МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГАЙДУК СЕРГІЙ ВАЛЕНТИНОВИЧ

УДК 669.245.018.044:620.193.53

РОЗВИТОК І ЗАСТОСУВАННЯ НАУКОВИХ ПРИНЦИПІВ ЛЕГУВАННЯ ДЛЯ РОЗРОБКИ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ З ГАРАНТОВАНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

05.02.01 - матеріалознавство

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Запоріжжя – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант: лауреат державної премії України у галузі науки та техніки, доктор технічних наук, професор, **БЄЛІКОВ СЕРГІЙ БОРИСОВИЧ**, ректор Запорізького національного технічного університету, професор кафедри фізичного матеріалознавства

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор, **КАЛІНІНА НАТАЛІЯ ЄВГРАФІВНА,** Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, професор кафедри технології виробництва

доктор технічних наук, професор, **БАЛИЦЬКИЙ ОЛЕКСАНДР ІВАНОВИЧ,** Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, завідувач лабораторії водневої стійкості конструкційних матеріалів

лауреат державної премії України у галузі науки та техніки, доктор технічних наук, професор, **МІЩЕНКО ВАЛЕРІЙ ГРИГОРОВИЧ**, Запорізький національний університет, завідувач кафедри прикладної фізики та наноматеріалів

Захист відбудеться «22» травня 2018 року о 13-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д17.052.01 у Запорізькому національному технічному університеті за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ауд. 153.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Запорізького національного технічного університету за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, та на сайті університету у розділі «Наука» – «Спеціалізована вчена рада».

Автореферат розіслано «11» квітня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор О.А. Мітяєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для успішного розвитку економіки України необхідно підвищення конкурентоспроможності високотехнологічної продукції на внутрішньому та зовнішньому ринках, засноване на модернізації науково-промислової галузі. Багаторічна практика показує, що більш ніж 80% інноваційних розробок базується на впровадженні у промислове виробництво нових матеріалів і технологій. Тому, важливу роль відіграє розробка нових жароміцних матеріалів з поліпшеним комплексом службових властивостей і впровадження їх у провідні галузі вітчизняної промисловості. У світовій практиці протягом тривалого часу емпіричний метод залишається основним при розробці жароміцних матеріалів. Стає очевидним, що пошук оптимального складу сплаву із гарантованими властивостями є складним і наукомістким завданням.

В своєму розвитку сучасне матеріалознавство підійшло до того, що чисто експериментальний шлях перестає задовольняти вимогам щодо темпу та якості створення нових жароміцних матеріалів. Проблема розробки нових сплавів з необхідними властивостями може ефективно вирішуватися на основі комплексного використання методів класичного металознавства, розрахунково-аналітичних методів, поєднаних з комп'ютерним моделюванням термодинамічних процесів.

Прогрес в області розробки жароміцних матеріалів значно стримується відсутністю ефективних методик. Тому, сучасний етап розвитку вимагає підвищення ефективності досліджень за рахунок збільшення ефективних розрахунково-аналітичних методик. Такий підхід суттєво підвищить конкурентоспроможність високотехнологічної продукції за рахунок зниження витрат на проведення досліджень і скороченню терміну від розробки до впровадження нових жароміцних матеріалів з заданими службовими властивостями для нової техніки в перспективних галузях вітчизняного газотурбобудування (авіаційній, енергетичній, суднобудівній та ін.).

Публікації про комп'ютерні програми, або методи, що орієнтовані на прогнозування властивостей нових матеріалів, практично відсутні. Тому, для ефективного розвитку газотурбобудування України, що дозволить вітчизняному розробнику і виробнику конкурувати на сучасному світовому рівні, даний напрямок є актуальним і перспективним.

Дана робота присвячена розвитку і застосуванню наукових принципів легування для розробки жароміцних нікелевих сплавів з гарантованими властивостями для газотурбінної техніки на основі створення експресної комплексної розрахунково-аналітичної методики (КРАМ) і її алгоритму.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Основні етапи дисертації виконані автором в Запорізькому національному технічному університеті відповідно до планів науково-дослідних робіт кафедри «Фізичне матеріалознавство» за наступними держбюджетними і госпдоговірними тематиками:

1. «Розвиток наукових основ і принципів розробки високожароміцних економнолегованих нікелевих сплавів», ДБ №01019, 2009 – 2010. - № держ. реєстр. 0109U000217.

2. «Розвиток теоретичних і практичних основ легування промислових жароміцних корозійностійких нікелевих сплавів перспективними елементами», ДБ №02811, 2011 – 2012. - № держ. реєстр. 0111U000058.

3. «Підвищення зварюваності і характеристик міцності зварних з'єднань сплаву ЖС3ЛС-М», ГД №1013, 2013.

4. «Комплексне дослідження технологічних і службових характеристик модернізованого складу сплаву ЖС3ЛС-М», ГД №2813, 2014-2017, № держ. реєстр. 0113U007691.

Мета та завдання досліджень. Мета дослідження полягала в розвитку та застосуванні наукових принципів легування для розробки жароміцних нікелевих сплавів з гарантованими властивостями шляхом оптимізації хімічного складу на основі розрахункового прогнозу заданих характеристик, які кардинально впливають на їх працездатність в умовах експлуатації.

Для досягнення були поставлені наступні завдання:

- систематизувати хімічні склади широкого ряду відомих промислових вітчизняних і зарубіжних жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) з різноманітними системами легування з математичною обробкою розрахункових та експериментальних даних за визначеними групами найважливіших характеристик, що впливають на працездатність;

- отримати групи регресійних моделей (РМ) типу «склад-властивість» або «параметр-властивість» для розрахунку параметрів структурної стабільності, структурно-фазових, фізичних, температурних, корозійних і механічних характеристик для класу жароміцних нікелевих сплавів;

- створити комплексну розрахунково-аналітичну методику (КРАМ) і її алгоритм для розрахунку вищезазначених груп властивостей для розробки як нових складів, так і удосконалення складів існуючих промислових марок;

- розробити за створеним алгоритмом методики КРАМ склад нового ливарного жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву, призначеного для виготовлення робочих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації для наземних газотурбінних установок Д-336, з рівнем жароміцності і технологічності промислового жароміцного некорозійностійкого сплаву ЖС26-ВІ, при забезпеченні ВТК - стійкості на рівні промислового корозійностійкого сплаву ЗМІ-3У, перевершуючи його за показниками жароміцності;

- розробити за створеним алгоритмом методики КРАМ склад нового ливарного технологічно зварювального жароміцного корозійностійкого сплаву, призначеного для виготовлення цільнолитих соплових апаратів двигуна ТВ3-117ВМА-СБМ1В, з рівнем жароміцності промислового сплаву ВЖЛ12Е, який не має необхідної ВТК - стійкості і технологічно не зварювальний, а технологічною зварюваністю і ВТК - стійкістю на рівні промислового сплаву ЖС3ЛС, перевершуючи його за показниками жароміцності.

Об'єкт дослідження – процеси структуроутворення, які впливають на працездатність жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) в умовах експлуатації.

Предмет дослідження – структурна стабільність, структурно-фазові, фізичні, температурні, корозійні і механічні властивості жароміцних нікелевих сплавів з різноманітними системами легування.

Методи дослідження: розрахунково-аналітичні методи PHACOMP, New PHACOMP, ΔE-метод; комп'ютерне моделювання термодинамічних процесів методом CALPHAD в програмі JMatPro; визначення хімічного складу спектральним аналізом на оптичному емісійному приладі «ARL-4460»; визначення критичних температур методом диференційного термічного аналізу на установці ВДТА-8М; дослідження структури з використанням оптичної та електронної мікроскопії з якісним і кількісним аналізом фаз на приставці до растрового електронного мікроскопу марки JEOL JSM-6360LA з системою енергодисперсійного мікрорентгеноспектрального аналізу JED-2300; рентгеноструктурний аналіз; стандартні методи оцінки корозійних і механічних властивостей; математичне оброблення розрахункових і експериментальних даних за допомогою персонального комп'ютера в стандартному програмному пакеті MS EXCEL методом найменших квадратів (МНК); кореляційний аналіз.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розвитку і застосуванні наукових принципів легування для розробки нових жароміцних нікелевих сплавів з гарантованими властивостями на основі поетапного розрахункового прогнозу заданих характеристик за отриманими групами регресійних моделей з метою оптимізації хімічного складу.

Основні положення, які характеризують наукову новизну роботи, полягають у наступному:

- Узагальнено закономірності комплексного впливу легувальних елементів, що входять до хімічного складу ливарних ЖНС, на групи властивостей, які впливають на працездатність: структурна стабільність, структурно-фазові, фізичні, температурні, корозійні та механічні. Показано, що процеси фазових перетворень, які протікають при високих температурах в структурі ливарних ЖНС дають можливість узагальнити експериментальну статистику, а також встановити залежність критичних температур і інтервалів фазових перетворень від системи легування сплавів. Показано, що середню швидкість корозії ($\overline{V}_q$) ливарних ЖНС в умовах впливу синтетичної золи можна оцінювати за корозійними параметрами: (Cr/Al), (Ti/Al) і $\sqrt{Cr}\cdot$(Ti/Al). Показано, що рівень жароміцності залежить, не тільки від об'ємної частки (V_{γ}') γ'- фази в структурі, але і від її хімічного складу, морфології та розміру часток, а також структурної стабільності фаз в широкому температурному діапазоні.

- Вперше запропоновано регресійні моделі (група 1) для розрахунку параметрів структурної стабільності ливарних ЖНС. Встановлено, що отримані регресійні моделі дозволяють розраховувати величину параметрів структурної стабільності ($\overline{N}_{V\gamma}$) і ($\overline{Md}_{\gamma}$) для γ- твердого розчину за величиною мінілегувального комплексу $П_{ТЩУ}$ = Cr / (Cr+Mo+W), співвідношенням цих елементів в їхньому складі, з відповідними похибками 2,98% і 1,37%, а

величину параметра ($\bar{M}d_C$) для сплаву за величиною дисбалансу (ΔЕ) системи легування сплаву, з похибкою 1,07%, тобто точніше, ніж традиційні методи PHACOMP і New PHACOMP з їх відомимими регресійними рівняннями.

- Розширено уявлення про комп'ютерне моделювання термодинамічних процесів, які відбуваються в структурі жароміцних нікелевих сплавів в процесі охолодження (кристалізації) і нагрівання. Показано, що термодинамічні розрахунки структурно-фазових (група 2) і фізичних (група 3) характеристик, здійснених на основі хімічного складу досліджених ливарних ЖНС методом CALPHAD в програмі JMatPro, мають похибку менше 5%, в порівнянні з експериментальними даними.

- Вперше запропоновано регресійні моделі (група 4) для розрахунку критичних температур ливарних ЖНС. Встановлено, що отримані регресійні моделі дозволяють розраховувати температури ліквідусу (t_L) і солідусу (t_S) за величиною мінілегувального комплексу $\Sigma C_i^{\gamma} = (Mo+W+Ta+Re+Ru)\%$, за масою, сумарного вмісту цих елементів в складі, що зміцнюють γ- твердий розчин, з відповідними похибками 1,41% і 1,36%, а температури початку ($t_{П.Р.}^{\gamma'}$) і кінця ($t_{К.Р.}^{\gamma'}$) розчинення γ'- фази в γ- твердому розчині, а також температуру ($t_{ЕВТ.}$) локального плавлення евтектики (γ+γ') за величиною мінілегувального комплексу $\Sigma C_i^{\gamma'} = (Al+Ti+Nb+Ta+Hf)\%$, за масою, сумарного вмісту γ'- утворювальних елементів в їхньому складі, з відповідними похибками 1,76% ; 1,69 ; 2,10%.

- Вперше запропоновано регресійні моделі (група 5) для розрахунку середньої швидкості корозії ($\bar{V}_q^t$) і критичної температури ($t_{КРИТ.}$) переходу до прискореної ВТК ливарних ЖНС. Встановлено, що отримані регресійні моделі дозволяють розраховувати середню швидкість корозії ($\bar{V}_q^t$) для температур 800^0, 850^0, 900^0 і 950^0С в умовах впливу синтетичної золи, що імітує продукти згоряння газотурбінного палива, а також критичну температуру ($t_{КРИТ.}$) переходу до прискореної ВТК за величиною мінілегувального комплексу $П_{КС} = \sqrt{Cr} \cdot (Ti / Al)$, співвідношенням цих елементів в їхньому складі, з відповідними похибками 2,85%; 2,96%; 2,50%; 2,66%, 1,39%.

- Вперше запропоновано регресійні моделі (група 6) для розрахунку об'ємної частки ($V_{\gamma'}^t$) γ'- фази в структурі ливарних ЖНС, а також границь їх короткочасної (σ_B^t) та тривалої (σ_τ^t) міцності. Встановлено, що отримані регресійні моделі дозволяють розраховувати об'ємну частку ($V_{\gamma'}^t$) γ'- фази в структурі для температур 20^0, 800^0, 900^0 і 1000^0С за величиною мінілегувального комплексу $\Sigma C_i^{\gamma'} = (Al+Ti+Nb+Ta+Hf)\%$, за масою, сумарного вмісту γ'- утворювальних елементів в їхньому складі, з відповідними похибками 1,81%; 1,83%; 1,80%; 1,77%. Показано, що отримані регресійні моделі дозволяють за величиною об'ємної частки ($V_{\gamma'}^t$) γ'- фази в їх структурі розраховувати границі короткочасної (σ_B^t) міцності для температур 20^0, 800^0, 900^0, 1000^0С з відповідними похибками 2,28% ; 2,20% ; 1,20% ; 2,52%, а також границі 100- і 1000- годинної тривалої (σ_τ^t) міцності для температур 800^0, 900^0, 1000^0С з відповідними похибками 1,19%; 1,41%; 1,12%; 1,88%; 1,75%; 1,87%.

- Створено алгоритм комплексної розрахунково - аналітичної методики [1], який дозволяє узагальнити механізми впливу легувальних елементів на групи властивостей жароміцних нікелевих сплавів. Показано, що відповідно з алгоритмом методики КРАМ без попереднього проведення експериментів, на основі покрокового розрахунку характеристик за групами, з подальшою оптимізацією хімічного складу за заданими критеріями можна розробляти як нові жароміцні нікелеві сплави, так і удосконалювати склади існуючих промислових марок з гарантованими властивостями, які враховують умови експлуатації.

- Оптимізовано, за створеним алгоритмом методики КРАМ, склад нового ливарного жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву ЗМІ-3У-М1 [30], призначеного для виготовлення робочих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації для наземних газотурбінних установок Д-336. Експериментально встановлено, що розроблений сплав **ЗМІ-3У-М1** має жароміцність ($\tau_{260}^{975} \geq 40$ годин) і технологічність (48-50%) при отриманні придатних робочих лопаток за макроструктурою, на рівні промислового не корозійностійкого сплаву ЖС26-ВІ, а показники ВТК- стійкості на рівні промислового корозійностійкого сплаву ЗМІ-3У, значно перевершуючи його за рівнем жароміцності, за рахунок оптимізованого вмісту легувальних елементів в хімічному складі: вуглецю - 0,06%, хрому - 11,5% і танталу - 4%, за масою.

- Оптимізовано, за створеним алгоритмом методики КРАМ, склад нового вітчизняного ливарного технологічно зварювального жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву ЖС3ЛС-М [33], призначеного для виготовлення цільнолитих соплових апаратів двигунів ТВ3-117. Експериментально встановлено, що розроблений сплав **ЖС3ЛС-М** має жароміцність ($\tau_{180}^{975} \geq 40$ годин) на рівні промислового не корозійностійкого сплаву ВЖЛ12Е, який не має необхідної ВТК – стійкості і технологічно не зварювальний, а технологічну зварювальність і ВТК – стійкість має на рівні промислового технологічно зварювального корозійностійкого сплаву ЖС3ЛС, значно перевершуючи його за рівнем жароміцності, за рахунок оптимізованого вмісту легувальних елементів в хімічному складі: танталу - 2,5%, гафнію - 0,3%, хрому - 14,5%, молібдену - 2,0% і вольфраму - 6,5%, за масою.

Практичне значення одержаних результатів. В результаті теоретичних та експериментальних досліджень, які проведені автором:

1. Розроблено ефективну комплексну розрахунково-аналітичну методику та її алгоритм [1], що дозволяє розробляти як нові жароміцні нікелеві сплави, так і удосконалювати склади існуючих промислових марок, шляхом оптимізації хімічного складу за заданими критеріями, гарантуючи заданий комплекс властивостей.

2. Розроблено новий вітчизняний ливарний жароміцний корозійностійкий нікелевий сплав марки ЗМІ-3У-М1, призначений для виготовлення робочих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації для наземних газотурбінних установок Д-336. На розроблений сплав ЗМІ-3У-М1 отримано патент на винахід [30].

3. Відпрацьована і впроваджена технологія виплавлення шихтової заготовки із розробленого сплаву ЗМІ-3У-М1 в промислових умовах ГП «Івченко-Прогрес» відповідно із затвердженими ТУ 14-134-446-2010.

4. Розроблено новий вітчизняний ливарний технологічно зварювальний жароміцний корозійностійкий нікелевий сплав марки ЖС3ЛС-М, призначений для виготовлення цільнолитих соплових апаратів двигунів ТВ3-117. На розроблений сплав ЖС3ЛС-М отримано патент на винахід [33].

5. Відпрацьована і впроваджена технологія виплавлення шихтової заготовки із сплаву ЖС3ЛС-М в промислових умовах АТ «МОТОР СІЧ» і ЗМЗ ім. В.І. Омельченка відповідно із затвердженими ТУУ 24.4-23365425-698: 2016.

6. Середньорічний економічний ефект від використання результатів роботи по заміні сплаву ЖС26-ВІ на розроблений сплав ЗМІ-3У-М1 для промислового підприємства ГП «Івченко-Прогрес» склав 13 680 159 грн. на рік.

7. Середньорічний економічний ефект від використання результатів роботи по заміні сплавів ВЖЛ12Е і ЖС3ЛС на розроблений сплав ЖС3ЛС-М для промислових підприємств АТ «МОТОР СІЧ» і ЗМЗ ім. В.І. Омельченка склав 9 588 139 грн. на рік.

8. Загальний економічний ефект від використання результатів роботи на промислових моторобудівних підприємствах України склав 23 268 298 грн. на рік (за цінами 2015 року).

Особистий внесок здобувача. Дисертація відображає основні результати досліджень, здійснених автором у Запорізькому національному технічному університеті. Здобувач самостійно провів науковий аналіз, систематизацію, математичну обробку результатів і сформулював висновки. Автору особисто належать ідеї розробки комплексної розрахунково - аналітичної методики (КРАМ) і її алгоритму для оптимізації складу ливарних жароміцних нікелевих сплавів ЗМІ-3У-М1 і ЖС3ЛС-М з гарантованими властивостями, отримання патентів України на розроблені сплави та практичне їх впровадження у вітчизняну промисловість. Автором особисто [1-5] отримано групи регресійних моделей для розрахункового прогнозу заданих властивостей, що кардинально впливають на працездатність ливарних ЖНС в умовах експлуатації. У надрукованих статтях, опублікованих у співавторстві, автору належать наступні особисті наукові внески: систематизація та математична обробка результатів досліджень, щодо визначення властивостей, які забезпечують працездатність розроблених сплавів ЗМІ-3У-М1 [13, 20, 21, 30-32] і ЖС3ЛС-М [14, 17-19, 22-24, 26, 28, 33] з урахуванням умов їх експлуатації: параметри структурної стабільності [15, 16, 27, 29, 37, 38, 43, 44, 46], структуроутворення і фазовий склад [7, 8, 16-18, 23, 25, 27, 28, 36], критичні температури фазових перетворень [9, 11, 12, 22, 24], корозійні [6, 10, 30, 32-34, 42] і механічні характеристики [15, 17-20, 30, 31, 33, 35, 39, 45], технологічність [20, 26, 40, 41], розроблена методика КРАМ і її алгоритм [11-14]. Автором особисто проведено розрахункові і експериментальні дослідні роботи, що представлено в дисертації як нові. Усі наукові положення, автором розроблені особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та долговічності виробів» (Україна, Запоріжжя, 2010, 2014); «Молодёжь в авиации: новые решения и передовые технологии» (Украина, Запорожье – Алушта 2011) ; «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология» (Украина, Киев, 2011); «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах» (Україна, Запоріжжя, 2012, 2015); «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (Україна, Київ, 2015); «Международный Конгресс Двигателестроителей» (Украина, Харьков – Николаев - Коблево, 2015), кафедральних і міжкафедральних семінарах ЗНТУ.

Публікації. Основні результати роботи наведено в 46 публікаціях, з яких 2 – монографії, 3 – статті без співавторів, 9 - статей в виданнях з індексом цитування, 15 – статей у фахових наукових журналах, 4 – патенти на винахід, 13 – тез в матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел та 8 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 404 сторінки: основного тексту 282 сторінки, список використаних джерел із 465 найменувань на 55 сторінках та 8 додатків на 29 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми і викладена загальна характеристика роботи, вказується на зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами, охарактеризовані елементи наукової новизни одержаних результатів, їх 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 проблеми сучасного стану теорії і практики легування жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС), а також сучасні підходи і методи їх розробки. Показані існуючі погляди на оцінку найважливіших властивостей, які кардинально впливають на працездатність сплавів цього класу в умовах експлуатації.

Для дослідження та впровадження наукових розробок було обрано жароміцні нікелеві сплави, як найперспективніші конструкційні матеріали для виготовлення широкої номенклатури деталей, що працюють в різних умовах експлуатації. Розглянуто сучасні вимоги до рівня властивостей жароміцних матеріалів даного класу, призначених для виготовлення відповідальних деталей гарячої частини газотурбінних двигунів (ГТД) і установок (ГТУ), із вказівкою на неоднозначний характер впливу легувальних елементів на характеристики структурної стабільності, фазового складу, фізичних, температурних, корозійних, механічних властивостей та технологічності.

На підставі аналізу літературних даних узагальнено відомості щодо впливу легувальних елементів на зазначені властивості. Показано, що світова практика використання цього класу жароміцних матеріалів зараз зазнає істотних змін у зв’язку з розширенням номенклатури сплавів, як за рахунок розробки нових складів, так і удосконалення складів існуючих промислових марок.

Розглянуто існуючі розрахункові методи прогнозування зазначених властивостей, а також сучасні методи комп'ютерного моделювання термодинамічних процесів, які відбуваються в структурі жароміцних нікелевих сплавах в широкому температурному діапазоні.

В остаточному підсумку зазначено, що тільки комплексний підхід із застосуванням методів класичного металознавства, розрахунконо-аналітичних методів, поєднаних з комп'ютерним моделюванням термодинамічних процесів, що відбуваються в структурі при охолодженні (кристалізації) та нагріванні, може забезпечити ефективне вирішення поставлених задач при розробці оптимальних складів нових жароміцних матеріалів.

Даний підхід повинен забезпечити заданий комплекс властивостей матеріалу та призвести до значної економії промислових, матеріальних і людських ресурсів.

Виходячи з наведеного огляду, показано про актуальність і необхідність проведення подальших досліджень у галузі створення ефективних методів для розробки нових складів ливарних жароміцних нікелевих сплавів з поліпшеними властивостями для вітчизняного газотурбобудування.

У другому розділі обґрунтовано вибір матеріалів і методів досліджень для досягнення поставлених в роботі цілей. Достовірність і надійність отриманих результатів в роботі було забезпечено використанням основних фундаментальних положень фізичного металознавства з комплексним використанням сучасних розрахунково-аналітичних методів та стандартних методів експериментальних досліджень з їх коректним узгодженням. При виконанні даної роботи необхідна точність експериментів була забезпечена використанням сучасного контролювального та вимірювального обладнання, якістю шихтових матеріалів, які використовувалися при виготовленні тестових і промислових плавок.

Досліджений ряд сплавів представлено 32 відомими промисловими марками, що наведено в таблиці 1, з них: вітчизняних – 13; закордонних 19, не враховуючи 2-х розроблених сплавів за марками ЗМІ-3У-М1 і ЖС3ЛС-М.

Вибірку досліджуваних сплавів було здійснено з позицій різноманітних хімічних складів (систем легування), що за вмістом основних елементів охоплюють широкий діапазон легування, а також надання надійних розрахункових і експериментальних даних за дослідженими групами властивостей: 1- структурна стабільність, 2 - структурно-фазові, 3 - фізичні, 4 - температурні, 5 – корозійні, 6 – механічні (табл. 2).

Таблиця 1 - Хімічний склад досліджених ливарних ЖНС

Марка сплаву	Вміст елементу, % за масою														
	C	Cr	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	Ta	Hf	V	Re	Ru	Zr	B
TMS-71	-	6,0	6,0	5,7	-	6,4	-	-	8,4	-	-	2,5	-	-	-
ЗМІ-3У	0,12	13,3	5,0	3,4	4,8	0,9	7,3	-	-	-	-	-	-	-	0,015
CMSX-10	-	2,0	3,0	5,7	0,2	0,4	5,0	0,1	8,0	0,03	-	6,0	-	-	-
ЖС32	0,15	5,0	9,0	6,0	-	1,0	8,3	1,5	4,0	-	-	4,0	-	-	0,015
ЖС6К	0,18	10,6	4,5	5,7	2,8	4,0	5,1							0,04	0,015
ЖС6У	0,16	8,8	9,8	5,6	2,4	1,8	10,3	1,0	-	-	-	-	-	0,04	0,025
ЖС26	0,15	4,9	9,0	5,9	1,0	1,1	11,7	1,6	-	-	1,0	-	-	-	0,015
*ЗМІ-3У-М1	0,06	11,5	5,0	3,6	4,5	0,8	7,0	-	4,0	-	-	-	-	-	0,010
ЧС70	0,09	15,8	10,7	2,8	4,6	2,0	5,5	0,2	-	-	-	-	-	0,050	0,020
ВЖМ-1	-	2,5	11,0	5,8	-	2,0	1,3	-	8,8	-	-	9,0	-	-	-
ВЖМ-4	0,008	2,5	6,0	6,0	-	4,0	4,0	-	4,5	-	-	6,5	4,0	-	0,004
ЖС3ЛС	0,09	16,0	5,0	2,7	2,7	4,0	4,0	-	-	-	-	-	-	0,015	0,015
*ЖС3ЛС-М	0,10	14,5	4,5	3,0	3,0	2,0	6,5	-	2,5	0,3	-	-	-	0,015	0,015
ЖС32Е	0,07	5,0	5,5	6,0	-	0,6	6,7	0,8	8,0	-	-	2,0	-	0,025	0,010
ВЖЛ12Е	0,18	9,4	9,0	5,4	4,5	3,1	1,4	0,75	-	-	0,75	-	-	0,020	0,011
CMSX-4	-	6,5	9,0	5,6	1,0	0,6	6,0	-	6,5	0,10	-	3,0	-	-	-
IN-939	0,15	22,5	19,0	1,9	3,7	-	2,0	1,0	1,4	-	-	-	-	0,100	0,010
GTD-111	0,10	14,0	9,5	3,0	5,0	1,5	4,0	-	3,0	0,15	-	-	-	0,030	0,010
IN-738	0,10	16,0	8,5	3,4	3,4	1,75	2,6	0,9	1,75	-	-	-	-	0,050	0,010
U-500	0,07	18,0	19,0	3,0	3,0	4,2	-	-	-	-	-	-	-	0,05	0,007
U-700	0,06	15,5	17,0	4,7	3,5	5,0	-	-	-	-	-	-	-	0,02	0,030
Rene N5	0,05	7,0	7,5	6,2	-	1,5	5,0	-	6,6	0,15	-	3,0	-	-	0,004
Rene N6	0,05	4,2	12,5	5,75	-	1,4	6,0	-	7,2	0,15	-	5,4	-	-	0,004
CM186LC	0,07	6,0	9,0	5,7	0,7	0,5	8,0	-	3,0	1,4	-	3,0	-	0,005	0,015
CM247LC	0,07	8,1	9,2	5,6	0,7	0,5	9,5	-	3,2	1,4	-	-	-	0,015	0,015
Rene 80	0,17	14,0	9,5	3,0	5,0	4,0	4,0	-	-	-	-	-	-	0,030	0,015
PWA1422	0,14	9,0	10,0	5,0	2,0	-	12	1,0	-	1,5	-	-	-	0,050	0,015
PWA1480	-	10	5,0	5,0	1,5	-	4,0	-	12,0	-	-	-	-	-	-
ЖСКС-1	0,10	14,0	9,0	4,0	4,0	2,0	4,0	1,0	0,5	-	-	-	-	-	0,015
ЖСКС-2	-	13,5	9,5	4,1	3,8	2,0	4,1	-	2,0	-	-	1,0	-	-	-
CMSX-11B	0,002	12,5	7,0	3,6	4,2	0,5	5,6	0,01	5,0	0,004	-	-	-	0,001	0,002
CMSX-11C	0,002	14,9	3,0	3,4	4,2	0,4	4,5	0,01	5,0	0,004	-	-	-	0,001	0,002
TMS-162	-	2,9	5,8	5,8	-	3,9	5,8	-	5,6	0,09	-	4,9	6,0	-	-
TMS-196	-	4,6	5,6	5,6	-	2,4	5,0	-	5,6	0,10	-	6,4	5,0	-	-

Примітка: *- сплави ЗМІ-3У-М1 [30] і ЖС3ЛС-М [33] розроблені ЗНТУ в рамках науково-дослідних робіт кафедри «Фізичне матеріалознавство»

Таблиця 2 - Групи досліджених характеристик жароміцних нікелевих сплавів

Група 1 – Параметри структурної стабільності
$П_{ТЩУ}$ = Cr / (Cr+Mo+W), параметр структурної стабільності, співвідношення цих елементів в складі сплаву, % ат.; $\bar{N}v_\gamma$ - сумарна кількість електронних вакансій елементів в γ- твердому розчині; $\bar{M}d_\gamma$ - сумарний енергетичний рівень d-орбіталей елементів в γ- твердому розчині; $\bar{M}d_C$ – сумарний енергетичний рівень d-орбіталей елементів в складі сплаву; ΔE – величина дисбалансу системи легування сплаву.
Група 2 – Структурно-фазові характеристики
γ- фаза, складнолегований γ- твердий розчин; γ'- фаза - складнолегована інтерметалідна фаза на основі (Ni_3Al); евтектика типу (γ+γ'); карбіди різних типів (MC, $M_{23}C_6$, M_6C); бориди різних типів (M_3B_2, MB_2); топологічно щільноупаковані (ТЩУ) фази різних типів (σ-, μ-, η-, p-).
Група 3 – Фізичні характеристики
ρ - питома щільність; E - модуль пружності Юнга ; α - коефіцієнт термічного розширення ; C_P – питома теплоємність ; r - питомий електроопір ; λ – теплопровідність ; $a_{\gamma'}$ - параметр кристалевої гратки γ'- фази; a_γ - параметр кристалевої гратки γ- твердого розчину; місфіт $\delta = 2 \cdot \frac{(a\gamma' - a\gamma)}{(a\gamma + a\gamma')} \cdot 100\%$ - розмірна невідповідність параметрів граток $a_{\gamma'}$ - і a_γ – фаз.
Група 4 – Температурні характеристики
(ΣC_i^{γ}) - мінілегувальний комплекс , сумарний вміст елементів, що зміцнюють γ- твердий розчин (Mo+W+Ta+Re+Ru), % за масою; ($\Sigma C_i^{\gamma'}$) – мінілегувальний комплекс, сумарний вміст γ'- утворювальних елементів (Al+Ti+Nb+Ta+Hf), % за масою, в складі сплаву; (t_L) - температура ліквідусу, ^{0}C; (t_S) - солідусу, ^{0}C; ($\Delta t_{КР.}$) - температурний інтервал кристалізації сплаву, ^{0}C; ($t_{ЕВТ.}$) - температура локального плавлення евтектики (γ+γ'), ^{0}C; ($t_{П.Р.}^{\gamma'}$) - температура початку і ($t_{К.Р.}^{\gamma'}$) кінця розчинення γ'- фази в γ- твердому розчині, ^{0}C; ($\Delta t_{ГОМ.}$) – температурний інтервал для проведення термічної обробки (гомогенізація), ^{0}C; ($t_{ГОМ.}$) - оптимальна температура гомогенізації для сплаву, ^{0}C.
Група 5 – Корозійні характеристики
$П_{КС} = \sqrt{Cr} \cdot$ (Ti/Al) - мінілегувальний комплекс, співвідношення цих елементів у складі сплаву; ($\bar{V}_q^t$) - середня швидкість ВТК в умовах впливу синтетичної золи, що імітує продукти згоряння газотурбінного палива за температури (t^0C); ($t_{КРИТ.}$) - критична температура переходу до прискореної ВТК сплаву.
Група 6 – Механічні характеристики
($\sum C_i^{\gamma'}$) - мінілегувальний комплекс, сумарний вміст γ'- утворювальних елементів (Al+Ti+Nb+Ta+Hf), % за масою, в складі сплаву; ($V_{\gamma'}^t$) – об'ємна частка γ'- фази в структурі за температури (t^0C); (σ_B^t) – границі короткочасної міцності за температури (t^0C); (σ_τ^t) - границі 100- і 1000- годинної тривалої міцності за температури (t^0C) ; (τ_σ^t) - довговічність, час до руйнування зразків ($\tau_{РУЙН.}$) в умовах напруги (σ, МПа) за температури (t,^{0}C).

За схемою, наведеною на рисунку 1, була здійснена математична обробка даних за групами (1, 4, 5, 6) властивостей досліджених сплавів (табл. 1). Отримані результати було оброблено у програмному комплексі Microsoft Office в пакеті EXCEL методом найменших квадратів (МНК) з отриманням кореляційних залежностей типу «параметр-властивість» з побудовою функцій відгуку (ліній трендів) з коефіцієнтами детермінації (R^2) і отриманням математичних рівнянь регресійних моделей, які оптимально описують ці залежності. Розрахунки структурно-фазових (група 2) і фізичних (група 3) характеристик досліджених сплавів виконувались на основі хімічного складу досліджених сплавів з використанням комп'ютерного моделювання термодинамічних процесів кристалізації (охолодження) або нагрівання методом CALPHAD в програмі JMatPro, з отриманням температурних залежностей типу «склад-властивість».

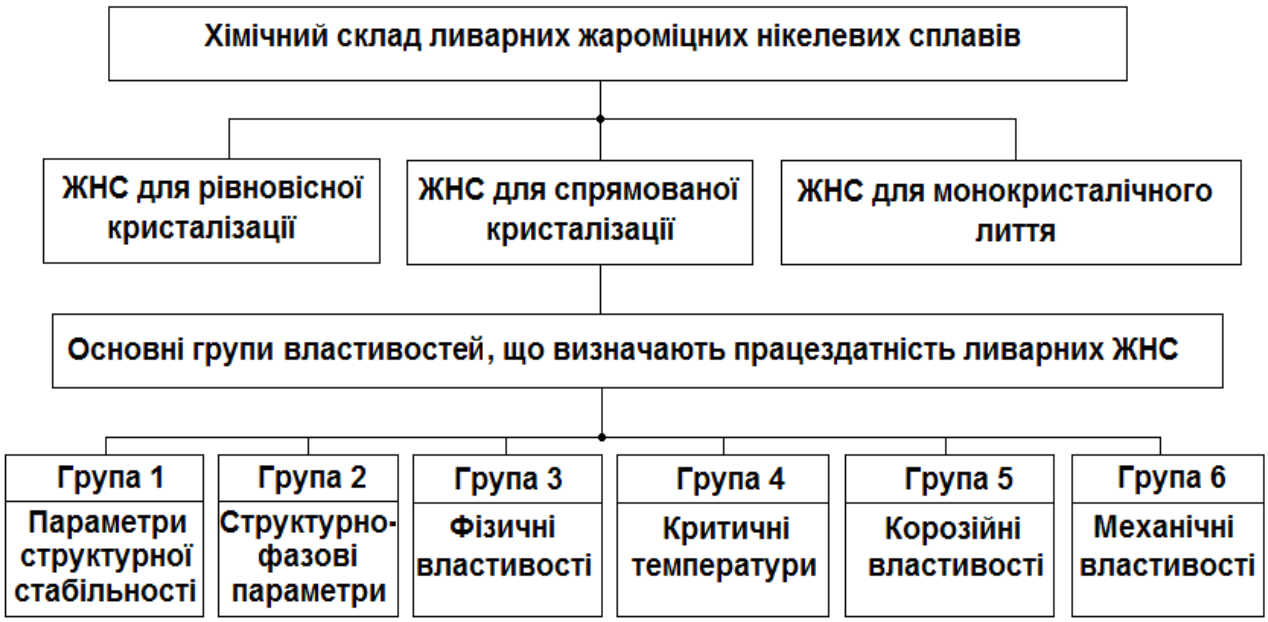


Рисунок 1 - Схема систематизації та обробки даних за групами характеристик ливарних жароміцних нікелевих сплавів

У третьому розділі представлено результати поетапного отримання регресійних моделей для розрахункового прогнозу властивостей за групами на основі обробки розрахункових і експериментальних даних за вищезазначеними характеристиками для класу ливарних ЖНС.

Встановлено кореляційні залежності впливу величини мінілегувального комплексу $П_{ТЩУ}$ = Cr / (Cr+Mo+W), співвідношення цих елементів в складі ливарних ЖНС, на параметри структурної стабільності ($\bar{N}_{V\gamma}$) і ($\bar{M}d_{\gamma}$) γ-твердого розчину з отриманням нових прогнозуючих регресійних моделей (група 1) для їх розрахунку з відповідними похибками 2,98% і 1,37%. Встановлена кореляційна залежність впливу величини дисбалансу (ΔE) системи легування досліджених сплавів на параметр ($\bar{M}d_C$) для досліджених сплавів з

отриманням нової регресійної моделі для прогнозування цього параметру з похибкою 1,07%, що дозволяє точніше розраховувати ці параметри, ніж традиційними методами PHACOMP і New PHACOMP з їх відомими регресійними рівняннями (табл. 3).

Таблиця 3 - Регресійні моделі для розрахунку параметрів структурної стабільності ливарних ЖНС

Розрахунковий параметр	Коефіцієнт детермінації, R^2	Регресійні моделі (група 1)
$П_{ТЩУ}$	-	$П_{ТЩУ}$ = Cr / (Cr + Mo + W), % ат.
$\overline{N}_{V\gamma}$	0,9112	$\overline{N}_{V\gamma} = 1{,}7346 \cdot (П_{ТЩУ}) + 0{,}7593$
$\overline{Md}_{\gamma}$	0,9813	$\overline{Md}_{\gamma} = 0{,}0975 \cdot (\overline{N}_{V\gamma}) + 0{,}6941$
ΔE	-	$\Delta E = \Sigma E_i \cdot C_i - 0{,}036 \cdot \Sigma A_i \cdot C_i - 6{,}28$
$\overline{Md}_{C}$	0,9886	$\overline{Md}_{C} = 0{,}1879 \cdot (\Delta E) + 0{,}9803$

В результаті отримані регресійні моделі (РМ) (група 1), які враховують принципи збалансованого легування жароміцних нікелевих сплавів, що дозволяє точніше визначати їх структурну стабільність за параметрами: $П_{ТЩУ} = 0{,}825 \pm 0{,}025$; $\overline{N}_{V\gamma} \le 2{,}40$; $\overline{Md}_{\gamma} \le 0{,}93$; $-0{,}04 \le \Delta E \le 0{,}04$; $0{,}972 \le \overline{Md}_{C} \le 0{,}988$.

В таблиці 4, як приклад, представлено результати розрахунків параметрів структурної стабільності для відомого промислового сплаву ЗМІ-3У середнього рівня легування, розрахованих за регресійними моделями (група 1), в порівнянні з результатами розрахунків, отриманих за відомими регресійними рівняннями традиційних методів PHACOMP і New PHACOMP.

Таблиця 4 - Порівняльні розрахункові значення параметрів структурної стабільності (група 1) для сплаву ЗМІ-3У

Сплав ЗМІ-3У	Параметр структурної стабільності				
	$П_{ТЩУ}$	$\overline{N}_{V\gamma}$	$\overline{Md}_{\gamma}$	ΔE	$\overline{Md}_{C}$
PHACOMP	-	2,1431	-	-	-
New PHACOMP	-	-	0,9065	-	0,9833
ΔE-метод	-	-	-	+0,0362	-
Розрахунок за РМ	0,8421	2,2200	0,9106	+0,0362	0,9871

Використання комп'ютерного моделювання термодинамічних процесів методом CALPHAD в програмі JMatPro показало, що розрахунки структурно-фазових (група 2) і фізичних (група 3) характеристик, що були виконані на основі хімічного складу відомого сплаву ЗМІ-3У (рис. 2), узятого для прикладу, мають збіжність з експериментальними даними з похибкою менше 5% (табл. 5, 6).

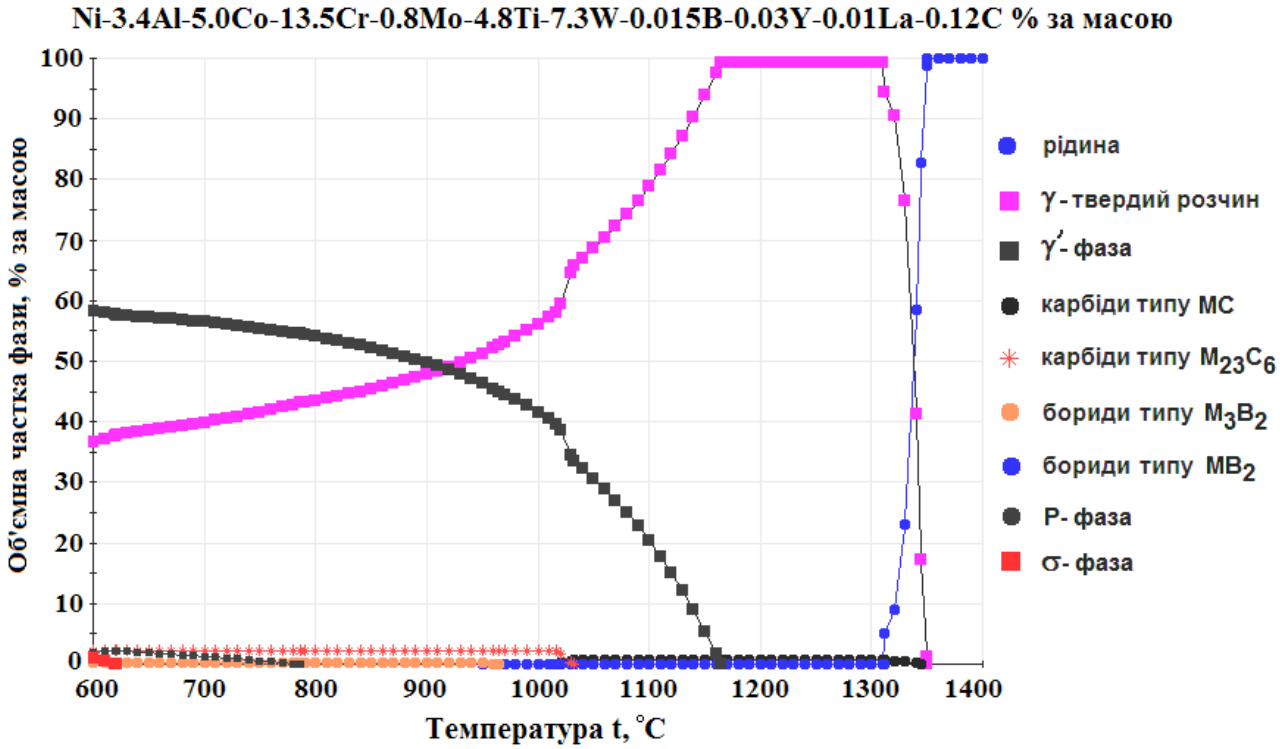


Рисунок 2 - Моделювання процесу виділення фаз при кристалізації в сплаві ЗМІ-3У середнього рівня легування

Таблиця 5 - Розрахункові і експериментальні значення структурно-фазових характеристик (група 2) сплаву ЗМІ-3У середнього рівня легування

Фаза	Об'ємна частка фази, % за масою		Вміст елементу в фазі при 20^{0}С, % за масою								
	Розр.	Експ.	C	Co	Cr	Al	Ti	Mo	W	B	Ni
γ-	36,63	45,2	- *-	9,17 *9,00	26,05 *25,85	0,35 *-	0,06 *-	0,52 *0,50	7,63 *7,50	- *-	56,22 *57,20
γ'-	57,43	52,0	- *-	2,39 *2,40	2,09 *2,30	5,62 *5,60	8,21 *7,90	0,03 *-	5,65 *5,20	- *-	76,01 *76,60
MC	0,72	0,9	15,13 *15,90	- *-	0,73 *-	- *-	57,69 *56,40	0,16 *-	26,29 *27,70	- *-	- *-
$M_{23}C_6$	2,15	1,9	5,10 *5,20	1,01 *1,00	71,54 *72,90	- *-	- *-	13,45 *13,00	5,13 *5,00	- *-	3,77 *2,90
**M_3B_2	0,18	-	-	-	21,84	-	-	63,88	6,02	8,08	0,18
**MB_2	0,04	-	-	-	-	-	68,88	-	-	31,12	-
**p-	1,96	-	-	4,65	18,13	-	-	8,40	54,23	-	14,60
**σ-	0,89	-	-	16,52	62,24	-	-	1,98	3,61	-	15,65

Примітка: *- експериментальні значення, отримані методом локального МРСА; ** - фази експериментально не визначені.

Таблиця 6 - Розрахункові і експериментальні значення фізичних властивостей (група 3) сплаву ЗМІ-3У середнього рівня легування

Сплав ЗМІ-3У	Фізичні характеристики при 20^0C								
	ρ	E	$\alpha \cdot 10^6$	C_p	$r \cdot 10^6$	λ	$a_{\gamma'}$	a_{γ}	δ
Од. виміру	г/см^3	ГПа	1/К	Дж/г·К	Ом·м	Вт/м·К	нм	нм	%
Розрахунок	8,29	212,5	12,23	0,430	0,70	10,42	0,3586	0,3578	0,220
Експеримент	8,28	224,0	12,20	0,436	0,69	8,6	0,3587	0,3577	0,280

Встановлено кореляційні залежності впливу величини мінілегувального комплексу ΣC_i^{γ} = (Mo+W+Ta+Re+Ru)%, за масою, сумарного вмісту цих елементів в складі, що зміцнюють γ- твердий розчин, на критичні температури ліквідусу (t_L) і солідусу (t_S) для класу ливарних ЖНС, з отриманням нових прогнозуючих регресійних моделей для розрахунку цих температур з відповідними похибками 1,41% ; 1,36%.

Встановлено кореляційні залежності впливу величини мінілегувального комплексу $\Sigma C_i^{\gamma'}$ = (Al+Ti+Nb+Ta+Hf)%, за масою, сумарного вмісту в складі γ'- утворювальних елементів, на критичні температури початку ($t_{П.Р.}^{\gamma'}$) і кінця ($t_{К.Р.}^{\gamma'}$) розчинення γ'- фази в γ- твердому розчині, а також на температуру ($t_{ЕВТ.}$) локального плавлення евтектики (γ+γ') з отриманням нових прогнозуючих регресійних моделей для розрахунку цих температур з відповідними похибками 1,76%; 1,69; 2,10% (табл. 7).

Таблиця 7 - Регресійні моделі для розрахунку критичних температур ливарних ЖНС

Розрахунковий параметр	Одиниця виміру	R^2	Регресійні моделі (група 4)
ΣC_i^{γ}	%, мас.	-	ΣC_i^{γ} = (Mo+W+Ta+Re+Ru)
t_L	^{0}C	0,9801	$t_L = 5{,}5572 \cdot (\Sigma C_i^{\gamma}) + 1309{,}3$
t_S	^{0}C	0,9816	$t_S = 8{,}7819 \cdot (\Sigma C_i^{\gamma}) + 1189{,}6$
$\Sigma C_i^{\gamma'}$	%, мас.	-	$\Sigma C_i^{\gamma'}$ = (Al+Ti+Nb+Ta+Hf)
$t_{ЕВТ.}$	^{0}C	0,9563	$t_{ЕВТ.} = 16{,}059 \cdot (\Sigma C_i^{\gamma'}) + 1101{,}8$
$t_{К.Р.}^{\gamma'}$	^{0}C	0,9715	$t_{К.Р.}^{\gamma'} = 25{,}073 \cdot (\Sigma C_i^{\gamma'}) + 955{,}01$
$t_{П.Р.}^{\gamma'}$	^{0}C	0,9691	$t_{П.Р.}^{\gamma'} = 3{,}0087 \cdot (\Sigma C_i^{\gamma'}) + 818{,}49$

Для відомого промислового сплаву ЗМІ-3У середнього рівня легування, взятого в якості прикладу, представлені розрахункові значення температурних характеристик, розрахованих за отриманими регресійними моделями (група 4) (табл. 7), в порівнянні з його експериментальними паспортними даними (табл. 8). Встановлено кореляційні залежності впливу величини мінілегувального комплексу $П_{КС} = \sqrt{Cr} \cdot (Ti / Al)$, співвідношення цих елементів в складі ливарних ЖНС, на середню швидкість корозії ($\overline{V}_q^t$) в умовах синтетичної золи, що імітує продукти згоряння газотурбінного палива для температур 800^0, 850^0, 900^0 і 950^0C, а також впливу на критичну температуру ($t_{КРИТ.}$) переходу до прискореної ВТК, з отриманням нових регресійних

моделей для прогнозування цих характеристик з відповідними похибками 2,85%; 2,96%; 2,50%; 2,66%; 1,39% (табл. 9).

Таблиця 8 - Розрахункові і експериментальні значення критичних температур (група 4) сплаву ЗМІ-3У

Сплав ЗМІ-3У	Температурні характеристики, ^{0}C								
	$\sum C_i^{\gamma}$	t_L	t_S	$\Delta t_{КР.}$	$\sum C_i^{\gamma'}$	$t_{ЕВТ.}$	$t_{К.Р.}^{\gamma'}$	$t_{П.Р.}^{\gamma'}$	$\Delta t_{ГОМ.}$
Розрахунок	8,1	1354,3	1260,7	93,6	8,2	1233,5	1160,6	843,2	72,9
Експеримент	-	1350	1255	95,0	-	1235	1167	-	68,0

Таблиця 9 - Регресійні моделі для розрахунку корозійних властивостей ливарних ЖНС

Розрахунковий параметр	Одиниця виміру	R^2	Регресійні моделі (група 5)
$П_{КС}$	-	-	$П_{КС} = \sqrt{Cr} \cdot (Ti / Al)$, % мас.
$\bar{V}_q^{800}$	г / м^2·с	0,9187	$V_q^{800} \cdot 10^4 = 17,076 \cdot exp^{-0,9364 \cdot Пкс}$
$\bar{V}_q^{850}$	г / м^2·с	0,9123	$V_q^{850} \cdot 10^3 = 27,645 \cdot exp^{-0,8792 \cdot Пкс}$
$\bar{V}_q^{900}$	г / м^2·с	0,9374	$V_q^{900} \cdot 10^3 = 76,395 \cdot exp^{-0,8034 \cdot Пкс}$
$\bar{V}_q^{950}$	г / м^2·с	0,9293	$V_q^{950} \cdot 10^3 = 94,478 \cdot exp^{-0,7229 \cdot Пкс}$
$t_{КРИТ.}$	^{0}C	0,9806	$t_{КРИТ.} = 677,22 \cdot (П_{КС})^{0,1405}$

У таблиці 10 наведено порівняльні результати розрахунків середньої швидкості корозії ($\bar{V}_q^t$) за температур 800^0, 850^0, 900^0 і 950^0C, а також критичної температури ($t_{КРИТ.}$) переходу до прискореної ВТК, які здійснювалися за отриманими регресійними моделями (група 5), в порівнянні з експериментальними паспортними даними сплаву ЗМІ-3У середнього рівня легування, узятого в якості прикладу.

Таблиця 10 - Розрахункові і експериментальні значення корозійних властивостей (група 5) сплаву ЗМІ-3У

Сплав ЗМІ-3У	Середня швидкість корозії ($\bar{V}_q^t$), г / м^2·с					
	$П_{КС}$	$\bar{V}_q^{800} \cdot 10^4$	$\bar{V}_q^{850} \cdot 10^3$	$\bar{V}_q^{900} \cdot 10^3$	$\bar{V}_q^{950} \cdot 10^3$	$t_{КРИТ.}$,^{0}C
Розрахунок	5,15	0,140	0,2990	1,2208	2,2852	852,6
Експеримент	-	0,100	0,2500	1,1400	1,8500	~ 850

Встановлено кореляційні залежності впливу величини мінілегувального комплексу $\Sigma C_i^{\gamma'}$ = (Al+Ti+Nb+Ta+Hf)%, за масою, сумарного вмісту γ'- утворювальних елементів в складі ливарних ЖНС, на об'ємну частку ($V_{\gamma'}^t$) γ'- фази в структурі за температур 20^0, 800^0, 900^0 і 1000^0C, з отриманням нових регресійних моделей для прогнозування об'ємної частки γ'- фази в структурі з відповідними похибками 1,81%; 1,83%; 1,80%; 1,77%.

Встановлено кореляційні залежності впливу величини об'ємної частки ($V_{\gamma'}^t$) γ'- фази в структурі ливарних ЖНС на границі їх короткочасної міцності (σ_B^t) за

температур 20^0, 800^0, 900^0, 1000^0C з отриманням нових регресійних моделей для прогнозування цих характеристик з відповідними похибками 2,28%; 2,20%; 1,20%; 2,52%, та на границі 100- і 1000- годинної тривалої міцності (σ_τ^t) за температур 800^0, 900^0, 1000^0C з отриманням нових прогнозуючих регресійних моделей для розрахунку цих характеристик з відповідними похибками 1,19%; 1,41%; 1,12%; 1,88%; 1,75%; 1,87% (табл. 11-13).

Таблиця 11 - Регресійні моделі для розрахунку об'ємної долі ($V_{\gamma'}^t$) γ'- фази в структурі ливарних ЖНС за температур 20^0, 800^0, 900^0 і 1000^0C

Розрахунковий параметр	Одиниця виміру	R^2	Регресійні моделі (група 6)
$\Sigma C_i^{\gamma'}$	% мас.	-	$\Sigma C_i^{\gamma'} = (Al+Ti+Nb+Ta+Hf)$
$V_{\gamma'}^{20}$	% мас.	0,9671	$V_{\gamma'}^{20} = -0{,}1028 \cdot (\Sigma C_i^{\gamma'})^2 + 5{,}0757 \cdot (\Sigma C_i^{\gamma'}) + 16{,}209$
$V_{\gamma'}^{800}$	% мас.	0,9665	$V_{\gamma'}^{800} = -0{,}4437 \cdot (\Sigma C_i^{\gamma'})^2 + 12{,}769 \cdot (\Sigma C_i^{\gamma'}) - 26{,}493$
$V_{\gamma'}^{900}$	% мас.	0,9677	$V_{\gamma'}^{900} = -0{,}3556 \cdot (\Sigma C_i^{\gamma'})^2 + 10{,}892 \cdot (\Sigma C_i^{\gamma'}) - 21{,}033$
$V_{\gamma'}^{1000}$	% мас.	0,9686	$V_{\gamma'}^{1000} = -0{,}2879 \cdot (\Sigma C_i^{\gamma'})^2 + 10{,}259 \cdot (\Sigma C_i^{\gamma'}) - 30{,}409$

Таблиця 12 - Регресійні моделі для розрахунку границь короткочасної (σ_B^t) міцності за температур 20^0, 800^0, 900^0 і 1000^0C

Розрахунковий параметр	Одиниця виміру	R^2	Регресійні моделі (група 6)
σ_B^{20}	МПа	0,9479	$\sigma_B^{20} = 16{,}625 \cdot (V_{\gamma'}^{20}) + 72{,}049$
σ_B^{800}	МПа	0,9517	$\sigma_B^{800} = 8{,}432 \cdot (V_{\gamma'}^{800}) + 493{,}67$
σ_B^{900}	МПа	0,9857	$\sigma_B^{900} = 13{,}331 \cdot (V_{\gamma'}^{900}) + 131{,}60$
σ_B^{1000}	МПа	0,9461	$\sigma_B^{1000} = 9{,}0038 \cdot (V_{\gamma'}^{1000}) + 164{,}07$

Таблиця 13 - Регресійні моделі для розрахунку границь 100- і 1000- годинної тривалої (σ_τ^t) міцності за температур 800^0, 900^0 і 1000^0C

Розрахунковий параметр	Одиниця виміру	R^2	Регресійні моделі (група 6)
σ_{100}^{800}	МПа	0,9859	$\sigma_{100}^{800} = 8{,}3257 \cdot (V_{\gamma'}^{800}) + 127{,}09$
σ_{1000}^{800}	МПа	0,9645	$\sigma_{1000}^{800} = 7{,}7537 \cdot (V_{\gamma'}^{800}) + 1{,}4101$
σ_{100}^{900}	МПа	0,9802	$\sigma_{100}^{900} = 9{,}4593 \cdot (V_{\gamma'}^{900}) - 99{,}463$
σ_{1000}^{900}	МПа	0,9692	$\sigma_{1000}^{900} = 9{,}5859 \cdot (V_{\gamma'}^{900}) - 231{,}47$
σ_{100}^{1000}	МПа	0,9875	$\sigma_{100}^{1000} = 5{,}7086 \cdot (V_{\gamma'}^{1000}) - 56{,}666$
σ_{1000}^{1000}	МПа	0,9650	$\sigma_{1000}^{1000} = 5{,}3733 \cdot (V_{\gamma'}^{1000}) - 141{,}95$

У таблицях 14-16 представлені розрахункові значення об'ємної частки ($V_{\gamma'}^t$) γ'- фази, а також границь короткочасної (σ_B^t) і границь 100- і 1000- годинної тривалої (σ_τ^t) міцності для досліджених температур, які

розраховувалися за отриманими регресійними моделями (група 6), в порівнянні з експериментальними паспортними даними для промислового ливарного жароміцного корозійностійкого сплаву ЗМІ-3У середнього рівня легування, взятого в якості прикладу.

Таблиця 14 - Розрахункові і експериментальні значення границь короткочасної ($\sigma_B{}^t$) міцності (група 6) для сплаву ЗМІ-3У

Сплав ЗМІ-3У	Мінілегувальний комплекс ($\Sigma C_i{}^{\gamma'}$), об'ємна частка ($V_{\gamma'}{}^t$), % за масою ; границя короткочасної міцності ($\sigma_B{}^t$), МПа								
	$\Sigma C_i{}^{\gamma'}$	$V_{\gamma'}{}^{20}$	$V_{\gamma'}{}^{800}$	$V_{\gamma'}{}^{900}$	$V_{\gamma'}{}^{1000}$	$\sigma_B{}^{20}$	$\sigma_B{}^{800}$	$\sigma_B{}^{900}$	$\sigma_B{}^{1000}$
Розрахунок	8,2	50,9	48,4	44,4	34,4	918,6	901,6	723,1	473,4
Експеримент	-	48	-	-	-	920	900	735	-

Таблиця 15 - Розрахункові і експериментальні значення границь 100- годинної тривалої міцності ($\sigma_{100}{}^t$) (група 6) для сплаву ЗМІ-3У

Сплав ЗМІ-3У	Мінілегувальний комплекс ($\Sigma C_i{}^{\gamma'}$), об'ємна частка ($V_{\gamma'}{}^t$),% за масою ; границя 100- годинної тривалої міцності ($\sigma_\tau{}^t$), МПа						
	$\Sigma C_i{}^{\gamma'}$	$V_{\gamma'}{}^{800}$	$V_{\gamma'}{}^{900}$	$V_{\gamma'}{}^{1000}$	$\sigma_{100}{}^{800}$	$\sigma_{100}{}^{900}$	$\sigma_{100}{}^{1000}$
Розрахунок	8,2	48,4	44,4	34,4	509,9	320,2	139,4
Експеримент	-	-	-	-	491	300	-

Таблиця 16 - Розрахункові і експериментальні значення границь 1000- годинної тривалої міцності ($\sigma_{1000}{}^t$) (група 6) для сплаву ЗМІ-3У

Сплав ЗМІ-3У	Мінілегувальний комплекс ($\Sigma C_i{}^{\gamma'}$), об'ємна частка ($V_{\gamma'}{}^t$),% за масою ; границя 1000- годинної тривалої міцності ($\sigma_\tau{}^t$), МПа						
	$\Sigma C_i{}^{\gamma'}$	$V_{\gamma'}{}^{800}$	$V_{\gamma'}{}^{900}$	$V_{\gamma'}{}^{1000}$	$\sigma_{1000}{}^{800}$	$\sigma_{1000}{}^{900}$	$\sigma_{1000}{}^{1000}$
Розрахунок	8,2	48,4	44,4	34,4	376,5	193,9	42,6
Експеримент	-	-	-	-	392	199	-

На рисунку 3 представлено створений алгоритм методики КРАМ для оптимізації складу розробляємого сплаву із заданими характеристиками. Алгоритм разом із відомими методами, містить групи отриманих регресійних моделей, інтегрованих в загальну схему алгоритму. Це дозволяє поетапно здійснювати розрахунки за заданими властивостями. Показано, що за отриманими групами регресійних моделей, які включають мінілегувальні комплекси ($П_{ТЩУ}$, $\sum C_\gamma$, $\sum C_{\gamma'}$, $П_{КС}$), можна розраховувати задані характеристики з похибкою менше 5%. Таким чином, створений алгоритм методики КРАМ дозволяє без попереднього проведення експериментів визначати оптимальний склад розробляємого сплаву за заданими властивостями (див. рис. 3).

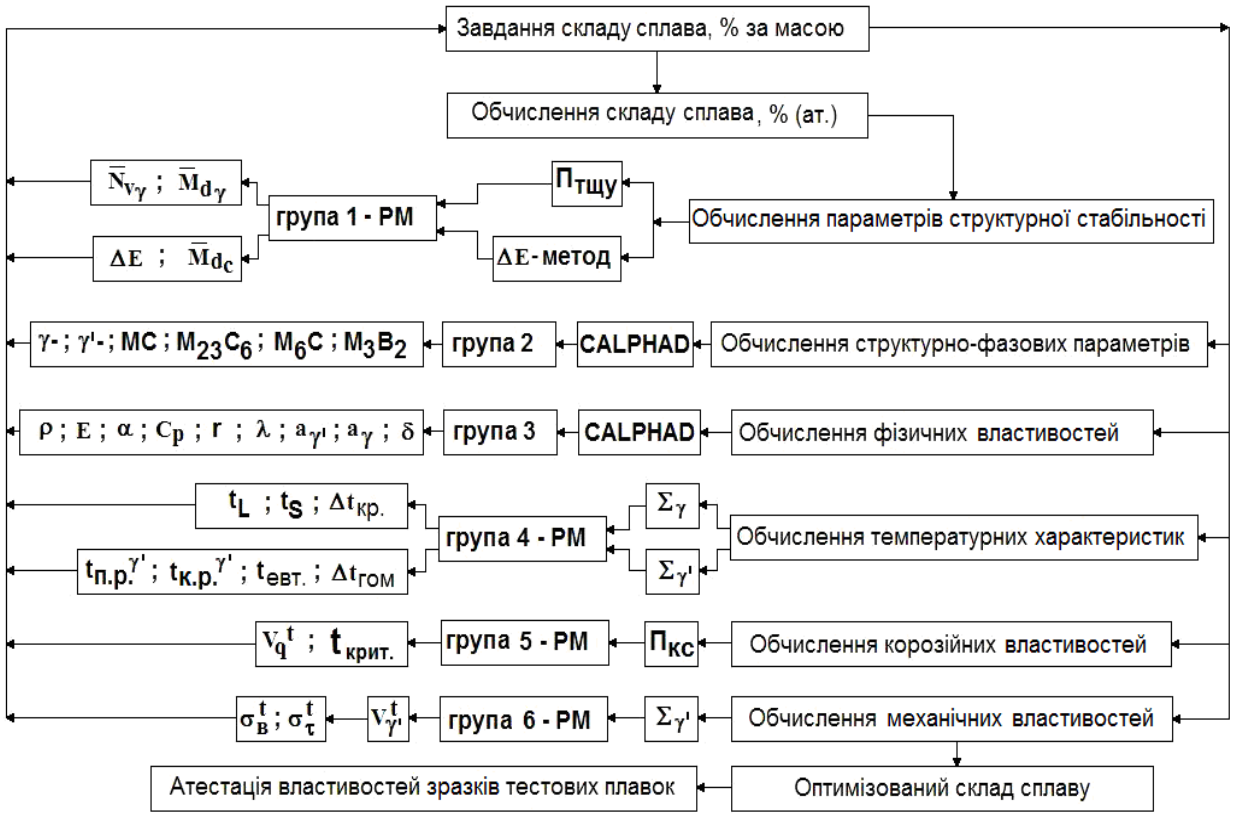


Рисунок 3 - Загальний алгоритм методики КРАМ для оптимізації складу розробляємого сплаву за заданими критеріями

У четвертому розділі представлено результати поетапної оптимізації, за створеним алгоритмом методики КРАМ, складу нового ливарного жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву для виготовлення робочих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації для наземних газотурбінних установок Д-336.На початковому етапі розробки були сформульовані вимоги до рівня контрольованих характеристик, які закладалися в розрахунок для оптимізації складу розробляємого сплаву за заданими критеріями (табл. 17).

Для отримання дослідних композицій за основу було обрано відомий промислово доступний ливарний жароміцний корозійностійкий нікелевий сплав ЗМІ-3У, як найбільш близький за науково-технічною сутністю і очікуваному результату. Пошук оптимальної композиції розробляємого сплаву проводився в новій системі легування (Ni-Co-Cr-Al-Ti-Mo-W-Ta-B-Y-La-C) шляхом покрокового варіювання елементами в досліджуваних межах: новим елементом танталом (1,0...5,0)%, з одночасним варіюванням вмістом вуглецю в межах (0,04...0,12)% і хрому в межах (11,0...13,0)%, за масою (табл. 18).

Відповідно з алгоритмом комплексної методики (див. рис. 3) для дослідних складів (1-5) і промислових сплавів ЗМІ-3У, ЖС26-ВІ, наведених в таблиці 18, були розраховані показники за заданими групами властивостей. Розрахункові результати, що були отримані на модельних складах (1-5) порівнювалися з рівнем контрольованих показників (див. табл. 17), що дозволило їх оцінити за заданими критеріями і обрати для подальших експериментальних досліджень в промислових умовах найбільш оптимальний склад 4.

Таблиця 17 - Основні параметри для оптимізації складу за заданими характеристиками розробляємого сплаву для спрямованої (моно) кристалізації

Контрольовані параметри	Одиниця виміру	Рівень параметра
$П_{ТЩУ}$ = Cr / (Cr+Mo+W)	-	0,825 ± 0,025
Nv_γ	-	≤ 2,40
$\bar{M}d_\gamma$	-	≤ 0,93
$\bar{M}d_C$	-	0,980 ± 0,008
ΔE	-	0,00 ± 0,04
$\sum C_\gamma$ = (Mo+W+Ta+Re+Ru)	%, за масою	≥ 11,0
$\sum C_{\gamma'}$ = (Al+Ti+Nb+Ta+Hf)	%, за масою	≥ 11,0
t_S	^{0}C	≥ 1290
$\Delta t_{КР.}$	^{0}C	≤ 80
$t_{К.Р.}^{\gamma'}$	^{0}C	≥ 1200
$\Delta t_{ГОМ.}$	^{0}C	≥ 20
$V_{\gamma'}^{20}$	%, за масою	≥ 60
Місфіт, δ	%	0,15 - 0,45
σ_B^{20}	МПа	≥ 950
δ^{20}	%	≥ 5,0
τ_{260}^{975}	годин	≥ 40
$П_{КС} = \sqrt{Cr} \cdot$ (Ti / Al)	-	≥ 3,0
$t_{КРИТ.}$	^{0}C	≥ 800
Рівень виходу придатних литих робочих лопаток за макроструктурою	%	На рівні промислового сплаву ЖС26-ВІ

Таблиця 18 - Хімічний склад дослідних сплавів

№ складу	Вміст елементу %, за масою; Ni - основа												
	C	Cr	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	V	Ta	B	Y	La
ЗМІ-3У	0,12	13,5	5,0	3,4	4,8	0,8	7,3	-	-	-	0,015	0,03	0,01
1	0,12	13,0	5,0	3,6	4,5	0,8	7,0	-	-	1,0	0,010	0,03	0,01
2	0,10	12,5	5,0	3,6	4,5	0,8	7,0	-	-	2,0	0,010	0,03	0,01
3	0,08	12,0	5,0	3,6	4,5	0,8	7,0	-	-	3,0	0,010	0,03	0,01
4	0,06	11,5	5,0	3,6	4,5	0,8	7,0	-	-	4,0	0,010	0,03	0,01
5	0,04	11,0	5,0	3,6	4,5	0,8	7,0	-	-	5,0	0,010	0,03	0,01
ЖС26-ВІ	0,16	5,0	9,0	5,8	0,8	1,1	11,5	1,6	1,0	-	0,015	0,005	0,005

Оптимальний склад 4 за групами властивостей має наступні розрахункові показники:

- параметри структурної стабільності (група 1): $П_{ТЩУ}$ = 0,8265; $\bar{N}v_\gamma$ = 2,1929; $\bar{M}d_\gamma$ = 0,9079 ; ΔE = - 0,0400; $\bar{M}d_C$ = 0,9728;

- структурно-фазові (група 2) характеристики при 20^{0}C, % за масою: γ = 28,13%; γ' = 63,03; MC = 0,55%; $M_{23}C_6$ = 1,18%; *M_3B_2 = 0,12%; *MB_2 = 0,03%; *σ = 2,51%; *p = 4,45% (* - виділення фаз малоймовірне);

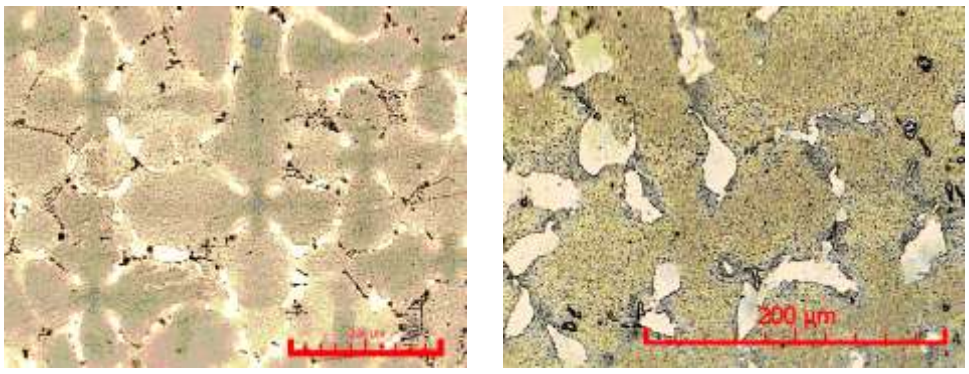
- фізичні (група 3) характеристики при 20^0C: ρ = 8,46 г/см^3; E = 213,66 ГПа; α= 11,29·10 $^{-6}$ 1/К ; C_p = 0,42 Дж / г·К; r = 0,70·10 $^{-6}$ Ом·м; λ = 10,39 Вт/м·К ; $a_{\gamma'}$ = 0,3591 нм ; a_{γ} = 0,3580 нм; (місфіт) δ = 0,362 %;

- температурні (група 4) характеристики, ^{0}C: $\sum C_{\gamma}$ = 11,8%, за масою; $t_L = 1374^0$; $t_S = 1296^0$; $\sum C_{\gamma'}$ = 12,1%, за масою ; $t_{ЕВТ.} = 1293^0$C ; $t_{П.Р.}^{\gamma'} = 855^0$; $t_{К.Р.}^{\gamma'} = 1258^0$C ; $\Delta t_{КР.} = 78^0$; $\Delta t_{ГОМ.} = 38^0$;

- корозійні (група 5) характеристики: $П_{КС}$ = 4,24 ; $\bar{V}_q^{800} = 0{,}3220 \cdot 10^{-4}$; $\bar{V}_q^{850} = 0{,}6653 \cdot 10^{-3}$; $\bar{V}_q^{900} = 2{,}5354 \cdot 10^{-3}$; $\bar{V}_q^{950} = 4{,}4107 \cdot 10^{-3}$; $t_{КРИТ.} = 829^0$;

- механічні (група 6) характеристики: об'ємна частка ($V_{\gamma'}^t$)%, за масою, зміцнювальної γ'- фази в структурі для температур 20^0, 800^0, 900^0 і 1000^0C, відповідно: $V_{\gamma'}^{20}$ = 62,60%; $V_{\gamma'}^{800}$ = 63,0%; $V_{\gamma'}^{900}$ = 58,7%; $V_{\gamma'}^{1000}$ = 51,6%; короткочасна міцність (σ_B^t), відповідно для температур 20^0, 800^0, 900^0 і 1000^0C: σ_B^{20} = 1112 МПа; σ_B^{800} = 1025 МПа; σ_B^{900} = 914 МПа; σ_B^{1000} = 628 МПа; тривала 100- і 1000- годинна міцність (σ_{100}^t), (σ_{1000}^t), відповідно для температур 800^0, 900^0 і 1000^0C: σ_{100}^{800} = 648 МПа; σ_{100}^{900} = 451 МПа; σ_{100}^{1000} = 234 МПа ; σ_{1000}^{800} = 490 МПа; σ_{1000}^{900} = 331 МПа; σ_{1000}^{1000} = 135 МПа; розрахункова довговічність зразків, час до руйнування ($\tau_{РУЙН.}$) в умовах випробування ($\tau_{260}^{975} \geq 40$ годин) становить 47,3 години.

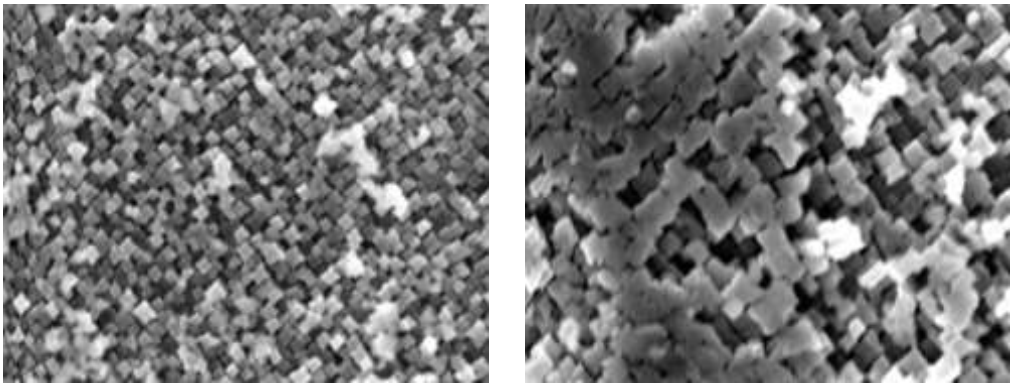
Оптимальний за заданими критеріями дослідний склад 4 було прийнято за середній рівень легування з присвоєнням йому марки ЗМІ-3У-М1. Експериментальні дослідження властивостей, технологічне випробування і промислову атестацію розробленого сплаву ЗМІ-3У-М1 було здійснено на монокристалічних зразках і робочих лопатках з КГО [001], отриманих за серійною технологією з тестових і промислових плавок в умовах підприємства ДП «Івченко-Прогрес». Металографічні дослідження показали, що в литому стані мікроструктура монокристалічних зразків [001] оптимізованого складу розробленого сплаву ЗМІ-3У-М1 має типову для сплавів цього класу спрямовану (моно) структуру дендритної будови, що представляє γ- твердий розчин, зміцнювальну γ'- фазу та евтектику (γ+γ'), а також карбідну фазу. Частинки поліедричної морфології було ідентифіковано як карбіди МС. Частинки, що мали шрифтову та полігональну морфологію було ідентифіковано як карбіди $M_{23}C_6$ (рис. 4).



×100 ×200

Рисунок 4 - Мікроструктура монокристалічних зразків [001] сплаву ЗМІ-3У-М1 в литому стані (травлення в електроліті)

Показано, що в структурі литого стану (без ТО) розміри частинок γ'- фази значно розрізняються в осях дендритів 015-0,25 мкм (рис. 5а) і в міждендритних просторах 0,45-0,75 мкм (рис. 5б). У міждендритних просторах частинки γ'- фази в 3-5 разів більше, ніж в осях дендритів. Розмірна і морфологічна неоднорідність частинок γ'- фази в структурі монозразків [001] і лопаток є прямим наслідком дендритної ліквації після спрямованої (моно) кристалізації.

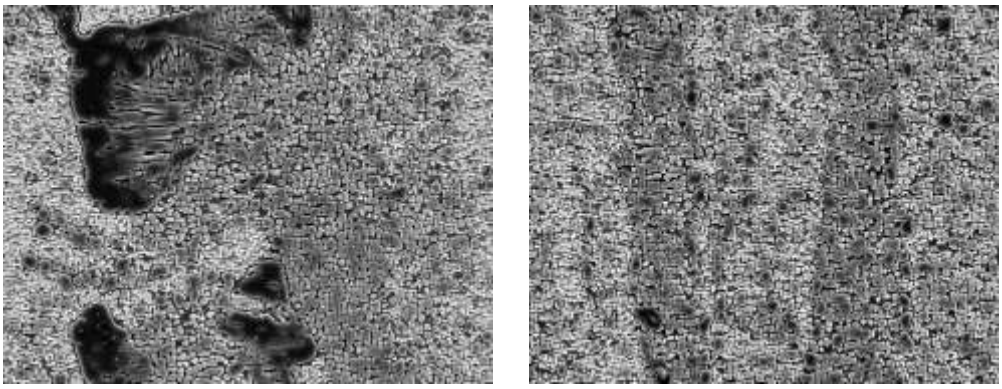


а б

а - вісь дендриту; б - міждендритний простір.

Рисунок 5 - Морфологія γ'- фази в структурі монокристалічних зразків [001] сплаву ЗМІ-3У-М1 в литому стані: (×10000)

Показано, що в литому стані структура монозразків сплаву ЗМІ-3У-М1 характеризується наявністю в міждендритних просторах нерівноважних світлих виділень (γ+γ') евтектики (див. рис. 4, рис. 6 а). Встановлено, що за оптимальної температури гомогенізації 1250^0С відбувається найбільш повне розчинення евтектики (γ+γ') з виділенням додаткової частки дрібнодисперсних частинок зміцнювальної γ'- фази (рис. 6 б).



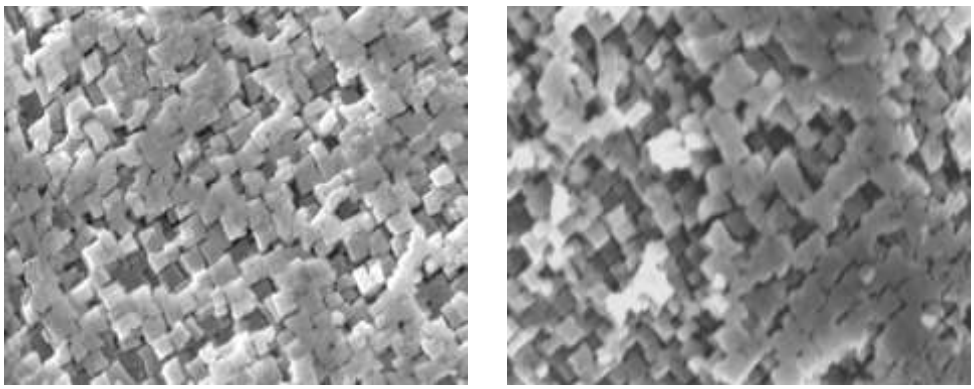
а б

а – евтектика (γ+γ') в литому стані;

б – розчинення евтектики (γ+γ') після гомогенізації при t = 1250^0С.

Рисунок 6 - Мікроструктура монокристалічних зразків [001] розробленого сплаву ЗМІ-3У-М1: (×2000)

На рисунку 7 показано, що після оптимальної гомогенізації при 1250^0C ± 10^0C протягом 4 годин з подальшим охолодженням на повітрі, розмір частинок зміцнювальної γ'- фази в осях дендритів і в міждендритних просторах практично вирівнюється і становить 0,35...0,45 мкм.



а б

а - вісь дендрита; б - міждендритний простір.

Рисунок 7 - Морфологія частинок γ′- фази в структурі монозразків [001] сплаву ЗМІ-3У-М1 після оптимальної гомогенізації при t = 1250^0C: (×10000)

Такий структурний стан є найбільш оптимальним за фазовою стабільністю і показниками жароміцності. Експериментально визначено, що розроблений сплав ЗМІ-3У-М1 за групами властивостей має наступні показники:

- структурно-фазові (група 2) характеристики при 20^0C, % за масою: γ = 31,4 ; γ' = 61,7; (γ+γ') = 5,5; МС = 0,40 ; $M_{23}C_6$ = 1,0 ; фази типу: *M_3B_2, *MB_2, *σ-, *р- не визначені.

- фізичні (група 3) характеристики при 20^0C: ρ = 8,45 г/см^3; Е = 213,4 ГПа; α= $11,60\cdot10^{-6}$ 1/К ; C_p = 0,42 Дж / г·К; r = $0,70\cdot10^{-6}$ Ом·м ; λ = 11,40 Вт/м·К ; $a_{\gamma'}$ = 0,3598 нм ; a_{γ} = 0,3586 нм; (місфіт) δ = 0,351%;

- температурні (група 4) характеристики, ^{0}C: $t_L = 1365^0$; $t_S = 1305^0$; $t_{ЕВТ.} = 1290^0$; $t_{П.Р.}^{\gamma'} = 850^0$; $t_{К.Р.}^{\gamma'} = 1248^0$; $\Delta t_{КР.} = 60^0$; $\Delta t_{ГОМ.} = 42^0$; $t_{ГОМ.} = 1250^0$;

- корозійні (група 5) характеристики, г/ м^2·с: $\bar{V}_q^{800} = 0,20\cdot10^{-4}$; $\bar{V}_q^{850} = 0,60\cdot10^{-3}$; $\bar{V}_q^{900} = 2,50\cdot10^{-3}$; $\bar{V}_q^{950} = 3,95\cdot10^{-3}$; $t_{КРИТ.} = \sim 830^0$C;

- механічні (група 6) характеристики: об'ємна частка зміцнювальної γ'- фази в структурі за температури 20^0: $V_{\gamma'}^{20}$ = 61,7%, за масою; короткочасна міцність (σ_B^t), відповідно для температур 20^0, 800^0, 900^0 і 1000^0C: σ_B^{20} = 1140 МПа; σ_B^{800} = 1010 МПа; σ_B^{900} = 900 МПа ; σ_B^{1000} = 630 МПа; тривала 100- і 1000- годинна міцність (σ_{100}^t), (σ_{1000}^t), відповідно для температур 800^0, 900^0 і 1000^0C: σ_{100}^{800} = 620 МПа ; σ_{100}^{900} = 410 МПа; σ_{100}^{1000} = 230 МПа ; σ_{1000}^{800} = 480 МПа; σ_{1000}^{900} = 320 ;σ_{1000}^{1000} = 130 МПа; середня довговічність зразків, час до руйнування ($\tau_{РУЙН.}$) в умовах випробування (τ_{260}^{975}) становить 76,5 години.

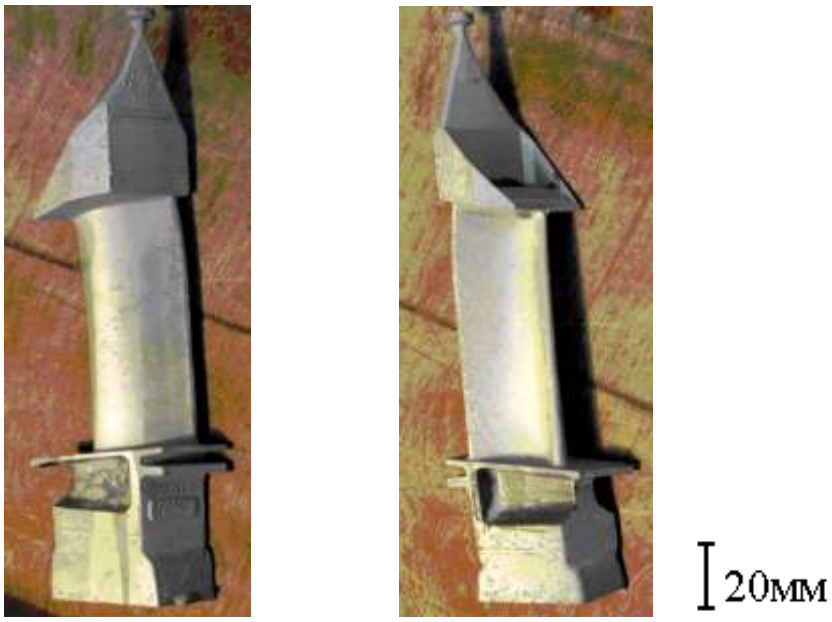
На рисунках 8-9 представлено макроструктуру литих робочих лопаток І-го і ІІ- го ступенів наземної газотурбінної установки Д-336.

а б

а – брак литої робочої лопатки за макроструктурою;

б – придатна робоча лопатка за макроструктурою;

Рисунок 8 - Макроструктура литих робочих лопаток І-го ступеня (ТВТ) з розробленого сплаву ЗМІ-3У-М1 для наземної газотурбінної установки Д-336



а б

а – брак литої робочої лопатки за макроструктурою;

б – придатна робоча лопатка за макроструктурою;

Рисунок 9 - Макроструктура литих робочих лопаток ІІ-го ступеня (ТНТ) з розробленого сплаву ЗМІ-3У-М1 для наземної установки Д-336

Таким чином, за створеним алгоритмом методики КРАМ розроблено, технологічно випробувано і промислово атестовано в умовах ДП «Івченко-Прогрес» новий вітчизняний ливарний жароміцний корозійностійкий нікелевий сплав марки ЗМІ-3У-М1 з гарантованими властивостями, призначений для виготовлення робочих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації для наземних газотурбінних установок Д-336.

У п'ятому розділі представлено результати поетапної оптимізації, за створеним алгоритмом методики КРАМ, складу нового ливарного технологічно зварювального жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву для виготовлення цільнолитих соплових апаратів двигунів ТВ3-117.

На початковому етапі розробки були сформульовані вимоги до рівня контрольованих характеристик, які закладалися в розрахунок для оптимізації складу розробляємого сплаву за заданими критеріями (табл. 19).

Таблиця 19 - Основні параметри для оптимізації складу за заданими характеристиками розробляємого сплаву для цільнолитих соплових апаратів

Контрольовані параметри	Одиниця виміру	Рівень параметра
$П_{ТЩУ}$ = Cr / (Cr+Mo+W)	-	0,825 ± 0,025
$\overline{Nv}_\gamma$	-	≤ 2,40
$\overline{Md}_\gamma$	-	≤ 0,93
$\overline{Md}_C$	-	0,980 ± 0,008
ΔE	-	0,00 ± 0,04
$\sum C_\gamma$ = (Mo+W+Ta+Re+Ru)	%, за масою	≥ 10,0
$\sum C_{\gamma'}$ = (Al+Ti+Nb+Ta+Hf)	%, за масою	$8,0 \le \sum C_{\gamma'} \le 9,0$
t_S	^{0}C	≥ 1280
$t_{K.P.}^{\gamma'}$	^{0}C	≥ 1150
$\Delta t_{ГОМ.}$	^{0}C	≥ 20
$V_{\gamma'}^{20}$	%, за масою	$43 < V_{\gamma'}^{20} < 50$
Місфіт, δ	%	0,15 - 0,45
σ_B^{20}	МПа	≥ 850
δ^{20}	%	≥ 5,0
τ_{180}^{975}	годин	≥ 40
$П_{КС} = \sqrt{Cr} \cdot$ (Ti / Al)	-	≥ 3,0
$t_{КРИТ.}$	^{0}C	≥ 800
Технологічна зварюваність, щодо усунення ливарних дефектів на цільнолитих СА методом аргонодугового зварювання (АДЗ)	-	На рівні промислового сплаву ЖС3ЛС

Для отримання дослідних композицій за основу було обрано відомий промислово доступний ливарний технологічно зварювальний жароміцний корозійностійкий нікелевий сплав ЖС3ЛС, як найбільш близький за науково-технічною сутністю і очікуваному результату. Пошук оптимальної композиції розробляємого сплаву проводився в новій системі легування (Ni-Co-Cr-Al-Ti-Mo-W-Ta-Hf-Zr-B-C) шляхом покрокового варіювання елементами в досліджуваних межах: новими елементами гафнієм (0,1...0,5)% і танталом (1,0...5,0)%, з одночасним варіюванням вмістом хрому в межах

(13,5...15,5)%, молібдену в межах (1,0...3,0)%, вольфраму в межах (5,5...7,5)%, за масою (табл. 20).

Таблиця 20 - Хімічний склад модельних композицій

№ складу	Вміст елементу %, за масою ; Ni - основа												
	C	Cr	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	V	Ta	Hf	Zr	B
ЖС3ЛС	0,10	16,0	5,0	2,7	2,7	4,0	4,0	-	-	-	-	0,015	0,015
1	0,10	15,5	4,5	3,0	3,0	3,0	5,5	-	-	1,5	0,1	0,015	0,015
2	0,10	15,0	4,5	3,0	3,0	2,5	6,0	-	-	2,0	0,2	0,015	0,015
3	0,10	14,5	4,5	3,0	3,0	2,0	6,5	-	-	2,5	0,3	0,015	0,015
4	0,10	14,0	4,5	3,0	3,0	1,5	7,0	-	-	3,0	0,4	0,015	0,015
5	0,10	13,5	4,5	3,0	3,0	1,0	7,5	-	-	3,5	0,5	0,015	0,015
ВЖЛ12Е	0,16	9,25	9,0	5,4	4,5	3,1	1,4	0,75	0,75	-	-	0,020	0,015

Відповідно з алгоритмом комплексної методики (рис. 3) для дослідних складів (1-5) і промислових сплавів ЖС3ЛС, ВЖЛ12Е, наведених в таблиці 20, були розраховані показники за заданими групами властивостей. Розрахункові результати, що були отримані на модельних складах (1-5) порівнювалися з рівнем контрольованих показників (табл. 19), що дозволило їх оцінити за заданими критеріями і обрати для подальших експериментальних досліджень в промислових умовах найбільш оптимальний склад 3.

Оптимальний склад 3 за групами властивостей має наступні розрахункові показники:

- параметри структурної стабільності (група 1): $П_{ТЩУ}$ = 0,8323; $\bar{N}v_{\gamma}$ = 2,2030; $\bar{M}d_{\gamma}$ = 0,9089 ; ΔE = + 0,0123; $\bar{M}d_{C}$ = 0,9826;

- структурно-фазові (група 2) характеристики при 20^0C, % за масою: γ = 44,51%; γ' = 48,59; МС = 1,03%; $M_{23}C_6$ = 1,29; $*M_3B_2$ = 0,18%; $*MB_2$ = 0,05%; *р = 4,35% (* - виділення фаз малоймовірне);

- фізичні (група 3) характеристики при 20^0C: ρ = 8,47 г/см^3 ; E = 213,25 ГПа; α= 11,46 $\cdot 10^{-6}$ 1/К ; C_p = 0,42 Дж / г·К; r = 0,71$\cdot 10^{-6}$ Ом·м ; λ = 10,29 Вт/м·К ; $a_{\gamma'}$ = 0,3589 нм ; a_{γ} = 0,3575 нм; (місфіт) δ = 0,377%;

- температурні (група 4) характеристики, ^{0}C: $\sum C_{\gamma}$ = 11,0%, за масою; $t_L = 1370^0$; $t_S = 1286^0$; $\sum C_{\gamma'}$ = 8,8%, за масою ; $t_{ЕВТ.} = 1243^0$C ; $t_{П.Р.}^{\gamma'} = 845^0$; $t_{К.Р.}^{\gamma'} = 1176^0$C ; $\Delta t_{КР.} = 84^0$; $\Delta t_{ГОМ.} = 67^0$;

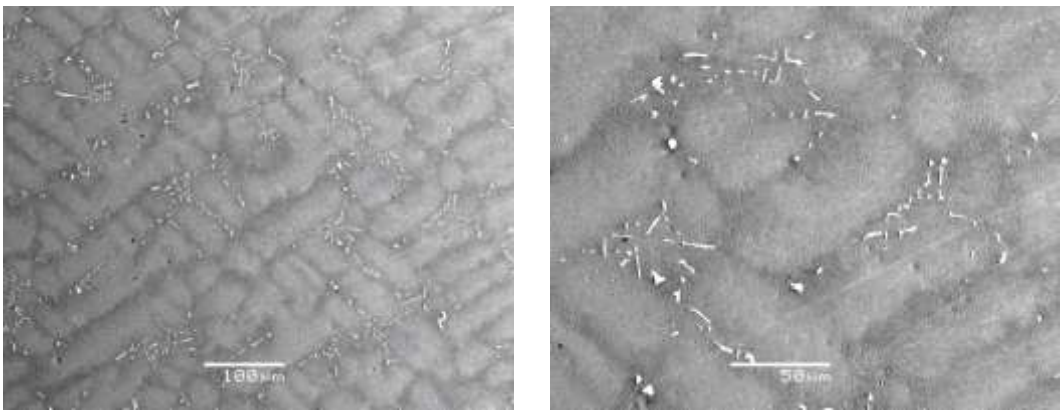
- корозійні (група 5) характеристики: $П_{КС}$ = 3,81 ; $\bar{V}_q^{800} = 0,4830 \cdot 10^{-4}$; $\bar{V}_q^{850} = 0,9719 \cdot 10^{-3}$; $\bar{V}_q^{900} = 3,5846 \cdot 10^{-3}$; $\bar{V}_q^{950} = 5,9234 \cdot 10^{-3}$; $t_{КРИТ.} = 817^0$;

- механічні (група 6) характеристики: об'ємна частка ($V_{\gamma'}^t$)%, за масою, зміцнювальної γ'- фази в структурі для температур 20^0, 800^0, 900^0 і 1000^0C, відповідно: $V_{\gamma'}^{20}$ = 48,6%; $V_{\gamma'}^{800}$ = 49,14%; $V_{\gamma'}^{900}$ = 47,28%; $V_{\gamma'}^{1000}$ = 37,57%; короткочасна міцність (σ_B^t), відповідно для температур 20^0, 800^0, 900^0 і 1000^0C: σ_B^{20} = 952 МПа; σ_B^{800} = 928 МПа; σ_B^{900} = 842 МПа; σ_B^{1000} = 502 МПа; тривала 100- і 1000- годинна міцність (σ_{100}^t), (σ_{1000}^t), відповідно для температур 800^0, 900^0 і 1000^0C: σ_{100}^{800} = 515 МПа ; σ_{100}^{900} = 305 МПа; σ_{100}^{1000} = 129 МПа; σ_{1000}^{800} = 363 МПа; σ_{1000}^{900} = 179 МПа; σ_{1000}^{1000} = 70 МПа; розрахункова

довговічність зразків, час до руйнування ($\tau_{РУЙН.}$) в умовах випробування ($\tau_{180}^{975} \geq 40$ годин) становить 86,7 години.

Оптимальний за заданими критеріями дослідний склад 3 було прийнято за середній рівень легування з присвоєнням йому марки ЖС3ЛС-М. Експериментальні дослідження властивостей, технологічне випробування і промислову атестацію розробленого сплаву ЖС3ЛС-М було здійснено на зразках з рівновісьовою структурою, отриманих за серійною технологією з тестових і промислових плавок в умовах підприємств АТ «МОТОР СІЧ» і ЗМЗ ім. В.І. Омельченка.

Металографічні дослідження показали, що в литому стані мікроструктура зразків розробленого сплаву ЖС3ЛС-М представляє типову для цього класу сплавів рівновісьову структуру дендритної будови, що представляє γ- твердий розчин, зміцнювальну γ'- фазу, евтектику (γ+γ') і карбідну фазу (рис. 10).

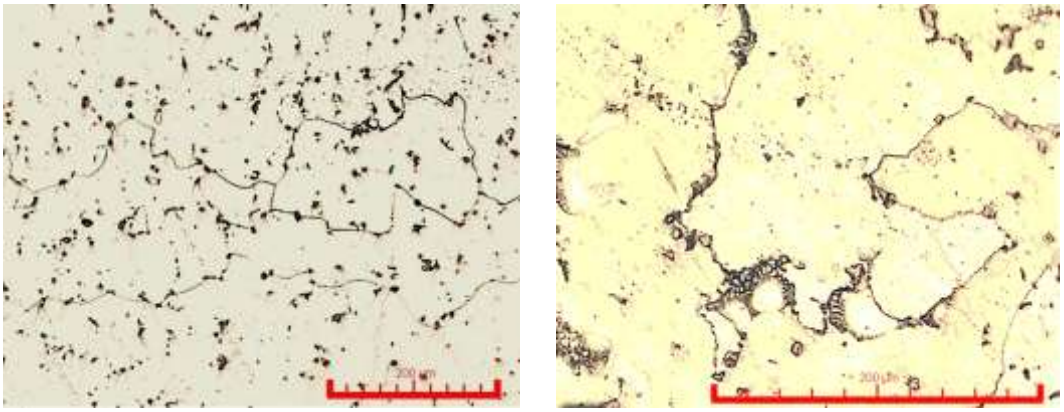


×100 ×200

Рисунок 10 - Мікроструктура зразків рівновісьової кристалізації сплаву ЖС3ЛС-М в литому стані (електролітичне травлення)

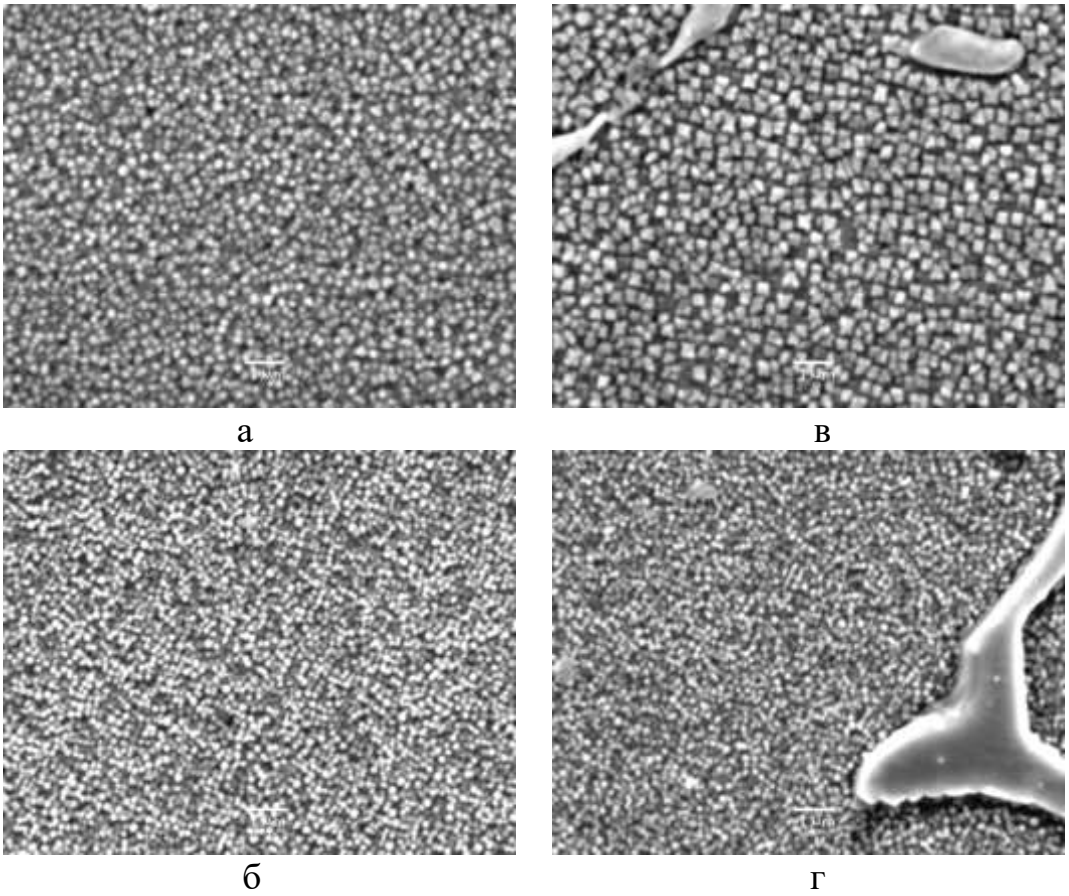
Встановлено, що в литому стані мікроструктура зразків рівновісьової кристалізації сплаву ЖС3ЛС-М характеризується наявністю в міждендритних просторах незначною кількістю евтектичних виділень фаз (γ+γ'), а також частинок карбідної фази сферичної і поліедричної морфології, ідентифікованих як карбіди МС. Частинки карбідної фази полігональної і шрифтової морфології, які ідентифіковані, як карбіди $M_{23}C_6$, переважно розташовані на границях зерен (рис. 11).

На рисунку 12 показано, що в структурі в литому стані форма частинок γ'- фази правильна кубічна, середній розмір яких знаходиться в межах 0,15...0,45 мкм. Розміри частинок γ'- фази значно розрізняються в осях дендритів (див. рис. 12а) і в міждендритних просторах (див. рис. 12в). Розмірна і морфологічна неоднорідність частинок γ'- фази в структурі зразків і цільнолитих СА після кристалізації є прямим наслідком дендритної ліквації.



×100 ×200

Рисунок 11 - Мікроструктура зразків рівновісьової кристалізації сплаву ЖС3ЛС-М в литому стані (травлення в реактиві Марбле)



а в

б г

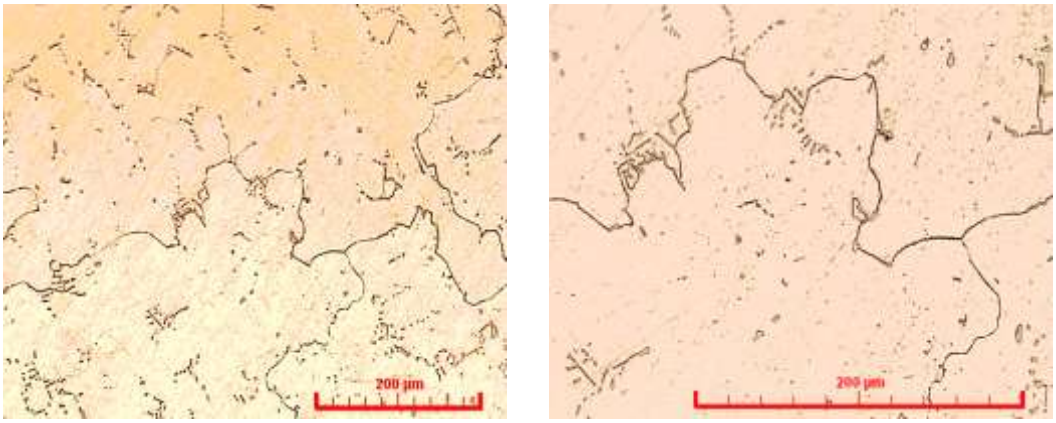
а, в - литий стан ; б, г - після гомогенізації при t = 1190^{0}С.

Рисунок 12 - Розподіл і розміри частинок γ′- фази в структурі зразків сплаву ЖС3ЛС-М: (×10000)

Після проведення термічної обробки за оптимальною температурою гомогенізації (1190 ± 10)^{0}С протягом 4 годин з подальшим охолодженням на

повітрі, розмір частинок γ'- фази в осях дендритів і в міждендритних просторах практично вирівнюється 0,25-0,35 мкм (рис. 12 б, г).

Встановлено, що в процесі термічної обробки за оптимальною температурою гомогенізації при t=11900С (рис. 13) в структурі відбувається найбільш повне розчинення нерівновісної евтектики (γ+γ'). Досягається найбільш оптимальний мікроструктурний стан в зразках сплаву ЖС3ЛС-М, який стає більш гомогенним та стабільним, включаючи стан границь зерен.



×100 ....×200

Рисунок 13 - Мікроструктура зразків сплаву ЖС3ЛС-М після оптимальної гомогенізації при $t=1190^0C$ (травлення в реактиві Марбле)

Експериментально визначено, що розроблений сплав ЖС3ЛС-М за групами властивостей має наступні показники:

- структурно-фазові (група 2) характеристики при 20^0C, % за масою: γ = 47,7 ; γ' = 46,5; (γ+γ') = 3,5; МС = 1,0 ; $M_{23}C_6$ = 1,3; фази типу: *M_3B_2, *MB_2, *σ-, *р- не визначені;

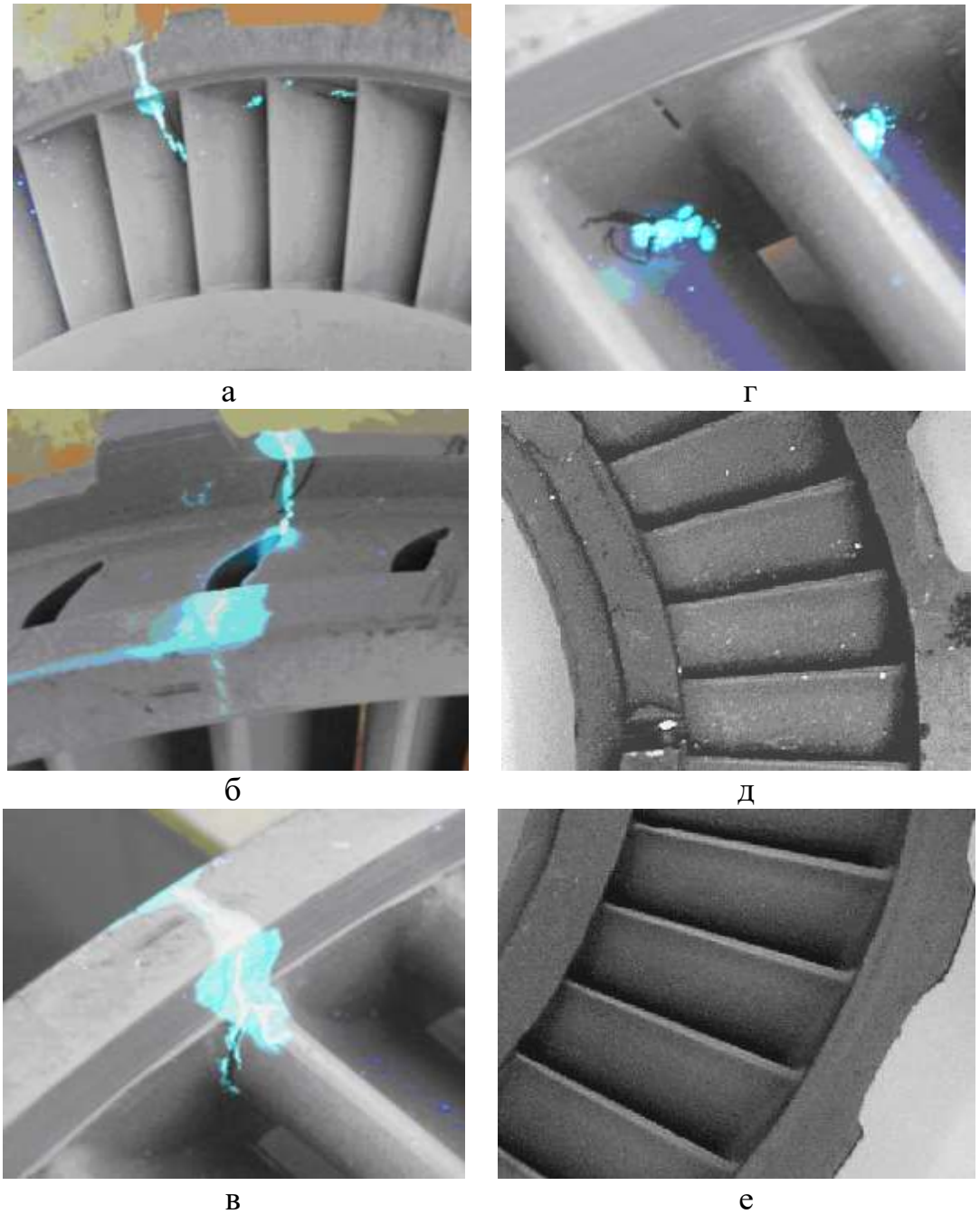
- фізичні (група 3) характеристики при 20^0C: ρ = 8,47 г/см^3; Е = 210,5 ГПа; α= $11,50\cdot10^{-6}$ 1/К ; C_p = 0,42 Дж / г·К; r = $0,71\cdot10^{-6}$ Ом·м; λ = 10,10 Вт/м·К ; $a_{\gamma'}$ = 0,3597 нм ; a_{γ} = 0,3583 нм; (місфіт) δ = 0,367%;

- температурні (група 4) характеристики, ^0C: $t_L = 1355^0$; $t_S = 1290^0$; $t_{ЕВТ.} = 1220^0$; $t_{П.Р.}^{\gamma'} = 850^0$; $t_{К.Р.}^{\gamma'} = 1160^0$; $\Delta t_{КР.} = 65^0$; $\Delta t_{ГОМ.} = 60^0$; $t_{ГОМ.} = 1190^0$;

- корозійні (група 5) характеристики: $\bar{V}_q^{800} = 0,5\cdot10^{-4}$; $\bar{V}_q^{850} = 0,9\cdot10^{-3}$; $\bar{V}_q^{900} = 3,5\cdot10^{-3}$; $\bar{V}_q^{950} = 5,9\cdot10^{-3}$; $t_{КРИТ.} = \sim 820^0$;

- механічні (група 6) характеристики: об'ємна частка зміцнювальної γ'- фази в структурі за температури 20^0: $V_{\gamma'}^{20} = 46,5\%$, за масою; короткочасна міцність (σ_B^t), відповідно для температур 20^0, 800^0, 900^0 і 1000^0C: σ_B^{20} = 955 МПа; σ_B^{800} = 930 МПа ; σ_B^{900} = 850 МПа; σ_B^{1000} = 510 МПа; тривала 100- і 1000- годинна міцність (σ_{100}^t), (σ_{1000}^t), відповідно для температур 800^0, 900^0 і 1000^0C: σ_{100}^{800} = 500 МПа; σ_{100}^{900} = 300 МПа; σ_{100}^{1000} = 125 МПа; σ_{1000}^{800} = 360 МПа; σ_{1000}^{900} = 170 МПа;σ_{1000}^{1000} = 75 МПа ; середня довговічність зразків, час до руйнування ($\tau_{РУЙН.}$) в умовах випробування ($\tau_{180}^{975} \geq 40$ годин) становить 56,0 годин.

На рисунку 14 показані типові ливарні дефекти на цільнолитих СА ТВ3-117, виготовлених з промислового сплаву ВЖЛ12Е (14 а, б, в), а також з промислового сплаву ЖС3ЛС (рис. 14 г) і атестованої за механічними властивостями промислової плавки №14см01U з розробленого сплаву ЖС3ЛС-М (рис. 14 д, е) та усунення цих дефектів методом аргонодугового зварювання (рис.15).



а, б, в – сопловий апарат (СА) з промислового сплаву ВЖЛ12Е;
г - СА з промислового сплаву ЖС3ЛС;
д, е - СА з розробленого сплаву ЖС3ЛС-М.
Рисунок 14 - Типові ливарні дефекти на цільнолитих СА ТВ3-117

а б

а – усунення ливарних дефектів методом АДЗ;

б – придатний СА після механічної обробки.

Рисунок 15 - Усунення ливарних дефектів на цільнолитих СА ТВ3-117, виготовлених з розробленого сплаву ЖС3ЛС-М

Таким чином, за створеним алгоритмом методики КРАМ розроблено, технологічно випробувано і промислово атестовано в умовах АТ «МОТОР СІЧ» і ЗМЗ ім. В.І. Омельченка новий вітчизняний ливарний жароміцний корозійностійкий нікелевий сплав марки ЖС3ЛС-М з гарантованими властивостями, призначений для виготовлення цільнолитих соплових апаратів двигунів ТВ3-117.

ВИСНОВКИ

1. Показано, що легувальні елементи, які ходять до хімічного складу жароміцних нікелевих сплавів, комплексно впливають на різні групи властивостей, забезпечуючи їх працездатність. Показано, що процеси фазових перетворень, які протікають при високих температурах в структурі сплавів цього класу дають можливість встановити залежність критичних температур і інтервалів фазових перетворень від системи легування сплавів. Показано, що середню швидкість корозії ($\bar{V}_q$) для сплавів з різними системами легування можна оцінювати за різними корозійними параметрами: (Cr/Al), (Ti/Al) і $\sqrt{Cr}\cdot$(Ti/Al). Показано, що рівень жароміцності сплавів комплексно залежить від фазового складу, об'ємної частки (V_{γ}') γ'- фази в структурі і її хімічного складу, морфології та розміру часток, а також їх структурної та поверхневої стабільності в широкому температурному діапазоні.

2. Встановлено, що отримані регресійні моделі (група 1) дозволяють розраховувати за величиною мінілегувального комплексу $П_{ТЩУ}$ = Cr / (Cr+Mo+W), співвідношенням цих елементів в складі жароміцних нікелевих сплавів, величину параметрів структурної стабільності ($\bar{N}_{V\gamma}$) і ($\bar{M}d_{\gamma}$) для γ- твердого розчину, з відповідними похибками 2,98% і 1,37%, а також розраховувати за величиною дисбалансу (ΔЕ) системи легування сплаву

величину параметра ($\overline{Md}_C$) для сплаву, з похибкою 1,07%, тобто точніше, ніж за регресійними рівняннями традиційних методів PHACOMP і New PHACOMP.

3. Показано, що розрахунки структурно-фазових (група 2) і фізичних (група 3) характеристик жароміцних нікелевих сплавів можна здійснювати на основі їхнього хімічного складу, використовуючи комп'ютерне моделювання термодинамічних процесів, які відбуваються в структурі при охолодженні (кристалізації) або нагріванні, з похибкою менше 5%, в порівнянні з експериментальними даними.

4. Встановлено, що отримані регресійні моделі (група 4) дозволяють розраховувати температури ліквідусу (t_L) і солідусу (t_S) за величиною мінілегувального комплексу ΣC_i^{γ} = (Mo+W+Ta+Re+Ru)%, за масою, сумарного вмісту цих елементів в складі, що зміцнюють γ- твердий розчин, з відповідними похибками 1,41% і 1,36%, а температури початку ($t_{П.Р.}^{\gamma'}$) і кінця ($t_{К.Р.}^{\gamma'}$) розчинення γ'- фази в γ- твердому розчині, а також температуру ($t_{ЕВТ.}$) локального плавлення евтектики (γ+γ') за величиною мінілегувального комплексу $\Sigma C_i^{\gamma'}$ = (Al+Ti+Nb+Ta+Hf)%, за масою, сумарного вмісту γ'- утворювальних елементів в складі жароміцних нікелевих сплавів, з відповідними похибками 1,76% ; 1,69 ; 2,10%.

5. Встановлено, що отримані регресійні моделі (група 5) дозволяють розраховувати середню швидкість корозії ($\overline{V}_q^t$) для температур 800^0, 850^0, 900^0 і 950^0C в умовах впливу синтетичної золи, що імітує продукти згоряння газотурбінного палива, а також критичну температуру ($t_{КРИТ.}$) переходу до прискореної ВТК за величиною мінілегувального комплексу $П_{КС} = \sqrt{Cr} \cdot (Ti / Al)$, співвідношенням цих елементів в складі жароміцних нікелевих сплавів, з відповідними похибками 2,85%; 2,96%; 2,50%; 2,66%, 1,39%.

6. Встановлено, що отримані регресійні моделі (група 6) дозволяють розраховувати об'ємну частку ($V_{\gamma'}^t$) γ'- фази в структурі для температур 20^0, 800^0, 900^0 і 1000^0C за величиною мінілегувального комплексу $\Sigma C_i^{\gamma'}$ = (Al+Ti+Nb+Ta+Hf)%, за масою, сумарного вмісту γ'- утворювальних елементів в складі жароміцних нікелевих сплавів, з відповідними похибками 1,81%; 1,83%; 1,80%; 1,77%. Показано, що отримані регресійні моделі дозволяють за величиною об'ємної частки ($V_{\gamma'}^t$) γ'- фази в їх структурі розраховувати границі короткочасної (σ_B^t) міцності для температур 20^0, 800^0, 900^0, 1000^0C з відповідними похибками 2,28% ; 2,20% ; 1,20% ; 2,52%, а також границі 100- і 1000- годинної тривалої (σ_τ^t) міцності для температур 800^0, 900^0, 1000^0C з відповідними похибками 1,19%; 1,41%; 1,12%; 1,88%; 1,75%; 1,87%.

7. Створено алгоритм комплексної розрахунково - аналітичної методики [1], який дозволяє узагальнити механізми впливу легувальних елементів на групи властивостей жароміцних нікелевих сплавів. Встановлено, що за створеним алгоритмом методики КРАМ без попереднього проведення експериментів, на основі розрахунку характеристик за групами, можна оптимізувати хімічний склад за заданими критеріями, як при розробці нових жароміцних нікелевих сплавів, так і удосконаленні складів існуючих

промислових марок, гарантуючи властивості, які забезпечують працездатність в умовах експлуатації.

8. Оптимізовано, за створеним алгоритмом методики КРАМ, склад нового ливарного жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву марки ЗМІ-3У-М1, призначеного для виготовлення робочих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації для наземних газотурбінних установок Д-336. Встановлено, що розроблений сплав ЗМІ-3У-М1 має жароміцність ($\tau_{260}^{975} \geq 40$ годин) і технологічність (48-50%) при отриманні придатних робочих лопаток за макроструктурою на рівні промислового не корозійностійкого сплаву ЖС26-ВІ, а показники ВТК- стійкості на рівні промислового корозійностійкого сплаву ЗМІ-3У, значно перевершуючи його за рівнем жароміцності, за рахунок оптимізованого вмісту легувальних елементів в хімічному складі: вуглецю - 0,06%, хрому - 11,5% і танталу – 4,0%, за масою. На розроблений сплав ЗМІ-3У-М1 отримано патент на винахід [30] і затверджено ТУ14-134-446-2010.

9. Оптимізовано, за створеним алгоритмом методики КРАМ, склад нового вітчизняного ливарного технологічно зварювального жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву марки ЖС3ЛС-М, призначеного для виготовлення цільнолитих соплових апаратів двигунів ТВ3-117. Встановлено, що розроблений сплав ЖС3ЛС-М має жароміцність ($\tau_{180}^{975} \geq 40$ годин) на рівні промислового не корозійностійкого сплаву ВЖЛ12Е, який не має необхідної ВТК – стійкості і технологічно не зварювальний, а технологічну зварювальність і ВТК – стійкість має на рівні промислового технологічно зварювального корозійностійкого сплаву ЖС3ЛС, значно перевершуючи його за рівнем жароміцності, за рахунок оптимізованого вмісту легувальних елементів в хімічному складі: танталу - 2,5%, гафнію - 0,3%, хрому - 14,5%, молібдену - 2,0% і вольфраму - 6,5%, за масою. На розроблений сплав ЖС3ЛС-М отримано патент на винахід [33] і затверджено ТУУ 24.4-23365425-698: 2016.

10. Загальний економічний ефект від використання результатів роботи на промислових моторобудівних підприємствах України склав 23 268 298 грн. на рік (за цінами 2015 року).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія:

1. Гайдук, С.В. Наукові основи проектування ливарних жароміцних нікелевих сплавів з необхідним комплексом службових властивостей [монографія] / С.В. Гайдук, Бєліков С.Б. - Запоріжжя, ЗНТУ. - 2017. - 80 с. - ISBN: 978-617-529-160-3.

Монографія у виданні іншої держави:

2. Гайдук, С.В. Жаропрочные никелевые сплавы [монографія] / С.В. Гайдук // LAP LAMBERT Academic Publishing. - Saarbrucken, Deutschland. - 2012. - 196 p. - ISBN: 978-3-84433-190-5.

Статті без співавторів у наукових фахових виданнях України:

3. Гайдук, С.В. Комплексная расчетно-аналитическая методика для проектирования литейных жаропрочных никелевых сплавов / С.В. Гайдук // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - 2015. - №2. - С. 92-103.

4. Гайдук, С.В. Проектирование литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава для изготовления турбинных лопаток методом направленной (моно) кристаллизации / С.В. Гайдук // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - 2016. - №1. - С. 58-68.

5. Гайдук, С.В. Проектирование технологически свариваемого литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава для изготовления цельнолитых сопловых аппаратов / С.В. Гайдук // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - 2016. - № 2. - С. 66-76.

Статті у виданнях з індексом цитування:

6. Гайдук, С.В. Исследование влияния соотношения тантала и рения на высокотемпературную коррозионную стойкость жаропрочного никелевого сплава ЖС-32 / С.В. Гайдук, А.Г.Андриенко, В.В. Кононов, И.С. Малашенко // Современная электрометаллургия. - 2009. - № 4 (97). - С. 36-39.

7. Гайдук, С.В. Расчет фазового состава литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава методом CALPHAD / С.В. Гайдук, В.В. Кононов, В.В. Куренкова // Современная электрометаллургия. – 2015. - № 3 (120). – С. 35-40.

8. Гайдук, С.В. Применение CALPHAD-метода для расчета количества γ′- фазы и прогнозирования длительной прочности литейных жаропрочных никелевых сплавов / С.В. Гайдук, Т.В. Тихомирова // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2015. - №6 (297). - С. 64-68.

9. Гайдук, С.В. Получение прогнозирующих математических моделей для расчета термодинамических параметров литейных жаропрочных никелевых сплавов / С.В. Гайдук, В.В. Кононов, В.В. Куренкова // Современная электрометаллургия. - 2015. - №4 (121). – С. 31-37.

10. Гайдук, С.В. Регрессионные модели для прогнозирующих расчетов коррозионных параметров литейных жаропрочных никелевых сплавов / С.В. Гайдук, В.В. Кононов, В.В. Куренкова // Современная электрометаллургия. - 2016. - № 3 (124). - С.51-56.

11. Гайдук, С.В. Применение комплексной расчетно-аналитической методики для многокритериальной оптимизации составов литейных жаропрочных никелевых сплавов / С.В. Гайдук, В.В. Кононов, В.В. Куренкова // Современная электрометаллургия. – 2017. - № 1. – С. 44-51.

12. Гайдук, С.В. Комплексная расчетно-аналитическая методика для проектирования литейных жаропрочных никелевых сплавов с требуемыми служебными свойствами / С.В. Гайдук, Т.В. Тихомирова // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2016. - №5(302). - С. 62-69.

13. Гайдук, С.В. Автоматизированное проектирование литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава для направленной (моно) кристаллизации отливок с требуемыми свойствами / С.В. Гайдук, Т.В. Тихомирова // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2016. – №6 (303). - С. 30-34.

14. Гайдук, С.В. Технологически свариваемый литейный жаропрочный коррозионностойкий никелевый сплав / С.В. Гайдук, Т.В. Тихомирова // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2017. - №1. - С. 65-70.

Статті у наукових фахових виданнях України:

15. Гайдук, С.В. Оценка влияния соотношения тантала к рению на структурную стабильность и механические свойства жаропрочного никелевого сплава ЖС-32 / С.В. Гайдук, А.Г. Андриенко, В.В. Кононов, О.В. Гнатенко // Вестник двигателестроения. - 2010. - №1. - С. 128-132.

16. Гайдук, С.В. Прогнозирование структурной и фазовой стабильности экономнолегированного жаропрочного сплава для ответственных отливок / С.В. Гайдук, О.В. Гнатенко, В.В. Наумик // Вісник ДДМА. - 2011. - №4 (25). – С. 40-43.

17. Гайдук, С.В. Влияние тантала на структуру и прочностные характеристики литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава ЖС3ЛС / С.В. Гайдук, А.Д. Коваль, А.Г. Андриенко [и др.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - 2011. -№2. - С. 42-46.

18. Гайдук, С.В. Исследование влияния гафния на структуру и свойства литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава / С.В. Гайдук, А.Д. Коваль [и др.] // Вестник двигателестроения. - 2012. - № 1. - С. 196-200.

19. Гайдук, С.В. Влияние соотношения вольфрама к молибдену на механические свойства сплава ЖС3ЛС, оптимально легированного гафнием и танталом / С.В. Гайдук, А.Д. Коваль, А.Г. Андрієнко, В.В. Кононов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.- 2012.- №1.- С.31-34.

20. Гайдук, С.В. Механические свойства и технологические особенности получения деталей ГТУ с направленной (моно) структурой из жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава / С.В. Гайдук, А.Г. Андриенко, В.В. Кононов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2012. - № 2. – С. 81-86.

21. Гайдук, С.В. Разработка состава коррозионностойкого защитного покрытия и способа его нанесения на отливки из жаропрочных сплавов / С.В. Гайдук, О.В. Гнатенко, В.В. Наумик // Вестник двигателестроения. - 2013.- №1. - С. 133-138.

22. Гайдук, С.В. Применение методов пассивного и активного эксперимента к оценке влияния гафния на характеристические температуры многокомпонентного никелевого сплава / С.В. Гайдук, В.В. Кононов // Вестник двигателестроения. – 2014. - № 1. – С. 120-126.

23. Гайдук, С.В. Исследование гафния на фазовый состав литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава с применением метода пассивного эксперимента / С.В. Гайдук, В.В. Кононов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - 2014. - №1. - С. 45-51.

24. Гайдук, С.В. Оценка влияния тантала на критические температуры в литейном свариваемом жаропрочном никелевом сплаве с применением расчетных и экспериментальных методик / С.В. Гайдук, В.В. Кононов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - 2014. -№ 2. - С. 34-40.

25. Гайдук, С.В. Применение CALPHAD-метода к расчету фазового состава литейного свариваемого жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава с танталом / С.В. Гайдук, В.В. Кононов // Вестник двигателестроения. – 2015. - № 1. – С. 131-138.

26. Гайдук, С.В. Сравнительные исследования свариваемости литейных жаропрочных никелевых сплавов / С.В. Гайдук, И.А. Петрик [и др.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. - 2015. -№1. - С. 82-88.

27. Гайдук, С.В. Применение аналитических методов для расчета химического состава γ-, γ'- фаз и параметров фазовой стабильности литейных жаропрочных никелевых сплавов / С.В. Гайдук, Т.В. Тихомирова // Авиационно-космическая техника и технология. - 2015. - № 9 (126). - С. 33-37.

28. Гайдук, С.В. Расчет фазового состава литейного свариваемого жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава методом CALPHAD / С.В. Гайдук, В.В. Кононов // Вестник двигателестроения. - 2016. - №1. - С. 107-112.

29. Гайдук, С.В. Прогнозирование параметров структурной стабильности литейных жаропрочных никелевых сплавов / С.В. Гайдук, В.В. Кононов // Вестник двигателестроения. - 2017. - № 1. - С. 139-148.

Патенти на винахід:

30. Пат. 2354733, Россия, МПК[6] С22С 19/05. Сплав на никелевой основе для литья монокристаллических лопаток турбины газотурбинного двигателя / Ю.С. Елисеев, В.А. Поклад, О.Г. Оспенникова, А.Г. Андриенко, С.В. Гайдук и др. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие ММПП «Салют». - № 2007123936/02; заявл. 27.06.07 ; опубл. 10.05.09, Бюл. № 13. – 7 с.

31. Пат. 48242, Україна, МПК[6] С22С 19/05. Ливарний жароміцний нікелевий сплав / С.В. Гайдук, А.Д. Коваль та ін. ; заявник і дотримувач Запорізький нац. техн. ун-т. - № u200909668 ; заявл.21.09.09 ; опубл. 10.03.10, Бюл. №5. - 8 с.

32. Пат. 48240, Україна, МПК[6] С23С 10/00 С23С 28/00. Спосіб одержання виробів з корозійностійким високотемпературним покриттям / А.Д. Коваль,

А.Г. Андрієнко, С.В. Гайдук, В.В. Кононов та ін. ; заявник і патентовласник Запорізький нац. техн. ун-т; заявл. 21.09.2009, № u200909664; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5. – 14 с.

33. Пат. 67814, Україна, МПК[6] С22С 19/05. Ливарний жароміцний корозійностійкий нікелевий сплав / С.В. Гайдук, А.Д. Коваль, А.Г. Андрієнко, В.В. Кононов та ін. ; заявник і дотримувач Запорізький нац. техн. ун-т. - № U201108648 ; заявл. 11.07.11 ; опубл. 12.03.12, Бюл. №5. - 6 с.

Тези в матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій:

34. Гайдук С.В., Коваль А.Д, Андриенко А.Г., Ястребова О.Ф., (2010), *Зависимость параметров коррозионной стойкости сплава ЖС-32 от величины соотношения тантала к рению*, «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів» : Зб. наук. пр. XII-й Міжнар. наук.-техн. конф. – (Запоріжжя, 6-8 жовтня 2010). – сс. 35-37.

35. Гайдук С.В., Коваль А.Д., Андриенко А.Г., Ястребова О.Ф., (2010), *О влиянии соотношения тантала к рению в сплаве ЖС-32 на механические свойства*, «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів» : Зб. наук. пр. XII-й Міжнар. наук.-техн. конф. – (Запоріжжя, 6-8 жовтня 2010). – сс. 49-51.

36. Гайдук С.В., Андриенко А.Г., Кононов В.В., Тихомирова Т.В., (2011), *Влияние легирования гафнием на структурообразование жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава*, «Молодежь в авиации: новые решения и передовые технологии» : Сб. тез. докл. V-й Междунар. молодёж. конф. авиамоторостроительной отрасли. - (Запорожье - Алушта, 16-20 мая 2011). - сс.172-174.

37. Гайдук С.В., Гнатенко О.В., Наумик В.В., (2011), *Прогнозирование фазовой стабильности экономнолегированного никелевого сплава*, «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология» : Материалы Междунар. научн.-практич. конф.-выставки. – (Украина, Киев, 2011). - сс. 67–69.

38. Гайдук С.В., Гнатенко О.В., Наумик В.В., (2012), *Разработка оптимального состава экономнолегированного жаропрочного никелевого сплава с повышенной фазовой стабильностью*, «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах» : Зб. тез XIII Міжнар. наук.-техн. конф. – (Запоріжжя, 9-12 жовтня 2012). – сс. 106 – 107.

39. Гайдук С.В., Гнатенко О.В., Андриенко А.Г., Наумик В.В., (2012), *Структурные превращения жаропрочных никелевых сплавов в условиях ползучести*, «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах» : Зб. тез XIII Міжнар. наук.-техн. конф. – (Запоріжжя, 9-12 жовтня 2012). – сс. 112-113.

40. Кононов В.В., Гнатенко О.В., Гайдук С.В., Наумик В.В., (2012), *Состав коррозионностойкого защитного покрытия и способ его нанесения на отливки из жаропрочных никелевых сплавов*, «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах» : Зб. тез XIII Міжнар. наук.-техн. конф.- (Запоріжжя, 9-12 жовтня 2012). – сс. 114-115.

41. Гайдук С.В., Андриенко А.Г., Петрик И.А., (2014), *Сравнительная оценка свариваемости литейных жаропрочных никелевых сплавов,* «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів» : Зб. матер. наук. пр. XIII-й Міжнар. наук.-техн. конф.– (Запоріжжя, ЗНТУ, 2014). – сс. 90-92.

42. Belikov S.B., Sanchugov E.L., Stepanova L.P., Gayduk S.V., Denisov D.L., (2014), *Corrosion resistance of nickel superalloys for marine gas turbines,* «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів» : Зб. матер. наук. пр. XIII-й Міжнар. наук.-техн. конф.– Запоріжжя, ЗНТУ, 2014). – сс. 196-197.

43. Гайдук С.В., Милонин Е.В., Наумик В.В., (2015), *Система легирования жаропрочного никелевого сплава для силовых агрегатов наземных установок,* «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» : Матер. VII-й Міжнар. наук.-техн. конф. – (Україна, Київ, 2015). – сс. 101 – 102.

44. Гайдук С.В., Тихомирова Т.В., (2015), *Применение аналитических методов для расчета химического состава γ-, γ'- фаз и параметров фазовой стабильности литейных жаропрочных никелевых сплавов,* «XX-й міжнародний конгрес двигунобудівників» : Тези доповідей. – (Харків, «ХАІ», 2015). – сс.88.

45. Милонин Е.В., Наумик В.В., Гайдук С.В., (2015), *Экономнолегированный жаропрочный никелевый сплав для установок наземной эксплуатации,* «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах» : Зб. тез XIV Міжнар. наук.-техн. конф. – (Запоріжжя, 6-9 жовтня 2015). – сс. 107 – 109.

46. Гайдук С.В., Тихомирова Т.В., (2015), *Исследование структурно-фазовой стабильности литейных жаропрочных никелевых сплавов с помощью синтеза расчетно-аналитических методик,* «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах» : Зб. тез XIV Міжнар. наук.-техн. конф. – (Запоріжжя, 6-9 жовтня 2015). – сс. 125 – 127.

АНОТАЦІЯ

Гайдук С.В. Розвиток і застосування наукових принципів легування для розробки жароміцних нікелевих сплавів з гарантованими властивостями. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство. – Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми забезпечення гарантованого комплексу властивостей жароміцних нікелевих сплавів. Встановлено кореляційні залежності за групами властивостей, що впливають на працездатність сплавів цього класу. Отримано групи нових прогнозуючих регресійних моделей для розрахунку цих властивостей, що реалізовано в алгоритмі комплексної розрахунково-аналітичної методики, призначеної для оптимізації хімічного складу за заданими критеріями без попереднього проведення експериментів. За

створеною методикою розроблено, технологічно випробувано і атестовано в промислових умовах моторобудівних підприємств України нові вітчизняні ливарні жароміцні корозійностійкі нікелеві сплави ЗМІ-3У-М1 і ЖС3ЛС-М відповідального призначення.

Ключові слова: жароміцні нікелеві сплави, структурна стабільність, фазовий склад, критична температура, високотемпературна корозія, механічні властивості, прогнозування, регресійна модель, алгоритм, комплексна розрахунково-аналітична методика.

АННОТАЦИЯ

Гайдук С.В. Развитие и применение научных принципов легирования для разработки жаропрочных никелевых сплавов с гарантированными свойствами. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.01 – Материаловедение. – Запорожский национальный технический университет, Запорожье, 2018.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической проблемы обеспечения гарантированного комплекса свойств жаропрочных никелевых сплавов. В результате математической обработки расчетной и экспериментальной статистики для класса жаропрочных никелевых сплавов, определены основные группы свойств, оказывающие наиболее существенное влияние на их работоспособность.

Получены новые регрессионные модели (группа 1) для расчета параметров структурной стабильности ($\bar{N}_{V\gamma}$) и ($\bar{M}d_{\gamma}$) γ- твердого раствора по величине минилегирующего комплекса $П_{ТПУ}$ = Cr / (Cr+Mo+W), соотношения данных элементов в составе жаропрочных никелевых сплавов с соответствующими погрешностями 2,98% и 1,37%; получена новая регрессионная модель для расчета параметра (Md_C) для сплавов по величине дисбаланса (ΔE) системы легирования сплавов с погрешностью 1,07%. Полученные модели позволяют более точно рассчитывать параметры структрурной стабильности, чем традиционные методы PHACOMP и New PHACOMP.

Показано, что расчеты структурно-фазовых (группа 2) и физических (группа 3) характеристик жаропрочных никелевых сплавов можно осуществлять на основе их химического состава, с применением компьютерного моделирования термодинамических процессов, которые происходят в структуре при охлаждении (кристаллизации) или нагревании, с погрешностью менее 5%, в сравнении с экспериментальными данными.

Получены новые регрессионные модели (группа 4) для расчета критических температур жаропрочных никелевых сплавов: ликвидуса (t_L) и солидуса (t_S) по величине минилегирующего комплекса ΣC_i^{γ} = (Mo+W+Ta+Re+Ru)%, по массе, с погрешностями 1,41%; 1,36%, а также

расчета критических температур начала ($t_{Н.Р.}^{\gamma'}$) и конца ($t_{К.Р.}^{\gamma'}$) растворения γ'- фазы в γ- твердом растворе и температуры ($t_{ЭВТ.}$) локального плавления эвтектики (γ+γ') по величине минилегирующего комплекса $\Sigma C_i^{\gamma'}$ = (Al+Ti+Nb+Ti+Hf)%, по массе, с погрешностями 1,76%; 1,69; 2,10%.

Получены новые регрессионные модели (группа 5) для расчета средней скорости коррозии ($\overline{V}_q^t$) жаропрочных никелевых сплавов в условиях воздействия синтетической золы при температурах 800^0, 850^0, 900^0 и 950^0С, а также критической температуры ($t_{КРИТ.}$) перехода к ускоренной коррозии по величине минилегирующего комплекса $П_{КС} = \sqrt{Cr} \cdot (Ti/Al)$ с соответствующими погрешностями 2,85%; 2,96%; 2,50%; 2,66%, 1,39%.

Получены новые регрессионные модели (группа 6) для расчета объемной доли ($V_{\gamma'}^t$) γ'- фазы в структуре жаропрочных никелевых сплавов для температур 20^0, 800^0, 900^0 и 1000^0С по величине минилегирующего комплекса $\Sigma C_i^{\gamma'}$ = (Al+Ti+Nb+Ta+Hf)%, по массе, с погрешностями 1,81%; 1,83%; 1,80%; 1,77%. Получены новые регрессионные модели для расчета пределов кратковременной (σ_B^t) прочности для температур 20^0, 800^0, 900^0, 1000^0С с погрешностями 2,28%; 2,20%; 1,20% 2,52%, а также пределов 100- и 1000- часовой длительной (σ_τ^t) прочности для температур 800^0, 900^0, 1000^0С с погрешностями 1,19%; 1,41%; 1,12%; 1,88%; 1,75%; 1,87% по величине объемной доли ($V_{\gamma'}^t$) γ'- фазы в структуре сплавов данного класса.

Создан алгоритм комплексной методики, позволяющий без предварительного проведения экспериментов, путем оптимизации состава по заданным критериям, разрабатывать как новые сплавы, так и совершенствовать составы существующих промышленных марок, гарантируя заданные свойства.

Оптимизирован, по созданному алгоритму комплексной методики, состав нового отечественного литейного коррозионностойкого никелевого сплава ЗМИ-3У-М1 с повышенной жаропрочностью. Оптимизировано содержание легирующих элементов: углерод - 0,06%, хром - 11,5% и тантал - 4,0%, по массе. Сплав ЗМИ-3У-М1 имеет жаропрочность и технологичность на уровне промышленного жаропрочного не коррозионностойкого сплава ЖС26-ВИ, применяемого для изготовления рабочих лопаток методом направленной кристаллизации к наземным установкам Д-336. На разработанный сплав ЗМИ-3У-М1 получен патент № 2354733 на изобретение и утверждены ТУ 14-134-446-2010.

Оптимизирован, по созданному алгоритму комплексной методики, состав нового отечественного литейного технологически свариваемого коррозионностойкого никелевого сплава ЖС3ЛС-М с повышенной жаропрочностью. Оптимизировано содержание элементов: тантал - 2,5%, гафний - 0,3%, хром - 14,5%, молибден - 2,0% и вольфрам - 6,5%, по массе. Сплав ЖС3ЛС-М имеет более высокие показатели жаропрочности, чем промышленный сплав ЖС3ЛС, применяемый для изготовления цельнолитых сопловых аппаратов двигателей ТВ3-117. Разработаный сплав имеет жаропрочность на уровне промышленного жаропрочного не коррозионностойкого сплава ВЖЛ12Э, который не обладает технологической

свариваемостью. На разработанный сплав ЖС3ЛС-М получен патент Украины № 67814 и утверждены ТУУ 24.4-23365425-698: 2016.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, структурная стабильность, фазовый состав, критическая температура, высокотемпературная коррозия, механические свойства, прогнозирование, регрессионная модель, алгоритм, комплексная расчетно-аналитическая методика.

ANNOTATION

Gayduk S.V. Development and application of the scientific alloying concepts in engineering of high-temperature nickel-base cast alloys with the guaranteed set of service properties. – Qualifying scientific work by right of a manuscript.

The present dissertation is intended for getting the scientific degree of doctor of technical sciences by speciality 05.02.01 «Material Science». – Zaporizhzhya National Technical University, 2018.

The present dissertation is devoted to an actual scientific and technical problem of the required set of properties control for high-temperature nickel-base alloys. According to the groups, the correlation dependences of properties, which influence on serviceability of this class alloys, have been determined. The groups of forecast progression models for calculation of these properties have been obtained and realized in algorithm of Comprehensive Analytical Solution Method applied for optimization of chemical composition by the given criteria without preliminary tests. By the created method, innovative national high-temperature corrosion resistant cast alloys ЗМІ-3У-М1 and ЖС3ЛС-М of reliable application have been developed, technologically tested and certificated under the conditions of engine-building enterprises of Ukraine.

Key words: high-temperature nickel-base cast alloys, alloying system, structure stability, phase composition, critical temperatures, high-temperature corrosion resistance, mechanical properties, forecast, regression model, algorithm, Comprehensive Analytical Solution Method.