

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

МІЛОНІН ЄВГЕН ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 669.24.002.8:621.74.045

**БЕЗРЕНІЄВИЙ ЖАРОМІЦНИЙ НІКЕЛЕВИЙ СПЛАВ ДЛЯ
ВИГОТОВЛЕННЯ ВИЛИВКІВ ЗІ СПРЯМОВАНОЮ ТА
МОНОКРИСТАЛІЧНОЮ СТРУКТУРОЮ**

05.02.01 – матеріалознавство

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Запоріжжя – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, **НАУМИК ВАЛЕРІЙ ВЛАДИЛЕНОВИЧ**, проректор Національного університету «Запорізька політехніка», професор кафедри машин та технології ливарного виробництва.

Офіційні опоненти:

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

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 «06» жовтня 2020 року о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д17.052.01 у Національному університеті «Запорізька політехніка» за адресою: 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ауд. 153.

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

Автореферат розіслано «28» серпня _____ 2020 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



О.А. Мітяєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Україна залишається одним з визнаних лідерів у виготовленні енергетичних установок. Питання зниження собівартості вироблених вузлів і агрегатів стоїть для нашої держави особливо гостро.

Литі лопатки газових турбін, як авіаційних, так і наземного використання, виготовляють з жароміцних нікелевих сплавів методом високошвидкісної спрямованої кристалізації. На сьогодні широко поширені лопаточні жароміцні нікелеві сплави ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ. Сплав ЖС26-ВІ не відповідає вимогам до матеріалу робочих лопаток за жароміцністю. Високожароміцний сплав ЖС32-ВІ відповідає всім вимогам за механічними і жароміцними властивостями, що пред'являються до матеріалу лопаток, але в системі легування містить особливо коштовний імпорتنний елемент – реній і, відповідно, характеризується високою вартістю, при цьому не забезпечує корозійної стійкості, внаслідок чого на лопатки додатково наносять захисне покриття.

Раніше в НУ «Запорізька політехніка» був розроблений склад економнолегованого жароміцного нікелевого сплаву, який перевершує за комплексом характеристик відомий сплав ЖС26-ВІ, не поступається за властивостями міцності та пластичності сплаву ЖС32-ВІ і при цьому, забезпечує достатню для експлуатації вказаних виробів стійкість проти високотемпературної корозії в агресивних середовищах. Даний сплав є набагато дешевшим, оскільки вміст ренію в ньому в два рази нижче, в порівнянні з ЖС32-ВІ. Проаналізувавши вплив легувальних елементів на властивості жароміцних нікелевих сплавів призводить до логічного висновку про доцільність повного виключення з їх складу, у разі експлуатації на наземних установках, коштовного ренію і заміни його підвищеним вмістом відносно менш коштовних легувальних елементів, що дозволяє одночасно забезпечити достатньо високі показники жароміцності і необхідну стійкість проти високотемпературної корозії. Такими елементами можуть бути вольфрам і тантал.

Представлена робота присвячена вирішенню важливої наукової і практичної задачі – розробленню складу економнолегованого безренієвого жароміцного нікелевого сплаву з підвищеною структурною та фазовою стабільністю та експлуатаційними характеристиками на рівні серійного жароміцного сплаву ЖС32-ВІ, розробленню технології його виготовлення та обґрунтованому підбору режимів термічної обробки для використання при виготовленні методом високошвидкісної спрямованої кристалізації робочих лопаток агрегатів наземного базування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Робота виконувалася відповідно до:

– науково-дослідної роботи "Розробка та випробування імпортозамінних та ресурсозберігаючих технологій виробництва високоякісного литва з кольорових сплавів для авіадвигунів подвійного призначення" (ДБ 02319, 2019р. № державної реєстрації 0119U100527), в якій автор є виконавцем;

– спільної науково-дослідної роботи Запорізького національного технічного університету та АТ "Мотор Січ" "Розробка безренієвого жароміцного нікелевого сплаву для виготовлення литих лопаток, одержуваних методом високошвидкісної спрямованої кристалізації" (№ 2638, 2018 р.), в якій автор був виконавцем.

Мета та завдання досліджень. Метою роботи є розробка складу безренієвого жароміцного нікелевого сплаву для лиття методом спрямованої кристалізації, обґрунтований вибір режиму його термічної обробки, що забезпечить йому збереження необхідних експлуатаційних властивостей при значному зниженні вартості із використанням розрахунково-аналітичних методів прогнозування фазової та структурної стабільності.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні науки та прикладні завдання:

1. Вивчити характеристики дослідного жароміцного сплаву на базі ЖС32-ВІ з підвищеним вмістом танталу.

2. Із використанням розрахунково-аналітичних методик обрати хімічний склад ливарного жароміцного безренієвого сплаву для виготовлення лопаток методом спрямованої кристалізації.

3. Провести дослідження впливу основних легувальних елементів на експлуатаційні властивості дослідного сплаву.

4. Розробити тимчасові технічні умови (ТТУ) на розроблений жароміцний нікелевий сплав, для виготовлення виливків методом високошвидкісної спрямованої кристалізації, відповідно проведеним прогнозуючим розрахункам.

5. Розробити технологію виплавлення дослідного сплаву та вивчити склад та структуру матеріалу отриманої шихтової заготовки.

6. Провести дослідження з вибору раціонального режиму термічної обробки відповідальних виливків з дослідного сплаву, отриманих методом високошвидкісної спрямованої кристалізації, для забезпечення необхідного комплексу експлуатаційних властивостей.

7. Впровадити у виробництво розроблений ливарний безренієвий жароміцний нікелевий сплав для виготовлення лопаток методом високошвидкісної спрямованої кристалізації для наземних агрегатів в умовах АТ «Мотор Січ».

8. Оцінити очікуваний економічний ефект від впровадження розробленого ливарного жароміцного безренієвого нікелевого сплаву у

виробництво.

Об'єкт дослідження – процес забезпечення комплексу фізико-механічних та експлуатаційних властивостей на рівні розповсюджених серійних сплавів для виготовлення литих лопаток турбін наземного базування на підставі збалансованої системи легування безрениєвого жароміцного сплаву виготовленого методом високошвидкісної спрямованої кристалізації, та обрання раціонального режиму його термічної обробки.

Предмет дослідження – закономірності зміни структури, фізико-механічних, жароміцних та експлуатаційних властивостей жароміцних нікелевих сплавів внаслідок сукупного впливу зміни системи легування та проведення відповідної термічної обробки з метою зниження собівартості литва.

Методи дослідження: Для оцінки структурної та фазової стабільності жароміцних нікелевих сплавів застосовували різні розрахункові методи: "ΔE-метод" оцінки збалансованості хімічного складу сплавів за величиною параметра дисбалансу системи легування; методи PHACOMP і New PHACOMP - за хімічним складом γ-твердих розчинів; розроблену в НУ «Запорізька політехніка» комплексну методику, яка встановлює взаємозв'язок між різними параметрами структурної стабільності.

Плавки жароміцних нікелевих сплавів проводили на установках типу FM-1-2-100, УВСК-9А і УППФ-3М.

За допомогою стандартних методик досліджували хімічний склад, структуру, фізико-механічні властивості матеріалу дослідних зразків при різних температурах використовуючи хімічні та спектральні методи.

Макро- і мікроструктури досліджували за допомогою оптичних металографічних мікроскопів МІМ-10 і Neophot при збільшеннях від 100 до 1000 разів.

Електронномікроскопічні дослідження і рентгеноспектральний мікроаналіз (РСМА) проводили на растровому електронному мікроскопі JSM-IT300LV при збільшеннях до 10000 разів.

Механічні властивості при температурі 20 °С визначали випробуваннями на розривній машині ZDM30. Тривалу міцність – на установці моделі АІМА-5-2 при температурах 975°С та 1000°С.

Отримані розрахункові та експериментальні дані обробляли методами математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Отримали подальший розвиток уявлення про вплив підвищеного вмісту Та при зниженому вмісті С на структуру та властивості матеріалу зразків, відлитих методом високошвидкісної спрямованої кристалізації на установці УВСК-9А з дослідного жароміцного нікелевого сплаву на базі ЖС32-ВІ. Встановлено, що

підвищений вміст Та забезпечує механічні і жароміцні властивості дослідного сплаву після термообробки за режимом, передбаченим для сплаву ЖС32-ВІ, на рівні, що істотно перевищує вимоги ТУ для сплаву ЖС32-ВІ (ВСК).

2. Вперше, з використанням розрахункових методів прогнозування структурної та фазової стабільності жароміцних нікелевих сплавів, отримано оптимальний склад економнолегованого безренієвого сплаву для виготовлення відповідальних виливків зі спрямованою і монокристалічною макроструктурою з підвищеною структурною та фазовою стабільністю при збереженні властивостей міцності на рівні серійного жароміцного сплаву ЖС32-ВІ. Поліпшення структурної стабільності і підвищення комплексу властивостей розробленого сплаву забезпечується за рахунок збалансованого легування танталом і вольфрамом (по 8,5 мас. % на середньому рівні), при відсутності в хімічному складі найбільш дорогого компонента – ренію.

3. Отримали подальший розвиток уявлення про вплив вмісту основних легувальних елементів (в першу чергу Та і W) на фізико-механічні і експлуатаційні властивості розробленого сплаву ЗМІ-М5. Встановлено, що даний склад поєднує в собі високу структурну і фазову стабільність зі збереженням характеристик жароміцності та технологічності на рівні сплаву ЖС32-ВІ при зниженні вартості майже в 2 рази (акт від 03.12.2019р.)

4. Отримали подальший розвиток матеріалознавчі уявлення про механізм впливу режиму термічної обробки на структуру і комплекс фізико-механічних і експлуатаційних властивостей жароміцних нікелевих сплавів. Встановлено, що форма частинок інтерметаллідної γ -фази в структурі зразків після термообробки за режимом, передбаченим для сплаву ЖС32-ВІ переважно глобулярна, а в дослідних зразках, які пройшли термообробку за режимом, передбаченим для сучасних сплавів IV покоління – кубічна і, як відомо, має найбільший зміцнюючий ефект. Проведення термообробки за відповідним режимом дозволило забезпечити механічні властивості, а також тривалу міцність при температурі випробування 975 °С і навантаженні 300 МПа монокристалічних зразків розробленого сплаву I покоління на рівні вимог розроблених ТТУ, а також ТУ1-92-177-91 і 18Т-ТУ-158 для сплаву ЖС32-ВІ II покоління.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Дослідженнями показано, що значення тривалої міцності при температурі 1000 °С і навантаженні 280 МПа дослідних зразків, відлитих методом високошвидкісної спрямованої кристалізації на установці УВСК-9А з дослідного жароміцного нікелевого сплаву на базі ЖС32-ВІ, з підвищеним вмістом Та при зниженому вмісті С, знаходяться на рівні значень для сплаву

ЖС32-ВІ. Випробування при температурі 975 °С і навантаженні 250 МПа показало, що тривала міцність дослідного сплаву більш ніж в 3 рази перевищує середні значення для сплаву ЖС32-ВІ. Наведені дані підтверджують позитивний вплив підвищеного вмісту Та на жароміцність і перспективність застосування низьковуглецевої модифікації сплаву на базі ЖС32-ВІ.

2. Для виготовлення відповідальних виливків методом високошвидкісної спрямованої кристалізації розроблено ливарний жароміцний нікелевий сплав ЗМІ-М5, що містить легувальні компоненти в наступному співвідношенні, мас. %: С – 0,06...0,12; Сг – 4,5...5,5; Со – 5,0...6,0; W – 8,0...9,0; Мо – 0,4...1,0; Al – 5,7...6,3; Та – 8,0...9,0; В – 0,005...0,015; Се – 0,005...0,015; Y – 0,005...0,015; Ni – основа. Сплав відрізняється підвищеним вмістом танталу, який компенсує відсутність у сплаві ренію, також у сплаві зменшено кількість вуглецю та виключено зі складу ніобій. При цьому, суттєво знижується вартість сплаву, в порівнянні зі сплавом ЖС32-ВІ, покращується структурна стабільність при збереженні показників жароміцності (акт від 06.03.2020р.).

3. Встановлено, що термообробка за режимом, передбаченим для сучасних сплавів IV покоління, забезпечує розробленому сплаву механічні властивості і тривалу міцність монокристалічних зразків при температурі випробування 975 °С і навантаженні 300 МПа на рівні вимог для серійного сплаву ЖС32-ВІ, котрий містить коштовний реній.

5. Дослідно-промислове випробування розробленого сплаву ЗМІ-М5 на базі АТ «Мотор Січ» при отриманні робочих лопаток ТВД для наземної установки Д-336 методом високошвидкісної спрямованої кристалізації за серійною технологією показало, що розроблений сплав має технологічні параметри на рівні промислового сплаву ЖС32-ВІ. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження сплаву ЗМІ-М5 при потребі в литих лопатках з монокристалічною структурою для агрегатів наземного базування порядку 3 тонн складає близько 8 мільйонів гривень (акт від 03.12.2019р.).

Особистий внесок здобувача.

Основні результати, наведені в дисертаційній роботі, були отримані і проаналізовані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать:

– проведення дослідних плавок з виготовлення жароміцного нікелевого сплаву на базі серійного ЖС32-ВІ з підвищеним вмістом Та і зниженим вмістом С; виготовленню з нього зразків методом високошвидкісної спрямованої кристалізації; дослідження структури і властивостей отриманого сплаву та зразків [1, 2, 3, 11];

– обрання системи легування жароміцного нікелевого сплаву для силових агрегатів наземних установок [9, 10];

– розробка оптимального хімічного складу економнолегованого жароміцного нікелевого сплаву, що не містить реній, з використанням методів розрахункового прогнозування його структурної і фазової стабільності [4, 7, 8];

– дослідження структури і властивостей зразків дослідних жароміцних нікелевих сплавів, отриманих методом високошвидкісної спрямованої кристалізації [5, 12, 13];

– дослідження впливу термічної обробки за різними режимами на структуру і властивості дослідного жароміцного сплаву, що не містить реній, та вивчені ролі дифузії в означеному процесі [6, 13].

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи були повідомлені та обговорювалися на міжнародних, республіканських конференціях і семінарах. Основними з них є: VII та VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні» (м. Київ, 21...22 травня 2015 р. та 30...31 травня 2016 р.); XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Неметалеві вкrapлення і гази у ливарних сплавах» (Запоріжжя, 6...9 жовтня 2015 р.); XXI, XXII та XXIII міжнародні конгреси двигунобудівників (Харків: Нац. Аерокосмічний ун-т «Харківський авіаційний інститут», 2016, 2017 та 2018 рр.); Міжнародна науково-практична конференція «Науково-інноваційні рішення в металургії та ливарному виробництві», присвячена 60-й річниці заснування ФТІМС НАН України (м. Київ, 19...21 листопада 2018 р.); Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 8» (м. Київ, Інженерно-фізичний факультет НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», 6...7 грудня 2018 р.).

Публікації. Основні матеріали і результати дисертації опубліковані в 13 роботах, з яких: 6 – статей у фахових виданнях, які входять до переліку МОН України, 1 – у міжнародному виданні, 1 патент України на корисну модель, а також 5 тез доповідей в матеріалах конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та 4 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 175 сторінок: основного тексту 127 сторінок, список використаних джерел із 115 найменувань на 13 сторінках та 4 додатків на 20 сторінках, містить 47 рисунків та 33 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, визначено її мету і задачі, висвітлено наукове і практичне значення, особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** наведено огляд технічної літератури з питань розробки складу економнолегованих жароміцних нікелевих сплавів, для

виготовлення відповідальних виливків зі спрямованою і монокристалічною макроструктурою для агрегатів наземного базування, з підвищеною структурною та фазовою стабільністю при збереженні властивостей міцності на рівні серійних жароміцних сплавів.

На основі літературних даних та проведеного аналізу сучасного стану питання сформульовано мету дослідження та задачі, які необхідно вирішити для її досягнення.

У **другому розділі** викладені загальні методичні положення роботи.

Дослідні сплави виплавляли в сучасних вакуумних індукційних установках рівновісної та спрямованої кристалізації в тому числі з проведенням високотемпературної термочасової обробки розплаву.

Для прогнозування фазової, структурної стабільності та властивостей сплаву, що розроблено задіяли сучасні розрахунково-аналітичні методи. Розрахунково-аналітичні та експериментальні дослідження проводили в порівнянні з промисловими жароміцними сплавами ЖС26-ВІ та ЖС32-ВІ.

Хімічний склад, структури, механічні та жароміцні властивості дослідних сплавів визначали за допомогою сучасних достовірних методик на відповідному обладнанні. Відносна похибка складала на більше 5 %.

Термообробку зразків проводили за трьома варіантами.

I варіант. За стандартним режимом, що передбачено для сплаву ЖС32-ВІ (ВСК): гомогенізація в вакуумі при температурі 1270 ± 10 °C протягом 2,0 годин при залишковому тиску 1,33...0,133 Па.

II варіант. За режимом зі збільшеним часом витримки:

– нагрів у вакуумі зі швидкістю не більше 20 °C/хв. до температури 1270 ± 10 °C; витримка протягом 4,0 годин у вакуумі при залишковому тиску 1,33...0,133 Па;

– охолодження до кімнатної температури протягом не менше 60 хв.

III варіант. За режимом, що передбачено для сучасних сплавів IV покоління (ВСК):

– нагрів в вакуумі до 1000 ± 50 °C зі швидкістю 6...8 °C/хв.; витримка при температурі 1000 ± 50 °C протягом 30...45 хв. у вакуумі при залишковому тиску 0,133...0,00133 Па;

– нагрів до $1280 \pm_{-5}^{+10}$ °C зі швидкістю 5 °C/хв.; витримка при температурі $1280 \pm_{-5}^{+10}$ °C протягом 75...90 хвилин в динамічному вакуумі 1,33...0,133 Па;

– охолодження до 700 °C зі швидкістю 80...100 °C/хв;

– нагрів до 1030 ± 10 °C зі швидкістю 6...8 °C/хв. в динамічному вакуумі 1,33...0,133 Па, витримка при температурі 1030 ± 10 °C протягом 4 годин;

– охолодження до 700 °C зі швидкістю 80...100 °C/хв в середовищі аргону;

– нагрів до 870 ± 10 °С зі швидкістю 6...8 °С/хв. в динамічному вакуумі при залишковому тиску 1,33...0,133 Па, витримка при температурі 870 ± 10 °С протягом 28 годин;

– охолодження до кімнатної температури в середовищі аргону не менше ніж за 60 хвилин.

Використані методи та сучасне обладнання дозволили отримати достовірні результати.

Третій розділ присвячено розробці нового безренієвого жароміцного нікелевого сплаву для виготовлення виливків зі спрямованою та монокристалічною структурою.

Для підтвердження ефективності впливу збільшеного вмісту танталу на рівень експлуатаційних властивостей ЖНС провели дослідження зразків (ВСК) відлитих з жароміцного нікелевого сплаву на базі ЖС32-ВІ, з підвищеним вмістом Та, при зниженому вмісті С. Встановлено, що механічні властивості сплаву відповідають вимогам ТУ ЖС32-ВІ, а тривала міцність при температурі 975 °С і навантаженні 250 МПа більше ніж в 3 рази перевищує середні значення для сплаву ЖС32-ВІ.

Проведені комплексні розрахункові дослідження по розробці оптимального складу нового ливарного жароміцного нікелевого безренієвого сплаву, призначеного для виготовлення робочих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації для стаціонарних газотурбінних установок.

У таблиці 1 представлено дослідні хімічні склади (1 – 5) сплаву, що розробляли, а також промислових сплавів ЖС32-ВІ і ЖС26-ВІ середнього рівня легування.

Таблиця 1 – Хімічний склад дослідних сплавів

Сплав	Середній вміст елементу %, масових											
	С	Cr	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	V	Ta	Re	B
ЖС32-ВІ	0,15	5,0	9,0	6,0	-	1,0	8,3	1,5	-	4,0	4,0	0,02
Склад 1	0,15	5,0	5,5	5,9	-	0,7	7,5	-	-	7,5	-	0,01
Склад 2	0,12	5,0	5,5	5,9	-	0,7	8,0	-	-	8,0	-	0,01
Склад 3	0,09	5,0	5,5	5,9	-	0,7	8,5	-	-	8,5	-	0,01
Склад 4	0,06	5,0	5,5	5,9	-	0,7	9,0	-	-	9,0	-	0,01
Склад 5	0,03	5,0	5,5	5,9	-	0,7	9,5	-	-	9,5	-	0,01
ЖС26-ВІ	0,15	5,0	9,0	5,8	1,0	1,1	11,7	1,6	1,0	-	-	0,015

Примітка. Ni – основа.

Відповідно до розрахунково-аналітичної методики було встановлено наступне:

– розрахункові показники структурної стабільності та збалансованості системи легування забезпечують задовільну структурну та фазову стабільність розробленого безренієвого сплаву;

– температурні показники (температури солідус, кінця розчинення γ' -фази; температурний інтервал кристалізації; температурний інтервал для проведення гомогенізації, обробки на γ - твердий розчин) забезпечують оптимальний мікроструктурний стан і показники механічних властивостей розробленого безрениєвого ливарного жароміцного сплаву на рівні промислового серійного сплаву ЖС32-ВІ, який містить реній (4 мас. %);

– досягнуто наступний рівень показників: границя короточасної міцності в межах $\sigma_B^{20} = 1219,0 \dots 1231,8$ МПа і середньої довговічності зразків $\tau_{300}^{975} = 45,4$ години, відповідно із вихідними вимогами до розробки ($V_{\gamma}^{20} \geq 60\%$; $\sigma_B^{20} \geq 900$ МПа ; $\tau_{300}^{975} \geq 40$ годин) та нормативами ТУ 1-92-177-91;

– за рахунок забезпечення показника ефективного «еквівалентного» хрому $[Cr]_{\text{ЕКВ.}} < 30\%$, було досягнуто достатню прогнозовану корозійну стійкість розробленого безрениєвого нікелевого сплаву.

– за оптимальними показниками комплексу властивостей було обрано дослідний сплав, який не містить ренію, з присвоєнням йому марки ЗМІ-М5, призначеного для виготовлення робочих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації для наземних газотурбінних установок, з метою заміни промислового сплаву ЖС32-ВІ, що містить в складі дорогих реній.

Вивчили вплив вмісту основних легувальних елементів (в першу чергу Та і W) на експлуатаційні властивості дослідного сплаву ЗМІ-М5. В таблиці 2 наведено розрахункові значення механічних властивостей для досліджених сплавів.

Таблиця 2 – Розрахункові значення властивостей моно [001] зразків досліджених сплавів

№	Сплав	Механічні властивості при 20 °С		Час до руйнування при 975 °С під навантаженням 300 МПа тр, годин
		σ_B , МПа	δ , %	
	Сплав ЖС26-ВІ	930	12,8	18,0
1	Запропонований ЗМІ-М5-ВІ	1039	12,0	22,0
2		1142	8,0	45,0
3		1181	10,0	48,0
4		1150	8,8	52,0
5		1152	8,0	55,5
	Сплав ЖС32-ВІ	1156	6,0	69,0
	Норми ТУ 1-92-177-91 (для сплаву ЖС32-ВІ)	≥ 900	$\geq 6,0$	≥ 40 годин

Аналіз отриманих даних показав що середній показник часу до руйнування зразків оптимального складу 3 та сплаву ЖС32-ВІ задовольняють

умовам ТУ 1-92-177-91 на сплав ЖС32-ВІ, а сплаву ЖС26-ВІ – є значно нижчим відносно вказаних норм.

Таким чином, з використанням розрахунково-аналітичних методик розроблено жароміцний нікелевий сплав ЗМІ-М5, який після проведення відповідної термічної обробки за показниками механічних властивостей та довготривалої міцності відповідає вимогам розроблених тимчасових технічних умов, ТУ 1-92-177-91 на сплав ЖС32-ВІ, та суттєво перевищує відповідні показники сплаву ЖС26-ВІ. Сплав є дешевшим ніж ЖС32-ВІ, який містить реній (4 мас. %) майже в 2 рази (акт від 03.12.2019р.).

Для виготовлення монокристалічних литих лопаток газотурбінних установок наземного використання пропонується ливарний жароміцний нікелевий сплав ЗМІ-М5, що містить легувальні компоненти, в наступному співвідношенні, мас. %: С – 0,06...0,12; Cr – 4,5...5,5; Со – 5,0...6,0; W – 8,0...9,0; Мо – 0,4...1,0; Al – 5,7...6,3; Та – 8,0...9,0; В – 0,005...0,015; Се – 0,005... 0,015; Y – 0,005...0,015; Ni – основа.

Були проведені дослідні плавки з виготовлення розробленого жароміцного нікелевого безренієвого сплаву ЗМІ-М5. Хімічний склад досліджених фрагментів шихтової заготовки зі сплаву ЗМІ-М5 представлений в таблиці 3.

Таблиця 3 – Хімічний склад дослідного жароміцного нікелевого сплаву ЗМІ-М5

Плавка	Вміст елементів, мас.%						
	С	Cr	Со	W	Al	Та	Мо
FM-1-2-100	0,05	5,29	5,42	9,46	5,76	9,0	0,84
УППФ-3М	0,064	5,35	5,51	9,53	5,88	8,72	0,84
Норми ТТУ	0,04...0,08	4,7...5,3	5,0...6,0	8,7...9,3	5,7...6,3	8,7...9,3	0,5...1,0

Закінчення таблиці 3.

Плавка	Вміст елементів, мас.%						
	Cu	Si	Mn	Fe	B	S	P
FM-1-2-100	0,009	0,02	0,03	0,06	0,012	0,006	0,004
УППФ-3М	0,009	0,10	0,03	0,06	0,011	0,005	0,004
Норми ТТУ	≤ 0,07	≤0,3	-	≤ 1,0	-	≤0,010	≤0,010

Мікроструктура шихтової заготовки, отриманої на установці FM-1-2-100 в литому стані являє собою γ -твердий розчин з наявністю інтерметаллідної γ' -фази, евтектичної фази (γ - γ'), карбідів і карбонітридів.

Поверхня дослідної заготовки в основному чиста. У центральній зоні верхньої і середньої частин заготовки є чисті усадкові раковина і рихлоти, дедалі менші від верху до низу.

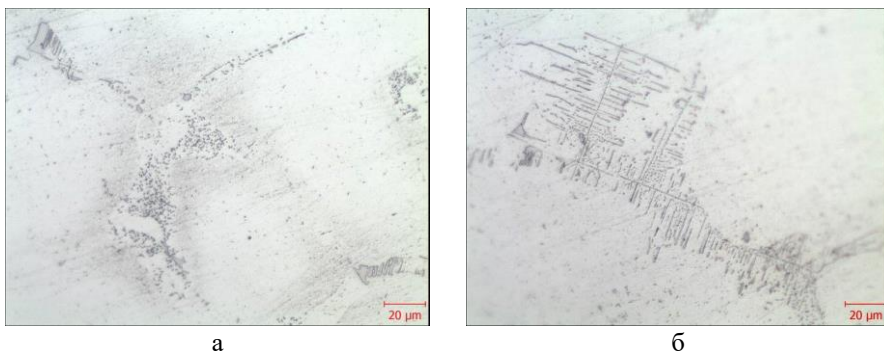
Провели дослідження з вибору раціонального режиму термічної обробки дослідного сплаву для забезпечення необхідного комплексу експлуатаційних властивостей.

Литі зразки з дослідного сплаву ЗМІ-М5, для визначення механічних і жароміцних властивостей (\varnothing 15 мм, L = 135 мм) отримували методом високошвидкісної спрямованої кристалізації на установці УВСК-9А.

Встановлено, що значення відхилень напрямку [001] від осі Z в зразках, відлитих з дослідного сплаву ЗМІ-М5, коливаються від 0,2 до 54,7 кут. град. Інші зразки мали спрямовану структуру з кількістю кристалів ≥ 3 .

На нетравлених мікрошліфах зразків виявлені мікропори розміром до ~ 27 мкм, а також поодинокі оксидні включення – до ~ 10 мкм.

Карбіди виділяються в незначній кількості, що характерно для структури низьковуглецевого сплаву ЗМІ-М5 ($C \leq 0,08$ мас. %), у вигляді дрібних дискретних глобулярних частинок Me_3C (рис. 1 а), а також у вигляді «китайських ієрогліфів» з наявністю тонких пластин евтектичних карбідів типу Me_6C (рис. 1 б); розташовуються переважно в міждендритних просторах. Товщина пластин евтектичних карбідів складає $\sim 0,3...0,7$ мкм.



а – глобулярні частинки Me_3C ; б – частки у вигляді «китайських ієрогліфів»

Рисунок 1 – Карбіди в зразках зі сплаву ЗМІ-М5 до термообробки, $\times 500$.

Мікроструктура зразків зі сплаву ЗМІ-М5 до термообробки являє собою γ -твердий розчин з наявністю інтерметаллідної γ' -фази, евтектичної фази ($\gamma-\gamma'$) і незначної кількості карбідів (рис. 2). В литій структурі спостерігається розмірна і морфологічна неоднорідність частинок γ' -фази. Розмір і форма

γ' -частинок в осях і міждендритних областях різні – в осях частинки γ' -фази дрібніше і мають більш правильну кубічну морфологію (рис. 3).



Рисунок 2 – Мікроструктура зразків зі сплаву ЗМІ-М5, що отримані методом високошвидкісної спрямованої кристалізації до термообробки.

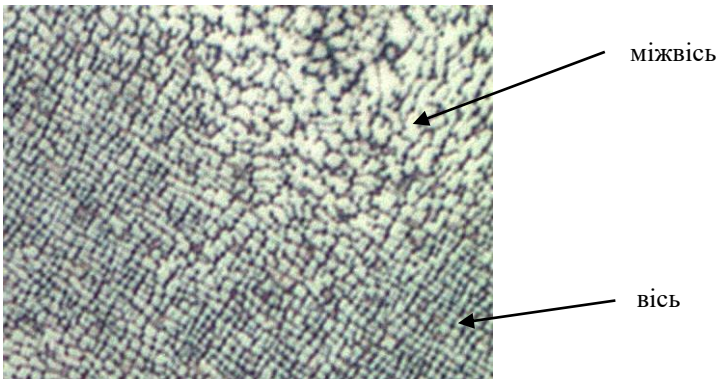
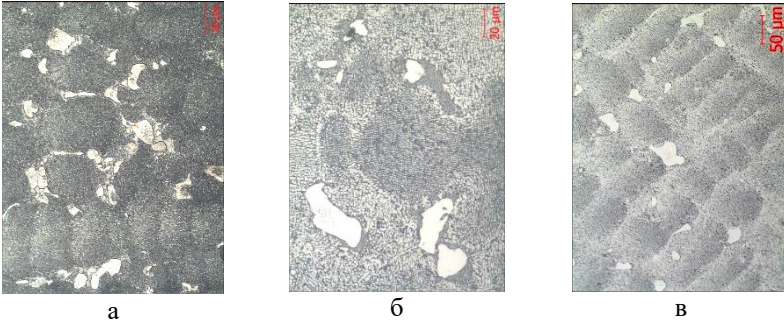


Рисунок 3 – Морфологія частинок інтерметалідної γ' -фази в зразках зі сплаву ЗМІ-М5 до термообробки, $\times 1500$.

Для забезпечення необхідного комплексу фізико-механічних і експлуатаційних властивостей даного сплаву проводили відповідну термічну обробку за трьома варіантами (див. розділ 2).

Мікроструктура зразків зі сплаву ЗМІ-М5 після термообробки за випробуваними режимами представляє собою γ -твердий розчин, зміцнений інтерметалідною γ' -фазою, з наявністю евтектичної фази (γ - γ') і незначної кількості карбідів. Проведення термообробки за різними режимами сприяло деякому зменшенню структурної неоднорідності внаслідок вирівнювання хімічного складу в межах дендритних осередків (рис. 4).



а

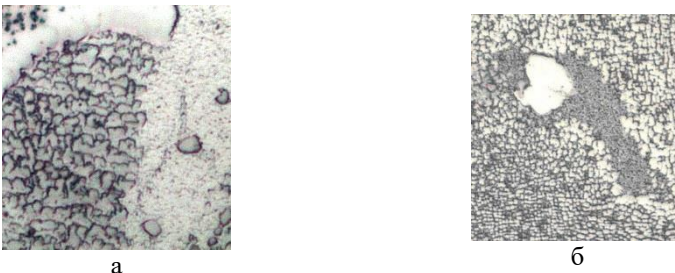
б

в

а – для сплаву ЖС32-ВІ (ВСК); б – зі збільшенням до 4 годин часом витримки при температурі 1270 ± 10 °С; в – за режимом, що передбачений для сучасних сплавів ІV покоління.

Рисунок 4 – Мікроструктура зразків зі сплаву ЗМІ-М5, що пройшли різні види термічної обробки, $\times 200$.

Дослідженнями встановлено, що форма частинок інтерметалідої γ' -фази в структурі зразків після термообробки за режимом, передбаченим для сплаву ЖС32-ВІ переважно глобулярна (рис. 5 а). У дослідних зразках, які пройшли термообробку за режимом, передбаченим для сучасних сплавів ІV покоління встановлено кубічну форму часток γ' -фази (рис. 5 б).



а

б

а – для сплаву ЖС32-ВІ; б – для сучасних сплавів ІV покоління.

Рисунок 5 – Стан інтерметалідої γ' -фази в монокристалічних зразках зі сплаву ЗМІ-М5 після термообробки за різними режимами $\times 1500$.

Можна зробити висновок, що зниження властивостей досліджуваного сплаву ЗМІ-М5, особливо жароміцних, обумовлено формуванням структури з великими (до 3,5 мкм) γ' -частинками зміцнювальної фази глобулярної морфології, яка характеризується меншою зміцнюючою дією в порівнянні з кубічною формою дисперсних частинок γ' -фази розміром $\sim 0,5$ мкм. Чинником, що сприяв отриманню нестабільних результатів також можна

вважати наявність структурної неоднорідності внаслідок утворення локальних об'ємів з дрібними частинками фази γ' , розмір яких в ~ 4 рази менше, ніж в основної матриці, а також виділення значної кількості евтектичної (γ - γ')-фази в вигляді подовжених частинок несприятливої морфології.

В результаті механічних випробувань і випробувань на тривалу міцність зразків відлитих з дослідного жароміцного нікелевого сплаву ЗМІ-М5 методом високошвидкісної спрямованої кристалізації (ВСК), встановлено що зразки зі спрямованою макроструктурою (3 і більше кристалів) всіх варіантів плавок і режимів термообробки не відповідають вимогам ТТУ для сплаву ЗМІ-М5 і вимогам ТУ1-92-177-91 і 18Т-ТУ-158 (для сплаву ЖС32-ВІ).

Результати механічних випробувань і випробувань на тривалу міцність дослідних зразків з монокристалічною макроструктурою наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Механічні і жароміцні властивості дослідних зразків зі сплаву ЗМІ-М5 з монокристалічною макроструктурою.

Термообробка	КГО, кут. град.	Механічні властивості при 20 °С			Час до руйнування		
		σ_b , МПа	δ , %	Ψ , %	$T_{исп}$ °С	σ , МПа	t_p , год.
Стандартна для ЖС32-ВІ (гомогенізація при 1270 ± 10 °С, 2,0 год.)	3,6	1112	8,0	6,7	975	320	19,0
	0,7	1152	7,6	-			19,3
	19,0	1142	8,0	4,2			20,5
	18,5	-	-	-			55,5
	18,5	-	-	-			38,0
	0,8	-	-	-		300	27,8
	6,5	-	-	-	1000	280	27,8
Гомогенізація при 1270 ± 10 °С, 4,0 год.	15,5	835	20,8	23,4	975	300	77,5
	0,2	-	-	-	975	300	56,5
					1000	280	26,0
					975	280	101,5
Стандартна для сучасних сплавів IV покоління (ВСК)	47,4	1340	6,8	8,6	-	-	-
		1396	5,2	8,6	-	-	-
	9,1	-	-	-	975	300	60,5
					1000	280	21,0
	44,9	-	-	-	975	300	95,15
					1000	280	55,0
	17,2	-	-	-	975	300	90,5
					1000	280	26,25
ЖС32-ВІ (моно)		1156	6,0	-	975	300	69,0
Норми ТТУ		≥ 1000	≥ 6,0	-	975	300	≥ 40,0
Норми ТУ1-92-177-91 і 18Т-ТУ-158 (для ЖС32-ВІ)		≥ 900	≥ 6,0	-	975	300	≥ 40,0
					1000	280	≥ 40,0

З представлених результатів видно, що механічні властивості досліджуваних зразків зі сплаву ЗМІ-М5 з монокристалічною структурою після термообробки за стандартним режимом, передбаченим для сплаву ЖС32-ВІ (ВСК), задовільні та відповідають вимогам ТТУ.

Значення тривалої міцності дослідних зразків після такої термообробки (випробуваних при температурі 975 °С і навантаженні 320 МПа, а також при температурі 1000 °С і навантаженні 280 МПа) не відповідають вимогам ТТУ для сплаву ЗМІ-М5 і вимогам ТУ1-92- 177-91 і 18Т-ТУ-158 (для сплаву ЖС32-ВІ).

Після термообробки зі збільшеним часом витримки при гомогенізації до 4 годин отримані значення межі міцності зразків (σ_b) нижче рівня вимог ТТУ, при відносному подовженні, що більше ніж в 3 рази перевищує ці вимоги. При цьому значення часу до руйнування при випробуванні на тривалу міцність матеріалу при $T_{\text{вип.}} = 975$ °С, $\sigma = 280$ МПа і 300 МПа задовольняють вимогам ТТУ, а при $T_{\text{вип.}} = 1000$ °С, $\sigma = 280$ МПа – знаходяться нижче вимог ТУ, передбачених для сплаву ЖС32-ВІ.

Дослідження розробленого жароміцного сплаву ЗМІ-М5 після термообробки за режимом, передбаченим для сучасних сплавів IV покоління показало, що механічні властивості при температурі 20 °С, а також тривала міцність при температурі випробування 975 °С і навантаженні 300 МПа відповідають вимогам тимчасових технічних умов.

Значення часу до руйнування при температурі випробування 1000 °С і навантаженні 280 МПа нестабільні. Зниження значень τ_p при 1000 °С, ймовірно, обумовлено кристалографічним напрямком зразків.

Встановлено, що для дослідних зразків, як і для жароміцних сплавів на нікелевій основі в цілому, характерним є крихкий межзеренний злам.

Таким чином, дослідний сплав ЗМІ-М5 який не містить ренію, має майже вдвічі меншу вартість (акт від 03.12.2019р.), при цьому після проведення відповідної термообробки забезпечує механічні та жароміцні властивості на рівні промислового сплаву ЖС32-ВІ і може бути використаний для виготовлення лопаток газотурбінних установок наземного призначення методом спрямованої кристалізації.

Четвертий розділ присвячено дослідно-промислового випробуванню розробленого сплаву ЗМІ-М5. В промислових умовах на базі АТ "Мотор Січ" випробувано виготовлення робочих лопаток ТВД для наземної установки Д-336 методом високошвидкісної спрямованої кристалізації на установці УВСК-9А за серійною технологією із використанням затравок зі сплаву НВ-4 підвищеної чистоти з додатковим вмістом вуглецю в кількості до 0,1 %. Проведені дослідження показали, що розроблений сплав має технологічні параметри на рівні промислового сплаву ЖС32-ВІ. Коригування ведення технологічного процесу спрямованої кристалізації не потрібно.

Загальний вихід придатного литва за макроструктурою лопаток для обох сплавів склав 48...50%, з цієї кількості отримано 70...75% лопаток зі спрямованою і 25...30% лопаток з монокристалічною макроструктурою (акт від 03.12.2019р.).

При потребі в литих лопатках з монокристалічною структурою для агрегатів наземного базування порядку 3 тон очікуваний річний економічний ефект від впровадження сплаву ЗМІ-М5 складає близько 8 мільйонів гривень (акт від 03.12.2019р.).

ВИСНОВКИ

1. Аналіз технічної літератури і сучасного стану питання показав, що роботи, присвячені розробці складу монокристалічного жароміцного нікелевого сплаву, що не містить реній, та при цьому характеризується підвищеною структурною та фазовою стабільністю і зберігає рівень властивостей міцності відповідно вимогам, котрі висуваються до серійного сплаву ЖС32-ВІ є актуальними.

2. Хімічний склад, структури, механічні та жароміцні властивості дослідних сплавів визначали за допомогою сучасних достовірних методик на відповідному обладнанні. Для прогнозування фазової, структурної стабільності та властивостей сплаву, що розробляється задіяли сучасні розрахунково-аналітичні методи, що дозволило суттєво скоротити витрати на етапі розробки хімічного складу сплаву та забезпечити його високі фізико-механічні та експлуатаційні властивості. Проведений комплекс досліджень дозволив отримати достовірні результати, встановити взаємозв'язок між комплексом легування, структурою та властивостями сплаву.

3. Встановлено, що механічні властивості при кімнатній температурі та тривала міцність матеріалу зразків, відлитих методом високошвидкісної спрямованої кристалізації (ВСК) на установці УВСК-9А з дослідного жароміцного нікелевого сплаву на базі ЖС32-ВІ, з підвищеним вмістом Та при зниженому вмісті С, після термообробки за режимом, передбаченим для сплаву ЖС32-ВІ, задовільні і відповідають вимогам ТУ для сплаву ЖС32-ВІ (ВСК). Випробування при температурі 975 °С і навантаженні 250 МПа показали, що тривала міцність дослідного сплаву більше ніж в 3 рази перевищує середні значення для сплаву ЖС32-ВІ.

4. Із застосуванням відомих розрахунково-аналітичних методів прогнозування фазової та структурної стабільності та розробленої в НУ «Запорізька політехніка» комплексної розрахунково-аналітичної методики спрогнозовано найважливіші параметри, що визначають працездатність дослідного економнолегованого безренієвого ливарного жароміцного нікелевого сплаву і показано, що розроблений сплав за розрахунковими

параметрами не поступається вимогам до широко поширеного і майже вдвічі більш дорогому ЖС32-ВІ.

5. Запропонованому сплаву, що не містить в своєму складі коштовного імпортного ренію присвоєно марку ЗМІ-М5.

Сплав містить легуючі компоненти, в наступному співвідношенні, мас. % : С – 0,06...0,12; Cr – 4,5...5,5; Со – 5,0...6,0; W – 8,0...9,0; Мо – 0,4...1,0; Al – 5,7...6,3; Та – 8,0...9,0; В – 0,005...0,015; Се – 0,005... 0,015; Y – 0,005...0,015; Ni – основа.

Розроблений сплав ЗМІ-М5 може бути рекомендованим для виготовлення монокристалічних литих лопаток газотурбінних установок наземного використання, як замітник серійного сплаву ЖС32-ВІ.

6. Комплексом досліджень з метою обрання раціонального режиму термічної обробки встановлено, що механічні властивості, а також тривала міцність при температурі випробування 975 °С і навантаженні 300 МПа монокристалічних зразків, отриманих з розробленого сплаву ЗМІ-М5 після термообробки за режимом, передбаченим для сучасних сплавів IV покоління відповідають вимогам тимчасових умов (ТТУ) на розроблений сплав.

7. Дослідно-промислове випробування розробленого сплаву ЗМІ-М5 на базі АТ "Мотор Січ" при отриманні робочих лопаток ТВД для наземної установки Д-336 методом високошвидкісної спрямованої кристалізації на установці УВСК-9А за серійною технологією підтвердило, що розроблений сплав має технологічні параметри та експлуатаційні властивості на рівні вимог до промислового сплаву ЖС32-ВІ (акт від 03.12.2019р.).

8. Очікуваний річний економічний ефект від впровадження сплаву ЗМІ-М5 при потребі в литих лопатках з монокристалічною структурою для агрегатів наземного базування порядку 3 тон складає близько 8 мільйонів гривень (акт від 03.12.2019р.).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Милонин Е.В., Лысенко Н.А., Наумик В.В. Направленная кристаллизация литых изделий из опытного жаропрочного сплава на базе ЖС32-ВИ. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2016. № 8/135. С. 83 – 89 [*Index Copernicus, Google Scholar*].

2. Милонин Е.В., Наумик В.В., Гайдук С.В. Исследование качества материала литых образцов направленной кристаллизации из опытного жаропрочного никелевого сплава. // *Металлургия машиностроения*. 2017. № 3. С. 22 – 26 [*Міжнародне видання*].

3. Ключихин В.В., Лысенко Н.А., Милонин Е.В., Наумик В.В., Берстовой Я.А. Исследование качества материала затравок для монокристаллического литья.

Авиационно-космическая техника и технология. 2017. № 9/144. С. 80 – 85 [*Index Copernicus, Google Scholar*].

4. Милонин Е.В., Малиновский П.Е., Наумик В.В., Гайдук С.В., Кондрашова С.Г. Разработка состава литейного безрениевого жаропрочного никелевого сплава для изготовления лопаток методом направленной кристаллизации. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2018. № 1. С. 75 – 80.

5. Милонин Е.В., Малиновский П.Е., Наумик В.В., Гайдук С.В. Исследование качества опытного жаропрочного никелевого безрениевого сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ). *Авиационно-космическая техника и технология*. 2018. № 7 (151). С. 88 – 94 [*Index Copernicus, Google Scholar*].

6. Милонин Е.В., Лысенко Н.А., Малиновский П.Е., Наумик В.В., Гайдук С.В. Выбор рационального режима термической обработки опытного безрениевого сплава для монокристаллического литья. *Металл и литье Украины*. 2018. № 7 – 8. С. 31 – 40.

7. Гайдук С.В., Милонин Е.В., Наумик В.В. Оптимізація складу ливарного жароміцного нікелевого сплаву для виготовлення литих робочих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації для перспективних газових турбін. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2018. № 2. С. 30 – 38.

Патент на корисну модель

8. Ливарний жароміцний нікелевий сплав: пат. № 129076 Україна : МПК (2018.01) С22С 19/00. № u201802749; заявл.19.03.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 6 с.

Тези в матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій

9. Милонин Е.В., Гайдук С.В., Наумик В.В. Система легирования жаропрочного никелевого сплава для силовых агрегатов наземных установок. *Нові матеріали і технології в машинобудуванні: матеріали науково-технічної конференції*, 21...22 травня 2015 р., м. Київ. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. С. 101 – 102.

10. Милонин Е.В., Наумик В.В., Гайдук С.В. Экономнолегированный жаропрочный никелевый сплав для установок наземной эксплуатации. *Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах: збірник тез XIV Міжнародної науково-технічної конференції, Запоріжжя, 6...9 жовтня 2015 р. / відп. ред. В.В. Луньов*. Запоріжжя: ЗНТУ, 2015. С. 107 – 109.

11. Милонин Е.В., Наумик В.В., Гайдук С.В. Исследование качества материала литых образцов направленной кристаллизации из опытного жаропрочного никелевого сплава на базе ЖС32-ВИ. *VIII Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2016: матеріали науково-технічної конференції*, 30...31 травня 2016 р., м. Київ / загальна редакція Р. В. Лютий, І. М. Гурия. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. С. 104 – 105.

12. Милонин Е.В., Малиновский П.Е., Наумик В.В., Гайдук С.В. Исследование качества опытного жаропрочного никелевого безрениевого сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ). *XXIII міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези*

доповідей. Харків: Нац. Аерокосмічний ун-т «Харківський по авіаційний інститут», 2018. С. 24.

13. Милонин Е.В., Малиновский П.Е., Наумик В.В., Гайдук С.В. Безрениевый сплав для монокристаллического литья. *Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 8»* Київ, 6 – 7 грудня 2018 р., Інженерно-фізичний факультет НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського» С. 245 – 247.

АНОТАЦІЯ

Милонин Е.В. "Безрениевый жароміцний нікелевий сплав для виготовлення виливків зі спрямованою та монокристалічною структурою" Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство. – Національний університет "Запорізька політехніка" МОН України, м. Запоріжжя, 2020.

В представленій роботі із використанням розрахунково-аналітичних методів прогнозування фазової та структурної стабільності розроблено хімічний склад жароміцного нікелевого сплаву для виготовлення литих робочих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації ЗМІ-М5, що не містить реній. Сплав після термообробки за режимом, що передбачений для сучасних сплавів IV покоління, продемонстрував при температурі 20 °С межу міцності σ_b вище 1300 МПа при задовільній пластичності ($\delta \geq 6,0\%$), а також час до руйнування при температурі випробування 975 °С і навантаженні 300 МПа 60...90 годин, що відповідає вимогам до серійного сплаву ЖС32-ВІ і при цьому є значно дешевшим.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав, спрямована кристалізація, лопатка, реній, монокристалічна макроструктура, кристалографічна орієнтація, термічна обробка, мікроструктура, γ' -фаза, механічні властивості, жароміцність.

АННОТАЦИЯ

Милонин Е.В. "Безрениевый жаропрочный никелевый сплав для изготовления отливок с направленной и монокристаллической структурой" Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – Материаловедение. – Национальный университет "Запорожская политехника", МОН Украины, г. Запорожье, 2020.

Диссертация посвящена техническому решению актуальной научной и практической задачи, а именно разработке состава экономнолегированного

безрениевого жаропрочного никелевого сплава, для изготовления ответственных отливок с направленной и монокристаллической макроструктурой для агрегатов наземного базирования, с повышенной структурной и фазовой стабильностью при сохранении свойств прочности на уровне серийного жаропрочного сплава ЖС32-ВИ, разработке технологии его изготовления и обоснованному выбору режима термической обработки.

На базе анализа современного состояния вопроса разработки экономнолегированных жаропрочных никелевых сплавов определены пути обеспечения необходимого в условиях их эксплуатации уровня прочностных свойств при существенном снижении себестоимости.

Исследованиями установлено, что механические и жаропрочные свойства материала образцов, отлитых методом высокоскоростной направленной кристаллизации (ВНК) на установке УВНК-9А из опытного жаропрочного никелевого сплава на базе ЖС32-ВИ, с повышенным содержанием Та, при пониженном содержании С, после термообработки по режиму, предусмотренному для сплава ЖС32-ВИ, удовлетворительные и соответствуют требованиям ТУ для сплава ЖС32-ВИ (ВНК). При испытании при температуре 975 °С и напряжении 250 МПа длительная прочность опытного сплава более чем в 3 раза превышает средние значения для сплава ЖС32-ВИ.

С применением известных расчетно-аналитических методов прогнозирования фазовой и структурной стабильности и разработанной в НУ "Запорожская политехника" комплексной расчетно-аналитической методики спрогнозированы важнейшие параметры, определяющие работоспособность опытного экономнолегированного безрениевого литейного жаропрочного никелевого сплава и показано, что разработанный сплав по расчетным параметрам не уступает широко распространенному и гораздо более дорогому (за счет 4%-го содержания Re) ЖС32-ВИ.

Предложенному сплаву, не содержащему в своем составе дорогостоящего и дефицитного импортного рения, присвоено марку ЗМИ-М5. Сплав содержит легирующие компоненты, в следующем соотношении, % по массе: С – 0,06...0,12; Cr – 4,5...5,5; Со – 5,0...6,0; W – 8,0...9,0; Мо – 0,4...1,0; Al – 5,7...6,3; Та – 8,0...9,0; В – 0,005...0,015; Се – 0,005... 0,015; Y – 0,005...0,015; Ni – основа.

Установлено, что сплав ЗМИ-М5 после термообработки по режиму, предусмотренному для современных сплавов IV поколения продемонстрировал при температуре 20 °С предел прочности σ_b выше 1300 МПа при удовлетворительной пластичности ($\delta \geq 6,0\%$), а также время до разрушения при температуре испытания 975 °С и нагрузке 300 МПа 60...90 часов, что соответствует требованиям временных условий (ВТУ) на разработанный сплав.

Таким образом, разработанный сплав ЗМИ-М5 не содержит рения, имеет значительно меньшую стоимость, и после соответствующей термической обработки обеспечивает механические и жаропрочные свойства на уровне промышленного сплава ЖС32-ВИ, следовательно, может быть использован для изготовления лопаток газотурбинных установок наземного назначения методом направленной кристаллизации.

Опытно-промышленное опробование разработанного сплава ЗМИ-М5 на базе АО "Мотор Сич" при получении рабочих лопаток ТВД для наземной установки Д-336 методом высокоскоростной направленной кристаллизации на установке УВНК-9А по серийной технологии подтвердило, что разработанный сплав имеет технологические параметры и эксплуатационные свойства на уровне промышленного сплава ЖС32-ВИ. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения сплава ЗМИ-М5 при потребности в литых лопатках с монокристаллической структурой для агрегатов наземного базирования порядка 3 тонн составляет около 8 млн. грн.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, направленная кристаллизация, лопатка, рений, монокристаллическая макроструктура, кристаллографическая ориентация, термическая обработка, микроструктура, γ' -фаза, механические свойства, жаропрочность.

SUMMARY

Milonin E.V. "Rhenium-free heat-resistant nickel alloy for the production of castings with directional and monocrystalline structure".
Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation is intended for a candidate degree in engineering science by specialty 05.02.01 – Materials science. – National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Ministry of Education and Science of Ukraine, Zaporizhzhia, 2020.

In the presented work, using the calculation and analytical methods for forecasting phase and structural stability, the chemical composition of the heat-resistant nickel alloy for the manufacture of cast rotor blades by the method of directional (mono) crystallization ZMI-M5, which does not contain rhenium, is developed. The alloy after heat treatment, under the regime provided for modern IV generation alloys showed a tensile strength σ_b above 1300 MPa with satisfactory ductility ($\delta \geq 6.0\%$) at a temperature of 20 °C, as well as time to failure at a test temperature of 975 °C and a load of 300 MPa 60..90 hours, which meets the requirements for the serial alloy ZhS32-VI and it is much cheaper.

Keywords: heat-resistant nickel alloy, directed crystallization, blade, rhenium, monocrystalline macrostructure, crystallographic orientation, heat treatment, microstructure, γ' -phase, mechanical properties, heat-resistance.