

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

ГЛОТКА ОЛЕКСАНДР АНАТОЛІЙОВИЧ



УДК 669.245.018.044:620.193.53

**НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ
ЛЕГУВАННЯ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РЕСУРСУ
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ**

05.02.01 - матеріалознавство

РЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Запоріжжя – 2026

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Національному університеті «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України, **Глушкова Діана Борисівна**, завідувач кафедри «Технології металів та матеріалознавства» імені О.М. Петриченка, Харківський національний автомобільно-дорожній університет Міністерства освіти і науки України;

доктор технічних наук, професор, Заслужений діяч науки і техніки України, **Дурягіна Зоя Антонівна**, професор кафедри «Матеріалознавства та інженерії матеріалів», Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, **Квасницька Юлія Георгіївна**, член-кореспондент Національної академії наук України, завідувач відділу спеціальних сталей та сплавів, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України.

Захист відбудеться « 08 » вересня 2026 року о 13-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 17.052.01 при Національному університеті «Запорізька політехніка» за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Університетська, 64, ауд. 253.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Запорізька політехніка» за адресою: м. Запоріжжя, вул. Університетська, 64, та на сайті університету у розділі «Наука» – «Постійно діюча спеціалізована рада» <https://zp.edu.ua/science/ssc-d1705201/info/>.

Реферат розіслано « 04 » серпня 2026р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 17.052.01,
доктор технічних наук, професор



Олександр МІТЯЄВ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Сутність науково-прикладної проблеми, розглянутої в роботі, полягає в розвитку й впровадженні у практику теоретичних, методичних і аналітичних науково-технологічних основ оптимізації процесів легування та визначення теплофізичних параметрів для формування сприятливої структури і підвищення експлуатаційної надійності та довговічності ливарних жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС). Нові результати ґрунтуються на подальшому розвитку теорії міжатомної взаємодії у сплавах, включаючи вплив легування на механічні властивості, корозію та хімічний склад карбідів, і враховують важливий параметр – температуру фазових перетворень. Практичне значення роботи полягає у підвищенні ресурсу експлуатації корпусних деталей газотурбінних двигунів завдяки підвищенню жароміцності, а також довговічності при зменшенні кількості фізичних експериментів.

Актуальність теми. Успішний розвиток машинобудування в Україні базується на підвищенні конкурентоспроможності високотехнологічної продукції, що можливо при застосуванні сучасної наукової складової в промисловій сфері. За всі роки незалежності рушійною силою в інновації розробок газотурбінних двигунів виступали не тільки новітні технології, а і нові матеріали. Тому, важливу роль у газотурбобудуванні відіграє розробка і впровадження нових жароміцних матеріалів з підвищеними експлуатаційними властивостями.

Наразі виросли вимоги до сучасних газотурбінних установок, що вказує на економічну виправданість використання авіакосмічних технологій і матеріалів при проєктуванні і виробництві сучасної газотурбінної техніки. Такий підхід підтверджується тим, що провідні світові лідери в галузі газотурбобудування (General Electric, Pratt & Whitney, Siemens, Rolls Royce) ведуть активні роботи стосовно створення спеціальних жароміцних і корозійностійких сплавів з підвищеними властивостями.

Робоча температура сучасних ЖНС в газотурбінних установках досягає $\sim 1100^{\circ}\text{C}$ і становить 80...85% від температури плавлення нікелевої матриці $\sim 1350^{\circ}\text{C}$. Такий результат був досягнутий завдяки новим технологіям виплавки і ускладнення систем легування різних марок жароміцних нікелевих сплавів (завдяки використанню великої кількості елементів, ретельно збалансованих для отримання необхідних властивостей, а саме: Al, Ti, Cr, Fe, Co, тугоплавких металів Nb, Mo, Ta, W, Re, коштовного металу платинової групи Ru, модифікаторів B, C, V, Zr, Hf і рідкоземельних металів (РЗМ) Y, La, Ce і ін., а також зниженому вмісту домішок P, Mn, Zn, Se, Te, Pb, Bi і ін. та газоподібних домішок N, O, H). При цьому конкретна марка жароміцного нікелевого сплаву може містити до 10...15 хімічних елементів. Вважалось, що покращити структуру та властивості за допомогою легувальних елементів майже не можливо і перспективним напрямом в цьому є введення модифікаторів та удосконалення технологій виплавки. Однак, використання оптимізації кількості та співвідношення легувальних елементів в жароміцних нікелевих сплавах відкриває нові можливості для покращення їх властивостей.

Аналіз сучасних публікацій показує, що велика кількість робіт спрямована на дослідження проблеми прогнозування властивостей жароміцних матеріалів, однак вони не охоплюють широкий комплекс властивостей. Також в новітніх наукових роботах практично відсутня інформація про специфіку розподілу легувальних елементів в жароміцних нікелевих сплавах. Основний напрямок цих робіт - це дослідження коефіцієнтів ліквіації, хімічного складу та кількості зміцнювальної фази і впливу γ' - фази на механічні властивості, але при цьому майже не згадуються інші фази, що існують в сплавах даного типу. Стає очевидним, що сучасна наукова спільнота звертає увагу лише на зміцнювальну γ' -фазу, однак в процесах зміцнення та підвищення жароміцності беруть участь і карбідні фази, розподіл легувальних елементів в яких розглянутий в незначній кількості робіт.

Дисертаційна робота спрямована на розвиток і застосування наукових основ легування ливарних ЖНС за результатами комплексних теоретичних та експериментальних досліджень, а також на створення і промислову реалізацію інноваційних підходів до розробки хімічних складів для корпусних деталей, що є актуальною задачею і сприяє вирішенню важливої науково-прикладної проблеми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Основні етапи дисертації виконані автором в Національному університеті «Запорізька політехніка» відповідно до планів науково-дослідних робіт кафедри «Фізичне матеріалознавство» за такими тематиками:

1. «Розробка та дослідження економнолегованих жаростійких листових сталей з підвищеними корозійно- та зносостійкістю», ДБ 2812, 2012-2014 рр., № держ. реєстрації 0112U002022.

2. «Розробка ефективних технологій застосування полімерабразивних інструментів (ПАІ) при обробці тонкостінних деталей із сталей та сплавів на основі нікелю, титану та алюмінію», ДБ 2815, 2015-2016 рр., № держ. реєстрації 0115U002568.

3. «Комплексне дослідження технологічних і службових характеристик модернізованого складу сплаву ЖСЗЛС-М», ГД №2813, 2014-2017 рр, № держ. реєстр. 0113U007691.

4. «Створення новітніх конструкційних сплавів та композитів авіаційної і космічної техніки», НДР № 3/22, 2022-2024рр., № держ. реєстр. 0122U001316.

Мета та завдання досліджень. Створення і впровадження науково та експериментально обґрунтованого алгоритму вибору вмісту хімічних елементів на основі результатів дослідження конкуренції та кооперації легувальних елементів у жароміцних нікелевих сплавах для забезпечення високого рівня теплофізичних, механічних і корозійних властивостей корпусних деталей за зменшених матеріальних витрат на проведення попередніх експериментів.

Для вирішення зазначеної проблеми необхідно було вирішити такі завдання:

- встановити, систематизувати та обробити дані щодо теплофізичних, механічних і корозійних властивостей ливарних ЖНС широкого діапазону;
- дослідити вплив хімічних елементів на теплофізичні, механічні і корозійні властивості ливарних ЖНС;

- встановити взаємозв'язки легувальних елементів у широкому ряді композицій для визначення впливу на механічні та корозійні властивості ливарних ЖНС;

- побудувати діаграми для встановлення критичних температур ЖНС, отриманих за різною технологією лиття з використанням встановлених закономірностей, для обґрунтування нового або вдосконалення хімічного складу відомого сплаву з попередньо заданою жароміцністю ;

- проаналізувати закономірності впливу хімічного складу сплавів на очікуваний хімічний склад карбідів ливарних ЖНС;

- дослідити можливості зміни хімічних складів карбідів в структурі ливарних ЖНС в процесі зміни хімічного складу сплаву;

- визначити зміну морфології і топології карбідних фаз в залежності від кількості легувальних елементів в ливарних ЖНС;

- розробити алгоритм прогнозування комплексу властивостей на основі встановлених залежностей від хімічного складу без проведення експериментів;

- провести промислове випробовування розробленого алгоритму вибору хімічного складу ливарних ЖНС для заданого комплексу властивостей;

- розробити за створеним алгоритмом склад ливарного жароміцного сплаву, призначеного для виготовлення корпусних деталей двигунів газотурбінних установок.

Об'єкт дослідження – закономірності впливу хімічного складу та перерозподілу легувальних елементів на фазоутворення і властивості ливарних жароміцних нікелевих сплавів.

Предмет дослідження – структура, теплофізичні, корозійні і фізико-механічні властивості ливарних жароміцних нікелевих сплавів з різними системами легування.

Методи дослідження: комп'ютерне моделювання термодинамічних процесів методом CALPHAD; визначення хімічного складу ряду сплавів спектральним аналізом на оптичному емісійному приладі «ARL-4460»; дослідження структури з використанням оптичної («Olympus IX-70») та електронної мікроскопії з кількісним аналізом фаз на приставці до растрового електронного мікроскопу REM-106I із системою енергодисперсійного рентгеноспектрального мікроаналізу; рентгеноструктурний аналіз на дифрактометрі RIGAKU MINIFLEX 600; стандартизовані методи оцінки корозійних і механічних властивостей; математичне оброблення розрахункових і експериментальних даних; кореляційний аналіз.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. На підставі теоретичних термодинамічних і експериментальних обґрунтувань отримали подальший розвиток закономірності впливу легувальних елементів на властивості жароміцних нікелевих сплавів, враховуючи конкуренцію та кооперацію різних груп елементів. На основі вище вказаних положень розроблені співвідношення $K_{\gamma'}$, K_{γ} та $K_{\text{пс}}$, що враховують взаємодію γ та γ' - утворювальних елементів.

Виявлено, що отримані співвідношення дозволяють визначати властивості ливарних жароміцних нікелевих сплавів (певної концентраційної вибірки) з великою точністю ($R^2 \geq 0,8$), при зміні вмісту хімічних елементів у наступних діапазонах, % мас.: Cr=1...35; Co=0,5...19; W=0,1...19; Ta=0,1...12; Al=0,5...6,25; Ti=1...6; Mo=0,1...6; Nb=0,1...4; Hf=0,1...2,5; C=0,01...0,2.

2. Вперше для жароміцних нікелевих сплавів, отриманих за різною технологією литва, побудовані діаграми (з використанням співвідношень $K_{\gamma'}$ і K_{γ}) для встановлення теплофізичних властивостей.

Отримані діаграми при варіюванні вмісту хімічних елементів у наступних діапазонах (Cr=1...35; Co=0,5...19; W=0,1...19; Ta=0,1...12; Al=0,5...6,25; Ti=1...6; Mo=0,1...6; Nb=0,1...4; Hf=0,1...2,5; C=0,01...0,2 % мас.) дозволяють прогнозувати критичні температури, що дає змогу обґрунтовано обирати вміст легувальних елементів відповідно до заданого комплексу властивостей.

3. Встановлено вплив співвідношення легувальних елементів ($K_{\gamma'}$ і K_{γ}) на об'ємну частку γ' - фази, співвідношення розміру кристалічних ґраток γ/γ' (місфіт), границь короткотривалої та довготривалої міцності в ливарних жароміцних нікелевих сплавах. Співвідношення розміру кристалічних ґраток γ/γ' має мінімальне значення (0,15...0,2%) для сплавів рівновісної та спрямованої кристалізації при $K_{\gamma'} \approx 1,5...2$, завдяки зменшенню кількості γ - утворювальних елементів, що збільшують параметр кристалічної ґратки γ - фази.

Це дозволило отримати раціональний комплекс показників якості корпусних деталей із жароміцних нікелевих сплавів.

4. Набули подальшого розвитку теоретичні відомості про вплив хімічного складу на корозійні властивості рівновісних та спрямованих ливарних жароміцних нікелевих сплавів. Встановлено, що для сплавів рівновісної і спрямованої кристалізації досягається мінімальний рівень середньої швидкості високотемпературної корозії при $K_{\text{пс}} \approx 2$. За цих умов забезпечується формування щільної плівки, яка перешкоджає проникненню в середину виробу кисню та продуктів горіння палива.

З'ясовано, що результати мають важливе значення для розробки нових та удосконалення широко відомих сплавів, а також дозволяють попередити передчасне руйнування корпусних деталей газотурбінних двигунів.

5. Запропоновано новий підхід щодо закономірностей впливу хімічного складу ливарних жароміцних нікелевих сплавів на температури карбідних ліквідусів. На основі вище вказаних понять розроблені співвідношення $K_{\text{МС}}$ та $K_{\text{М23С6}}$, що враховують взаємодію карбідоутворювальних елементів. Для сплавів рівновісної та спрямованої кристалізації встановлено, що при $K_{\text{МС}} \approx 20$ спостерігається зниження температури карбідного ліквідусу карбідів типу МС до мінімальних значень (1300...1350°C), що пов'язується з утворенням евтектичних карбідів на основі титану. Збільшення співвідношення $K_{\text{М23С6}}$ для сплавів спрямованої кристалізації призводить до підвищення температури карбідного ліквідусу до 1050°C, а у сплавах рівновісної кристалізації до рівня

1100°C ($K_{M_{23}C_6} \approx 13$) у карбідах типу $M_{23}C_6$, це дозволяє раціонально підібрати хімічну композицію та уникнути перебігу фазового перетворення під час експлуатації.

Завдяки цьому, оптимізовано хімічні склади жароміцних нікелевих сплавів з метою отримання заданого рівня властивостей в границях їх марочного складу.

6. Набули подальшого розвитку поняття про структурні перетворення, що відбуваються в ливарних жароміцних нікелевих сплавах з різними системами легування. Встановлено закономірності впливу хімічного складу на особливості формування карбідів типу MC та $M_{23}C_6$. Показано, що зміна морфології карбідів типу MC можлива не лише завдяки зміні умов кристалізації, а і завдяки зміні легування карбідоутворювальними елементами. За допомогою цього, можливо зменшити негативний вплив карбідів шрифтової форми та збільшити тріщиностійкість матеріалу.

Це дало змогу розробити підходи до легування ливарних жароміцних нікелевих сплавів та отримати раціональний комплекс властивостей сплавів для корпусних деталей газотурбінних двигунів.

Практичне значення одержаних результатів. На підставі теоретичних та експериментальних досліджень розроблено новий ливарний жароміцний нікелевий сплав ЗМІ-М8, який атестовано на ДП «Івченко-Прогрес» та котрий може бути використаний при виготовленні корпусних деталей у газотурбінних двигунах та установках.

Запропоновані в роботі нові методологічні підходи щодо прогнозування механічних властивостей та конструювання хімічних складів нових ливарних жароміцних сплавів захищено патентами України на корисну модель.

За результатами проведених досліджень додатково розроблено нові методи удосконалення хімічних складів, теплофізичних, механічних та корозійних властивостей відомих жароміцних нікелевих сплавів. На підставі отриманих результатів розроблено алгоритм конструювання та удосконалення хімічного складу ливарних жароміцних нікелевих сплавів.

Очікуваний економічний ефект від розробки нового ливарного жароміцного нікелевого сплаву ЗМІ-М8 та впровадження його у виробництво склав 15 368 300 грн. на рік за цінами 2025 року.

Результати роботи впроваджено в навчальний процес на кафедрі «Фізичне матеріалознавство» НУ «Запорізька політехніка» і використано у створенні методичних матеріалів.

Достовірність результатів роботи. Достовірність та обґрунтованість отриманих в роботі експериментальних даних і сформульованих на цій підставі наукових положень і висновків забезпечені: використанням добре апробованих методів дослідження, зокрема рентгеноспектрального мікроаналізу, оптичної та електронної мікроскопії, механічних випробувань тощо; застосуванням сертифікованого дослідницького обладнання; достатнім статистичним полем випробувальних зразків; використанням обчислювальних методів фізико-хімічного і математичного моделювання, сучасної обчислювальної техніки та програмного забезпечення; чітким трактуванням отриманих результатів, які не

суперечать загальноприйнятим науковим положенням; апробацією результатів на міжнародних науково-технічних конференціях; застосуванням комплексного підходу з виконанням лабораторних та промислових експериментальних досліджень, а також впровадженням результатів у виробництво.

Особистий внесок здобувача. Дисертація відображає основні результати досліджень, здійснених автором у Національному університеті «Запорізька політехніка». Здобувач самостійно провів науковий аналіз, систематизацію, математичну обробку результатів і сформулював висновки.

Автору особисто належать ідеї розробки співвідношень $K_{\gamma'}$, K_{γ} та $K_{\text{пс}}$ для оптимізації складу ливарних жароміцних нікелевих сплавів. Їм особисто отримані співвідношення для прогнозованого розрахунку заданих властивостей, що кардинально впливають на працездатність ливарних ЖНС в умовах експлуатації. У надрукованих статтях, опублікованих у співавторстві, автору належать особисті наукові внески: розробка співвідношень $K_{\gamma'}$, K_{γ} та $K_{\text{пс}}$ і отримання регресійних моделей на їхній основі [1, 4 - 7, 12, 16, 24 - 25, 27 - 34, 36, 38 - 44, 51, 55, 62 - 64] встановлення закономірностей зміни теплофізичних властивостей [1, 6, 7, 31, 33, 36, 42 - 44, 65], прогнозування механічних властивостей [1, 4, 5, 24, 25, 27, 30, 32, 38, 51, 69], корозійних властивостей [1, 28, 29, 39], прогнозування структурно-фазового складу [2, 3, 8 - 11, 13 - 23, 26, 35, 37, 44 - 50, 52 - 61, 66 - 68, 70 - 74]. Автором особисто проведено розрахункові і експериментальні дослідження, що представлені в дисертації. Усі наукові положення автором розроблені особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра» (Україна, Київ, 2016); «Космічні технології: сьогодні та в майбутньому» (Україна, Дніпро, 2017); «Литво. Металургія.» (Україна, Запоріжжя, 2019 - 2023); «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Україна, Дніпро 2019 - 2023); «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (Україна, Київ, 2019 - 2022); «Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів» (Україна, Запоріжжя, 2019 - 2025); «Прикладні науково-технічні дослідження» (Україна, Івано-Франківськ, 2020 - 2024); «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання» (Україна, Тернопіль, 2021, 2022); «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики» (Україна, Тернопіль, 2022); «Матеріалознавство та технології» (Україна, Харків, 2022); кафедральних семінарах НУ «Запорізька політехніка».

Публікації. Основні результати роботи наведено в 74 публікаціях, з яких 1 – монографія, 19 – статей у виданнях з індексом цитування Scopus/ Web of Science (2 – статті без співавторів), 22 – статті у фахових наукових виданнях (1 – стаття без співавторів), 2 – патенту на корисну модель, 30 – тез в матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел та 13 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 281 сторінки: основного тексту 212 сторінок,

список використаних джерел із 340 найменувань на 41 сторінці та 14 додатків на 29 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми і викладені загальні характеристики роботи, вказується на зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, охарактеризовано елементи наукової новизни одержаних результатів, їхня практична значимість. Визначено особистий внесок автора в спільних наукових публікаціях та наведено дані про апробацію результатів роботи.

У першому розділі проведено аналітичний огляд з питань розвитку сучасних жароміцних сплавів та основ їхнього легування, а також сучасні підходи і методи їхнього розроблення. Розглянуто існуючі погляди на оцінку найважливіших службових властивостей, які кардинально впливають на працездатність ливарних ЖНС в умовах експлуатації.

Проаналізовано сучасні тенденції легування, перспективні легувальні матеріали та основи розподілу легувальних елементів в ливарних ЖНС, які є одними з прогресивних матеріалів в газотурбобудуванні для безпілотних літальних апаратів та газотурбінних установок.

Розглянуто промислові сплави різних країн та сучасні тенденції моделювання термодинамічних процесів. Проаналізовано обширну експериментальну базу даних за складами і властивостями відомих вітчизняних та зарубіжних ливарних жароміцних нікелевих сплавів з різноманітними системами легування, які використовуються в сучасному авіаційному і стаціонарному газотурбобудуванні. Проаналізовано стан та напрямки фундаментальних досліджень і промислових експериментів світових вчених в цій області (Ч.Т. Сімс, В.Ч. Хагель, К. Сміт та іншими), а також українськими вченими, що відносяться до наукових шкіл Б.Е. Патона, М.К. Янгеля, А.Д. Ковалю, А.Г. Івченко, Ф.М. Муравченко. Значний практичний досвід, накопичений в процесі експлуатації ГТД, показав, що можливості кардинального поліпшення структури і механічних властивостей сплавів з використанням відомих хімічних композицій практично вичерпано.

За результатами аналітичного огляду літературних джерел зроблено висновки, а також обґрунтовано мету і завдання досліджень.

Другий розділ присвячений методологічному обґрунтуванню досліджень для досягнення поставлених в роботі цілей, що включає використані матеріали, розрахункові і стандартні експериментальні методи дослідження та послідовність їх застосування. Здійснено вибірку ливарних ЖНС з позицій різноманіття систем легування, що за складом охоплює широкий діапазон, а також забезпечує надійність розрахункових і експериментальних даних. Кожен розглянутий сплав використовувався як самостійний об'єкт дослідження.

Досліджено ряд сплавів представлений відомими промисловими марками (та розроблений сплав за маркою ЗМІ-М8), які були систематизовано за технологією

литва. Для апробації отриманих результатів були використані значення властивостей ливарних жароміцних нікелевих сплавів RR2000, ЖС32Б та ЗМІ-ЗУ.

Вибірку досліджуваних сплавів було здійснено з позицій різноманітних хімічних складів (систем легування), а також надання надійних розрахункових і експериментальних даних. Виходячи з отриманої вибірки, було вибрано діапазон варіювання концентрацій хімічних елементів для подальших аналітичних досліджень (табл.1).

Таблиця 1 – Діапазон варіювання хімічного складу досліджених ливарних жароміцних нікелевих сплавів

Вміст елементу, % за масою												
C	Cr	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	Ta	Hf	V	Zr	B
0,01... 0,2	1,0... 35,0	0,5... 19,0	0,5... 6,25	1,0... 6,0	0,1... 6,0	0,1... 16,0	0,1... 4,0	0,1... 12,0	0,1... 2,5	0,1... 1,6	0,005... 0,1	0,004... 0,03

Примітка: Ni-основа, $S+P \leq 0,015\%$ за масою.

За схемою, наведеною на рисунку 1, була проведена робота по встановленню математичних закономірностей властивостей дослідних сплавів. Отримані результати були оброблені з отриманням залежностей типу «концентрація-властивість» з побудовою функцій відгуку та коефіцієнтами детермінації ($R^2 \geq 0,8$) і отриманням залежностей, які оптимально описують ці процеси.

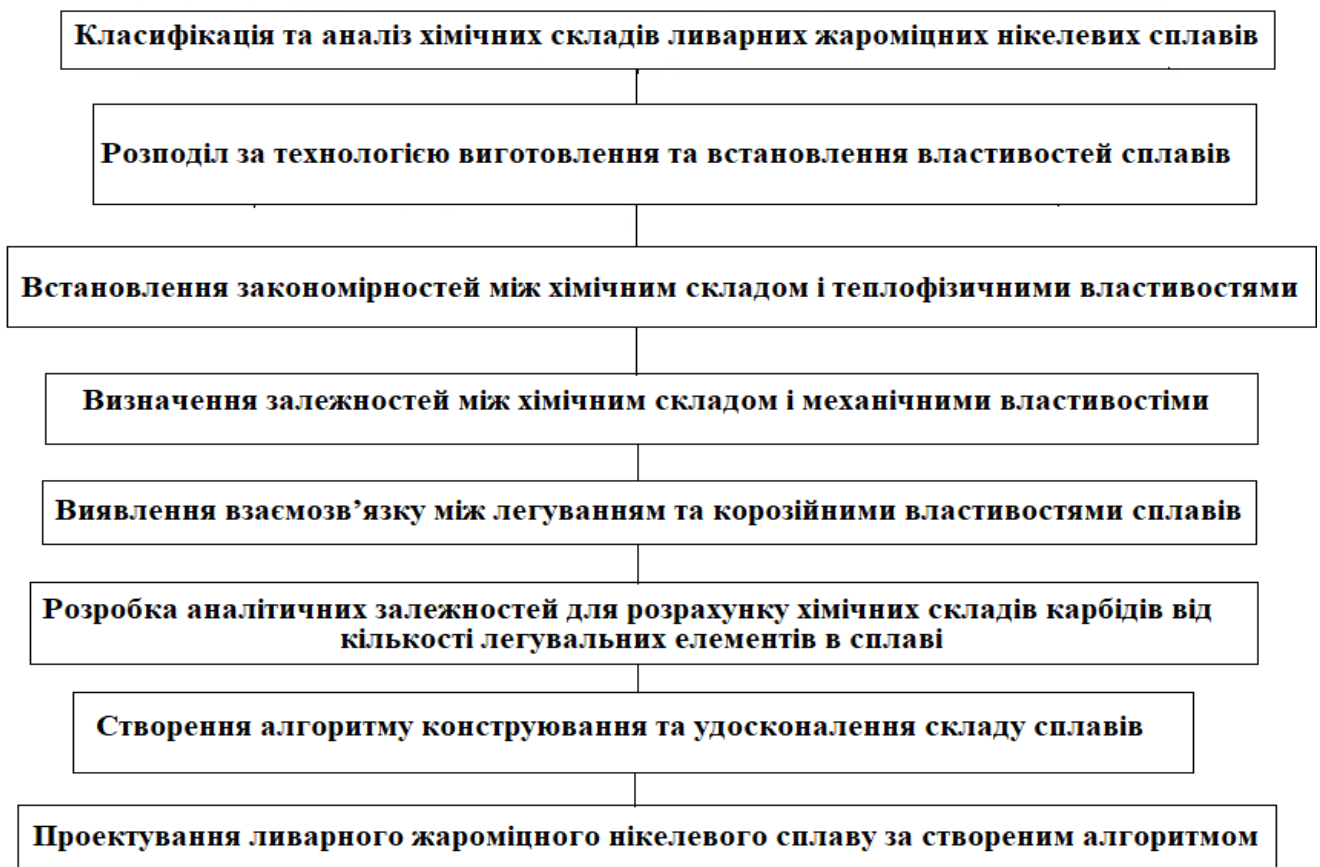


Рисунок 1 - Схема систематизації та оброблення характеристик ливарних жароміцних нікелевих сплавів

Розрахунки структурно-фазових характеристик досліджених сплавів виконано на основі хімічного складу з використанням комп'ютерного моделювання термодинамічних процесів кристалізації (охолодження) методом CALPHAD, з отриманням температурних залежностей типу «хімічний склад-властивість».

Литі зразки розробленого сплаву ЗМІ-М8 (табл. 2) із рівноосною структурою, а також аналогічні зразки з промислових сплавів отримували в вакуумно-індукційній печі марки УППФ-3М. Хімічний аналіз тестових і промислових плавок здійснювався відповідно до вимог ТУ 14-1689-73 та ОСТ 1.90127-85. Спектральний хімічний аналіз проводили на оптичному емісійному приладі ARL-4460.

Таблиця 2 – Хімічний склад розробленого сплаву ЗМІ-М8

Вміст елементу %, за масою (Ni – основа)										
C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	Ta	Hf	Zr
0,09... 0,15	22,5... 23,5	8,5... 9,5	1,6... 2,2	3,0... 4,0	1,0... 1,6	1,0... 1,6	1,0... 1,6	1,0... 1,6	0,6... 1,0	до 0,03

Механічні властивості визначали за ДСТУ ISO 6892-1:2019 на розривних машинах УМЕ-10ТМ і ГСМ-20. Ударні випробування проведено за ДСТУ ISO 148-1:2022. Випробування на довготривалу міцність проведено на аналогічних зразках за температури 800°C на машинах АІМА-5-2 і ZTZ 3/3 (ДСТУ ISO 204:2019) шляхом одновісного розтягування при постійному навантаженні на стандартних тимчасових базах 40, 100 і 1000 годин. Визначення опору високотемпературній корозії (ВТК), проводили в синтетичній золі, на циліндричних зразках (діаметр 10 мм, довжина $l = 12$ мм), які після попереднього знежирення, вимірювались і зважувались на аналітичних вагах з точністю ($\pm 0,0005$ г), з нанесенням на їхню поверхню синтетичної золи в кількості 12 мг/см², що імітує продукти згоряння газотурбінного палива, такого складу: Na₂SO₄ - 66,2%; Fe₂O₃ - 20,4% ; NiO - 8,3% ; CaO - 3,3% ; V₂O₅ - 1,8%, потім розміщували і витримували в печі на платформі з вогнетривкого матеріалу в повітряній атмосфері. Корозійні випробування проводили в синтетичній золі за температур 800, 850, 900 і 950°C впродовж 100...300 годин. Порівняльну стійкість зразків досліджуваних сплавів до ВТК оцінювали за питомою втратою маси (q , г/м²) і середньою швидкістю корозії ($\bar{V}_q$, г/м²·с).

Оцінювання результатів лабораторних і промислових експериментів виконано з використанням стандартних методів математичної статистики та моделювання. Для металографічного і рентгеноспектрального мікроаналізу використано оптичний («Olympus IX-70») та електронний растровий мікроскоп «РЕМ-106І».

У третьому розділі представлено результати дослідження впливу легувальних елементів на теплофізичні, механічні та корозійні властивості жароміцних нікелевих сплавів на основі обробки експериментальних даних. У періодичній літературі розглянуті властивості на основі хімічного складу ливарних ЖНС лише з урахуванням γ' -утворювальних елементів. Необхідність дослідження

особливостей впливу всіх легувальних елементів на властивості потрібно для збільшення точності визначення їхніх характеристик. Тому автором було розроблено співвідношення на підставі термодинамічних суджень, які дали змогу визначити показники теплофізичних, механічних та корозійних властивостей ливарних жароміцних нікелевих сплавів, виходячи з наступних міркувань.

Одночасна присутність кількох легувальних елементів в складі ливарних жароміцних нікелевих сплавів надає більш ефективний вплив на жароміцність, ніж еквівалентна кількість одного елемента. В залежності від впливу на механізм зміцнення ливарних ЖНС, елементи можна класифікувати і розділити на такі основні групи: розчинно-дисперсійні зміцнювачі (Al, Ti, Ta, Hf); твердорозчинні зміцнювачі (Co, Cr, Mo, W, Re); карбідоутворювальні елементи (Ti, Ta, Hf, Nb, V, W, Mo, Cr); мікролегувальні елементи і домішки різного типу. Такий поділ є досить умовним, оскільки елементи-зміцнювачі можуть розчинятися не лише в γ -твердому розчині, а й в інтерметалідній γ' -фазі з утворенням сполуки типу $(\text{Ni}, \text{Cr})_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Mo}, \text{W}, \text{Nb}, \text{Ta})$. Однак, автор вважає, що, дотримуючись такої класифікації, створюється більш цілісна картина.

Вважається, що оптимізація властивостей ливарних ЖНС полягає в підвищенні сумарного вмісту γ' -утворювальних елементів, при збалансованому сумарному легуванні твердорозчинними зміцнювачами (однак їх внесок у зміцнення є значно меншим). Згідно з термодинамічних позицій, залежність властивостей систем у двофазному рівноважному стані ($\gamma+\gamma'$ -фази) від концентраційних факторів створюють ефект кооперації (конкуренції). Тому для вільної енергії (G) у звичайному стані буде справедливо співвідношення:

$$G[T, P, N_{i,j}] = G_i^{\gamma'} \sum_i^{\gamma'} N_i + G_j^{\gamma} \sum_j^{\gamma} N_j + \dots, \quad (1)$$

де T- температура, К; P – тиск, Па; N_i, N_j – концентраційні (середньозважені) фактори присутніх у сплаві хімічних компонентів.

За умови рівноваги (P і T= const) у випадку двох основних фаз $G^{\gamma+\gamma'} = \min$ рівність (1) перетворюється у вираз:

$$dG^{\gamma+\gamma'} = 0 = \left(\frac{\partial G}{\partial N_i}\right) \sum_i N_i + \left(\frac{\partial G}{\partial N_j}\right) \sum_j N_j = \mu_i^{\gamma'} \sum_i N_i + \mu_j^{\gamma} \sum_j N_j, \quad (2)$$

де $\mu_{i(j)}$ - парціальні хімічні потенціали.

Якщо вважати, що коефіцієнт термодинамічної активності компонентів наближено дорівнює 1, $\mu_0^{\gamma'} + kT \ln \sum_i N_i^{\gamma'} \cong \mu_0^{\gamma} + kT \ln \sum_j N_j^{\gamma}$. Вважаючи, що $\Delta\mu_0 = \mu_0^{\gamma'} - \mu_0^{\gamma}$ достатньо мале і до того ж незалежне від концентрації, будемо мати:

$$\ln \sum_i^{\gamma'} N_i - \ln \sum_j^{\gamma} N_j = 0 \quad (3)$$

Звідси:

$$\frac{\sum N_i^{\gamma'}}{\sum N_j^{\gamma}} \approx 1 \quad (4)$$

З урахуванням масштабного фактору останнє рівняння набуває наступного вигляду:

$$q \frac{\sum N_i^{\gamma'}}{\sum N_j^{\gamma}} \geq 1, \quad (5)$$

де q – масштабний фактор (≥ 1).

Тому, виходячи з вище наведених співвідношень, автором було запропоновано відповідні залежності $K_{\gamma'}$ (формула 6) і K_{γ} (формула 7), що враховують як конкуренцію, так і кооперацію різних груп елементів в ливарних ЖНС, стан яких не є рівноважним:

$$K_{\gamma'} = 5 \frac{\sum (Al+Ti+Nb+Ta+Hf)}{\sum (Cr+W+Mo+Co)}, \quad (6)$$

де Al, Ti, Nb, Ta, Hf, Cr, W, Mo, Co – відповідний вміст елементів в сплаві, % мас.

У формулі (6) критерій $q=5$ був спеціально підібраний для забезпечення найкращого співвідношення елементів згідно таких міркувань: γ' -утворювальні елементи забезпечують значно більший внесок (приблизно в 5 разів) в зміцнення сплаву (в наслідок зростання кількості зміцнювальної фази).

Співвідношення K_{γ} (формула 7) використовується для визначення температури плавлення ливарних ЖНС. Оскільки при цих температурах основним фактором, який впливає на критичну температуру, є процеси дифузії (швидкість яких залежить від твердорозчинних зміцнювачів) було запропоновано співвідношення, що враховує і цей процес:

$$K_{\gamma} = \frac{\sum (Cr+W+Mo+Co)}{\sum (Al+Ti+Nb+Ta+Hf)} \quad (7)$$

де Al, Ti, Nb, Ta, Hf, Cr, W, Mo, Co – відповідний вміст елементів в сплаві, % мас.

Аналітичні вирази (6, 7) розроблені для концентраційних інтервалів елементів, вказаних в таблиці 1, та не мають фізичної розмірності.

Температурна працездатність ливарних ЖНС характеризується структурно-фазовою стабільністю і рівнем жароміцності, що залежить від критичних температур, таких як температури ліквідусу (t_L), солідусу (t_S), температури ($t_{\text{евт.}}$) локального плавлення евтектики ($\gamma+\gamma'$), а також температур початку ($t_{\text{п.р.}}^{\gamma'}$) розчинення зміцнювальної γ' - фази. Вважається, що чим менше температурний інтервал кристалізації ($\Delta t_{\text{кр.}}$) сплаву, тим менше ступінь дендритної ліквідації. А звуження температурного інтервалу гомогенізації ($\Delta t_{\text{гом.}}$) негативно впливає на технологічність термічного оброблення сплавів.

З використанням аналітичних виразів (6, 7) визначено залежності, які дозволяють здійснювати розрахунки для прогнозування теплофізичних властивостей за величиною співвідношення $K\gamma'$ та $K\gamma$ в ливарних ЖНС (рис. 2, 3).

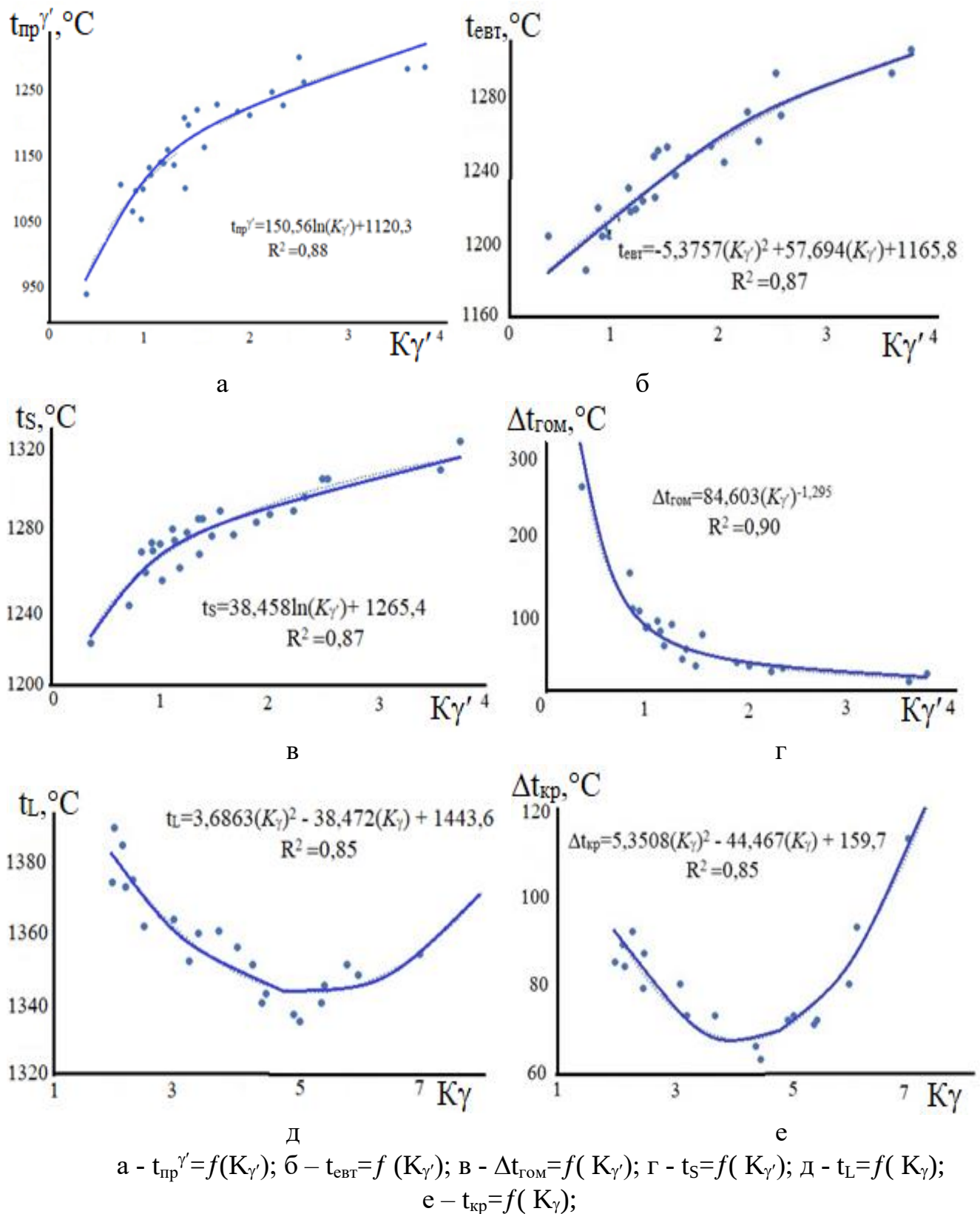
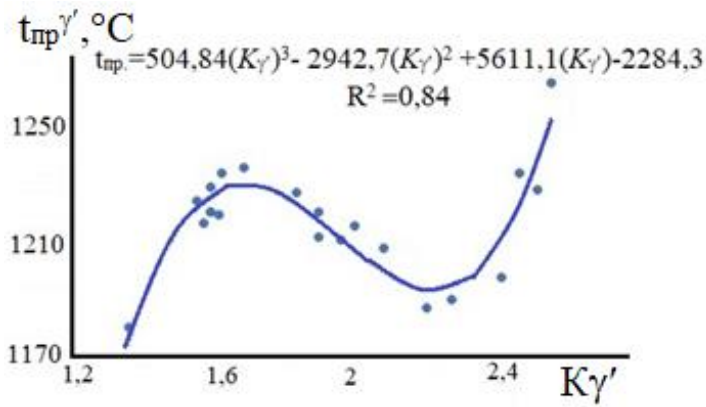
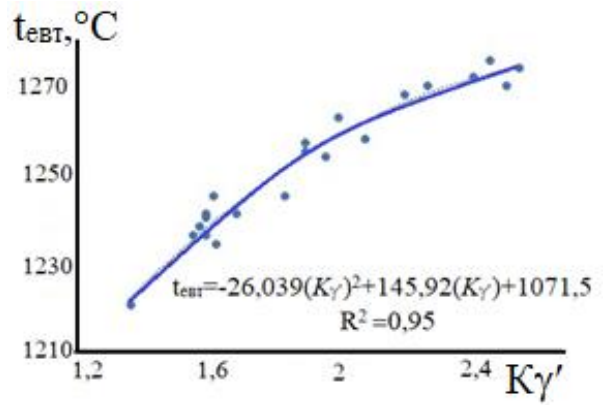


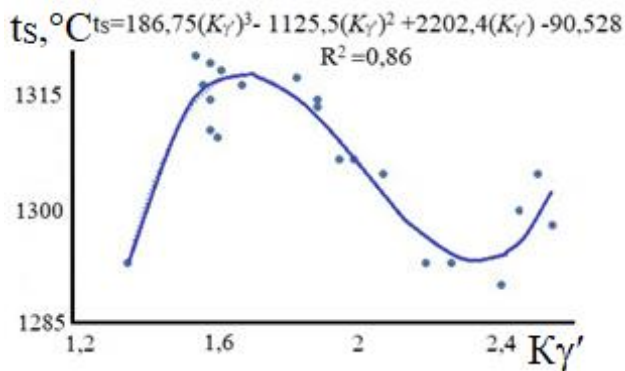
Рисунок 2 - Залежність критичних температур і інтервалу гомогенізації від співвідношення легувальних елементів в складі ЖНС рівновісної кристалізації



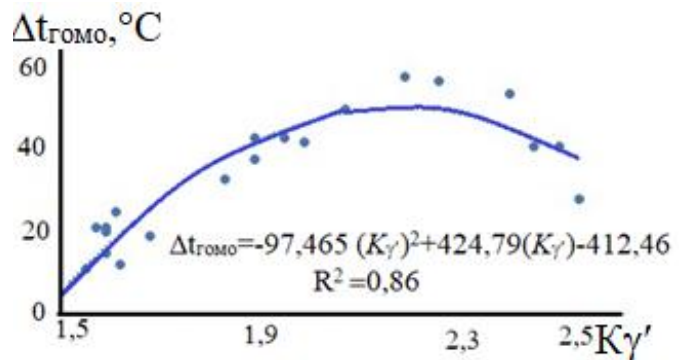
а



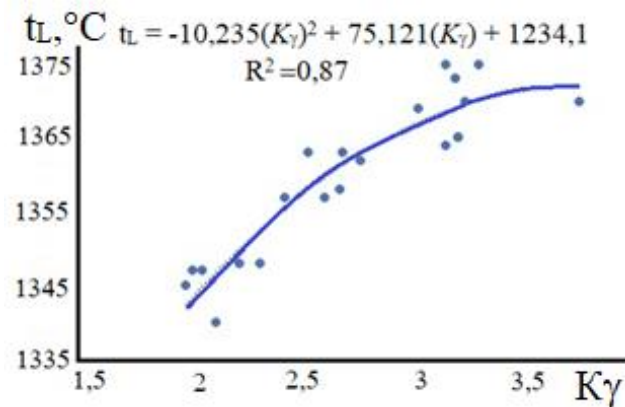
б



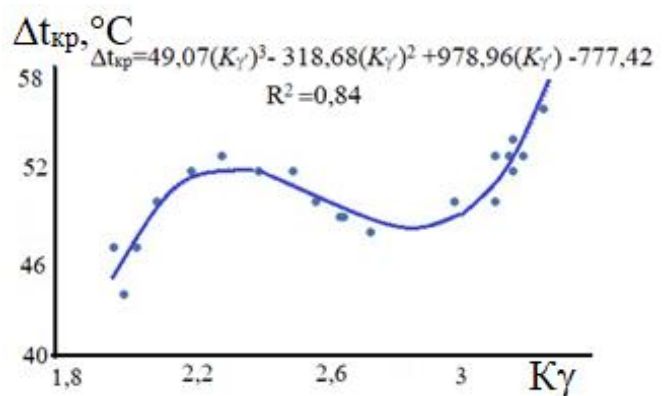
в



г



д



е

а - $t_{лп}^{γ'} = f(K_{γ'})$; б - $t_{евт}^{γ+γ'} = f(K_{γ'})$; в - $\Delta t_{ГОМ} = f(K_{γ'})$; г - $t_s = f(K_{γ'})$; д - $t_L = f(K_γ)$;
 е - $t_{кр} = f(K_γ)$;

Рисунок 3 – Залежність критичних температур та інтервалу кристалізації від співвідношення легувальних елементів в складі ЖНС спрямованої кристалізації

Залежності температури ліквідус і інтервалу кристалізації від співвідношення $K_γ$ (див. рис. 2, д, е) мають екстремум в інтервалі значень 4,5...5 $K_γ$, що відповідає взаємозв'язку $γ$ -утворювальних елементів до $γ'$ -утворювальних елементів як 5:1. З підвищенням значення $K_γ$ спостерігається деяке збільшення температури ліквідус, але максимуму не досягає. Протилежна поведінка

спостерігається в інтервалі кристалізації сплавів, при значеннях $K\gamma > 5$, $\Delta t_{кр}$ зростає і досягає максимальних значень та викликає збільшення ліквіації в зливках.

При значенні $1,6 \dots 1,7 K\gamma'$, для сплавів спрямованої кристалізації, спостерігається зниження температур $t_{пр}$ і t_s (див. рис. 3, а, в), в наслідок збільшення вмісту γ -твердорозчинних зміцнювачів. При підвищенні значення до $K\gamma' = 2,2 \dots 2,3$ спостерігається зростання температур $t_{пр}$ і t_s , це пов'язано зі зростанням кількості γ' -утворювальних елементів.

З метою перевірки отриманих залежностей було проведено порівняльні дослідження розрахункових та експериментальних даних по промисловим сплавам як вітчизняного так і закордонного виробництва. В таблиці 3 представлено результати розрахунків теплофізичних властивостей сплавів ЗМІ-3У та ЖС-32ВІ середнього рівня легування, розрахованими за залежностями в порівнянні з експериментальними.

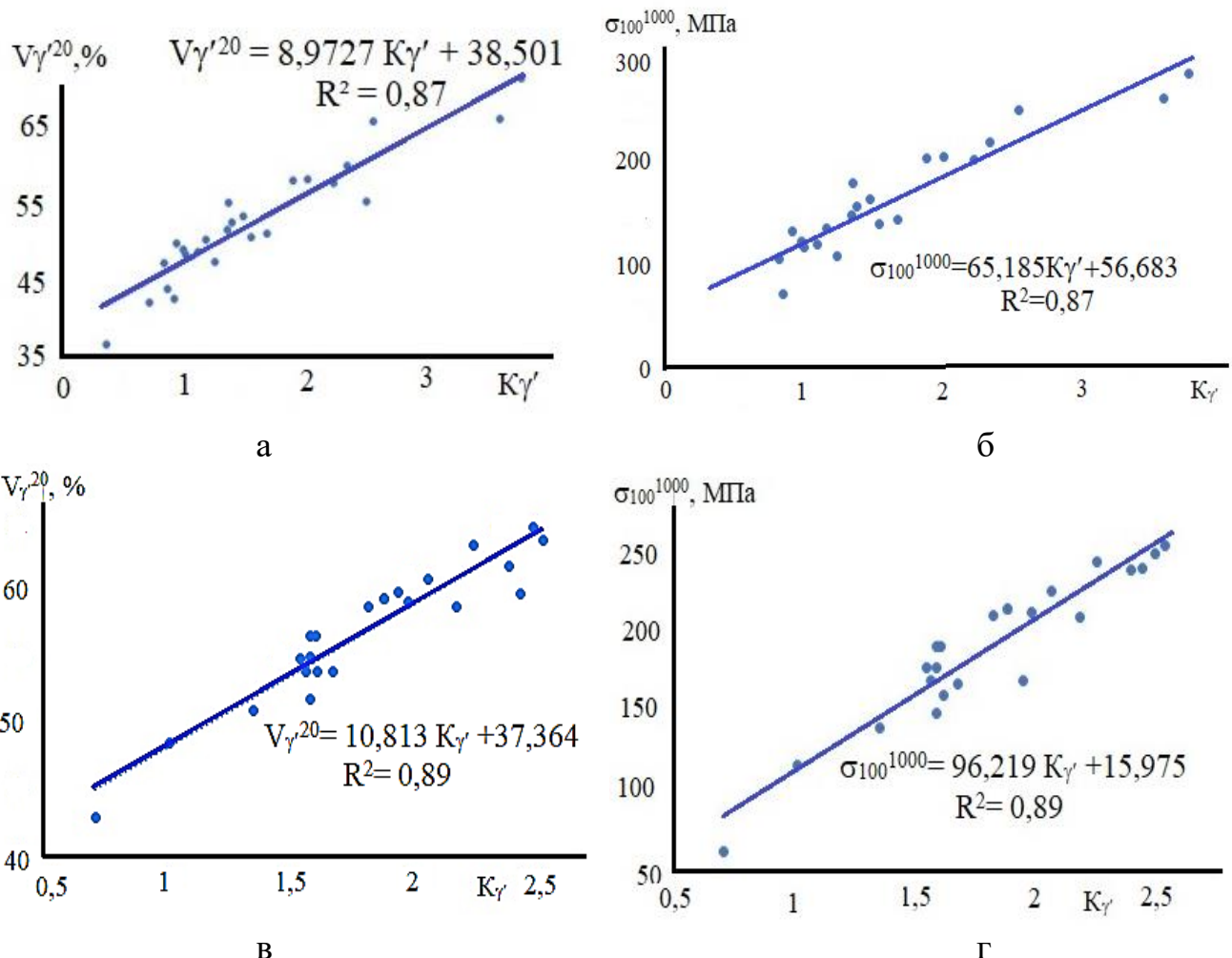
Таблиця 3 - Порівняльні розрахункові значення теплофізичних властивостей для сплавів ЗМІ-3У та ЖС-32ВІ на середньому рівні легування

Метод отримання результатів	Критичні температури, °C					
	$t_{пр}^{\gamma'}$	$t_{эвт}^{\gamma+\gamma'}$	t_s	t_L	$\Delta t_{гом}$	$\Delta t_{кр}$
ЖС32-ВІ						
Розраховані за розробленими моделями	1205	1265	1303	1355	55	53
Експериментальні значення за даними ПАТ «МОТОР СІЧ»	1197	1260	1298	1352	48	54
ЗМІ-3У						
Розраховані за розробленими моделями	1160,6	1233,5	1260,7	1354,3	72,9	93,6
Паспорт на жароміцний корозійностійкий нікелевий сплав ЗМІ-3У (ХН64ВМКЮТ).	1165	1235	1255	1350	68	79

Використання отриманих залежностей показало, що розрахункові значення критичних температур, мають збіжність з експериментальними даними з похибкою не більше 5% (див. табл. 3). Таким чином, використання отриманих залежностей для встановлення та оптимізації температур виплавлення та термічного оброблення дає змогу зменшити кількість експериментальних робіт до мінімуму.

В четвертому розділі встановлено зв'язок між хімічним складом та механічними властивостями, що зумовлює зниження кількості коштовних експериментів при розробці та вдосконаленні ливарних ЖНС. Проведено

дослідження по визначенню аналітичних залежностей сплавів, які дозволяють по визначеним моделям розрахувати основні характеристики. Показано, що розрахунки механічних властивостей можна здійснювати, використовуючи співвідношення $K_{\gamma'}$ (рис. 4). Отримані залежності мають лінійний характер з позитивним кутом нахилу, такі залежності пояснюються тим, що зі збільшенням $K_{\gamma'}$ кількість γ' -утворювальних елементів в сплаві зростає, а отже, зростає кількість зміцнювальної фази ($V_{\gamma'^{20}}$), яка впливає на довготривалу міцність сплавів.



а, в - $V_{\gamma'^{20}} = f(K_{\gamma'})$; б, г - $\sigma_{100}^{1000} = f(K_{\gamma'})$; а, б – сплави рівноосної кристалізації;
в, г – сплави спрямованої кристалізації

Рисунок 4 – Залежності кількості γ' -фази при кімнатній температурі та довготривалої міцності від співвідношення легувальних елементів $K_{\gamma'}$

В таблиці 4 наведено результати розрахунків механічних властивостей для промислових сплавів RR2000 та ЖС-32ВІ середнього рівня легування, отриманих за залежностями в порівнянні з експериментальними даними. Використання отриманих співвідношень показало, що розрахункові значення властивостей, мають збіжність з експериментальними даними з похибкою не більше 8%.

На високотемпературну корозію (ВТК) значно впливає хімічний склад ливарних ЖНС. Хром є основним елементом, який забезпечує стійкість сплавів в

умовах ВТК, однак позитивну тенденцію дають введення титану та алюмінію (в певних співвідношеннях).

Таблиця 4 - Механічні властивості сплавів ЖС-32ВІ та RR2000 на середньому рівні легування, отримані розрахунковим методом та експериментально

Метод отримання результатів	Властивості жароміцних сплавів					
	σ_B , МПа	δ^{20} , %	σ_{100}^{1000} , МПа	$V_{\gamma'}^{20}$, %	$V_{\gamma'}^{1000}$, %	ρ , г/см ³
RR2000						
Розраховані за розробленими моделями	1140	0,055	225	68	60	8,7
Експериментальні значення за даними Р. Fusco	1100	0,043	215	67	48	8,6
ЖС32-ВІ						
Розраховані за розробленими моделями	1090	0,35	240	62	51	8,5
Експериментальні значення за даними ПАТ «МОТОР СІЧ»	1100	0,36	245	64	55	8,55

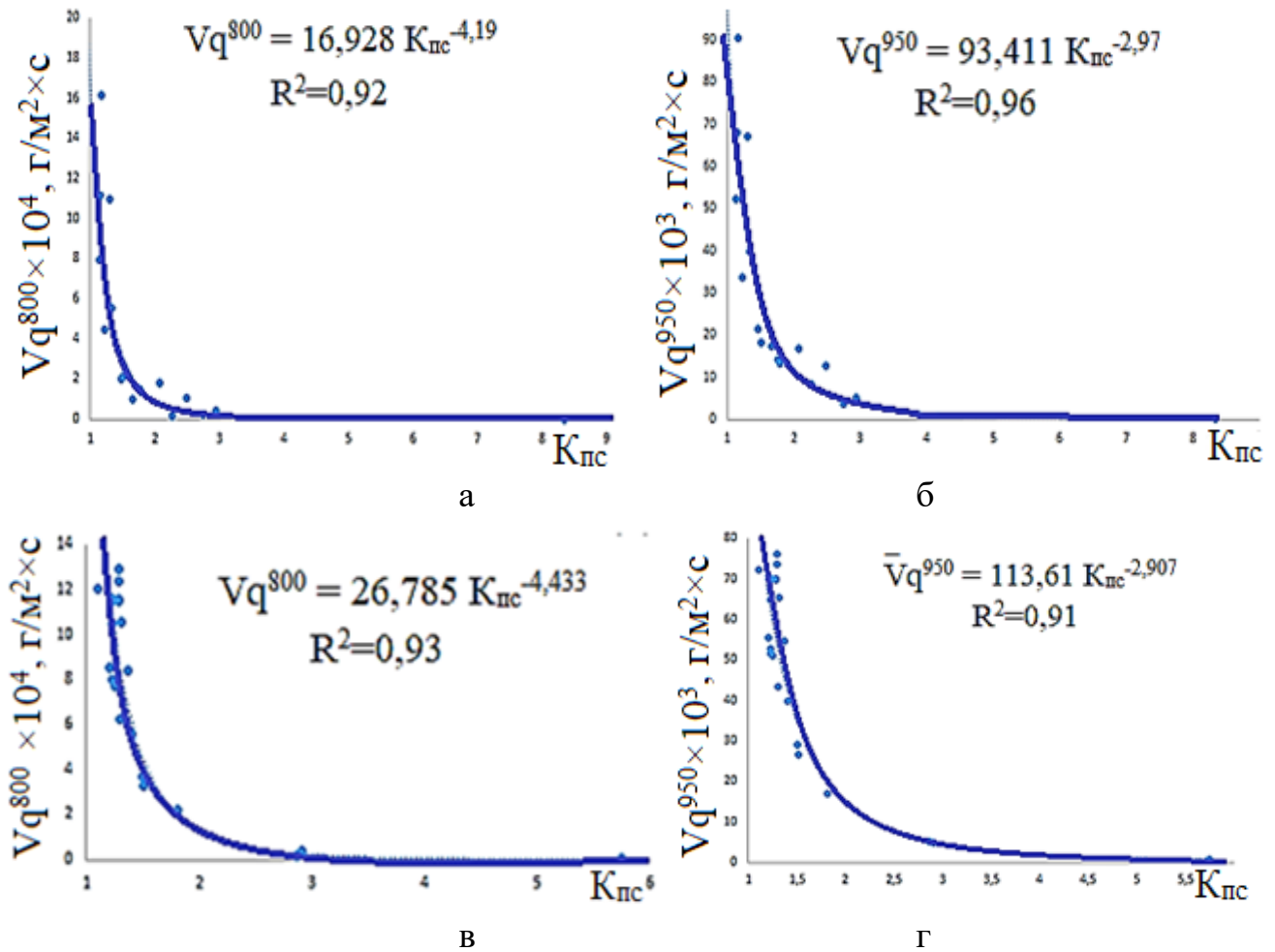
Сучасні жароміцні нікелеві сплави мають в своєму складі елементи, що знижують стійкість до високотемпературної корозії (вольфрам, молібден, вуглець та інші). Оцінка впливу кожного елементу окремо може бути неадекватною при різних варіантах легування сплавів, в зв'язку з цим, зроблена спроба врахування комплексної оцінки їх впливу за допомогою розробленого співвідношення Кпс:

$$K_{\text{пс}} = \text{Cr} \sqrt{\frac{(\text{Al}+\text{Ti}+\text{Nb}+\text{Ta}+\text{Hf})}{(\text{W}+\text{Mo}+\text{Co})}}, \quad (8)$$

де Al, Ti, Nb, Ta, Hf, Cr, W, Mo, Co – відповідний вміст елементів в сплаві, % мас.

З використанням співвідношення Кпс отримано залежності, які дозволяють встановити середню швидкість корозії (V_q^t) при різних температурах, за умов наближених до робочих. На рисунку 5 представлені залежності для відповідних температур, які мають експоненціальну залежність, тобто зі збільшенням Кпс швидкість корозії зменшується. Ці залежності пояснюються тим, що зі зростанням Кпс підвищується кількість легувальних елементів, які посилюють стійкість до високотемпературної корозії. Отже, за отриманими залежностями можливо встановити середню швидкість корозії для ливарного жароміцного нікелевого сплаву на етапі розробки хімічного складу.

У п'ятому розділі проаналізовано структурно-фазові склади ливарних ЖНС та виділено основні складові, що формують властивості. За останні десятиліття науковцями розроблено та впроваджено велику кількість методик встановлення хімічного складу зміцнювальної γ' -фази та її вплив на властивості сплавів. Однак в цих роботах майже не піддаються аналізу карбідні фази, які також впливають на робочі характеристики.



а, в- 800°C; б, г – 950°C

Рисунок 5 - Кореляційні залежності середньої швидкості корозії (V_q^t) сплавів рівновісної (а, б) та спрямованої (в, г) кристалізації від величини співвідношення $K_{пс}$

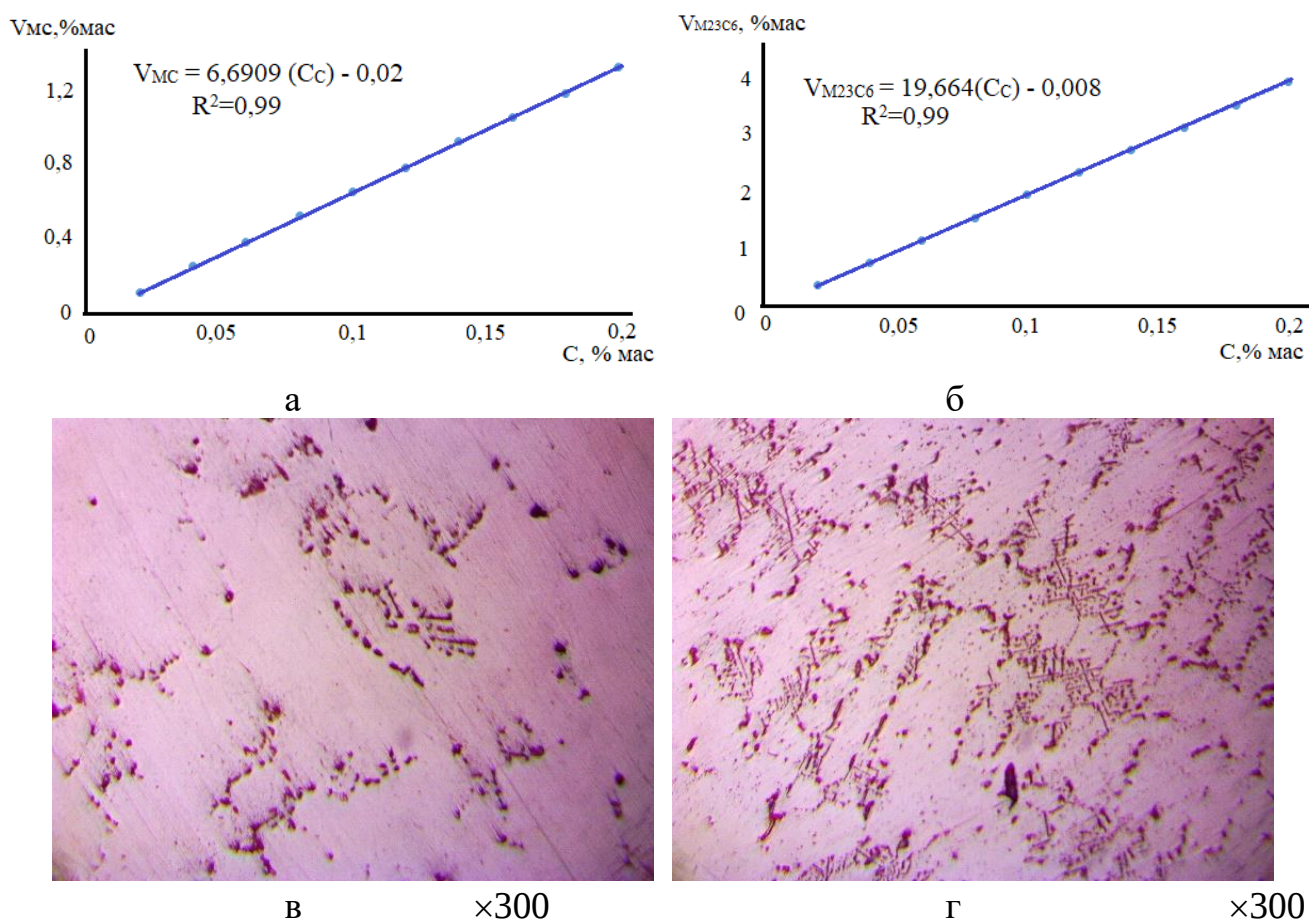
В складнолегованих жароміцних нікелевих сплавах утворюються карбіди типів MC , $M_{23}C_6$ та M_6C , тип та стабільність яких визначається легуванням. Карбіди MC мають найбільші показники міцності та стійкості до температур 1300°C. Однак в процесі експлуатації та термоциклювання вони можуть бути джерелом зародження тріщин. Тому для зменшення негативного впливу MC карбідів необхідно оптимізувати хімічний склад та зменшувати їхню кількість.

Карбіди типів $M_{23}C_6$ та M_6C позитивно впливають на повзучість (знижують зерномежове проковзування) при виділенні по межах зерен у вигляді перервних блочних виділень. Вони можуть утворюватися при кристалізації, високотемпературній та термічній обробці за наступними відомими реакціями:



В залежності від хімічного складу карбіди будуть мати різну стійкість при температурах експлуатації та схильність до переродження в топологічно щільноупаковані фази (ТЩП).

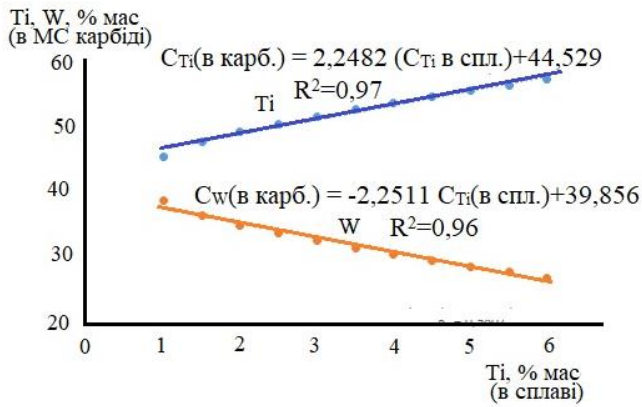
Завдяки зміні хімічного складу карбідів можливо зменшити негативні процеси та підвищити експлуатаційні властивості сплавів. В цьому розділі наведені результати розробки залежностей, які встановлюють взаємозв'язок між хімічним складом сплаву та хімічним складом карбідів, а також дозволяють визначати температури ліквідусу і об'ємний вміст карбідів. Зміна кількості карбідів залежить від вмісту вуглецю в сплаві прямопропорційно для карбідів MC та $M_{23}C_6$ одночасно в сплаві типу ЗМІ-3У (рис. 6). Тобто змінюючи кількість вуглецю в системі, можливо керувати об'ємним вмістом в ній карбідів.



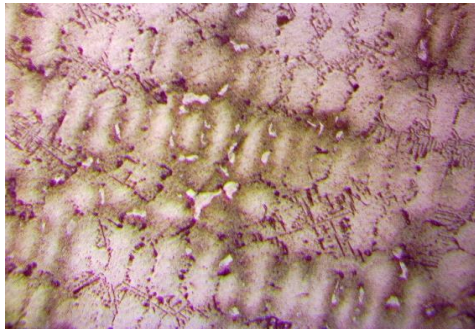
а – для карбідів MC; б – для карбідів $M_{23}C_6$; в – сплав з 0,1% вуглецю;
г – сплав з 0,18% вуглецю

Рисунок 6 – Залежності об'ємного вмісту карбідів від кількості вуглецю в ливарному жароміцному нікелевому сплаві типу ЗМІ-3У

При збільшенні кількості титану в сплаві, в карбіді MC поступово відбувається заміна атомів вольфраму титаном та відбувається перехід до карбіду типу TiC, який має шрифтову морфологію та знижує властивості сплаву (рис. 7). Введення танталу більше 2% приводить до витіснення атомів титану та вольфраму з карбіду і утворення більш стабільних карбідів типу TaC, які під час експлуатації не зазнають розпаду та позитивно впливають на властивості сплаву.

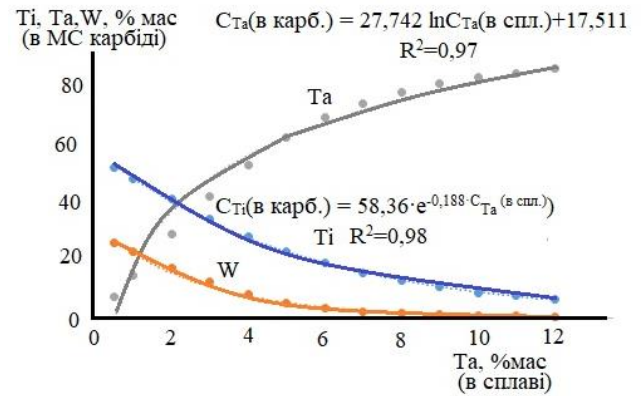


а

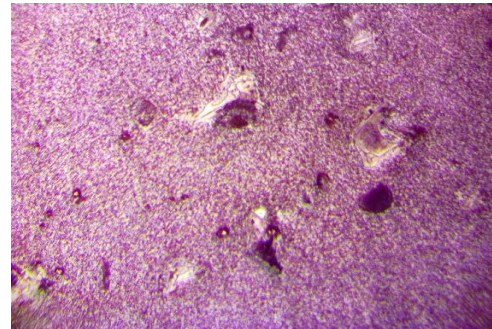


в

×400

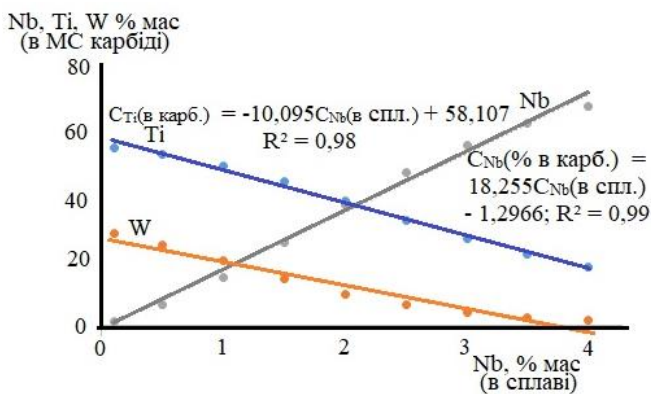


б

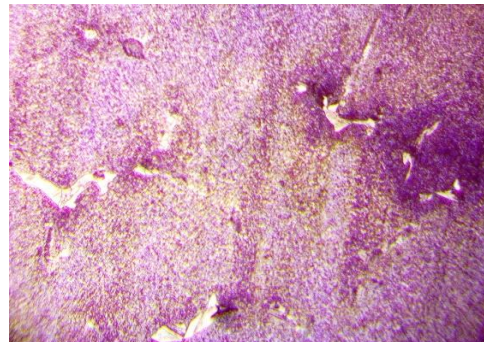


г

×520

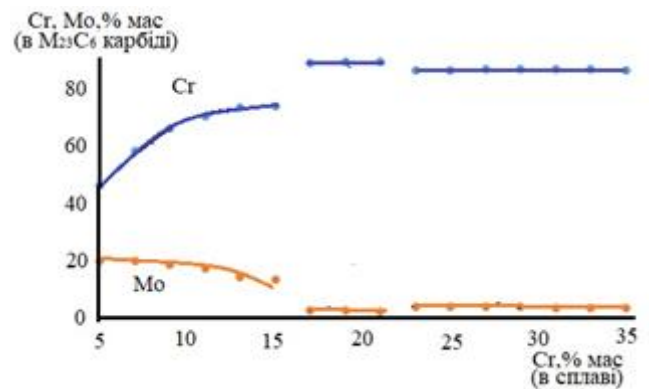


д



ж

×520



е

а- від кількості титану; б – від кількості танталу; в – шрифтові карбіди типу TiC;
г – карбіди типу TaC ограненої форми; д - від кількості ніобію; е - від кількості хрому;
ж – карбіди типу (Nb, Ti)C неправильної ограненої форми

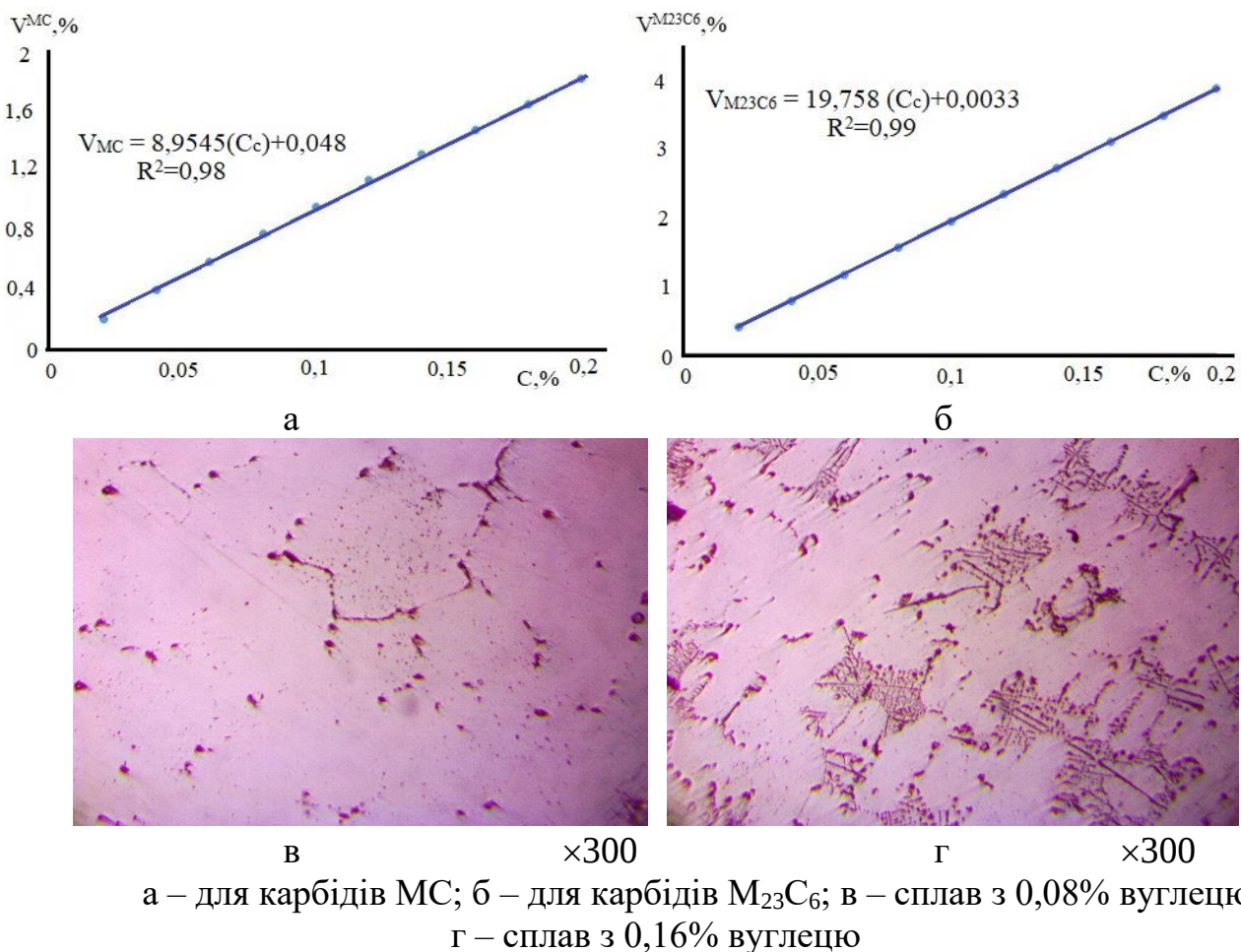
Рисунок 7 – Залежність хімічного складу та морфології карбідів типу МС від вмісту легувальних елементів в ливарному жароміцному нікелевому сплаві типу ЗМІ-3У

Додаткове легування ніобієм утворює складний карбід типу $(W, Ti, Nb)C$ (з високим вмістом титану) шпигунової форми, що знижує експлуатаційні показники. При 2,5% ніобію в сплавi, карбід змінює основу на $(Nb, Ti)C$, в якому атоми титану поступово замінюються ніобієм. Зміна складу карбїду призводить до утворення ограненої неправильної форми виділень, що мають підвищену стійкість в умовах високотемпературної роботи матеріалу (див. рис. 7).

Збільшення хрому в сплавах даного класу призводить до зниження властивостей. По-перше, завдяки утворенню каркасу із карбїдів типу $M_{23}C_6$ по межах зерен, по-друге – виділенням σ -фази при досягненні 15% хрому в сплавi та α -твердого розчину на основі хрому при 23% Cr (див. рис. 7). Всi вищенаведені фази мають підвищені показники міцності та знижену пластичність, тому вони будуть виступати центрами зародження тріщин під час експлуатації.

Доволі поширеним сплавом, що використовують при виготовленні газотурбінних двигунів та установок є GTD-111. Сплав легований близько 10 елементами, які забезпечують дотримання висунутих експлуатаційних вимог.

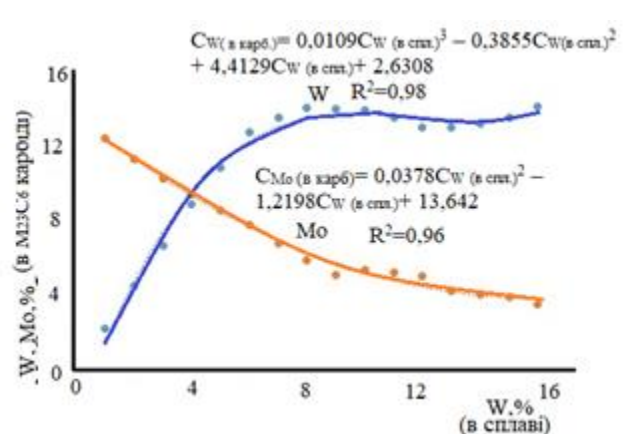
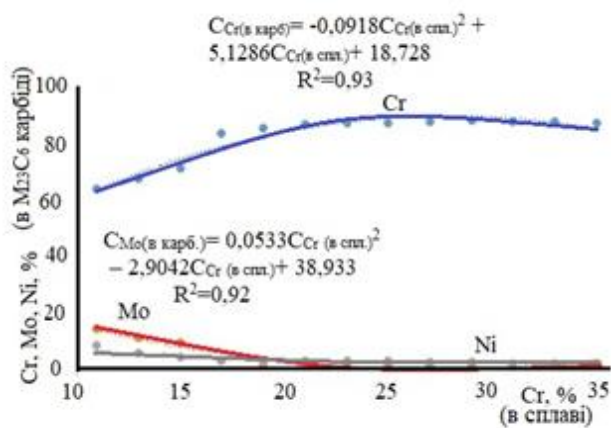
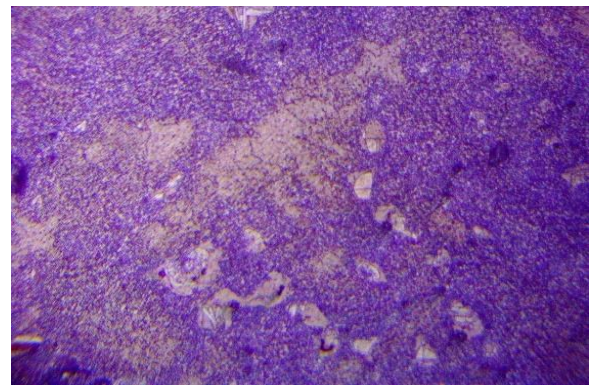
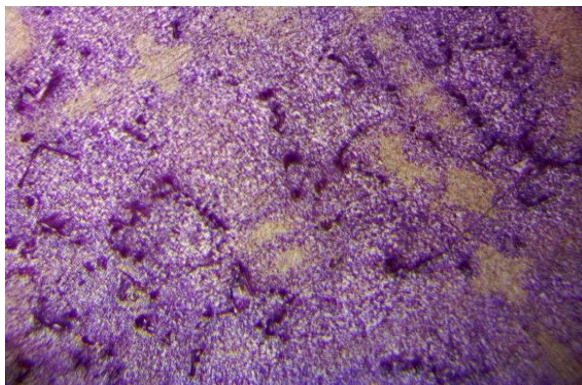
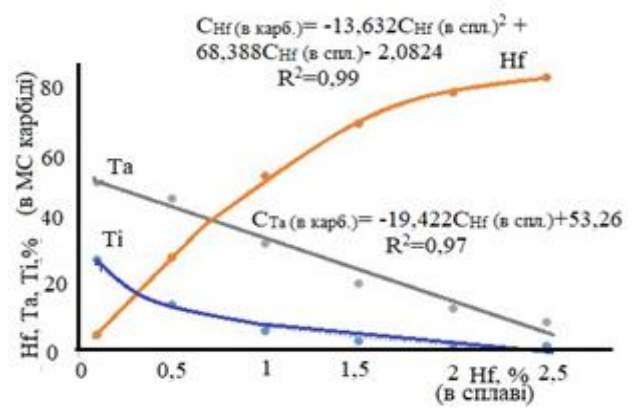
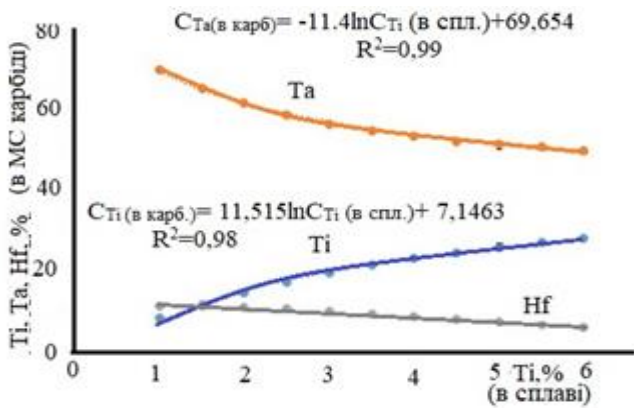
Зі збільшенням кількості вуглецю в сплавi зростає кількість карбїдів по прямопропорційній залежності (рис. 8). Все ж прагнути до максимальної кількості карбїдів в сплавi не є раціональним, через зниження експлуатаційних характеристик сплаву.



а – для карбїдів MC; б – для карбїдів $M_{23}C_6$; в – сплав з 0,08% вуглецю;
г – сплав з 0,16% вуглецю

Рисунок 8 – Залежності об'ємного вмісту карбїдів від кількості вуглецю в системі типу GTD-111

Збільшення кількості титану в сплаві приводе не тільки до збільшення кількості γ' -фази, а і до зростання концентрації Ті в карбіді (рис. 9), оскільки зміна основи карбіду викликає трансформацію морфології з округлої до шрифтової форми, що знижує стійкість таких включень до навантажень. Карбіди на основі титану утворюються при температурах нижче солідусу сплаву в міждендритних областях і мають шрифтову форму.



а - від кількості титану; б – від кількості гафнію; в – шрифтові карбіди типу TiC; г – карбіди типу HfC округлої форми; д - від кількості хрому; е - від кількості вольфраму

Рисунок 9 – Залежність хімічного складу та морфології карбідів типу MC від вмісту титану та гафнію в ливарному жароміцному нікелевому сплаві типу GTD-111

Гафній позитивно впливає на властивості сплавів завдяки покращенню морфології карбідів, в результаті чого підвищується одночасно міцність і пластичність. Основа карбідів MC змінюється при вмісті 0,75% Hf в сплаві (див. рис. 9), форма виділень перетворюється на округлу, оскільки такі карбіди утворюються при температурах, значно вищих за солідус. Ці карбіди мають високу енергію зв'язку, що утруднює реакції розпаду з утворенням M_6C та $M_{23}C_6$.

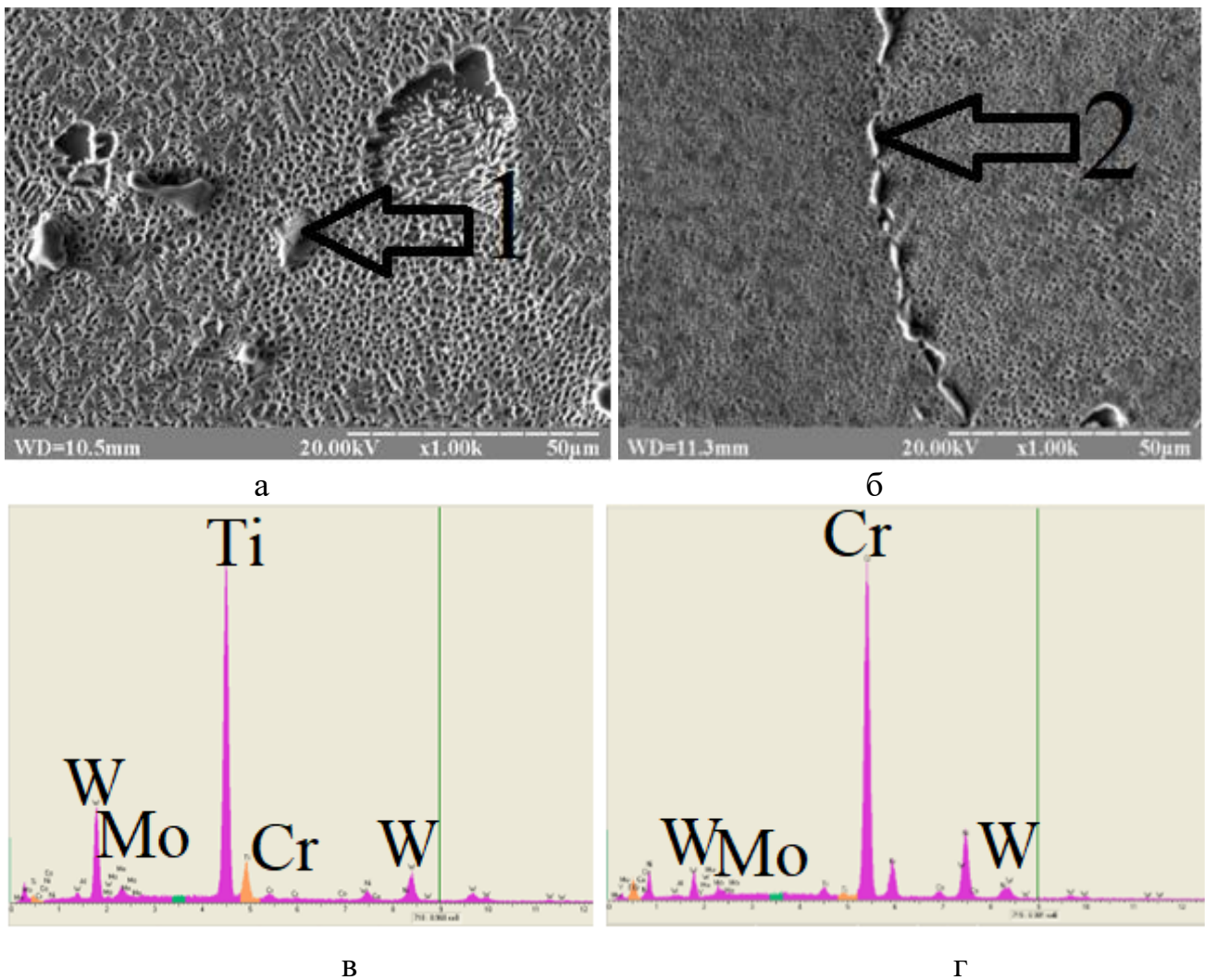
Для покращення опору високотемпературній корозії в сплавах збільшують вміст хрому, але збільшення його концентрації викликає появу σ -фази та α -твердого розчину на основі хрому при 17 та 25% відповідно. Ці фази окрихчують сплав, оскільки утворюються на зерномежових карбідах у вигляді пластин зигзагоподібної форми та змінюють розподіл хімічних елементів в сплаві.

З метою підвищення критичних температур та температури рекристалізації в ливарні ЖНС вводять важкоплавкі елементи такі як вольфрам. Однак це може призвести до виділення небажаних ТЩУ- фаз, що мають пластинчасту форму і мінімальну пластичність. Вже за 10%W в сплаві GTD-111 утворюється σ -фаза, а концентрація вольфраму в карбіді досягає максимального значення 14%. Таку поведінку важкоплавких елементів слід враховувати при виборі раціонального легування сплавів на основі нікелю.

В шостому розділі проведено порівняльний аналіз розрахункових та експериментальних даних хімічних складів карбідів у сплаві ЗМІ-ЗУ. Встановлено, що до складу карбідів входять титан, вольфрам, молібден, хром і кобальт. В таблиці 5 наведено хімічний склад карбідів в сплаві ЗМІ-ЗУ, у відповідних точках мікроструктури (рис. 10).

Таблиця 5 - Хімічний склад карбідів, розрахований за встановленими моделями і експериментально визначені рентгеноспектральним мікроаналізом в сплаві ЗМІ-ЗУ

Метод отримання результатів	Хімічний склад карбідів при 20°C, % за масою [ат. %]						
	Ti	W	Mo	Cr	Ni	Co	C
ЗМІ-ЗУ							
Розрахований за встановленими моделями (MC)	55,7 [45,82]	28,68 [6,14]	0,15 [0,06]	0,58 [0,43]	-	-	14,4 [47,4]
Експериментально визначений (MC) (див. рис. 10, точка 1)	53,59 ±5,8 [44,4]	28,21 ±5,3 [6,08]	1,59 ±0,1 [0,65]	0,26 ±0,1 [0,19]	-	0,29 ±0,1 [0,19]	14,3 ±1,6 [47,2]
Розрахований за встановленими моделями ($M_{23}C_6$)	-	14,87 [4,14]	6,94 [3,7]	66,22 [65,29]	5,8 [5,07]	1,33 [1,15]	4,83 [20,61]
Експериментально визначений ($M_{23}C_6$) (див. рис.10, точка 2)	-	14,14 ±2,1 [3,88]	7,31 ±0,5 [3,85]	66,28 ±6,8 [64,45]	5,36 ±1,2 [4,64]	1,73 ±0,5 [1,48]	5,15 ±0,8 [21,68]

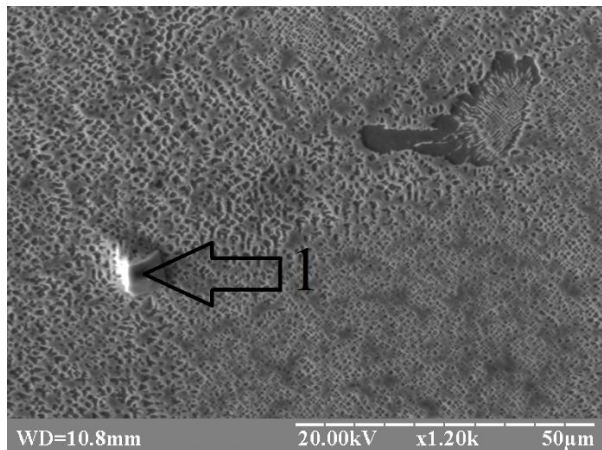


а, б – місця проведення аналізу; в, г – спектри випромінювання

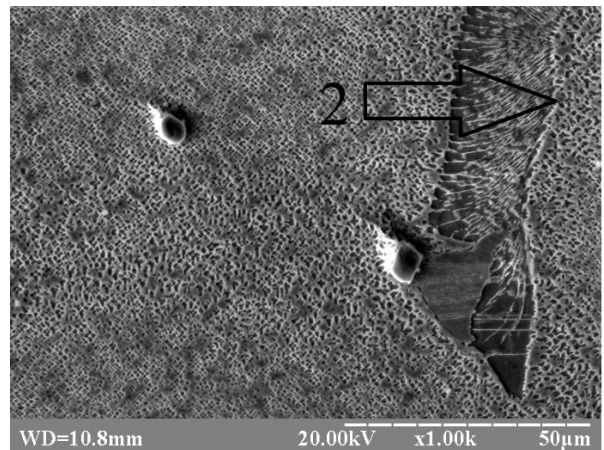
Рисунок 10 – Карбіди в структурі сплаву ЗМІ-3У та спектри випромінювання від позначених точок

Використання отриманих залежностей показало, що розрахункові значення, мають збіжність з експериментальними даними з похибкою не більше 6%. Втім кількість молібдену і вольфраму дещо завищені при експериментальному визначенні. Збільшення молібдену можливо для карбідів такого типу завдяки заміни деякої частини вольфраму молібденом. Кобальт має бути відсутнім в карбідах МС, проте відомі випадки, коли Со може знаходитися в невеликих кількостях в первинних карбідах, заміщуючи хром.

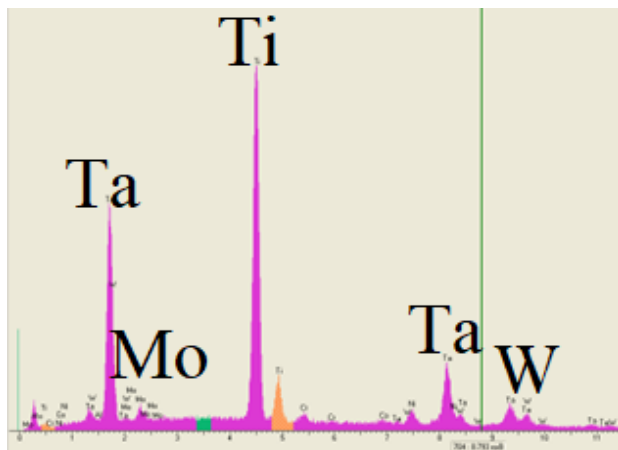
Апробація отриманих залежностей здійснювалась на ливарному жароміцному нікелевому сплаві GTD-111. Морфологія МС карбідів, яка найбільш часто зустрічається в структурі сплавів даного класу, має вигляд окремих блоків (рис. 11, точка 1). Карбіди типу $M_{23}C_6$ (рис. 11, точка 2) присутні в переривчастих блокової і пластинчастої формах (табл. 6). Найбільш раціональним є блоковий тип виділень карбідів, оскільки в цьому випадку концентрація напружень з матрицею знаходяться на мінімально можливому рівні.



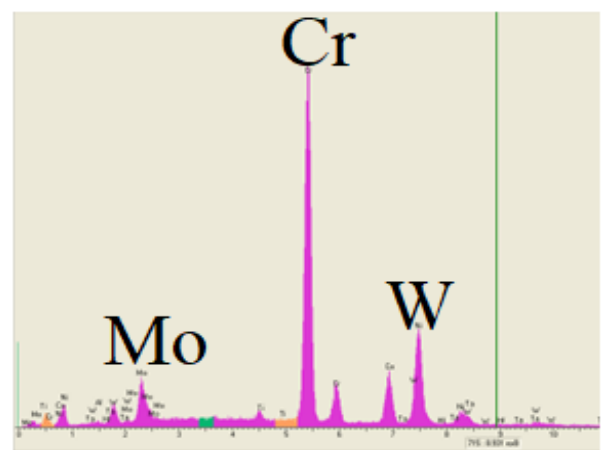
а



б



в



г

а, б – місця проведення аналізу; в, г – спектри випромінення

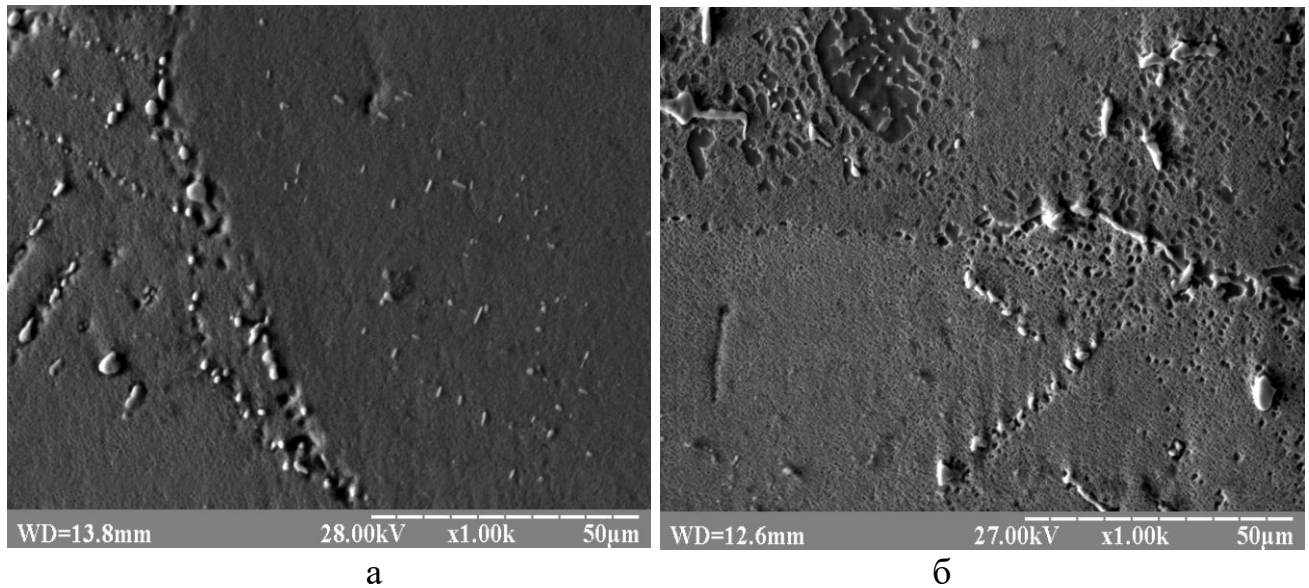
Рисунок 11 – Карбіди в структурі сплаву GTD-111 та спектри випромінення від позначених точок

Таблиця 6 – Хімічний склад карбідів, розрахованих за встановленими залежностями і експериментально визначений рентгеноспектральним мікроаналізом в сплаві GTD-111

Метод отримання результатів	Вміст елементу, % за масою [ат. %]								
	Ta	Ti	W	Mo	Co	Ni	Cr	Hf	C
Розрахований за встановленими моделями МС	51,4 [16,1]	27 [32,04]	4,3 [1,32]	-	-	-	-	7,1 [2,25]	10,2 [48,23]
Розрахований за встановленими моделями $M_{23}C_6$	-	-	8,3 [2,22]	9,8 [5,03]	2,4 [2]	4,4 [3,69]	70,1 [66,5]	-	5,0 [20,53]
Експериментально визначений МС (див. рис. 11, точка 1)	53,6 $\pm 3,1$ [16,9]	26,3 $\pm 0,9$ [31,4]	3,2 $\pm 0,4$ [0,99]	-	-	-	-	6,7 $\pm 0,3$ [2,14]	10,2 $\pm 0,4$ [48,53]
Експериментально визначений $M_{23}C_6$ (див. рис.11, точка 2)	-	-	9,5 $\pm 0,3$ [2,57]	10,2 $\pm 0,4$ [5,3]	1,9 $\pm 0,1$ [1,6]	6,1 $\pm 0,3$ [5,18]	67,3 $\pm 3,8$ [64,5]	-	5,0 $\pm 0,2$ [20,76]

Експериментально підтверджено, що дані, отримані розрахунковим (за встановленими залежностями) та експериментальним методами, мають похибку яка не перевищує 7%.

Структури, наведені на рисунку 9, є наслідком проходження перерозподілу елементів, що знаходяться в матриці сплаву та карбідних фазах. Структурно-енергетичний стан, який визначає морфологію карбідів (рис. 12), пов'язаний зі зміною складів карбідних фаз (див. табл. 6) (в процесі розчинення-виділення) і зміною відносних вільних енергій меж, пов'язаних з двогранними кутами взаємного контакту (в полях зору мікроструктури сплавів).



а – 3MI-3Y; б - GTD-111

Рисунок 12 – Ланцюжкові карбіди в ливарних жароміцних нікелевих сплавах

Відповідно до характеру контурів карбідних виділень (гладких або вигнутих) мають місце такі залежності вільних енергій від кутів контакту фаз в межзерених і міжфазних стиках:

- в разі гладких контурів:

$$\frac{\gamma^{KM}}{\gamma^{MM}} = \frac{1}{2 \cos \frac{\Theta}{2}}, \quad (12)$$

-а при двічі вигнутих контурах:

$$\frac{\gamma^{KM}}{\gamma^{MM}} = \frac{1}{2 (\cos \frac{\Theta}{2} - \sin \frac{\Theta}{2} \times \tan \frac{\Theta}{2})}, \quad (13)$$

де γ^{KM} - міжфазна енергія на межі матриця-карбідна фаза;

γ^{MM} - міжзеренна енергія на межі матриця-матриця (енергія порівняння);

Θ - рівноважний двогранний кут.

Відповідно до вищенаведених формул, проведена усереднена оцінка відносної енергії для різних видів карбідів. Так, для сфероїдальних типів карбідів (з кутами Θ 45...120°) відносна енергія знаходиться на рівні 0,53...0,85, а для кутових виділень (з кутами Θ 30...80°) відносна енергія становить 0,57...1,28.

Схильність до коалесценції можна оцінити за допомогою енергетичного критерію:

$$\eta = \frac{\sum_i \gamma^1}{\gamma^2}, \quad (14)$$

де $\sum_i \gamma^1$ - сумарна міжфазних енергій ланцюга з n рівних часток, які коалісцують за певний час в одну частинку;

γ^2 - міжфазна енергія всієї поверхні частинки і частини межі розділу, яка звільнилася при зміні загальної поверхні частинок.

У вище приведених формулах цей фактор набуває вигляду таких співвідношень відповідно до зміни кута Θ :

-для гладкого контуру:

$$\eta(\Theta, n) = \frac{\Theta}{\sin \Theta + \frac{1}{\sqrt{n}} (\Theta - \sin \Theta)}; \quad (15)$$

-для двічі вигнутого контуру:

$$\eta(\Theta, n) = \frac{\Theta}{1 - 2(1 - \frac{1}{\sqrt{n}}) \sin^2 \frac{\Theta}{2}} \quad (16)$$

З використанням цих виразів проведена усереднена оцінка швидкості коалісценції для розглянутих типів карбідних фаз (МС і $M_{23}C_6$). Так, для сфероїдальних типів карбідів (з кутами Θ 45...120°) швидкості коалісценції знаходяться на рівні 8,77...9,38, а для кутових виділень (з кутами Θ 30...80°) - на рівні 1,09...2, 27.

Таким чином, якщо в кінцевій структурі мають місце виділення ланцюгового виду, то для можливості зменшення швидкостей міжзереного проковзування, необхідна оцінка схильності таких фазових виділень до взаємної коалісценції (щоб оптимізувати цей кінетичний фактор та зменшити зерномежове проковзування).

В дисертаційній роботі проведено дослідження по визначенню зв'язку між хімічним складом сплаву та складом карбідів на промислових сплавах (окрім тих, що розглянуті вище) різної технології виробництва таких як: ЖС6К, ЖС6У, ВХ4Л, ЖС26, ЖС32-ВІ, ЖС32Б-ВІ, ЖС32Е-ВІ.

На основі встановлених залежностей, за якими можливо розрахунково визначити основні властивості ливарних ЖНС, розроблено алгоритм, який дає змогу проєктувати нові сплави даного класу або модернізувати склади існуючих промислових марок з необхідним рівнем властивостей. Новий концептуальний підхід до розробки сплавів шляхом оптимізації їх хімічного складу реалізовано в загальному алгоритмі, що представлено на рисунку 13.



Рисунок 13 – Алгоритм методики конструювання та удосконалення хімічного складу ливарних жароміцних нікелевих сплавів

Алгоритм методики конструювання та удосконалення складів ливарних ЖНС включає виконання наступних етапів:

- розробляється технічне завдання на сплав, на основі вимог конструкторів і технологів;
- відповідно до технічного завдання формується перелік вимог до сплаву, які задаються з урахуванням особливостей умов його експлуатації;
- визначається сплав-аналог і сплав-прототип з метою вибору дослідних складів сплавів;
- на основі заданих параметрів визначаються основні характеристики сплавів. У разі невідповідності до висунутих вимог, хімічні склади змінюються. Після порівняльного аналізу отриманих розрахункових властивостей визначається один - найбільш оптимальний склад;
- в промислових умовах здійснюються тестові плавки оптимізованого складу сплаву і встановлення властивостей дослідних зразків.

Створений алгоритм конструювання та удосконалення хімічного складу дозволяє оптимізувати склад ливарних ЖНС, без проведення експериментів та визначити основні характеристики сплавів розрахунково.

У цьому розділі представлено результати розробки нового сплаву для виготовлення корпусних деталей газотурбінних установок, за створеним алгоритмом на основі встановлених залежностей.

На початковому етапі розробки було сформульовано вимоги до рівня контрольованих характеристик, які закладалися в розрахунок для оптимізації хімічного складу сплаву, що розробляється на основі умов експлуатації виробів (табл. 7).

Таблиця 7 - Контрольовані параметри для оптимізації складу сплаву, що розробляється

Контрольовані параметри	Одиниця виміру	Величина параметра
Температура солідусу, t_s	°C	≥ 1290
Температура кінця розчинення γ' - фази, $t_{к.р.}^{\gamma'}$	°C	≥ 950
Температурний інтервал для проведення гомогенізації, $\Delta t_{гом.}$	°C	≥ 20
Об'ємна частка зміцнювальної γ' - фази в структурі при 20°C, $V_{\gamma'}^{20}$	%, за масою	$15 < V_{\gamma'}^{20} < 25$
Границя короткочасної міцності при 20°C, σ_B^{20}	МПа	≥ 700
Відносне видовження при 20°C, δ^{20}	%	≥ 15
Ударна вязкість при 20°C, КСУ	Дж/см ²	≥ 25
Час до руйнування зразків (довговічність) при τ_{40}^{800}	годин	≥ 40
Корозійні властивості, (V_q^t)	г / м ² · с	0,002...0,09

Для отримання дослідних композицій за основу було обрано відомі промислові ливарні жароміцні нікелеві сплави ВЖ98Л та ЖСЗЛС, як найбільш близькі за науково-технічною сутністю і очікуваному результату. Пошук оптимальної композиції сплаву, проводили в новій системі легування Ni-Co-Cr-Al-Ti-Mo-W-Ta-Hf-Zr-B-C шляхом покрокового варіювання легувальних елементів (табл. 8).

Таблиця 8 - Хімічний склад експериментальних сплавів

№ складу	Вміст елементу %, за масою; Ni - основа										
	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	Ta	Hf	Zr
1	0,12	22,0	7,5	1,3	2,5	1,9	1,9	1,9	1,9	0,6	0,03
2	0,10	22,5	8,0	1,6	3,0	1,6	1,6	1,6	1,6	0,8	0,03
3	0,08	23,0	8,5	1,9	3,5	1,3	1,3	1,3	1,3	1,0	0,03
4	0,06	23,5	9,0	2,2	4,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	0,03
5	0,04	24,0	9,5	2,5	4,5	0,7	0,7	0,7	0,7	1,5	0,03

Відповідно з розробленим алгоритмом для дослідних складів 1...5 (див. табл. 8), були розраховані показники за контрольованими характеристиками. Розрахункові результати порівнювалися з рівнем контрольованих показників (див. табл. 7), що дозволило їх оцінити за заданими критеріями і обрати для подальших експериментальних досліджень найбільш оптимальний склад 3.

Оптимальний склад 3 за властивостями має такі розрахункові показники:

- теплофізичні характеристики: $t_L = 1361^\circ\text{C}$; $t_S = 1298^\circ\text{C}$; $t_{\text{свт.}} = 1204^\circ\text{C}$; $t_{\text{п.р.}}^{\gamma'} = 968^\circ\text{C}$; $\Delta t_{\text{к.р.}} = 63^\circ\text{C}$; $\Delta t_{\text{гом.}} = 236^\circ\text{C}$;
- механічні властивості: короткотривала міцність (σ_B^t), при кімнатній температурі - $\sigma_B^{20} = 705,1 \text{ МПа}$; довготривала 100-годинна міцність (σ_{100}^t), для температури 1000°C : $\sigma_{100}^{1000} = 36 \text{ МПа}$; густина матеріалу - $\rho = 8,41 \text{ г/см}^3$;
- корозійні характеристики: $\bar{V}_q^{800} = 0,0021 \cdot 10^{-4}$; $\bar{V}_q^{850} = 0,006 \cdot 10^{-3}$; $\bar{V}_q^{900} = 0,0366 \cdot 10^{-3}$; $\bar{V}_q^{950} = 0,0620 \cdot 10^{-3}$, $\text{г/м}^2 \cdot \text{с}$;
- структурно-фазові характеристики при 20°C , % за масою: об'ємна частка ($V_{\gamma'}^t$)%, зміцнювальної γ' - фази в структурі для температур 20°C - $V_{\gamma'}^{20} = 22,5\%$; хімічний склад карбіду типу $\text{MC} = 10\text{Ti}-37,78\text{Nb}-25,34\text{Ta}-16,5\text{Hf}-0,48\text{W}-0,15\text{Cr}-9,44\text{C}$; хімічний склад карбіду типу $\text{M}_{23}\text{C}_6 = 69,5\text{Cr}-13,6\text{Mo}-5,6\text{Ni}-4,48\text{W}-1,69\text{Co}-5,1\text{C}$.

Виходячи з порівняльного аналізу заданих контрольованих параметрів та отриманих розрахункових даних було обрано за оптимальний варіант експериментальний склад 3. Цей склад було прийнято за середній рівень легування з присвоєнням йому марки ЗМІ-М8.

Експериментальні дослідження властивостей було здійснено на зразках з рівноважною структурою, отриманих за експериментальною технологією в умовах підприємства ПАТ «МОТОР СІЧ».

Металографічні дослідження показали, що в литому стані мікроструктура зразків сплаву ЗМІ-М8 представляє собою рівноважну структуру дендритної будови, γ - твердий розчин, зміцнювальну γ' - фазу, евтектику ($\gamma + \gamma'$) і карбідні фази.

З метою отримання повного спектра характеристик дослідного сплаву, проводили визначення механічних властивостей (табл. 9). У відповідності з кожним етапом експериментального термічного оброблення, внаслідок структурних змін в матеріалі, характеристики пластичності сплаву знижувались, а міцність зростала. Так, структура після литва характеризується високою ліквациєю, метастабільністю та накопиченням внутрішніх напружень. Гартування приводить до зниження ліквацийного впливу та розчинення метастабільних фаз. Старіння викликає максимальну стабілізацію структури та виділення зміцнювальної γ' -фази, внаслідок чого зростає міцність сплаву. Оптимальні властивості, які знаходяться на вищому рівні контрольованих характеристик, досягаються після повного циклу термічного оброблення.

На рисунку 14 представлена структура сплаву ЗМІ-М8 в литому стані при рівноважній кристалізації. Спостерігаються структурні складові грубої форми, що є типовим для ливарного сплаву.

Таблиця 9 – Механічні властивості сплаву ЗМІ-М8 в залежності від етапу термічного оброблення

Етап термічного оброблення	Механічні властивості при 20°C			Тривала міцність, довговічність при 800°C
	σ_B , МПа	δ , %	KCU, Дж/см ²	τ_{210}^{800} , годин
Без термічного оброблення (литво)	660±9	21±2	39±4	330±10
Гартування 1180 ± 15 °C, витримка 4 години, охолодження на повітрі	570±9	28±3	94±5	310±15
Гартування 1180 ± 15 °C, витримка 4 години, охолодження на повітрі. Старіння при 900 ± 10°C, витримка 16 годин, охолодження на повітрі	670 ±10	16±2	37±3	310±10
Вимоги до рівня контрольованих характеристик	≥650	≥15	≥25	≥40

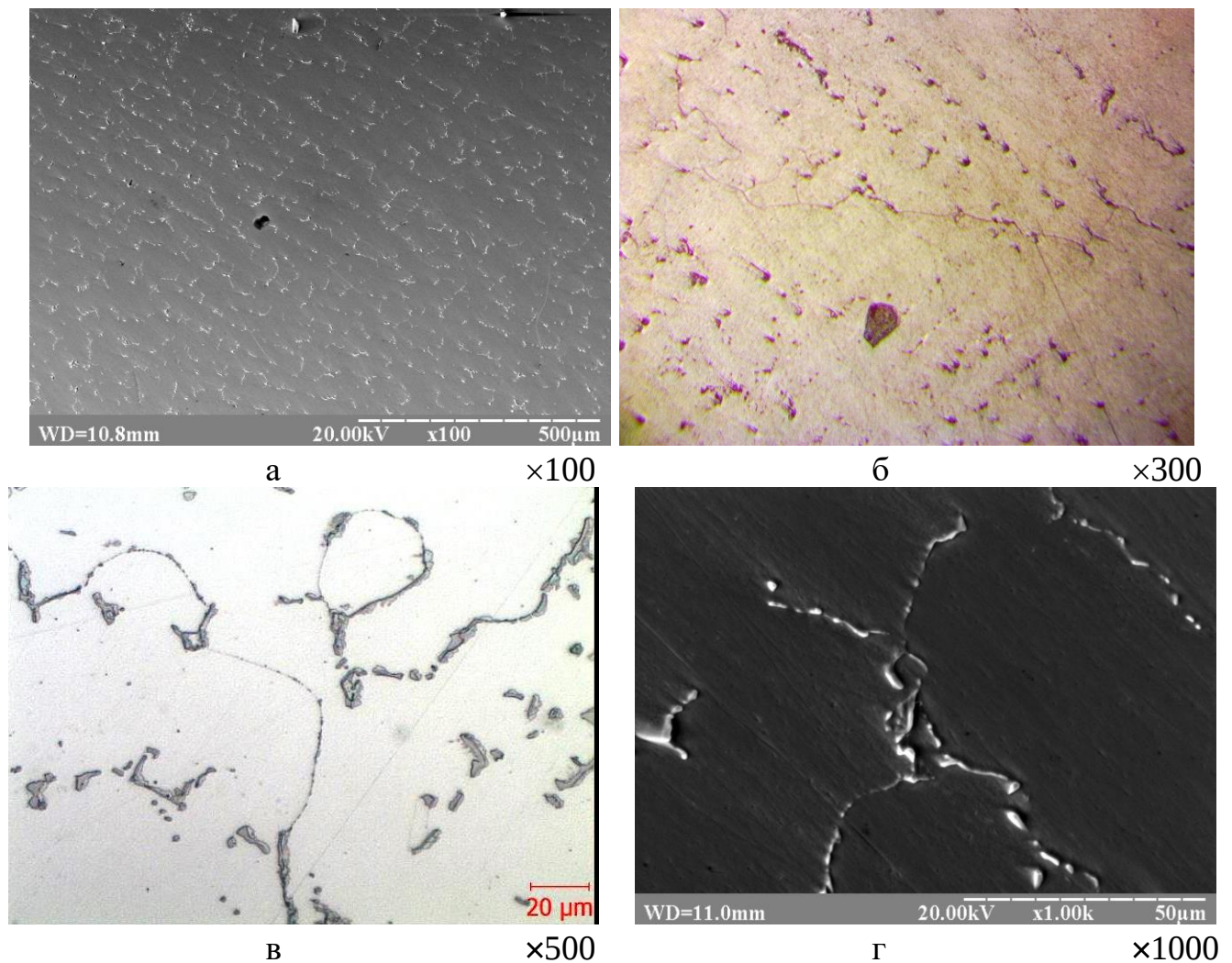
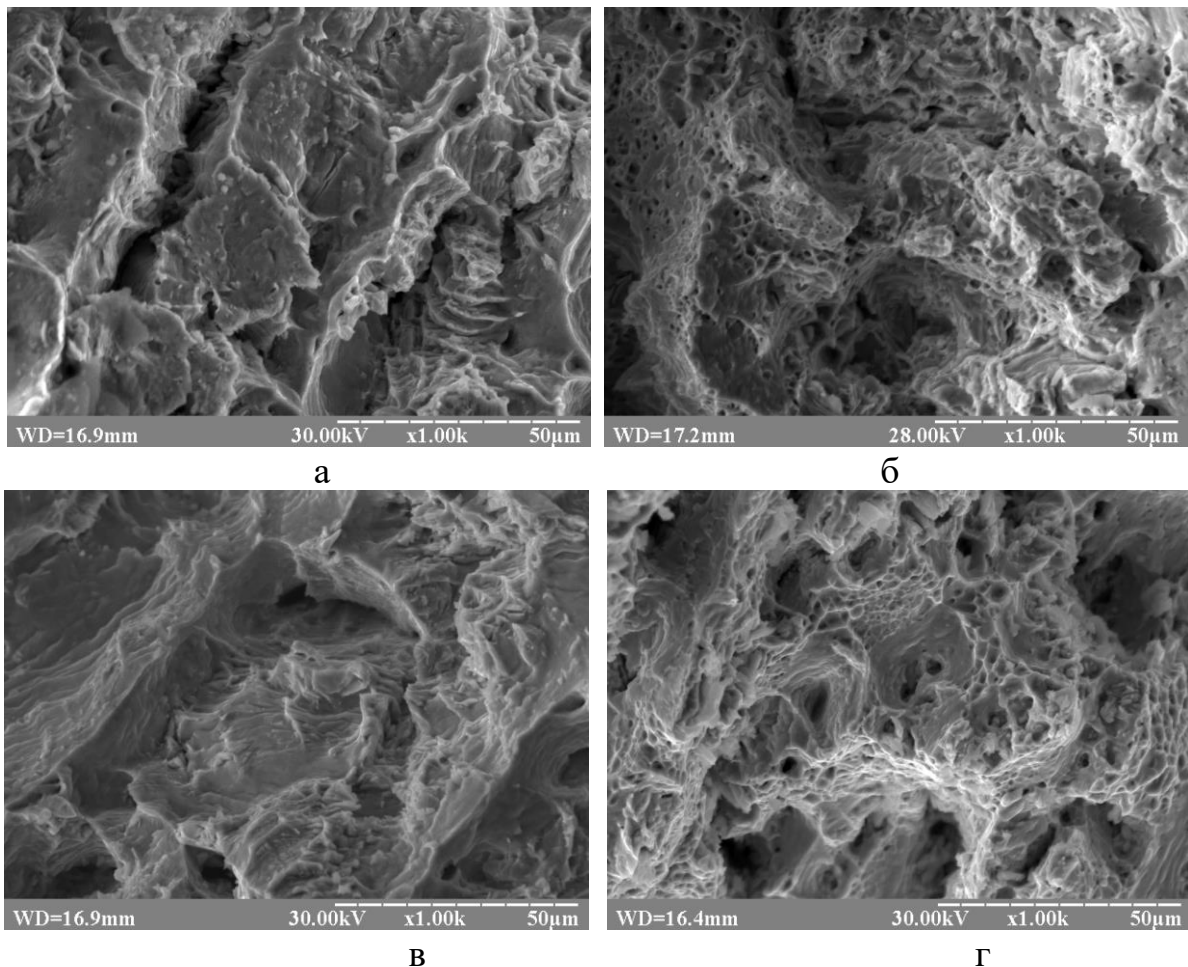


Рисунок 14 - Мікроструктура зразків рівновісної кристалізації сплаву ЗМІ-М8 в литому стані при різному збільшенні

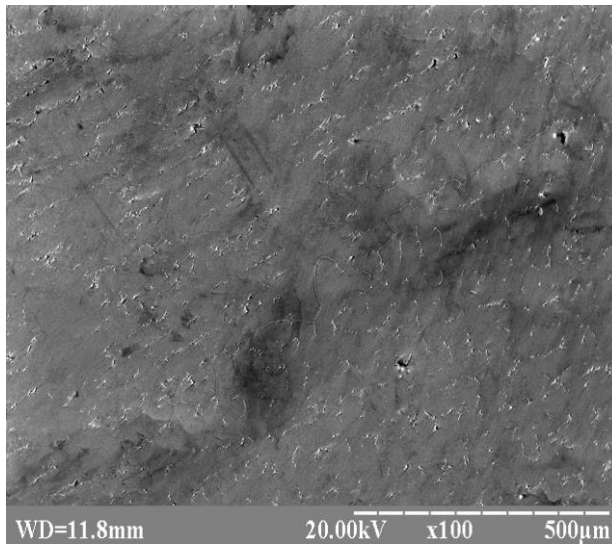
На поверхнях руйнування випробуваних зразків (рис.15) спостерігаються структурні складові, що відповідають пластичному характеру руйнування (ямки, що утворюються в процесі пластичної течії металу, зародження яких може відбуватися на вторинних фазах чи мікронесуцільностях) та крихкому руйнуванню (гребні і сходинки, що утворюються внаслідок перемичок між елементами зламу та при з'єднанні двох поверхонь руйнування). Значна кількість структурних складових, яка відповідає пластичному руйнуванню, спостерігається після гартування (див. рис. 15, б), завдяки утворенню однорідної структури. Також значна кількість ямок присутня на зламах після довготривалих випробувань при підвищених температурах, що свідчить про збільшення рухомості атомів при підвищених температурах (див. рис. 15, г).



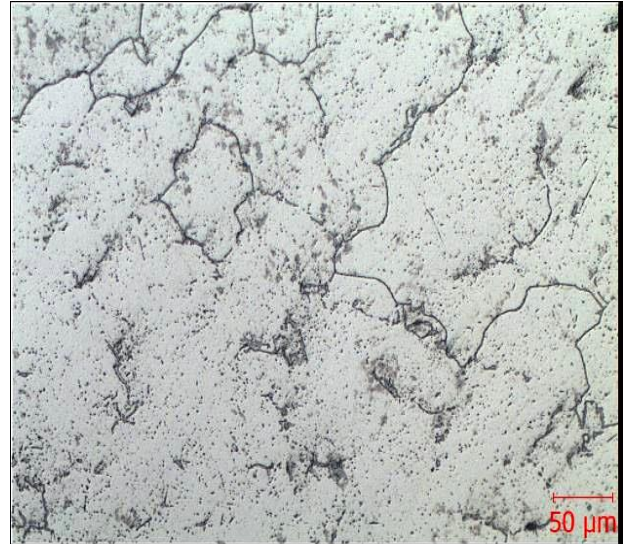
а - після литва; б – гартування; в - гартування і старіння; г - довготривалих випробувань

Рисунок 15 – Поверхні руйнування зразків сплаву ЗМІ-М8 після випробувань

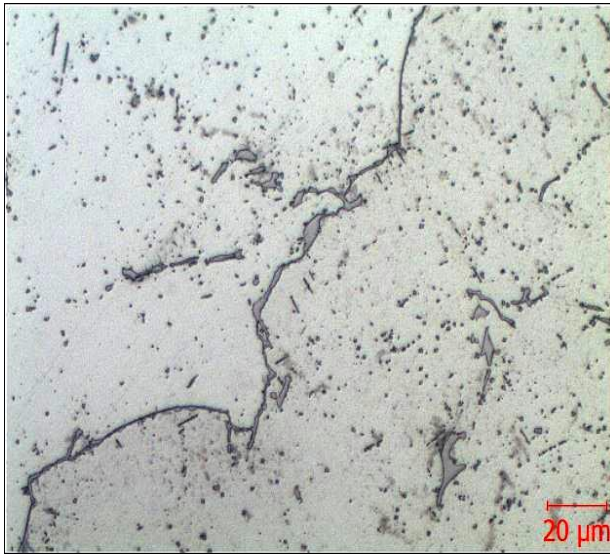
На рисунку 16 наведено структури сплаву ЗМІ-М8 після повного циклу термічного оброблення (гартування $1180 \pm 15^\circ\text{C}$, витримка 4 години, охолодження на повітрі; старіння при $900 \pm 10^\circ\text{C}$, витримка 16 годин, охолодження на повітрі), що характеризується рівномірним розподілом карбідів МС округлої форми, карбідів M_{23}C_6 , розташованих по межах зерен у вигляді блоків, що перериваються, γ -твердого розчину та γ' -фази.



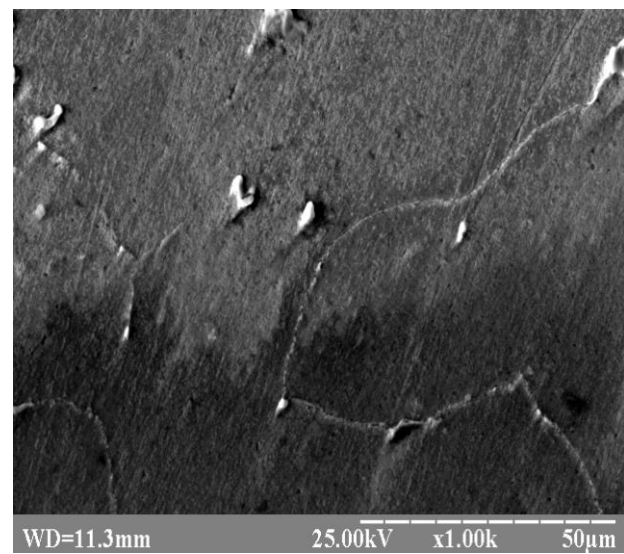
а ×100



б ×200



в ×500



г ×1000

Рисунок 16 - Структура сплаву ЗМІ-М8 після термічної обробки

Встановлено, що в процесі термооброблення зникають метастабільні карбіди типу МС з підвищеним вмістом хрому, вольфраму та титану і зниженим вмістом ніобію та гафнію. При цьому карбіди типу $M_{23}C_6$ ідентифікуються тільки після повного циклу термічного оброблення.

Порівняльний аналіз експериментально визначеного складу карбідів та розрахункових значень (табл. 10) виявив незначну розбіжність (не більше 5% мас.). Таким чином, запропонований алгоритм методу конструювання та удосконалення хімічного складу ливарних жароміцних нікелевих сплавів може бути використаний в дослідницьких та конструкторських роботах.

Розроблений жароміцний нікелевий сплав ЗМІ-М8 відповідає рівню контрольованих характеристик і може бути використано для виготовлення корпусних деталей газотурбінних двигунів для безпілотних літальних апаратів та газоперекачувальних установок.

Таблиця 10 – Хімічний склад карбідів, експериментально визначений та розрахований для сплаву ЗМІ-М8 при 20°C

Склад карбідів типу	Вміст елементу, % за масою									
	Ti	Nb	Ta	Hf	Co	W	Mo	Ni	Cr	C
Експериментально визначений склад карбідів										
МС (після литва)	19,3 ±3	31,23 ±3	24,51 ±3	2,73 ±0,5	-	1,07 ±0,3	4,1 ±0,6	-	8,36 ±2	8,7 ±1
МС (після гартування)	13,61 ±2	42,98 ±4	29,04 ±4	-	-	0,63 ±0,1	0,21 ±0,1	-	0,2 ±0,1	10,5 ±1,5
МС (після повного циклу ТО)	12,19 ±2	36,1 ±4	25,26 ±3	14,85 ±2	-	0,42 ±0,1	-	-	0,79 ±0,1	10,0 ±1,5
M ₂₃ C ₆ (після повного циклу ТО)	-	-	-	-	1,5 ±0,3	4,34 ±0,5	11,26 ±2	7,3 ±1	70,57 ±8	5,1 ±0,5
Розрахунковий склад карбідів										
МС	10	37,78	25,34	16,5	-	0,48	-	-	0,15	9,44
M ₂₃ C ₆					1,69	4,48	13,6	5,6	69,5	5,1

Незважаючи на те, що в розроблений сплав додають елементи, які збільшують його вартість, спостерігається зростання часу міжремонтного обслуговування корпусних деталей завдяки збільшенню витривалості сплаву, яке зменшує експлуатаційні витрати. Очікуваний економічний ефект, отриманий в результаті заміни сплаву ЖСЗЛС на розроблений сплав ЗМІ-М8 при виготовленні корпусних деталей газотурбінних двигунів (з річною програмою 1510 кг металовиробів) та газоперекачувальних установок, становить 15 368 300 грн /рік за цінами 2025 року.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі узагальнено наукові та практичні дані щодо важливої науково-прикладної проблеми і запропоновано її нові результати, які стосуються подальшого розвитку оптимізації науково-технологічних основ процесів легування ливарних жароміцних нікелевих сплавів та встановлення закономірностей зв'язку між теплофізичними, механічними та корозійними властивостями таких сплавів, спираючись на результати наукових та експериментальних досліджень, враховуючи промислову реалізацію комплексу технологічних заходів з метою отримання сукупності поліпшених властивостей корпусних деталей газотурбінних двигунів щодо збільшення тривалості їхньої експлуатації. Виконані дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Проаналізовано науково-технічну літературу, стосовно уявлень процесів структуроутворення в жароміцних нікелевих сплавах та сучасного стану

способів їхнього легування для встановлення взаємозв'язків між хімічним складом і властивостями матеріалів. Встановлено, що для визначення закономірностей типу «хімічний склад - структура (властивості)», з використанням сучасних наукових підходів та методик, актуальними і перспективними є дослідження стосовно визначення особливостей фазоутворення та розроблення технологічних рішень, які стосуються керування структурою для забезпечення поліпшених властивостей корпусних деталей газотурбінних двигунів.

2. Із урахуванням сучасних тенденцій виробництва жароміцних нікелевих сплавів узагальнено та систематизовано перспективні композиції хімічних складів сплавів за властивостями та технологіями отримання при визначенні меж легування основними елементами.

3. На основі методів термодинаміки, які стосуються хімічних потенціалів елементів фаз системи, були розроблені співвідношення кількостей легувальних елементів K_{γ} , $K_{\gamma'}$ та $K_{\text{пс}}$, що враховують конкуренцію та кооперацію в об'ємі термодинамічної системи. За допомогою вказаних співвідношень були встановлені залежності між хімічним складом сплавів та їхніми теплофізичними, механічними і корозійними властивостями.

4. Побудовано діаграми для встановлення теплофізичних характеристик, на основі отриманих співвідношень K_{γ} та $K_{\gamma'}$. Встановлено зв'язок між хімічним складом та температурами ліквідусу (t_L), солідусу (t_S), кінця розчинення γ' - фази в γ - твердому розчині ($t_{\text{пр.}\gamma'}$), а також температури ($t_{\text{свт.}}$) локального плавлення евтектики ($\gamma+\gamma'$). Показано, що завдяки отриманим залежностям можна провести оптимізацію процесів виплавлення та термічного оброблення ливарних жароміцних нікелевих сплавів за різними технологіями виготовлення.

5. Встановлено, що закономірності між співвідношенням $K_{\gamma'}$ та механічними властивостями ливарних жароміцних нікелевих сплавів мають лінійний характер. Показано, що зі збільшенням легованості зростають характеристики жароміцності для сплавів незалежно від технології виготовлення.

6. Розроблено співвідношення $K_{\text{пс}}$, яке дозволяє визначити середню швидкість корозії ливарних жароміцних нікелевих сплавів різної технології виготовлення в умовах, наближених до робочих температур (800, 850, 900 і 950°C) з похибкою, яка не перебільшує 5%. Встановлено, що для сплавів рівноосної та спрямованої кристалізації треба прагнути до співвідношення легувальних елементів $K_{\text{пс}} \geq 2$, оскільки швидкість корозії за цих умов буде мати мінімальні значення.

7. Встановлено закономірності впливу хімічного складу сплавів на морфологію та тип карбідів. Показано, що на карбіди типу MC можна впливати не тільки проведенням пластичної деформації (що для ливарних жароміцних нікелевих сплавів неприпустимо), а зміною хімічного складу сплавів. Так, при збільшенні кількості титану в сплавах відбувається виділення шрифтових карбідів типу TiC, які негативно впливають на тріщиностійкість.

8. Отримано залежності, за якими можна встановити температури карбідних ліквідусів, що дозволяє оптимізувати режими термічного оброблення для удосконалення структури сплавів. Оскільки, карбіди типу $M_{23}C_6$ та M_6C

виділяються під час термічного оброблення, то оптимізація режимів, за отриманими залежностями, дає змогу загальмувати процеси зерномежового проковзування при експлуатації корпусних деталей.

9. Створено алгоритм конструювання та уточнення хімічного складу ливарних жароміцних сплавів, що забезпечує можливість розроблення та удосконалення промислових сплавів і дає змогу підвищити теплофізичні, механічні та експлуатаційні характеристики при отриманні необхідного структурно-фазового складу жароміцних матеріалів. Це дозволяє, в умовах обмеженого варіювання легувальних елементів (в межах марочного складу) збільшити механічні та технологічні властивості сплаву.

10. Розроблено, згідно вище зазначеного алгоритму, і впроваджено у виробництво жароміцний нікелевий сплав ЗМІ-М8, який має підвищені характеристики жароміцності ($\tau_{210}^{800} = 203$ годин), що збільшує довговічність корпусних деталей в 2 рази в порівнянні із серійним сплавом ЖСЗЛС. Це обумовлено оптимізацією вмісту легувальних елементів у хімічному складі сплаву: танталу – 1,3%, гафнію – 0,15%, хрому – 23%, молібдену – 1,9% і вольфраму – 3,5%, за масою.

Очікуваний економічний ефект, при заміні промислового сплаву ЖСЗЛС на розроблений сплав ЗМІ-М8, призначений для виготовлення корпусних деталей газотурбінних двигунів для безпілотних літальних апаратів та газоперекачувальних установок, становить за розрахунком 15 368 300 грн /рік за цінами 2025 року.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії у виданні іншої держави

1. Morphology and diffusion coalescence of boundary phases in metal systems : monograph / O. Glotka, V. Ol'shanetskii. — Germany : Palmarium Academic Publishing, 2022. — 81 с. — ISBN 978-620-2-05434-8

Статті у виданнях, що включені до міжнародних науково-метричних баз Scopus та Web of Science

2. Modelling the composition of carbides in nickel-based superalloys of directional crystallization / O. A. Glotka // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. — 2020. — № 102/1. — Pp. 5–15. — <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.6324>.

3. Distribution of alloying elements in carbides of refractory nickel alloys under the conditions of equiaxial crystallization / O. A. Glotka // Materials Science. — 2021. — Vol. 56, No. 5. — Pp. 714–721.

4. Mathematical prediction of the properties of heat-resistant nickel alloys after directional crystallization / O. A. Glotka, V. Yu. Ol'shanetskii // Materials Science. — 2023. — Vol. 58, No. 5. — Pp. 679–685.

5. Influence of alloying systems on the properties of single crystal nickel-based superalloys / A. Glotka, V. Ol'shanetskii // International Journal of Materials Research. — 2021. — Vol. 112, No. 10. — Pp. 794–799. — <https://doi.org/10.1515/ijmr-2021-8328>.

6. Forecasting the Properties of Heat-Resistant Nickel Alloys Equalaxial Crystallization / A. A. Glotka, V. E. Ol'shanetskii // Archives of Metallurgy and Materials. — 2022. — Vol. 67, No. 1. — Pp. 51–56. — <https://doi.org/10.24425/amm.2022.137471>.

7. Prediction thermo-physical characteristics heat-resistant nickel alloys directional crystallization / A. A. Glotka, V. E. Ol'shanetskii // Acta Metallurgica Slovaca. — 2021. — Vol. 27, No. 2. — Pp. 68–71.

8. Prediction of carbide liquidus and carbide composition of the Ni-14Cr-9Co-5Ti-3Al-3Ta-3.5W-1.5Mo-0.15Hf-0.1C system / V. E. Ol'shanetskii, A. A. Glotka, V. V. Klochikhin // Functional Materials. — 2021. — Vol. 28, No. 2. — Pp. 359–365. — <https://doi.org/10.15407/fm28.02.359>.

9. Optimisation of the composition and morphology of carbides in single-crystal nickel-based superalloys / V. Ol'shanetskii, A. Glotka // Structural Integrity and Life. — 2023. — Vol. 23, No. 2. — Pp. 185–189.

10. Glotka O., Obnosov K., Fasol Y., Sotnikov D., Dzhus A. Improvement of the Phase Composition of Single-Crystal Superalloys for Working and Nozzle Blades // Advanced and Novel Technologies—Interdisciplinary Collaboration in Materials Science / eds. M. Aikin, O. Smolyakov, V. Girzhon, D. Tkach, S. Belikov, G. S. Yar-Mukhamedova, V. Shalomeev, O. Narivskyi. Cham : Springer Nature Switzerland AG, 2025. P. 27–34. DOI: 10.1007/978-3-032-00373-7_4.

11. Distribution of Elements in Carbides of Multicomponent Superalloys / O. A. Glotka, S. V. Haiduk // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. — 2020. — Vol. 42, No. 6. — Pp. 869–884.

12. Prediction of the thermodynamic processes of phase separation in single-crystal refractory alloys based on nickel / A. A. Hlotka, S. V. Haiduk // Materials Science. — 2020. — Vol. 55, No. 6. — Pp. 878–883. — <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00382-5>.

13. Modeling of carbides composition in welded alloy system Ni-34Cr-4,3W-2,3Mo-1,3Al-1,3Ti-1,3Nb-0,1C / A. A. Glotka, V. E. Ol'shanetskii // Acta Metallurgica Slovaca. — 2021. — Vol. 27, No. 3. — Pp. 157–161. — <https://doi.org/10.36547/ams.27.3.1049>.

14. Application of Domestic Heat-Resistant Powders in Additive Techniques / O. A. Glotka, O. V. Ovchinnikov, V. I. Degtyaryov et al. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. — 2018. — Vol. 56. — Pp. 726–732. — <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9948-2>.

15. Mathematical forecasting composition of secondary carbides in the single-crystal superalloys / O. A. Glotka, V. E. Ol'shanetskii // Archives of Materials Science and Engineering. — 2021. — Vol. 111, No. 1. — Pp. 34–41.

16. Control of the processes of phase formation of carbide components in nickel-based superalloys / A. A. Glotka, V. E. Ol'shanetskii // Acta Metallurgica Slovaca. — 2022. — Vol. 28, No. 2. — Pp. 101–105. — <https://doi.org/10.36547/ams.28.2.1506>.

17. Influence of Alloying Elements on the Composition of Primary Carbides in the Ni-11.5Cr-5Co-3.6Al-4.5Ti-7W-0.8Mo-0.06C System / V. Y. Ol'shanetskii,

O. A. Glotka // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. — 2022. — Vol. 44, No. 7. — Pp. 861–871.

18. Influence of alloying systems on the lattice parameters of nickel-based superalloys / O. Glotka, V. Ol'shanetskii, S. Byelikov, Y. Fasol // *Archives of Materials Science and Engineering*. — 2023. — Vol. 122, No. 1. — Pp. 5–12.

19. Modeling of carbide formation in alloy of the Ni-Cr-Co-W-Mo-Al-Ti-C system / O. Glotka, S. Byelikov, O. Lysytsya // *Acta Metallurgica Slovaca*. — 2024. — Vol. 30, No. 1. — Pp. 15–18.

20. Effect of Alloying on the Phase composition of Nickel-Based Superalloys / V. L. Greshta, O. A. Glotka, K. V. Obnosov, D. E. Sotnikov // *Archives of Metallurgy and Materials*. — 2025. — Vol. 70, No. 2. — Pp. 721–725. — <https://doi.org/10.24425/amm.2025.153473>.

Статті у наукових фахових виданнях України, у тому числі без співавторів

21. Comparative analysis of the complex of properties of nickel-based superalloys / S. Byelikov, V. Kononov, O. Hlotka, M. Sydorenko, S. Pychek // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. — 2025. — № 1. — С. 13–23. — DOI: 10.15588/1607-6885-2025-1-2.

22. Удосконалення структури сплаву системи Ni-Cr-Co-W-Mo-Al-Ti-C / К. В. Обносов, В. Л. Грешта, О. А. Глотка, В. В. Кононов, Є. О. Фасоль // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. — 2024. — № 3. — С. 6–11. — DOI: 10.15588/1607-6885-2024-3-1.

23. Оптимізація фазового складу жароміцного нікелевого сплаву, що використовується для виготовлення направляючих лопаток газотурбінних двигунів та установок / К. В. Обносов, В. Л. Грешта, О. А. Глотка, О. Ю. Дроль // *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. — 2024. — № 20 (27). — С. 246–251. — DOI: 10.54858/dndia.2024-20-31.

24. Prediction carbides composition in nickel-based superalloys directional crystallization / O. A. Glotka // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. — 2020. — № 2. — С. 13–21. — DOI: 10.15588/1607-6885-2020-2-2.

25. Прогнозування складу первинних карбідів багатокомпонентної системи Ni-5Cr-9Co-6Al-8,3W-4Re-4Ta-1Mo-1,5Nb-0,15C / В. Ю. Ольшанецький, О. А. Глотка // *Вісник ХНАДУ*. — 2021. — Вип. 92, т. 2. — С. 109–115. — DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.92.2.109.

26. Вторинні карбіди в багатокомпонентній системі Ni-13,5Cr-5Co-3,4Al-4,8Ti-7,3W-0,8Mo-0,015B-0,12C / О. А. Глотка, В. В. Ключихін, В. Ю. Ольшанецький // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. — 2020. — № 1. — С. 6–12. — DOI: 10.15588/1607-6885-2020-1-1.

27. Properties of nickel-based superalloys of equiaxial crystallization / O. A. Glotka, V. Yu. Olshanetskii // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. — 2021. — № 1. — С. 19–23. — DOI: 10.15588/1607-6885-2021-2-3.

28. Математическое прогнозирование свойств жаропрочных никелевых сплавов / А. А. Глотка, В. Е. Ольшанецкий, С. В. Гайдук // Наука та прогрес транспорту. — 2020. — № 4 (88). — С. 77–85. — DOI: 10.15802/stp2020/213420.

29. Розподіл легувальних елементів в структурі жароміцних нікелевих сплавів у вторинних карбідах / О. А. Глотка, С. В. Гайдук, В. Ю. Ольшанецкий // Металознавство та обробка металів. — 2020. — № 26 (95). — С. 25–36. — DOI: 10.15407/mom2020.03.025.

30. Вплив системи легування та розмірної невідповідності кристалічних ґраток γ - та γ' -фаз на характеристики міцності монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів / О. А. Глотка, С. В. Гайдук, В. В. Кононов // Вісник двигунобудування. — 2019. — № 1. — С. 107–113.

31. Математическое моделирование высокотемпературной коррозии жаропрочных никелевых сплавов / А. А. Глотка, С. В. Гайдук // Вісник Приазовського державного технічного університету. — 2019. — Вип. 38. — С. 30–38. — DOI: 10.31498/2225-6733.38.2019.181273.

32. Оцінка высокотемпературної корозії жароміцних сплавів на нікелевій основі / О. А. Глотка, С. В. Гайдук // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2019. — № 1. — С. 6–11. — DOI: 10.15588/1607-6885-2019-1-1.

33. Прогнозирование свойств монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов / А. А. Глотка, С. В. Гайдук // Наука та прогрес транспорту. — 2019. — № 2 (80). — С. 91–100. — DOI: 10.15802/stp2019/165876.

34. Прогнозування температурних інтервалів кристалізації і гомогенізації в монокристалічних жароміцних нікелевих сплавах / О. А. Глотка, С. В. Гайдук // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2018. — № 2. — С. 25–29.

35. Прогнозування властивостей жароміцних нікелевих сплавів спрямованої кристалізації / О. А. Глотка, В. Ю. Ольшанецкий // Металознавство та обробка металів. — 2021. — № 27 (99). — С. 15–22. — DOI: 10.15407/mom2021.03.015.

36. Моделювання термодинамічних процесів для оцінки впливу танталу на критичні температури і структуроутворення багатокомпонентних нікелевих систем / С. В. Гайдук, О. А. Глотка, А. С. Дорогокупля // Математичне моделювання. — 2018. — № 1 (40). — С. 139–149.

37. Аналіз вітчизняних жароміцних порошків на нікелевій основі, які застосовуються в адитивних технологіях / О. А. Глотка, А. В. Овчинников // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2016. — № 2. — С. 39–43.

38. Термодинамічні аспекти фазових перетворень в подвійних металевих системах / В. Ю. Ольшанецкий, О. А. Глотка, Ю. І. Кононенко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2022. — № 1. — С. 74–75. — DOI: 10.15588/1607-6885-2022-1-11.

39. Вплив системи легування та розмірної невідповідності решіток γ - і γ' - фаз на характеристики міцності монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів / В. Ю. Ольшанецкий, О. А. Глотка, В. В. Кононов // Нові матеріали і технології в

металургії та машинобудуванні. — 2021. — № 2. — С. 6–10. — DOI: 10.15588/1607-6885-2021-3-1.

40. Залежність критичних температур багатокомпонентних нікелевих сплавів від їх атомно-фазового стану / В. Ю. Ольшанецький, О. А. Глотка // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2021. — № 2. — С. 83–85. — DOI: 10.15588/1607-6885-2021-3-14.

41. Закономірності впливу хімічного складу на морфологію і тип карбідів в жароміцному нікелевому сплаві / О. А. Глотка, В. Л. Грешта, В. Ю. Ольшанецький // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2022. — № 1. — С. 13–18. — DOI: 10.15588/1607-6885-2022-1-2.

42. Наукові підходи до оптимізації основних критичних температур жароміцних нікелевих сплавів рівноосної кристалізації / О. А. Глотка, В. Ю. Ольшанецький, С. Б. Беліков, В. В. Кононов, В. В. Хвостак // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2023. — № 1. — С. 12–17. — DOI: 10.15588/1607-6885-2023-1-2.

Патенти на корисну модель

43. Спосіб визначення механічних властивостей жароміцних нікелевих сплавів : пат. 151631 Україна : МПК G01N 25/02 (2006.01) / О. А. Глотка, В. Ю. Ольшанецький, В. В. Кононов ; заявник і патентовласник Нац. ун-т «Запорізька політехніка». — № u202106110 ; заявл. 01.11.2021 ; опубл. 25.08.2022, Бюл. № 34.

44. Спосіб підвищення жароміцних характеристик сплавів на основі нікелю : пат. 152691 Україна : МПК C22F 1/10 G01N 25/02 (2006.01) / О. А. Глотка, В. Ю. Ольшанецький, В. В. Кононов ; заявник і патентовласник Нац. ун-т «Запорізька політехніка». — № u202203328 ; заявл. 12.09.2022 ; опубл. 29.03.2023, Бюл. № 13.

Тези доповідей в матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій

45. Phase composition of nickel-based superalloys / O. Glotka, K. Obnosov, D. Sotnikov // Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф., 14–16 трав. 2024 р. — Івано-Франківськ, 2024. — С. 35–37.

46. Удосконалення складу зміцнюючої фази жароміцного нікелевого сплаву / О. А. Глотка, В. Л. Грешта, К. В. Обносів // Неметалеві вкращення і гази у ливарних сплавах : матеріали XVIII міжнар. наук.-техн. конф., 26–27 листоп. 2024 р. — Запоріжжя, 2024. — С. 129–131. — ISBN 978-617-529-488-8.

47. Удосконалення фазового складу монокристалічних сплавів на основі нікелю / О. А. Глотка, К. В. Обносів, Є. О. Фасоль, Д. Є. Сотніков, А. В. Джус // Advanced & Novel Technologies - Interdisciplinary Collaboration in Materials Science (ANTICM-2025) : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., 25–27 лют. 2025 р. — Запоріжжя, 2025. — С. 71–73.

48. Математическое прогнозирование свойств монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов / А. А. Глотка, С. В. Гайдук // Литво. Металургія 2019 : матеріали VIII міжнар. наук.-практ. конф., 21–23 трав. 2019 р. — Запоріжжя, 2019. — С. 261–262.

49. Количественное прогнозирование высокотемпературной коррозии жаропрочных никелевых сплавов / А. А. Глотка, В. Е. Ольшанецкий // Проблемы та перспективи розвитку залізничного транспорту : матеріали 79 міжнар. наук.-практ. конф. — Дніпро, 2019. — С. 323–324.

50. Прогнозирование температурных интервалов кристаллизации и гомогенизации монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов / А. А. Глотка, С. В. Гайдук // Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали XI Міжнарод. науч.-техн. конф. — Київ : НТУУ «КПІ», 2019. — С. 50–52.

51. Оцінка впливу танталу в сплаві ЗМІ-3У на критичні температури фазових перетворень / С. В. Гайдук, О. А. Глотка, В. В. Кононов, А. С. Дорогокупля // Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів : матеріали XIV міжнар. наук.-техн. конф., 8–10 жовт. 2019 р. — Запоріжжя, 2019. — С. 41–43.

52. Estimation of the effect of alloying elements on critical temperatures and structuring of multicomponent nickel systems using the modeling of thermodynamic processes / А. А. Glotka, S. V. Haiduk // Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів : матеріали XIV міжнар. наук.-техн. конф., 8–10 жовт. 2019 р. — Запоріжжя, 2019. — С. 14–15.

53. Карбіди в жароміцних нікелевих сплавах / О. А. Глотка, В. Ю. Ольшанецкий, С. В. Гайдук // Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали IV міжнар. наук.-практ. конф. — Івано-Франківськ, 2020. — С. 68–70.

54. Вторинні карбіди в жароміцних нікелевих сплавах / О. А. Глотка, В. Ю. Ольшанецкий, С. В. Гайдук // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : матеріали 80 міжнар. наук.-практ. конф. — Дніпро : ДНУЗТ, 2020. — С. 205–207.

55. Распределение элементов в карбидах никелевых сплавов равноосной кристаллизации / А. А. Глотка, С. В. Гайдук // Металургія 2020 : матеріали IX міжнар. наук.-практ. конф., 8–10 верес. 2020 р. — Запоріжжя, 2020. — С. 204–206.

56. Carbides in nickel-based superalloys / О. А. Glotka, V. V. Goncharova // Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали V міжнар. наук.-практ. конф., 5–7 квіт. 2021 р. — Івано-Франківськ : Академія технічних наук України, 2021. — С. 275–277. — ISBN 978-617-7926-12-1.

57. Прогнозування складу первинних карбідів багатокomпонентних систем / О. А. Глотка, С. В. Грибанова // Прикладні науково-технічні дослідження : матеріали V міжнар. наук.-практ. конф., 5–7 квіт. 2021 р. — Івано-Франківськ : Академія технічних наук України, 2021. — С. 278–280. — ISBN 978-617-7926-12-1.

58. Вплив легування на параметр графок гама та гама штрих фази в жароміцних нікелевих сплавах / О. А. Глотка, В. Ю. Ольшанецкий, С. Б. Беліков, С. В. Єсауленко, В. В. Кононов // Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : тези 82 міжнар. наук.-практ. конф. — Дніпро, 2023. — С. 274–275.

59. Процеси карбідоутворення в системі Ni-5Cr-9Co-6Al-8,3W-4Re-4Ta-1Mo-1,5Nb-0,15C / О. А. Глотка, В. Ю. Ольшанецкий // Проблеми та перспективи

розвитку залізничного транспорту : тези 81 міжнар. наук.-практ. конф. — Дніпро, 2021. — С. 219–220.

60. Чисельний метод визначення властивостей жароміцних нікелевих сплавів / В. В. Гончарова, О. А. Глотка // Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання : тези IV міжнар. студ. наук.-техн. конф. — Тернопіль, 2021. — С. 144–145. — Електронний ресурс.

61. Математическое прогнозирование карбидного ликвидуса и состава карбидов жаропрочных никелевых сплавов / А. А. Глотка, В. Е. Ольшанецкий // Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021 : матеріали XIII міжнар. наук.-техн. конф., 28–29 квіт. 2021 р. — Київ, 2021. — С. 60–61.

62. Математичне прогнозування властивостей жароміцних нікелевих сплавів / О. А. Глотка, В. В. Гончарова // Металургія 2021 : матеріали X міжнар. наук.-практ. конф., 18–20 трав. 2021 р. — Запоріжжя, 2021. — С. 41–43.

63. Еволюція хімічного складу карбідів в залежності від режиму термічної обробки / О. А. Глотка, В. Ю. Ольшанецький // Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах : матеріали XVI міжнар. наук.-техн. конф., 07–08 жовт. 2021 р. — Запоріжжя, 2021. — С. 74–76. — ISBN 978-617-529-335-5.

64. Возможности использования порошкового жаропрочного сплава ЭП741п в аддитивных технологиях / А. А. Глотка, А. В. Овчинников, А.А. Скребцов // Космические технологии: сегодня и в будущем : материалы VI междунар. конф., 28–30 мая 2017 г. — Днепр, 2017. — С. 67–68.

65. Об эвтектической составляющей в экономнолегированных быстрорежущих сталях / А. А. Глотка // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра : матеріали XIV всеукр. наук.-техн. конф., 19 квіт. 2016 р. — Київ, 2016. — С. 260–268.

66. Modeling of carbides composition in welded alloy / A. Glotka, D. Goncharova // Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2022 : матеріали XIV міжнар. наук.-техн. конф., 28–29 квіт. 2022 р. — Київ, 2022. — С. 9–11.

67. Концепція впливу хімічного складу на структуру і властивості жароміцних нікелевих сплавів / О. А. Глотка, В. Ю. Ольшанецький, В. В. Хвостак, В. В. Кононов // Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів : матеріали XV міжнар. наук.-техн. конф., 08–09 листоп. 2022 р. — Запоріжжя, 2022. — С. 28–31. — ISBN 978-617-529-387-4.

68. Carbide transformations in a welded nickel-based superalloy / O. A. Hlotka, V. Yu. Olshanetsky, D. Yu. Honcharenko, V. F. Cherep, D. A. Andriyanenko // Нові сталі та сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів : матеріали XV міжнар. наук.-техн. конф., 08–09 листоп. 2022 р. — Запоріжжя, 2022. — С. 31–34. — ISBN 978-617-529-387-4.

69. Збільшення працездатності жароміцних нікелевих сплавів завдяки оптимізації хімічного складу / О. А. Глотка, В. Ю. Ольшанецький, В. В. Хвостак // Матеріалознавство та технології : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., 22–23 верес. 2022 р. — Харків, 2022. — С. 130–134.

70. Удосконалення структурно-фазового складу ливарних жароміцних нікелевих сплавів рівноосної кристалізації / О. А. Глотка, В. Ю. Ольшанецький //

Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва: проблеми теорії та практики : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 29–30 верес. 2022 р. — Тернопіль, 2022. — С. 115–116.

71. Improvement of carbide phases in welded nickel-based superalloy / O. Glotka, V. Olshanetsky, S. Belikov // Нові матеріали і технології в машинобудуванні : матеріали XV міжнар. наук.-практ. конф., 27–28 квіт. 2023 р. — Київ : НТУУ «КПІ», 2023. — С. 21–22.

72. Встановлення критичних температур в жароміцних нікелевих сплавах за хімічним складом / О. Глотка, В. Ольшанецький, К. Литвинова // Сучасна наука та освіта: стан, проблеми, перспективи : матеріали III міжнар. наук.-практ. конф., 20–21 берез. 2023 р. — Полтава, 2023. — С. 401–402.

73. Прогнозування складу карбідів в ливарному жароміцному нікелевому сплаві / О. Глотка, С. Беліков, В. Ольшанецький, С. Єсауленко // Матеріали та технології в інженерії: інженерія, матеріали, технології, транспорт : матеріали міжнар. конф., 16–18 трав. 2023 р. — Луцьк, 2023. — С. 90–92.

74. Predicting the properties of cast nickel-based superalloys / O. A. Glotka // Металургія 2023 : матеріали XII міжнар. наук.-практ. конф., 10–12 жовт. 2023 р. — Харків-Київ, 2023. — С. 274–277.

АНОТАЦІЯ

Глотка О.А. Науково-технологічні основи оптимізації процесів легування нікелевих сплавів для підвищення ресурсу газотурбінних двигунів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство. – Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, 2026.

Дисертаційна робота присвячена комплексному вирішенню науково-технічної проблеми створення та практичної реалізації науково обґрунтованих підходів до керування процесами легування і визначення теплофізичних характеристик, спрямованих на формування структурного стану та забезпечення підвищеного рівня експлуатаційної надійності й довговічності ливарних жароміцних нікелевих сплавів. Встановлено залежності між хімічним складом сплавів і властивостями, що впливають на працездатність матеріалів цього класу. Отримано залежності для встановлення хімічного складу карбідів та показано як змінюється морфологія карбідів типу МС в залежності від легування, що дає змогу оптимізувати хімічний склад без попереднього проведення експериментів. За створеним алгоритмом розроблено і технологічно випробувано в промислових умовах моторобудівного підприємства України новий вітчизняний ливарний жароміцний нікелевий сплав ЗМІ-М8 призначений для виготовлення корпусних деталей газотурбінних двигунів.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у розробленні підходів, що забезпечують істотне збільшення ресурсу служби корпусних деталей газотурбінних двигунів шляхом цілеспрямованого підвищення їх жароміцності та

довговічності, при одночасному суттєвому зменшенні потреби у проведенні трудомістких і ресурсоємних фізичних експериментів.

Ключові слова: оптимізація складу, жароміцні нікелеві сплави, газотурбінний двигун, фазовий склад, карбіди, критична температура, високотемпературна корозія, механічні властивості, морфологія, легувальні елементи, підвищений ресурс.

SUMMARY

Hlotka O.A. Scientific and technological foundations of alloying processes optimization of nickel-based superalloys for increased resource of gas turbine engines. – Qualifying research paper as manuscript.

Thesis for the Academic Degree of a Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.02.01 – «Materials science». - National University "Zaporizhzhya Polytechnic", Zaporizhzhya, 2026.

The content of the dissertation. This dissertation addresses the pressing scientific and technical challenge of ensuring a range of properties in nickel-based superalloys by developing an algorithm based on the ratio of alloying elements. This area is relevant and promising for the modern development of gas turbine engineering in Ukraine, allowing the domestic developer and manufacturer to establish itself at the same level as leading international companies.

For the first time, the ratios $K_{\gamma'}$, K_{γ} and K_{ps} are presented for which dependencies were obtained to determine the properties based on the processing of calculated and experimental data of cast nickel-based superalloys.

Dependences have been obtained for calculating the critical temperatures of nickel-based superalloys: liquidus (t_L) and solidus (t_S), the end ($t_{pr.\gamma'}$) of the dissolution of the γ' -phase in the γ -solid solution, and the temperature ($t_{eut.}$) of local melting of the eutectic ($\gamma + \gamma'$) in terms of the ratios $K_{\gamma'}$ and K_{γ} , which take into account the total content of elements in the composition of alloys with high accuracy ($R^2 \geq 0.8$)

Dependences have been obtained to establish the volume fraction ($V_{\gamma'}$) of the γ' -phase in the structure of nickel-based superalloys of temperatures 20° and 1000°C by the value of the $K_{\gamma'}$ ratio. A relationship has been established between $K_{\gamma'}$ and the short-term (σ_B^t) strength limit of a temperature 20°C, as well as the limit of 100- and 1000-hour long-term (σ_{τ}^t) strength in a wide temperature range with an error not exceeding $\geq 5\%$. Also, a relationship has been found with the help of which it is possible to determine the value of the dimensional mismatch of crystal lattices γ/γ' (misfit) in the structure of cast nickel-based superalloys, based on the obtained ratio $K_{\gamma'}$.

It has been established that the K_{ps} ratio takes into account the total content of elements in the composition of the alloys. This made it possible to obtain a connection for different classes of cast nickel-based superalloys with the help of which it is possible to determine the average corrosion rate under the influence of synthetic ash at temperatures of 800°, 850°, 900° and 950°C.

Also, dependences were obtained with the help of which it is possible to determine the liquidus temperature and the volume fraction of primary and secondary carbides.

Regularities of the influence of alloying elements on the liquidus temperatures of primary and secondary carbides of nickel-based superalloys are presented, which depend on the processes of new phases precipitation and of alloying systems (generations of alloys). This makes it possible to more carefully plan the heat treatment modes and operating temperatures. Regularities of the influence of the morphology of carbide phases on the content of alloying elements in the composition of the alloy are established. The influence of certain elements on the shape and size of carbides, which affect the performance properties, are shown.

It is shown that in some cases, alloying within the generally accepted boundaries is not rational, since this causes the formation of non-equilibrium or TCP phases in the alloy, which reduces the performance properties of materials. An experimental-theoretical analysis of the obtained dependences was carried out, which gives good agreement and convergence of experimental data with theoretical calculations.

In accordance with the developed algorithm for designing cast nickel-based superalloys, the composition of a new domestic foundry nickel-based superalloys of the ZMI-M8 brand, intended for the manufacture of body parts, has been developed. It has been established that the developed alloy ZMI-M8 has a heat resistance higher than the industrial nickel-based superalloys ZhS3LS, due to the optimization of the content of alloying elements in the chemical composition: tantalum - 1.3%, hafnium - 0.15%, chromium - 23%, molybdenum - 1.9% and tungsten - 3.5%, by weight. Based on the obtained dependences, the structural-phase composition of carbide inclusions was determined, according to which two types of carbide MC and $M_{23}C_6$ are present in the structure. Analytical-experimental comparison of the results showed good agreement between calculated and experimental results the chemical compositions for experimental alloys.

Experimental studies were carried out on samples of equiaxed crystallization obtained using experimental technology on test melts under the production conditions of MOTOR SICH JSC.

Key words: composition optimization, nickel-based superalloys, gas turbine engine, phase composition, carbides, critical temperature, high-temperature corrosion, mechanical properties, morphology, alloying elements, increased service life.