

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інженерно-фізичний факультет
(повне найменування факультету)

Кафедра «Фізичне матеріалознавство»
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему Оптимізація хімічного складу сплаву ЗМІ-3У при введенні танталу

Виконав(ла): студент(ка) курсу, групи ІФ-212м

Спеціальності 132 «Матеріалознавство»

(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

Прикладне матеріалознавство

РУБІН Руслана Михайлівна

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ГЛОТКА Олександр Анатолійович

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент

(ПРИЗВИЩЕ та ініціали)

2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Інженерно-фізичний
Кафедра Фізичне матеріалознавство
Ступінь вищої освіти магістр
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація) Прикладне матеріалознавство
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри «Фізичне матеріалознавство»

Вадим ОЛЬШАНЕЦЬКИЙ

«_____» _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

РУБІН Руслана Михайлівна

(ПРИЗВИЩЕ, ІМ'Я, ПО БАТЬКОВІ)

1. Тема проєкту (роботи) Оптимізація хімічного складу сплаву ЗМІ-ЗУ при введенні танталу

керівник проєкту (роботи) к.т.н., доцент ГЛОТКА Олександр Анатолійович,

(науковий ступінь, вчене звання, ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «_____» _____ 20__ року №_____

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) хімічний склад та властивості серійних ливарних жароміцних нікелевих сплавів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Літературний огляд;

2. Матеріали та методики досліджень;

3. Експериментальний розділ;

4. Охорона праці;

5. Економічний розділ.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів) Температурні залежності розчинення (виділення) первинних карбідів (а); кількість первинних карбідів МС (б) від вмісту вуглецю в складі сплаву, Залежності температури розчинення (виділення) карбідів і вміст легувальних елементів у первинних карбідах від вмісту легувальних елементів у сплаві., Температурна залежність розчинення карбідів типу МС (а); кількість танталу, титану і вольфраму в МС карбіді (б) від вмісту титану в складі сплаву, Температурна залежність розчинення карбідів типу МС (а); кількість танталу, титану і вольфраму в МС карбіді (б) від вмісту титану в складі сплаву, Температурна залежність розчинення карбідів типу МС (а) та кількість танталу, титану і вольфраму в МС карбіді (б) від вмісту танталу в складі сплаву, Вплив танталу на склад первинних карбідів у системі Ni-11,5Cr-5Co-3,6Al-4,5Ti-7W-0,8Mo-0,06C.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-3	ГЛОТКА О.А., к.т.н., доцент		
4	КРУГЛІКОВА В.М.		
5	НЕСТЕРОВ О.В., к.т.н., доцент		
н/к			

7. Дата видачі завдання «_____» _____ 20__ року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Ознайомлення із темою дипломного проєкту. Вивчення відповідної літератури	06.10.2023	
2	Розробка вступу та розділу «Літературний огляд»	16.10.2023	
3	Розробка розділу «Матеріали та методики досліджень»	27.10.2023	
4	Розробка розділу «Експериментальний розділ»	16.11.2023	
5	Розробка розділу «Охорона праці»	04.12.2023	
6	Розробка розділу «Економічний розділ»	20.12.2023	
7	Написання висновків та переліку посилань	22.01.2024	

Студент(ка)

_____ Руслана РУБІН
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проєкту (роботи) _____ Олександр ГЛОТКА

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 85 с., 2 табл., 15 рис., 9 дод., 47 джерел.

НІКЕЛЕВІ СПЛАВИ; CALPHAD-МЕТОД; ЗМІ-ЗУ; ЗМІЦНЕННЯ; МЕХАНІЗМИ ЗМІЦНЕННЯ; γ' -ФАЗА; ЖАРОМІЦНІСТЬ; ЛЕГУВАННЯ

Об'єкт розробки – жароміцний нікелевий сплав ЗМІ-ЗУ

Мета роботи – Метою даної магістерської роботи є розробка сплаву ЗМІ-ЗУ з оптимізованим вмістом танталу, що забезпечить покращення його жароміцності, корозійної стійкості та крипостійкості. Дослідження передбачає експериментальну оцінку впливу танталу на структурно-механічні властивості сплаву, аби забезпечити його ефективне застосування в умовах високих температур.

Результати роботи – Застосовуючи комплексний аналітичний підхід до сплаву Ni-11,5Cr-5Co-3,6Al-4,5Ti-7W-4Ta-0,8Mo-0,06C, розроблено нові регресійні моделі для прогнозування складу карбідів на основі хімічного складу сплаву. Виявлено, що легувальні елементи впливають на температури розчинення карбідів, з якими корелюють термодинамічні процеси в системі, призводячи до екстремумів на температурних кривих. Збільшення концентрації титану понад 5% і танталу понад 7% у сплаві ініціює формування σ -фази, яка негативно впливає на механічні властивості, в той час як збільшення гафнію та ніобію модифікує карбіди та змінює їхні температури утворення. Порівняльний аналіз розрахункових даних, отриманих CALPHAD-методом, і експериментальних даних, отриманих рентгенівською спектроскопією, підтверджує точність моделей. Оптимальний вміст танталу в системі визначено у діапазоні від 4% до 7% для збереження балансу міцності та формування карбідів без утворення небажаної σ -фази.

ЗМІСТ

	С.
Вступ.....	7
1 Огляд літературних джерел.....	9
1.1 Ключові наукові засади легування у сплавах категорії ЖНС.....	9
1.1.1 Елементи, що сприяють формуванню γ' -фази.....	10
1.1.2 Легувальні елементи, які зміцнюють γ - твердий розчин	13
1.1.3 Карбідоутворювальні і мікролегувальні елементи	17
1.2 Вплив легувальних елементів на структуру і властивості сплавів класу ЖНС.....	19
1.2.1 Механізми підвищення міцності сплавів класу ЖНС.....	20
1.2.2 Вплив елементів легування на критичні температури та характеристики міцності сплавів категорії високотемпературних нікелевих суперсплавів.....	25
2 Матеріали та методики досліджень.....	31
2.1 Схема та устрій растрового електронного мікроскопа.....	33
3 Вплив танталу на склад первинних карбідів у системі Ni-11.5Cr-5Co-3.6Al-4.5Ti-7W-0.8Mo-0.06C.....	36
4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	
4.1 Аналіз потенційних небезпек.....	
4.2 Заходи забезпечення безпеки.....	
4.3 Заходи з виробничої санітарії.....	
4.4 Заходи з пожежної безпеки.....	
4.5 Заходи безпеки в умовах НС.....	
5 Економіко-організаційна частина.....	
5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу.....	
5.2 Послідовний аналіз.....	
Висновки.....	
Перелік джерел посилань.....	

Додаток А	
-----------------	--

ВСТУП

У сучасному матеріалознавстві одним із вирішальних напрямків є розробка та вдосконалення високотемпературних сплавів, здатних ефективно працювати в екстремальних умовах. Важливість цього дослідження зумовлена стрімким розвитком авіаційної, космічної та енергетичної галузей, де матеріали піддаються впливу високих температур, агресивного середовища та інтенсивних навантажень. ЗМІ-3У — жароміцний сплав, що активно використовується в турбінах сучасних двигунів, де високі механічні властивості та стабільність при високих температурах є критично важливими.

Оптимізація хімічного складу сплаву ЗМІ-3У за рахунок введення танталу є актуальним завданням, яке може привести до значного підвищення його експлуатаційних характеристик. Тантал відомий своєю здатністю підвищувати жароміцність, корозійну стійкість та крипостійкість сплавів, що робить його цінним додатком до складу жаростійких матеріалів.

Тема даної магістерської роботи, "Оптимізація хімічного складу сплаву ЗМІ-3У при введенні танталу", спрямована на дослідження впливу танталу на властивості сплаву, зокрема на його структуру, фізико-механічні характеристики та поведінку під час високотемпературної експлуатації. Робота передбачає теоретичне обґрунтування можливості використання танталу в якості легуючого елемента, проведення експериментальних досліджень зі зміни хімічного складу сплаву та аналізу отриманих зразків. Особлива увага буде приділена вивченню впливу танталу на мікроструктуру сплаву та на формування його механічних властивостей.

Метою дипломної роботи є розробка оптимізованого хімічного складу сплаву ЗМІ-3У з введенням танталу, що забезпечить покращення його експлуатаційних властивостей і, як наслідок, розширення можливостей його промислового застосування.

У процесі дослідження буде використано комплексний підхід, що включає як теоретичні, так і практичні аспекти. Результати дослідження мають стати

внеском у розвиток матеріалознавства та сприяти підвищенню надійності та довговічності виробів, що експлуатуються в умовах високих температур. Робота також має практичне значення для промислових підприємств, які займаються виготовленням та експлуатацією обладнання, де використовуються жароміцні сплави.

Таким чином, ця магістерська робота спрямована на вирішення актуальної наукової задачі, результати якої матимуть як теоретичне, так і прикладне значення.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Ключові наукові засади легування у сплавах категорії ЖНС

Ливарні жаростійкі нікелеві сплави представляють собою комплексні мультикомпонентні системи з вмістом до 12-15 легувальних елементів. Такі елементи можуть одночасно входити до складу декількох фаз і різноманітно впливати на окремі властивості сплаву.

Розглядаючи низку наукових публікацій, автори яких як в Україні, так і за кордоном, можна зустріти аналіз впливу окремих та комбінованих легувальних елементів на жароміцні властивості нікель-хромових (Ni-Cr) матриць, а також виявлено можливості підвищення міцності бінарних систем шляхом інтеграції як основних (Al, Ti, Co, Mo, W, Nb, Ta, Hf), так і мікролегувальних елементів (Zr, V, Y, La, Ce).

Зазначається, що комбінована дія кількох легувальних елементів (Cr, Ti, Mo, W, Co, Nb), у складі жаростійких ливарних нікелевих сплавів, сприяє підвищенню жароміцності більш ефективно, ніж внесення еквівалентної дози одного елемента.

На основі впливу на процеси зміцнення жаростійких ливарних нікелевих сплавів, легувальні елементи можна поділити на чітко визначені категорії: розчинні дисперсні зміцнювачі; твердорозчинні зміцнювачі; карбідоутворювачі; мікролегувальні елементи та шкідливі домішки. Цей поділ є дещо умовним, адже розчинні зміцнювачі можуть входити в склад не тільки гамма твердого розчину, але й взаємодіяти з інтерметалічною гамма-прим фазою, утворюючи сполуки типу $(\text{Ni}, \text{Cr})_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Mo}, \text{W})$. Проте, така класифікація дозволяє досягти зрозумілої і систематизованої картини взаємодії компонентів у сплавах [1].

1.1.1 Елементи, що сприяють формуванню γ' -фази

У контексті бінарних сплавів Ni-X, де X символізує такі елементи, як Al, Ti, Nb, Ta, Hf, до категорії легувальних елементів, що індукують утворення інтерметалідної сполуки Ni_3X , належать ті, що переважно концентруються у γ' -фазі. Так, елементи Al, Ti, Nb, Ta, Hf класифікуються як розчинно-дисперсні зміцнювачі, оскільки вони формують ключову зміцнювальну інтерметалідну γ' -фазу. Вплив на зміцнення γ' -фази зумовлюється типом дислокаційних взаємодій при впливі зовнішніх навантажень. У цій фазі спостерігається заміщення атомів одних елементів атомами інших, наприклад, кобальт може замінювати нікель, тоді як титан, ніобій, тантал і гафній можуть замінювати алюміній. Хром, молібден та вольфрам здатні замінювати як нікель, так і алюміній. Щоб покращити опір повзучості, слід збільшувати об'єм γ' -фази шляхом додавання ніобію, танталу та гафнію, які мають виражену спорідненість до γ' -фази та обмежену дифузійну мобільність [2].

У фундаментальній структурі литих нікелевих суперсплавів (ливарних ЖНС) інтерметалідна γ' -фаза на основі $Ni_3(Al, Ti)$ виступає як основна зміцнювальна фаза, причому її об'ємна частка залежить від вмісту алюмінію та титану в сплаві. Однак слід враховувати, що перевищення загального вмісту цих елементів може призвести до створення евтектичної $\gamma'_{\text{ЕВТ.}}$ -фази, зміцнювальні властивості якої є значно меншими.

Сучасні тенденції розвитку ливарних ЖНС вказують на стабільне зростання вмісту алюмінію та титану, що входять до складу γ' -фази. Проте це збільшення не повинно бути надмірним, оскільки існує ризик "перелегування", що може призвести до утворення грубих метастабільних евтектичних (перитектичних) фаз типу $(\gamma + \gamma')$, які мають негативний вплив на жароміцність.

У сфері матеріалознавства спостерігається збільшення жаростійкості литих жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) завдяки введенню титану, який ефективно впливає на зміцнення γ' -фази і знижує темпи її часток коагуляції. Однак, ексцес титану призводить до формування η -фази (Ni_3Ti) з небажаною

морфологією, що може негативно впливати на властивості сплаву. З іншого боку, зі зростанням вмісту титану та алюмінію відзначається зменшення кількості хрому у складі сучасних ЖНС.

У той час як раніше для легування використовувалася комбінація алюмінію та титану (Al+Ti), нині з'явився тренд на легування тільки алюмінієм. Дослідження підтвердили, що в таких сплавах γ' -фази (Ni_3Al) мають вищу термічну стійкість і лише при температурах на $150\text{--}200^\circ\text{C}$ вищих трансформуються в γ -твердий розчин порівняно з γ' -фазами $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$.

На міжнародному рівні, легування литих ЖНС почало включати такі елементи, як ніобій, гафній та тантал, при цьому в сплаві PWA-1480 вміст танталу може складати до 12% за масою.

Ніобій, як елемент, що сприяє формуванню γ' -фази, підвищує температурні показники розчинення цієї ключової зміцнювальної фази у литих жароміцних нікелевих сплавах. Статистика свідчить, що понад половина всього ніобію виявляється в γ' -фазі, приблизно третина – у γ -твердому розчині, тоді як мінорна частка (0,2...0,3% за масою) локалізована в карбідній фазі NbC. Присутність ніобію в обох – γ' -фазі та γ -твердому розчині – зумовлює дуальний ефект зміцнення: твердорозчинного та зміцнення γ' -фази. Ніобій затримує дифузійні процеси в сплавах, обмежує розчинність алюмінію та титану в γ -твердому розчині та сприяє утворенню більшого об'єму γ' -фази, яка уповільнює коагуляцію, тим самим підвищуючи температуру, при якій сплав слабшає. Ніобій знижує небезпеку зональної ліквідації в литих ЖНС, забезпечуючи більший вплив на зміцнення γ -твердого розчину, ніж молібден і титан, але менший, ніж вольфрам і тантал, що позитивно позначається на жароміцності сплавів [3].

Втім, зловживання ніобієм може негативно позначитися на пластичності литих ЖНС, збільшуючи їх схильність до тріщиноутворення. У ситуаціях, де висока сукупна концентрація ніобію, титану та танталу, рекомендовано балансувати склад литих ЖНС алюмінієм в еквівалентних пропорціях, інакше може спричинити формування небажаних δ -фаз, базованих на $\text{Ni}_3(\text{Nb}, \text{Ta})$, і η -фаз на основі Ni_3Ti . Тому ніобій включають у сплави в міру, і його концентрація зазвичай не перевищує 2% за масою. Ніобій виявляється найбільш

ефективним у забезпеченні тривалої міцності литих ЖНС при температурах 700...800°C, в порівнянні з іншими легувальними елементами, такими як Al, Ti, Ta, Mo, W, Co, V.

Для удосконалення жаростійкості литих жароміцних сплавів (ЛЖС) ключовим елементом є тантал, який вирізняється високою температурою плавлення та відмінною пластичністю. Введення танталу в композицію ЛЖС сприяє зростанню стійкості до високотемпературної деформації через повзучість та зменшує ризик формування втомних тріщин. Проте, присутність танталу може спричинити зростання евтектичних фаз ($\gamma + \gamma'$) у структурі сплаву, а також збільшення його ваги. Зазначимо, що тантал найбільш ефективно впливає на зміцнення та стабілізацію γ' -фази, підвищуючи її температуру розчинення у γ -твердому розчині, тим самим, посилюючи зміцнення самого γ -твердого розчину ЛЖС та стримуючи дифузійні реакції. Тантал є потужнішим агентом зміцнення γ' -фази, ніж титан та ніобій, як при нормальних, так і при високих температурах. Легувальний ефект танталу веде до зростання об'ємної частки γ' -фази та евтектики ($\gamma + \gamma'$), збільшуючи їх термодинамічну стабільність.

Щодо гафнію, він суттєво підсилює пластичність ЛЖС і позитивно впливає на їхні експлуатаційні якості. У Сполучених Штатах на початку 1970-х були інтегровані в промислове виробництво модифіковані композиції ЛЖС з гафнієм: наприклад, сплав В-1900 + (Hf), відомий як ММ-007, та сплав IN713С + (Hf), під маркуванням ММ-004. Було доведено, що введення оптимальної кількості гафнію в систему легування конкретного сплаву призводить до одночасного підвищення міцності та пластичності. Ключові переваги гафнію полягають у дрібненні дендритної структури, уповільненні дифузійних процесів на межах зерен, позитивному впливі на морфологію карбідної фази та збільшенні термічної стабільності γ' -фази, що зміцнює сплав [2].

На сьогоднішній день гафній інтегрований у склад численних виливків жароміцних сплавів, з вмістом, що коливається від 0,03% до 2,0% за масою. Необхідно підкреслити, що гафній має значний вплив на зниження точок евтектичного ($L + \gamma \rightarrow \gamma'$) та перитектичного ($L \rightarrow \gamma + \gamma'$) переходів, що сприяє формуванню евтектичних та перитектичних фаз. Це може призвести до загрози

локалізованого розплавлення евтектики ($\gamma + \gamma'$) під час термічної обробки виливків. Крім того, гафній негативно впливає на величину параметра "місфіт", що призводить до трансформації γ' -фази в більш сферичну форму з меншим зміцнюючим ефектом, ніж кубічна форма.

Існує прямий зв'язок між загальним вмістом елементів, що формують γ' -фазу (Al, Ti, Nb, Ta, Hf) у ливарних ЖНС, об'ємною часткою ($V_{\gamma'}$) зміцнюючої γ' -фази, що виділилася в їх структурі, та рівнем їх жаростійкості. Продemonстровано, що збільшення вмісту алюмінію в умовах збалансованого легування титаном, ніобієм, танталом та гафнієм сприяє підвищенню термічної працездатності ливарних ЖНС.

1.1.2 Легувальні елементи, які зміцнюють γ -твердий розчин

У розділі, що розглядає підвищення характеристик γ -твердого розчину, акцентується увага на важливості легувальних елементів, таких як Cr, W, Mo, Co, Ta, Ru та Re. Ці компоненти сприяють значному підсиленню міцності, що корелює як з атомними радіусами, які впливають на параметри кристалічної ґратки, так і з пониженням енергії дефектів упаковки, що призводить до зростання опору дислокаційного руху. У сучасних ливарних жаростійких сплавах, основу γ -твердого розчину становлять Ni, Co, Cr, доповнені важкоплавкими елементами. Вклад цих елементів у зміцнення розчину варіює відповідно до послідовності Cr, Mo, W, Ta, Re і Ru.

Кобальт та хром вносять свій вклад у зміцнення γ -твердого розчину до рівня температур, що дорівнюють 0,6 від температури плавлення. При вищих температурах, в області високотемпературної повзучості, ефективність зміцнення залежить від дифузійних процесів. Таким чином, для посилення γ -твердого розчину та його термічної стабільності вводяться важкоплавкі легувальні елементи з низькою дифузійною активністю, включаючи Mo, W, Ta, Re та Ru, які є потужними зміцнювачами [1].

Кобальт не лише сприяє міцності та стабілізації γ -твердого розчину у жаростійких ливарних сплавах, але й підвищує пластичність, в'язкість та розчинність елементів, таких як алюміній, хром і тантал. У зв'язку з цим, кобальт присутній у таких сплавах у проміжку концентрацій від 3% до 15% за масою.

Необхідно підкреслити, що при концентрації кобальту понад 10% від маси в складі виливків із жароміцних нікелевих сплавів, його пропорції з іншими легувальними елементами (такими як Cr, Mo, W, Re, Al, Ti, Nb, Ta, Hf) можуть виявитися непропорційними. Це може спричинити формування небажаних топологічно щільноупакованих (ТЩУ) фаз, що істотно знижують механічні характеристики матеріалу. Тому оптимальний вміст кобальту в виливках зазначених сплавів рекомендується утримувати в діапазоні від 3 до 12 мас. % [3].

У процесі додавання хрому у високолеговані виливки жароміцних нікелевих сплавів, варто врахувати, що його більша частина розміщується у γ -фазі твердого розчину. Хром може сприяти формуванню ТЩУ фаз, таких як α_{Cr} -, σ -, що знижують жаростійкість даних сплавів. Водночас, хром має благотворний вплив на опір прогресуванню втомних тріщин у матеріалі.

Щодо вольфраму як легувального елемента для виливків з жароміцних нікелевих сплавів, його концентрація варіюється у широких межах - від 0,5 до 12,5 мас. %, з огляду на його функціональну роль. Вольфрам виступає як важливий компонент, присутній у γ -фазі твердого розчину та γ' -фазі, забезпечуючи підвищення термічної стабільності і зміцнення матриці. Підвищення жароміцності виливків спостерігається насамперед при синергічній дії вольфраму з молібденом чи танталом. Мінімальний рекомендований вміст вольфраму для забезпечення належної жароміцності становить 8%, за масою. При збільшенні його вмісту до 10-12% від маси можливе погіршення стійкості сплавів до високотемпературного окислення та газової корозії. Також слід врахувати, що вольфрам як один із важкоплавких легувальних елементів сприяє зростанню щільності сплавів.

Збагачення складу ливарних нікелевих жароміцних сплавів (ЖНС) елементами, які сприяють утворенню γ' -фази, такими як титан, ніобій, тантал, гафній, що виявляються ефективнішими від вольфраму, сприяє заміщенню

останнього у складі як γ' -фази, так і в карбідних фазах типу MC. Водночас, підвищення концентрації вольфраму за рахунок зниження хрому і кобальту веде до зростання температури, при якій γ' -фаза починає розчинятися у γ -твердому розчині, що відповідає передовим підходам легування ЖНС.

Молібден, на відміну від вольфраму, має тенденцію переважно зосереджуватися у γ -твердому розчині, хоча й присутній також у γ' -фазі. Цей елемент підсилює жароміцність та термічну стабільність ЖНС, але його здатність зміцнювати γ -твердий розчин є менш вираженою порівняно з вольфрамом та танталом. Тим не менш, завдяки своїй нижчій вартості та питомій щільності, порівняно з вольфрамом, молібден продовжує бути популярним легувальним елементом у ЖНС.

Наявність молібдену у невеликих кількостях вважається сприятливою для підвищення опору ливарних ЖНС до сульфідно-оксидної корозії в порівнянні зі сплавами, що не містять цей елемент. Проте, зі збільшенням його вмісту понад 3% за масою, спостерігається погіршення стійкості до високотемпературного окислення та газової корозії. Таким чином, оптимальний діапазон концентрації молібдену в ЖНС зазвичай коливається у межах 0,5...2,5% за масою.

Попри виокремлені переваги, великі концентрації молібдену та вольфраму, у поєднанні зі значними кількостями хрому, можуть спричинити структурну нестабільність, що веде до помітного зниження показників міцності у литих жароміцних сплавах (ЖНС). Зі зростанням частки тугоплавких елементів у жароміцних ливарних сплавах, включаючи молібден, вольфрам, ніобій, тантал та реній, стає актуальним зменшення вмісту хрому.

Значний прорив у підвищенні жаростійкості литих ЖНС було досягнуто завдяки введенню у легування таких елементів як тантал і реній, які раніше не використовувались у домашніх сплавах. Легування танталом сприяє посиленню жароміцності, оскільки це зміцнює гамма-фазу твердого розчину при одночасному включенні молібдену та вольфраму у склад. Наприклад, застосування танталу та ренію у відомому сплаві ЖС32 дозволило збільшити температурну стійкість більше ніж на 40°C у порівнянні зі сплавом ЖС26, який характеризується схожим складом, але не містить цих елементів [3].

Аналізуючи хімічні склади литих ЖНС, можна відзначити, що на противагу сплавам, що кристалізуються у рівноважних умовах, сплави призначені для направленої кристалізації та монокристалічного литва містять тантал у широкому діапазоні від 0,5 до 12 відсотків за масою. Така різноманітність обумовлена різними рівнями хрому у складі, які обмежують розчинність танталу в нікелевій гамма-матриці.

Реній виступає як надзвичайно ефективний легувальний елемент, який здатний значно посилити жароміцні властивості литих ЖНС [4]. Його основна дія полягає у концентрації в γ -твердому розчині, де він, завдяки своїй обмеженій дифузійній мобільності, найефективніше зміцнює матрицю. Реній також затримує коагуляцію часток γ' -фази, сприяючи їх термічній стабільності. Його присутність у нікелевих жароміцних сплавах призводить до утворення більш дрібнодисперсної γ' -фази під час її випадання з γ -твердого розчину, і одночасно гальмує їх розчинення при високих температурах. Таким чином, реній, інтегрований у γ -матрицю, сприяє підвищенню жароміцності литих ЖНС і покращує їх опір до високотемпературної повзучості і окислення.

Проте, легування ренієм може виявити певні недоліки. У дендритних комірках реній має схильність до ліквідаційної сегрегації, яку вкрай важко, а іноді й неможливо, виправити за допомогою термічної обробки через його низьку дифузійну мобільність. Більше того, реній сприяє утворенню в структурі сплавів ТЩУ фаз (тобто r -фаз). Однак, найсуттєвішим недоліком цього елемента є його висока ціна та дефіцитність, обумовлені обмеженим обсягом світового виробництва.

У наукових колах існує консенсус щодо здатності рутенію підвищувати стабільність γ -твердого розчину та фазового складу у ливарних ЖНС із високим вмістом ренію, обмежуючи при цьому формування небажаних ТЩУ фаз. Рутеній та реній відзначаються одними з найнижчих коефіцієнтів дифузії у нікелі, що є важливим для контролю над процесами зміцнення.

Попри це, світова практика у сфері легування вказує на те, що продовження тенденції до збільшення вмісту тугоплавких елементів, насамперед ренію, може спричинити виділення шкідливих надлишкових ТЩУ фаз, таких як

σ -, μ -, та ρ -фази, у структурі ливарних ЖНС. Це, в свою чергу, призводить до зниження структурної стабільності та параметрів жароміцності. Як відповідь на цю проблему, було запропоновано замінити частку ренію рутенієм, який сприяє підвищенню механічних характеристик, особливо тривалої міцності, завдяки зміцненню структурної та фазової стабільності у високоренієвих ливарних жароміцних нікелевих сплавах.

1.1.3 Карбідоутворювальні і мікролегувальні елементи

До категорії елементів, здатних утворювати карбіди, належать такі елементи, як Ti, Nb, Ta, Hf, Cr, Mo та W, разом із мікролегувальними елементами, що зміцнюють границі зерен, включно з C, B, Zr, Ce, Y, Hf, La, Nd, та Pr, через створення карбідних та інших тугоплавких термодинамічно стійких сполук.

Вуглець, зокрема, у структурі ливарних жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) відіграє ключову роль у формуванні різних типів карбідів, зокрема MC, M_6C , та $M_{23}C_6$. Ці карбідні включення, особливо сферичної форми, сприяють додатковому дисперсному зміцненню γ -твердого розчину та ефективно уповільнюють дифузійні процеси на границях зерен, тим самим знижуючи температури ліквідусу (t_L) і солідусу (t_S).

За результатами аналізу чисельних промислових ливарних ЖНС вітчизняної та зарубіжної виробництва стає зрозумілою значущість карбідів у загальному механізмі зміцнення сплавів. Вони зазвичай утворюються безпосередньо з розплаву, розміщуючись між дендритами та вздовж границь зерен, що призводить до формування характерної морфології. γ' -утворюючі елементи, як Ti, Nb, Ta та Hf, відомі своєю здатністю створювати карбіди типу MC, які є вкрай термодинамічно стійкими [3].

Втім, у реальних сплавах в карбіди MC, крім основних карбідоутворюючих елементів, входять також інші елементи, включаючи Co, Cr, Mo, та W. Це може послаблювати сили зв'язку всередині сполук і спричиняти розпадові реакції, в

результаті яких утворюються інші типи карбідів, як $M_{23}C_6$ чи M_6C , потенційно впливаючи на стабільність характеристик міцності сплаву. Об'ємні частки карбідів різного типу у ливарних ЖНС, залежно від специфіки легування, можуть варіюватися в межах 0,5 до 2,5 відсотків за масою.

Границі зерен мають вирішальне значення у структурі литих жароміцних сплавів (ЖНС). Внаслідок зниженої міцності на границях зерен, при підвищених температурах у цих сплавах переважає міжзернове ковзання, яке спричиняє повзучість. Для зміцнення цих критичних зон вводять мікродобавки легувальних елементів (Hf, Zr, B, Y, La, Ce, Nd). Вони здійснюють обмеження дифузії, покращуючи тим самим міцність границь зерен і фаз.

З розвитком технології ливарних ЖНС, що формують монокристалічний стан, де відсутні границі зерен, стає зайвим додавання елементів, що покращують їх властивості (C, B, Zr). Проте, варто відзначити, що сплави для монокристалічного лиття, наприклад, серії «Rene», містять незначні кількості вуглецю та бору. Експерти вважають, що повне вилучення цих компонентів може негативно позначитися на тривалості експлуатації. Введення невеликої кількості вуглецю (до 0,05% за масою) вважається важливим для зміцнення малокутових границь дендритів, забезпечення термічної стійкості карбідної фази та стабільності структури монокристалічних ливарних ЖНС.

Отже, скорочення вмісту елементів, котрі зміцнюють границі зерен (C, B, Zr), підвищує температуру солідусу (t_s) сплаву, що сигналізує про початок його плавлення. Це водночас дозволяє повністю розчинити γ' -фазу з перевагою розчинення метастабільних фаз, без ризику місцевого розплавлення евтектики ($\gamma+\gamma'$).

Ніобій, тантал та гафній, як потужні агенти формування карбідів, суттєво впливають на їх морфологію у структурі ливарних жароміцних сплавів (ЖНС). Ці елементи ефективно перешкоджають утворенню небажаних карбідів з морфологією, схожою на "китайські ієрогліфи", трансформуючи їх у сферичні або поліедричні форми, які виявляються надзвичайно корисними. Окрім того, ці елементи забезпечують формування термодинамічно стабільних сульфідів, зміцнюючи сплави.

Як найміцніші стабілізатори γ' -фази та карбідів типу (MC), що мають міцні зв'язки з γ -матрицею, ніобій, тантал і гафній витісняють молібден і вольфрам у матричний γ -твердий розчин, що сприяє його подальшому зміцненню.

Невеликі дозування гафнію, цирконію, церію, лантану та неодиму мають значний вплив на зниження дифузійної мобільності атомів, що, в свою чергу, сповільнює коагуляційні процеси γ' -фаз у ході довготривалого високотемпературного експонування. Рідкоземельні метали (РЗМ) виявляють свій позитивний ефект не лише за рахунок уповільнення дифузії, але й завдяки утворенню стійких до температур сполук із небажаними домішками. Ці елементи також виступають бар'єром окисленню сплавів уздовж меж зерен при високих температурах через формування тугоплавких оксидів, які перешкоджають подальшому окисленню.

У контексті ливарних ЖНС з монокристалічною структурою, церій, ітрій та лантан застосовуються для підвищення міцності міжфазних границь. Внесення РЗМ істотно підсилює поверхневу стабільність цих матеріалів, їхню здатність протистояти високотемпературному окисленню та газовій корозії. Зазначено, що мікролегування лантаном нікелевого жароміцного сплаву ВЖМ4-ВІ [4] для монокристалічного лиття сприяло підвищенню його червоностійкості у 1,5...2 рази. Також відзначено, що присутність шкідливих домішок, до яких належать легкоплавкі сполуки сірки, свинцю, олова, вісмуту, а також кисню, азоту та водню, негативно позначається на міцності та оброблюваності ливарних ЖНС.

1.2 Вплив легувальних елементів на структуру і властивості сплавів класу ЖНС

Сучасна індустрія постійно розширює асортимент ливарних сплавів на нікелевій основі, що використовуються для виробництва критично важливих компонентів газотурбінних установок, а також удосконалює технологічні

процеси їх виготовлення. Високі температурні вимоги до цих сплавів наголошують на необхідності детального вивчення механізмів їх зміцнення та руйнування, а також аналізу структурних та фазових перетворень, які відбуваються в рамках експлуатаційних температур. Комплексний хімічний та фазовий склад цих сплавів є відображенням великої кількості взаємосуперечливих вимог, які пред'являються до матеріалів цього класу.

Аналіз структури та фазового складу ливарних сплавів на нікелевій основі став невід'ємною частиною їх розвитку. Ці сплави класифікуються як матеріали, що зміцнюються за рахунок дисперсного твердіння. Показник жаростійкості значною мірою залежить від складу та об'ємної частки γ' - фази в сплаві, морфології та розмірів частинок, а також від стабільності γ' - фази в широкому діапазоні температур за умов впливу термічних, статичних та динамічних навантажень [2].

Взаємодія кожного легувального елемента з γ - твердим розчином та γ' - фазою, вплив на об'ємну частку та хімічний склад фаз, параметри кристалічних ґраток та інші ключові структурні характеристики ливарних жароміцних нікелевих сплавів є складним та не завжди передбачуваним процесом. Проте, дослідження широкого спектру ливарних сплавів на нікелевій основі з різноманітними системами легування та різними функціональними призначеннями дозволяють визначити загальні тенденції та закономірності.

1.2.1 Механізми підвищення міцності сплавів класу ЖНС

Основою високих жароміцних якостей сплавів класу ЖНС є процес розпаду пересиченого гамма-твердого розчину з наступним утворенням дисперсних частинок інтерметалідної гамма-прим фази, зокрема, на базі Ni_3Al . Створення однорідної гетерофазної структури є ключовим для зміцнення цих матеріалів. Слід відзначити, що γ' фаза, яка демонструє визначальну роль у

високотемпературній поведінці та стійкості сплавів при тривалій експлуатації, є важливим аспектом в характеристиках міцності цих сплавів в цілому.

Також важливим є той факт, що існує здатність заміщення більшої частки алюмінію у γ' -фазі титаном, а додавання елементів, таких як хром, кобальт, вольфрам, впливає на її склад. Вищевказані елементи, а також ніобій та тантал, які становлять понад половину у загальному складі γ' -фази, впливають на її хімічний склад, в той час як вони становлять приблизно третину за масою у γ -твердому розчині. Для карбо-нітридних фаз, таких як Nb (C, N), Ta (C, N), їх вміст не перевищує (0,2...0,3)%.

Зауважимо, що хоча існує взаємозв'язок між хімічним складом жароміцних нікелевих сплавів та складом гамма-прим фази, точна кореляція поки що не визначена. На рис. 1.1 демонструється механізм підвищення міцності сплавів за допомогою частинок γ' -фази, де концентрація частинок в структурі сплаву є сталою. Для оптимального ефекту зміцнення важливою є максимальна об'ємна частка гамма-прим фази та оптимальний розмір цих часток (d).

Дослідження показали, що γ' -фаза, багата на алюміній, не здатна трансформуватися у інші інтерметалідні сполуки, аналогічні (Ni_3X). Проте, перехід до таких фаз стає можливим у випадку значного вмісту титану та/або ніобію, танталу, гафнію у γ' -фазі. Стійкість фазового складу виливків із жароміцних нікелевих сплавів істотно впливає на їх експлуатаційні характеристики. Внутрішня нестабільність є характерною рисою реальних ливарних ЖНС через динамічну природу їх структури.

Структурні та фазові перетворення можуть неоднорідно відбуватися в сплавах з різним хімічним складом під час їх нагрівання та охолодження. Однак, для досягнення оптимальних механічних властивостей необхідно ретельно контролювати процеси формування та росту зміцнювальних частинок γ' - фази [1-3].

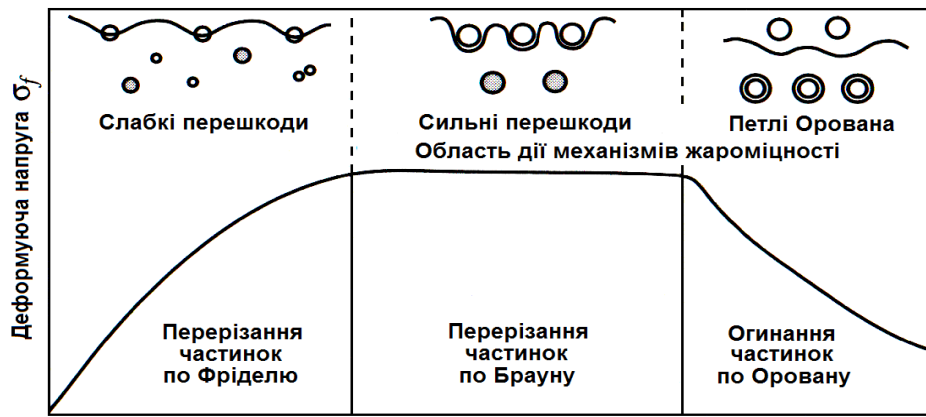


Рисунок 1.1 – Механізм зміцнення ливарних ЖНС частинками γ' - фази (об'ємна кількість частинок постійна)

На рис. 1.2 та рис. 1.3 представлені діаграми, які ілюструють зв'язок між об'ємною часткою виділеної γ' - фази ($V_{\gamma'}$) і концентрацією алюмінію та хрому у складі ливарних жароміцних нікелевих сплавів.

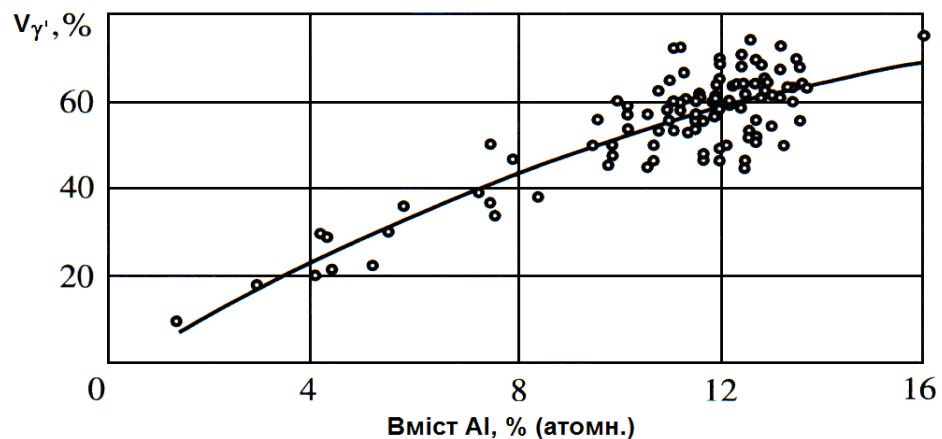


Рисунок 1.2 – Залежність об'ємної частки γ' - фази ($V_{\gamma'}$) в структурі ливарних ЖНС від вмісту алюмінію в їх складі

Дослідження вказують на те, що зі збільшенням кількості алюмінію відбувається зростання об'ємної частки γ' - фази ($V_{\gamma'}$). Водночас, зі збільшенням кількості хрому, спостерігається пригнічення процесу формування γ' -фази у структурі ливарних жароміцних нікелевих сплавів, що демонструються на рис. 1.2 та рис. 1.3.

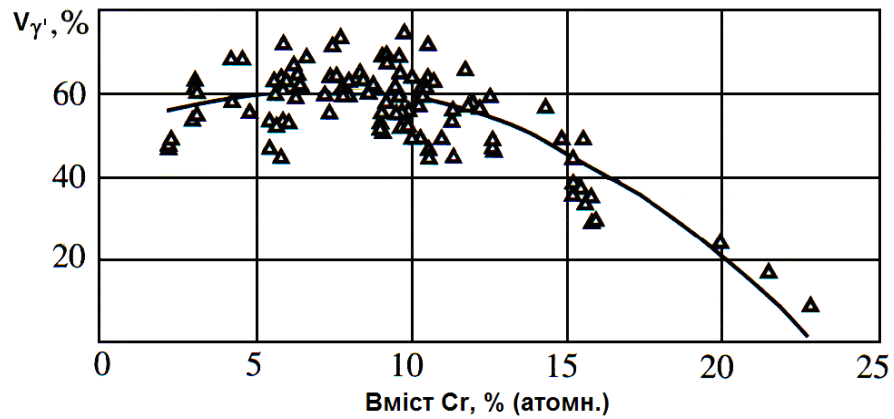
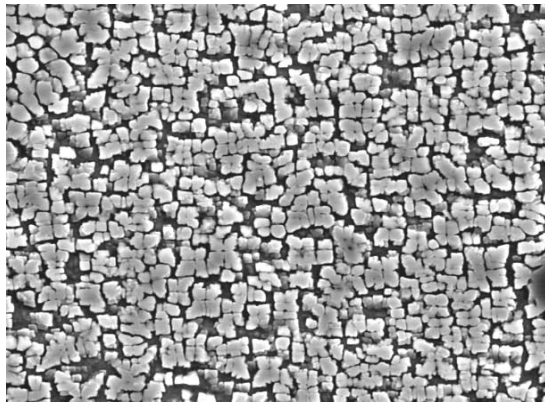
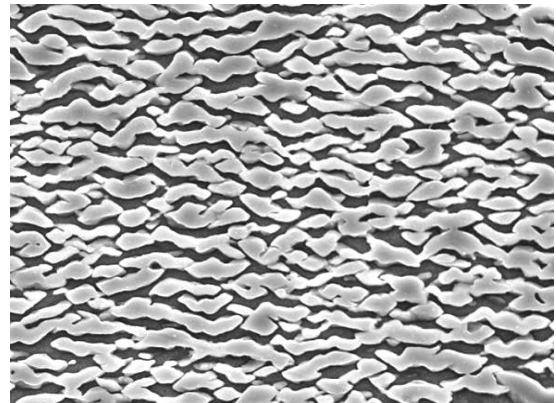


Рисунок 1.3 – Залежність об'ємної частки γ' - фази ($V_{\gamma'}$) в структурі ливарних ЖНС від вмісту хрому в їх складі



а



б

а – вихідна структура (після термообробки);

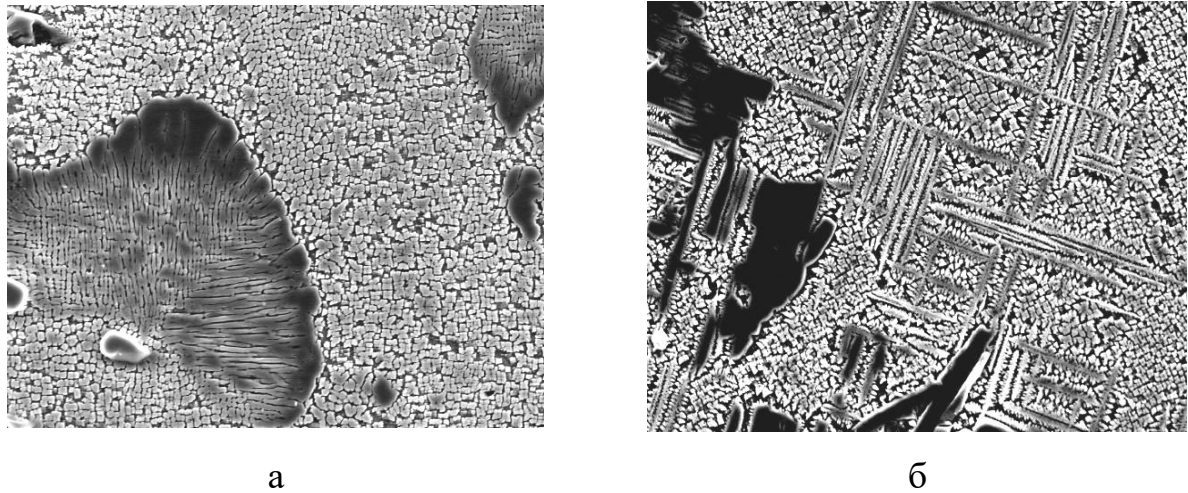
б – РАФТ структура, яка утворилася після тривалих випробувань

Рисунок 1.4 – Деградація структури ливарних ЖНС в процесі випробувань на тривалу міцність при $t = 1000^{\circ}\text{C}$ і $\sigma = 180 \text{ МПа}$, $\times 5000$

На рис. 1.4 зображено характерну структуру ливарних жароміцних нікелевих сплавів, яка розвивається під впливом напруги 180 МПа при температурі 1000°C .

Високий загальний вміст елементів, які формують γ' -фазу, у сучасних ливарних жароміцних нікелевих сплавах призводить до значного збільшення об'ємної частки евтектики ($\gamma + \gamma'$) у міждендритних зонах. Це підкреслюється на

рис. 1.5 а. Крім того, відбувається утворення ТЩУ частково узгоджених фаз, що відображено на рис. 1.5 б.



а

б

а – евтектика ($\gamma+\gamma'$);

б – ТЩУ фази в осях дендритів

Рисунок 1.5 – Метастабільні фази в структурі ливарних ЖНС, $\times 2000$

Проблема схильності до інтенсивного дендритного розплавлення в жароміцних нікелевих сплавах, призначених для використання в технології монокристалічного лиття, виявляється особливо значущою. У цих матеріалах критичним чинником виступає не стільки середній об'єм ТЩУ фаз у загальній структурі сплаву, скільки їх локалізована концентрація, яка може досягати максимальних значень. Також необхідно відзначити, що в жароміцних нікелевих сплавах присутні α -фази (αCr , αW тощо), що включають γ -стабілізуючі елементи, серед яких хром, молібден та вольфрам. Внаслідок цього, їхня присутність у γ -твердому розчині знижується, що призводить до зменшення ефекту зміцнення сплаву.

Особливу увагу слід зосередити на тому, що дендритні осі, ілюстровані на рис. 1.5 б, виявляються надзвичайно схильними до утворення ТЩУ фаз. Ці ділянки, які є першими, що кристалізуються під час формування виливків, насичені високотемпературними елементами такими як молібден, вольфрам і реній, на відміну від міждендритного простору, представленого на рис. 1.5 а.

ТЩУ фази характеризуються високою ламкістю та пластинчастою морфологією, що сприяє концентрації напружень і стимулює появу та розвиток тріщин, негативно впливаючи на міцність жароміцних нікелевих сплавів. Варто підкреслити, що негативний вплив ТЩУ фаз на довговічність сплавів починається з певної критичної концентрації в структурі матеріалу. Зокрема, спостерігається різке зниження працездатності жароміцних нікелевих сплавів при вмісті ТЩУ фаз більше 7 відсотків за масою.

Формування ТЩУ-фаз, таких як σ - та μ -фази, значною мірою виділяються за присутності хрому, вольфраму, молібдену та ренію, а також додаткових елементів, зокрема кобальту. Водночас, легування кобальтом у кількості менше ніж 5% за масою, виявляється фактором, що знижує тенденцію до створення σ -фаз. Проте, коли вміст кобальту перевищує 5%, він активно стимулює формування σ -фаз. При високому рівні таких елементів, як титан, ніобій, тантал та гафній, у структурі литих жароміцних нікелевих сплавів, можлива присутність ТЩУ-фаз, зокрема η -фаз (Ni_3Ti , Ni_3Nb , Ni_3Ta , Ni_3Hf) [4]. Слід відзначити, що може відбуватися виділення пластин η -фаз на базі сполук (Ni_3Ti), чия температура розчинення є вищою, ніж температура завершення розчинення γ' -фаз ($t_{\text{K.P.}\gamma'}$). Цей аспект категорично виключає можливість елімінування таких фаз шляхом термічної обробки. Щоб знизити схильність до утворення ТЩУ-фаз типу σ - та η - за умови підвищеного вмісту титану, рекомендується в деяких випадках зменшувати концентрацію хрому і збільшувати кількість кобальту в складі литих жароміцних нікелевих сплавів.

1.2.2 Вплив елементів легування на критичні температури та характеристики міцності сплавів категорії високотемпературних нікелевих суперсплавів

Детальне дослідження фазових переходів у високотемпературних умовах у виливках з нікелевих суперсплавів дозволяє сформулювати обґрунтовану

експериментальну базу даних, яка відображає особливості динаміки цих процесів та вплив легувальних компонентів на критичні температури та діапазони фазових перетворень. Роль виділення та розчинення зміцнювальних фаз у формуванні структури цих виливків зазначена в численних наукових публікаціях.

Зв'язок між легуванням та термічною стабільністю γ' -фази в більшості досліджень розглядається лише на рівні певних промислових сплавів, залишаючи питання відкритим. Відомо, що температурна ефективність виливків з нікелевих суперсплавів визначається їх структурно-фазовою стабільністю та рівнем червоностійкості, які корелюють з критичними температурами, такими як температури ліквідусу (t_L) та солідусу (t_S), температури евтектичного локального плавлення ($t_{\text{ЕВТ.}}$), а також температурами початку ($t_{\text{П.Р.}\gamma'}$) і завершення ($t_{\text{К.Р.}\gamma'}$) розчинення γ' -фази. Довготривала практика підтверджує, що критичні температури ліквідусу (t_L) і солідусу (t_S) мають значний вплив на діапазон кристалізації сплавів ($\Delta t_{\text{КР.}} = t_L - t_S$), який визначає схильність до дендритної ліквідації. Встановлено, що зменшення цього температурного інтервалу кристалізації сприяє зниженню дендритної ліквідації та підвищенню однорідності сплаву за хімічним складом і структурою. Це призводить до зниження контрасту хімічного складу між основами дендритів і міждендритними зонами, а також зменшує ризик формування мікропористості, що позитивно впливає на міцнісні показники. Водночас слід наголосити на тому, що температура солідусу (t_S) визначає верхню межу температур, при яких сплав зберігає свої експлуатаційні властивості. Висока температура солідусу (t_S) є індикатором здатності нікелевих суперсплавів забезпечувати високу температурну стійкість у процесі експлуатації, що є критично важливим для виливків, що використовуються в умовах високих навантажень та температур [2,3].

Зона кристалізації сплаву визначає міру дендритної ліквідації, яка є залежною від температурного градієнта та швидкості кристалізаційного фронту. Менший температурний градієнт і нижча швидкість фронту кристалізації призводять до збільшення міждендритної відстані, сприяючи зростанню дендритної ліквідації. Експертні спостереження підтверджують, що ступінь

дендритної ліквідації корелює з дифузійними властивостями легувальних елементів у рідких та твердих станах, адже в зонах, примикаючих до фронту кристалізації, інтенсивно перебігають дифузійні процеси, як з рідкої фази в тверду, так і в зворотньому напрямку. Особливо важливою є рухливість дифузії елементів, що зміцнюють γ -твердий розчин; низька рухливість таких елементів уповільнює дифузійні процеси при високих температурах, що впливає на швидкість розчинення часток γ' -фази в γ -твердому розчині та на швидкість їх коагуляції. Ці фактори мають вирішальний вплив на деградацію структури ливарних ЖНС.

Критичні температури, що характеризують фазові перетворення у специфічних ливарних сплавах, визначаються як унікальні для кожного металу і є показниками термодинамічної стабільності та впливають на механізми ослаблення при підвищених температурах. Досі визначення цих критичних температур здійснюється за допомогою експериментальних підходів. У сучасних ливарних ЖНС, робочі температури піднялися настільки, що температурний рубіж розчинення γ' -фази часто включається в цей діапазон. Відомо, що збільшення концентрації алюмінію, титану, ніобію, танталу та гафнію підвищує температуру, при якій завершується розчинення γ' -фази, що одночасно звужує температурний проміжок доступний для термічної обробки і гомогенізації γ -твердого розчину, а це ускладнює технологічний процес ливарних ЖНС.

Що стосується евтектичних перетворень, то вони представляють собою комплексні процеси, які можуть відбуватися одночасно в структурі ливарних ЖНС, перекриваючись у певному температурному діапазоні. Врахування цього аспекту є критично важливим при визначенні критичних температур за допомогою експериментальних методів, таких як дилатометричний або диференційний термічний аналізи, де правильне тлумачення та точна оцінка результуючих даних є невід'ємними для точності визначення.

Визнано, що оптимальні значення міцності досягаються тоді, коли γ -твердий розчин повністю розпадається, що відбувається при розмірі γ' -фази від 0,30 до 0,50 мікрометрів. Процедури термічної обробки, прийняті для ливарних жароміцних сплавів, як правило, охоплюють етапи гомогенізації та

двоступеневого старіння. Ці методи забезпечують високі рівні жароміцності. Проте, вони не завжди здатні забезпечити достатній рівень пластичності, критичний для довготривалої роботи лопаток у стаціонарних газотурбінних установках[4].

Багатостадійна циклічна гомогенізація лопаток з направленою та монокристалічною структурою виявляється найефективнішим методом для досягнення однорідності хімічного складу. За її допомогою вдається більш повно розчинити γ' -фазу та зменшити кількість нерівноважних фаз у γ -твердому розчині, не впливаючи при цьому на евтектику ($\gamma+\gamma'$). У практичному застосуванні це досягалося шляхом емпіричного вибору оптимальних температур гомогенізації та старіння для різних вітчизняних та закордонних ливарних суперсплавів. У сплавах з направленою та монокристалічною структурою стабілізація фазового стану відбувається при вищих температурах, ніж у сплавів з рівноважною структурою.

Згідно з сучасними уявленнями, оптимальне поєднання міцності та пластичності у ливарних суперсплавах досягається за рахунок обмеженого перестаріння γ' -фази та наявності специфічної структури, коли ізольовані випадіння карбідів оточені більш пластичною γ -матрицею. Експериментально доведено, що така структура сприяє затримці розвитку міждендритних тріщин за рахунок зниження чутливості до концентраторів напружень, що сприяє збільшенню терміну служби ливарних суперсплавів. Деякі фахівці стверджують, що після обробки литих жароміцних сплавів (ЖНС) при високій температурі, необхідно застосовувати обробку при низькій температурі з наступним повітряним охолодженням. Такий підхід надає γ' -фазі двомодальну структуру та вдосконалює характеристики стійкості до деформації при високих температурах (рис. 1.6) [5]. При цьому, ключовими структурними елементами литих ЖНС, що визначають міцність та пластичність, є об'ємна доля γ' -фази, розміри та морфологія її зерен, а також розподіл евтектики ($\gamma+\gamma'$) і карбідних фаз.

Інша точка зору полягає в тому, що литі ЖНС не потребують термообробки, оскільки розпад γ -твердого розчину з утворенням часток γ' -фази відбувається під час кристалізації самого сплаву.

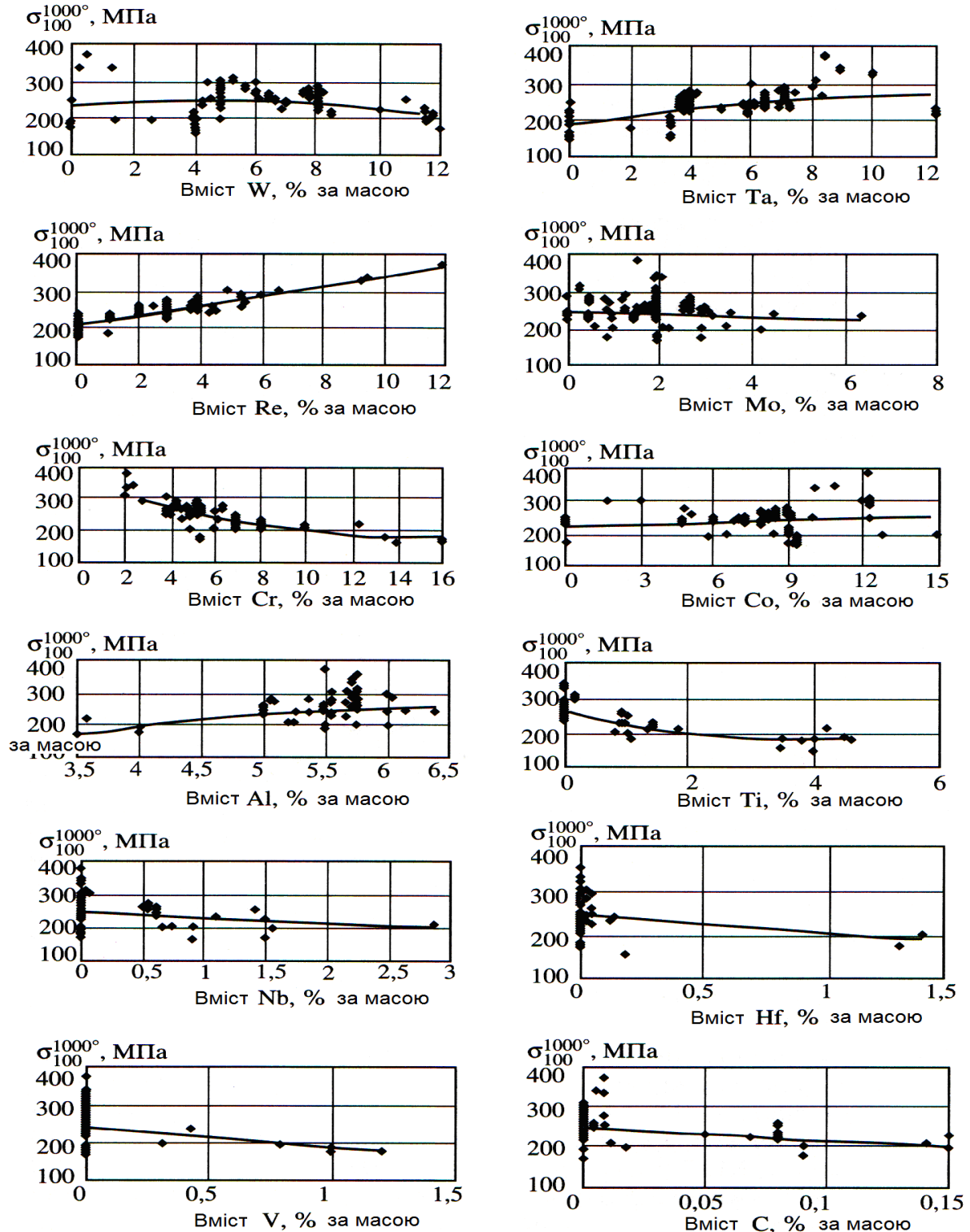


Рисунок 1.6 – Вплив легувальних елементів на границю 100- годинної тривалої міцності монокристалів [001] ливарних ЖНС при $t = 1000^\circ\text{C}$

Зазначається, що неоднорідна структура в литих ЖНС є ідеальною для лопатей газових турбін, які працюють в умовах змінних навантажень. Різний

розмір частинок (переважно дво модальної) укріплюючої γ' -фази сприяє рівномірному розподілу міцності по різних кристалографічних осях, надаючи матеріалу більшу ізотропність. Тим часом, жаростійкість значно залежить від об'ємної долі, розподілу та дисперсності часток γ' -фази. Проте, багато дослідників вважають, що в литих ЖНС, які не проходили термічної обробки, спадкова нерівномірність структури знижує пластичність з часом експлуатації.

Дослідження показують, що додавання до ливарних жароміцних сплавів (ЖНС) таких елементів, як ніобій, тантал, гафній, реній та рутеній, які характеризуються низькою швидкістю дифузії, може покращити їх властивості при високих температурах. Однак, це також значно підвищує їх вартість. Зміцнення ливарних ЖНС можна досягти за рахунок збільшення загального вмісту елементів, які формують γ' -фазу (наприклад, алюміній, титан, ніобій, тантал, гафній), оскільки ці елементи зазвичай концентруються в γ' -фазі більше, ніж у γ -твердому розчині. Це потрібно зробити, узгоджуючи з легувальними елементами, які зміцнюють твердий розчин (хром, молібден, вольфрам, реній, рутеній).

Під час експериментів було виявлено, що ослаблення міцності ливарних ЖНС, особливо тих, що мають спрямовану та монокристалічну структуру, походить від перерозподілу легувальних елементів через дифузійні процеси біля меж фаз. Це стосується переважно таких елементів як алюміній, титан і хром, а також шкідливих домішок, що ведуть до прискорення об'єднання частинок γ' -фази і зменшення їх кількості [5].

Тривалість служби сплавів з класу ЖНС залежить від ряду чинників, включаючи тип кристалізації, швидкість дифузії легувальних елементів, характеристики кристалічних решіток γ - та γ' -фаз, а також розмірну невідповідність між ними.

Для забезпечення надійної роботи ливарних ЖНС при високих робочих температурах потрібно за допомогою термообробки створити оптимальний структурний стан, який має високу термічну стабільність і сприяє формуванню максимально можливої об'ємної частки γ' -фази з оптимальним розміром її частинок.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Моделювання термодинамічних процесів, що протікають під час кристалізації (охолодження) або нагрівання в структурі сплавів здійснювалося методом CALPHAD [6,7].

Моделювання цих процесів дає змогу провести розрахункове прогнозування та порівняльну оцінку впливу легувальних елементів у карбідах різних типів на їхній розподіл і фазовий склад у досліджуваних сплавах. Розрахунки проводилися за кожним дослідженням складом індивідуально при покроковому введенні конкретного легувального елемента у фіксований склад багатокомпонентної системи.

Залежно від системи легування сплаву результати, отримані моделюванням процесу кристалізації, дають змогу розрахувати температури і кількість типів карбідів, що виділяються, а також їхній хімічний склад.

У системі багатокомпонентного легування (Ni-11,5Cr-5Co-3,6Al-4,5Ti-7W-0,8Mo-0,06C) діапазон варіювання елементами було обрано з міркувань максимальної та мінімальної кількості елемента, що вводять у ЖНС. Таким чином, для дослідження були обрані карбідоутворювальні елементи в таких діапазонах легування: вуглець (0,02-0,2)%; гафній (0,1-2,5)%; ніобій (0,1-4)%; титан (1-6)%; тантал (0,5-12)% за масою.

Моделювання процесу кристалізації сплаву здійснювалося від температури рідкого стану (1600°C) до кімнатної температури (20°C) з температурним кроком 10°C по всьому діапазону, що дало змогу визначити температурну послідовність виділення фаз у процесі кристалізації.

Прогнозувальні розрахунки проводилися за вихідним хімічним складом сплаву з визначенням найімовірнішого виділення кількості й типу карбідів у структурі, а також їхнього хімічного складу після моделювання процесу кристалізації.

Експериментальний сплав було отримано на високоградієнтній установці для спрямованої (моно) кристалізації УВНК-8П у спеціальних керамічних

блоках, з попередньо встановленими всередину стартовими кристалами, згідно з серійною технологією. Необхідна швидкість охолодження забезпечувалася шляхом занурення залитих форм у рідкометалевий кристалізатор (розплав алюмінію) зі швидкістю 10 мм/хв. Для отримання заданої кристалографічної орієнтації (КГО) застосовували стартові кристали (затравки зі сплаву бінарної системи Ni-W), що мали відхилення від основного кристалографічного напрямку [001] на кут не більше, ніж $\alpha \leq 5^\circ$. Зростання монокристала в зразку забезпечувалося за рахунок підплавлення зовнішньої поверхні затравки металом, який заливався. Перед заливанням розплав витримували в тиглі за температури перегріву металу 1620°C протягом 8 ... 10 хвилин. Заливка зразків проводилася за таких параметрів: температура заливки 1580°C; температура нижнього нагрівача 1610°C; температура верхнього нагрівача 1580°C. За основу було взято сплав такої композиції Ni-11,5Cr-5Co-3,6Al-4,5Ti-7W-0,8Mo-0,06C, у якому змінювали значення танталу від 0 до 5%.

Експериментально склад карбідів визначали на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И з системою енергодисперсійного рентгеноспектрального мікроаналізу. Цим методом вивчали морфологію і хімічний склад карбідів, що виділилися в структурі сплаву. Переведення значень якісного в кількісний аналіз здійснювали автоматично за програмою приладу. Відносна похибка методу становить $\pm 0,1\%$ (за масою). Результати розрахунків типу карбідів і їхнього хімічного складу порівнювали з експериментальними даними, отриманими за допомогою електронної мікроскопії.

Отримані значення обробляли в програмному комплексі Microsoft Office у пакеті EXCEL. Отримані залежності мають досить високі коефіцієнти детермінації $R^2 \geq 0,9$ і можуть використовуватися для прогнозуючих розрахунків зазначених характеристик з відносною похибкою $\pm 3,1\%$.

2.1 Схема та устрій растрового електронного мікроскопа

Растрова електронна мікроскопія використовується для вивчення об'єкта за допомогою тонкого сфокусованого електронного пучка, який рухається по поверхні зразка в растрі. Під час взаємодії електронного пучка з поверхнею зразка виникають вторинні електрони, відбиті електрони, рентгенівське випромінювання, оже-електрони і фотони різних енергій, які виникають у визначених областях внутрішнього генерації зразка. Ці дані можуть бути використані для вимірювання різних характеристик зразка, таких як його топографія поверхні, хімічний склад, електрофізичні властивості та інші.

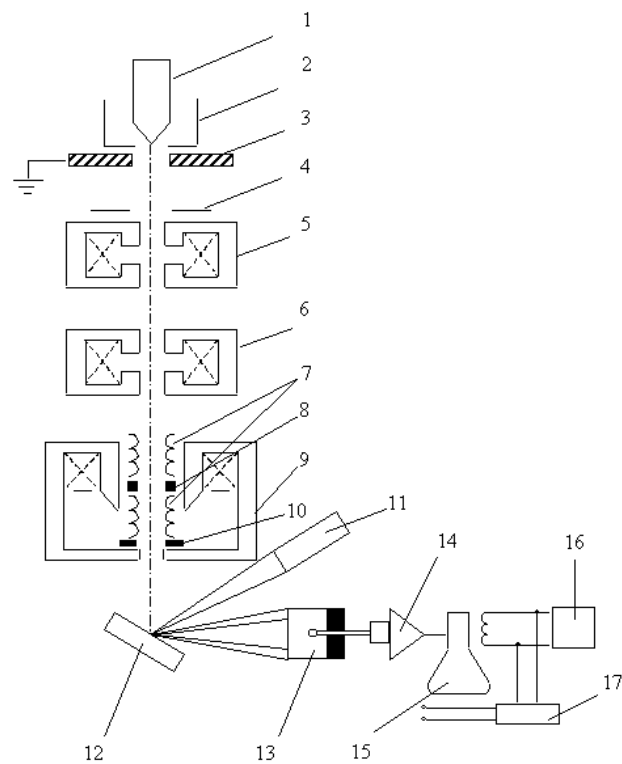
Однією з основних переваг растрових електронних мікроскопів є їх висока роздільна здатність при дослідженні масивних об'єктів, яка може досягати 1,0 нм (10 Å). Ще однією важливою характеристикою зображень, отриманих в растровому електронному мікроскопі, є їх об'ємність, яка визначається великою глибиною різкості пристрою.

Зручність використання растрового електронного мікроскопа в мікро- та нанотехнологіях пояснюється його відносною простотою підготовки зразка і оперативністю дослідження. Це дозволяє використовувати його для міжопераційного контролю технологічних параметрів без значних втрат часу. Зображення в растровому мікроскопі формується у вигляді телевізійного сигналу, що спрощує його інтеграцію з комп'ютером та подальшу обробку результатів досліджень.

Розвиток мікротехнологій та настання ери нанотехнологій, де розміри елементів значно менше довжини хвилі видимого світла, призводить до того, що растрова електронна мікроскопія стає практично єдиною неруйнуючою методикою візуального контролю при виробництві продукції в сферах твердотільної електроніки та мікромеханіки.



Рисунок 2.2 – Растровий електронний мікроскоп



1-3 електронна гармата, емітує електрони; 4-10 електроннооптична система, яка формує електронний зонд і забезпечує його сканування на поверхні зразка 12; 11-17 система, яка формує зображення

Рисунок 2.3 – Схема растрового електронного мікроскопа

У складі растрового електронного мікроскопа визначаються наступні компоненти:

- джерело електронів (електронна гармата),
- оптична система, що забезпечує фокусування променя та його розгортку в растр,
- стіл для об'єктів, що дозволяє позиціонувати зразок в трьох площинах,
- набір детекторів, які реєструють випромінювання, індуковане електронним променем.

Також в системі входить обладнання для обробки відеосигналу та його відображення на екрані електронно-променевої труби (ЕПТ). Крім того, до складу будь-якого електронного мікроскопа входить вакуумна система, що підтримує робочий вакуум на рівні приблизно $10^{-5} - 10^{-8}$ мм ртутного стовпа. Схема мікроскопа подана на рисунку 2.3 [8].

З ВПЛИВ ТАНТАЛУ НА СКЛАД ПЕРВИННИХ КАРБІДІВ У СИСТЕМІ Ni-11.5Cr-5Co-3.6Al-4.5Ti-7W-0.8Mo-0.06C

Найважливішим кроком у вдосконаленні структури жароміцних сплавів було отримання матеріалів взагалі без будь-яких меж зерен, тобто монокристалів. Для цього знадобилася не тільки модернізація технології спрямованої кристалізації з метою виростити монокристали із заданою орієнтацією, а й розробка спеціальних складів жароміцних сплавів, а також режимів їх термічної обробки [9-13]. Оскільки в монокристалах відсутні межі зерен, то немає необхідності вводити в сплав елементи, що зміцнюють їх. Ця обставина істотно спростила систему легування жароміцних сплавів для вирощування монокристалів. Крім того, використовуючи анізотропію фізико-механічних властивостей, можна вибрати таку раціональну орієнтацію монокристала (осьову або азимутальну) відносно напрямку дії головних напружень, яка забезпечила б найкращий комплекс механічних властивостей і максимальний ресурс роботи виробу [14-19].

Роль карбідів дуже складна в жароміцних нікелевих сплавах (ЖНС). Вони впливають на механічні властивості залежно від їхньої морфології та розподілу. Для монокристалічних сплавів характерною є присутність первинних карбідів сферичної, блокової або шрифтової морфології [20-24]. Основними методами дослідження таких тонких структур є рентгенівська спектроскопія, яка повною мірою дає можливість визначити основні характеристики [25-28].

Метою цієї роботи є вивчення специфіки впливу легувальних елементів на розподіл карбідів різних типів у структурі, їхню топологію та морфологію, а також їхній склад для багатокомпонентної системи типу Ni-11,5Cr-5Co-3,6Al-4,5Ti-7W-0,8Mo-0,06C за допомогою розрахункового методу прогнозування CALPHAD (пасивний експеримент) у порівнянні з даними, одержаними методом растрової електронної мікроскопії (активний експеримент).

Вивчення виділення фаз у процесі кристалізації дослідженого сплаву в температурному діапазоні (1600-20°C) показало, що найбільш імовірним є

виділення основних фаз у такому порядку: γ -твердий розчин; первинні карбіди; евтектика $\gamma+\gamma'$; інтерметалід типу γ' на основі (Ni_3Al). Відомо [39-32], що первинні карбіди мають високу температуру розпаду і добре зміцнюють сплави за підвищених температур експлуатації. Основними елементами, що входять до їхнього складу є титан, тантал, гафній та ніобій, у зв'язку з цим, надалі проводиться моделювання та експериментальне дослідження розподілу зазначених елементів.

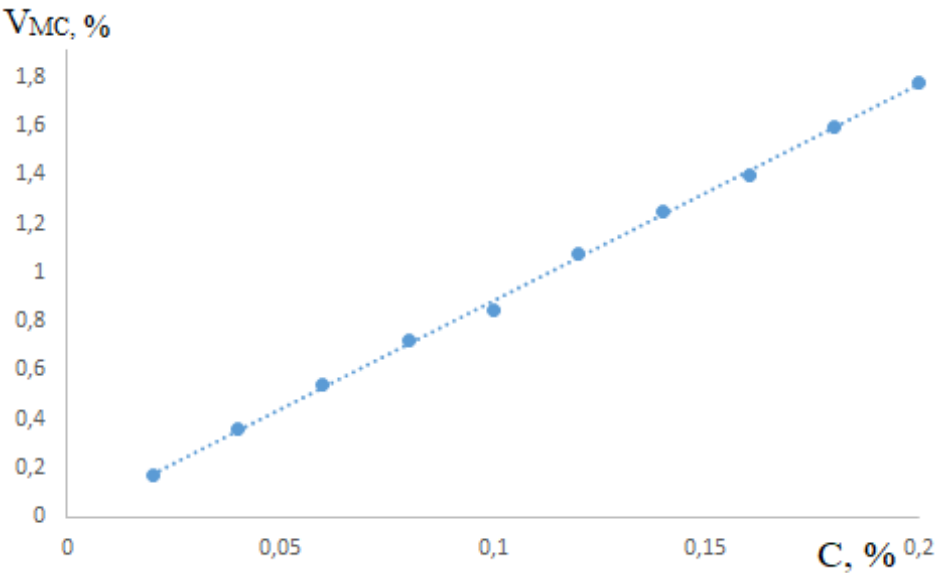
Встановлено, що залежності розчинення (виділення) карбідів MC та кількості карбідів MC від вмісту вуглецю мають складний характер та оптимально описуються залежностями (табл. 3.1), що наведені на рис. 3.1.

Таблиця 3.1 - Залежності температури розчинення (виділення) карбідів і вміст легуючих елементів у первинних карбідах від вмісту легувальних елементів у сплаві.

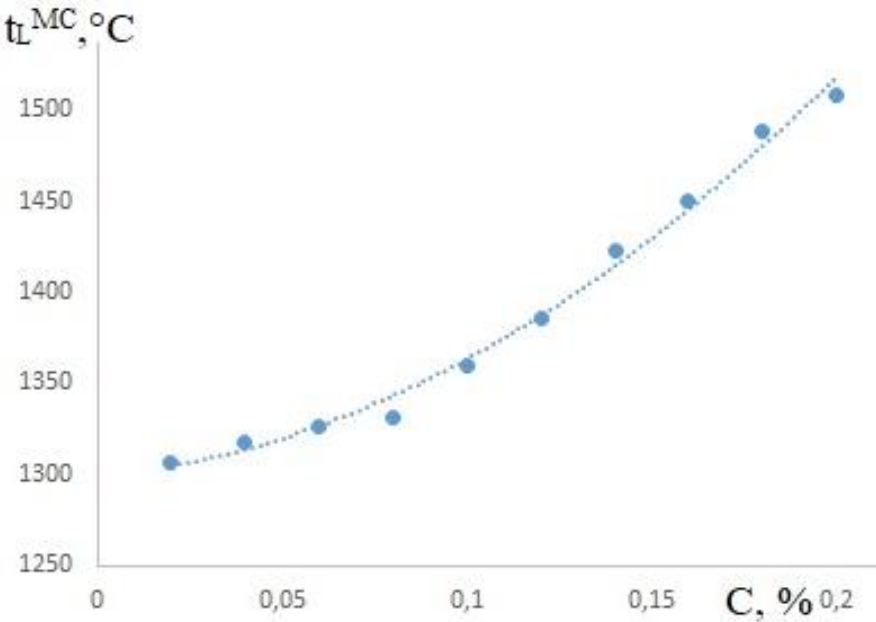
Легувальний елемент	Температури розчинення (виділення) карбідів, °C	Кількість карбідів (V) та вміст елементів в карбіді (C), мас %
C	$t_L^{MC}, ^\circ\text{C} = 1818,18(C)^2 - 188,18(C) + 1299$	$V_{MC} = 8,8758(C) - 0,0013$
Ta	$t_L^{MC}, ^\circ\text{C} = 1,672 \cdot (C_{Ta})^2 - 15,173 (C_{Ta}) + 1349,8$	$C_{Ta} = -0,7427(C_{Ta} \text{ у сплаві})^2 + 15,668(C_{Ta} \text{ у сплаві}) + 0,189;$ $C_{Ti} = 57,135e^{-0,182 (C_{Ta} \text{ у сплаві})};$ $C_W = 32,103 e^{-0,35 (C_{Ta} \text{ у сплаві})}.$
Ti	$t_L^{MC}, ^\circ\text{C} = 0,7677(C_{Ti})^3 - 6,7459 (C_{Ti})^2 + 10,757 (C_{Ti}) + 1342$	$C_{Ta} = 1,3478(C_{Ti} \text{ у сплаві})^2 - 14,527(C_{Ti} \text{ у сплаві}) + 89,293;$ $C_{Ti} = -0,6788(C_{Ti} \text{ у сплаві})^2 + 8,8497(C_{Ti} \text{ у сплаві}) + 2,6473;$ $C_W = -0,4277(C_{Ti} \text{ у сплаві})^2 + 3,4424(C_{Ti} \text{ у сплаві}) + 1,7964$
Hf	$t_L^{MC}, ^\circ\text{C} = -6,6371 (C_{Hf}) + 1325,2$	$C_{Hf} = 24,526 \ln (C_{Hf} \text{ у сплаві}) + 68,343;$ $C_{Ta} = -14,96 \ln (C_{Hf} \text{ у сплаві}) + 19,696;$ $C_{Ti} = 1,8744 (C_{Hf} \text{ у сплаві})^{-1,111}$

Кінець таблиці 3.1

Nb	$t_L^{MC}, ^\circ C = 5,8807 \cdot (C_{Nb})^2 - 23,849 (C_{Nb}) + 1329,7$	$C_{Ta} = -0,8811(C_{Nb} \text{ у сплаві})^2 - 0,6181(C_{Nb} \text{ в сплаве}) + 52,036;$ $C_{Ti} = 0,7664(C_{Nb} \text{ у сплаві})^2 - 7,5143 (C_{Nb} \text{ у сплаві}) + 28,911;$ $C_{Nb} = -0,5051(C_{Nb} \text{ у сплаві})^2 + 12,876 (C_{Nb} \text{ у сплаві}) - 0,7022$
----	---	---



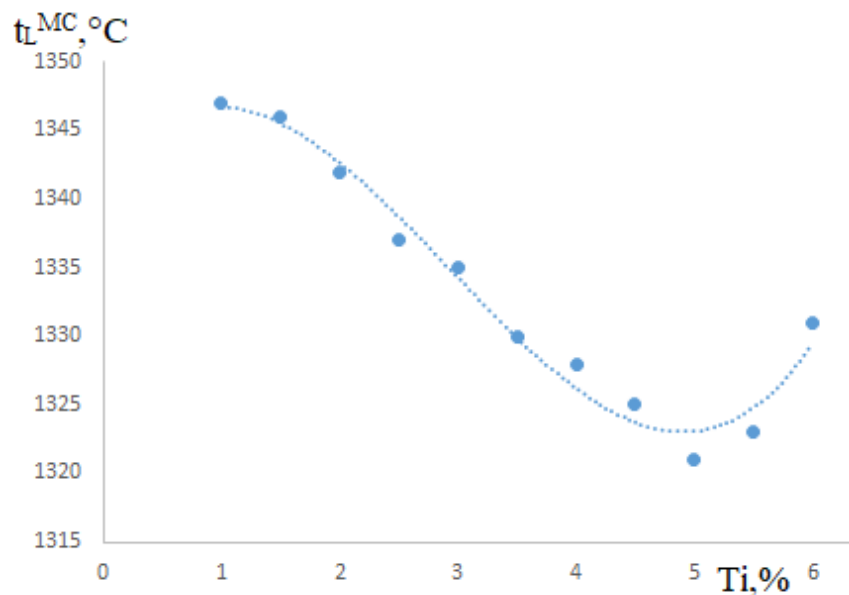
а



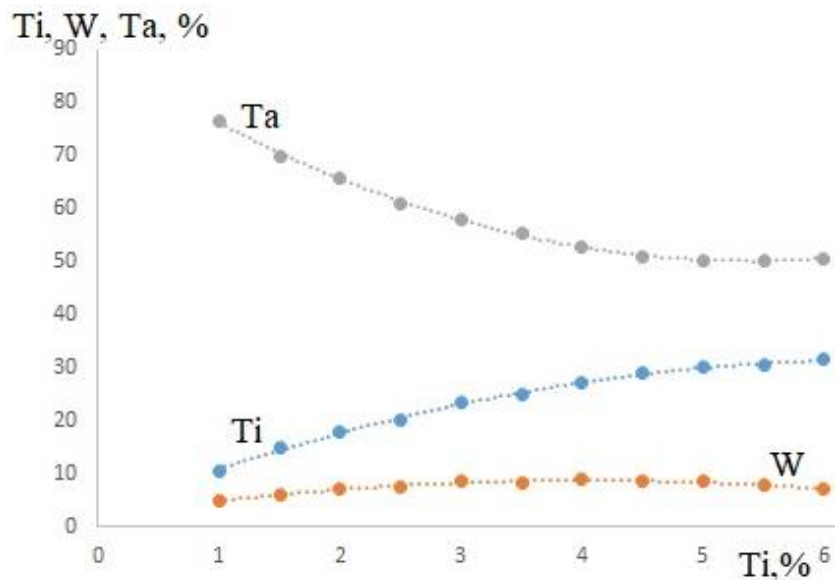
б

Рисунок 3.1 – Температурні залежності розчинення (виділення) первинних карбідів (а); кількість первинних карбідів МС (б) від вмісту вуглецю в складі сплаву.

На кривій залежності температури карбідного ліквідусу (рис. 3.2, а) спостерігається екстремум за 5% Ti у сплаві, воно пов'язане з виділенням σ -фази у сплаві, що знижує експлуатаційні властивості. Збільшенням вмісту титану в сплаві призводить до збільшення його концентрації в карбіді MC до 31% (рис. 3.2, б) (табл. 3.1). При цьому, вміст танталу в карбіді зменшується до рівня 50%.



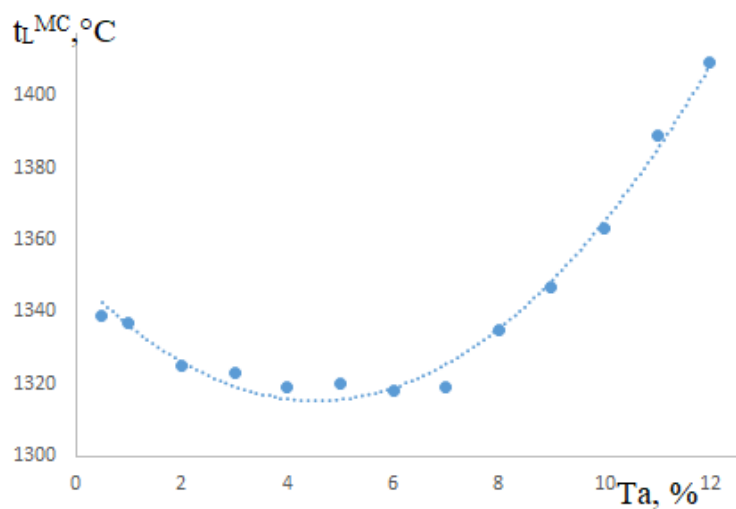
а



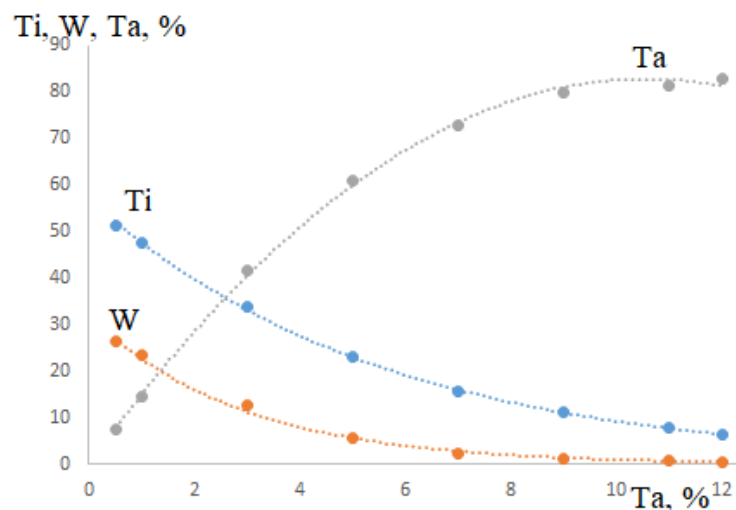
б

Рисунок 3.2 – Температурна залежність розчинення карбідів типу MC (а); кількість танталу, титану і вольфраму в MC карбіді (б) від вмісту титану в складі сплаву

Збільшення вмісту танталу в сплаві призводить до появи екстремуму температур карбідного ліквідусу при вмісті 7% Та в сплаві, що пов'язано з утворенням σ -фази в сплаві (рис. 3.3, а). При введенні в сплав танталу спостерігається зміна основи карбідів МС з титану на тантал (рис. 3.3, б). Перехід карбіду МС у карбід на основі танталу призводить до збільшення міжатомних зв'язків, що сприяє збільшенню температури розчинення (виділення) карбіду (рис. 3.3, а). При цьому спостерігається зниження за зазначеними залежностями (табл. 3.1) вмісту титану та вольфраму.



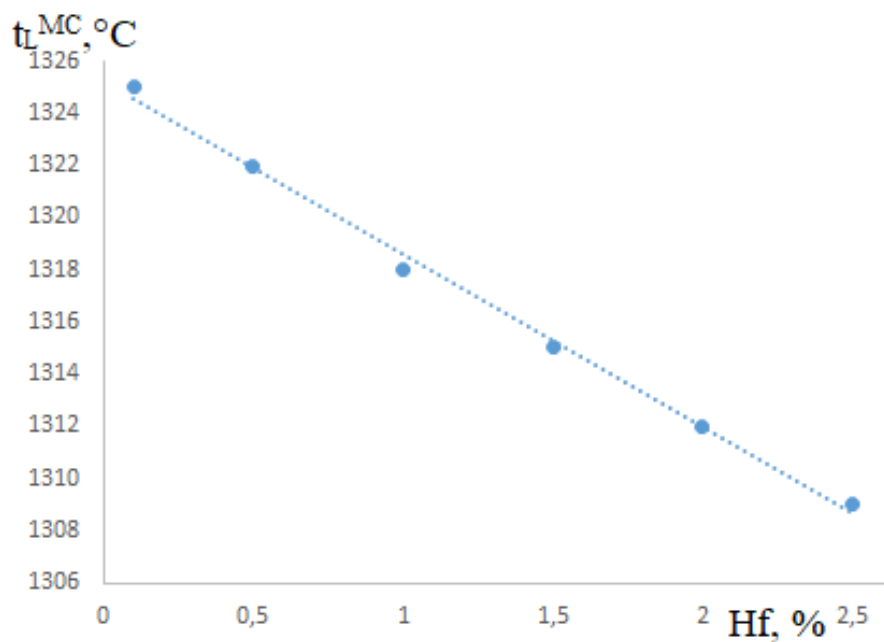
а



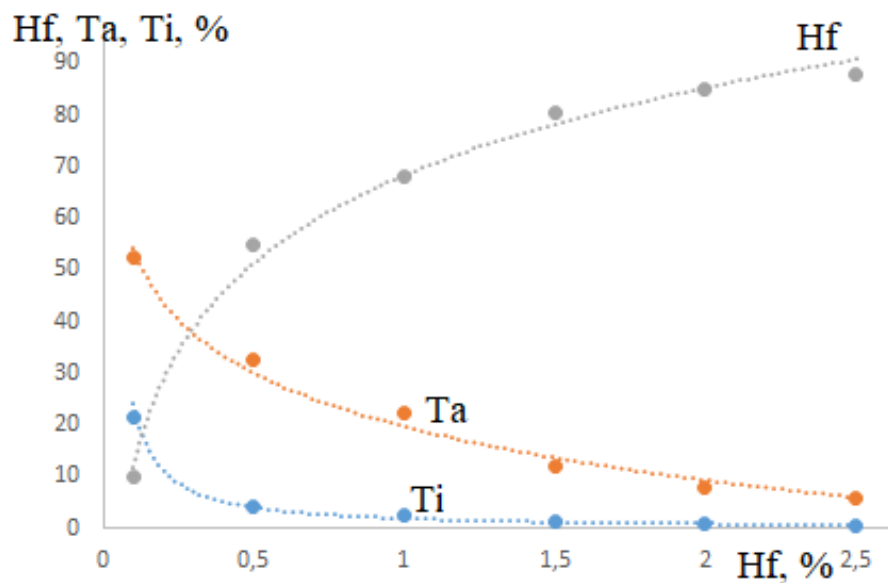
б

Рисунок 3.3 – Температурна залежність розчинення карбідів типу МС (а) та кількість танталу, титану і вольфраму в МС карбіді (б) від вмісту танталу в складі сплаву

Встановлено, що гафній знижує температуру розчинення (виділення) первинних карбідів (рис. 3.4, а), що описується лінійною залежністю (табл. 3.1).



а



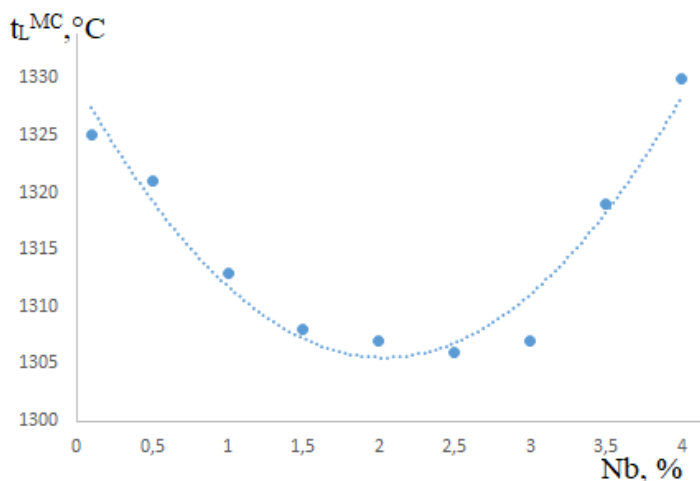
б

Рисунок 3.4 – Вплив танталу на склад первинних карбідів у системі Ni-11,5Cr-5Co-3,6Al-4,5Ti-7W-0,8Mo-0,06C

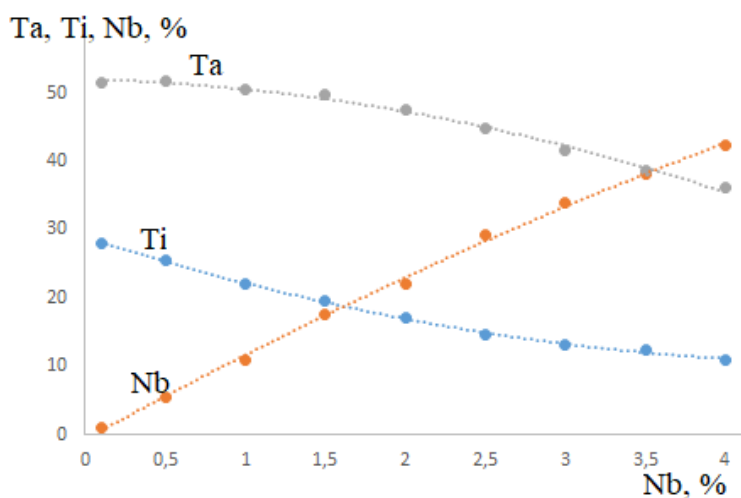
За вмісту гафнію понад 0,1% змінюється морфологія карбіду. Карбід на основі титану перетворюється на карбід на основі гафнію, в якому вміст гафнію досягає 54,8 %, і його концентрація зростає до 87 % за 2,5 % Hf. Відповідно титан

і тантал знижують концентрацію в первинному карбіді з 21% до 0,5% і з 52% до 5,7%, відповідно.

Ніобій неоднозначно впливає на температури утворення карбідів (рис. 3.5), знижуючи до концентрації 2% і підвищуючи за більшого вмісту. Мінімум на залежності карбідного ліквідусу зникає при збільшенні ніобію в карбіді до 22% і переважанні над титаном у МС (рис. 3.5,б). Зі збільшенням концентрації ніобію понад 3,5% утворюється карбід в основі якого переважає ніобій, це призводить до змін сил міжатомного зв'язку і зростання температури розчинення (виділення) карбіду.



а



б

Рисунок 3.5 – Температурна залежність розчинення карбідів типу МС (а) та кількість танталу, титану і ніобію в МС карбіді (б) від вмісту ніобію у складі сплаву

Результати розрахунку фазового складу, отримані згідно із залежностями (табл. 1.1), надалі порівнювали з експериментальними даними, отриманими за допомогою електронної мікроскопії в режимі мікрозондування на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И. На рисунку 3.6 наведено типову морфологію карбідів, залежно від кількості танталу в сплавi. Виявлено, що карбіди виділяються з різною морфологією типовою для первинних виділень у вигляді грубої кубічної (блокової) та ієрогліфів (скриптів). Розмір первинних карбідів практично не залежить від кількості танталу в сплавi (рис. 3.6).

Хімічний склад карбідів визначали експериментально методом рентгеноспектрального мікроаналізу, за допомогою якого фіксували інтенсивність рентгенівського випромінювання залежно від енергії кЕв. Експериментально встановлено, що до складу карбідів входять титан, тантал, вольфрам, молібден, кобальт і хром у таких співвідношеннях до розрахункових значень (табл. 3.2). Похибки визначення елементів даним методом не перевищували $\pm 1\%$ за масою.

Таблиця 3.2 — Зміна складів первинних карбідів залежно від вмісту танталу в сплавi системи Ni-11,5Cr-5Co-3,6Al-4,5Ti-7W-0,8Mo-0,06C

Метод отримання результатів	Вміст елементу, мас %						
	Ti	Ta	Cr	Co	Mo	W	C
0%Ta							
Розрахунковий	55.66	-	0.6	-	0.14	28.69	14.92
Експериментальний	57.7	-	0.28	0.3	3.5	23.3	14.92
1%Ta							
Розрахунковий	48.85	13.49	0.54	-	0.12	23.16	13.83
Експериментальний	45.01	21.46	0.23	0.25	0.95	18.3	13.8
2%Ta							
Розрахунковий	42.02	27.09	0.45	-	0.13	17.63	12.68
Експериментальний	46.59	21.42	0.27	0.15	0.75	17.2	13.62
3%Ta							
Розрахунковий	35.8	39.14	0.36	-	0.1	12.89	11.68
Експериментальний	33.91	45.05	0.34	0.16	0.6	8.26	11.68
4%Ta							
Розрахунковий	28.6	51.5	0.27	-	0.08	8.99	10.53
Експериментальний	23.61	54.28	1.15	0.36	1.08	8.99	10.53

Кінець таблиці 3.2

5%Ta							
Розрахунковий	23.83	60.22	0.2	-	0.07	5.84	9.75
Експериментальний	19.01	63.68	1.05	0.25	0.4	5.86	9.75

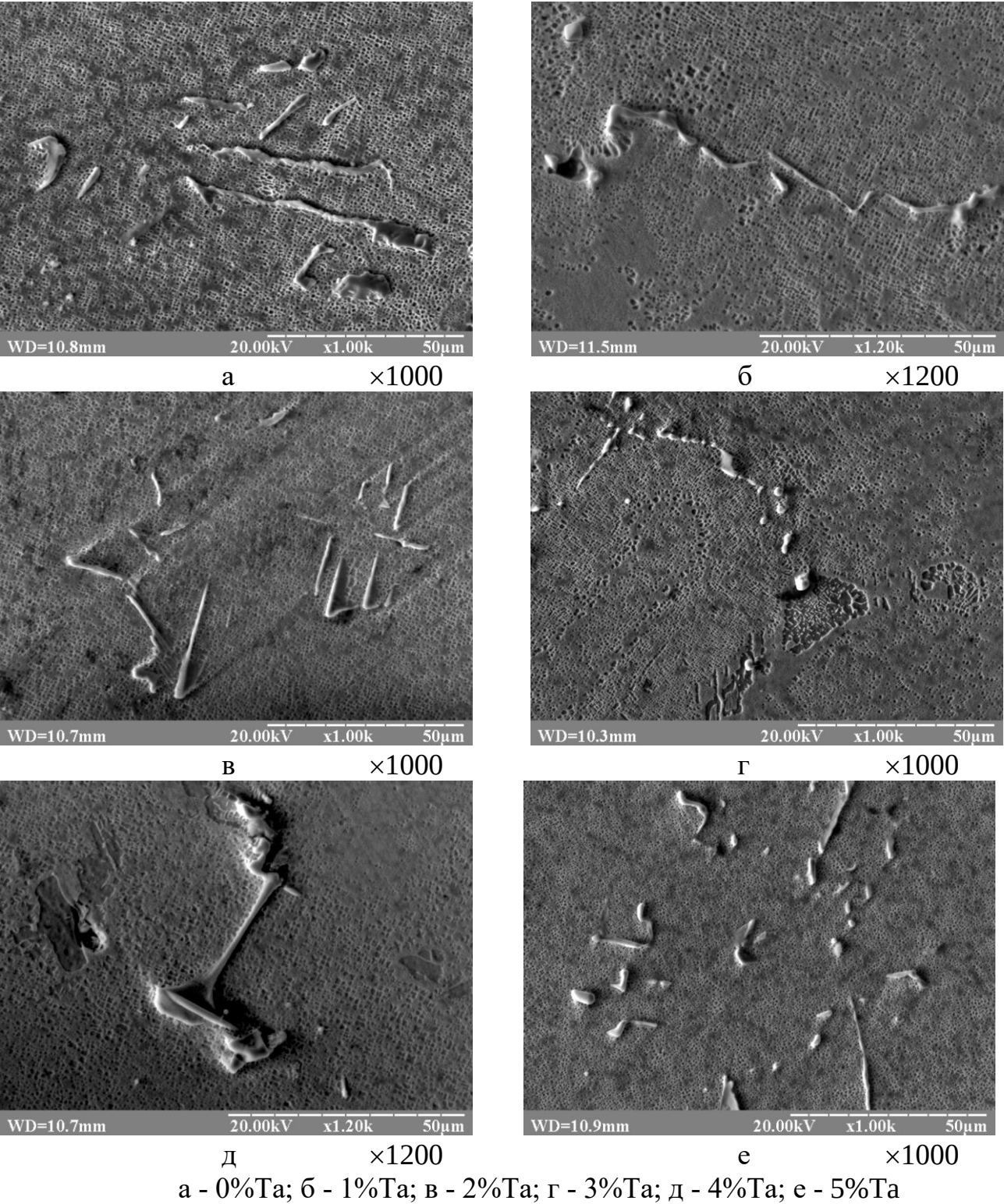


Рисунок 3.6 – Типова морфологія карбідів у структурі сплаву системи Ni-11,5Cr-5Co-3,6Al-4,5Ti-7W-0,8Mo-0,06C

У таблиці 3.2 показано, що розрахункові та експериментальні дані добре узгоджуються між собою практично за всіма елементами. Встановлено, що при вмісті в сплаві 4% Та, спостерігається зміна основи карбіду з титану на тантал (концентрація танталу в карбіді перевищує 50%). Спостерігається зниження кількості вольфраму в карбіді до менш ніж 10% і зростання хрому та молібдену до 1%, що пояснюється як взаємозамінність цих елементів у кристалічних ґратках. Збільшення танталу до 5% у сплаві збільшує його концентрацію в карбіді понад 60% і знижує титан нижче 20%. Такий розподіл елементів у карбідах можна пов'язати з властивостями матеріалу, зокрема в роботі [33] вказується, що оптимальні властивості сплав отримує при введенні 4% Та. Це пояснюється не тільки зміною складу карбіду, а й протіканням інших структурних перетворень у сплаві.

Таким чином, розрахункові дані, отримані CALPHAD-методом за визначенням типу і хімічного складу карбідів, показали хорошу збіжність і узгодженість з експериментальними даними, отриманими методом електронної мікроскопії.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У рамках даної магістерської роботи, яка присвячена оптимізації хімічного складу сплаву ЗМП-3У з введенням танталу, особлива увага приділяється не тільки технічним і технологічним аспектам дослідження, але й питанням охорони праці. Важливо забезпечити безпечні умови праці протягом усього циклу виробництва сплаву, починаючи від вибору сировини і закінчуючи виготовленням кінцевого продукту. Врахування ризиків для здоров'я, забезпечення безпеки процесів обробки та мінімізація впливу виробництва на навколишнє середовище є важливими аспектами, що сприяють створенню оптимальних умов праці та підвищенню ефективності виробничого процесу.

З огляду на високу активність танталу та його можливий вплив на здоров'я персоналу, у цьому розділі будуть розглянуті заходи щодо забезпечення безпечного введення цього елемента в сплав, контролю якості повітря в робочій зоні, захисту працівників від потенційно небезпечних впливів, а також зниження впливу технологічного процесу на довкілля. У цьому контексті також будуть розглянуті нормативно-правові акти, стандарти безпеки та методи оцінки ризиків, які повинні регламентувати виробничі процеси відповідно до сучасних вимог охорони праці.

4.1 Аналіз потенційних небезпек

Небезпеки які пов'язані з порушеннями роботодавцями вимог

НПАОП 0.00 – 7.11 – 12 «Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників», а саме [36]:

а) небезпеки які пов'язані, з порушенням вимог ергономіки стосовно, організації робочих місць дослідників в приміщенні дослідницької лабораторії, зокрема невідповідності розмірів робочих зон, а також максимально можливої

кількості осіб, що можуть там перебувати, нераціонального розташування дослідницького приладдя та офісного обладнання;

б) можливість ураження електричним струмом, при виконанні службових обов'язків внаслідок порушення правил з електробезпеки, несправності енергоспоживаючого обладнання, відсутності групових або індивідуальних засобів захисту, що може призвести до електричних травм або летального наслідку;

в) небезпеки які пов'язані із обробкою результатів досліджень із використанням ПК, зокрема ушкодження кістково-м'язового апарату внаслідок довготривалої роботи в однотипній позі, що може призвести до зниження працездатності та розвитку професійних захворювань;

г) можливість отримання механічних травм при підготовці зразків або дослідницьких виробів до термічної обробки що може бути пов'язано з порушеннями правил охорони праці під час роботи з абразивним інструментом зокрема: використання абразивного інструменту який не пройшов випробування, порушення правил експлуатації, що може призвести до тяжких травм;

д) 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;

е) незадовільні параметри мікроклімату які повинні відповідати фізіологічним потребам організму працюючих, із врахуванням енергетичних витрат на виконувану роботу внаслідок неефективної роботи систем опалення та повітрообміну, що може призвести до загальних захворювань;

є) невідповідність вимогам освітлення робочих зон дослідницької лабораторії внаслідок виходу з ладу освітлювальних приладів або хибного розрахунку їх кількості та потужності, що може призвести до погіршення зору;

ж) можливість загоряння внаслідок порушень правил пожежної безпеки, а саме хибне визначення видів та кількості первинних засобів пожежогасіння

відносно категорій приміщень с пожежної безпеки, що може привести до пожежі;

з) невиконання інженерно-технічні заходи цивільної оборони, що забезпечують тривалу роботу цеху у військовий час [37].

4.2 Заходи забезпечення безпеки

а) конструкція робочого місця дослідника має відповідати сучасним вимогам ергономіки і забезпечувати оптимальне розміщення на робочій поверхні пристроїв і документів, які необхідні для виконання досліджень. Висота робочої поверхні робочого столу ВДТ має регулюватися в межах 680...800мм, а ширина і глибина –забезпечувати можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: 600...1400 мм, глибина – 800...1000мм).Робочий стіл повинен мати простір для ніг заввишки не менше ніж 600 мм, завширшки не менше ніж 500 мм, завглибшки (на рівні колін) не менше ніж 450 мм, на рівні простягнутої ноги - ніж 650 мм.

б) до основних заходів захисту людини від ураження електричним струмом, відносять:

- забезпечення неможливості випадкового дотику до струмоведучих частин, що перебувають під напругою;
- електричний розподіл мережі;
- усунення небезпеки ураження з появою напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електроустаткування, що досягається захисним заземленням, зануленням і захисним відключенням;
- використання малих напруг;
- захист від випадкового дотику до струмоведучих частин кожухами, огороженням або подвійною ізоляцією;
- захист від небезпек можливих при переході напруги з вищої сторони на нижчу;

- контроль і профілактика пошкоджень ізоляції;
- компенсація ємнісної складової струму замикання на землю;
- застосування спеціальних електрозахисних засобів, блокувань, сигналізації та запобіжних пристроїв;
- організація безпечної експлуатації електроустановок.

Використання захисного заземлення:

- робоче заземлення – це заземлення струмоведучих частин електроустановки, яке виконане для забезпечення роботи електроустановки (не з метою електробезпечності), наприклад, робоче заземлення нейтралі трансформатора;
- заземлення блискавкозахисту – це заземлення блискавкоприймача, з метою захисту об'єкта від прямого удару блискавки;
- захисне заземлення – це заземлення, яке виконане з метою електробезпечності, тобто з'єднання відкритих провідних частин (ВПЧ) із заземлювачем для захисту від непрямого дотику та від наведеного напруги.

в) об'єкти відмінності мають як негативний (темні об'єкти на світлому фоні) так і позитивний (світлі об'єкти на темному фоні) контраст. Тому відбувається постійна переадаптація від яскравих об'єктів з позитивним контрастом на темні з негативним контрастом. За восьмигодинний робочий день за монітором користувач кидає приблизно 30000 поглядів на екран, око працює з перевантаженням і не може достатньо адаптуватися до цієї ситуації. Такі особливості призводять до напруження м'язового та світло-сприймаючого апарату очей, що є однією з причин виникнення астенопічних явищ (різь в очах, біль в очах, ломить у надбрівній ділянці, розпливчастість контурів, нечіткість зображення). Постійний погляд на матове скло екрана монітора зменшує частоту кліпання очей, що призводить до висихання та викривлення роговиці ока, погіршує зір (синдром Сікка). Робота користувача за пульсуючим екраном монітора, що не відповідає нормативним вимогам щодо обмеження пульсації (блимання), викликає дискомфорт і втому (загальну і зорову). Робота з дзеркальною відбиваючою і неплоскою зовнішньою поверхнею екрана монітора, на якій з'являються численні відбиті відблиски, призводить до виникнення у

користувача астенотичних явищ та функціональних змін ока. Неправильний розподіл яскравості в полі зору, тобто поверхні периферії (стеля, стіни, меблі і т.п.) висвітлені краще ніж центр поля зору, призводить до порушення основних зорових функцій ока. Засліплююча дія світильників у приміщенні, на робочому місці з ПК викликає не тільки астенотичні явища, але й функціональні порушення очей користувача.

Кольоровий шрифт збільшує навантаження на зір, оскільки складові кольорів мають різні довжини хвиль і видимі на різній віддалі. Око потребує точнішої адаптації, ніж при чорно-білому зображенні.

г) для уникнення механічних травм при виготовленні зразків необхідно працювати на справному станку, своєчасно проводити заміну деталей, термін експлуатації яких вже закінчився та використовувати захисні окуляри та рукавиці; для виключення травмування органів зору передбачено застосування захисних окулярів, які служать для захисту очей від ушкоджень частками твердих тіл, що летять попереду, знизу і збоку. Ці окуляри оснащені фігурними боковинами, що відкидаються. Застосовувати прозорий екран для захисту очей робітника від поранень частками, що відлітають.

д) об'єктиви-ахромати мають корекцію тільки для середніх кольорів видимої частини спектра, з цієї причини при білому світлі вони дають зображення з не чіткими контурами, пофарбованими головним чином по краю поля зору. Щоб погасити всі кольори, в яких об'єкт не має корекції, застосовують жовто-зелений світлофільтр. З огляду на те, що об'єктиви-апохромати мають корекцію майже для всіх кольорів видимої частини спектра, жовто-зелені світлофільтри для них зайві.

Для електронного мікроскопа «Tesla BS 540» 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 слід спочатку відключити високу напругу, піч диф.насоса і вимкнути головний автомат на стінці. При відмові водопостачання постаратися обмотати мокрими ганчірками піч диф. 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 прориві повітря в колону мікроскопа, як правило, спрацьовує автоматика, відсікаючи 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 [38-40].

4.3 Заходи з виробничої санітарії

а) параметри мікроклімату і чистоти повітря визначають в залежності від категорії фізичних робіт, для певних робочих місць (постійних і непостійних). Постійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться понад 50% робочого часу або більше 2-х годин безперервно. Якщо при цьому робота здійснюється в різних пунктах робочої зони, то постійним робочим місцем вважається вся ця зона. Непостійне робоче місце – це місце, на якому працюючий знаходиться менше 50% робочого часу або менше 2-х годин безперервно.

Необхідно враховувати, що:

- для постійних робочих місць визначаються оптимальні та допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року;
- для непостійних робочих місць визначаються тільки допустимі параметри мікроклімату в холодний та теплий період року.
- в холодний період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 18-20 °С, допустима 17-23 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 75 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,2 м/с, допустима не більше 0,3 м/с;

– в холодний період року на непостійних робочих місцях допустима температура: 15-24 °С; допустима відносна вологість: 75 %; допустима швидкість переміщення повітря: не більше 0,3 м/с;

– в теплий період року на постійних робочих місцях: температура оптимальна 21-23 °С, допустима 18-27 °С; відносна вологість: оптимальна 40-60 %, допустима 40-60 %; швидкість переміщення повітря: оптимальна не більше 0,3 м/с, допустима не більше 0,2-0,4 м/с;

– в теплий період року на непостійних робочих місцях допустима температура 17-29 °С; допустима відносна вологість: 65 % 45 при температурі 26 °С; допустима швидкість переміщення повітря: 0,2-0,4 м/с.

б) Виробниче освітлення організується і нормується залежно від:

– розряду зорової роботи, тобто її характеристики (найменшого розміру об'єкта який різниться, світлості фону, контрасту об'єкта з фоном);

– виду і системи освітлення.

Також необхідно врахувати, що передбачається оптимальне (необхідне) освітлення виробничих приміщень і робочих місць:

– природне (бокове або верхнє);

– штучне: робоче, аварійне, евакуаційне, охоронне, чергове [41-43].

4.4 Заходи з пожежної безпеки

Категорію виробництва за пожежною небезпекою (А, Б, В, Г, Д) споруд (приміщень) цеху (ділянки, підстанції) визначають на основі аналізу речовин і матеріалів, що використовуються у виробництві, відповідно до категорії виробництва з пожежної безпеки, визначають ступінь вогнестійкості приміщення цеху (дільниці, підстанції).

Охоронно-пожежна сигналізація неадресного типу влаштована на неадресних (порогових) датчиках. Обладнання розраховане на цілодобову

роботу і відповідає необхідним вимогам пожежної безпеки. До складу системи ОПС входить панель, блок управління і індикації та програмне забезпечення.

Панель системи ОПС призначена для прийому сповіщень від шлейфів сигналізації з пожежними та охоронними сповіщувачами або інших приладів, перетворення сигналів, видачі сповіщень про пожежу і/або проникненні з включенням оповіщення та інших виконавчих пристроїв і передачі сповіщень на пульт централізованого спостереження.

Система ОПС на неадресних (порогових) сповіщувачах дозволяє:

- контролювати стан пожежних, охоронних шлейфів сигналізації;
- видавати повідомлення про пожежу та/або проникненні на блоці індикації;
- включати систему оповіщення та інші виконавчі пристрої комплексної системи безпеки;
- передавати повідомлення на Пульт централізованого спостереження, якщо він передбачений проектом.

Разом із системою ОПС можуть працювати такі види охоронних датчиків, як:

- інфрачервоні, що реагують на рух;
- магнітоконтатні, що реагують на розмикання дверей;
- акустичні, що реагують на розбивання скла.

Порогова охоронно-пожежна сигналізація – може працювати як автономно, так і в складі комплексної системи безпеки спільно з відеоспостереженням, контролем доступу і системою підвищення ефективності управління. Істотно розширюються можливості по управлінню обладнанням і обробці інформації, що надходить - при наявності модулів «Моніторинг» або «Центральний пост» на моніторі охоронця автоматично видається інформація про пожежу із зазначенням місця його виникнення на графічному плані підприємства. В охоронюваних приміщеннях встановлюються порогові пожежні або охоронні сповіщувачі, які об'єднуються в шлейфи сигналізації [44, 45].

4.5 Заходи безпеки в умовах НС

Підвищення міцності промислових споруд, а також їх стійкості до дії ударної хвилі, по-перше, пов'язано із значними затратами, а по-друге, все ж неповністю гарантують їх збереження в епіцентрі ядерного вибуху. У зв'язку із цим проведення робіт по зміцненню тих чи інших споруд може плануватись і здійснюватися лише в цілях захисту особливо цінного, унікального обладнання або в тих випадках, коли окремі важливі споруди мають значно меншу міцність, ніж інші, і «підтягнувши» їх міцність до середніх по заводу величин, можна без великих затрат підвищити стійкість об'єкту в цілому.

Вибір заходів, які забезпечують підвищення стійкості об'єкту, визначається різними місцевими умовами в кожному конкретному випадку. Найбільш ефективними являються заглиблення, зменшення парусності і висоти споруд. Міцність і жорсткість конструкцій можна підвищити встановленням контрфорсів, підкосів, додаткових рамних конструкцій, розпірок і відтяжок. Стійкість незначних по розмірам споруд підвищується шляхом обсіпки нижньої частини їх стін ґрунтом (піском і т.п.). Цей же спосіб значно підвищує захисні властивості споруд по відношенню до дії радіаційних випромінювань.

Захист обладнання і готової продукції передбачає розміщення деяких видів обладнання і продукції у заглиблення в приміщеннях, а також підготовку індивідуальних захисних пристроїв.

Надійно захистити все обладнання від впливу ударної хвилі практично неможливо, оскільки доводити міцність цехових споруд до захисних властивостей сховищ економічно недоцільно. Задача полягає в тому, щоб звести до мінімуму небезпеку руйнування і пошкодження особливо цінного обладнання, унікальних шліфувальних, токарних, розточних і зубофрезерних станків, пресів і кувальних машин, насосного обладнання, розрахунково-аналітичних машин і т. д.

Для зменшення руйнування обладнання підсилюють його найбільш слабкі деталі та вузли, виготовляють їх з'ємними і створюють запаси для заміни

пошкоджених. Стійкість обладнання від падіння під дією ударної хвилі ядерного вибуху підвищують шляхом надійного закріплення на фундаменті, створення контрфорсів, заглиблень. Запас найбільш нестійких деталей і вузлів для важливого унікального обладнання слід утримувати в спорудах, які забезпечили б їх збереження при дії ударної хвилі.

Підвищення стійкості обладнання може бути досягнуто також шляхом заміни застарілих зразків новими, які найбільш відповідають вимогам до їх стійкості, а також скороченням числа типомodelей станків, що використовуються, що в подальшому значно спростить проведення ремонтних і відновлювальних робіт; заміною горючих і вибухонебезпечних змащувально-охолоджувальних рідин (наприклад, сульфозфрезолу, фрезолу, керосину) емульсіями; впровадженням в процеси термічної обробки с.в.ч. і т. п.

Важливе значення має і раціональне розміщення обладнання. Найбільш цінне і нестійке обладнання і прилади слід розміщувати в найбільш міцних приміщеннях, важкі станки, машини і агрегати повинні розташовуватись на нижніх поверхах споруд. Машини і станки великої цінності рекомендується розміщувати не в основних промислових, а у окремо розташованих спорудах, які мають легкі конструкції і конструкції, які важко горять, руйнування їх не приведе до руйнування цього обладнання.

Особливо велике значення має стійкість і розгалуженість систем енергетичного забезпечення (електроенергія, газо-, паро- і теплопостачання, забезпечення стисненим повітрям).

До числа заходів, які можуть бути рекомендовані для підвищення стійкості роботи систем енергопостачання, відносять: перенос інженерних і енергетичних комунікацій у підземні колектори, розміщення найбільш відповідальних пристроїв (центральні диспетчерські і розподільчі пункти, компресорні і аварійні електричні станції) в захищених спорудах з підвищеною ступеню стійкості до впливу ударної хвилі; кільцювання всіх енергетичних систем; побудова захищених автономних джерел електро- і водопостачання, резервних ємностей і резервуарів; придбання пересувних електростанцій і насосних агрегатів з двигунами внутрішнього згорання; обладнання пристосувань для роботи

підприємств на різних видах палива; кооперування постачання групи підприємств, тобто створення умов і можливостей для використання джерел електро-, газо-, тепло- і водопостачання, кисневих станцій, складів палива одного підприємства для забезпечення потреб іншого.

Стійкість систем електропостачання підвищується базуванням підприємств на декількох енергоджерелах, віддалених один від іншого на таку відстань, щоб виключити можливість руйнування їх одним ядерним вибухом. При живленні підприємства від районної енергосистеми лінії електропередач необхідно підводити не менш ніж із двох напрямків, а приймальні підстанції (ЦРП, РП) розташовують одна від одної на можливо більшій відстані. Доцільні і такі заходи, як забезпечення захисту існуючих і побудова резервних підстанцій, перевід енергопостачання із повітряного на підйомно-кабельне, встановлення автоматичних роз'єднувачів для відімкнення ділянок сітей у випадку перевантаження і короткого замикання. Споруди цивільної оборони забезпечуються автономними джерелами енергопостачання.

Система водопостачання також повинна базуватися на двох і більше незалежних вододжерелах, віддалених один від одного на відповідну відстань. Рекомендується встановлювати додаткові бурові скважини (артезіанські скважини), кільцювати розвідні сіті, захищати гідранти і водорозбірні колонки, впроваджувати автоматичні і напівавтоматичні пристрої, які б відключали б пошкоджені ділянки без порушення роботи іншої частини сіті.

На сітях газопостачання і теплофікації слід передбачити заходи проти втрачання газу (пари, води) у випадку руйнування магістральних ліній і внутрішньої сіті у пошкоджених або зруйнованих спорудах. Це досягається шляхом встановлення на вводах в споруди або на відводах магістральних ліній автоматичних запірних пристроїв, які відмикають лінії при руйнуванні. Встановлюють і задвижки дистанційного управління, які дозволяють відімкнути сіті із одного центра управління.

Сіті зв'язку можна вважати підготовленими з точки зору цивільної оборони, якщо забезпечений захист вузлів зв'язку і розподільчих шаф, а повітряні лінії зв'язку на території підприємства переведені на підземно-

кабельні. Стійкість засобів зв'язку може бути підвищена шляхом прокладання другого живлення фідерів на автоматичну телефонну станцію і радіовузол заводу, придбання пересувних електростанцій для зарядки акумуляторів АТС і для живлення радіовузла при повному відключенні постійних джерел електроенергії.

Важливе значення має планове накопичення ультракороткохвильових радіостанцій, телефонних апаратів і телефонного кабелю польового типу для створення тимчасових ліній зв'язку на випадок виходу із ладу постійних. Необхідно також мати незмінний резерв запасних частин і деталей для ремонту всіх засобів зв'язку.

Попередження або зменшення до мінімуму можливих руйнувань, пожеж і втрат від додаткової дії вторинних факторів ураження ядерного вибуху в значній мірі залежать від проведення інженерно-технічних заходів, направлених на підвищення загальної стійкості всього інженерно-технічного комплексу підприємства і його окремих елементів. Крім цього, ця задача досягається розосередженням (вивозом) наднормативних запасів вибухових і вогненебезпечних речовин на безпечній відстані від самого підприємства, а також від інших населених пунктів та об'єктів. Таке розосередження вибухових та вогненебезпечних матеріалів здійснюється в основному при виникненні погрози нападу супротивника, однак уже у мирний час для цього слід підготовляти склади у загородній зоні.

Роботи із вибуховими речовинами рекомендується сконцентрувати в спеціальних окремо розташованих спорудах, щоб виключити джерела додаткової небезпеки при здійсненні цих робіт у різних цехах. На багатьох підприємствах запаси горючих рідин (нафта, бензин, керосин, масла і т. п.) містяться не в підземних сховищах, а в наземних резервуарах та інших ємностях. В цих випадках такі ємності повинні бути уже в мирний час обваловані, тобто оточені валами ґрунту такої висоти, щоб вони були здатні втримати весь об'єм рідини при руйнуванні резервуару.

Створення обмежувальних земляних валів (дамб) являється також одним із ефективних способів захисту об'єктів, розташованих в низинних ділянках

місцевості, від катастрофічного затоплення в результаті руйнування поблизу розташованих гідропоруд.

Для попередження виникнення джерел хімічного зараження можна рекомендувати наступні заходи: розосередження складів отрутохімікатів, а також обладнання їх пристосуваннями, які забезпечують швидку нейтралізацію отруйних речовин (змивання водою; обробка залізним купоросом приміщень, небезпечних із-за наявності ціаністих сполук; обробка кислот лугами і т. п.); виготовлення міцної і надійної тари; настил підлог в складах отрутохімікатів із кислотоупорних і лугостійких матеріалів; створення запасів нейтралізуючих речовин; ізоляція (відгородження) в цехах небезпечних ділянок (травлення, ціанування, азотування та ін.); забезпечення робочих небезпечних і сумісних з ними ділянок спеціальними засобами індивідуального захисту (промислові протигази, захисний одяг) [46, 47].

5 ЕКОНОМІКО-ОРГАНІЗАЦІЙНА ЧАСТИНА

5.1 Актуальність теми з позиції маркетингу

Оптимізація процесу термообробки для сплавів, що мають підвищену термічну стійкість, виявляється ключовою з точки зору стратегії в маркетингу.

Покращення характеристик матеріалів: Впровадження інноваційних методів термообробки, спрямованих на підвищення термічної стійкості або механічної міцності сталі, може стати основним фактором конкурентоспроможності для компаній у галузі інженерії та виробництва, що використовують такі сплави.

Зменшення енергоспоживання та витрат: Вдосконалення процесів термообробки, спрямованих на зменшення енергетичних витрат або виробничих витрат, може стати важливою конкурентною перевагою на ринку.

Отримання доступу до нових сегментів ринку: Вдосконалена термічна обробка може відкрити нові можливості застосування теплостійких сталей, зокрема в енергетичному виробництві, авіабудівництві та інженерії, де вимагається висока термостійкість.

Маркетингові заходи: Ця тема може бути використана для організації рекламних кампаній, участі в виставках, конференціях, написанні статей для спеціалізованих видань та інших маркетингових заходів.

Співпраця та партнерство: Розробка нових технологій у галузі термічної обробки відкриває можливості для співпраці з іншими компаніями через партнерські відносини або ліцензування.

Важливо акцентувати увагу на дослідженні ринку, розумінні потреб споживачів та демонстрації переваг власних продуктів або технологій у порівнянні з конкурентами. Також доцільно займатися партнерськими ініціативами та активно брати участь у профільних заходах для зміцнення репутації та позиції компанії на ринку.

5.2 Послідовний аналіз

Оптимізація характеристик зварних ливарних жаростійких нікелевих сплавів включає в себе аналіз областей їх застосування та переваг для кінцевих користувачів (табл. 5.1). Ключові компоненти цих матеріалів, включаючи їх фазовий склад, визначають основні характеристики, такі як міцність при високих температурах, гнучкість, стійкість до корозії та теплопровідність. Результати таких досліджень можуть бути застосовані для вдосконалення виробничих процесів, впровадження нових методів контролю якості та розробки нових жаростійких нікелевих матеріалів.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для споживачів (користувачів)
Удосконалення хімічного складу жароміцних нікелевого сплаву ЗМІ-3У	Авіаційна, енергетична, морська промисловість, машинобудування.	Підвищення надійності та ресурсу авіаційних двигунів
		Зменшення витрат на обслуговування та ремонт обладнання
		Розширені можливості застосування та підвищення строку експлуатації

Досконалення хімічного складу жароміцних нікелевих сплавів, зокрема сплаву ЗМІ-3У, шляхом дослідження інтерметалідних фаз, відкриває перспективи для вдосконалення технологій виробництва та контролю якості. Це дослідження відображає важливість в розробці нових сплавів, які відповідають сучасним вимогам до довговічності та термостійкості в промисловості. Воно

відкриває шлях до створення матеріалів з високими технічними характеристиками, що можуть ефективно використовуватися у виробництві та різноманітних галузях промисловості. Виконаний аналіз характеристики потенційного ринку (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Головні конкуренти	Nippon Yakin Kogyo Co., Ltd., Allegheny Technologies Incorporated (ATI), Sandvik Materials Technology, VDM Metals GmbH, Special Metals Corporation
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стабільне зростання попиту на жароміцні сплави через розвиток високотехнологічних галузей.
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Високі витрати на дослідження та розробку, патентні обмеження, високий рівень конкуренції, строгі стандарти якості та безпеки, сировинні обмеження.
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Дотримання міжнародних стандартів ASTM International, EN, NACE, PED і ISO, національних стандартів DSTU, сертифікація відповідно до вимог авіаційної та енергетичної промисловості.

Оптимізація хімічного складу сплаву ЗМІ-ЗУ за участю танталу є важливим кроком у підвищенні властивостей зварних нікелевих сплавів для різноманітних галузей, таких як енергетика, авіація, автомобілебудування, хімічна промисловість та суднобудування. Ці сплави мають високі вимоги до теплостійкості, міцності, стійкості до корозії та інших параметрів. Розуміння цих вимог дозволяє оптимізувати процес виробництва сплавів, враховуючи потреби клієнтів і забезпечуючи відповідність їх вимогам.

Таблиця 5.3 – Попередня характеристика потенційних клієнтів

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів (користувачів)
Підвищена стійкість деталей до високотемпературного впливу та корозії.	Виробники авіаційних двигунів, компанії теплоенергетичного сектора.	Авіаційна промисловість акцентує на легкості та міцності сплавів, теплоенергетика – на довговічності та жаростійкості.	Високий рівень механічних властивостей сплавів, стабільність характеристик при тривалому застосуванні.

Аналіз SWOT є важливим інструментом стратегічного планування для підвищення властивостей зварних ливарних жароміцних нікелевих сплавів. Цей аналіз допомагає виявити переваги та недоліки проекту, а також потенційні можливості та загрози, що йому загрожують. Результати аналізу подані у таблиці 5.4. Ефективне використання сильних сторін та управління слабкими є ключовими для успішної реалізації проекту. SWOT-аналіз підкреслює важливість оптимізації можливостей та зменшення загроз з метою досягнення максимального успіху проекту.

Таблиця 5.4 – SWOT- аналіз

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Покращення термічної стійкості та міцності. Збільшення стійкості до корозії та агресивних середовищ. Посилення операційної ефективності за рахунок використання нового складу.	Можливі високі витрати на дослідження та розробку. Необхідність нових технологічних процесів та обладнання.

Кінець таблиці 5.4

Можливості:	Загрози:
Розширення ринку через виробництво більш високоякісних матеріалів. Потенційне залучення нових клієнтів та партнерів через покращення властивостей сплаву.	Конкуренція на ринку від інших виробників сплавів. Технологічні труднощі при впровадженні нового складу.

Перший крок у формуванні ринкової стратегії полягає в установленні підходу до охоплення ринку, що визначає, як продукт чи послуга буде представлена на ринку та як будуть залучені цільові групи потенційних споживачів. У контексті поліпшення термічної обробки теплостійких сталей, розглядаються різні можливі цільові групи (див. табл. 5.5).

Ці стратегії охоплення ринку дозволяють налаштовувати маркетингові та продажні зусилля для досягнення успіху на ринку теплостійких сталей. Важливо розробляти індивідуальний підхід до кожної цільової групи та адаптувати стратегії згідно з їхніми унікальними потребами і вимогами.

Таблиця 5.5 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Виробники високотехнологічного обладнання, авіаційні компанії,	Висока за умови демонстрації технічних переваг.	500-1000 тонн на рік для авіаційної галузі, 300-600 тонн для енергетичного сектору.	Висока серед провідних світових виробників та нових гравців з	Складна через високі вимоги до якості та необхідності довготривали

виробники компонентів для енергетичної промисловості і			інноваційними розробками.	х досліджень і розробок.
---	--	--	------------------------------	-----------------------------

Було визначено зацікавлені сторони та їх порядок важливості, що призвело до створення Мапи зацікавлених сторін. Ця карта допомагає візуально показати зв'язки між різними зацікавленими сторонами. Для кращого зображення їх взаємодії були створені три концентричні зони. Центральна зона Мапи зацікавлених сторін відображає сферу відповідальності та компетенцій ініціатора проекту. Тут розташовані ключові зацікавлені сторони, які мають прямий зв'язок з ініціатором, що спрощує процес управління проектом.



Рисунок 5.1 - Карта стейкхолдерів

Були розраховані витрати на оплату праці, враховуючи розподіл робочого часу одного працівника, необхідного для виконання конкретного етапу виготовлення авіаційних дисків. У цих розрахунках також враховувалася сума єдиного соціального внеску (ЄСВ), що є важливою складовою витрат на працю. Отримані результати представлені у таблицях 5.6 і 5.7, які детально розглядають витрати на оплату праці та відповідні обов'язкові внески в соціальні фонди для забезпечення адекватної фінансової оцінки трудових ресурсів, використаних на кожному етапі виробничого процесу авіаційних дисків.

Таблиця 5.6 – Склад, чисельність та фонд заробітної плати

Посада	Кількість осіб	Посадовий оклад, грн	Преміальний відсоток до окладу, %	Сума премій, грн	Місячна заробітна плата	Річний фонд оплати праці, грн	ЄСВ, грн
Науковий керівник	1	16000	20	3200	19200	230400	50688
Старший науковий співробітник	2	10500	20	2100	12600	151200	33264
Молодший науковий співробітник	2	9800	20	1960	11760	141120	31046,4
Лаборант	3	6500	20	1300	7800	187200	41184
Разом	8	42800	—	8560	51360	709920	156182,4

Розрахунок вартості матеріалів. До цієї статті належать витрати на придбання основних матеріалів для проведення дослідження, а також для виготовлення макетів та дослідних зразків (табл. 5.7)

Таблиця 5.7 – Розрахунок матеріальних витрат

Матеріальні витрати	Виробнича програма	Обсяг сировини	Ціна за одиницю, грн	Сума, грн
Папір	—	3 блоків	170	510
Ручка	—	20 од.	15	300
Олівець	—	20 од.	10	200
Зразки	80	80 од.	250	20000
Реактиви	—	10 од.	900	9000
Змінні лінзи	—	2 од.	3200	6400
Тара зразків	—	14 од.	50	700
Разом				37110

Розрахунок вартості матеріалів. До цієї статті належать витрати на електропостачання, водопостачання тощо (табл. 5.8).

Таблиця 5.8 – Розрахунок вартості спожитих послуг

Вид послуг	Виробнича програма	Обсяг послуг	Тарифи	Сума, грн
Електропостачання	—	450 кВт	2,64 грн/ кВт	1188
Водопостачання	—	6 м ³	25 грн/м ³	150
Теплопостачання	—	2.24 Гкал	1380 грн/Гкал	3091,2
Охоронна система	—	1	1500	1500
Утилізація реактивів	8 одиниць	8	200 грн	1600
Разом				7529,2

Визначили річну суму амортизації з урахуванням первісної вартості основних засобів та норми амортизації при терміні експлуатації у 5 років (табл. 5.9).

Таблиця 5.9 – Розрахунок амортизації

Група основних засобів	Кількість	Первісна вартість ОЗ	Вартість обладнання	Річні амортизаційні відрахування	Витрати на поточний ремонт у розмірі 2%
Металографічний мікроскоп	2	98 287	196574	27520,36	3931,48
Електронний мікроскоп	1	1357110	1357110	189995,4	27142,2

Кінець таблиці 5.9

Прилад для контролю хімічного складу сплавів	1	941240	941240	131773,6	18824,8
Комп'ютер	4	26547	106188	14866,32	2123,76
Принтер	2	14521	29042	4065,88	580,84
Разом	10	2437705	2630154	368221,56	52603,08

Відображаємо кошторис витрат на основі даних ,вказаних в табл. 5.6-5.9. В табл. 5.10 наведено кошторис витрат на проведення науково-дослідницьких робіт.

Таблиця 5.10 – Кошторис витрат

Калькуляційні статті	Витрати, грн
Фонд заробітної плати, рік	709920
ЄСВ, рік	156182
Матеріальні витрати, рік	37110
Вартість спожитих послуг, рік	7529
Амортизація обладнання, рік	368222
Поточний ремонт, рік	52603
Виробнича собівартість	1331566
Адміністративні витрати 50%	354960
Повна собівартість	1686526

Розрахунок економічного ефекту використання оптимізованого нікелевого сплаву ЗМІ-3У легованого танталом полягаю у підвищенні опору матеріалу до дії агресивного середовища при умовах роботи авіаційних двигунів. Використання такого легування дозволяє підвищити надійність та тривалість експлуатації деталей газотурбінних двигунів.

Таблиця 5.11 – Орієнтовна ціна матеріалів для виготовлення сплавів ЖСЗЛС та ЖСЗЛС-М

Назва матеріалу	Ціна, грн/кг	Вміст % ЗМІ-ЗУ	Ціна 1 кг ЗМІ-ЗУ	Вміст % ЗМІ-ЗУ + Та	Ціна 1 кг ЗМІ-ЗУ + Та
1	2	3	4	5	6
Нікель Ni	970	66,809	648,05	63,248	613,51
Вуглець С	126	0,08	0,1	0,09	0,11
Хром Сг	388	16,2	62,86	14,3	55,48
Алюміній Al	600	2,7	16,2	3,0	18,0
Титан Ti	400	2,7	10,8	3,0	12,0
Молібден Мо	2400	3,5	84,0	1,8	43,2
Вольфрам W	2200	3,5	77,0	6,8	149,6
Кобальт Со	1250	4,5	56,25	4,5	56,25
Тантал Та	8100	—	—	2,9	234,9
Гафній Hf	16000	—	—	0,35	56,0
Бор	700	0,011	0,08	0,012	0,08
Разом	—	100%	955,34	100%	1239,13

Економічна ефективність використання нового матеріалу визначається наступним чином:

$$E = (C_6 K_e - C_n) \cdot N, \text{ грн.},$$

де C_6 – собівартість базового виробу;

K_e – коефіцієнт експлуатаційного ресурсу

C_n – собівартість нового виробу

$$E = (955,34 \cdot 1,5 - 1239,13) \cdot 1 = 139,88 \text{ грн.}$$

Отже, економія на виготовленні 1 кг корозійностійкого дослідного нікелевого сплаву ЗМІ-ЗУ додатково легованого Та становить 139,88 грн при

коефіцієнті експлуатаційного ресурсу 1,5. Це свідчить про те, що додавання 3% танталу до складу серійного сплаву ЗМІ-3У дозволяє знизити його собівартість через підвищення показників корозійної стійкості, які в свою чергу безпосередньо впливають на збільшення терміну експлуатації деталей газотурбінного двигуна.

ВИСНОВКИ

На основі комплексного підходу для багатокомпонентної системи Ni-11,5Cr-5Co-3,6Al-4,5Ti-7W-4Ta-0,8Mo-0,06C отримано нові регресійні моделі, які дають змогу адекватно прогнозувати хімічний склад карбідів за хімічним складом сплаву.

Встановлено залежності впливу легувальних елементів на температури розчинення (виділення) карбідів. Показано, що температурні залежності змінюються від вмісту елемента і тісно корелюють з термодинамічними процесами, що відбуваються в системі, тобто на кривих спостерігаються екстремуми, які супроводжують зміну стехіометрії карбідів або виділення нових фаз.

Встановлено, що при збільшенні концентрації титану понад 5% і танталу понад 7% у сплаві утворюється σ -фаза, яка знижує механічні властивості. Вміст гафнію понад 0,1% призводить до зміни основи карбиду з титану на гафній, що знижує температуру утворення (розчинення) карбиду. Введення ніобію близько 2% знижує температуру утворення (розчинення) карбідів до мінімуму. Однак за концентрації ніобію в карбіді понад 20% карбідний ліквідус починає зростати.

Проведено порівняльну оцінку розрахункових результатів, отриманих CALPHAD-методом і експериментальних даних, отриманих методом рентгенівської спектроскопії. Отримані результати з визначення типу та хімічного складу карбідів узгоджуються між собою.

Встановлено оптимальний вміст танталу в даній системі, який має бути від 4% до 7%. Вводити тантал у кількості менше 4% недоцільно через те, що в карбідах залишається як основа титан, а більше 7% - через утворення σ -фази і зниження властивостей сплаву.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Гайдук, С.В. Наукові основи проектування ливарних жароміцних нікелевих сплавів з необхідним комплексом службових властивостей / С.В. Гайдук, С.Б. Беліков. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2017. – 80 с. - ISBN: 978-617-529-160-3.
2. Симс, Ч.Т. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок: В 2-х кн. / Под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля ; Пер. с англ. под ред. Р.Е. Шалина. – М.: Металлургия, 1995. – Кн. 1. - 384 с. ; Кн. 2. - 384 с.
3. Кишкин, С.Т. Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе / С.Т. Кишкин, Г.Б. Строганов, А.В. Логунов. – М.: Машиностроение, 1987. – 112 с.
4. Беліков, С.Б. Розвиток наукових принципів легування ливарних жароміцних никельових сплавів з метою підвищення корозійної стійкості деталей в умовах високотемпературного середовища газотурбінних установок : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра. техн. наук : 05.02.01 / Беліков Сергій Борисович. - Запоріжжя, 1996. - 48 с.
5. Гайдук, С.В. Исследование влияния концентраций молибдена, вольфрама и тантала на сопротивление локальному коррозионному разрушению никелевых сплавов / С.В. Гайдук, С.Б. Беликов, В.В. Кононов // Вестник двигателестроения. – 2003. -№ 1. - С. 162 – 165.
6. Ohtani H. The CALPHAD Method. In: Czichos H., Saito T., Smith L. (eds) Springer Handbook of Materials Measurement Methods. Springer Handbooks. – 2006. – Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30300-8_20
7. Saunders, N., Guo, U.K.Z., Li, X. et al. Using JMatPro to model materials properties and behavior // JOM. – 2003, 55.— Pp. 60–65. <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0013-2>

8. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П., Джой Д., Фиори Ч., Лифшин Ф. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: в двух книгах. – Изд. Мир, 1984. – 303с.
9. Horst O.M., Schmitz D., Schreuer J. et al. Thermoelastic properties and γ' -solvus temperatures of single-crystal Ni-base superalloys. // Journal of Materials Science. — 2021. — Т. 56. — С. 7637–7658. — URL: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05628-w>
10. Chen B., Wu W.P., Chen M.X. Orientation-Dependent Morphology and Evolution of Interfacial Dislocation Networks in Ni-Based Single-Crystal Superalloys: A Molecular Dynamics Simulation. // Acta Mechanica Solida Sinica. — 2021. — Т. 34. — С. 79–90. — URL: <https://doi.org/10.1007/s10338-020-00172-1>
11. Mazzarisi M., Campanelli S.L., Angelastro A. et al. In situ monitoring of direct laser metal deposition of a nickel-based superalloy using infrared thermography. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2021. — Т. 112. — С. 157–173. — URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06344-0>
12. Song W., Wang X.G., Li J.G. et al. Role of Ru on the Microstructural Evolution During Long-Term Aging of Ni-Based Single Crystal Superalloys. // Acta Metallurgica Sinica (English Letters). — 2020. — Т. 33. — С. 1689–1698. — URL: <https://doi.org/10.1007/s40195-020-01110-3>
13. Borouni A., Kermanpur A. Effect of Ta/W Ratio on Microstructural Features and Segregation Patterns of the Single Crystal PWA1483 Ni-Based Superalloy. // Journal of Materials Engineering and Performance. — 2020. — Т. 29. — С. 7567–7586. — URL: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05189-8>
14. Kvasnytska, Y.H., Ivaskevych, L.M., Balytskyi, O.I., et al. High-Temperature Salt Corrosion of a Heat-Resistant Nickel Alloy // Mater Sci. — 2020. — Vol. 56. — Pp. 432-440.
15. Yang, S., Yun, J., Seok, C.S. Rejuvenation of IN738LC Gas-Turbine Blades Using Hot Isostatic Pressing and a Series of Heat Treatments // J Mech Sci Technol. — 2020. — Vol. 34. — Pp. 4605-4611.

16. Yin, B., Xie, G., Jiang, X., et al. Microstructural Instability of an Experimental Nickel-Based Single-Crystal Superalloy // *Acta Metall Sin (Engl Lett)*. — 2020. — Vol. 33. — Pp. 1433-1441.
17. Pandey, A., Hemker, K.J. Temperature Dependence of the Anisotropy and Creep in a Single-Crystal Nickel Superalloy // *JOM*. — 2015. — Vol. 67. — Pp. 1617-1623.
18. Chai, L., Huang, J., Hou, J., et al. Effect of Holding Time on Microstructure and Properties of Transient Liquid-Phase-Bonded Joints of a Single Crystal Alloy // *J. of Materi Eng and Perform*. — 2015. — Vol. 24. — Pp. 2287-2293.
19. Glotka, A.A., Moroz, A.N. Comparison of the Effects of Carbides and Nonmetallic Inclusions on Formation of Fatigue Microcracks in Steels // *Met Sci Heat Treat*. — 2019. — Vol. 61. — Pp. 521-524.
20. Zhu, C.Z., Zhang, R., Cui, C.Y., et al. Effect of Ta Addition on the Microstructure and Tensile Properties of a Ni-Co Base Superalloy // *Metall Mater Trans A*. — 2021. — Vol. 52. — Pp. 108-118.
21. Oh, S.A., Lim, R.E., Aroh, J.W., et al. Microscale Observation via High-Speed X-ray Diffraction of Alloy 718 During In Situ Laser Melting // *JOM*. — 2021. — Vol. 73. — Pp. 212-222.
22. Chen, Y., Wang, H.M. Growth Morphologies and Mechanisms of Non-Equilibrium Solidified MC Carbide // *Journal of Materials Research*. — 2006. — Vol. 21. — Pp. 375-379.
23. Kong, Y.H., Chen, Q.Z., Knowles, D.M. Effects of Minor Additions on Microstructure and Creep Performance of RR2086 SX Superalloys // *Journal of Materials Science*. — 2004. — Vol. 39. — Pp. 6993-7001.
24. Tin S., Pollock T.M., Murphy W. Stabilization of thermosolutal convective instabilities in Ni-based single-crystal superalloys: Carbon additions and freckle formation / Tin S., Pollock T.M., Murphy W. // *Metall Mater Trans A*. — 2001. — T. 32. — Pp. 1743 – 1753. <https://doi.org/10.1007/s11661-001-0151-5>
25. Petrushin, N.V., Visik, E.M., Gorbovets, M.A. et al. Structure–phase characteristics and the mechanical properties of single-crystal nickel-based rhenium-

containing superalloys with carbide–intermetallic hardening // Russ. Metall. – 2016. – Pp. 630–641. <https://doi.org/10.1134/S0036029516070119>

26. Yu, Z., Qiang, J., Zhang, J. et al. Microstructure evolution during heat treatment of superalloys loaded with different amounts of carbon // Journal of Materials Research. – 2015, 30. – Pp. 2064–2072. <https://doi.org/10.1557/jmr.2015.127>

27. Pigrova, G.D., Rybnikov, A.I. Carbide phases in a multicomponent superalloy Ni-Co-W-Cr-Ta-Re // Phys. Metals Metallogr. – 2013, 114. – Pp. 593–595. <https://doi.org/10.1134/S0031918X13070089>

28. Glotka, A.A., Gaiduk, S.V. Distribution of Alloying Elements in the Structure of Heat-Resistant Nickel Alloys in Secondary Carbides. // J Appl Spectrosc. – 2020, 87. – Pp. 812–819. <https://doi.org/10.1007/s10812-020-01075-2>

29. Ohtani H. The CALPHAD Method. In: Czichos H., Saito T., Smith L. (eds) Springer Handbook of Materials Measurement Methods. Springer Handbooks. – 2006. – Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30300-8_20

30. Saunders, N., Guo, U.K.Z., Li, X. et al. Using JMatPro to model materials properties and behavior // JOM. – 2003, 55.– Pp. 60–65. <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0013-2>

31. Tin, S., Pollock, T.M. Stabilization of thermosolutal convective instabilities in Ni-based single-crystal superalloys: Carbide precipitation and rayleigh numbers // Metall Mater Trans A. – 2003, 34. – Pp. 1953–1967. <https://doi.org/10.1007/s11661-003-0160-7>

32. Buchanan, K.G., Kral, M.V. & Bishop, C.M. Crystallography and Morphology of MC Carbides in Niobium-Titanium Modified As-Cast HP Alloys // Metall Mater Trans. – 2014, A 45. – Pp. 3373–3385. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2285-2>

33. Wu, Bp., Li, Lh., Wu, Jt. et al. Microstructure and stress rupture properties of polycrystal and directionally solidified castings of nickel-based superalloys // Int J Miner Metall Mater. – 2014, 21. – Pp. 58–64. <https://doi.org/10.1007/s12613-014-0865-1>

34. Hlotka, A.A., Haiduk, S.V. Prediction of the Thermodynamic Processes of Phase Separation in Single-Crystal Refractory Alloys Based on Nickel // Mater Sci. – 2020, 55. – Pp. 878–883. <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00382-5>

35. Gajduk, S.V. Mekhanicheskie svoystva i tekhnologicheskie osobennosti polucheniya detalej GTU s napravlennoj (mono) strukturoj iz zharoprochnogo korrozionnostojkogo nikellevogo splava / S.V. Gajduk, A.G. Andrienko, V.V. Kononov // Novi` materi`ali i` tekhnologi`yi v metalurgi`yi ta mashinobuduvanni`. – 2012. - # 2. – S. 81-86.

36. Загальні вимоги стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-7.11-12. – На заміну наказу МНС України від 26.12.2011 № 1350 ; чинний від 2012-03-16. – К. : МНС України, 2012. – 116 с. – URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці).

37. Про охорону праці [Електронний ресурс] – Чинний від 1992-10-14. : станом на 20.01.2018 р.–К.:ВРУкраїни,1998.– URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>. – (Закон України).

38. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом [Текст] : ДСТУ Б В.2.5-82:2016. – На заміну ДБН В.2.5-27-2006 ; чинний від 2017-04-01. – К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 109 с. – (Державний Стандарт України).

39. Правила охорони праці під час роботи з інструментом та пристроями [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-1.71-13. – Чинний від 2014-03-28. – К. : Міненерговугілля України, 2013. – 59 с. – URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0327-14>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці).

40. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроям [Електронний ресурс] : НПАОП 0.00-7.15-18. – На заміну НПАОП 0.00-1.28-10 ; чинний від 2018-05-18. – К. : Мінсоцполітики України, 2018. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0508-18>. – (Нормативно-правовий акт охорони праці).

41. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин [Електронний ресурс] : ДСанПіН 3.3.2.007-98. – Чинний від 1998-12-10. – К. : МОЗ України, 1998. – URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=2445>. –(Державні санітарні правила та норми).
42. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Електронний ресурс] : ДСН 3.3.6.042-99. – Чинний від 1999-12-01. – К. : МОЗ України, 1999. – URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99>. – (Державні санітарні норми).
43. Природне і штучне освітлення. [Текст] : ДБН В.2.5-28-2018. – На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01. – К. : Мінрегіон України, 2018. – 133 с. – (Державні будівельні норми України).
44. Правила пожежної безпеки в Україні [Текст] : НАПБ А.01.001-14. – На заміну НАПБ А.01.001-04 ; чинний від 2014-12-30. – К. : МВС України, 2014. – 47 с. – (Нормативний акт пожежної безпеки).
45. Протипожежний захист. Знаки безпеки. Форма та колір [Текст] : ДСТУ ISO 6309:2007. – На заміну ГОСТ 12.4.026-76 в частині пунктів 1.1, 1.2, 1.4, 1.6 таблиці 5, пунктів 2.1, 2.2 таблиці 6, пунктів 4.1-4.11 таблиці 8; знаків 1.1, 1.2, 1.4, 1.6, 2.1, 2.2, 4.1-4.11 додатка 3 ; чинний від 2007-10-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 9 с. – (Державний Стандарт України).
46. Планування і забудова територій [Текст] : ДБН Б.2.2-12:2018 – На заміну ДБН 360-92** ; ДБН Б.2.4-1-94 ; ДБН Б.2.4-3-95 ; ДБН Б.2.4-4-97 ; ДБН Б.1-2-95 ; СНиП II-89-80 ; чинний від 2018-09-01. – К. : Мінрегіон України, 2018. – 179 с. – (Державні будівельні норми).
47. Катренко Л. А. Охорона праці. Курс лекцій. Практикум [Текст] : навчальний посібник / Л. А. Катренко, Ю. В. Кіт, І. П. Піскун – 2-ге вид., стер. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2007. – 496 с.