

## *Вибір легуючого комплексу нового корозійностійкого сплаву для соплових лопаток ГТД*

Г. П. Мьяльниця\*, кандидат технічних наук  
І. І. Максюта, кандидат технічних наук  
Ю. Г. Квасницька, кандидат технічних наук  
О. В. Михнян

\*ДП НВКГ “Зоря”–“Машпроект”, Миколаїв  
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

*Методом математичного планування з використанням багатofакторної схеми експериментів проведено вибір додаткового легуючого комплексу жароміцного сплаву типу ХН57КВТЮМБЛ–ВІ з метою підвищення стійкості матеріалу щодо високотемпературної корозії при збереженні довготривалої міцності та пластичності на рівні промислового сплаву на нікелевій основі ЧС104–ВІ для соплових лопаток газотурбінних двигунів.\*\**

Проблема високотемпературної корозії (ВК) деталей газових турбін є досить актуальною у зв'язку зі зростанням робочої температури матеріалу лопаток газотурбінних двигунів (ГТД) та з підвищенням вмістом шкідливих домішок у дизельному та газоподібному типах пального. Тому розробка нових композицій сплавів для деталей ГТД з полікристалічною або монокристалічною структурою, більш стійких до ВК, є для вітчизняного матеріалознавства та металургії актуальною.

В конструкціях енергетичних та транспортних ГТД, вироблених в Україні в центрах газотурбобудування (НПКГ “Зоря”–“Машпроект”, м. Миколаїв, ВАТ “Мотор-Січ”, ЗМКБ “Прогрес”, м. Запоріжжя), використовують робочі та соплові лопатки з ливарних нікелевих сплавів, які розроблено ще в Радянському Союзі (ЕК-9, ЧС70, ЧС88-У, ЧС104). За комплексом основних та додаткових легуючих елементів та, як наслідок, за фізико-механічними характеристиками (перед усім, термічною стабільністю фазових складових –  $\gamma'$ -фази, карбідів, стійкості до корозійного руйнування) вони не дозволяють витримувати ресурс, більший за 25000 годин роботи сучасних ГТД в умовах агресивного середовища [1 – 3].

Метою даної роботи було визначення легуючого комплексу для сплавів типу ХН57КВТЮМБЛ–ВІ, з більш високими показниками довготривалої міцності та корозійної стійкості за рахунок введення тугоплавких елементів ренію та танталу, здатних зміцнювати аустеніт при розчиненні у ньому, сприяти

\*\* В роботі брав участь О. В. Нейма

підвищенню структурної стабільності як  $\gamma'$ -фази, так і сплаву в цілому, а також підвищувати стійкість до ВК.

За базовий склад з незмінною кількістю компонентів обрано композицію, що відповідає марочному складу жароміцного сплаву ЧС104 [4, 5]: Ni – основа, 0,10 С, 20,0 Cr, 2,5 Al, 3,5 Ti, 10,2 Co, 0,05 Zr, 0,03 Y, 0,015 В, до якої з метою підвищення експлуатаційних характеристик, вводили елементи додаткового легуючого комплексу: Мо (0,20 – 0,60), W (2,0 – 5,0), Nb (0,10 – 0,40), Та (1,0 – 3,0), Re (1,0 – 3,0).

Згідно даних літератури [1 – 3, 6 – 9] тантал та реній є елементами, які мають властивості ефективних зміцнювачів аустенітного твердого розчину та активних утворювачів карбідної та  $\gamma'$ -фази, за рахунок чого вони здатні суттєво поліпшувати жароміцність сплавів. Також, згідно [1 – 3, 7], сплави на основі нікелю та кобальту, леговані танталом, відрізняються високою стійкістю до окиснення та ВК. Ймовірно, переважне утворення карбідів типу МС на базі танталу та титану під час введення активного карбідоутворювача, яким є тантал, призводить до того, що більша частина хрому не витрачається на карбіди  $M_{23}C_6$ , а залишається в аустенітній матриці, підвищуючи корозійну стійкість матеріалу. При дослідженні жаровини сплавів було виявлено, що в ній, поряд з захисними оксидами  $CoO$  та  $Cr_2O_3$ , присутній також оксид  $Ta_2O_3$ , який, на відміну від оксидів молібдену, вольфраму та ніобію, що реагують з  $Na_2SO_4$ , сприяючи розчиненню захисного шару оксидів  $NiO$  та  $CoO$ , не взаємодіє з сульфатом натрію і тим самим, сприяє утворенню щільної захисної плівки жаровини та зниженню швидкості ВК [7].

При відборі найбільш перспективних систем легування використано метод математичного планування експериментів [10]. Параметрами оптимізації вибрані довготривала міцність ( $\tau$ , час до руйнування під навантаженням  $\sigma = 200$  МПа при температурі  $T = 900$  °С) та корозійна стійкість модельних сплавів (втрата маси зразків,  $mg/m^2 \cdot год \cdot 10^4$ ) у розплаві 75 %  $Na_2SO_4$  + 25 %  $NaCl$  при 900 °С,  $\tau = 100$  годин). Була задіяна багатофакторна схема, відповідно до якої ефективність впливу будь-якого фактору (кількість введеного додатково легуючого елемента) визначали за результатами усіх дослідів, тобто оцінювали комплексно. При зафіксованому вмісті хрому, вуглецю, кобальту, алюмінію, титану, цирконію, ітрію вміст інших елементів змінювали відносно вибраного основного рівня з підвищенням його до максимального та зниженням до мінімального рівня (таблиця). Локальна область зміни факторів була

Інтервалами варіювання елементів додаткового легуючого комплексу

Рівень факторів (кількість елементів)	Елементи, % (по масі)				
	Ta (X <sub>1</sub> )	Mo (X <sub>2</sub> )	Nb(X <sub>3</sub> )	Re(X <sub>4</sub> )	W (X <sub>5</sub> )
Основний рівень в натуральному масштабі ( $X_{ic}$ )	2,0	0,40	0,25	2,0	3,5
Інтервал варіювання, $\Delta X$	1,0	0,20	0,15	1,0	1,5
Верхній рівень	3,0	0,60	0,40	3,0	5,0
Нижній рівень	1,0	0,20	0,10	1,0	2,0

визначена з апіорних міркувань за попередніми дослідженнями авторів та аналізу науково-патентної літератури [1 – 5].

Одержані значення коефіцієнтів в рівняннях регресії дозволяють дати окрему та комплексну оцінку ступеня якісного впливу на значення службових характеристик.

З метою мінімізації кількості дослідів використано метод факторного експерименту  $2^{5-1}$  [10], основна відмінність якого від повного – неможливість одержання окремих, незалежних оцінок коефіцієнтів, тобто у даному випадку лінійні (окремі) ефекти змішуються з ефектами парних взаємодій, які є дуже незначними за рівнем впливу на властивості матеріалу.

Розрахунки, проведені для обох параметрів оптимізації, свідчать, що обидві моделі при вибраному рівні значущості 0,05 % можливо розглядати як адекватні [10]. Адекватність моделей доводить, що одержані рівняння регресії з великим ступенем імовірності описують явища, у даному випадку – ступінь впливу складу сплаву (кількості компонентів) на властивості матеріалу. Перевіривши за допомогою критерію Стюдента [10] математичну гіпотезу щодо статистичної значущості чи незначущості кожного з коефіцієнтів, одержуємо рівняння регресії та абсолютні значення коефіцієнтів, які представлено у вигляді гістограм (рис. 1, 2).

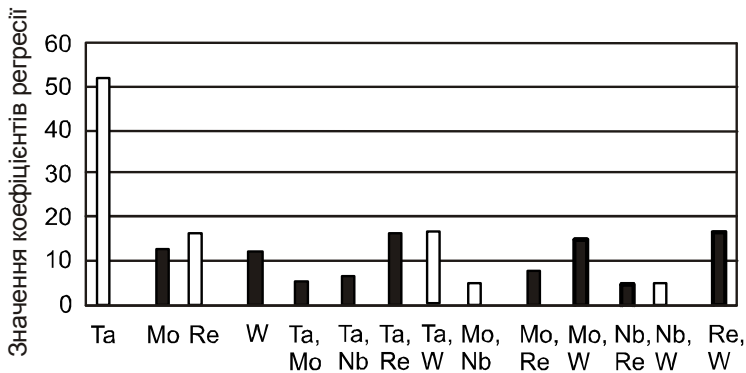


Рис. 1. Значення коефіцієнтів регресії моделі при оптимізації довготривалої міцності.  
 □ – позитивний вплив, ■ – негативний вплив.

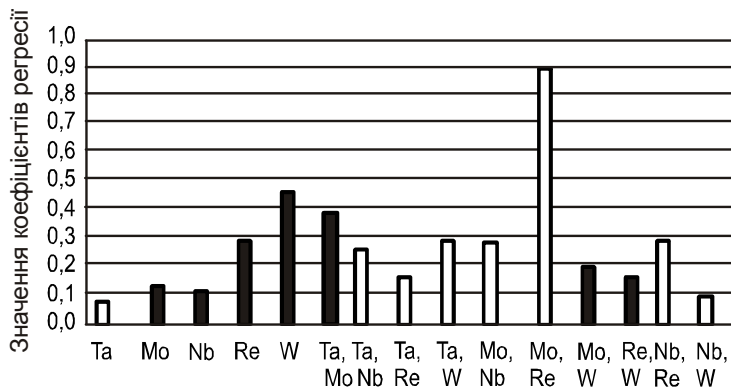


Рис. 2. Значення коефіцієнтів регресії моделі при оптимізації корозійної стійкості.  
 □ – позитивний вплив, ■ – негативний вплив.

Слід відмітити, що статистично незначущим було визнано коефіцієнт, що відповідав окремому впливу ніобію на рівень довготривалої міцності. Можливо, такий результат пов'язаний з присутністю найбільш потужного зміцнювача твердого розчину, яким є тантал в даній композиції та взаємним впливом елементів між собою.

Аналіз моделі починаємо з пошуку найбільш міцного та найбільш стійкого до корозійного руйнування сплаву в межах інтервалів легування композиції, яку досліджуємо. Відомо, що абсолютні значення та знаки коефіцієнтів регресії відповідають ступеню та напрямку впливу відповідних факторів на розміри параметрів оптимізації при переході факторів з основного рівня на верхній чи нижній. Беручи до уваги вищезазначене та проаналізувавши знак та абсолютну величину коефіцієнтів регресії (рис. 1, 2), робимо висновок, що найбільш помітний вплив на підвищення довготривалої міцності при температурі 900 °С можливий при зростанні кількості танталу та ренію до верхнього рівня, тобто до 3 % для кожного з двох елементів з одночасним зниженням вольфраму та молібдену до нижнього рівня; вплив ніобію є непомітним згідно незначущості відповідного коефіцієнта регресії.

Під час аналізу окремого та парного впливу елементів на рівень корозійної стійкості були встановлені нижче наведені закономірності (рис. 2). Легування танталом, враховуючи його значний позитивний вплив на довготривалу міцність та малопомітний негативний вплив на корозійну стійкість (мала абсолютна величина відповідного коефіцієнта регресії), треба вести по верхньому рівню (3 %). Відносно окремої дії інших елементів (молібдену, ніобію, ренію, вольфраму), якщо їх вводити за верхніми рівнями, можна спостерігати підвищення корозійної стійкості (знижується втрата маси). Однак, аналізуючи парний вплив елементів можна вважати що, майже усі вони комплексно при підвищенні до верхнього рівня не сприяють корозійній стійкості. Так, якщо взяти до уваги, що верхній та середній рівень для вольфраму заборонено у зв'язку з негативним впливом на довготривалу

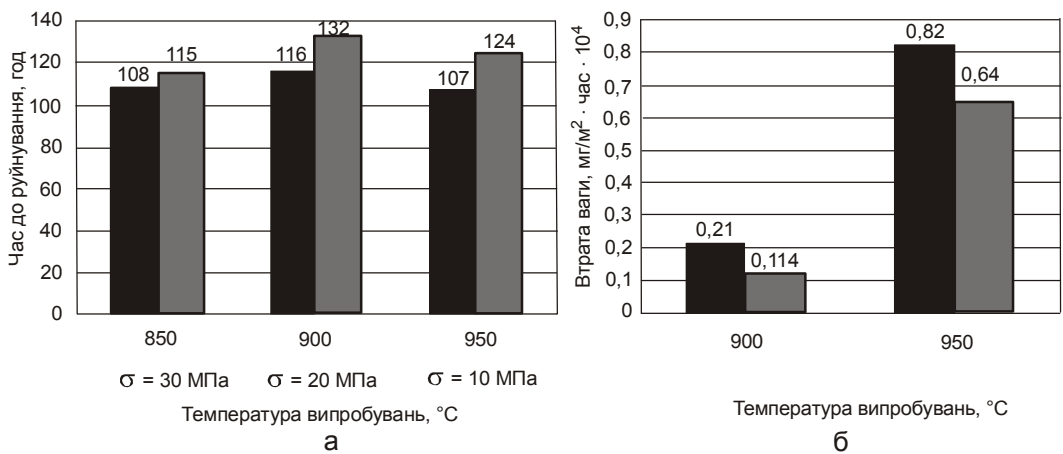


Рис. 3. Температурна залежність довготривалої міцності  $\tau$  (а) при різних ступенях навантаження та корозійної стійкості (б) жароміцних сплавів ЧС104–ВИ та модельного сплаву. ■ – ЧС 104 ВИ, ■ – модельний сплав ЧС 104+Re+Ta.

міцність, залишаємо його на основному рівні – 3,5 %. Вплив ніобію на довготривалу міцність є непомітним, проте він може суттєво поліпшити корозійну стійкість і з урахуванням парного впливу, тобто залишаємо його кількість на основному рівні (0,25 %).

Після аналізу коефіцієнтів регресії для обох параметрів, що оптимізуємо, можемо визначити склад додаткового легуючого комплексу в такому вигляді: Та – 3,0, Мо – 0,40, Nb – 0,25, Re – 3,0, W – 3,50. Шихтові заготовки з модельного сплаву, склад якого відповідав розрахунковому, було виплавлено в вакуумно-індукційної печі УППФ-2. Випробування зразків-супутників, отриманих при виплавленні натурних деталей соплового апарату компресора високого тиску ГТД з модельного сплаву дійсно виявили максимальну витривалість при випробуваннях на довготривалу міцність (132 годин) та мінімальний показник втрати ваги ( $0,145 \text{ мг/м}^2 \cdot \text{год} \cdot 10^4$ ) в порівнянні з аналогічними показниками сплавів, які входили в матрицю планування. Обидва показники перевищували (рис. 3) паспортні дані для сплаву ЧС104-ВИ, який використовують в даний час для деяких типів соплових лопаток турбін на підприємствах України.

## Література

1. Симс Ч.Т., Столофф Н.С., Хагель У.К. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. – М.: Металлургия, 1995. – Т.1. – 384 с.
2. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. – М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
3. Яцык С.И. Производство высокотемпературных литых лопаток авиационных ГТД. – М.: Машиностроение, 1995. – 256 с.
4. Инструкция И ЖАКИ. 105,509 – 2001: Сплавы жаропрочные литейные для лопаток газовых турбин (Паспорт сплава ЧС104-ВИ).
5. Максютя И.И., Квасницкая Ю.Г., Симановский В.М. // Процессы литья. – 2007. – № 4. – С. 3 – 8.
6. Бурова Н.Н., Масленков С.Б. Структурные особенности никелевых сплавов, легированных танталом. // МиТОМ. – 1979. – № 5. – С. 19 – 21.
7. Johuson D.M., Whittle D.P. Mechanisms of  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – induced accelerated oxidation. // Corros. Sci. – 1975. – 15. – P. 721 – 739.
8. Патент 2186144 RU C22C19/05. Никелевый жаропрочный сплав для монокристаллического литья и изделие, выполненное из этого сплава. / В.Н.Толораия, Н.Г.Орехов, Е.Н.Каблов, Е.Н.Чубарова. – Опубл. 27.07.2002.
9. Каблов Е.Н. Физико-химические и технологические особенности создания жаропрочных сплавов, содержащих рений. – Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. – 2005. – 46. – № 3 – С. 155.
10. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.

Одержано 10.09.12

Г. Ф. Мьяльница, И. И. Максута, Ю. Г. Квасницкая, Е. В. Михнян

Выбор легирующего комплекса нового коррозионностойкого сплава  
для сопловых лопаток ГТД

Резюме

Методом математического планирования с использованием многофакторной схемы экспериментов проведен выбор дополнительного легирующего комплекса жаропрочного сплава типа ХН57КВТЮМБЛ–ВИ с целью повышения стойкости материала к высокотемпературной коррозии при сохранении длительной прочности и пластичности на уровне промышленного сплава на никелевой основе ЧС104–ВИ для сопловых лопаток газотурбинных двигателей.

G. F. Myalnitsa, I. I. Maksuita, Yu. G. Kvasnitskaya, E. V. Mihnyan

Selection of new-alloying corrosion-resistant alloy for the nozzle blades

Summary

The method of mathematical planning schemes using multivariate experiments were applied to select addition complex of alloying elements for heat-resistant alloy type ХН57КВТЮМБЛ–ВИ to improve the resistance of the material to high temperature corrosion, while maintaining long-term strength and plasticity at the level of industrial nickel-based alloy ЧС104–ВИ intended for the manufacture of nozzle blades GTE.

УДК 621.669.018.45:553.92.

*Структура та термемісійні властивості  
сплавів системи  $LaB_6 - MoB_2$*

Г. П. Кисла, кандидат технічних наук

П. І. Лобода, професор, чл.-кор. НАН України

Л. В. Павленко

Національний технічний університет «КПІ», Київ

*Побудовано діаграму стану сплавів системи  $LaB_6 - MoB_2$ . Досліджено структуру і властивості сплавів системи  $LaB_6 - MoB_2$ , отриманих в процесі електронно-променевої плавки і спрямованої кристалізації в індукційній установці безтигельної зонної плавки. Визначена щільність струму емісії електронів гексабориду лантану і евтектичного сплаву системи  $LaB_6 - MoB_2$  в апараті електронно-променевого зварювання і показано, що при високих температурах щільність струму емісії евтектичного сплаву є вищою, ніж у чистого гексабориду лантану.*

Чистий гексаборид лантану використовується переважно як матеріал термокатодів електронно-променевих установок для плавки, напилення і зварювання металів і сплавів, оскільки має відносно високу густину емісії електронів при відносно низьких температурах (1400 – 1700 °С). Але при