

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ЛИВАРНОГО ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИТИХ РОБОЧИХ ЛОПАТОК МЕТОДОМ СПРЯМОВАНОЇ (МОНО) КРИСТАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ГАЗОВИХ ТУРБІН

Мета роботи. Розробка складу жароміцного нікелевого сплаву, що не містить реній для виготовлення литих робочих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації. Сплав повинен мати підвищену структурну стабільність, при збереженні рівня механічних, антикорозійних і жароміцних властивостей і значному зниженні вартості.

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 ЗНТУ комплексну методику, яка встановлює взаємозв'язок між різними параметрами структурної стабільності.

Отримані результати. Розрахунково-аналітичними методами розроблений склад нового економнолегованого жароміцного нікелевого сплаву для виготовлення литих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації, який не містить в своєму складі дорогого імпортного ренію.

Наукова новизна. З використанням розрахунково-аналітичних методів розроблений склад жароміцного нікелевого сплаву з підвищеною структурною стабільністю, стійкістю проти високотемпературної корозії і жароміцних властивостей, необхідних для литих монокристалічних виробів.

Поліпшення структурної стабільності й підвищення комплексу властивостей розробленого сплаву забезпечується за рахунок збалансованого легування танталом і вольфрамом (по 8,5 % на середньому рівні), при зменшенні вмісту вуглецю, молібдену і кобальту майже в 2 рази, при відсутності в складі найбільш дорогого компонента – ренію.

Практична цінність. Розроблений економнолегований жароміцний нікелевий сплав, який не містить у своєму складі дорогого ренію, забезпечує весь необхідний комплекс експлуатаційних властивостей при істотному зниженні вартості, і може бути рекомендований для використання при виготовленні монокристалічних литих лопаток газотурбінних установок наземного базування.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав, лопатка, наземні газотурбінні установки, реній, структурна стабільність, розрахунково-аналітичні методики, збалансованість хімічного складу, короточасна міцність, тривала міцність, стійкість проти високотемпературної корозії.

Стан питання

До найбільш відомих ливарних жароміцних нікелевих сплавів, які широко застосовуються для виготовлення робочих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації в умовах моторобудівних підприємств ПАТ «Мотор Січ» і ГП «Івченко-Прогрес», належать промислові серійні сплави ЖС26-ВІ і ЖС32-ВІ [1, 2].

Відомо, що промисловий ливарний жароміцний некорозійностійкий нікелевий сплав ЖС32-ВІ [1], легований алюмінієм у кількості (5,6...6,3) %, танталом (3,5...4,5) % і ренієм (3,5...4,5) %, за масою, в якому об'ємна частка ($V \gamma'_{20}$) γ' - фази в структурі знаходиться в межах (62...69) %, має значно вищу жароміцність і кращий опір високотемпературної повзучості при 1000 °С,

ніж серійний промисловий ливарний жароміцний нікелевий сплав ЖС26-ВІ [2], легований алюмінієм у кількості (5,5...6,2) %, і титаном (0,8...1,2) %, за масою, та не містить ренію, в якому об'ємна частка ($V \gamma'_{20}$) γ' - фази в структурі знаходиться в межах (58...64) % за масою.

Однак, промисловий сплав ЖС26-ВІ не має задовільної стійкості проти високотемпературної корозії та рівня характеристик жароміцності, що робить його застосування як матеріалу робочих лопаток стаціонарних ГТУ не перспективним. У той же час промисловий сплав ЖС32-ВІ має необхідний рівень характеристик жароміцності і більш-менш задовільний рівень ВТК-стійкості, але при цьому має у своєму складі дуже дорогий реній (4 %), що робить його застосування для наземних стаціонарних ГТУ економічно недоцільним.

Мета досліджень

Основною метою досліджень була розробка оптимального складу нового ливарного жароміцного нікелевого сплаву з використанням комплексної розрахунково-аналітичної методики (КРАМ) [3–5]. Розроблювальний сплав, призначений для виготовлення робочих лопаток зі спрямованою (моно) структурою до наземних газотурбінних установок Д-336 різних модифікацій (Т1, Т2), повинен мати характеристики міцності на рівні авіаційного промислового серійного ливарного жароміцного сплаву ЖС32-ВІ [1], взятого за аналог.

За основу було обрано промисловий ливарний жароміцний нікелевий сплав ЖС26-ВІ [2], взятий за прототип, як найбільш близький за науково-технічною сутністю і очікуваним результатом. Ливарний жароміцний не корозійностійкий нікелевий сплав ЖС26-ВІ до теперішнього часу широко застосовується у вітчизняній промисловості як матеріал для виготовлення робочих лопаток існуючих наземних ГТУ різного призначення, наприклад енергетичних установок типу Д-336.

Методика та актуальність досліджень

Базова система легування сплаву ЖС26-ВІ (Ni-Co-Cr-Al-Ti-Mo-W-Nb-V-B-C) не містить танталу і ренію. Пошук дослідних композицій розроблюваного сплаву проводився в новій системі легування з виключенням зі складу титану, ніобію та ванадію (Ni-Co-Cr-Al-Mo-W-Ta-B-C) при одночасному покроковому варіюванні в дослідних складах вмістом танталу, вольфраму та вуглецю в досліджених межах, що було обумовлено наступними обставинами:

- зниження вмісту вуглецю матиме позитивний вплив на підвищення показників пластичності та покращення характеристик ВТК - стійкості;

- оптимальне легування танталом і вольфрамом разом з алюмінієм підвищить сумарний вміст γ' - утворювальних елементів в складі, що сприятиме збільшенню об'ємної частки ($V \gamma'^{20}$) γ' - фази в структурі, а також зміни її хімічного складу і підвищення температури кінця ($t_{кр.}^{\gamma'}$) розчинення в γ - твердому розчині, а отже, збільшення залишкової об'ємної частки γ' - фази при підвищених температурах, що матиме позитивний вплив на підвищення рівня характеристик міцності і температурної працездатності;

- тантал позитивно впливає на морфологію та термодинамічну стійкість карбідів типу МС, при цьому створює умови для уповільнення процесу утворення менш стійких карбідів типу $M_{23}C_6$, що поліпшить структурну і фазову стабільність;

- тантал сприяє звуженню температурного інтервалу кристалізації ($\Delta t_{кр.}$), в основному за рахунок зниження температури ліквідусу (t_l), що буде позитивно впливати на технологічність сплаву при формуванні бездефектної спрямованої (моно) структури в литих зразках і лопатках.

У зв'язку з вищевикладеним, розробка за алгоритмом методики КРАМ [3–5] оптимального складу ливарного жароміцного сплаву, який не містить в складі ренію і має характеристики жароміцності на рівні промислового сплаву ЖС32-ВІ, який містить реній (4%), за масою, є актуальним і перспективним напрямком для розвитку вітчизняного наземного газотурбобудування. Розробляємий економнолегований сплав, що не містить ренію, призначений для виготовлення литих робочих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації для перспективних стаціонарних ГТУ.

Основний матеріал досліджень

Початковий етап розробки полягав в коригуванні границь легування деяких елементів всередині марочного складу промислового сплаву ЖС26-ВІ [2], що було пов'язано з наступним:

- виключення зі складу титану, ніобію і ванадію сприятиме підвищенню структурної стабільності в коригованому складі сплаву ЖС26-ВІ середнього рівня легування;

- зниження середнього вмісту вольфраму з 11,5% до 9,0% за масою, сприятиме поліпшенню характеристик структурно-фазової стабільності, зменшенню розкиду показників міцності та покращенню показників ВТК- стійкості в коригованому складі сплаву ЖС26-ВІ середнього рівня легування;

- зниження середньої концентрації зернограничних зміцнювачів – бору до 0,010% і вуглецю з до 0,09%, за масою, що сприятиме підвищенню критичних температур в коригованому базовому складі сплаву ЖС26-ВІ середнього рівня легування.

Скоригований склад сплаву ЖС26-ВІ був узятий як базовий, на основі якого далі здійснювався вибір п'яти (1–5) модельних складів (табл. 3) розроблюваного сплаву, що обґрунтовувалося наступним:

- покрокове варіювання вмістом вольфраму від 7,5% до 9,5% і введення танталу в інтервалі від 7,5% до 9,5% за масою з концентраційним кроком 0,5% матиме позитивний вплив на характеристики жароміцності розроблюваного сплаву і показники ВТК- стійкості порівняно з базовим сплавом ЖС26-ВІ, взятим за прототип;

- покрокове зниження вмісту вуглецю в інтервалі від 0,15% до 0,03% за масою з концентраційним кроком 0,03% сприятиме підвищенню критичних температур, стабілізації параметрів ВТК- стійкості, зниження загальної об'ємної частки карбідної фази та поліпшенню її морфології, що матиме позитивний вплив на характеристики пластичності розроблюваного сплаву;

- покрокове введення нового елемента танталу в інтервалі від 7,5% до 9,5% за масою з концентраційним кроком 0,5% сприятиме збільшенню об'ємної частки ($V \gamma'^{20}$) γ' - фази в структурі і зміни її хімічного складу, що підвищить термодинамічну стабільність γ' - фази і її залишкову частку в структурі розроблюваного сплаву в межах температурного діапазону (800...1000 °С);

- визначення оптимального вмісту і границь легування вуглецем, вольфрамом і танталом в складі розроблюваного сплаву забезпечить підвищення жароміцності до рівня промислового сплаву ЖС32-ВІ, поліпшить його технологічність за рахунок звуження температурного інтервалу кристалізації ($\Delta t_{кр}$), що є важливим при формуванні бездефектної структури в зразках і лопатках, отриманих методом спрямованої (моно) кристалізації;

- підхід до оптимізації хімічного складу за багатьма критеріями в новій вибраній системі легування (Ni-Co-Cr-Al-Mo-W-Ta-V-Y-La-C) забезпечить виконання заданих вимог, щодо забезпечення рівня контрольованих параметрів, які були визначені для розроблюваного сплаву (див. табл. 1).

У таблиці 3 представлено дослідні склади (1–5) розроблюваного сплаву, разом зі складами промислових сплавів ЖС32-ВІ і ЖС26-ВІ середнього рівня легування.

Діапазон варіювання елементами в новій обраній системі легування (Ni-Co-Cr-Al-Mo-W-Ta-V-C) розроблюваного сплаву був заданий в наступних досліджуваних межах: вуглець (0,03...0,15)%; вольфрам (7,5...9,5)%; тантал (7,5...9,5) % за масою, при співвідношенні в дослідних складах W/Ta \approx 1,0.

Для дослідних складів (1–5) і промислових сплавів ЖС32-ВІ [1] і ЖС26-ВІ [2], наведених в таблиці 3, були розраховані основні групи параметрів за регресійними моделями, відповідно з алгоритмом методики КРАМ [3–5].

Результати розрахункових параметрів, що були отримані на модельних складах (1–5), порівнювалися з рівнем контрольованих показників. Це дозволило здійснити порівняльну оцінку за заданими критеріями і визначити один оптимальний склад для проведення подальших експериментальних досліджень в промислових умовах.

Таблиця 1 – Хімічний склад дослідних сплавів

Марка сплаву	Середній вміст елементу %, за масою; Ni – основа											
	C	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

Таблиця 2 – Регресійні моделі для розрахунку параметрів структурної стабільності ливарних ЖНС [3–5]

Розрахунковий параметр	Умови стабільності	Коефіцієнт детермінації, R^2	Регресійні моделі для розрахунку параметрів структурної стабільності
$\Pi_{ТЦУ}$	-	-	$\Pi_{ТЦУ} = Cr / (Cr + Mo + W)$
$\bar{N}v_{\gamma}$	$\leq 2,40$	0,9112	$\bar{N}v_{\gamma} = 1,7346 \cdot (\Pi_{ТЦУ}) + 0,7593$
$\bar{M}d_{\gamma}$	$\leq 0,93$	0,9813	$\bar{M}d_{\gamma} = 0,0975 \cdot (\bar{N}v_{\gamma}) + 0,6941$
ΔE [.....]	$0,00 \pm 0,04$	-	$\Delta E = \sum E_i \cdot C_i - 0,036 \cdot \sum A_i \cdot C_i - 6,28$
$\bar{M}d_c$	$0,980 \pm 0,008$	0,9886	$\bar{M}d_c = 0,1879 \cdot (\Delta E) + 0,9803$

Параметри структурної стабільності досліджених складів, розрахованих за регресійними рівняннями методики КРАМ

Відповідно з алгоритмом експрес-методики КРАМ [3–5] за відповідними регресійними моделями (табл. 2) було здійснено порівняльну оцінку структурної стабільності дослідних складів (1–5) за параметрами $\bar{N}v_{\gamma}$, $\bar{M}d_{\gamma}$, $\bar{M}d_c$, ΔE порівняно з цими показниками для промислових сплавів ЖС32-ВІ і ЖС26-ВІ.

Відповідно з ΔE -методом [6, 7], показано, що в складі ливарних ЖНС з великим негативним значенням дисбалансу системи легування ($\Delta E \ll -0,04$) велика ймовірність утворення гетеротипних фаз: карбідів типу M_6C , α -фаз на основі вольфраму (α_w) і молібдену (α_{Mo}), а також ТЦУ фаз типу (σ -, μ -). У той же час сплави з великим позитивним значенням дисбалансу системи легування ($\Delta E \gg +0,04$), схильні до утворення гомеотипних фаз типу η -фази на основі (Ni_3Ti , Ni_3Nb , Ni_3Ta), а також евтектичних (+) (перитектичних) фаз на основі (Ni_3Al). Якщо величина ($\Delta E \rightarrow 0$) близька до нуля, то сплав за хімічним складом вважається ідеально збалансованим. У таблиці 3 представлено результати порівняльної оцінки структурної стабільності дослідних складів (1–5) розроблюваного сплаву, разом з результатами для промислових сплавів ЖС32-ВІ і ЖС26-ВІ. Склади, що задовільняли умовам: $\bar{N}v_{\gamma} \leq 2,40$; $\bar{M}d_{\gamma} \leq 0,93$; $-0,04 \leq \Delta E \leq +0,04$; $0,972 \leq \bar{M}d_c \leq 0,988$, вважалися фазово-стабільними. Розрахунки параметрів структурної стабільності ($\bar{N}v_{\gamma}$, $\bar{M}d_{\gamma}$, ΔE , $\bar{M}d_c$) проводилися в атомн. % за регресійними моделями методики КРАМ [3–5].

Таблиця 3 – Розрахункові значення параметрів структурної стабільності (група 1) досліджених сплавів [3–5]

Марка сплаву	Варіювання елементами, % за масою			Параметри структурної стабільності, розраховані за регресійними моделями методики КРАМ [3–5]			
	С	W	Ta	$\bar{N}v_{\gamma} \leq 2,4$	$\bar{M}d_{\gamma} \leq 0,93$	$\bar{M}d_c \leq 0,98 \pm 0,008$	$\Delta E \leq \pm 0,04$
ЖС32-ВІ	0,15	8,3	4,0	1,8587	0,8753	0,9570	- 0,1238
Склад 1	0,15	7,5	7,5	1,9156	0,8809	0,9899	+0,0512
Склад 2	0,12	8,0	8,0	1,8942	0,8788	0,9836	+0,0174
Склад 3	0,09	8,5	8,5	1,8735	0,8768	0,9771	-0,0171
Склад 4	0,06	9,0	9,0	1,8537	0,8748	0,9705	-0,0522
*Склад 5	0,03	9,5	9,5	1,8345	0,8730	0,9638	-0,0877
ЖС26-ВІ	0,15	11,7	-	1,7332	0,8631	0,9713	-0,0477

Встановлено (див. табл. 3), що дослідні склади 2 і 3 збалансовані з точки зору умов дисбалансу системи легування ($\Delta E = \pm 0,04$). Так, величина (ΔE) для дослідних складів 2 і 3 знаходиться в межах від +0,0174 до -0,0171, що задовольняє умовам збалансованого легування. Відомо [3–5], що структурна і фазова стабільність є необхідною, але недостатньою умовою для досягнення необхідного рівня жароміцності в температурному діапазоні (800...1000 °С), що підтверджено практикою.

Тому дослідний склад 1 ($\Delta E = +0,0512$) і склад 4 ($\Delta E = -0,0522$), а також промисловий сплав ЖС26-ВІ ($\Delta E = -0,0477$), які за розрахунками мають незначну схильність до фазової нестабільності, не виключалися з подальших розрахункових досліджень. Разом з тим, показано, що величина (ΔE) для промислового сплаву ЖС32-ВІ ($\Delta E = -0,1238$) і дослідного складу 5 ($\Delta E = -0,0877$) не задовольняє умовам збалансованого легування ($\Delta E = \pm 0,04$), тому склад 5 був виключений з подальших розрахункових досліджень.

Критичні температури досліджених сплавів, розраховані за регресійними моделями методики КРАМ

Відповідно з алгоритмом методики КРАМ [3–5] за відповідними регресійними моделями (табл. 4) для фа-

зово-стабільних композицій 2 і 3 розроблюваного сплаву, а також дослідних складів 1 і 4 та промислових сплавів ЖС32-ВІ і ЖС26-ВІ були здійснені порівняльні розрахунки критичних температур, що представлено в таблиці 5.

Встановлено (табл. 5), що кращі показники контрольованих критичних температур ($t_s, t'_{к.р.}, \Delta t_{к.р.}, \Delta t_{ГОМ}$), відповідальних за рівень показників жароміцності, а також технологічність при отриманні бездефектної спрямованої (моно) структури в зразках і лопатках, має дослідний склад 4.

Порівняно з дослідними складами 2–4, у яких виконуються всі умови по розробці, у дослідного складу 1 і промислових ливарних жароміцних сплавів ЖС32-ВІ та ЖС26-ВІ (див. табл. 5) не виконується умова ($t'_{к.р.} \geq 1270$ °С), при цьому всі інші умови з розробки виконуються ($t_s \geq 1300$ °С; $\Delta t_{к.р.} \leq 80$ °С; $\Delta t_{ГОМ} \geq 20$ °С).

Порівняльна оцінка корозійної стійкості досліджених складів за величиною «еквівалентного» хрому [Cr]_{ЕКВ}

Відомо [4], що оцінка впливу кожного легувального елемента окремо може бути неадекватною при різних

Таблиця 4 – Регресійні моделі для розрахунку критичних температур ливарних ЖНС [3–5]

Розрахунковий параметр	Одиниця виміру	R^2	Регресійні моделі для розрахунку критичних температур
$\sum C_i^{\gamma}$	%, за масою	-	$\sum C_i^{\gamma} = (Mo+W+Ta+Re+Ru)$
t_L	°С	0,9801	$t_L = 5,5572 \cdot (\sum C_i^{\gamma}) + 1309,3$
t_s	°С	0,9816	$t_s = 8,7819 \cdot (\sum C_i^{\gamma}) + 1189,6$
$\sum C_i^{\gamma'}$	%, за масою	-	$\sum C_i^{\gamma'} = (Al+Ti+Nb+Ta+Hf)$
$t_{ЕВТ}$	°С	0,9563	$t_{ЕВТ} = 16,059 \cdot (\sum C_i^{\gamma'}) + 1101,8$
$t_{к.р.}^{\gamma}$	°С	0,9715	$t_{к.р.}^{\gamma} = 25,073 \cdot (\sum C_i^{\gamma'}) + 955,01$
$t_{п.р.}^{\gamma}$	°С	0,9691	$t_{п.р.}^{\gamma} = 3,0087 \cdot (\sum C_i^{\gamma'}) + 818,49$

Таблиця 5 – Розрахункові результати температурних характеристик досліджених сплавів

Марка сплаву	Температурні характеристики, °С								
	$\sum C_{\gamma}$	t_L	t_s	$\sum C_{\gamma'}$	$t_{ЕВТ}$	$t_{п.р.}^{\gamma}$	$t_{к.р.}^{\gamma}$	$\Delta t_{к.р.}$	$\Delta t_{ГОМ}$
ЖС32-ВІ	17,3	1405,5	1341,5	11,5	1286,5	853,1	1262,2	64,0	24,3
Склад 1	15,7	1396,5	1327,5	13,4	1287,0	858,8	1270,4	69,0	16,6
Склад 2	16,7	1402,1	1336,3	13,9	1295,0	860,3	1273,5	65,8	21,5
Склад 3	17,7	1407,7	1345,0	14,4	1303,0	861,8	1276,1	62,7	26,9
Склад 4	18,7	1413,2	1353,8	14,9	1305,1	863,3	1277,6	59,4	27,5
ЖС26-ВІ	12,8	1380,4	1302,0	8,4	1286,7	843,7	1265,6	78,4	21,1

схемах легування, в зв'язку з чим проводили комплексну оцінку корозійної стійкості. Тому була проведена порівняльна оцінка впливу легувальних елементів на ВТК-стійкість дослідних сплавів у функції «еквівалентного» хрому, де у рівнянні Рентца [4] показано, який потрібен «ефективний» вміст хрому, щоб протистояти ВТК в різних корозійних середовищах.

Відповідно з алгоритмом методики КРАМ [3–5], для фазово-стабільних композицій 2 і 3, та умовно стабільних композицій 1 і 4, а також промислових сплавів ЖС32-ВІ і ЖС26-ВІ була проведена порівняльна оцінка корозійної стійкості досліджених сплавів за «еквівалентним» хромом $[Cr]_{\text{ЕКВ}}$, що наведено в таблиці 6, величину якого розраховували за багатокомпонентним регресійним рівнянням Рентца:

$$[Cr]_{\text{ЕКВ}} = [Cr] + 3,8[Al-5] + 2[W] - 12,5[C] - 1,4[Mo-1]. \quad (1)$$

Встановлено, що промисловий ливарний жароміцний сплав ЖС3 2-ВІ ($[Cr]_{\text{ЕКВ}} = 23,525$), а також дослідний склад 1 ($[Cr]_{\text{ЕКВ}} = 21,965$) і склад 2 ($[Cr]_{\text{ЕКВ}} = 23,340$) мають кращі показники ефективного «еквівалентного» хрому $[Cr]_{\text{ЕКВ}}$, ніж склад 3 ($[Cr]_{\text{ЕКВ}} = 24,715$) і склад 4 ($[Cr]_{\text{ЕКВ}} = 26,090$), але кращі показники, ніж промисло-

вий ливарний жароміцний сплав ЖС26-ВІ ($[Cr]_{\text{ЕКВ}} = 30,185$), у якого цей показник найгірший, що не забезпечує йому необхідний опір до високотемпературної корозії та поверхневу стабільність в цілому (див. табл. 6).

Характеристики міцності досліджених сплавів, розраховані за регресійними моделями методики КРАМ

Відповідно з алгоритмом за регресійними моделями методики КРАМ (табл. 7–9) [3–5] для дослідних складів (1–4), а також промислових сплавів ЖС32-ВІ і ЖС26-ВІ, були здійснені розрахунки об'ємної частки $(V_{\gamma'})\gamma'$ - фази в їх структурі, а також виконані розрахунки границь короткочасної (σ_B^t) і тривалої (σ_T^t) міцності для досліджених температур, що наведено в таблицях 10–12.

Встановлено, що кращі показники границь короткочасної міцності (σ_B^t) за температур 20 °, 800 °, 900 °С має дослідний склад 4, а за температури 1000 °С – дослідний склад 4 і промисловий ливарний жароміцний сплав ЖС32-ВІ (табл. 10).

Таблиця 6 – Результати розрахунків величини ефективного «еквівалентного» хрому $[Cr]_{\text{ЕКВ}}$ досліджених сплавів

Величина $[Cr]_{\text{ЕКВ}}$, % за масою	Марка сплаву					
	ЖС32-ВІ	Склад 1	Склад 2	Склад 3	Склад 4	ЖС26-ВІ
	23,525	21,965	23,340	24,715	26,090	30,185

Таблиця 7 – Регресійні моделі для розрахунку об'ємної частки $(V_{\gamma'})\gamma'$ - фази в структурі ливарних ЖНС за сумарним вмістом γ' - утворюючих елементів в складі [3–5]

Розрах. параметр	Одиниця виміру	R^2	Регресійні моделі для розрахунку об'ємної частки $(V_{\gamma'})\gamma'$ - фази в структурі, % за масою
$\Sigma C_i^{\gamma'}$	%, 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 8 – Регресійні моделі для розрахунку границь короткочасної міцності (σ_B^t) за об'ємною часткою $(V_{\gamma'})\gamma'$ - фази в структурі ЖНС [3–5]

Розрахунковий параметр	Одиниця виміру	R^2	Регресійні моделі для розрахунку границь короткочасної міцності (σ_B^t), МПа
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 9 – Регресійні моделі для розрахунку границь 100- і 1000- годинної тривалої міцності за об'ємною часткою $(V_{\gamma'})\gamma'$ - фази в структурі ЖНС [3–5]

Розрахунковий параметр	Одиниця виміру	R^2	Регресійні моделі для розрахунку границь (σ_{100}^t) і (σ_{1000}^t) годинної тривалої міцності, МПа
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	$\sigma_{1000}^{1000} = 5,3733 \cdot (V_{\gamma'}^{1000}) - 141,95$

Таблиця 10 – Розрахункові значення границь короткочасної (σ_B) міцності за температур 20 °, 800 °, 900 ° і 1000 °С для досліджених сплавів

Марка сплаву	Границі короткочасної (σ_B) міцності, МПа							
	$V_{\gamma, 20}$	σ_B^{20}	$V_{\gamma, 800}$	σ_B^{800}	$V_{\gamma, 900}$	σ_B^{900}	$V_{\gamma, 1000}$	σ_B^{1000}
ЖС32-ВІ	*67,8	*1238,8	*65,0	*1129,6	*59,9	*1021,4	*50,5	*750,8
РМ	62,0	1185,9	61,7	1113,7	57,2	994,1	49,5	709,7
Склад 1	*72,9	*1109,1	*68,7	*1081,9	*62,6	*984,3	*53,0	*696,0
РМ	65,8	1165,4	64,9	1041,3	61,1	945,7	55,4	662,6
Склад 2	*75,2	*1214,5	*71,2	*1054,0	*65,7	*990,1	*56,7	*715,4
РМ	66,9	1184,3	65,3	1044,0	61,7	953,6	56,6	673,4
Склад 3	*76,8	*1222,7	*73,1	*1063,7	*68,4	*987,4	*60,3	*732,8
РМ	68,0	1202,3	65,4	1044,9	62,1	959,1	57,6	682,9
Склад 4	*78,0	*1231,8	*74,2	*1089,3	*70,1	*991,3	*63,9	*746,7
РМ	69,0	1219,4	65,3	1053,9	62,3	962,3	58,5	691,0
ЖС26-ВІ	*66,7	*943,7	*63,8	*979,2	*62,5	*753,9	*54,4	*547,5
РМ	61,7	929,8	59,5	910,7	55,4	736,4	45,5	483,3

Таблиця 11 – Розрахункові значення границь (σ_{100}) тривалої міцності за температур 800 °, 900 ° і 1000 °С для досліджених сплавів

Марка сплаву	Границі (σ_{100}) - годинної тривалої міцності, МПа					
	$V_{\gamma, 800}$	σ_{100}^{800}	$V_{\gamma, 900}$	σ_{100}^{900}	$V_{\gamma, 1000}$	σ_{100}^{1000}
ЖС32-ВІ	*65,0	*725,0	*59,9	*459,0	*50,5	*230,0
РМ	61,7	695,6	57,2	441,6	49,5	225,9
Склад 1	*68,7	*660,0	*62,6	*400,0	*53,0	*190,0
РМ	64,9	667,8	61,1	418,2	55,4	259,4
Склад 2	*71,2	*680,0	*65,7	*420,0	*56,7	*200,0
РМ	65,3	670,5	61,7	423,8	56,6	206,2
Склад 3	*73,1	*700,0	*68,4	*440,0	*60,3	*210,0
РМ	65,4	671,4	62,1	427,7	57,6	212,3
Склад 4	*74,2	*720,0	*70,1	*450,0	*63,9	*225,0
РМ	65,3	670,4	62,3	440,0	58,5	217,5
ЖС26-ВІ	*66,7	*600,0	*62,5	*380,0	*54,4	*190,0
РМ	61,7	578,9	55,4	369,7	45,5	185,7

Таблиця 12 – Розрахункові значення границь (σ_{1000}) тривалої міцності за температур 800 °, 900 ° і 1000 °С для досліджених сплавів

Марка сплаву	Границі (σ_{1000}) - годинної тривалої міцності, МПа					
	$V_{\gamma, 800}$	σ_{1000}^{800}	$V_{\gamma, 900}$	σ_{1000}^{900}	$V_{\gamma, 1000}$	σ_{1000}^{1000}
ЖС32-ВІ	*65,0	*600,0	*59,9	*355,0	*50,5	*150,0
РМ	61,7	589,6	57,2	346,8	49,5	144,0
Склад 1	*68,7	*540,0	*62,6	*290,0	*53,0	*100,0
РМ	64,9	524,9	61,1	313,9	55,4	115,5
Склад 2	*71,2	*560,0	*65,7	*307,0	*56,7	*110,0
РМ	65,3	547,5	61,7	329,6	56,6	122,0
Склад 3	*73,1	*580,0	*68,4	*330,0	*60,3	*125,0
РМ	65,4	568,3	62,1	363,6	57,6	137,7
Склад 4	*74,2	*590,0	*70,1	*350,0	*63,9	*145,0
РМ	65,3	577,4	62,3	345,8	58,5	142,6
ЖС26-ВІ	*66,7	*510,0	*62,5	*240,0	*54,4	*90,0
РМ	61,7	494,9	55,4	223,4	45,5	80,5

Примітка до таблиць 10–12: у рядках під «*» наведено дані розрахунків з використанням програми JMatPro, а у рядках нижче наведено дані розрахунків за відповідними групами регресійних моделей методики КРАМ [3–5].

Таблиця 13 – Хімічний склад розробленого сплаву ЗМІ-М5 для спрямованої (моно) кристалізації відповідно з ТУ 1-92-177-91

Рівень легування	Вміст елементу, % за масою; Ni – основа							
	C	Cr	Co	Al	Mo	W	Ta	B
Мінімальний	0,09	4,5	5,0	5,7	0,4	8,5	8,5	0,005
Середній	0,06	5,0	5,5	6,0	0,7	9,0	9,0	0,010
Максимальний	0,03	5,5	6,0	6,3	1,0	9,5	9,5	0,015
Границі (ЛЕ)	±0,3	±0,5	±0,5	±0,3	±0,3	±0,5	±0,5	±0,005

Встановлено, що близький рівень показників границь 100- і 1000-годинної тривалої міцності (σ_t') за температур 800°, 900° і 1000 °С мають дослідний склад і промисловий ливарний жароміцний сплав ЖС32-ВІ (табл. 11, 12).

Екстраполяція значень довговічності ($\tau_{руйн.}$) для умов випробування ($\tau_{300}^{975} \geq 40$ годин) показала, що кращі розрахункові показники середнього часу до руйнування зразків у дослідного складу 4, що становить ($\tau_{руйн.} = 45,4$ години) і зразків промислового сплаву ЖС32-ВІ – ($\tau_{руйн.} = 66,3$ години), що задовільняє умовам розробки, в порівнянні із зразками промислового сплаву ЖС26-ВІ ($\tau_{руйн.} = 18,4$ години).

У процесі оптимізації складу розроблюваного сплаву за заданими критеріями було показано, що структурна стабільність є важливою характеристикою, але ще недостатньою умовою для забезпечення необхідного рівня жароміцності в температурному діапазоні (800...1000 °С).

За алгоритмом, відповідно за групами регресійних рівнянь методики КРАМ [3–5], поетапно були виконані порівняльні розрахунки для досліджених сплавів за групами заданих характеристик. Це дозволило шляхом порівняльної оцінки за заданими критеріями визначити оптимальний склад 4, який задовільняє всім контрольованим характеристикам, відповідно з вихідними умовами розробки. Таким чином, за заданими критеріями для подальших експериментальних досліджень було обрано оптимальний склад 4, який було прийнято за середній рівень легування, з присвоєнням йому марки ЗМІ-М5.

У таблиці 13 наведено оптимальний склад розробленого сплаву ЗМІ-М5, із зазначенням середнього вмісту основних легувальних елементів та їх граничними допусками, відповідно до нормативів тимчасових ТУ.

Висновки

У результаті комплексних розрахункових досліджень з розробки оптимального складу нового вітчизняного ливарного жароміцного нікелевого сплаву марки ЗМІ-М5, призначеного для виготовлення робочих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації для стаціонарних газотурбінних установок, вперше було встановлено наступне: $\bar{N}v_\gamma, \bar{M}d_\gamma, \bar{M}d_c$,

- отримано показники структурної стабільності відповідно з вихідними умовами розробки ($\bar{N}v_\gamma \leq 2,40$; $\bar{M}d_\gamma \leq 0,93$; $\Delta E = 0,00 \pm 0,04$; $\bar{M}d_c = 0,980 \pm 0,008$), що враховують збалансованість системи легування: $\bar{N}v_\gamma = 1,8537$; $\bar{M}d_\gamma = 0,8748$; $\Delta E = -0,0522$; $\bar{M}d_c = 0,9705$, які забезпечують задовільну структурну та фазову стабільність розробленого безренієвого сплаву ЗМІ-М5;

- отримано температурні показники відповідно з вихідними умовами розробки ($t_s \geq 1300$ °С; $t'_{к.р.} \geq 1270$ °С;

$\Delta t_{к.р.} \leq 80$ °С; $\Delta t_{ТОМ} \geq 20$ °С), які відповідають величинам температур: солідус ($t_s = 1353,8$ °С); температура кінця ($t'_{к.р.} = 1277,6$ °С) розчинення γ' - фази; температурний інтервал кристалізації ($\Delta t_{к.р.} = 59,4$ °С); температурний інтервал для проведення гомогенізації, обробки на - твердий розчин ($\Delta t_{ТОМ} = 27,5$ °С), що забезпечує оптимальний мікроструктурний стан і показники механічних властивостей розробленого безренієвого ливарного жароміцного сплаву ЗМІ-М5 на рівні промислового серійного сплаву ЖС32-ВІ, який містить реній (4 %), за масою;

- за рахунок забезпечення виділення в структурі розробленого сплаву ЗМІ-М5 об'ємної частки ($V_{\gamma',20}$) γ' - фази в межах (69,0...78,0) %, за масою, а також забезпечення показника місфіт-фактора в межах ($\delta = 0,398 - 0,450$ %) було досягнуто рівень показників міцності: границя короточасної міцності в межах ($\sigma_B^{20} = 1219,0...1231,8$) МПа і показників середньої довговічності зразків ($\tau_{300}^{975} = 45,4$ години), відповідно з вихідними вимогами до розробки ($V_{\gamma',20}$ і 60 %; $\delta = 0,25...0,45$ %; σ_B^{20} і 900 МПа; τ_{300}^{975} і 40 годин) та нормативами ТУ 1-92-177-91;

- за рахунок забезпечення показника ефективного «еквівалентного» хрому $[Cr]_{ЕКВ} < 30$ %, була досягнута корозійна стійкість розробленого безренієвого нікелевого сплаву ЗМІ-М5 на рівні близькому до серійного промислового жароміцного сплаву ЖС32-ВІ, що містить в складі реній;

- за оптимальними показниками комплексу властивостей для подальших експериментальних досліджень було обрано дослідний склад 4, який не містить ренію, з присвоєнням йому марки ЗМІ-М5, призначений для виготовлення робочих лопаток методом спрямованої (моно) кристалізації для наземних газотурбінних установок, з метою заміни промислового сплаву ЖС32-ВІ, що містить в складі дорогої реній.

Список літератури

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) / Е. Н. Каблов. – Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Государственный научный центр Российской Федерации. – М. : МИСИС, 2001. – 632 с.

2. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Р. Е. Шалин, И. Л. Светлов, Е. Б. Качанов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1997. – 336 с.

3. Гайдук С. В. Наукові основи проектування ливарних жароміцних нікелевих сплавів з необхідним комплексом службових властивостей / С. В. Гайдук, С. Б. Беліков. – Запоріжжя : ЗНГУ, 2017. – 80 с. – ISBN : 978-617-529-160-3.

4. 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.

5. 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(126). – С. 44–51.
6. Морозова, Г. И. Сбалансированное легирование жаропрочных никелевых сплавов / Г. И. Морозова // Металлы. – 1993. – № 1. – С. 38–41.
7. Морозова Г. И. Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов / Г. И. Морозова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – №12. – С. 52–56.

Одержано 31.01.2019

Гайдук С.В., Милонин Е.В., Наумик В.В. Оптимизация состава литейного жаропрочного никелевого сплава для изготовления литых рабочих лопаток методом направленной (моно) кристаллизации для перспективных газовых турбин

Цель работы. Разработка состава жаропрочного никелевого сплава, не содержащего рений, для изготовления литых рабочих лопаток методом направленной (моно) кристаллизации. Сплав должен обладать повышенной структурной стабильностью, при сохранении уровня механических, антикоррозионных и жаропрочных свойств и значительном снижении стоимости.

Методы исследования. Для оценки структурной и фазовой стабильности жаропрочных никелевых сплавов применяли различные расчётные методы: « ΔE - метод» оценки сбалансированности химического состава сплавов по величине параметра дисбаланса системы легирования; методы PHACOMP и New PHACOMP – по химическому составу γ - твердых растворов; разработанную в ЗНТУ комплексную методику, устанавливающую взаимосвязь между различными параметрами структурной стабильности.

Полученные результаты. Расчётно-аналитическими методами разработан состав нового экономнолегированного жаропрочного никелевого сплава для изготовления литых лопаток методом направленной (моно) кристаллизации, который не содержит в своем составе дорогостоящего импортного рения.

Научная новизна. С использованием расчётно-аналитических методов разработан состав жаропрочного никелевого сплава с повышенной структурной стабильностью, стойкостью против высокотемпературной коррозии и жаропрочными свойствами необходимыми для литых монокристаллических изделий.

Улучшение структурной стабильности и повышения комплекса свойств разработанного сплава обеспечивается за счет сбалансированного легирования танталом и вольфрамом (по 8,5 % на среднем уровне), при уменьшении содержания углерода, молибдена и кобальта почти в 2 раза, при отсутствии в составе наиболее дорогостоящего компонента – рения.

Практическая ценность. Разработанный экономнолегированный жаропрочный никелевый сплав, не содержащий в своём составе дорогостоящего рения, обеспечивает весь необходимый комплекс эксплуатационных свойств, при существенном снижении стоимости, и может быть рекомендован для использования при изготовлении монокристаллических литых лопаток газотурбинных установок наземного базирования.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, лопатка, наземные газотурбинные установки, рений, структурная стабильность, расчётно-аналитические методики, сбалансированность химического состава, кратковременная прочность, длительная прочность, стойкость против высокотемпературной коррозии.

Gaiduk S., Milonin Ye., Naumik V. Optimization of the composition of the foundry heat-resistant nickel alloy for the manufacture of cast working blades using the method of (mono) crystallization for promising gas turbines

Purpose. Development of the composition of a heat-resistant nickel alloy not containing rhenium for the manufacture of cast working blades by the method of directional (mono) crystallization. The alloy should have increased structural stability, while maintaining the level of mechanical, anti-corrosion and heat-resistant properties and a significant reduction in cost.

Research methods. To estimate the structural and phase stability of high-temperature nickel alloys, various calculation methods were used: « ΔE -method» for assessing the balance of the chemical composition of the alloys by the value of the unbalance parameter of the doping system; PHACOMP and New PHACOMP – on the chemical composition of γ - solid solutions; developed in ZNTU complex methodology that establishes the relationship between the various parameters of structural stability.

Results. Computing-analytical methods have been used to develop the composition of an economically-alloyed heat-resistant nickel alloy for the manufacture of cast blades by the method of directional (mono) crystallization, which does not contain expensive imported rhenium.

Scientific novelty. Using computational and analytical methods, a composition of a heat-resistant nickel alloy with increased structural stability, resistance to high-temperature corrosion, and heat-resistant properties necessary for cast single-crystal products has been developed.

Improvement of structural stability and improvement of the complex of properties of the developed alloy is provided by balanced doping with tantalum and tungsten (8.5 % at an average level), at reducing the content of carbon, molybdenum and cobalt by almost 2 times, and absence of the most expensive component in the composition – rhenium.

Practical value. The developed economically-alloyed heat-resistant nickel alloy, which does not contain expensive rhenium, provides all the necessary operational properties, with a significant reduction in cost, and can be recommended for use in the manufacture of single-crystal cast blades of land-based gas turbine units.

Key words: nickel-base superalloy, blade, ground gas turbine units, rhenium, structural stability, computational and analytical methods, chemical composition balance, short-term strength, long-term strength, resistance to high-temperature corrosion.
