

УДК 669.245.018.44-048.77

doi: 10.32620/aktt.2022.4sup2.15

С. М. ДАНИЛОВ¹, Д. О. ТЬОМКІН¹, В. В. НАУМИК², Д. В. ТКАЧ²,
В.В. КЛОЧИХІН³, О. О. ПЕДАШ³

¹ Запорізький машинобудівний завод ім. Омельченко В. І., Запоріжжя, Україна

² Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

³ АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна

ВПЛИВ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФІКУВАННЯ НА СТРУКТУРУ Й ВЛАСТИВОСТІ ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ

В роботі проведено дослідження впливу комплексного модифікування жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ. Модифікування проводилось за різними технологічними схемами: високодисперсними частинками карбонітриду титану $Ti[Ti(C,N)]$, використанням $Ti[Ti(C,N)]$ при заливанні у форму з поверхневим модифікатором $CoAl_2O_4$, а також одночасного застосування комплексу об'ємних модифікаторів $Ti[Ti(C,N)]$ та $Ni-Y$. Серія дослідів дозволила встановити ефективність окремого впливу об'ємного модифікатора $Ti[Ti(C,N)]$ та його комплексного впливу сумісно з поверхневими модифікаторами та рідкоземельними металами на макро- та мікроструктуру жароміцного нікелевого сплаву. Було показано, що застосування модифікаторів дозволило значно подрібнити макроструктуру сплаву, причому найбільший ефект був отриманий при модифікуванні комплексами $Ti[Ti(C,N)]+CoAl_2O_4$ та $Ti[Ti(C,N)]+Ni-Y+CoAl_2O_4$. При дослідженні мікроструктури сплаву, встановлено, що величина міждендритних відстаней як у випадку окремого модифікування $Ti[Ti(C,N)]$, так і комплексного модифікування $Ti[Ti(C,N)]+Ni-Y+CoAl_2O_4$ знизилась зі 100...130 мкм до 80...120 мкм, що пов'язано з формуванням великої кількості зародків в об'ємі сплаву при його кристалізації та інтенсивним відведенням тепла від розплаву керамічною формою. За результатами впливу різних видів модифікування на мікроструктуру досліджуваного сплаву встановлено, що модифікування за всіма схемами призводить до зменшення розмірів карбідів та декотрому зростанню розмірів карбонітридів, а їх глобулярні частинки рівномірно розташовані за перерізом досліджуваних зразків. В усіх випадках модифікування спостерігається зниження величини усадкової мікропористості. Випробування механічних властивостей сплаву після стандартної термічної обробки показало, що модифікування вказаними комплексами дозволило отримати механічні властивості сплаву, що відповідають вимогам нормативно-технічної документації. Найкращий комплекс механічних властивостей при кімнатній температурі, ударної в'язкості й тривалості міцності отриманий з використанням комплексу модифікаторів $Ti[Ti(C,N)]+Ni-Y+CoAl_2O_4$.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав; модифікатор; макроструктура; дендрити; карбонітрид; карбід; алюмінат кобальту.

Вступ

Розвиток авіадвигунобудування тісно пов'язаний з підвищенням температури робочого газу на вході в турбіну та, відповідно, коефіцієнту корисної дії. Вочевидь, що підвищення температури газів можливе за умови наявності матеріалів, що можуть працювати тривалий час в умовах високотемпературного газового середовища. Застосування ливарних сплавів на нікелевій основі на сьогодні є найбільш перспективним шляхом при розробці матеріалів для газових турбін [1]. Необхідність підвищення експлуатаційних характеристик жароміцних сплавів на нікелевій основі призвела до розробки ряду складних багатокомпонентних систем, що дозволило забезпечити задовільні характеристики жароміцності, довготривалої міцності, структурної стабільності

тощо.

Підвищення експлуатаційної надійності робочих лопаток турбіни та лопаток соплових апаратів забезпечують різними підходами: отриманням лопаток з направленою та монокристалевою структурою, лопаток з рівновісною структурою тощо.

Ливарні сплави з рівновісною полікристалічною структурою широко застосовуються у вітчизняному авіадвигунобудуванні, проте підвищення температури їх експлуатації призводить до необхідності пошуку додаткових шляхів з підвищення жароміцності сплавів. Одним з достатньо ефективних шляхів, що дозволяють забезпечити зростання експлуатаційних характеристик ливарних сплавів на нікелевій основі є модифікування [2]. Це в першу чергу пов'язано з тим, що властивості жароміцних сплавів є чутливими до таких параметрів структури як розмір та орієнтація зерна, розмір та морфологія

включень, величина ліквідаційної неоднорідності тощо.

Отже метою цієї роботи було дослідження впливу комплексного модифікування на структуру жароміцного сплаву на нікелевій основі ЖСЗДК-ВІ.

1. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

На даний момент існує ряд робіт присвячених модифікуванню нікелевих жароміцних сплавів з метою підвищення їх експлуатаційних властивостей. Застосування модифікаторів не призводить до суттєвої зміни хімічного складу виливка, і дозволяє утримати хімічний склад сплаву у рамках марочної відповідності, що є необхідним в умовах жорсткого контролю відповідності сплавів такого типу до вимог технічної документації.

В розглянутих роботах з модифікування жароміцних сплавів на нікелевій основі застосовувались модифікатори у вигляді порошків різного розміру: від нано- та ультрадисперсних порошків до стандартних. В роботах [3 – 5] досліджували вплив модифікування сплаву ЖСЗДК-ВІ нанорозмірними порошками карбонітриду титану $Ti[Ti(C,N)]$. Було показано, що використання даного модифікатора дозволяє подрібнити макро- та мікрозерно, знизити величину мікропористості, сприяє покращенню морфології карбонітридних часток тощо.

На підприємстві АТ «МОТОР СІЧ» робота з підвищення механічних характеристик жароміцних сплавів на нікелевій основі ведеться систематично. В роботах [6, 7] було показано перспективність застосування нанотехнологій в ливарному виробництві. Зокрема, були отримані модифіковані сплави, котрі характеризувались дрібнозеренною структурою та більш сприятливою морфологією карбідів та карбонітридів [7, 8]. Зокрема, в дослідженні [9] показано, що після модифікування спостерігається збільшення кількості карбонітридних часток, а їх розмір становив 2...4 мкм.

В результаті дослідження впливу виду наночасток при об'ємному модифікуванні жароміцних сплавів на нікелевій основі та показано, що найбільш задовільні результати було отримано в результаті використання порошків $Ti[Ti(C,N)]$ [10, 11]. Автори [12] встановили раціональну кількість модифікатора в розплаві і показали, що для забезпечення подрібнення зерен в 5...8 разів достатньо вводити до 0,1 мас. % $Ti[Ti(C,N)]$.

В роботах [13 - 15] вивчали окремо вплив модифікування алюмінатом кобальту та комбінований вплив даного модифікатора в сукупності з цирконієм. Було показано, що алюмінат кобальту нанесений на поверхню ливарної форми сприяє підвищенню

теплопровідності, подрібненню макрозерен тощо. Проте зростання товщини стінки виливка призводило до зниження цього ефекту. При додаванні цирконію цього ефекту вдалось уникнути, крім того комплексне модифікування дозволило істотно знизити розміри дендритних комірок та позбавитись карбідної сітки по межах зерен.

Отже, для підвищення експлуатаційних характеристик жароміцних ливарних сплавів з рівнісною структурою ефективним є застосування різного роду модифікаторів. Це пов'язано з тим, що їх застосування дозволяє сформувати додаткові центри кристалізації в розплаві та забезпечити подрібнення литої структури сплаву. Існуючі дослідження підтверджують раціональність застосування даних технологій при виготовленні деталей авіаційних двигунів, проте має сенс провести дослідження щодо комплексного впливу поверхневих та об'ємних модифікаторів та впливу рідкоземельних елементів на структуру та властивості жароміцних нікелевих сплавів. Це дозволить встановити особливості впливу комплексного модифікування на їх експлуатаційні характеристики та обрати найбільш раціональну технологію. В даній роботі було досліджено вплив комплексного модифікування на макро- та мікроструктуру сплаву ЖСЗДК-ВІ, що широко використовується у виробництві лопаток газових турбін.

2. Матеріали та методи досліджень

На плавильній установці УППФ-3М шихту вагою ~ 8 кг розплавляли в основному тиглі, розплав нагрівали до температури $1650 \pm 10^\circ C$ й за 1,5...2 хв. до його зливання, крізь завантажувальний пристрій, присаджували на дзеркало металу завернуті в алюмінієву фольгу брикетовані частинки $Ti [Ti(C,N)]$ з співвідношенням компонентів $Ti - 90\%$; $Ti(C,N) - 10\%$ (для отримання із розрахунку 0,05 % за масою) з наступним:

- зливанням розплаву в електрокорундові керамічні форми характерною особливістю яких була наявність у першому робочому шарі 5% модифікатора – алюмінату кобальту $CoAl_2O_4$.

- додаванням $Ni-Y$ лігатури (із розрахунку отримання в сплаві 0,01 % ітрію за масою) з вмістом ітрію в ній 8-15 %, з подальшим зливанням розплаву у форму перший робочий шар котрої виготовлено з алюмінатом кобальту $CoAl_2O_4$.

Зливання розплаву у керамічні форми відбувалося при залишковому тиску в печі 0,665 Па й температурах 1530...1540°C. Керамічні форми були попередньо підігріті до температури $950 \pm 10^\circ C$.

Для порівняльних досліджень за такою ж технологією було отримано блок зразків із серійної шихтової заготовки.

Від дослідного матеріалу відбиралися зразки для проведення хімічного аналізу, вивчення макро- й мікроструктури, визначення механічних властивостей при кімнатній температурній тривалості міцності.

Хімічний склад визначали методами спектрального й хімічного аналізів.

Дендритну структуру вивчали на литих зразках металографічним методом на мікроскопі МІМ-8 при збільшенні до $\times 500$. Макроструктуру виявляли на макротемплетах методом хімічного травління в реактиві, котрий складався з 80 % HCl і 20 % H₂O₂. Форму й розміри макрозерна досліджували на бінокулярному мікроскопі МБС-9 при збільшенні $\times 4$.

Мікроструктуру сплаву вивчали за допомогою оптичної металографії, на зразках після термічної обробки (нагрів до температури $1210 \pm 15^\circ\text{C}$, витримка 4 год., охолодження на повітрі), на нетравлених шліфах й після електролітичного травління в реактиві P18.

Тимчасовий опір розриву й показники пластичності визначали при кімнатній температурі на установці ZDMY 30, а тривалу міцність (час до високотемпературного руйнування) зразків з діаметром робочої зони 5 мм визначали на установці Instron M3 при температурі 850°C й напруженні 340 МПа.

3. Результати досліджень

В таблиці 1 представлено хімічний склад виливків отриманих за серійною технологією та за технологіями комплексного модифікування.

Таблиця 1

Хімічний склад сплаву ЖСЗДК-ВІ дослідних варіантів

Варіант технології	Вміст елементів, % мас.							
	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo	Y
Серійний	0,07	12,0	9,6	4,1	4,2	2,8	4,4	-
Ti[Ti(C,N)]	0,07	11,9	9,6	4,4	4,2	3,2	4,2	-
Ti[Ti(C,N)] + CoAl ₂ O ₄	0,07	12,2	9,6	4,4	4,3	3,2	4,4	-
Ti[Ti(C,N)] + Ni-Y + CoAl ₂ O ₄	0,07	11,9	9,1	4,0	4,6	3,2	4,0	0,01
Норми ОСТ1 90126-85	0,06-0,11	11,0-12,5	8,0-10,0	3,8-4,5	4,0-4,8	2,5-3,2	3,8-4,5	-

Примітка: Ni – основа

Як видно з результатів представлених в таблиці 1, хімічний склад сплаву ЖСЗДК-ВІ дослідних варі-

антів модифікування, відповідав вимогам ОСТ1 90126-85. Модифікуванням отримали в сплаві вміст ітрію 0,01%.

Результати аналізу макроструктури показують, що використання при модифікуванні як окремих часток Ti[Ti(C,N)], так і комплексів Ti[Ti(C,N)] + CoAl₂O₄ та Ti[Ti(C,N)] + (Ni-Y) приводить до значного подібнення макрозерна сплаву. Розрахунок параметрів макроструктури (рис. 1) дозволив встановити, що зерна в модифікованих зразках більш ніж в 3 рази менші ніж в зразках жароміцного сплаву ЖСЗДК-ВІ отриманого за серійною технологією. Причому в зразках з використанням комплексів Ti[Ti(C,N)] + (Ni-Y) та Ti[Ti(C,N)] + CoAl₂O₄ величина максимального розміру макрозерна складала близько 5 мм.

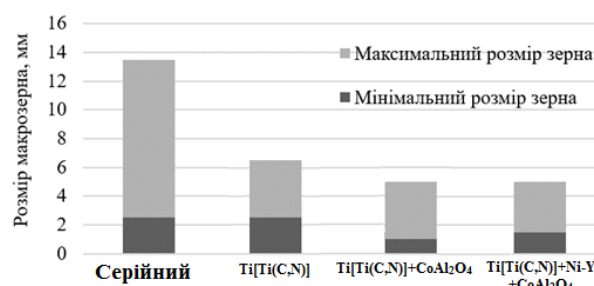


Рис. 1. Величина макрозерна зразків отриманих зі сплаву ЖСЗДК-ВІ дослідних варіантів

В результаті дослідження мікроструктури було встановлено, що модифікування жароміцного сплаву ЖСЗДК-ВІ привело до змін в структурі зразків.

Металографічним дослідженням було встановлено, що мікроструктура усіх дослідних зразків мала типову для ливарних жароміцних сплавів дендритну будову із наявністю: γ -твердого розчину на основі нікелю, що зміцнений частками вторинної інтерметалідної γ' -фази Ni₃(Al, Ti), карбідів типу MeC, Me₂₃C₆, карбонітридів Me(C,N). Первинні карбіди типу MeC в серійному сплаві виділялися як у вигляді дискретних поліедричних часток, так і у вигляді пластин шрифтової морфології (рис. 2, а), що розташовані в між дендритних просторах та на межах зерен (рис. 2, д).

Було встановлено, що використання дослідних комплексів модифікаторів вплинуло на кристалізаційні процеси при формуванні дендритної структури сплаву й призвело до зниження міждендритних відстаней у порівнянні із серійним варіантом зі 100-130 мкм до 80...120 мкм. Ймовірно, це обумовлено одночасним ростом дендритів по поверхні і об'єму всього вилівка та, відповідно, в модифікованому сплаві вісі першого порядку мали розвиток у напрямку теплопроводу, а вже вісі другого порядку не мали достатньої можливості розвитку через високу

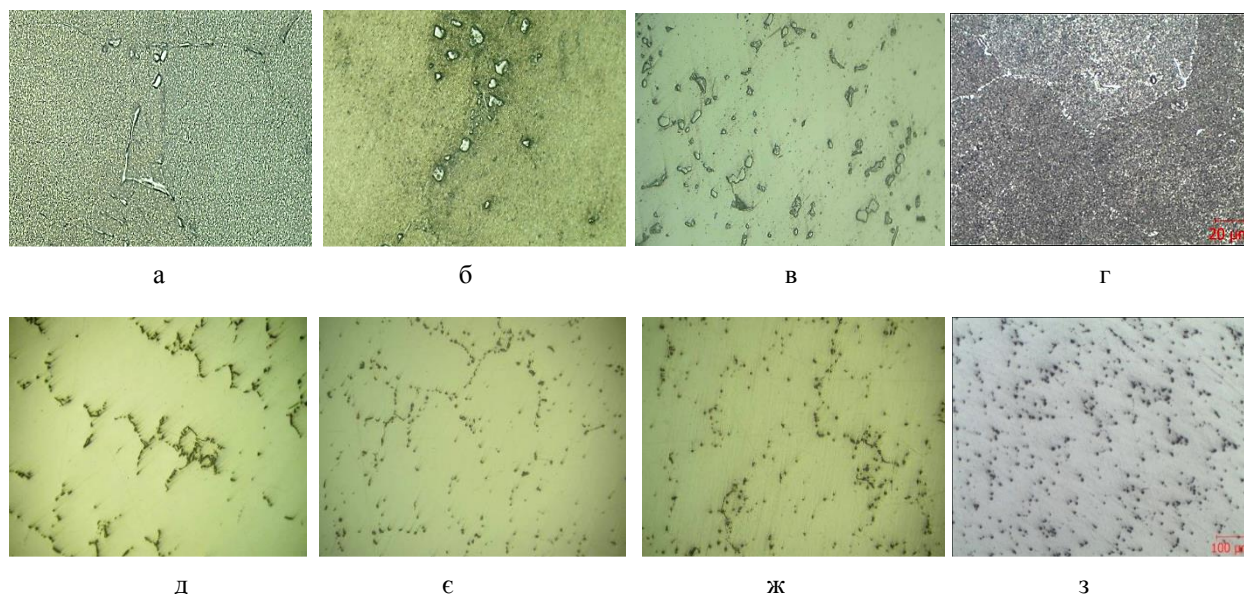


Рис. 2. Мікроструктура зразків модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ (а-г – морфологія карбідів й карбонітридів, $\times 500$; д-з – розподіл карбідів та карбонітридів в зразках, $\times 200$): а – серийний варіант технології; б – модифікування $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]$; в – $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]+\text{CoAl}_2\text{O}_4$; г – $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]+\text{Ni}-\text{Y}+\text{CoAl}_2\text{O}_4$

Таблиця 2
Розміри структурних складових в сплаві ЖСЗДК-ВІ дослідних варіантів

Варіант технології	Розмір карбідів типу MeC , мкм	Розмір карбонітридів типу $\text{Me}(\text{C},\text{N})$, мкм	Розмір мікропор, мкм
Серійний	(2...20)/11	(1...3)/2	до 230
$\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]$	(2...15)/8,5	(2...7)/4,5	до 90
$\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]+\text{CoAl}_2\text{O}_4$	(2...12)/7	(2...4)/3	до 80
$\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]+\text{Ni}-\text{Y}+\text{CoAl}_2\text{O}_4$	(2...30)/16	(2...4)/3	до 60

Примітка: чисельник – мінімальне й максимальне значення, знаменник – середнє значення

щільність зародків кристалізації. Тому у модифікованому сплаві можна очікувати меншого рівня розвитку дендритної ліквідації.

Дослідження мікроструктури дозволило встановити, що в модифікованому комплексом $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]+\text{Ni}-\text{Y}+\text{CoAl}_2\text{O}_4$ сплаві карбіди та карбонітриди виділяються у вигляді дискретних глобулярних часток (рис. 2, г), що в основному рівномірно розподілені в перерізі досліджуваного зразка (рис. 2, з), й розташовувалися переважно в об'ємі зерен. При цьому використання даного комплексу модифікаторів підвищило середній розмір карбідів, у порівнянні із серийним варіантом, а середній розмір карбонітридів дещо зменшився (табл. 2). Необхідно відмітити, що при даному варіанті модифікування

спостерігаються тонкі межі зерен з наявністю на них дрібнодисперсних карбідів, розмір котрих не перевищував 2 мкм (рис. 3).



Рис. 3. Мікроструктура зразків в зразках у модифікованому комплексом $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]+\text{Ni}-\text{Y}+\text{CoAl}_2\text{O}_4$ сплаві ЖСЗДК-ВІ, $\times 1000$

Слід відмітити, що використання алюмінату кобальту CoAl_2O_4 при комплексному модифікуванні призвело до зменшення розмірів мікропор в дослідних зразках (табл. 2). В роботах [14, 15] показано, що це є наслідком інтенсивного відведення тепла від виливка, що мінімізувало усадкові явища при кристалізації. Додавання модифікаторів першого та другого роду додатково інтенсифікувало цей процес.

Використання комплексу модифікаторів $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]+\text{CoAl}_2\text{O}_4$, та окремо часток $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]$ дозволило забезпечити рівномірний розподіл глобулярних карбідів в об'ємі матеріалу (рис. 2, е, ж).

Проведення механічних випробувань зразків показало відповідність показників при використанні дослідних варіантів модифікування вимогам норма-

тивної документації. Слід зазначити, що помітно кращий рівень властивостей й тривалої міцності отримано при використанні комплексу модифікаторів $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]+\text{Ni}-\text{Y}+\text{CoAl}_2\text{O}_4$. Більш сприятлива морфологія карбідних часток, отриманих через застосування ітрію та рівномірний розподіл карбонітрідів за об'ємом сплаву дозволив отримати помітно кращі ударну в'язкість сплаву та час до високотемпературного руйнування. На високий рівень цих показників ймовірно також вплинуло і зменшення мікропористості в сплаві через високу швидкість кристалізації сплаву у формі з алюмінатом кобальту.

Таблиця 3

Механічні властивості та тривала міцність зразків зі сплаву ЖСЗДК-ВІ дослідних варіантів

Варіант технології	Механічні властивості			Тривала міцність
	σ_b , МПа	δ , %	КСУ, Дж/см ²	
Серійний	967	8,6	33,0	310
Ti[Ti(C,N)]	1035	15,2	55,1	310,5
Ti[Ti(C,N)]+CoAl ₂ O ₄	966	15,2	49,9	327
Ti[Ti(C,N)]+Ni-Y+CoAl ₂ O ₄	1137	18,8	65,0	505
Норми ОСТ 1 90126	≥ 930	≥ 7,0	≥ 30	≥ 50,0

Висновки

Застосування комплексного модифікування призводить до подрібнення макрозерна сплаву дозволяючи знизити його розмір більше ніж в три рази. В модифікованих сплавах спостерігається більш рівномірний розподіл карбідів в об'ємі матеріалу, їх глобуляризація та зменшення розмірів усадкової мікропористості.

Отримання більш сприятливих макро- та мікроструктури при модифікуванні сплаву ЖСЗДК-ВІ комплексами модифікаторів, що розглядаються, дозволило отримати властивості, що відповідають вимогам нормативної документації на матеріал. При цьому модифікування комплексом $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]+\text{Ni}-\text{Y}+\text{CoAl}_2\text{O}_4$ дозволило отримати максимальні показники міцності, пластичності, ударної в'язкості та тривалої міцності, у порівнянні з іншими варіантами модифікування.

Література

1. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия [Текст] ; под общ. ред. Е. Н. Каблова. — М. : Наука, 2006. — 632 с.
2. Комплексное модифицирование многокомпонентных сплавов [Текст] / М. В. Грекова,

А. В. Калинин, Е. А. Джур, Т. В. Носова // Космична наука і технологія. — 2019. — Т. 25, № 3. — С. 25-31. DOI: 10.15407/knit2019.03.025.

3. Лысенко, Н. А. Влияние модифицирования карбонитридом титана на структуру и свойства жаропрочного сплава ЖСЗДК-ВИ с пониженным содержанием углерода [Текст] / Н. А. Лысенко, В. В. Клочихин, Д. А. Тёмкин // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ» : сб. науч. тр. Темат. вып.: Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. — Х. : НТУ «ХПИ». — 2010. — № 3. — С. 113-120.

4. Ресурсозберігаючі технології виробництва литва для авіаційного двигунобудування [Текст] : монографія / В. О. Богуслаєв, К. Б. Балушок, В. В. Клочихін [та інші]. — Запоріжжя : АТ «Мотор Січ», 2021. — 197 с.

5. Разработка технологии модифицирования жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ ультрадисперсными порошками карбонитрида титана [Текст] / В. В. Клочихин, С. Н. Данилов, Н. А. Лысенко, В. В. Наумик // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2020. — № 2. — С. 37–44

6. Использование нанотехнологий при изготовлении отливок. [Текст] / Т. В. Лысенко, В. В. Ясюков, О. И. Воронова [та інші] // Литье и металлургия. — 2019. — № 4. — С. 94-99. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-4-94-99.

7. Использование нанотехнологий в литейном производстве [Текст] / А. В. Богуслаев, В. В. Клочихин, Н. А. Лысенко, В. В. Наумик // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. — 2011. — № 4 (25). — С. 23-28.

8. Влияние легирования и модифицирования на свойства жаропрочных сплавов [Текст] / Н. Е. Калинина, Е. А. Джур, С. И. Мамчур, А. А. Шахов // Системнепроекування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки. — 2017. — Т. XXIII. — С. 28-32.

9. Модифицирование жаропрочных сплавов ультрадисперсными порошками [Текст] / А. В. Богуслаев, В. В. Клочихин, Н. А. Лысенко [и др.] // Вестник двигателестроения. — 2008. — № 1. — С. 47-51.

10. Особенности наномодифицирования многокомпонентных никелевых сплавов [Текст] / Н. Е. Калинина, А. Е. Калиновская, В. Т. Калинин, А. С. Дудников // Авиационно-космическая техника и технология. — 2012. — № 7 (94). — С. 23–26.

11. Калинина, Н. Е. Комплексное модифицирование сложнелегированных жаропрочных сплавов [Текст] / Н. Е. Калинина, А. Е. Юхименко, В. Т. Калинин // Вісник двигунобудування. — 2014. — № 2. — С. 181-185.

12. Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys [Text] / N. E. Kalinina, D. B. Glushkova, A. I. Voronkov, V. T. Kalinin // Funct. Mater. — 2019. — Vol. 26, Iss. 3. — P. 514-518. DOI: 10.15407/fm26.03.514.

13. Педаш, А. А. Влияние модифицирования однородного расплава на структуру и свойства сплава ЖСЗЛС-ВИ [Текст] / А. А. Педаш, Э. И. Цивирко //

Вестник двигателестроения. – 2008. – № 2. – С. 171-177.

14. Педаш, А. А. Повышение теплопроводности литейной керамической формы алюминатом кобальта [Текст] / А. А. Педаш, Г. А. Бялик, Э. И. Цивирко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 10(127). – С. 40–44.

15. Комбинированное модифицирование при получении деталей турбин ГТД [Текст] / П. Д. Жеманюк, А. А. Педаш, Э. И. Цивирко, А. Ф. Педаш // *Вестник двигателестроения*. – 2013. – № 1. – С. 75-58.

References

1. Kablov, E. N. *Lityye lopatki gazoturbinnnykh dvigateley: splavy, tekhnologii, pokrytiya* [Cast blades for gas turbine engines: alloys, technologies, coatings]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 632 p.

2. Grekova, M. V., Kalinin, A. V., Dzhur, E. A., Nosova, T. V. Kompleksnoye modifitsirovaniye nogokomponentnykh splavov [Complex modification of multicomponent alloy]. *Kosmichna nauka i tekhnologiya – Space science and technology*, 2019, vol. 25, no. 3, pp. 25-31. DOI: 10.15407/knit2019.03.025.

3. Lysenko, N. A., Klochikhin, V. V., Tomkin, D. A. Vliyaniye modifitsirovaniya karbonitridom titana na strukturu i svoystva zharoprochnogo splava ZHSZDK-VI s ponizhennym sodержaniyem ugleroda [Influence of titanium carbonitride modification on the structure and properties of ZhSZDK-VI heat-resistant alloy with reduced carbon content]. *Vestnik NTU «HPI»: sb. nauch. tr. Temat. vyp. : Jenergeticheskie i teplotekhnicheskie processy i oborudovanie [Herald of NTU «HPI» Series: Energy and heat engineering processes and installations]*, 2010, no. 3. pp. 113-120.

4. Boguslaev, O. V., Balushok, K. B., Klochikhin, V. V., Milonin, Ye. V., Naumyk, V. V., Shalomeiev, V. A. *Resursozberigayuchi tekhnologii vyrobnytzstva lyta dlya aviatziynogo dvigunobuduvannya* [Resource-saving casting technologies for aero engines building]. Zaporizhzhya, Motor Sich JSC, 2021. 197 p.

5. Klochikhin, V. V., Danylov, S. N., Lysenko, N. A., Naumyk, V. V. Razrabotka tekhnologii modifizirovaniia zharoprochnogo nikel'evogo ultradispersnymi poroshkami karbonitrida titana [Development of modification technique ZhS3DK-VI superalloy with ultrafine titanium carbonitrides powders]. *Novi materialy i tekhnologii v metallurgii ta mashinobuduvanni – New materials and technologies in metallurgy and machinebuilding*, 2020, no. 2, pp. 37 – 44

6. Lysenko, T. B., Yasyukov, V. V., Voronova, O. I., Kozishkurt, Ye. N., Kreytser, K. A. Ispol'zovaniye nanotekhnologiy pri izgotovleni iotlivok [The use of nanotechnology in the manufacture of castings]. *Lit'ye i metallurgiya*, 2019, no. 4, pp. 94-99. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-4-94-99.

7. Bohuslaev, A. V., Klochykhyn, V. V., Lysenko, N. A., Naumyk, V. V. Yspol'zovaniye nanotekhnolohyy v lyteynom proyzvodstve [The use of nanotechnologies in foundry production]. *Visnyk Donbas'koyi derzhavnoyi mashynobudivnoyi akademiyi – Herald of Donbas state machinebuilding academy*, 2011, no. 4 (25), pp. 23-28

8. Kalynyna, N. E., Dzhur, E. A., Mamchur, S. Y., Shakhov, A. A. Vlyyanye lehyrovanyya i modyfytsirovaniya na svoystva zharoprochnykh splavov [The influence of alloying and modification on the properties of heat-resistant alloys]. *Systemne proektuvannya ta analiz kharakterystyk aerokosmichnoyi tekhniki – System design and characteristics analysis of aerospace technique*, 2017, vol. XXIII, pp. 28-32

9. Boguslaev, A. V., Klochikhin, V. V., Lysenko, N. A., Dubrov, G. L., Temkin, D. A. Modifitsirovaniye zharoprochnykh splavov ul'tradispersnymi poroshkami [Modification of heat-resistant alloys with ultrafine powders]. *Vestnik dvigatelestroeniya - Herald of aeroenginebuilding*, 2008, no. 1, pp. 47-51

10. Kalinina, N. Ye., Kalinovskaya, A. Ye., Kalinin, V. T., Dudnikov, A. S. Osobennosti nanomodifitsirovaniya mnogokomponentnykh nikel'evykh splavov [Features of nanomodification of multicomponent nickel alloys]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologiya – Aerospace technic and technology*, 2012, no. 7 (94), pp.23–26.

11. Kalinina, N. Ye., Yukhimenko, A. Ye., Kalinin, V. T. Kompleksnoye modifitsirovaniye slozhnolegirovannykh zharoprochnykh splavov [Complex modification of complexly alloyed heat-resistant alloys]. *Visnik dvigunobuduvannya - Herald of aeroenginebuilding*, 2014, no. 2, pp. 181-185

12. Kalinina, N. E., Glushkova, D. B., Voronkov, A. I., Kalinin, V. T. Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys. *Funct. Mater.*, 2019, vol. 26, iss. 3, pp. 514-518. DOI: 10.15407/fm26.03.514.

13. Pedash, A. A., Tsivirko, E. I. Vliyaniye modifitsirovaniya odnorodnogo rasplava na strukturu i svoystva splava ZHS3LS-VI [Influence of modification of a homogeneous melt on the structure and properties of ZhS3LS-VI alloy]. *Vestnik dvigatelestroyeniya - Herald of aeroenginebuilding*, 2008, no. 2, pp. 171-177.

14. Pedash, A. A., Byalik, G. A., Tsivirko, E. I. Povysheniye teploprovodnosti liteynoy keramicheskoy formy alyuminatom kobal'ta [Increasing the thermal conductivity of a foundry ceramic mold with cobalt aluminate]. *Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologiya – Aerospace technic and technology*, 2015, no. 10 (127), pp. 40–44.

15. Zhemanyuk, P. D., Pedash, A. A., Tsivirko, E. I., Pedash, A. F. Kombinirovannoye modifitsirovaniye pri poluchenii detaley turbin GTD [Combined modification during the production of GTE turbine parts]. *Vestnik dvigatelestroyeniya – Herald of aeroenginebuilding*, 2013, no. 1, pp. 75-58.

EFFECT OF COMPLEX MODIFICATION ON PROPERTIES AND STRUCTURE OF NICKEL SUPER ALLOY

*Serhii Danilov, Dmytro Tomkin, Valeriy Naumyk,
Daria Tkach, Volodymyr Klochykhin, Oleksii Pedash*

In this work, a study of the influence of complex modification of the ZhS3DK-VI nickel-based heat-resistant super alloy was conducted. The modification was performed out according to different technological schemes: with highly dispersed titanium carbonitrides $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]$ particles, with $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]+\text{CoAl}_2\text{O}_4$ and $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]+\text{CoAl}_2\text{O}_4+\text{Ni}-\text{Y}$ complex that made it possible to investigate the specifics of the influence of the volume modifier $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]$ separately, and its complex effect with surface modifier CoAl_2O_4 and rare earth metals (with Ni-Y master alloy use) in the macro- and microstructure of a heat-resistant nickel alloy. It was shown that the use of modifiers allows for significant refining of macrograins, and the greatest effect was obtained with $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]+\text{CoAl}_2\text{O}_4$ and $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]+\text{Ni}-\text{Y}+\text{CoAl}_2\text{O}_4$ complexes. Microstructure study allows to show that the value of interdendritic distances in both the case of modification with $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]$ and $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]+\text{Ni}-\text{Y}+\text{CoAl}_2\text{O}_4$ complexes essentially decreased, from 100...130 μm to 80...120 μm , which is the result of many nuclei formation during crystallization in the volume of the alloy and with highly intense heat transfer from the melt by CoAl_2O_4 modified ceramic mould after melt pouring. Based on the results of the influence of various types of modification on the microstructure of the alloy under study, it was established that modification according to all schemes allows obtaining carbides of smaller sizes, but grown sizes of carbonitrides was observed. Globular particles of carbide and carbonitrides are evenly located along the cross-section of the samples under study. In all cases of modification, a decrease in the value of the shrinkage microporosity was observed. The mechanical properties of the specimens after standard heat treatment shows, that modification with complexes under study allows provide mechanical properties that meet the specification requirements. The best complex of alloy mechanical properties at room temperature, fracture toughness and stress-rupture strength provides with $\text{Ti}[\text{Ti}(\text{C},\text{N})]+\text{Ni}-\text{Y}+\text{CoAl}_2\text{O}_4$ modifiers complex.

Keywords: heat-resistant nickel alloy; modifier; macrostructure; dendrites; carbonitrides; carbide; cobalt aluminate.

Данилов Сергій Миколайович – директор Запорізького машинобудівного заводу ім. Омельченка В. І., Запоріжжя, Україна.

Тьомкін Дмитро Олександрович – заступник головного металурга Запорізького машинобудівного заводу ім. Омельченка В. І., Запоріжжя, Україна.

Наумик Валерій Владилєнович – д-р техн. наук, проф., проф. каф. машин й технології ливарного виробництва, проректор по науковій роботі й міжнародним зносинам, Національний університет «Запорізька політехніка» Запоріжжя, Україна.

Ткач Дар'я Володимирівна – канд. техн. наук, доц. каф. фізичного матеріалознавства, Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна.

Ключихін Володимир Валерійович – канд. техн. наук, головний металург АТ «МОТОР СІЧ», Запоріжжя, Україна.

Педаш Олексій Олександрович – канд. техн. наук, керівник бюро АТ «МОТОР СІЧ», Запоріжжя, Україна.

Serhii Danylov – Chief of the Zaporizhzhia Omelchenko machine-building plant, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: m_zmzmotor@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8087-9638.

Dmytro Tomkin – Deputy of head metallurgist in Zaporizhzhia Omelchenko machine-building plant, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: tajdv678@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4042-4452.

Valeriy Naumyk – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of foundry machinery and technology, Vice-Rector for Research and International Affairs, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: naumik@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0657-4510.

Daria Tkach – Candidate of Technical Science, Associate Professor, National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: dvt@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0003-0851-1481, Scopus Author ID: 24588185700.

Volodymyr Klochykhin – Candidate of Technical Sciences, Chief Metallurgist Engineer «MOTOR SICH» JSC, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0002-0754-5543.

Oleksii Pedash – Candidate of Technical Sciences, bureau chief in chief of metallurgical engineers department JSC «MOTOR SICH», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0003-1231-9951, Scopus Author ID: 57216853063.