

Ю. Г. Квасницька, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,

e-mail: kvasnytska@ptima.kiev.ua

М. І. Тарасевич, д-р техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу,

e-mail: nit@ptima.kiev.ua

І. І. Максютя, канд. техн. наук, ст. наук. співр.

О. О. Токарева, гол. електронник

О. В. Михнян, канд. техн. наук, ст. наук. співр., *e-mail: mixnyan@ukr.net*

Г. П. Мьяльніца*, канд. техн. наук, заст. гол. металурга

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*ДП НВКГ «Зоря»–«Машпроект», Миколаїв

ВИКОРИСТАННЯ РОЗРАХУНКОВИХ МЕТОДИК ПРИ СТВОРЕННІ НОВИХ ЛЕГУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Питання створення нових жароміцних корозійностійких сплавів для лопаток стаціонарних і транспортних турбін та технології їх отримання стосуються актуальних проблем галузі вітчизняного машинобудування. В статті представлено результати проведених досліджень, пов'язаних з оптимізацією легуючого комплексу на базі серійного жароміцного корозійностійкого сплаву типу ХН60КВТЮМ. До основних компонентів багатокомпонентного сплаву на Ni–Co–Cr-аустенітній основі з карбідним та інтерметалідним типом зміцнення за рахунок утворення дисперсних часток так званої γ' -фази автори додають тугоплавкі елементи тантал та реній. Згідно експериментальних досліджень, вони є елементами, які завдяки їх фізико-хімічним характеристикам мають властивості як ефективних зміцнювачів аустенітного твердого розчину (реній), так і активних утворювачів карбідної і γ' -фази (тантал). Застосування розрахункових методик з отриманням лінійних регресійних рівнянь та комп'ютерних програм для оптимізації співвідношення кількісного складу елементів, поряд з класичним металофізичним відбором зразків проведенням експериментальних плавок, дало змогу прогнозувати рівень експлуатаційних характеристик та оцінювати фазово-структурну стабільність матеріалу в процесі довготривалої експлуатації лопаток турбін. З метою мінімізації кількості дослідів використано метод факторного експерименту та отримано лінійні повні моделі. Таким чином, лінійний регресійний аналіз показав якісний вплив елементів, які розглядаються, і підтвердив дані літературного огляду. Поряд з використанням методики розрахунків за лінійним регресійним аналізом проведено також оптимізацію системи легування згідно методики прогнозування структурної стабільності за допомогою комп'ютерних програм за методом PHACOMP і комп'ютерної програми SPACE. При застосуванні цієї програми враховувались дані про кінетику виділення крихких фаз в залежності від часу та температури експлуатації литих лопаток, особливості структурних перетворень в процесі їх довготривалої експлуатації. Методика, яка була апробована раніше на промислових марках сплавів ЧС70-ВІ, ЧС88У-ВІ, ЧС-104, дала змогу значно скоротити як період розробки нового дослідного сплаву на базі марки СМ-88У, додатково легованого танталом та ренієм, так і значно обмежити необхідні обсяги експериментальних досліджень.

Ключові слова: нікелеві жароміцні сплави, реній, тантал, лопатка ГТД, структурна стабільність сплаву.

При виборі жароміцних сплавів для виготовлення та надійної експлуатації в екстремальних умовах таких литих деталей, як робочі лопатки газотурбодвигунів (ГТД), необхідно визначитися з головними критеріями, за якими проводиться оцінювання нових матеріалів. Згідно проведеному науково-патентному аналізу та з урахуванням зазначеного сертифікаційними документами рівня основних експлуатаційних характеристик конкретного типу агрегату, авторами в якості основних критеріїв були обрані жароміцність, корозійна стійкість, фазово-структурна стабільність і технологічні властивості сплаву.

За базовий склад хімічних компонентів нового сплаву, що розроблено, був обраний сертифікований жароміцний сплав CM88Y [1], в легуючий комплекс якого додатково вводили тугоплавкі елементи. Згідно літературних даних і експериментальних досліджень авторів [2, 3], вони є елементами, які ефективно зміцнюють аустенітний твердий розчин γ -фази (реній) і активно сприяють утворенню карбідної і γ' -фази (тантал), що призводить до підвищення жароміцності. Висока температура плавлення, збільшений у порівнянні з нікелем атомний радіус та вплив на фазово-структурні перетворення при введенні цих елементів у сплави, сприяє суттєвому збільшенню жароміцності. Слід зазначити, що в сплавах, що містять реній і тантал та інші тугоплавкі елементи (хром, титан, молібден, вольфрам, ніобій), в умовах експлуатації може спостерігатися утворення окрихчучих топологічно щільноупакованих фаз (ТЩУ-фаз), що негативно впливають на рівень жароміцності. Виходячи з цього, фазово-структурна стабільність матеріалу буде визначатися як загальним сумарним вмістом тугоплавких елементів легуючого комплексу, так і їх співвідношенням [2–4]. При комплексному легуванні композиції тугоплавкими металами слід враховувати також їх коефіцієнти ліквідації, особливо при отриманні сплавів з орієнтованою структурою. Так, введення до складу сплаву елементів, що підвищують різницю щільності основного розплаву і ліквату (Al, Ti, Nb та ін.) та тугоплавких елементів (W, Re, Mo та ін.) може сприяти утворенню поверхневих дефектів ліквідаційного походження в процесі спрямованої кристалізації, особливо при відносно низьких швидкостях кристалізації.

Слід зауважити, що значно знижувати вміст або виключати з метою недопущення виділення ТЩУ-фаз такі елементи, як молібден, вольфрам, ніобій нераціонально, так як кожен з них контролює певною мірою фазово-структурні процеси. Так, молібден, будучи зміцнювачем твердого розчину, вносить істотний внесок у зміну параметра ґратки γ -твердого розчину і, як наслідок, морфологію зміцнюючої вторинної γ' -фази, роблячи її кубічною, і цим сприяючи високому опору повзучості жароміцних сплавів [4].

З усіх елементів легуючого комплексу, що входять в жароміцні сплави розглянутого типу, найбільшу розчинність в γ -фазі і найменшу в γ' -фазі має реній, у якого коефіцієнт розподілу легуючих елементів між γ' - і γ -фазами $K / K_c = 0,1$ [5].

Емпірично доведено, що підвищення концентрації легуючих елементів з великими атомними радіусами надає більш істотний вплив на зміну параметра решітки γ -фази, ніж γ' -фази, причому, оскільки реній і тантал мають атомний радіус більший, ніж нікель (співвідношення для ренію 1,063), вони позитивно впливають на невідповідність періодів кристалічних решіток γ - і γ' -фаз (так званий місфіт $-\Delta a_{\gamma-\gamma'} = (a_{\gamma} - a_{\gamma'})/a_{\gamma}$), що є визначальним чинником тривалої міцності полі- і монокристалів жароміцних сплавів при високих температурах. Володіючи найменшим коефіцієнтом дифузії в нікелі, реній також гальмує процеси коагуляції зміцнюючої γ' -фази, тим самим підвищуючи її термічну стабільність. Крім того, і реній, і тантал сприяють підвищенню температури розчинення γ' -фази і температури солідус, що звужує інтервал кристалізації і, як правило, позитивно позначається на жароміцності, особливо в стані спрямованої кристалізації (СК) [5–7].

Слід особливо відзначити, що введення в сплав ренію і танталу дає можливість для підвищення довготривалої міцності знизити вміст хрому, оскільки ці елементи підвищують опір високотемпературній сольовій корозії як визначального параметру жароміцного корозійностійкого сплаву [6].

Аналіз патентної та науково-технічної літератури дозволив здійснити первинне доекспериментальне ранжування легуючих елементів згідно із ступенем їх впливу на комплекс фізико-механічних властивостей (міцність, пластичність, твердість) сплавів. Для встановлення функціональних взаємозв'язків «склад сплаву – властивості» на базі літературних та експериментальних досліджень було використано створений банк даних, який містить хімічний склад, властивості та технологічні особливості одержання та обробки серійних та експериментальних сплавів, що виробляються як за кордоном, так і вітчизняними підприємствами.

Виходячи з вищезазначеного, метою представленої роботи було проведення

вибору складу легуючих елементів сплаву типу СМ88У [1] додатковим введенням ренію і танталу для підвищення структурної стабільності сплаву в цілому за рахунок зменшення дифузійного проникнення елементів та підтримання високої стійкості до високотемпературної корозії завдяки формуванню більш стійкої окалини.

Для розрахунків складу легуючих елементів жароміцних корозійностійких сплавів для ГТД був застосований попередній досвід розробки сплавів [2, 3]. При цьому використано багатofакторну схему проведення експериментів, згідно з якою ефективність впливу будь-якого фактору (кількість введеного додатково легуючого елементу) визначається згідно з результатами усіх дослідів, тобто оцінюється комплексно. Визначено основний склад композиції з таким складом інгредієнтів на основі марки СМ88У (%мас.): Ni (осн.) – 0,05 С–12,75 Cr–3,5 Al–2,05 Ti–7,15 Co–1,15 Mo–6,3 W–0,3 Nb–0,04 Zr–0,5 Fe. На першому етапі під час оптимізації за базовий (основний) склад з незмінною кількістю інгредієнтів взято композицію, в яку, з метою підвищення експлуатаційних характеристик, вводили реній.

На етапі відбору найбільш перспективних систем легування поряд з класичним металофізичним підходом до вибору оптимального складу було проведено вивчення окремого впливу елемента на основний базовий комплекс з застосуванням лінійного регресійного аналізу [8]. В якості параметрів оптимізації вибрано експериментально визначені: об'ємний вміст зміцнюючої γ' -фази та швидкість корозії, яка визначена в експериментальному розчині 75 % Na₂SO₄ + 25 % NaCl при температурі 900 °С протягом 100 год.

При побудові регресійних моделей були прийняті наступні означення: X1 – вміст вуглецю; X2 – вміст хрому; X3 – вміст титану; X4 – вміст ренію; Y1 – корозійна стійкість (втрата маси); Y2 – швидкість корозії; Y3 – об'ємний вміст γ' -фази (табл. 1).

Таблица 1
Вихідні параметри для отримання лінійних регресійних рівнянь

Варіант	Вміст елементів, %мас.				Характеристики сплаву	
	С	Cr	Ti	Re	Показник швидкості корозії LgcorrosRate (СМ88У = 0,115)	γ' , %ат.
	X1	X2	X3	X4	Y1	Y2
1	0,03	12,4	2,4	3,8	-0,24	52
2	0,10	12,4	2,4	3,5	-0,30	51
3	0,10	10,0	2,4	4,1	-0,14	49
4	0,10	11,0	2,4	4,0	-0,34	52
5	0,10	10,0	2,4	3,9	-0,40	54
6	0,10	10,0	3,2	4,1	-0,30	57
7	0,10	10,0	3,0	3,5	-0,37	56

Обробка даних табл. 1 дозволила одержати наступні лінійні моделі:

$$Y1 = 1,52 - 0,0376815 \cdot Cr - 0,219755 \cdot Ti - 0,185562 \cdot Re \quad (1)$$

$$R^2 = 97,9276 \%$$

$$Y2 = 16,7844 - 39,5125 \cdot C + 9,47215 \cdot Ti + 3,33362 \cdot Re \quad (2)$$

$$R^2 = 99,1566 \%$$

Вважаючи на відсутність достовірної варіації незалежних параметрів, за рівнянням першого порядку можна оцінити тільки якісний вплив масового вмісту елементів на вибрані характеристики сплаву. Так, на корозійні властивості (Y1) найбільше впливає хром, при збільшенні вмісту хрому цей показник зменшується, тобто підвищуються

корозійні властивості сплаву. Виходячи з рівняння (1), реній також позитивно впливає на корозійні властивості дослідного сплаву. Реній і титан позитивно впливають на кількість зміцнюючої γ' -фази (Y_2), при збільшенні їх вмісту у сплаві об'єм γ' -фази збільшується. З рівнянь видно, що вуглець знижує кількість γ' -фази. Це підтверджує аналіз літератури та досвід попередніх досліджень, так як вуглець вводиться у ЖС для зміцнення границь зерен (утворення карбідів). Вплив вуглецю на корозійну стійкість сплаву практично не спостерігається.

Таким чином, лінійний регресійний аналіз показав якісний вплив елементів, які розглядаються, і підтвердив дані літературного огляду [4–6].

Практика використання нікелевих жароміцних сплавів для литих деталей ГТД показала, що важливим параметром забезпечення їх підвищених міцнісних та пластичних характеристик є стабільність фазового складу в процесі заданого часу роботи. Тому оцінку структурної стабільності відповідальних деталей ГТД та прогнозування утворення в них крихких фаз (топологічно щільноупакованих (ТЩУ) фаз: σ -; μ -фази) необхідно проводити на стадії розробки нових композицій [9–11].

При цьому необхідно врахувати загальні напрямки легування нікелевих сплавів, які володіють високою корозійною стійкістю та жароміцністю. Тому в даній роботі поряд з використанням методики розрахунків за лінійним регресійним аналізом проведена також оптимізація системи легування по методиці прогнозування структурної стабільності за допомогою методу PHACOMP [10, 11].

Цей метод отримав найбільш широке розповсюдження для оцінки фазової стабільності жароміцних сплавів розглянутого класу, тому що заснований на практичному використанні відомого ефекту: σ -фаза є інтерметалідною сполукою і утворюється з аустенітної матриці в інтервалі хімічного складу сплавів, що характеризуються визначеними значеннями концентрацій електронних вакансій N_v (число електронних вакансій матриці за вирахуванням частки елементів, які входять в карбіди та бориди). Розрахунок N_v для забезпечення структурної стабільності ЖС проводився, виходячи з його хімічного складу. Розрахунок N_v , визначений за допомогою рівнянь, які закладені в комп'ютерну програму, враховує як вплив нових легуючих елементів, особливості структурних перетворень в процесі експлуатації виробів з ЖС, так і кінетику виділення крихких фаз в залежності від часу та температури [9–11].

Визначення концентрації електронних вакансій потребує встановлення фаз, які утворюються в сплавах, також послідовності, в якій вони формуються в γ -матриці. Послідовність така: утворення боридів ($\text{Mo}_{0,5}\text{Ti}_{0,15}\text{Cr}_{0,25}\text{Ni}_{0,1}\text{B}_2$), утворення карбідів (монокарбідів ZrC , HfC , TaC , NbC , TiC ; комплексних карбідів Me_6C , Me_{23}C_6) та утворення зміцнюючої γ' -фази ($\text{Ni}_{0,88}\text{Co}_{0,08}\text{Cr}_{0,04}$)₃ (Al , Ti , Ta , Nb , Hf , V). Після розгляду цих реакцій визначають склад залишкової матриці. Він дозволяє розрахувати число електронних вакансій.

Після цього, для досягнення необхідного рівня жароміцності в розрахунках враховували кількість легуючих елементів, які формують загальний обсяг γ' -фази (об'єм за %мас.), а також корегували склад тугоплавких елементів з коефіцієнтом розподілу $\kappa_{\text{эф}} > 1$.

З розрахунків складу γ -матриці дослідного сплаву після тривалої роботи матеріалу (≥ 500 – 5000 год) визначають значення середнього числа електронних вакансій N_v . При цьому приймають, що кожний елемент, який входить в аустенітну матрицю, характеризується своїм постійним значенням N_{vi} , а сплав після тривалого старіння знаходиться у стані рівноваги і всі очікувані в ньому фази утворилися, а N_v є лінійною функцією складу матриці. Блок-схему алгоритму розрахунків за методом PHACOMP представлено в роботі [12].

Розрахунки проводили в два етапи: знаходили склади зміцнюючих фаз (γ' -фази, карбідів, боридів) з подальшим їх відніманням від загального складу сплаву з метою визначення складу залишкового аустеніту (γ); знаходили середню кількість електронних вакансій для твердого розчину N_v , враховуючи склад залишкового аустеніту.

Використовували наступний порядок розрахунку складу наявних фаз, враховуючи фізико-хімічні процеси утворення фаз та визначаючи склад сплаву в атомних

відсотках: до концентрації алюмінію, титану, ніобію, вольфраму, танталу, ренію (сумарно), що залишилися після виділення карбідів, додаємо хром, вміст якого становить ~ 3 % в атомних відсотках; з урахуванням потрібної кількості нікелю це призводить до утворення γ' -фази – $Ni_3(Al, Nb, Ti, Cr)$; потім визначається загальна сума з подальшим відніманням від повного складу сплаву. Остаточний склад аустеніту (матриці) приймається за 100 %; отриманий склад матриці використовується для розрахунку середньої кількості електронних вакансій згідно формули:

$$N_{v\text{сер.}} = \sum_{i=1}^n m_i (N_v)_i,$$

де $N_{v\text{сер.}}$ – середня кількість електронних вакансій для сплаву; m_i – атомна частка даного елемента; N_v – кількість електронних вакансій даного елемента; n – число елементів в матриці.

Для жароміцних корозійностійких сплавів показник схильності до утворення σ -фази $N_{v\text{сер.}}$ не повинен перевищувати 2,4 [13].

Слід зазначити, що світовими виробниками і дослідниками жароміцних сплавів розроблено комп'ютерні програми, які дозволяють отримати дані, що зв'язують хімічний склад ЖС, параметри структури з фізико-механічними властивостями та службовими характеристиками [13–15]. Розробка сплавів за допомогою таких розрахунків дозволяє з мінімальними затратами визначити граничний рівень легуючих елементів для заданого рівня експлуатаційних характеристик жароміцних сплавів. Тобто не потрібно проводити дорогі експерименти по виплавці декількох композицій, дослідження їх фізико-механічних властивостей, в тому числі випробування тривалої міцності протягом 10000 год.

У даній роботі для визначення критичних температур та властивостей дослідних сплавів було використано програму розрахунку SPACE (version 4) (Superalloy Phase Analysis Computation Engineering) [15]. Забезпечення рівня корозійної стійкості визначали за допомогою можливих корозійних втрат з урахуванням впливу всіх легуючих елементів. Було взято п'ять складів дослідних сплавів. Для достовірності та порівняння одержаних результатів їх зіставляли з розрахунками відомого сплаву CM88Y (табл. 2).

Таблица 2

Хімічний склад запропонованого жароміцного сплаву

Основні компоненти	Хімічний склад, %мас.					
	Аналог	Запропонований жароміцний сплав				
		CM88Y	1	2	3	4
C	0,07	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05
Cr	15,8	12,75	12,75	12,75	12,30	12,75
Co	11,7	7,15	7,15	7,15	7,15	7,15
Mo	1,96	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15
W	5,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30
Al	3,00	3,25	3,25	3,25	3,25	3,25
Ti	4,60	2,20	3,60	2,05	2,05	2,05
Nb	0,15	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Hf	0,3	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Ta	–	2,75	2,75	3,30	2,75	3,30
Re	–	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
B	0,09	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

В табл. 3 наведено основні характеристики сплавів, які одержано в результаті розрахунків. Видно, що для всіх дослідних сплавів показник $N_{\text{сер}} < 2,4$. Це означає, що сплави, які досліджувались, не схильні до утворення σ -фази, яка негативно впливає на структурну стабільність жароміцних сплавів.

Таблиця 3

Характеристики дослідних сплавів

Характеристики сплаву	1	2	3	4	5	CM88Y
Кількість електронних вакансій, $N_{\text{сер}}$	2,27	2,29	2,32	2,27	2,30	2,35
Об'єм γ' -фази у структурі сплаву, %	45,6	50,2	45,5	45,3	44,3	43,2
Температура розчинення γ' -фази	1201	1130	1199	1180	1152	1203
Температура ліквідус, T_L , °C	1388	1369	1388	1393	1389	1358
Температура солідус, T_S , °C	1309	1284	1310	1318	1310	1258
Тривала міцність сплаву, МПа, при 900 °C протягом 100 год, який одержано:	-	-	-	-	-	-
рівноосною кристалізацією	306	291	306	306	302	275
спрямованою кристалізацією	326	323	328	329	321	294
Корозійна стійкість за показником втрати маси LgMetalloss	- 1,608	- 1,896	- 1,490	1,533	- 1,678	- 1,372
Швидкість корозії по глибині, LgcorrosRate	- 0,190	- 0,298	- 0,183	- 0,148	- 0,176	0,115

Висновки

Таким чином, за допомогою розрахункових методик було визначено склад експериментального жароміцного сплаву та прогнозовані основні експлуатаційні властивості, що дало змогу позитивно оцінити можливість використання розробленого сплаву з даним комплексом компонентів в якості перспективного матеріалу для робочих лопаток ГТД при суттєво скороченому масиві дороговартісних експериментів. Показано, що легуючий комплекс, який додатково включає реній і тантал, сприяє зростанню жароміцності за рахунок підвищення рівня критичних температур (T_S , T_L , температура розчинення γ' -фази).

Список літератури

1. Specification Z88YF1-S2 for supplying remelting stocks of alloy CM-88Y. – Technical specifications of «Zorya»-« Mashproekt» GTRPC, 2016.
2. Максютя І. І., Квасницька Ю. Г., Сімановський В. М. Оптимізація складу жароміцного нікелевого сплаву для литих деталей газотурбінних двигунів // Металознавство та обробка металів. – 2007. – № 4. – С. 43–47.
3. Мьяльница Г. П., Максютя І. І., Квасницька Ю. Г., Михнян О. В. Вибір легуючого комплексу нового корозійностійкого сплаву для соплових лопаток ГТД // Металознавство та обробка металів. – 2013. – № 2. – С. 29–34.

4. *Кишкин С. Т.* Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов: избранные труды (к 100-летию со дня рождения). – М.: Наука, 2006. – 407 с.
5. *Каблов Е. Н.* Физико-химические и технологические особенности создания жаропрочных сплавов содержащих рений // Вестник Московского университета, Серия 2. – Химия. – 2005. – Т. 46. – № 3. – С. 155–157.
6. *Агальцова В. О., Колясникова Н. В., Голованенко С. А.* Влияние легирующих элементов на свойства коррозионно-стойких жаропрочных монокристаллических сплавов на никелевой основе // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – № 3. – 1998. – С. 8–10.
7. *Кузнецов В. П., Лесников В. П., Конакова И. П., Попов Н. А., Квасницкая Ю. Г.* Структурные и фазовые превращения в монокристаллическом никелевом сплаве, легированном рением и рутением, в условиях испытаний на длительную прочность // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2015. – № 8. – С. 55–59.
8. *Себер Дж.* Линейный регрессионный анализ / Пер с английского В. П. Носко; под ред. М. Б. Малютова. – М.: Мир, 1980. – 456 с.
9. *Петрушин Н. В., Светлов И. Л., Оспенникова О. Г.* Литейные жаропрочные сплавы // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2012. – № 6. – URL: <http://viam.ru/public/files/2012/2012-205998.pdf>.
10. *Zhang J.S., Matsugi K., Murata Y. et al.* Evaluation of the Phase Stability of modified IN738LC Alloys with New PHACOMPJ. *Mater. Sci. Lett.* – 1992. – Vol. 11. – no. 8. – pp. 444–448.
11. *Клясс О. В., Крещенко В. А.* Применение методики фазового расчета «PHACOMP» для прогнозирования прочностных свойств и контроля выделения ТПУ-фаз в лопаточных изделиях ГТГ-110 // Сборник статей конференции в ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект». – Николаев, 2004. – С. 91–94.
12. *Жуков А. А., Смирнова О. А.* Оценка эксплуатационной пригодности жаропрочных сплавов для ГТД и ГТУ // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2005. – № 10. – С. 60–66.
13. Пат. 2538054 RU C22C19/05. Жаропрочный сплав на основе никеля для изготовления лопаток газотурбинных установок. Авдюхин С. П., Дуб А. В., Квасницкая Ю. Г., Ковалев Г. Д., Кульмизев А. Е., Лубенец В. П., Скоробагатых В. Н. – Опубл. 10.01.2015.
14. AEROSPACE STANDARD SAE AS5491. Видано 2000-12, перевірено 2002-03.
15. British Standard HR100 Appendix Ais specified in some Material Specifications for wrought nickel base materials (N115 and N118) SPACE version 4 (Superalloy Phase Analysis Computation Engineering).

Одержано 20.02.2019

References

1. Specification Z88YF1-S2 for supplying remelting stocks of alloy CM-88Y. Technical specifications of «Zorya»–« Mashproekt» GTRPC, 2016.
2. *Maksiuta, I. I., Kvasnytska, Yu. H., Simanovskij, V. M.* (2007) Optimizatsiya of the heat-resisting nickel alloy for cast parts of gas turbine engines. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, Vol. 4, pp. 43–47 [in Ukrainian].
3. *Mialnytsia, H. P., Maksyuta, I. I., Kvasnytska, Yu. H., Mihnian, O. V.* (2013) The choice of alloying complex of a new corrosion-resistant alloy for gas nozzle blades. *Metaloznavstvo ta obrobkametaliv*, Vol. 4, pp. 43–47 [in Ukrainian].
4. *Kishkin, S. T.* (2006) Creation, research and application of heat-resistant alloys: Selected Works (to the 100th anniversary of birth). Moscow: Nauka [in Russian].
5. *Kablov, E. N.* (2005) Physico-chemical and technological features of creation of heat resistant alloys containing rhenium. *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya 2, Himija*, T. 46, Vol. 3, pp. 155–157 [in Russian].
6. *Agal'cova, V. O., Koljasnikova, N. V., Golovanenko, S. A.* (1998) Influence of alloying elements on the properties of corrosion-resistant, heat-resistant, single crystal nickel-based alloys. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*, Vol. 3, pp. 8–10 [in Russian].
7. *Kuznecov, V. P., Lesnikov, V. P., Konakova, I. P., Popov, N. A. & Kvasnickaja, Ju. G.* (2015) Structural and phase transformations in a single-crystal nickel alloy doped with rhenium and ruthenium, under conditions of long-term strength testing. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*, Vol. 8, pp. 55–59 [in Russian].
8. *Seber, Dzh.* (1980) Linear regression analysis. Per. s angl. V. P. Nosko, pod red. M. B. Maljutova. Moscow: Mir [in Russian].

9. *Petrushin, N. V., Svetlov, I. L., Ospennikova, O. G.* (2012) Foundry superalloys. Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocchnik, Vol. 6 [in Russian].
10. *Zhang, J. S. Matsugi, K., Murata, Y. et al.* (1992) Evaluation of the Phase Stability of modified IN738LC Alloys with New PHACOMP. J. Mater. Sci. Lett., Vol. 11, no. 8, pp. 444–448 [in English].
11. *Kljass, O. V., Kreshhenko, V. A.* (2004) Application of the phase calculation methodology PHACOMP for predicting the strength properties and controlling the release of TPU phases in the GTG-110 blades. Sbornik statej konferencii v GP NPKG «Zorya»–« Mashproekt», pp. 91–94 [in Ukrainian].
12. *Zhukov, A. A., Smirnova, O. A.* (2005) Evaluation of the operational suitability of heat-resistant alloys for gas turbine engines and gas turbines. Aviacionno-kosmicheskajatehnika i tehnologija, Vol. 10, pp. 60–66 [in Russian].
13. Pat. of Russia 2538054. *Avdjuhin, S. P., Dub, A. V., Kvasnickaja, Ju. G., Kovalev, G. D., Kul'mizev, A. E., Lubenec, V. P., Skorobagatyh, V. N.* Nickel-based heat-resistant alloy for the manufacture of gasturbine blades (Opubl. 2015, 10 January).
14. AEROSPACE STANDARD SAE AS5491. Vydano 2000-12, perevireno 2002-03.
15. British Standard HR100 Appendix Ais specified in some Material Specifications for wrought nickel base materials (N115 and N118) SPACE version 4 (Superalloy Phase Analysis Computation Engineering).

Received 20.02.2019

Ю. Г. Квасницкая, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
e-mail: kvasnytska@ptima.kiev.ua

Н. И. Тарасевич, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом,
e-mail: nit@ptima.kiev.ua

И. И. Максютя, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

О. О. Токарева, гл. электронщик

О. В. Михнян, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: mixnyan@ukr.net

Г. П. Мьяльница*, канд. техн. наук, зам. гл. металлурга

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

*ГП НПКГ «Зоря»–«Машпроект», Николаев

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДИК ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ ЛЕГИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Вопросы создания новых жаропрочных коррозионностойких сплавов для лопаток стационарных и транспортных турбин, а также технологии их получения, касаются актуальных проблем отрасли отечественного машиностроения. В статье представлены результаты проведенного комплекса исследований, связанного с оптимизацией легирующего комплекса на базе серийного жаропрочного коррозионностойкого сплава типа ХН60КВТЮМ. К основным компонентам многокомпонентного сплава на Ni–Co–Cr-аустенитной основе с карбидным и интерметаллидным типом упрочнения за счет образования дисперсных частиц так называемой γ' -фазы авторы добавили тугоплавкие элементы тантал и рений. Согласно экспериментальным исследованиям, они являются элементами, которые, благодаря их физико-химическим характеристикам, обладают свойствами как эффективных упрочнителей аустенитного твердого раствора (рений), так и активных образователей карбидной и γ' -фазы (тантал). Применение расчетных методик с получением линейных регрессионных уравнений и компьютерных программ для оптимизации соотношения количественного состава элементов, наряду с классическим металлофизическим отбором образцов путем проведения экспериментальных плавок, позволило спрогнозировать уровень эксплуатационных характеристик и оценить фазово-структурную стабильность материала в процессе длительной эксплуатации лопаток турбин. С целью минимизации количества опытов использован метод факторного эксперимента и получены линейные полные модели. Таким образом, линейный регрессионный анализ показал качественное влияние элементов, которые рассматриваются, и подтвердил данные литературного обзора. Наряду с использованием методики расчетов согласно линейному регрессионному анализу, проведена также оптимизация системы

легирования с помощью компьютерной программы по методу PHACOMP и компьютерной программы SPACE. При применении этой программы учитывались данные по кинетике выделения охрупчивающих фаз в зависимости от времени и температуры эксплуатации литых лопаток, особенности структурных преобразований в процессе их длительной эксплуатации. Методика, которая была опробована раньше на промышленных марках сплавов ЧС70-ВИ, ЧС88У-ВИ, ЧС-104, позволила значительно сократить как период разработки нового сплава на базе марки СМ-88У, дополнительно легированного танталом и рением, так и значительно ограничить необходимые объемы экспериментальных исследований.

Ключевые слова: никелевые жаропрочные сплавы, рений, тантал, лопатка ГТД, структурная стабильность сплава.

I. G. Kvasnytska, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher,
e-mail: kvasnytska@ptima.kiev.ua

N. I. Tarasevich, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Head of Department, e-mail: nit@ptima.kiev.ua

I. I. Maksyuta, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher

O. O. Tokareva, Chief Electronics Engineer

E. V. Mihnyan, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher,
e-mail: mixnyan@ukr.net

H. P. Myalnitsa*, Candidate of Engineering Sciences, Deputy Metallurgist

Phisico-Technological Institute of Metals and Alloys NAS of Ukraine, Kyiv

*SE SPCG «Zorya» – «Mashproekt»

THE USE OF COMPUTATIONAL METHODS FOR CREATING NEW ALLOYING COMPLEXES OF HIGH-TEMPERATURE ALLOYS FOR GTE PARTS

The issue of the creation of new heat-resistant corrosion-resistant alloys for blades of stationary and transport turbines and the technology of their obtaining concern the actual problems of the field of domestic machine building. The article presents the results of the conducted studies related to the optimization of the alloying complex on the basis of a series heat-resistant corrosion-resistant alloy of the type XH60KBTЮМ. The authors add refractory elements of tantalum and rhenium to the main ingredients of a multi-component Ni-Co-Cr alloy on an austenitic base with carbide and intermetal type hardening due to the formation of disperse particles of the so-called γ' -phase. According to experimental studies, they are elements that, due to their physic-chemical characteristics, have the properties of both effective austenitic solid solution (rhenium) and active carbide and γ' -phase (tantalum) forming agents. The application of calculation methods to obtain linear regression equations and computer programs to optimize the ratio of the quantitative composition of elements along with the classic metal-physical selection of samples by conducting experimental melts, has made it possible to predict the level of performance characteristics and evaluate the phase-structural stability of the material in the process of long-term operation of turbine blades. In order to minimize the number of experiments, the method of the factor experiment was used and the linear complete models were obtained. Thus, the linear regression analysis showed the qualitative influence of the elements that are considered and confirmed the data of the literary review. Along with using the method of calculations by linear regression analysis, optimization of the system of doping according to the method of forecasting structural stability using computer programs using the method PHACOMP and computer program SPACE. In applying this program, data on the kinetics of the allocation of brittle phases, depending on the time and temperature of the operation of cast blades, and the peculiarities of structural transformations in the process of their long-term exploitation, were taken into account. The technique, which was tested earlier on the industrial brands of the ЧС70-ВИ, ЧС88У-ВИ, ЧС-104, allowed to significantly reduce as a period of development of a new experimental alloy on the basis of mark SM-88У, additionally doped with tantalum and rhenium, also significantly limit the experimental research.

Keywords: superalloys, rhenium, tantalum, blades GTE, structural stability of alloy.