

УДК 669.245.018.044:620.193.53

Т. В. ТИХОМИРОВА<sup>1</sup>, С. В. ГАЙДУК<sup>2</sup>, С. Б. БЕЛИКОВ<sup>2</sup><sup>1</sup> Государственное предприятие Запорожское машиностроительное конструкторское бюро «Прогресс» им. акад. А. Г. Ивченко<sup>2</sup> 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 200-250<sup>0</sup>С, что составляет 1000-1050<sup>0</sup>С. 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.

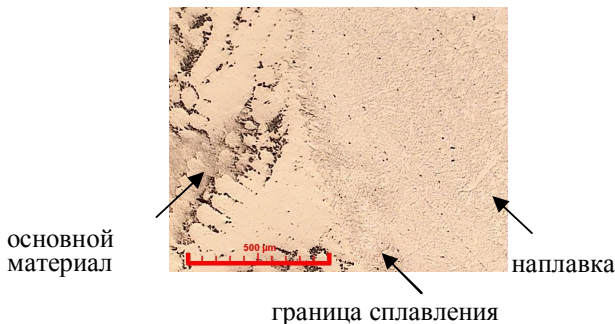


Рис. 1. Микроструктура по границе наплавки детали из сплава ЖС32-ВИ и наплавочного материала сплава ВЗК

## 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 ( $1400^{\circ}\text{C}$ ) до комнатной температуры ( $20^{\circ}\text{C}$ ), а также при нагреве в обратном порядке, с температурным шагом  $10^{\circ}\text{C}$  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  $\gamma$ - твердый раствор упрочнен в основном карбидами типа  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  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  $\gamma$ - 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.

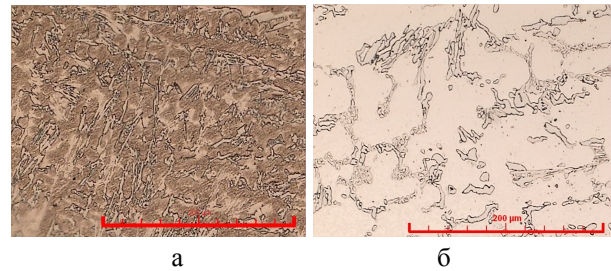


Рис. 2. Микроструктура исследованных сплавов после термической обработки (x200):  
а – сплав ВЗК; б – состав № 6

## 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.