

УДК 669.245:621.78

С.В. Овсепян¹, М.В. Ахмедзянов¹, И.С. Мазалов¹, О.И. Расторгуева¹**ЛЕГИРОВАНИЕ УГЛЕРОДОМ СПЛАВА СИСТЕМЫ Ni-Co-Cr-W-Ti, УПРОЧНЯЕМОГО ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ**

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-21-24

Исследовано влияние легирования углеродом на фазовый состав и свойства жаропрочного никелевого сплава нового класса системы Ni-Co-Cr-W-Ti, упрочняемого в процессе химико-термической обработки. Установлено, что образующиеся карбиды при высокотемпературном азотировании сдерживают рост зерен и снижают скорость диффузии азота, формируют термостабильные упрочняющие сплав карбобориды. Добавка углерода приводит к повышению жаростойкости и длительной прочности.

Ключевые слова: азотирование, нитриды, структура, химико-термическая обработка, жаропрочный никелевый сплав, легирование.

Influence of alloying by carbon on phase structure and properties of heat-resistant Ni-based superalloy of a new class of Ni-Co-Cr-W-Ti system strengthened by special chemical and thermal treatment is investigated. It is established that carbides, forming at high-temperature nitriding, restrain growth of grains and reduce the speed of nitrogen diffusion, form thermostable carboborides strengthening an alloy. The additive of carbon leads to increase in heat resistance and long-term strength.

Keywords: nitriding, nitrides, structure, thermo-chemical treatment, heat resistant Ni-based superalloy, alloying.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации
[Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Прогресс в усовершенствовании газотурбинных двигателей (ГТД) для летательных аппаратов и энергетических установок связан с повышением характеристик материалов, используемых при производстве ответственных деталей и узлов. В наиболее сложных условиях – в горячей зоне ГТД, применяются жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС). Главным направлением совершенствования ЖНС является повышение рабочей температуры и прочностных характеристик [1–9]. Кроме комплекса эксплуатационных свойств для этих материалов важны также технологичность и хорошая свариваемость.

Литейные и деформируемые жаропрочные никелевые сплавы могут упрочняться благодаря выделению интерметаллидных γ' - и γ'' -фаз на основе Ni_3Al и Ni_3Nb или легированию твердого раствора тугоплавкими элементами. Наиболее высокая температура их работы ограничена 1150°C, что составляет $\sim 0,85T_S$ [2, 6, 10]. Помимо интерметаллидных частиц сплавы упрочняются карбидами и боридами [11–13].

Для наиболее высокотемпературных деталей ГТД (жаровых труб камер сгорания, диффузоров, экранов, створок) созданы сплавы нового класса, которые упрочняются в процессе химико-термической обработки частицами нитридов [9, 14]. Наиболее жаропрочным материалом среди

них является свариваемый сплав ВЖ171 системы Ni-Co-Cr-W, разработанный в ВИАМ [3]. Длительная прочность сплава ВЖ171 в интервале температур 900–1100°C на 40–100% выше прочности отечественных и зарубежных серийных материалов аналогичного применения, а рабочая температура достигает 1250°C. В настоящее время разработаны технологии производства сплава ВЖ171 и проходит освоение его в промышленности [15, 16].

С 2008 г. известны работы компании Haynes International Inc. в этом направлении. Сплав NS-163 на основе системы Co-Cr-Fe с добавлением Ni, Ti и Nb упрочняется при высоких температурах благодаря образованию нитридов титана и ниобия в процессе химико-термической обработки [9, 17].

Несмотря на проведенные исследования [18–21], влияние легирования, в том числе малых добавок, на свойства сплавов данного класса недостаточно изучено. Определение закономерностей упрочнения позволит повысить их характеристики.

Целью данной работы является исследование влияния добавки углерода на фазовый состав и свойства сплава, упрочняемого нитридными частицами.

Материалы и методы

Объектом исследования являлся сплав ВЖ171 на основе системы Ni-Co-Cr-W, легированный титаном. Содержание углерода составляло

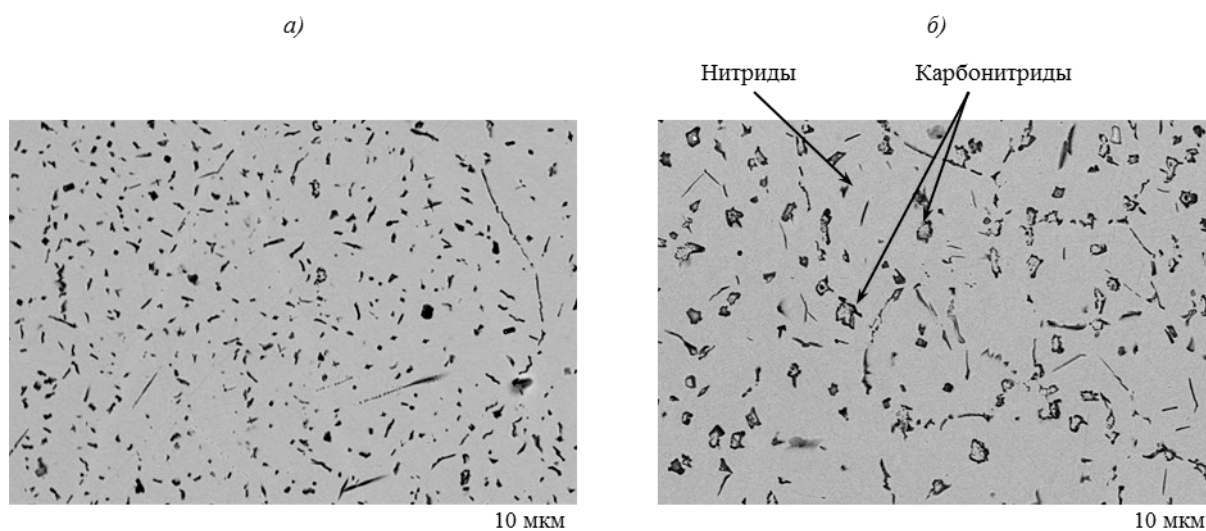


Рис. 1. Микроструктура сплава ВЖ171, содержащего 0,02 (а) и 0,2% (по массе) С (б)

Таблица 1

Химический состав фаз в сплаве ВЖ171 с разным содержанием углерода

Содержание углерода в сплаве, % (по массе)	Фаза	Содержание элементов, % (по массе)					
		Ti	Cr	Co	Ni	Mo	W
0,02	Нитрид	14,9–57,7	8,1–28	4,2–16,5	4,5–21,9	0–1	1–6,3
0,2	Нитрид	31,7–49	9,7–16,5	7,3–15,1	11–22	1,3–1,4	6,5–12,1
	Карбонитрид	38,1–48,2	5,5–6,3	4,2–4,7	6,9–7,3	2,3–2,5	24,4–25

Таблица 2

Температуры солидус и ликвидус сплава ВЖ171

Температура, °С	Состояние материала	Температура фазовых превращений, °С, экспериментальных составов сплава, содержащих углерод в количестве, % (по массе)	
		0,02	0,2
T_S	До азотирования	1261	1286
	После азотирования	1372	1387
T_L	До азотирования	1350	1358
	После азотирования	1420	1423

Таблица 3

Свойства сплава ВЖ171 с разным содержанием углерода (средние значения)

Содержание углерода, % (по массе)	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ_s , %	$\tau_{\sigma=64 \text{ МПа}, 1000^\circ \text{ Ч}}$
	МПа			
0,02	845	655	8,4	88
0,2	835	640	8,0	192

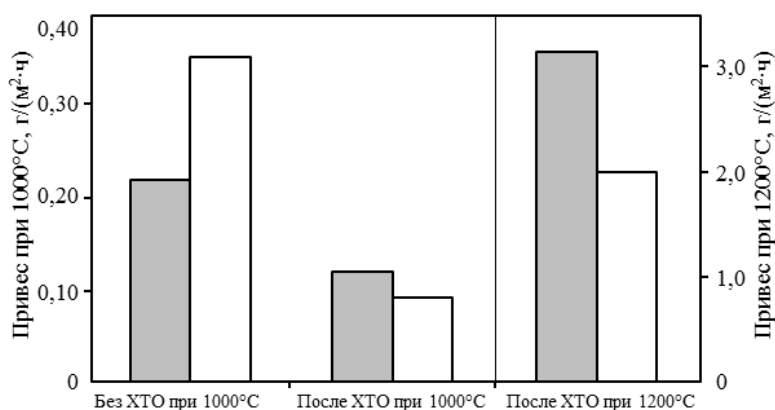


Рис. 2. Жаростойкость (привес) сплава ВЖ171, содержащего 0,02 (■) и 0,2% (по массе) С (□), после испытаний в течение 100 ч

0,02% (по массе) в одной плавке и 0,2% (по массе) – в другой. Из слитков изготовлены сутунки и затем листы толщиной 1,3 мм. Химико-термическую обработку (ХТО) проводили в атмосфере азота при температуре на 150–170°C ниже T_S сплава.

Методами оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ) с микрорентгеноспектральным анализом (МРСА)* исследовали микроструктуру сплава ВЖ171. Методом ДТА с помощью дифференциального сканирующего калориметра DSC 404 Netzsch определяли температуры фазовых превращений. Испытания на кратковременную и длительную прочность проводили по стандартным методикам – ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 10145–81 соответственно, жаростойкость определяли по ГОСТ 6130–71.

Результаты и обсуждение

Исследование структуры методами РЭМ с МРСА показало, что после деформации и отжига в сплаве с 0,02% (по массе) углерода наблюдаются вторичные карбиды (в основном по границам зерен) размером 0,4–1,0 мкм типа M_6C на основе вольфрама и хрома, легированных никелем, кобальтом и молибденом, со сложной кубической структурой. Присутствуют также отдельные частицы размером до 6 мкм. При содержании углерода 0,2% (по массе) количество карбидов размером 2–5 мкм значительно возрастает (они распределены равномерно по объему металла). Структура образцов после азотирования представлена на рис. 1. Средний размер частиц в сплаве с 0,02% (по массе) С составляет от 0,7 (в поверхностной зоне образца) до 2 мкм (в центральной зоне образца). Частицы нитридов сформировались по всему объему металла. При добавке 0,2% (по массе) С структура сплава меняется, скорость азотирования более низкая – нитриды образуются на 2/3 от общей толщины образца при той же продолжительности процесса химико-термической обработки. В центральной зоне ли-

ста сохраняются карбидные частицы, после увеличения продолжительности обработки структура по всему объему металла однородная: карбиды сдерживают рост зерен, количество упрочняющей фазы выше.

Химический состав фаз азотированной зоны показан в табл. 1. При 0,2% (по массе) С в сплаве кроме нитридов при взаимодействии карбидов с азотом образуются карбонитриды. Состав частиц одного типа различается, поэтому показаны интервалы содержания элементов – от минимального до максимального значения.

Результаты ДТА представлены в табл. 2. Видно, что температура солидус (при 0,2% (по массе) С) до и после азотирования выше на 25 и 15°C соответственно. Температура ликвидус для двух составов близка.

Жаростойкость образцов при 1000 и 1200°C показана на рис. 2. До химико-термической обработки у сплава с 0,2% (по массе) С жаростойкость ниже, после обработки при обеих температурах испытания сплав с более высоким содержанием углерода показывает меньший привес.

Свойства изучаемых сплавов, полученных после проведения ХТО по одинаковому режиму, показаны в табл. 3.

Видно, что при близких значениях прочности при комнатной температуре время до разрушения при 1000°C состава с более высоким содержанием углерода увеличивается более чем в 2 раза.

Полученные данные показывают преимущества состава сплава ВЖ171 с высоким содержанием углерода (0,2% по массе) перед составом с низким его содержанием (0,02% по массе). У него выше температура солидус, что позволяет проводить обработку и эксплуатацию материала при более высоких температурах. У такого сплава после химико-термической обработки улучшается жаростойкость и жаропрочность, вследствие образования карбидов и формирующихся на их месте после азотирования карбонитридов. В составе с более высоким содержанием углерода в карбонит-

* В работе принимали участие Е.В. Филонова и Е.А. Давыдова

ридах и нитридах в 2–4 раза больше тугоплавких элементов – вольфрама и молибдена, и меньше хрома. Это, вероятно, делает упрочняющую фазу и сам сплав более термически стабильными.

Отрицательным последствием легирования углеродом сплава ВЖ171 является необходимость более длительной (в ~2 раза) выдержки при химико-термической обработке для полного азотирования образца (по всему объему). Влияние бора, углерода и кремния на продолжительность азотирования отмечено в работе [21]. По мнению авторов, снижение скорости азотирования связано с уменьшением этими элементами растворимости азота в сплаве. Несмотря на это получено значительное преимущество по жаростойкости и жаропрочности.

Заключение

Исследовано влияние легирования углеродом на фазовый состав и свойства жаропрочного ни-

келевого сплава нового класса ВЖ171 системы Ni–Co–Cr–W–Ti, упрочняемого в процессе химико-термической обработки.

Установлено, что образующиеся карбиды при высокотемпературном азотировании сдерживают рост зерен и формируют термостабильные, упрочняющие сплав карбонитриды.

Показано повышение жаростойкости и длительной прочности сплава ВЖ171 при добавке 0,2% (по массе) углерода.

Несмотря на необходимость увеличения продолжительности химико-термической обработки, легирование углеродом азотируемого никелевого сплава ВЖ171 является перспективным.

Благодарность

Авторы выражают благодарность Б.С. Ломбергу за помощь в работе и обсуждении данного материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего //Автоматическая сварка. 2013. №10. С. 23–32.
3. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бахрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 52–57.
4. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения //Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34–38.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения //Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54.
6. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 36–52.
7. Lin J., Balint D., Pietrzyk M. Microstructure evolution in metal forming processes. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. 2012. 402 p.
8. Lee M. Pike 100 + years of wrought alloy development at Haynes International /In: 8-th International symposium on Superalloy 718 and derivatives. TMS. 2014. P. 15–30.
9. Locq D., Caron P. On some advanced nickel-based superalloys for disk applications //Aerospace Lab. 2011. №3 (Aerospacelab-journal.com).
10. Ломберг Б.С., Яковлев Е.Д. Новый жаропрочный материал для ядерной энергетики //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 18–19.
11. Reed R.C. The Superalloys. Fundamentals and Applications. 2008. 388 p.
12. Симс Ч.Т., Столофф Н.С., Хагель У.К. Суперсплавы-2. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок: Пер. с англ. В 2-х кн. М.: Металлургия. 1995. 768 с.
13. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бахрадзе М.М. Особенности легирования и термической обработки жаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 3–8.
14. Латышев В.Б. Жаропрочные деформируемые свариваемые сплавы для камер сгорания /В кн. Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков: Науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 1994. С. 273–278.
15. Ахмедзянов М.В., Скугоров А.В., Овсепян С.В., Мазалов И.С. Разработка ресурсосберегающей технологии получения холоднокатаного листа из высокожаропрочного свариваемого сплава ВЖ171 //Производство проката. 2015. №1. С. 14–17.
16. Быков Ю.Г., Овсепян С.В., Мазалов И.С., Ромашов А.С. Применение нового жаропрочного сплава ВЖ171 в конструкции перспективного двигателя //Вестник двигателестроения. 2012. №2. С. 246–249.
17. Cobalt-Chromium-Iron-Nickel alloys amenable to nitride strengthening: пат. 8075839 US; publ. 13.12.2011.
18. Петрова Л.Г., Чудина О.В. Применение методологии управления структурообразованием для разработки упрочняющих технологий //МиТОМ. 2010. №5. С. 31–41.
19. Fahrman M., Srivastava S.K. Nitridation of HAYNES® NS-163® Alloy: Thermodynamics and Kinetics //JOM. 2012. V. 64. №2. P. 280–287.
20. Овсепян С.В., Лукина Е.А., Филонова Е.В., Мазалов И.С. Формирование упрочняющей фазы в процессе высокотемпературного азотирования свариваемого жаропрочного деформируемого сплава на основе системы Ni–Co–Cr //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 3–8.
21. Kindlimann L.E., Ansell G.S. Kinetics of the internal nitridation of austenitic Fe–Cr–Ni–Ti alloys //Metal. Trans. Jan. 1970. V. 1. №1. P. 163–170.