сплаву. Також, автори цих робіт вважають, що з метою підвищення рівня жароміцності в сплави на нікелевій основі слід вводити тантал, який має високу температуру плавлення і пластичні властивості. До теперішнього часу пошук оптимальних складів жароміцних нікелевих сплавів, призначених для рівноосьової кристалізації, а також для спрямованої кристалізації та монокристалічного литва ще не завершений. Тому щорічно з'являються нові патенти і публікації в провідних світових країнах, таких як: США, Великобританія, Франція, Японія, Росія, Україна. Ці науково-дослідницькі роботи спрямовані на розробку як нових складів сплавів, так і вдосконалення (модернізація) серійних промислових сплавів та режимів їх термічної обробки з метою підвищення комплексу службових і технологічних характеристик.

1.5 Вплив термічної обробки на структурну і фазову стабільність жароміцних сплавів на нікелевій основі

Підвищення надійності і ресурсу газотурбінних двигунів у великій мірі залежить від підвищення термічної стабільності структури і окремих фаз жароміцних нікелевих сплавів. Механічні властивості жароміцних нікелевих сплавів значною мірою визначаються температурою старіння. При цьому в сплавах зі спрямованою або моноструктурою стабілізація фаз відбувається при більш високій температурі, ніж у сплавів з рівноосьовою структурою. Вивчення основних закономірностей розпаду γ - твердого розчину і виділення фаз необхідно для оптимального вибору режимів гомогенізації і старіння, які повинні забезпечити найбільш ефективне зміцнення сплавів цього класу. На практиці цей шлях реалізовувався для ряду вітчизняних і зарубіжних нікелевих сплавів за допомогою емпіричного підбору ступенів гомогенізації та старіння. В роботах багатьох дослідників [6, 8, 11] показано, що максимальна міцність досягається тоді, коли відбувається повний розпад γ - твердого розчину, що спостерігається при розмірі частинок γ' - фази (0,30 - 0,50) мкм. При цьому, жароміцні нікелеві сплави з дисперсійним інтерметалідним зміцненням термічно обробляються шляхом високотемпературної витримки (гомогенізація - обробка на твердий розчин) з подальшим швидким охолодженням на повітрі, що фіксує твердий розчин, з подальшим високотемпературним або низькотемпературним старінням, в результаті чого відбувається довиділення дисперсних частинок надлишкових фаз в результаті до розпаду твердого розчину. Однак, такий режим термообробки не завжди дозволяє отримати досить високі показники пластичності в сплавах, які призначені для тривалої експлуатації робочих лопаток ГТУ.

Вважається, що для зменшення дендритної ліквідації і вирівнювання хімічного складу за об'ємом, багатоступенева циклічна гомогенізація

лопаток зі спрямованою структурою є найбільш ефективною. З її допомогою досягають більш повного розчинення γ' - фази та розчинення більшої частини нерівноважної евтектики $\gamma+\gamma'$ без локального оплавлення. Після високотемпературної гомогенізації слід проводити низькотемпературну гомогенізацію з охолодженням на повітрі, що надає γ' - фазі двох розмірності (бімодальність) і оптимізує опір до високотемпературної повзучості. При цьому, оптимальний розмір часток основної зміцнювальної γ' - фази, її морфологія, а також розподіл евтектики $\gamma+\gamma'$, карбідної фази в структурі сплаву є визначальними факторами, які впливають на механічні властивості і пластичність сплавів цього класу. Практикою визначено, що при короткочасних і тривалих випробуваннях найкраще поєднання міцності і пластичності в жароміцних нікелевих сплавах досягається після двоступеневої гомогенізації.

За сучасними уявленнями вважається [3, 10, 11], що оптимальне поєднання міцності і пластичних характеристик в жароміцних нікелевих сплавах досягається при обмеженому перестарюванні основної зміцнюючої γ' - фази і при наявності специфічної структури, коли дискретні дрібнодисперсні виділення карбідних часток оточені більш пластичною матрицею. Така структура забезпечує затримку в розвитку міждендритних тріщин та сприяє збільшенню довговічності сплавів, за рахунок підвищення запасу пластичності, знижуючи чутливість до концентраторів напружень.

Виділення небажаних фаз в жароміцних нікелевих сплавах має місце як під час кристалізації, термообробки, так і в процесі тривалої експлуатації в інтервалі, так званих, небезпечних температур $(750-950)^{\circ}\text{C}$. В цей час експериментально встановлено, що ТЩУ - фази переважно виділяються із γ - твердого розчину (складно легованої аустенітної матриці). Тому контроль схильності сплавів цього класу до виділення надлишкових шкідливих фаз несприятливої морфології є одним з важливих факторів, який забезпечує надійність роботи лопаткового апарату та збільшення робочого ресурсу ГТУ.

Особливо великий інтерес [7, 9, 11] представляє утворення ТЩУ - фаз після кристалізації, виділення яких може спостерігатися в жароміцних нікелевих сплавах з незбалансованим хімічним складом. Показано, що утворенню σ -, μ - фаз в значній мірі сприяють хром, вольфрам, молібден, реній і деякі інші елементи. Разом з тим визначається, що вміст в складі кобальту менше 5% за масою знижує процес σ - утворення, так як кобальт входить до складу γ' - фази і витісняє хром в γ - твердий розчин, в той же час вміст кобальту понад 5% за масою активно впливає на σ - утворення. Тому з метою забезпечення експлуатаційних властивостей при робочих температурах в жароміцних нікелевих сплавах необхідно сформувати оптимальний структурний стан, який відрізняється високою структурною стабільністю фаз при впливі високих температур.

В роботах [3, 4] дослідники звертають увагу на те, що жароміцність і термічна стабільність сплавів в діапазоні робочих температур, в більшій мірі, залежить не стільки від кількості часток γ' - фази, скільки від її хімічного складу, так як дифузія є відповідальною за високотемпературні процеси, які відбуваються в структурі. Тому, типовий режим термообробки для високолегованих нікелевих сплавів передбачає три стадії: гомогенізацію (для вирівнювання ліквацийної неоднорідності і розчинення нерівноважних фаз грубої морфології), а також дві ступені старіння (для виділення дисперсних вторинних фаз і зняття термічних напруг). Термообробка жароміцних нікелевих сплавів, призначених для спрямованої кристалізації, відрізняється гомогенізацією при більш високій температурі. При цьому, відбувається не тільки повне розчинення γ' - фази, але і часткове розчинення нерівноважних фаз евтектичного походження, а також зниження дендритної ліквации. Після першого ступеня гомогенізації далі проводять другу ступінь термообробки в за температур (1030 – 1070)⁰С. Такий режим термообробки забезпечує більш високі характеристики міцності жароміцним нікелевим сплавам, призначеним для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття.

1.6 Перспективи щодо розвитку жароміцних нікелевих сплавів зі спрямованою і монокристалічною структурою

Технологія спрямованої кристалізації, підвищуючи службові характеристики жароміцних нікелевих сплавів, є перспективним процесом, який в даний час дозволяє збільшити ККД газотурбінних установок. В жароміцних нікелевих сплавах авіаційного призначення зі спрямованою та монокристалічною структурою досягнуто таке ж підвищення рівня жароміцності, яке вдалося отримати за останні 15 років шляхом вдосконалювання і оптимізації системи легування сплавів. При цьому, ще не вичерпані можливості технології спрямованої (моно) кристалізації, що пов'язана з підвищенням міцності жароміцних нікелевих сплавів за рахунок макро- і мікро- структурного фактору [8].

Використання лопаток зі спрямованою (моно) структурою, натомість рівноосного лиття, дає можливість значно підвищити ресурс експлуатації, за рахунок збільшення опору повзучості і підвищення запасу пластичності. При цьому підвищення робочої температури металу лопатки на 30 - 60⁰С дозволить заощадити витрата повітря на охолодження до 30% з відповідною економією палива. Подібний спосіб лиття відкриває перспективу використання литих охолоджуваних і неохолоджуваних лопаток на енергетичних і газоперекачувальних агрегатах тривалої експлуатації [8-11].

В період освоєння технічного процесу спрямованої (моно) кристалізації в стаціонарному газотурбобудуванні, для виготовлення лопаток використовувалися авіаційні ливарні сплави ЖС-6К, ЖС-6У, ЖС-26, ЖС-32, що мають досить високі властивості міцності і низькі параметри ВТК - стійкості. Надалі для забезпечення необхідного комплексу службових характеристик, з урахуванням умов роботи лопаткового апарату стаціонарних ГТУ, що характеризуються відносно зниженими робочими температурами, великим ресурсом експлуатації при наявності корозійно-

активних середовищ, були розроблені корозійностійкі сплави ЦНК-7, ЦНК-8, ЖСКС-1, ЖСКС-2 і ряд інших [11, 12, 14]. В даний час найбільш широке застосування анізотропні литі лопатки знайшли в авіаційному газотурбобудуванні, де вони використовуються вже протягом 25 років, причому в останні 15 років - монокристалічні. У міру вдосконалення і здешевлення технологічного процесу область застосування таких лопаток розширилася в стаціонарному газотурбобудуванні [7, 8, 10, 11].

В роботах [7, 8] показано, що близько половини приросту жароміцності було досягнуто за рахунок більш ефективної конструкції повітряної охолоджувальної системи робочих лопаток турбіни. Інша половина приросту була досягнута за рахунок розробки нових сплавів і удосконалення (модернізації) складів серійних промислових марок та вдосконалення ливарних технологій. При цьому, середній рівень короткочасної і тривалої міцності за 5 років підвищився на 20-30%, а найбільший темп зростання жароміцності нікелевих сплавів був досягнутий за останні 25 років. Подальше підвищення температури газу на вході в турбіну обмежується температурною працездатністю матеріалу зберігати структурну і фазову стабільність протягом тривалого часу. Практика показала, що використання для спрямованої (моно) кристалізації сплавів, призначених для лиття методом рівноосьової кристалізації з традиційною схемою легування, дозволяє підвищити границі їх тривалої міцності, повзучості, а також пластичність, але не дозволяє в повній мірі реалізувати потенційні можливості сплавів цього класу. Найбільший вплив на розчинність танталу в нікелі дає хром, і для підвищення вмісту танталу в корозійностійких нікелевих сплавах необхідно знижувати вміст хрому.

Основною метою дипломної роботи було визначення впливу танталу на структуру та хімічний склад фаз в сплаві ЗМІ-3У з метою визначення оптимального структурного стану, який буде позитивно впливати на термодинамічну стабільність структури і окремих фаз, що покращить

комплекс службових властивостей при тривалій експлуатації робочих лопаток зі спрямованою і монокристалічною структурою .

У зв'язку з цим в задачі досліджень входило:

- вивчити особливості впливу танталу на структуроутворення, морфологію і фазовий склад жароміцного корозійностійкого сплаву ЗМІ-ЗУ;
- на підставі порівняльного аналізу результатів металографічних досліджень оптимізувати вміст танталу в сплаві ЗМІ-ЗУ в дослідженому діапазоні легування (1-5)% за масою за оптимальним структурним станом та морфологією окремих фаз в литому стані та після термічної обробки з метою покращення комплексу службових властивостей.

2 МАТЕРІАЛ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

В рамках досліджень даної роботи було вивчено вплив танталу на формування структури, фазовий склад, а також хімічний склад фаз серійного промислового жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву ЗМІ-ЗУ, легованого танталом в досліджуваному діапазоні (1-5)% за масою.

На основі базового сплаву ЗМІ-ЗУ отримували досліджені склади, що містили тантал в досліджуваному діапазоні (1-5%), з концентраційним кроком 1%, за масою, всередині діапазону легування. Використовували стандартні вихідні шихтові матеріали.

Хімічний аналіз досліджених зразків дослідних плавів проводили за стандартними методами, відповідно до вимог ТУ 14-1689-73 і ОСТ 1.90127-85. Спектральний хімічний аналіз проводили на оптичному емісійному приладі ARL-4460 (квантометр одночасного багатоканального аналізу) в хвильовому діапазоні 170 - 800 нм. Хімічний склад досліджених плавів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад реальних дослідних плавів

№ складу	Вміст елемента, % за масою											
	C	Cr	Al	Ti	Mo	W	Co	Ta	B	Y	La	Ni
0	0,08	13,3	3,3	4,8	0,8	7,2	5,0	0,0	0,009	0,03	0,01	Ре ш.
1	0,07	13,1	3,4	4,7	0,7	6,9	5,1	0,9	0,008	0,03	0,01	Ре ш.
2	0,07	13,2	3,6	4,6	0,8	7,0	4,9	1,9	0,008	0,03	0,01	Ре ш.
3	0,08	13,5	3,5	4,6	0,7	6,9	4,8	2,8	0,009	0,03	0,01	Ре ш.

Продовження таблиці 2.1

№ складу	Вміст елемента, % за масою											
	C	Cr	Al	Ti	Mo	W	Co	Ta	B	Y	La	Ni
4	0,06	13,0	3,6	4,4	0,7	7,2	5,0	3,9	0,008	0,03	0,01	Рс ш.
5	0,07	13,2	3,5	4,5	0,8	7,1	5,1	4,8	0,008	0,03	0,01	Рс ш.

В таблиці 2.1 показано, що сплав ЗМІ-3У без танталу (склад «0») відповідає середньомарочному паспортному складу [16]. Кожен наступний за номером досліджений склад від «1» до «5» містив, за розрахунком, на 1% танталу більше, ніж попередній.

Заливку монозразків кристалографічної орієнтації (КГО) здійснювали на високоградієнтній установці для спрямованої кристалізації УВНК-8П в спеціальні керамічні блоки, з попередньо встановленими всередину затравочними кристалами відповідно до серійної технології, зі швидкістю переміщення форми $\bar{V} = 10$ мм / хв в рідкометалічному кристалізаторі (розплав алюмінію). Зростання монокристалу в зразку відбувалося за рахунок підплавлення металом, що заливається, верхньої поверхні затравки. Заливку проводили одночасно в два блоки по шість зразків. Загальна кількість литих заготовок циліндричної форми (діаметр $\varnothing 16$ мм, довжина $l = 180$ мм) становило 12 штук для кожного дослідного складу. Литі заготовки монокристалічних зразків дослідних складів (див. рис. 2.1) проходили 100% контроль макроструктури шляхом травлення в розчині, що містить: хлорне залізо (700-800 г), соляну кислоту (120-150 см³) і воду до 1 дм³. Контроль кристалографічної орієнтації здійснювали на установці ДРОН-3М. Контроль кристалографічної орієнтації показав, що монозразки всіх дослідних складів мали допустиме відхилення від основного напрямку [001] на кут не більше $\alpha \leq 10^0$.

2.1. Металографічні дослідження

Дослідження мікроструктури монокристалічних зразків дослідних складів проводили на нетравлених і травлених мікрошліфах, площа яких була орієнтована уздовж і по нормалі до поверхні зразків, на світловому оптичному мікроскопі «Olympus IX-70» із цифровою відеокамерою «ExwaveHAD color video camera Digital Sony» при збільшеннях: $\times 100$, $\times 200$, $\times 1000$. Мікроструктуру виявляли за допомогою травлення поверхні шліфів реактивом Марбле [27] - CuSO_4 - 4 г, HCl - 20 мл, вода - 20 мл по режиму: травлення 10 - 15 секунд, промивка водою, сушка гарячим повітрям. Для виявлення евтектики $\gamma + \gamma'$ і γ' - фази використовували реактив CuSO_4 - 20 г, H_2SO_4 - 5 мл, H_2O - 100 мл, щільність струму - 500 A/m^2 . Для виявлення карбідів, використовувався реактив NaF - 30 г, HCl - 100 мл, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ (лимонна кислота) - 100 г, H_2O - 1000 мл, щільність струму - 200 A/m^2 . Для ідентифікування ТЩУ- фаз і карбідів типу M_{23}C_6 , M_6C , які мають схожу голчасту морфологію, проводили кольорове травлення за допомогою реактиву: $\text{C}_6\text{N}_6\text{FeK}_3$ (червона кров'яна сіль) - 10 г, NaOH - 10 г, H_2O - 100 мл, щільність струму 500 A/m^2 .

Дослідження структури (морфологія, хімічний склад фаз) дослідних складів до і після термообробки здійснювали з використанням електронної мікроскопії на растровому мікроскопі JEOL JSM-6360LA при збільшенні $\times 10\,000$.

2.2 Мікрорентгеноспектральний аналіз фаз

Для ідентифікації фаз використовували метод локального мікронзондового аналізу. Дослідження складу фаз здійснювалося на приставці

до растрового електронного мікроскопа JEOL JSM - 6360LA з системою енергодисперсійного мікрорентгеноспектрального аналізу JED-2300. Даним методом в сплаві ЗМІ-ЗУ оцінювався вплив танталу в досліджуваному діапазоні легування на специфіку формування структури, морфологію та хімічний склад фаз. Переведення значень якісного аналізу в кількісний проводилося автоматично за програмою приладу. Відносна похибка методу становила $\pm 0,1\%$ за масою.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ТАНТАЛУ НА МОРФОЛОГІЮ І ФАЗОВИЙ СКЛАД СПЛАВУ ЗМІ-3У

Нерівноважні умови кристалізації викликають значний розвиток дендритної ліквіації, внаслідок наявності в складі сучасних жароміцних нікелевих сплавів великої кількості компонентів, що робить помітний вплив на морфологію і хімічний склад фаз. Тому однією з найважливіших ливарних характеристик є ступінь дендритної ліквіації елементів, що визначає кінцеві властивості сплаву і його працездатність [17, 18, 19-23, 24].

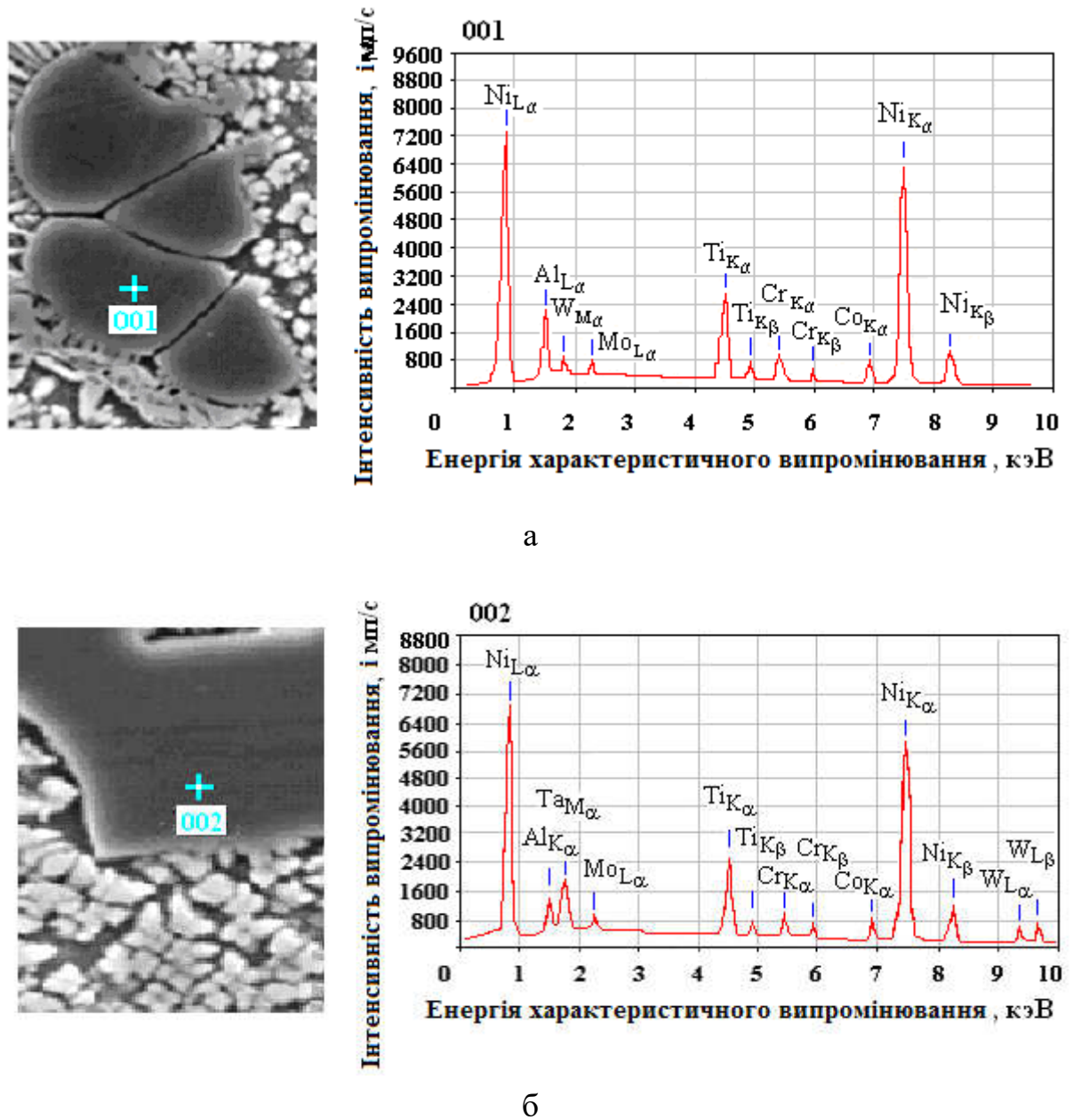
3.1. Якісний МРСА евтектики $\gamma+\gamma'$, γ' - фази та карбідної фази в литому стані.

Хімічний склад фаз залежить від вихідного складу сплаву. Але визначення складу конкретної фази за елементами вимагає точного кількісного аналізу в межах фази.

На рисунку 3.1 показано, що евтектика $\gamma+\gamma'$ в сплаві ЗМІ-3У без танталу (склад «0») і дослідному складі ЗМІ-3У з 4,8% танталу (склад «5»), що виділилася переважно в міждендритних просторах, має помітну різницю в морфології і хімічному складі.

Металографічні дослідження і дані МРСА показали, що при кристалізації міждендритний розплав збагачується γ' - утворюючими елементами. Тому в міждендритних областях, пересичених алюмінієм, титаном і танталом, евтектика $\gamma+\gamma'$ виділяється великих розмірів, за рахунок того, що ці елементи мають найбільшу ліквіацію. Ліквіаційний характер розподілу елементів, які беруть участь в утворенні евтектики $\gamma+\gamma'$,

призводить до нерівномірного її виділення в об'ємі сплаву.



а – сплав ЗМІ-3У без тантала (склад «0»);

б – сплав ЗМІ-3У с 4,8% тантала (дослідний склад «5»).

Рисунок 3.1 - Якісний МРСА евтектики $\gamma+\gamma'$ в литому стані (до термообробки): $\times 10000$

Металографічний аналіз показав, що підвищення вмісту тантала в дослідженому діапазоні легування приводить до зміни форми евтектики $\gamma+\gamma'$ від віялоподібної в структурі сплаву ЗМІ-3У без тантала (див. рис. 3.1 а) до

ограненої в структурі сплаву ЗМІ-3У з 4, 8% танталу (див. рис. 3.1 б). При цьому спостерігали збільшення на 3-5% об'ємної частки евтектики $\gamma+\gamma'$.

Якісний і кількісний МРСА показав помітну різницю в хімічному складі евтектики $\gamma+\gamma'$ сплаву ЗМІ-3У без танталу і дослідного складу ЗМІ-3У з 4,8% танталу, яку спостерігали за елементами, які найбільш сильно лікують: вольфрам, алюміній, титан, тантал (див. рис. 3.1 б і табл. 3.1).

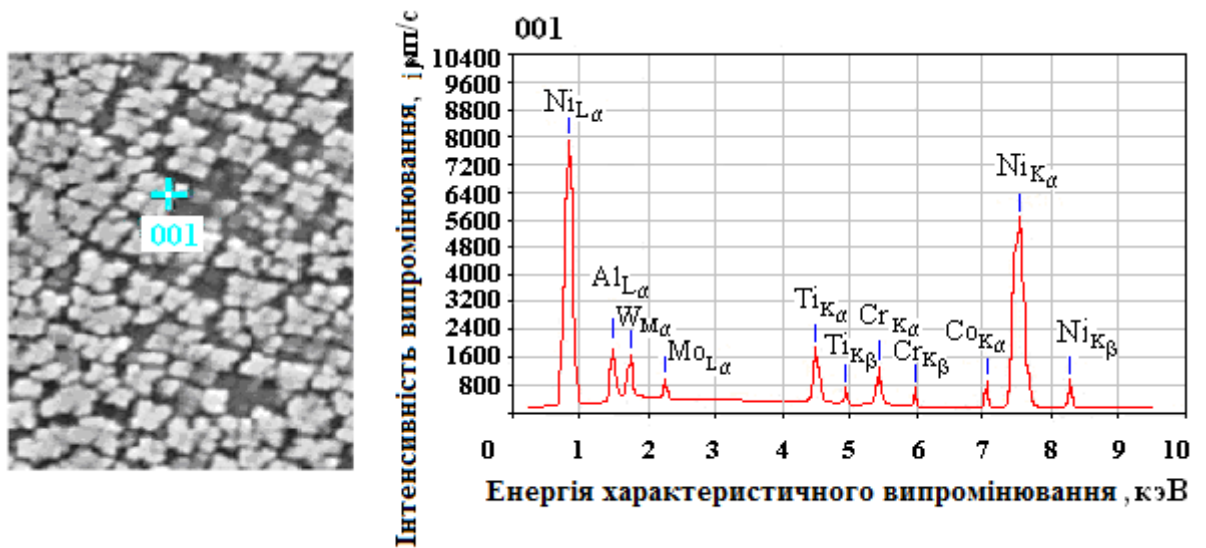
У таблиці 3.1 наведені порівняльні результати кількісного аналізу хімічного складу евтектики $\gamma+\gamma'$ дослідних сплавів, легованих танталом в дослідженому діапазоні (1-5)% за масою, отриманих за допомогою електронного мікрозонда методом МРСА [25].

Таблиця 3.1 - Якісний МРСА евтектики $\gamma+\gamma'$ в структурі дослідних складів

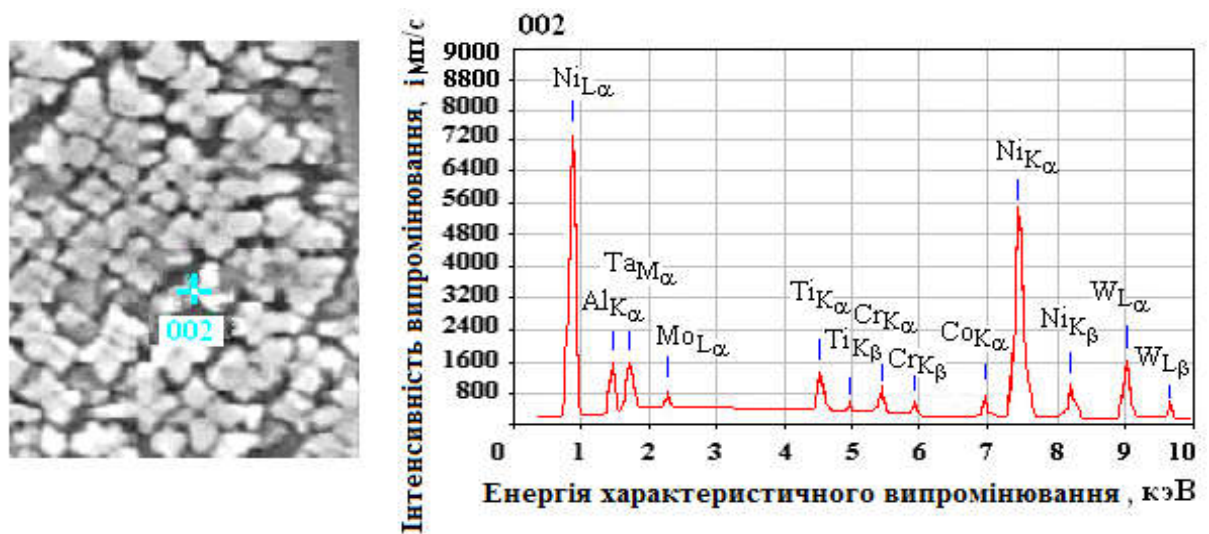
№ складу	Вміст елемента в евтектиці $\gamma + \gamma'$ в литому стані (до термообробки), % за масою						
	Cr	Co	W	Al	Ti	Ta	Ni
0	2,8	2,3	3,6	7,2	8,9	--	75,2
1	2,8	2,4	3,4	7,1	8,7	2,2	73,3
2	2,7	2,4	3,3	6,9	8,5	4,5	71,5
3	2,7	2,4	3,1	6,8	8,4	5,7	70,9
4	2,6	2,4	2,9	6,6	8,0	6,9	70,6
5	2,6	2,4	2,8	6,5	7,8	7,8	70,1

Аналіз результатів МРСА показав, що з підвищенням вмісту танталу в сплаві ЗМІ-3У в дослідженому інтервалі легування змінюється склад евтектики $\gamma+\gamma'$, за рахунок перерозподілу легувальних елементів. В складі евтектики $\gamma+\gamma'$ концентрація хрому та кобальту залишається постійною і не залежить від вмісту танталу в дослідних складах. Встановлено, що при вмісті танталу 4,8% в сплаві ЗМІ-3У (склад «5») у складі евтектики $\gamma+\gamma'$ кількість

вольфраму знижується в 1,3 рази, а концентрація алюмінію і титану - в 1,1 рази, в порівнянні з сплавом ЗМІ-3У без танталу (склад «0»).



а



б

а – сплав ЗМІ-3У без танталу (склад «0»);

б – сплав ЗМІ-3У з 4,8% танталу (дослідний склад «5»).

Рисунок 3.2 - Якісний МРСА γ' - фази в литому стані (до термообробки): $\times 10000$

Слід зазначити, що в складі евтектики $\gamma+\gamma'$ концентрація хрому нижче в 4,5 - 5 разів, а кобальту і вольфраму в 2,0 - 2,5 рази, при цьому, концентрація

алюмінію, титану і танталу в 1,5 - 2 рази вище, ніж їх зміст в складі сплаву (див. табл. 2.1, 3.1)

Якісний МРСА хімічного складу γ' - фази сплаву ЗМІ-3У без танталу і дослідного сплаву ЗМІ-3У з 4,8% танталу показав, що γ' - фаза представляє хімічно складне інтерметалідне з'єднання, в якому в значній кількості розчинені інші легувальні елементи (рис. 3.2).

Так, в хімічному складі γ' - фази дослідних сплавів «1» - «5», що містять тантал в дослідженому діапазоні легування, істотно перерозподіляються елементи, в порівнянні зі сплавом ЗМІ-3У без танталу (склад «0»). У таблиці 3.2 представлені результати кількісного аналізу хімічного складу γ' - фази дослідних сплавів, отриманих методом МРСА за допомогою електронного мікрозонда, де показано, що в хімічному складі γ' - фази дослідних сплавів «1» - «5», алюміній і титан частково заміщені танталом.

Таблиця 3.2 - Якісний МРСА γ' - фази дослідних сплавів

№ складу	Вміст елемента в γ' - фазі в литому стані (до термообробки), % за масою						
	Cr	Co	W	Al	Ti	Ta	Ni
0	2,9	2,5	7,1	6,8	7,4	--	73,3
1	2,9	2,8	7,0	6,3	7,4	1,4	72,2
2	2,8	2,9	6,9	6,0	7,3	2,8	71,3
3	2,8	3,1	6,9	5,6	7,2	3,4	71,0
4	2,7	3,3	6,9	5,4	6,9	4,0	70,8
5	2,7	3,4	6,8	5,2	6,8	4,4	70,7

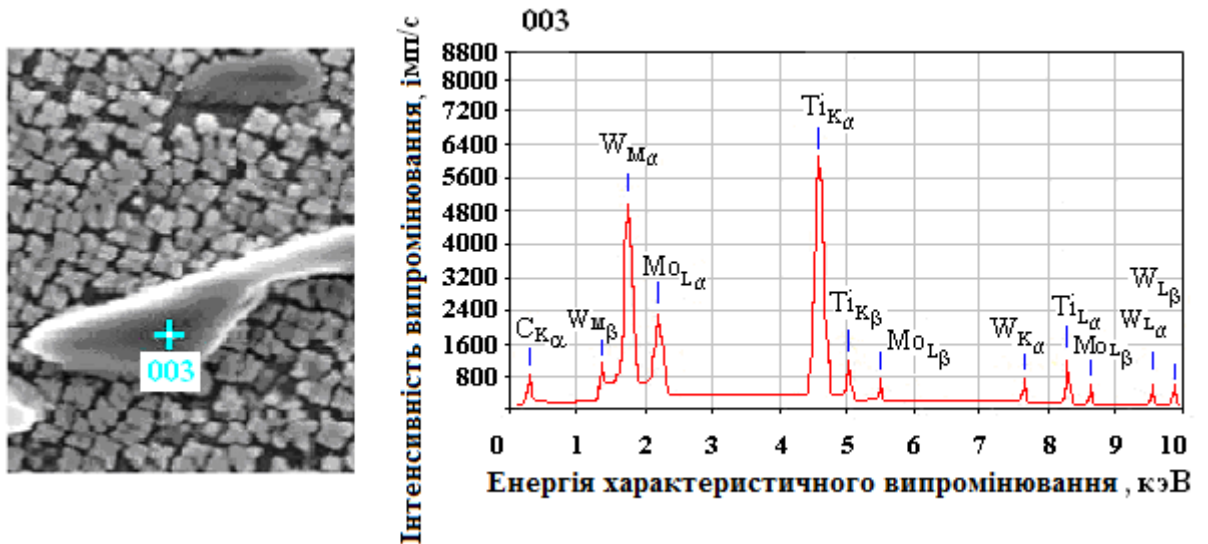
Порівняльний аналіз результатів показав, що в γ' - фазі всіх дослідних складів концентрація хрому і вольфраму залишається практично незмінною і не залежить від концентрації танталу в сплаві. Разом з тим, встановлено, що в хімічному складі γ' - фази дослідного складу «5», в порівнянні зі сплавом

ЗМІ-3У без танталу (склад «0»), збільшується концентрація кобальту в 1,4 рази і знижується концентрація алюмінію в 1,3 рази, а титану - в 1,1 рази.

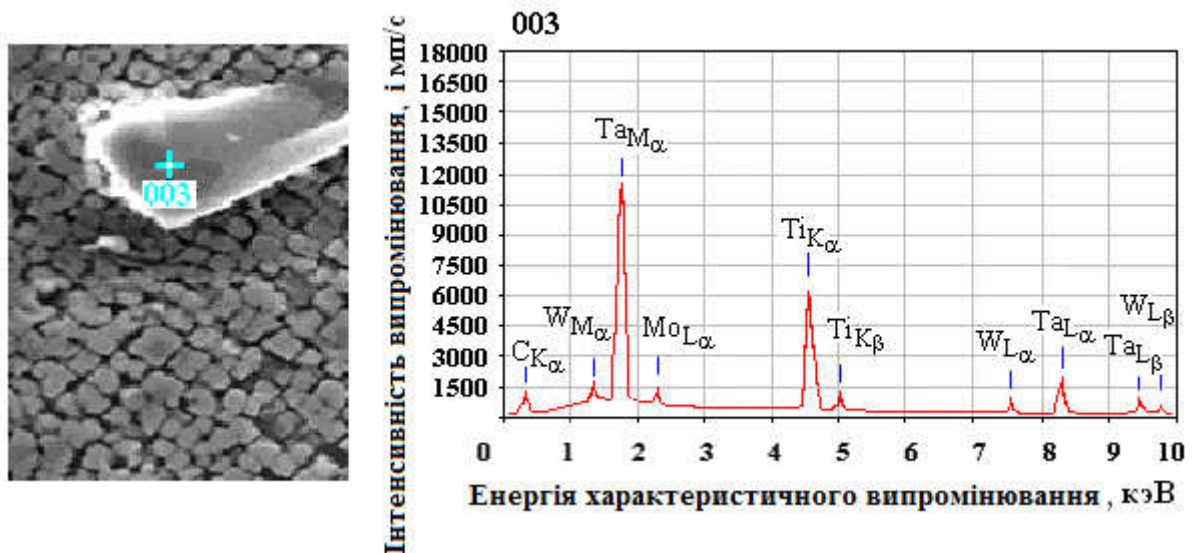
Слід зазначити, що в γ' - фазі дослідних складів «4» і «5» титан і вольфрам знаходяться в рівній концентрації. При цьому, концентрація хрому в 4,5 - 5 разів, а кобальту - в 1,5 - 2 рази нижче, ніж їх вміст в складі сплаву. Концентрація вольфраму в γ' - фазі майже така ж, що і його вміст в сплаві. Разом з тим, концентрація алюмінію в 1,7 - 2 рази, а титану і танталу - в 1,1 - 1,4 рази вище, ніж їх вміст в сплаві (див. табл. 2.1, 3.2).

Порівняльний аналіз складів евтектики $\gamma+\gamma'$ і γ' - фази показав, що остання збіднена елементами, коефіцієнт ліквідації яких позитивний (Ti, Ta), і збагачена елементами, коефіцієнт ліквідації яких від'ємний (Co, W). При цьому, в дослідженому сплаві ЗМІ-3У з 4,8% танталу (склад «5») вміст танталу в евтектиці $\gamma+\gamma'$ в 1,8 рази вище, ніж в γ' - фазі (див. табл. 3.1, 3.2).

На рисунку 3.3 представлені результати якісного МРСА частинок карбідної фази сплаву ЗМІ-3У без танталу і складу ЗМІ-3У з 4,8% танталу. Якісний МРСА хімічного складу карбідних частинок показав, що в литому стані (до термообробки) в структурі сплаву ЗМІ-3У без танталу переважно присутні карбіди на основі титану TiC (див. рис. 3.3 а), які містять досить високу концентрацію вольфраму. У дослідних складах, що містять тантал, зокрема, в складі ЗМІ-3У з 4,8% танталу, присутні карбіди на змішаній основі (Ti, Ta)C (див. рис. 3.3 б), що містять більш низьку концентрацію вольфраму. Наявність інших карбідоутворюючих елементів дозволяє зробити висновок про те, що карбіди за хімічним складом є складними включеннями [17, 25, 26].



а



б

а – сплав ЗМІ-3У без танталу (склад «0»);

б – сплав ЗМІ-3У з 4,8% танталу (досліджений склад «5»).

Рисунок 3.3 - Якісний МРСА карбідної фази в структурі (литий стан): $\times 10000$

У таблиці 3.3 наведені результати кількісного МРСА частинок карбідної фази дослідних складів «1» - «5» з різним вмістом танталу в дослідженому інтервалі легування (1-5%), в порівнянні зі сплавом ЗМІ-3У без танталу (склад «0»), отриманих методом МРСА за допомогою електронного мікрозонда.

Таблиця 3.3 - Якісний МРСА частинок карбідної фази в структурі дослідних складів

№ складу	Вміст елемента в карбідах типу МС в литому стані (до термообробки), % за масою				
	Ti	Ta	W	Mo	C
0	52	--	32	3	13
1	38	22	24	2	14
2	32	35	18	2	13
3	26	43	16	1	14
4	21	52	13	1	13
5	18	57	11	1	13

З таблиці 3.3 видно, що збільшення концентрації танталу призводить до істотного перерозподілу інших легуючих елементів в карбідній фазі в структурі дослідчених складів. Отже, порівняльний аналіз отриманих результатів показав, що карбідна фаза в сплаві ЗМІ-3У без танталу (склад «0»), крім 52% титану, містить 32% вольфраму і 3% молібдену. У складах, що містять тантал «1» - «5» карбідна фаза містить дані елементи в діапазоні концентрацій: титан (18 - 38%), тантал (22 - 57%), вольфрам (11 - 24%), молібден (1 - 2%) за масою.

При вмісті 4,8% танталу, за масою, в сплаві ЗМІ-3У (склад «5») збільшується його концентрація в карбідній фазі до 57%, що в 11 разів вище його вмісту в складі сплаву. При цьому, концентрація титану і сумарна концентрація вольфраму і молібдену знижується в 2,9 рази, в порівнянні зі сплавом ЗМІ-3У без танталу (склад «0») (див. табл. 2.1, 3.3).

Дані МРСА показали, що тантал, є більш сильним карбідоутворювачем, тому витісняє титан, вольфрам і молібден в γ - твердий розчин, ніж сприяє підвищенню термодинамічної стабільності карбідної фази при високих температурах з додатковим зміцненням γ - твердого розчину.

Підвищення концентрації танталу в складі фаз сплаву ЗМІ-3У робить позитивний вплив на механізм зміцнення [17,25], що підтверджується механічними випробуваннями досвідчених зразків аналогічних складів на короткочасну і тривалу міцність.

Дослідження зв'язку між концентрацією танталу в сплаві ЗМІ-3У в дослідженому діапазоні легування і хімічним складом фаз показало, що вміст конкретного легуючого елемента в евтектиці $\gamma+\gamma'$, γ' - фазі, карбідній фазі складного складу залежить від його вмісту в складі сплаву [29].

Металографічні дослідження і результати механічних випробувань показали, що вміст танталу 4,8% в сплаві ЗМІ-3У (склад «5»), ймовірно, перевищує оптимальні межі його розчинності в γ - твердому розчині, що призводить до збільшення структурної неоднорідності за рахунок утворення великої кількості нерівноважної евтектики $\gamma+\gamma'$, а також виділення надлишкових фаз несприятливої морфології, по всій видимості, перитектичного і евтектичного походження типу η - фази на основі титану Ni_3Ti або на основі танталу Ni_3Ta . Такий структурний стан негативно впливає на структурну однорідність, що може призводити до помітного зниження міцності, особливо пластичності. Встановлено, що η - фаза в структурі дослідного складу «5» може виділятися в процесі кристалізації і мати схожий склад на евтектику (перитектику) $\gamma+\gamma'$. Разом з тим, в структурі досвідчених складів з 0,9%, 1,9%, 2,8%, 3,9% танталу, фаз типу η - не виявлено, що свідчить про стабільність евтектичних виділень $\gamma+\gamma'$, а отже, кращої збалансованості систем легування дослідних складів (1-4).

4 ОЦІНКА ДЕНДРИТНОЇ ЛІКВАЦІЇ В СПЛАВІ ЗМІ-ЗУ, ЛЕГОВАНОГО ТАНТАЛОМ В ДОСЛІДЖЕНОМУ ДІАПАЗОНІ

Порівняльний металографічний аналіз структури показав, що збільшення вмісту танталу в дослідних складах «1» - «4» позитивно впливає на жароміцність. Це пов'язано не стільки зі збільшенням об'ємної частки γ' -фази, скільки зі зміною її хімічного складу, а також підвищенням температури її повного розчинення, в порівнянні з серійним сплавом ЗМІ-ЗУ без танталу (склад «0»). Практика показала, що ліквідація елементів в багатоконпонентних нікелевих системах досить повно характеризується співвідношенням концентрацій конкретного елемента в евтектиці $\gamma + \gamma'$ і в γ -твердому розчині. У зв'язку з цим, було вивчено вплив танталу в сплаві ЗМІ-ЗУ в дослідженому діапазоні легування (1-5%) на ліквідацію основних легувальних елементів [28]. Щоб простежити цю залежність, була введена величина «k» - коефіцієнт ліквідації, рівний відношенню концентрацій конкретного елемента в евтектиці $\gamma + \gamma'$ і в γ -твердому розчині, % за масою:

$$k = \frac{C_{\gamma+\gamma'}}{N_{\gamma}} \quad (4.1)$$

де $C_{\gamma+\gamma'}$ - концентрація елемента в евтектиці $\gamma + \gamma'$ дослідного сплаву;
 C_{γ} - концентрація елемента в γ -твердому розчині дослідного сплаву.

4.1. Ступінь ліквації легувальних елементів

У таблиці 4.1 представлені розрахункові значення коефіцієнтів ліквації за основними легувальними елементами в дослідних складах (1-5), отриманих на основі результатів, наведених в розділі 3.

Розрахункові коефіцієнти являють собою відношення концентрацій конкретного легувального елемента в евтектиці $\gamma+\gamma'$ і γ' - твердому розчині в литому стані (до термообробки) [30].

З таблиці 4.1 випливає, що в дослідних складах (1-5) зі збільшенням вмісту танталу підвищується ліквація кобальту, вольфраму, алюмінію, танталу і знижується ліквація титану, в порівнянні зі сплавом ЗМІ-3У без танталу (склад «0»). Слід зазначити, що ліквація вольфраму і танталу розвинена сильніше, ніж у інших елементів, при цьому у всіх досліджених складів коефіцієнт ліквації хрому незначний і приблизно однаковий [28].

Таблиця 4.1 - Розрахункові значення коефіцієнтів ліквації в дослідних складах

№ складу	Коефіцієнт ліквації елемента «k» (литий стан)					
	Cr	Co	W	Al	Ti	Ta
0	-1,03	-1,09	-1,97	+1,06	+1,20	--
1	-1,03	-1,17	-1,94	+1,12	+1,19	+1,57
2	-1,04	-1,21	-2,09	+1,15	+1,19	+1,61
3	-1,04	-1,29	-2,22	+1,21	+1,17	+1,68
4	-1,04	-1,37	-2,38	+1,22	+1,16	+1,73
5	-1,04	-1,42	-2,43	+1,25	+1,15	+1,77

Порівняльний аналіз показав, що, в порівнянні зі сплавом ЗМІ-3У без танталу (склад «0»), в дослідному сплаві ЗМІ-3У з 4,8% танталу (склад «5») підвищується коефіцієнт ліквації за такими елементами: кобальт з 1,09 до

1,42; вольфрам з 1,97 до 2,43; алюміній з 1,06 до 1,25; тантал з 1,57 до 1,77. При цьому, коефіцієнт ліквідації титану знижується з 1,20 до 1,15. Таким чином, результати досліджень підтвердили основні закономірності дендритної ліквідації елементів в сплавах даного класу - ліквідація хрому, кобальту і вольфраму - зворотна (-), а алюмінію, титану і танталу - пряма (+) [17].

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Тенденції розвитку світового ринку жароміцних нікелевих сплавів для лопаток ГТД

Тенденції розвитку та поліпшення авіаційних нікелевих сплавів, що супроводжуються ускладненням хімічного складу, призводять до необхідності використання інноваційних процесів, що реалізують комплекс властивостей і технологічних можливостей управління структурним станом сплавів, які поєднують можливості отримання необхідної якості сплавів з низьким рівнем витрат.

Спільні тенденції розвитку матеріалознавства свідчать, що у теперішній час інтенсивно проводяться розробки і дослідження в області жароміцних ливарних і де формівних сплавів і сталей зі спеціальними властивостями, сировини, вихідних компонентів для їх виробництва і технологій їх переробки у високотехнологічну наукоємну продукцію з великою часткою інноваційної складової. Такі розробки в області жароміцних сплавів і сталей проводять фірми США, Японії, ЄС, Китаю, Індії, Південно-Східна Азія, Південна Америка, які орієнтуються за перехід від дослідних робіт до комерційного використання.

Сучасна тенденція розвитку ливарних жароміцних нікелевих сплавів полягає в використанні дефіцитних елементів VII і VIII групи Періодичної системи Д.І. Менделєєва, таких як реній і рутеній. Це призвело до створення жароміцних нікелевих сплавів для спрямованої кристалізації і монокристалічного лиття.

Нині газотурбобудування України має чітко виражену експортну спрямованість, що свідчить про його конкурентоспроможність на світовому ринку, а отже, достатньо високий рівень. При цьому розроблення нових двигунів і модернізація тих, що випускаються серійно, здійснюється самими підприємствами. Однак продукція вітчизняних підприємств

газотурбобудування поки що мало користується попитом в Україні. Таку ситуацію не можна вважати задовільною, особливо враховуючи те, що сучасні вітчизняні серійні ГТД значно економічніші, ніж наявні в промисловості України двигуни, і ця обставина стає надзвичайно важливою у зв'язку з високими цінами на природний газ [31].

5.2 Техніко-економічні розрахунки

5.2.1. Характеристика продукції

Метою цього розділу є обґрунтування доцільності використання технології термічної обробки сплаву ЗМІ-3У+4%Та.

Таблиця 5.1 – Техніко-економічні показники виробів

№	Найменування виробу	Базовий сплав	Новий сплав
1	Робоча лопатка	ЗМІ-3У	ЗМІ-3У + 4%Та
2	Технологія термічної обробки	Перша гомогенізація при 1180°C, витримка $\tau = 4$ год; друга гомогенізація при 1050°C, витримка $\tau = 4$ год; старіння 850°C, витримка $\tau = 16$ год	Перша гомогенізація при 1240°C, витримка $\tau = 4$ год; друга гомогенізація при 1050°C, витримка $\tau = 4$ год
3	Ціна лопатки ГТД, грн	2850	-
4	Програма випуску, кг	500	500

Вартість сировини і основних матеріалів розраховується на основі технічних обґрунтованих норм використання на виробництво одиниці виробу, цін відповідних видів матеріальних ресурсів. При цьому враховуються транспортно-заготівельні витрати. Сума витрат на сировину та матеріали зменшується на величину зворотних відходів, які створюються в процесі виробництва.

Вартість сировини та основних матеріалів наведена в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Вартість основних матеріалів при термічній обробці

Найменування сировини та основних матеріалів	Норма використання	Ціна, грн	Вартість, грн
Аргон	40 л	15 грн/л	600
Разом	-	-	600

Основна заробітна плата основних виробничих робітників на одиницю виробу розраховується на основі трудомісткості виготовлення та часових тарифних ставок.

Розрахунок основної заробітної плати на одиницю продукції наведений в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3- Заробітна плата на одиницю продукції

Найменування операції	Норма часу, годин	Розряд робітника	Часова тарифна ставка, грн	Заробітна плата на одиницю продукції, грн
ЗМІ-3У				
Перша гомогенізація	4	V	60	240
Друга гомогенізація	4	V	60	240
Старіння	16	V	65	1040
Усього	28	-	-	1520
ЗМІ-3У + 4%Та				
Перша гомогенізація	4	V	60	240
Друга гомогенізація	4	V	60	240
Усього	8	-	-	480

Додаткова заробітна плата виробничих робітників виплачується за кількість та якість виконаної роботи. Вона вміщує надбавки і доплати, премії за виробничі результати, оплату чергових та додаткових відпусток та інше. Додаткова заробітна плата складає 40% від основної, та розраховується за формулою:

$$ЗД = ЗО \cdot \frac{К_d}{100}, \text{ грн} \quad (5.1)$$

де ЗО – заробітна плата основна;

К_д – процент додаткової заробітної плати.

$$ЗД = 1520 \cdot \frac{40}{100} = 608 \text{ грн}$$

$$ЗД = 480 \cdot \frac{40}{100} = 192 \text{ грн}$$

Відрахування на соціальні заходи являють собою форму перерозподілу доходу на фінансування суспільних потреб, розраховуються згідно діючого законодавства і складають 22% від фонду оплати праці. Відрахування на соціальні заходи розраховуються за формулою:

$$ВС = (ЗО + ЗД + ПП) \cdot \frac{К_{ВС}}{100}, \text{ грн} \quad (5.2)$$

де ПП – премії з прибутку (50%), грн;

$К_{ВС}$ - % відрахування на соціальні заходи.

$$ВС = (1520 + 608 + 760) \cdot \frac{22}{100} = 635,36 \text{ грн}$$

$$ВС = (480 + 192 + 240) \cdot \frac{22}{100} = 200,64 \text{ грн}$$

Загальновиробничі витрати вміщують витрати на утримання та експлуатацію обладнання, цехові витрати і послуги виробничого характеру. Витрати на утримання та експлуатацію обладнання вміщують витрати на технічне обслуговування машин і механізмів, витрати на поточний ремонт обладнання, цехового транспорту та інструментів, знос малоцінних і швидкозношуваних приладів, заробітну плату допоміжного персоналу та інші. Цехові витрати вміщують витрати, пов'язані з поточним ремонтом та амортизацією будівель цеху, заробітну плату керівників і спеціалістів цеху, витрати на охорону праці та техніку безпеки в цеху та інші.

Загальновиробничі витрати складають в середньому 400% до основної заробітної плати та розраховуються за формулою:

$$ЗВВ = 30 \cdot \frac{\alpha}{100}, \text{ грн} \quad (5.3)$$

де α - процент загальновиробничих витрат.

$$ЗВВ = 1520 \cdot \frac{400}{100} = 6080 \text{ грн}$$

$$ЗВВ = 480 \cdot \frac{400}{100} = 1920 \text{ грн}$$

Вищенаведені витрати складають виробничу собівартість.

Калькуляція собівартості і ціни продукції наведена в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Калькуляція собівартості робочої лопатки ГТД з урахуванням витрат на термічну обробку

№	Статті витрат	Сума, грн	
		Базовий сплав	Новий сплав
1	Сировина і основні матеріали (матеріал лопатки)	2850	-
2	Матеріали на термічну обробку	600	600
3	Основна заробітна плата основних виробничих робітників	1520	480
4	Додаткова заробітна плата основних виробничих робітників	608	192
5	Відрахування на соціальні заходи з заробітної плати основних виробничих робітників	635	201
6	Загальновиробничі витрати	6080	1920
7	Собівартість виробнича	9443	3393

5.2.2 Економічна ефективність

Розраховується економічна ефективність інноваційного проекту за такими показниками:

- економія витрат в виробництві;
- економія експлуатаційних витрат;
- питомі показники ефективності;
- беззбитковість виробництва;
- термін окупності додаткових капітальних вкладень;
- оцінка доцільності капітальних вкладень в інноваційний проект.

Економія витрат в виробництві розраховується на основі економії конкретних видів матеріальних, трудових та інших ресурсів. Розрахунок економії витрат наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Економія витрат на виробництво

Найменування показника	Норма використання		Ціна, грн	Вартість, грн		Економія, грн
	Базовий виріб	Новий виріб		базовий виріб	Новий виріб	
		Базовий виріб				
Жароміцний сплав, кг	500	500	2850	9443	3393	5385750

$$E = (C_6 \cdot K - C_H) \cdot N, \text{грн} \quad (5.4)$$

де E – економічний ефект від впровадження нової технології термообробки;

C_6 – собівартість базового виробу;

C_H – собівартість нового виробу;

K – коефіцієнт експлуатаційного ресурсу.

$$E = (9443 \cdot 1,5 - 3393) \cdot 500 = 5385750 \text{ грн}$$

Отже, застосування результатів даної науково-дослідницької роботи на практиці має економічне обґрунтування. Доцільність впровадження даної розробки підтверджується проведеними вище розрахунками. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження науково-дослідницької роботи (E) становить 5385750 грн.

Не зважаючи на підвищення вартості сплаву за рахунок легування танталом, економія обґрунтована значним підвищенням корозійної стійкості і механічних властивостей, а як результат і ресурсу роботи лопаток з розробленого сплаву. Виробнича собівартість сплава ЗМІ-3У є більшою в 2,5 рази, що не є доцільним його використовувати.

Легування сплаву ЗМІ-3У танталом та оптимізації його границь легування в багатокомпонентному складі та збалансування загального хімічного складу значно дозволило підвищити рівень показників механічних властивостей в 1,5 рази, особливо пластичності, в порівнянні з жароміцним корозійностійким нікелевим сплавом ЗМІ-3У без танталу.

Введення танталу в нікелеві сплави сприяє підвищенню їх корозійної стійкості, міцності та довговічності, структурної стабільності, збільшенню пластичності за рахунок вдосконалення механізму карбідного зміцнення при загальному покращенні їх морфології. Все це дало змогу значно збільшити конкурентоспроможність сплаву.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

В розділі надані основні заходи з охорони праці при дослідженнях методом електронної мікроскопії.

6.1 Аналіз потенційних небезпек

а) Небезпеки які пов'язані з порушеннями роботодавцями вимог НПАОП 0.00 – 7.11 – 12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників», а саме:

- вимог щодо облаштування робочих зон, що може бути пов'язано з незадовільним станом устаткування, захисних пристроїв, відсутності схем евакуації, захищеність аварійних виходів.

- вимог щодо облаштування виробничих приміщень, що може бути пов'язано з втратою міцності конструкцій будівель та споруд, незабезпеченням придатних метеорологічних умов, перевищенням граничнодопустимих концентрацій шкідливих речовин, недостатнього рівня освітлення [32].

б) Небезпеки які пов'язані з допуском до роботи посадових осіб які не пройшли навчання, перевірки знань та атестації з питань охорони праці, зокрема:

- нещасні випадків внаслідок не проведення усіх необхідних інструктажів з охорони праці;

- відсутність професійної підготовки за фахом або низький її рівень, яка може призвести до створення аварійної ситуації;

в) Можливість ураження електричним струмом, при виконанні службових обов'язків внаслідок порушення правил з електробезпеки,

несправності електричного обладнання, відсутності групових або індивідуальних засобів захисту, що може призвести до електричних травм або летального наслідку.

г) Небезпеки які пов'язані з дослідженням структури металу методом електронної металографії з використанням електронних мікроскопів зокрема: негативний вплив потужного електронного випромінювання на клітинному рівні, що може призвести до зниження імунітету та розвитку імунних захворювань.

д) Недостатній досвід дослідників в питаннях охорони праці при дослідженнях з використанням електронної мікроскопії.

е) Незадовільні параметри мікроклімату які повинні відповідати фізіологічним потребам організму працюючих, із врахуванням енергетичних витрат на виконувану роботу згідно з ДСН 3.3.6.042-99 « Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» внаслідок неефективної роботи систем опалення та повітрообміну, що може призвести до загальних захворювань.

є) Невідповідність вимогам ДБН В.2.5-28-2006 «Природне і штучне освітлення» освітлення робочих зон дослідницької лабораторії внаслідок виходу з ладу освітлювальних приладів або невірного розрахунку їх кількості та потужності, що може призвести до погіршення зору.

6.2 Заходи забезпечення безпеки

а) З метою виключення нещасних випадків або розвитку професійних захворювань обов'язковим є виконання вимог НПАОП (Нормативно правовий акт з охорони праці) 0.00-7.11-12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями згідно охорони праці працівників». Усі

працівники повинні пройти навчання та перевірку знань з питань охорони праці.

б) Працівники повинні забезпечити повну і вичерпну інформацію відносно можливих небезпечних ситуацій на робочих місцях. Законодавством передбачено систему інструктажів відповідно до «Типового положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з охорони праці» затвердженого наказом «Державним наглядом охорони праці» від 26.01.2005. №15.

в) Для виключення можливості ураження електричним струмом згідно з ПУЕ — 2013 «Правила улаштування електроустановок - споживачів» передбачається:

- всі співробітники лабораторії повинні пройти навчання та перевірку знань з електробезпеки та отримати 2-3 групу з електробезпеки.

- не рідше ніж два рази на рік, передбачається перевіряти справність контактів електроз'єднань, штепсельних вилок з'єднувальних провідників. Ремонт електричного обладнання проводять особи, котрі мають кваліфікаційну групу (не менше 3 групи) з електробезпеки.

- для захисту людей від ураження електричним струмом передбачено використовувати подвійну ізоляцію провідників.

- технічні заходи – розташування струмоведучих частин на недоступній висоті (до 1000В), не менше 3,5 м (більше 1000В – 6м). Всі не ізольовані струмопровідні лінії повинні бути надійно захощені суцільними огорожами. Відкриття або зйом яких можливий тільки за допомогою спеціальних пристроїв. Опір ізоляції електричних дротів повинен бути не менше 0,5 Ом.

- усі ремонтні роботи на електронних мікроскопах проводять тільки після повного відключення від електричної мережі. Ремонтні роботи або огляд високовольтних частин мікроскопу проводити не менш, ніж двома особами.

г) В разі виконання робіт які пов'язані з плануванням та розрахунками експериментів, обробку їх результатів робоче місце дослідника організують у

відповідності ГОСТ 12.2.032-78. “СС. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования” конструкція робочого місця повинна забезпечувати оптимальне положення співробітника, що досягається за рахунок регулювання висоти сидіння та підставки для ніг.

Дослідження фазового складу сплаву ЗМІ-3У методом мікрорентгеноспектрального аналізу (МРСА) здійснювалося на приставці до растрового електронного мікроскопа JEOL JSM - 6360LA з системою енергодисперсійного мікрорентгеноспектрального аналізу JED-2300.

Вимоги з охорони праці на кафедрі фізичного матеріалознавства регламентує „Інструкція з охорони праці № 13 при виконанні робіт в рентгенівській лабораторії”, затверджену наказом ректора ЗНТУ від 10.11.2005р. №257. У лабораторіях слід розміщати лише необхідні для забезпечення освітнього процесу (навчальних та позаурочних занять) меблі, прилади, моделі, речі тощо, які повинні зберігатись у шафах, на стелажах або на стаціонарно встановлених стояках.

Правила радіаційної безпеки в рентгенівській лабораторії:

- необхідно закрити місця можливого розсіювання рентгенівських променів захисними свинцевими екранами;
- при встановленні камер з люмінісцентними екранами для візуального спостереження за юстировкою зразка необхідно користуватися захисним просвинцьованим склом;
- для забезпечення захисту рук оператора від опромінення при юстировці гоніометра необхідно використовувати подовжені торцеві ключі.

Вимоги під час роботи:

- не вмикати та не вимикати без необхідності рубильники , перемикачі, кнопки, не порушувати послідовність операцій щодо ввімкнення/вимкнення установки.
- забороняється проводити аналіз зразків зі знятими боковими стінками, проводити ремонтні роботи без узгодження і одержання дозволу особи, відповідальної за їх експлуатацію і обслуговування;

- при відкритих вікнах трубки забороняється знаходитися на шляху розповсюдження рентгенівських променів;

- не ходити без потреби по лабораторії, не залишати без уваги свою роботу, не залишатись одному в лабораторії при випробуваннях [33].

д) В сучасних умовах к фахівцям рівня «дослідник» висуваються високі вимоги до входження в професійне середовище. Проблеми з таким входженням можна поділити на дві групи:

- недостатній рівень фахової підготовки, може бути пов'язаний з відсутністю поєднання теоретичної підготовки з досвідом проведення науково-дослідних робіт в умовах реального виробництва, що може призвести до психічних та емоційних навантажень, стресових станів;

- недостатній обсяг практичних робіт з використанням технологічного обладнання може призвести до відсутності знань специфіки роботи цього обладнання, невірному виконанню алгоритму дій і як наслідок призведе до виникнення аварійних ситуацій, виходу з ладу обладнання та негативних наслідків як для самого фахівця так і для оточуючих колег.

В якості рекомендацій можна зазначити: збільшення обсягу перебування в умовах виробництва, підвищення рівня вимогливості при атестації майбутніх фахівців, більш жорсткий професійний відбір.

Для електронного мікроскопа можливі 3 варіанти аварійної ситуації:

- відключення електроживлення;
- відключення води;
- прорив повітря в вакуумну систему.

У таких ситуаціях першочерговим завданням вважається охолодження печі дифузійного насоса і, по можливості, збереження вакууму в системі. У всіх випадках спочатку потрібно відключити високу напругу, піч дифузійного насоса і головний автомат на стінці.

При відмові водопостачання постаратися обмотати мокрими ганчірками піч дифузійного насоса і включити вентилятор для обдування. Гарячі мокрі ганчірки слід міняти, поки вакуум в системі не

почне падати. Після охолодження приступити до усунення несправності. При надходженні повітря в колону мікроскопа, як правило, спрацьовує автоматика, відділяючи дифузійний насос від решти обсягу, і вимикається напруження катода і висока напруга. Треба тільки простежити, щоб форвакуумний насос не працював «на повітря», а переключити його на закритий обсяг, наприклад на відкачку боксу з фотопластинками.

В цьому випадку найнебезпечнішим для мікроскопа випадком може з'явитися тріщина в керамічному ізоляторі високовольтного введення. Тому найкраще буде якомога швидше усунути протікання.

Електронний мікроскоп має потужне джерело іонізуючих випромінювань, що як наслідок негативно впливає на організм людини при зовнішньому опромінюванні. Зовнішнє опромінення — це дія на організм іонізуючих випромінювань від зовнішніх відносно нього джерел випромінювання. Під дією іонізуючих випромінювань в організмі людини відбувається іонізація молекул і атомів тканини, порушується хімічна структура і утворюються сполуки, не властиві живій клітині, які в свою чергу призводять до її відмирання. Також відбуваються зміни фізичних і біологічних процесів в організмі залежно від дози опромінювання.

Для попередження шкідливої дії іонізуючих випромінювань необхідно усувати всяку можливість опромінювання організму дозами, які перевищують гранично допустимі. Ступінь ураження радіоактивними речовинами організму людини залежить від ряду чинників: виду випромінювання (α -, β -, γ - промені тощо.); кількості ізотопу; його властивостей (енергії частинок в період напіврозпаду та ін.); шляхів попадання в організм людини та його індивідуальної чутливості. Для захисту від зовнішнього опромінювання, яке має місце при роботі із закритими джерелами випромінювання, основні зусилля необхідно направити на попередження переопромінення персоналу шляхом:

- збільшення відстані між джерелом випромінювання і людиною (захист відстанню);

- скорочення тривалості роботи в зоні випромінювання (захист часом);
- екранування джерела випромінювання (захист екранами).

6.3 Заходи по забезпеченню виробничої санітарії та гігієни праці

Заходи щодо забезпечення виробничої санітарії і гігієни праці розробляються відповідно до вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», МЮУ 06.05.2014 р. за № 472/25249 (далі – «Гігієнічна класифікація праці»).

а) Метеорологічні умови виробничого середовища регламентуються ДСН 3.3.6–042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Для забезпечення нормальних метеорологічних умов і підтримки теплової рівноваги між тілом людини і навколишнім середовищем проводиться ряд заходів:

- доцільне розміщення і теплоізоляція устаткування, апаратів комунікації й інших джерел, що випромінюють на робочі місця конвекційне і променисте тепло.

б) Виробнича вентиляція проектується відповідно вимог ДБН В.2.5-67.2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування».

Для мінімізації негативного впливу надлишкового тепла, застосовується загальнообмінна, механічна або природна вентиляція.

Природна вентиляція здійснюється завдяки різниці температур в помешканні і за його межами. Механічна вентиляція здійснює обмін повітря за допомогою спеціальних механізмів і пристроїв.

Для аерації влаштовуються прорізи в стінах будинку і ліхтарі на даху. Для провітрювання виробничих приміщень передбачають вікна, які відчиняються.

Розрахунок природної вентиляції для лабораторії [34].

Розрахуємо продуктивність природної вентиляції L , приплив або витягування повітря для розчинення надлишкового тепла:

$$L = k \cdot V_n, \text{ м}^3/\text{год} , \quad (6.1)$$

де k – кратність повітрообміну (відповідно до галузевих норм СніП 2.04.05.- 91 кратність повітрообміну в лабораторії становить $k = 2$);

V_n – об'єм приміщення, м^3 .

$$V_n = P \cdot h, \text{ м}^3 \quad (6.2)$$

де P – площа лабораторії, м^2 ;

h – висота лабораторії, м.

$$V_n = 20 \cdot 2,8 = 56 \text{ м}^3$$

$$L = 2 \cdot 56 = 112 \text{ м}^3/\text{год}.$$

При використанні природної вентиляції необхідно подати в лабораторії $112 \text{ м}^3/\text{год}$ зовнішнього повітря.

Розрахунок повітрообміну за умови виділення шкідливих речовин (газів, парів, пилу), що надходять у робочу зону з метою розбавлення їх до граничнодопустимих концентрацій:

$$L_B = \frac{G_{\text{ШР}}}{q_{\text{ПЛК}} - q_{\text{П}}} \cdot 3600, \text{ м}^3/\text{год} \quad (6.3)$$

де L_B – кількість приточного або виділяемого повітря в залежності від схеми механічної вентиляції, $\text{м}^3/\text{год}$;

$G_{\text{ШР}}$ – кількість шкідливих речовин, що виділяються у виробничих приміщеннях, мг/с ;

$q_{\text{ПЛК}}$ – граничнодопустима концентрація шкідливих речовин в приміщенні, мг/м^3 ;

$q_{\text{П}}$ – концентрація шкідливих речовин в зовнішньому повітрі, що подається в приміщення і дорівнює:

$$q_{\text{П}} = 0,3 \cdot g_{\text{ПДК}}, \text{мг/м}^3 \quad (6.4)$$

$$q_{\text{П}} = 0,3 \cdot 5 = 1,5 \text{ мг/м}^3;$$

$$L_B = \frac{6}{5 - 1,5} \cdot 3600 = 6171,4 \text{ м}^3/\text{год}$$

в) Для забезпечення необхідного рівня освітлення 200 люкс, використовується природне і штучне освітлення. Природне забезпечується за рахунок вікон визначеної площини у лабораторії, штучне освітлення організується за методом світлового потоку.

Штучне освітлення виробничих та побутових приміщень повинне відповідати вимогам ДБН В 25.28-2006 «Природне і штучне освітлення».

По розподілу світлового потоку в просторі у цеху встановлені світильники прямого, розсіяного і відбивного світла, а по конструктивному виконанню - світильники відкриті, закриті, захищені, пилонепроникні, вибухозахисні, вибухобезпечні.

6.4 Заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях

6.4.1 Заходи з пожежної безпеки

Заходи з пожежної безпеки для лабораторії розробляються відповідно до вимог НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні».

Лабораторія рентгеноспектрального аналізу згідно НАПБ Б.03.002-2007 «Норми визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» відноситься до категорії «Д», а клас можливої пожежі, згідно ДБН В.1.1.7-2002 «Пожежна безпека об'єктів будівництва», визначається, як «Д».

Відповідно до категорії виробництва з пожежної небезпеки і вимог ДБН В.1.1.7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», лабораторія відноситься до I і II груп (неспалимі при загорянні предмети у середині будинку, які охоплюються вогнем не раніше ніж через 3-4 години; будівлі I групи мають підвищену вогнестійкість несучих конструкцій).

Відповідність обладнання, силових і освітлювальних мереж дослідницької лабораторії повинно відповідати вимогам пожежної безпеки, згідно вимог НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок».

Площа лабораторії складає 20 м². Виходячи з цього згідно НАПБ Б.03.001-2004 «Типові норми належності вогнегасників» обирається два порошкових вогнегасника ємністю 5 літрів кожний.

До переліку перших засобів пожежогасіння, крім вогнегасників, відносяться ящики з піском, пожежні покривала, гаки, лопати, лом, сокири, бочки з водою, які розташовуються у складі пожежних щитів.

Виробничі приміщення можуть бути обладнані стаціонарними установками автоматичного пожежогасіння.

Розробка заходів з пожежної безпеки полягає у визначенні порядку дій, які спрямовані на збереження обладнання, матеріальних ресурсів в умовах

виникнення загорянь, організації ліквідації осередків загорянь, евакуації персоналу, забезпечення можливої участі у попередженні пожежі спеціалізованих пожежних підрозділів, мінімізації збитків виробництва.

Крім інструкції, розробляється «План евакуації при пожежі або загрозі вибуху».

6.4.2 Порядок проведення рятувальних та інших невідкладних робіт при аваріях на АЕС

Відповідно до Кодексу цивільного захисту України, підготовка персоналу на підприємствах незалежно від форм власності до дій в надзвичайних ситуаціях здійснюється за спеціально розробленою схемою заходів захисту населення та територій.

При радіаційних аваріях викинуті із реактора радіонукліди піднімаються в атмосферу і переносяться у вигляді аерозолів на значну відстань. Потім вони випадають з пилом і дощем на місцевість, утворюючи обширні зони радіоактивного забруднення, які є небезпечними для людей і навколишнього середовища. Ступінь радіаційної небезпеки для населення визначається кількістю і складом радіонуклідів, викинутих у зовнішнє середовище, відстанню від місця аварії до населеного пункту, метеорологічних умов і пори року в час аварії.

Організація і проведення рятувальних та інших невідкладних робіт при аварії на АЕС полягає у виконанні заходів, до яких відносяться:

- оповіщення населення про, аварію і постійне його інформування про наявну обстановку та порядок дій в даних умовах;
- використання засобів колективного і індивідуального захисту;
- організація дозиметричного контролю;

- проведення йодної профілактики населення, що опинилося в зоні радіоактивного зараження;
- введення обмеженого перебування населення на відкритій місцевості (режими радіаційного захисту);
- здійснення евакуації населення (за розпорядженням уряду) та інші заходи.

Після евакуації населення приступають до дезактивації території і техніки.

Ліквідація наслідків аварії спрямована насамперед на запобігання поширенню радіоактивних речовин за межі забрудненої території і передбачає:

- локалізацію та ліквідацію джерел радіоактивного забруднення;
- дезактивацію (реабілітацію) забрудненої території;
- збір і захоронення радіоактивних відходів, що утворилися в результаті проведених робіт;
- проведення ремонтно-відновлювальних робіт на об'єкті і його території, об'єм і зміст яких визначається ступенем важкості аварії і планами щодо подальшого їх використання за прямим призначенням або з іншою метою [35].

ВИСНОВКИ

1. При виконанні дипломного проекту було розглянуто сучасний стан теорії і практики легування жароміцних сплавів на нікелевій основі перспективним елементом, таким як тантал.

2. Показано, що до жароміцних нікелевих сплавів, призначених для спрямованої (моно) кристалізації, пред'являються більш жорсткі вимоги, ніж до сплавів, призначених для рівноосьової кристалізації за вмістом шкідливих домішок кольорових металів, джерелом яких є вихідні шихтові матеріали, а також газових домішок, зокрема, кисню та азоту, які є джерелом неметалічних включень оксидів і нітридів.

3. Показано, що алюміній, титан, молібден, вольфрам, ніобій, тантал, гафній, цирконій підвищують термічну стабільність основної зміцнюючої γ' - фази, за рахунок підвищення температури її повного розчину, а кобальт, хром, вуглець, бор, ванадій, навпаки, її знижують. Жароміцність сплавів цього класу значно підвищується, якщо об'ємна частка γ' - фази в структурі складає більше 50%.

4. Термообробка жароміцних нікелевих сплавів, призначених для спрямованої кристалізації, відрізняється від сплавів, призначених для отримання виливок з рівноосьовою структурою, гомогенізацією при більш високих температурах. При цьому, відбувається не тільки повне розчинення γ' - фази, але і більш повне розчинення нерівноважних фаз евтектичного походження, а також зниження дендритної ліквідації, що значно покращує структурну стабільність.

5. Використання для спрямованої (моно) кристалізації сплавів, призначених для лиття методом рівноосьової кристалізації із традиційною схемою легування, дозволяє підвищити показники їх тривалої міцності, а також пластичності, але не дозволяє в повній мірі реалізувати потенційні можливості цих сплавів.

6. В рамках досліджень даної роботи було вивчено вплив танталу на формування структури, фазовий склад, а також хімічний склад фаз серійного промислового жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву ЗМІ-3У, легованого танталом в досліджуваному діапазоні (1-5)% за масою.

7. Металографічний аналіз показав, що підвищення вмісту танталу в дослідженому діапазоні легування приводить до зміни форми евтектики $\gamma+\gamma'$ від віялоподібної в структурі сплаву ЗМІ-3У без танталу до ограненої в структурі сплаву ЗМІ-3У з 4, 8% танталу. При цьому спостерігається збільшення об'ємної частки евтектики $\gamma+\gamma'$ на 3 -5%.

8. Якісний МРСА хімічного складу γ' - фази сплаву ЗМІ-3У без танталу і дослідного сплаву ЗМІ-3У з 4,8% танталу показав, що γ' - фаза представляє хімічно складне інтерметалідне з'єднання, в якому в значній кількості розчинені інші легувальні елементи

9. Якісний МРСА хімічного складу карбідних частинок показав, що в литому стані (до термообробки) в структурі сплаву ЗМІ-3У без танталу переважно присутні карбіди на основі титану TiC , які містять досить високу концентрацію вольфраму. В складі ЗМІ-3У з 4,8% танталу, присутні карбіди на змішаній основі $(Ti, Ta)C$, що містять більш низьку концентрацію вольфраму.

10. Встановлено, що тантал, більш сильний карбідоутворювач, тому витісняє титан, вольфрам і молібден в γ - твердий розчин, чим сприяє підвищенню термодинамічної стабільності карбідної фази при високих температурах з додатковим зміцненням γ - твердого розчину.

11. В сплаві ЗМІ-3У, легованого танталом в дослідженому діапазоні (1-5)% за масою, зі збільшенням вмісту танталу підвищується ліквідація кобальту, вольфраму, алюмінію, танталу і знижується ліквідація титану, в порівнянні зі сплавом ЗМІ-3У без танталу (склад «0»).

12. В економічній частині виходячи з розрахунків випливає, що не зважаючи на підвищення вартості сплаву за рахунок легування танталом,

економія обґрунтована значним підвищенням корозійної стійкості і механічних властивостей, а як результат і ресурсу роботи лопаток з розробленого сплаву. Виробнича собівартість сплаву ЗМІ-3У є більшою в 2,5 рази, що не є доцільним його використовувати.

13. В розділі охорона праці і безпека у надзвичайних ситуаціях проведений аналіз потенційних небезпек і згідно до них підібрані заходи по забезпеченню безпеки. Проведений розрахунок природної вентиляції для рентгенівської лабораторії. Наведені заходи безпеки у надзвичайних ситуаціях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної магістерської дипломної роботи для студентів спеціальності 132 "Матеріалознавство" усіх форм навчання. / Укл.: І.М. Лазечний, В.Я. Грабовський, Ю.І Кононенко, О.В. Лисиця. Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. 38 с.
2. Конспект лекцій з дисципліни «Спеціальні розділи матеріалознавства» і «Спеціальні розділи термодинаміки і кінетики фазових перетворень» для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» усіх форм навчання: частина I / Укл.: С.В. Гайдук, С.Б. Беліков. - Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. 76 с.
3. Ртищев В.В. Оптимизация режима термической обработки жаропрочных сплавов ЭП220ВД и ЭИ929ВД с целью повышения надежности лопаток ГТУ. *Труды ЦКТИ им. И.И. Ползунова*. Л., 1982. Вып. 194. С. 92-100.
4. Масленков С.Б. Легирование и термическая обработка жаропрочных сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1977. № 10. С. 49-53.
5. Толораия В.Н., Орехов Н.Г., Каблов Е.Н. Усовершенствованный метод монокристаллического литья турбинных лопаток ГТД и ГТУ. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2002. № 7. С. 11-16.
6. Никитин В.И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин. Л. : Машиностроение, 1987. 272 с.
7. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1997. 336 с.
8. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). М.: МИСИС, 2001. 632 с.

9. Патон Б.Е., Строганов Г.Б., Кишкин С.Т. и др. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления. К.: Наук. думка, 1987. 256 с.
10. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Н. Жаропрочность никелевых сплавов. М. : Машиностроение, 1998. 464 с.
11. Котсорадис Д., Феликс П., Фишмайстер Х. и др.; Жаропрочные сплавы для газовых турбин. Материалы международной конференции / пер. с англ. под ред. Р.Е. Шалина. М. : Металлургия, 1981. 480 с.
12. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2002. № 7. С. 20-23.
13. Толораия В.Н., Орехов Н.Г., Ломберг Б.С. Коррозионностойкие жаропрочные сплавы для крупногабаритных монокристаллических турбинных лопаток. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2001. № 1. С. 30-32.
14. Каблов Е.Н., Кишкин С.Т. Перспективы применения литейных жаропрочных сплавов для производства турбинных лопаток ГТД. *Газотурбинные технологии*. 2002. Январь-февраль. С. 34–37.
15. Бокштейн С.З., Бронфин М.Б., Другова И.А. Свойства интерметаллидных фаз в никель - алюминиевых сплавах. *Современные способы упрочнения деталей машин термообработкой*. Ташкент: Наука, 1973. С. 56-61.
16. Паспорт на жаропрочный коррозионностойкий никелевый сплав ЗМИ-3У (ХН64ВМКЮТ) / А.Д. Коваль, С.Б. Беликов, А.Г. Андриенко и др.: утв. проректор по научной работе Н.С. Гамов. Запорожье, 1995. 30 с.
17. Гайдук С.В., Кононов В.В., Налесный Н.Б. Исследование дендритной ликвации и фазовой неоднородности в жаропрочных коррозионностойких никелевых сплавах. *Вестник двигателестроения*. – 2006. №1. С. 150-154.

18. Беликов С.Б., Гайдук С.В., Кононов В.В. Литейные жаропрочные коррозионностойкие никелевые сплавы для монокристалльных лопаток газовых турбин. *Вестник двигателестроения*. 2004. № 1. С. 151-154.

19. Гайдук С.В., Кононов В.В., Петрик И.А. и др. Влияние скорости кристаллизации и термической обработки на структуру и свойства монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов. *Вестник двигателестроения*. 2005. № 1. С. 150-153.

20. Беликов С.Б., Андриенко А.Г., Гайдук С.В. и др. Литейный жаропрочный коррозионностойкий никелевый сплав для монокристаллического литья методом направленной кристаллизации. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2008. № 1. С. 16-20.

21. Литейный жаропрочный коррозионностойкий сплав для монокристалльного литья лопаток газовых турбин : зб. наук. праць IX Міжнар. наук.-техн. конф. Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів, (Запоріжжя, 23-26 вересня 2003 р.) / ЗНТУ, 2003. С. 7-9.

22. Влияние режимов термообработки на свойства монокристалльного никелевого сплава: зб. наук. праць IX Міжнар. наук.-техн. конф. Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів, (Запоріжжя, 23-26 вересня 2003 р.) / ЗНТУ, 2003. С. 35-37.

23. Влияние скорости кристаллизации на структуру и свойства жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава для монокристалльного литья : зб. наук. праць IX Міжнар. наук.-техн. конф. Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів, (Запоріжжя, 23-26 вересня 2003 р.) / ЗНТУ, 2003. С. 37–39.

24. Жароміцні корозійностійкі стопи для газотурбінних двигунів : зб. наук. праць X Міжнар. наук.-техн. конф. Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів, (Запоріжжя, 20-22 вересня 2005 р.) / ЗНТУ, 2005. С. 3-6.

25. Гайдук С.В. Особенности влияния тантала на структуру и свойства никелевых сплавов. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2004. № 1. С. 16-19.

26. Беликов С.Б. Гайдук С.В., Кононов В.В. Исследование влияния концентраций молибдена, вольфрама и тантала на сопротивление локальному коррозионному разрушению никелевых сплавов. *Вестник двигателестроения*. 2003. № 1. С. 162-165.

27. Коваленко В.С. Металлографические реактивы: справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Металлургия, 1981. 120 с.

28. Голиков И.Н., Масленков С.Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах. М. : Металлургия, 1977. 332 с.

29. . Кишкин С.Т, Строганов Г.Б., Логунов А.В. и др. Особенности легирования жаропрочных никелевых сплавов при направленной кристаллизации. ДАН СССР. 1983. 268. № 4. С. 865-867.

30. Голиков И.Н., Масленков С.Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах. М. : Металлургия, 1977. 332 с.

31. Оспенникова О.Г. разработка научных основ создания нового поколения литейных жаропрочных наноструктурированных никелевых сплавов пониженной плотности с требуемым комплексом механических свойств: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.09 / Всерос. научно-исслед. институт авиац. матер. Москва, 2018. 308 с.

32. НПАОП 0.00 – 7.11 – 12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників».

33. Інструкція з охорони праці № 13 при виконанні робіт в рентгенівській лабораторії, затв. наказом ректора ЗНТУ від 10.11.2005р. №257.

34. Методичні вказівки до практичної роботи «Розрахунок повітрообміну у виробничих приміщеннях при загально обмінній вентиляції» з дисципліни «Охорона праці в галузі» для студентів всіх форм навчання /

Укл. А.С. Лавренко, О.Л. Скуйбіда, А.Є. Островська. Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. 14с.

35. Захист населення і територій від надзвичайних ситуацій. Т. 9. Аварійно-рятувальні та інші невідкладні роботи. За загальною редакцією О.М. Євдіна. К. 476 с.

ДОДАТОК А

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ТАНТАЛУ НА МОРФОЛОГІЮ І ФАЗОВИЙ СКЛАД ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

Об'єкт дослідження – вплив танталу на морфологію і фазовий склад в структурі ливарного жароміцного нікелевого сплаву ЗМІ-ЗУ.

Мета роботи – дослідити особливості впливу танталу в діапазоні легування (1-5)% за масою на специфіку формування структури, топологію, морфологію і хімічний склад фаз промислового жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву ЗМІ-ЗУ з метою підвищення термічної стабільності фаз для підвищення його температурної працездатності.

В задачі досліджень входило:

- вивчити особливості впливу танталу на структуроутворення, морфологію і хімічний склад фаз в структурі жароміцного корозійностійкого сплаву ЗМІ-ЗУ;
- дослідити ступень дендритної ліквідації;
- на підставі порівняльного аналізу результатів металографічних досліджень оптимізувати вміст танталу в сплаві ЗМІ-ЗУ в дослідженому діапазоні легування (1-5)% за масою за оптимальним структурним станом та морфологією окремих фаз в литому стані і після термічної обробки з метою покращення комплексу службових властивостей.

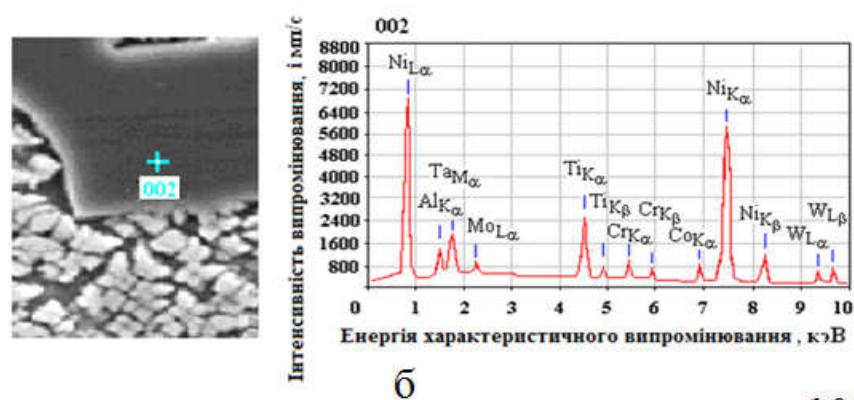
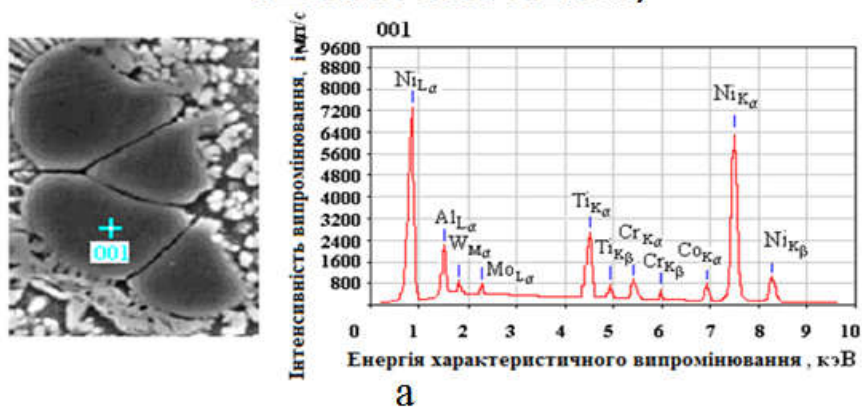
ХІМІЧНИЙ СКЛАД РЕАЛЬНИХ ДОСЛІДНИХ СКЛАДІВ

№ складу	Вміст елемента, % за масою											
	C	Cr	Al	Ti	Mo	W	Co	Ta	B	Y	La	Ni
0	0,08	13,3	3,3	4,8	0,8	7,2	5,0	0,0	0,009	0,03	0,01	Реш.
1	0,07	13,1	3,4	4,7	0,7	6,9	5,1	0,9	0,008	0,03	0,01	Реш.
2	0,07	13,2	3,6	4,6	0,8	7,0	4,9	1,9	0,008	0,03	0,01	Реш.
3	0,08	13,5	3,5	4,6	0,7	6,9	4,8	2,8	0,009	0,03	0,01	Реш.
4	0,06	13,0	3,6	4,4	0,7	7,2	5,0	3,9	0,008	0,03	0,01	Реш.
5	0,07	13,2	3,5	4,5	0,8	7,1	5,1	4,8	0,008	0,03	0,01	Реш.

Режими термообробки для дослідних сплавів

№ сплаву	$t_{\text{ГОМ.}}^I$ °C	Час витримки, год	$t_{\text{ГОМ.}}^{II}$ °C	Час витримки, год	Умови охолодження між ступенями
0	1180	4	1050	4	на повітрі
1	1195	4	1050	4	на повітрі
2	1210	4	1050	4	на повітрі
3	1225	4	1050	4	на повітрі
4	1240	4	1050	4	на повітрі
5	1255	4	1050	4	на повітрі

ЯКІСНИЙ МРСА ЕВТЕКТИКИ $\gamma+\gamma'$ В ЛИТОМУ СТАНІ (ДО ТЕРМООБРОБКИ)

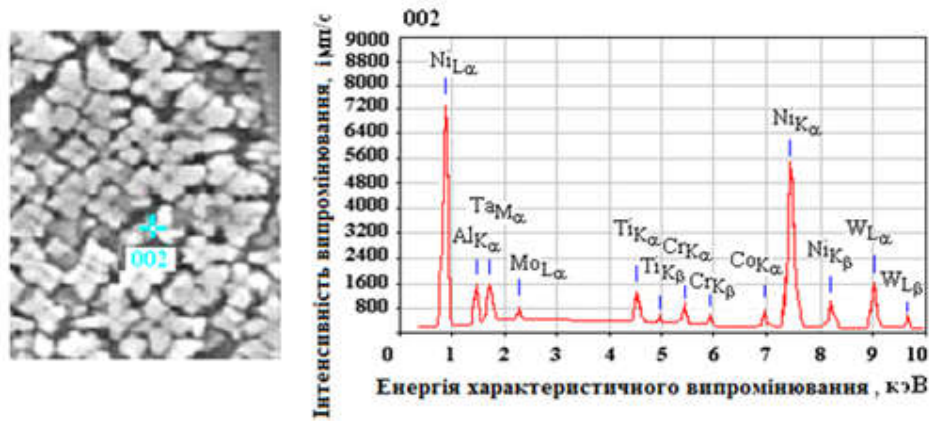
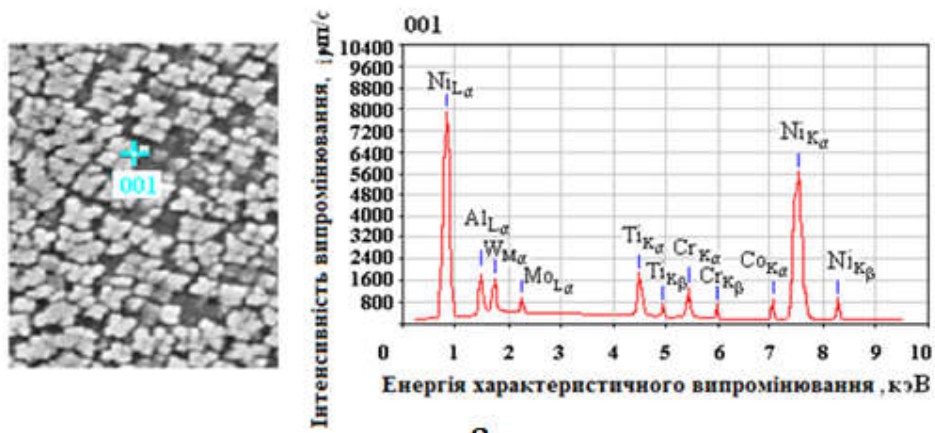


×10000

а – сплав ЗМІ-ЗУ без тантала (склад «0»);

б – сплав ЗМІ-ЗУ с 4,8% тантала (склад «5»).

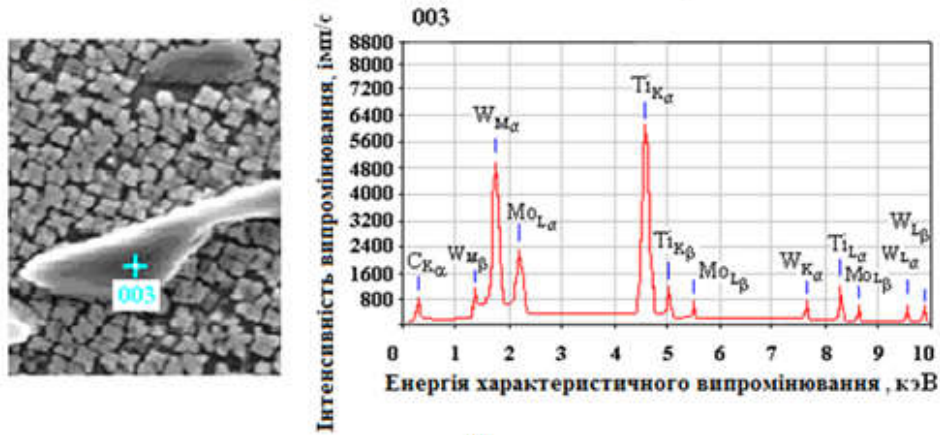
ЯКІСНИЙ МРСА γ' - ФАЗИ В ЛИТОМУ СТАНІ (ДО ТЕРМООБРОБКИ)



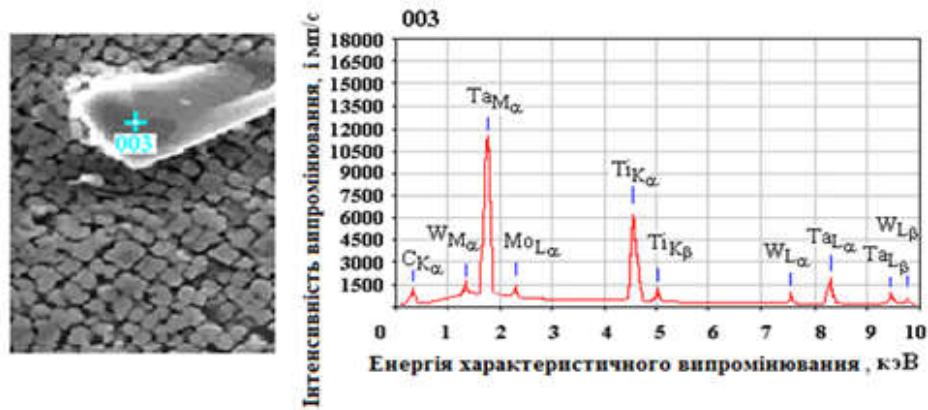
×10000

- а – сплав ЗМІ-ЗУ без танталу (склад «0»);
б – сплав ЗМІ-ЗУ з 4,8% танталу (склад «5»).

ЯКІСНИЙ МРСА КАРБІДНОЇ ФАЗИ (ЛИТИЙ СТАН)



а



б

×10000

а – сплав ЗМІ-3У без танталу (склад «0»);

б – сплав ЗМІ-3У з 4,8% танталу (склад «5»).

РОЗРАХУНКОВІ ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ЛІКВАЦІЇ В ДОСЛІДНИХ СКЛАДАХ

№ складу	Коефіцієнт ліквідації елемента «к» (литий стан)					
	Cr	Co	W	Al	Ti	Ta
0	-1,03	-1,09	-1,97	+1,06	+1,20	--
1	-1,03	-1,17	-1,94	+1,12	+1,19	+1,57
2	-1,04	-1,21	-2,09	+1,15	+1,19	+1,61
3	-1,04	-1,29	-2,22	+1,21	+1,17	+1,68
4	-1,04	-1,37	-2,38	+1,22	+1,16	+1,73
5	-1,04	-1,42	-2,43	+1,25	+1,15	+1,77

ВИСНОВКИ

1. В дипломному проекті досліджено особливості впливу танталу в дослідженому діапазоні легування (1-5)% за масою на специфіку формування структури, топологію, морфологію і хімічний склад фаз промислового жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву ЗМІ-3У.
2. Металографічний аналіз показав, що підвищення вмісту танталу в дослідженому діапазоні легування приводить до зміни форми евтектики $\gamma + \gamma'$ від віялоподібної в структурі сплаву ЗМІ-3У без танталу до ограненої в структурі сплаву ЗМІ-3У з 4, 8% танталу.
3. Показано, що алюміній, титан, молібден, вольфрам, ніобій, тантал, гафній, цирконій підвищують термічну стабільність основної зміцнюючої γ' - фази, за рахунок підвищення температури її повного розчину, а кобальт, хром, вуглець, бор, ванадій, навпаки, її знижують.
4. В сплаві ЗМІ-3У, легуваного танталом в дослідженому діапазоні (1-5)% за масою, зі збільшенням вмісту танталу підвищується ліквідація кобальту, вольфраму, алюмінію, танталу і знижується ліквідація титану, в порівнянні зі сплавом ЗМІ-3У без танталу (склад «0»).