

УДК 669.245.018.044:620.193.53

Т. В. ТИХОМИРОВА¹, С. В. ГАЙДУК², С. Б. БЕЛИКОВ²¹ Государственное предприятие Запорожское машиностроительное конструкторское бюро «Прогресс» им. акад. А. Г. Ивченко² Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОДЕРЖАНИЯ НИКЕЛЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КОБАЛЬТОВОГО СПЛАВА МЕТОДОМ CALPHAD

Приведено обоснование повышения содержания никеля в составе модернизированного кобальтового сплава. Выполнен расчет методом математического моделирования фазового состава и характеристических температур сплава в зависимости от содержания никеля. Выполнен сравнительный металлографический анализ микроструктуры опытных составов с микроструктурой существующих материалов. Представленные результаты показывают возможность повышения работоспособности сплава при увеличении содержания никеля до 10% на фоне снижения себестоимости шихтовой заготовки для выплавки сплава.

Ключевые слова: износостойкие сплавы, жаропрочные кобальтовые сплавы, система легирования, фазовый состав, карбиды, характеристические температуры.

Введение

Технология поверхностной наплавки позволяет не только восстановить геометрию детали после эксплуатации, но и изменить поверхностные свойства новой детали. Изменение поверхностных свойств возможно за счет применения наплавочных материалов с определенными механическими характеристиками, при этом сохраняя основные требуемые конструкционные характеристики детали.

Однако при выборе наплавочного материала необходимо не только учитывать поверхностные свойства получаемые после наплавки, но также технологичность материала и его совместимость с материалом детали [1].

В предыдущей [2] и настоящей работе рассматривается в качестве основной детали рабочая лопатка турбины из никелевого сплава, для наплавки которой, как правило, используются сплавы на кобальтовой основе - т.н. стеллиты. Кобальтовые сплавы сами по себе обладают хорошей жидкотекучестью и, соответственно, свариваемостью, но также эти материалы характеризуются хорошей совместимостью с никелевыми сплавами из-за химической схожести металлов-основ никеля и кобальта.

Эти два металла, обладая неограниченной растворимостью и близкими по значению температурами плавления, в процессе переплава образуют стабильный твердый раствор по границе сплавления.

Ограниченная номенклатура отечественных

износостойких стеллитов не позволяет расширить область применения кобальтовых сплавов: с одной стороны из-за высокой стоимости сплавов типа ХТН, с другой стороны из-за ограниченных температурных возможностей промышленного сплава ВЗК.

1. Формулирование проблемы

Модернизация сплава ВЗК, предложенная в предыдущей работе [2], показала перспективность выбранного направления.

Изменение соотношения W/Si, предложенное в опытном составе № 6 (таблица № 1), при содержании вольфрама 10% и кремния 0,5% по массе, позволяет повысить температурный уровень работоспособности сплава ВЗК на 200-250⁰С, что составляет 1000-1050⁰С. При увеличении соотношения W/Si за счет повышения содержания вольфрама может привести к снижению структурной и фазовой стабильности.

Современные кобальтовые сплавы по структуре делятся на три группы: сплавы с преимущественно карбидным и карбо-силицидным упрочнением, интерметаллидным упрочнением и сплавы с упрочненным твердым раствором [3]. Последняя группа сплавов имеет схожую схему легирования со сплавами первой группы, однако целью легирования в основном является упрочнение и стабилизация твердого раствора.

В случае повышения рабочих температур ко-

бальтового сплава ВЗК за счет повышения содержания вольфрама снижает стабильность матрицы. Таким образом, необходимо предусмотреть изменение системы легирования с целью ее лучшей сбалансированности введением элементов, которые благоприятно повлияют на твердый раствор и не приведут к снижению ожидаемых характеристик модернизируемого сплава.

Таблица 1

Содержание основных легирующих элементов в составе промышленных сплавов ХТН-61 и ВЗК

Марка сплава	Массовая доля содержания элементов, %					
	C	Cr	W	Ni	Si	Co
ВЗК	1,0-1,3	28,0-32,0	4,0-5,0	0,5-2,0	2,0-2,75	Осн.
Состав №6	1,0-1,3	28,0-32,0	10,0	2,0	0,5	Осн.

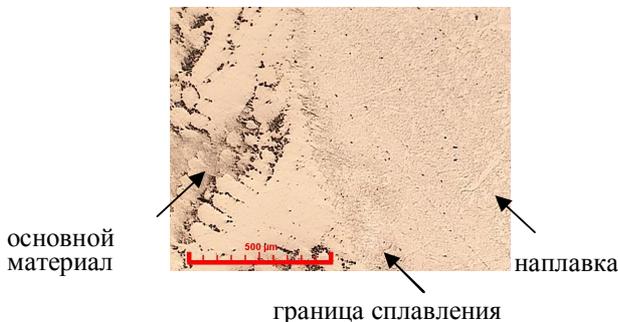


Рис. 1. Микроструктура по границе наплавки детали из сплава ЖС32-ВИ и наплавочного материала сплава ВЗК

2. Влияние содержания никеля на фазовый состав и характеристические температуры кобальтового сплава

Как правило, основными легирующими элементами стеллитов, сплав ВЗК не является исключением, являются хром, углерод и вольфрам. Такие элементы как никель и железо добавляются для стабилизации твердого раствора. Стабилизация твердого раствора происходит за счет подавления превращения в кобальтовой матрице.

Оценить влияние увеличения никеля на фазовый состав и характеристические температуры в короткие временные сроки позволяет метод математического моделирования.

Эффективность метода CALPHAD заключается в достаточно быстром получении необходимого объема достоверной информации по расчетному прогнозированию термофизических процессов, основанных на надежных физических принципах, что имеет ряд значительных преимуществ по сравнению с результатами, получаемыми статистическими ме-

тодами [5]. Расчеты, полученные методом компьютерного моделирования, позволяют без многократных промежуточных экспериментальных плавок выбрать оптимальный химический состав с необходимыми структурными параметрами. Данный подход позволяет существенно сократить количество экспериментов, дорогостоящие материалы и промышленные ресурсы, а также затраты времени на научные исследования [6].

Необходимо учитывать, что в случае удачных результатов легирования кобальтового сплава никелем, возможно, будет снижение себестоимости сплава за счет более низкой цены никеля в сравнении с кобальтом.

В таблице 2 представлены опытные составы модернизированного сплава с различным содержанием никеля. Шаг изменения концентрации 2%.

Для каждого конкретного опытного состава сплава выполнялось компьютерное моделирование процессов охлаждения (кристаллизации) от температуры жидкого состояния (1400°C) до комнатной температуры (20°C), а также при нагреве в обратном порядке, с температурным шагом 10°C внутри всего температурного диапазона.

Расчет в обоих направлениях выполнялся с целью подтверждения результатов.

Таблица 2

Среднее содержание основных легирующих элементов в исследованных составах

№ опытного состава	Массовая доля содержания легирующих элементов в составах, %					
	C	Co	Cr	Ni	W	Si
6	1,2	56,3	30	2,0	10,0	0,5
8	1,2	54,3	30	4,0	10,0	0,5
9	1,2	52,3	30	6,0	10,0	0,5
10	1,2	50,3	30	8,0	10,0	0,5
11	1,2	48,3	30	10,0	10,0	0,5
12	1,2	46,3	30	12,0	10,0	0,5
13	1,2	44,3	30	14,0	10,0	0,5

Кобальтовые сплавы, имея многокомпонентный состав, при нагреве и охлаждении претерпевают фазовые превращения, которые определяют фазовый состав и, соответственно, конечную структуру сплава. В свою очередь химический состав определяет фазовый состав и температурные интервалы прохождения основных превращений, таких как растворение/выделение карбидов различного типа и температуры плавления/кристаллизации.

Наиболее вероятный фазовый состав опытных сплавов и их характеристические температуры представлены в таблицах 3 и 4.

Расчеты показали, что в исходном сплаве ВЗК γ - твердый раствор упрочнен в основном карбидами типа M_{23}C_6 на основе хрома (17,8%), при этом ве-

роятно выделение карбидов типа M_6C (7,9%) на смешанной основе. Температуры полного растворения карбидов данных типов составляют $1009^{\circ}C$ и $1241^{\circ}C$ соответственно (табл. 3), что ниже температуры плавления твердого раствора (солидус $1276^{\circ}C$). Определяем рабочую температуру сплава ВЗК ниже на $200-250^{\circ}C$ температуры полного растворения карбидов основного типа $M_{23}C_6$ ($1009^{\circ}C$), что составляет $750-800^{\circ}C$.

Таблица 3
Расчетный фазовый состав опытных сплавов

Фаза, %	№ опытного состава							
	ВЗК	6	7	8	9	10	11	12
Г	74,3	68,5	81,65	82,03	82,34	82,6	82,81	82,98
$M_{23}C_6$	17,8	30,9	12,35	11,26	10,35	9,61	8,99	8,6
M_6C	7,9	0,6	-	-	-	-	-	-

Таблица 4
Расчетные значения характеристических температур для опытных сплавов

№ состава	Характеристические температуры, $^{\circ}C$		
	t_L	t_S	$M_{23}C_6$
ВЗК	1315	1276	1009
6	1334	1267	1255
8	1330,7	1269,56	1254
9	1327,5	1271,9	1252,86
10	1324,55	1273,8	1253
11	1321	1276	1251,41
12	1320	1277,8	1251,4
13	1317,1	1279,7	1251,3

Анализ результатов фазового состава опытного сплава № 6 [2], содержащий вольфрама 10% и кремния 0,5% по массе показал, что γ - твердый раствор упрочнен, в основном, карбидами типа $M_{23}C_6$ на основе хрома (30,9%) по массе, при этом в структуре практически отсутствуют карбиды типа M_6C (табл. 3).

Из таблицы 3 видно, что с повышением содержания никеля фазовый состав исследованных составов не изменяется. Карбиды M_6C в составе, начиная со сплава 8 – отсутствуют, соответственно и рабочая температура сплава определяется температурой растворения карбидов $M_{23}C_6$.

При повышении содержания никеля до 8-10% наблюдается повышение температуры полного растворения карбидов $M_{23}C_6$ до $1253^{\circ}C$, что соответствует работоспособности сплава опытных составов 10 и 11 до $1000-1050^{\circ}C$.

Дальнейшее повышение никеля выше 10% показывает постепенное снижение температуры растворения карбидов $M_{23}C_6$.

Таким образом, наиболее оптимальным, с точки зрения структурной и фазовой стабильности, являются опытные составы № 10 и 11, содержащие 8-10% никеля по массе.

При металлографических исследованиях образцов опытных составов № 6 и 11, и сплава ВЗК, Термическая обработка (ТО) образцов опытного составов № 6 и 10 проводилась по режиму для сплава ВЗК при $1230^{\circ}C$.

Образцы опытных плавок не имеют металлографических отличий в микроструктуре.

Результаты расчетов методами математического моделирования показали хорошую согласованность с металлографическими данными.

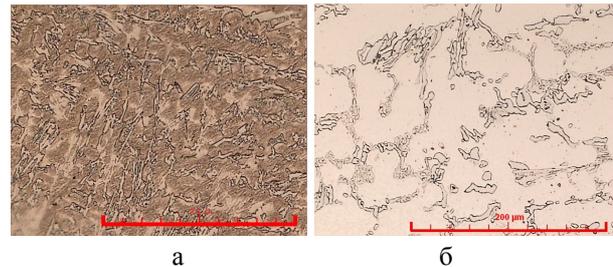


Рис. 2. Микроструктура исследованных сплавов после термической обработки (x200):
а – сплав ВЗК; б – состав № 6

Выводы

1. Методами математического моделирования установлено, что повышение в составе модернизированного кобальтового сплава никеля до 8-10% благоприятно сказывается на повышении рабочей температуры до $1000-1050^{\circ}C$.

2. Микроструктура образцов опытных составов с содержанием никеля до 10% не имеет отличий от сплавов с меньшим содержанием.

3. Повышение работоспособности сплава за счет повышения содержания никеля позволяет снизить себестоимость шихтовых материалов для выплавки сплава.

Литература

1. Диаграммы равновесия двойных металлических систем [Текст] : справочник / под ред. ак. Ран Н. П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 1997. – 56 с.
2. Тихомирова, Т. В. Исследование методом CALPHAD влияния отношения вольфрама к кремнию на фазовый состав и характеристические температуры кобальтового сплава [Текст] / Т. В. Тихомирова, С. В. Гайдук // Вестник двигателестроения. – 2014. – № 2. – С. 206-210.
3. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок [Текст] : пер с англ. / под ред. Ч. Т. Симса,

Н. С. Столоффа, У. К. Хагеля. – М. : Металлургия, 1995. – Кн. 1. – 384 с.

4. Saunders, N. *The Application of CALPHAD Calculations to Ni-Based Superalloys* [Text] / N. Saunders, M. Fahrman, C. J. Small // In

“Superalloys 2000” ; eds. K. A. Green, T. M. Pollock and R. D. Kissinger. – TMS, Warrendale, 2000. – 803 p.

5. Горбачев, И. И. Термодинамическое моделирование системы Fe–V–Nb–C–N на основе CALPHAD-метода [Текст] / И. И. Горбачев, В. В. Попов // ФММ. – 2011. – № 5. – С. 518–525.

Поступила в редакцию 13.06.2015, рассмотрена на редколлегии 23.06.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проректор Ю. М. Внуков, Запорожского национально-технического университета, Запорожье, Украина.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВМІСТУ НИКЕЛЯ НА ФАЗОВИЙ СОСТАВ ТА ХАРАКТЕРИСТИЧНІ ТЕМПЕРАТУРИ КОБАЛЬТОВОГО СПЛАВУ МЕТОДОМ CALPHAD

Т. В. Тихомирова, С. В. Гайдук, С. Б. Бєліков

Приведено обґрунтування підвищення вмісту нікеля у складі модернізованого кобальтового сплаву. Виконано розрахунки методом математичного моделювання фазового складу та характеристичних температур сплаву залежно від вмісту нікеля. Виконано порівняльний металлографічний аналіз мікроструктури дослідних составів з мікроструктурою існуючих матеріалів. Отримані результати показали, що з підвищення вмісту нікеля до 10% відбувається підвищення робочої температури. За рахунок підвищення вмісту нікеля та відповідного зниження вмісту кобальту можливе зниження собівартості шихтової заготовки.

Ключові слова: зносостійкі сплави, жароміцні кобальтові сплави, система легування, фазовий склад, карбіди, характеристичні температури.

RESEARCH OF THE INFLUENCE NIKEL ON PHASE STRUCTURE AND CHARACTERISTIC TEMPERATURES OF THE COBALT ALLOY BY METHOD CALPHAD

T. V. Tykhomyrova, S. V. Gayduk, S. B. Belikov

There is substantiated the increasing of the nickel maintenance at the modernized cobalt alloy. There is calculated phase structure and characteristic temperatures of an alloy by a method of mathematical modeling for each composition. It is executed the comparative analysis of a microstructure of skilled structures and a microstructure of existing materials. The presented results show possibility of increase of working capacity of modernized cobalt alloy at increase in the maintenance of nickel to 10 %. At the expense of increase of the maintenance of nickel and accordingly cobalt decrease probably decrease in the cost price of shихтовий preparations.

Key words: high-temperature strength cobalt alloy, wear resistance alloy, alloysystem, phase composition, carbide, characteristic s tempratures.

Тихомирова Татяна Владимировна – инженер ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: tykhonya.tt@gmail.com.

Гайдук Сергей Валентинович – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. «Прикладное материаловедение» Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: gayduksv@gmail.com.

Бєліков Сергей Борисович – д-р техн. наук, проф., ректор Запорожского национального технического университета. Запорожье, Украина, e-mail: gayduksv@gmail.com.