

УДК 621.74.045:669.245.018

Гнатенко О. В., Гайдук С. В., Наумик В. В.

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ И ФАЗОВОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ДЛЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОТЛИВОК

В силовых установках энергетического и авиационного машиностроения широко применяются дорогостоящие литые детали из жаропрочных никелевых сплавов с направленной или монокристаллической макроструктурой. Как правило, данные отливки изготавливаются в вакууме на установках типа УВНК-8П.

В современном мире особенно важно изготавливать высокотехнологичные изделия, не только обладающие высокими эксплуатационными свойствами и надёжностью, но и конкурентоспособные по экономическим факторам. Перспективным направлением является разработка новых экономнолегированных жаропрочных никелевых сплавов, не уступающих по комплексу свойств материалам, традиционно применяемым в данной отрасли на сегодня.

Большинство турбинных лопаток с направленной или монокристаллической макроструктурой для современных авиационных и наземных силовых установок изготавливают из жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ. Данный сплав отличается очень сложной системой легирования и, соответственно, высокой стоимостью, однако, при этом не обладает коррозионной стойкостью. Для устранения указанного недостатка на лопатки дополнительно наносится антикоррозионное покрытие.

Самым дорогостоящим легирующим элементом в сплаве ЖС32-ВИ является рений, содержание которого составляет 4 %. Замена его на другой, менее дорогостоящий элемент, который при этом обеспечит наличие у сплава механических свойств на уровне близком к данному сплаву и обеспечит повышение его коррозионной стойкости, позволит существенно снизить себестоимость лопаток газотурбинных двигателей.

Одним из важных параметров, обеспечивающих эксплуатационный ресурс рабочих лопаток, является фазовая стабильность их материала – жаропрочного никелевого сплава. Особенно остро эта проблема стоит для сплавов, содержащих рений [1, 2].

Для оценки структурной и фазовой стабильности жаропрочных никелевых сплавов применяются различные расчётные методы [1, 3].

Целью данной работы является разработка экономнолегированного никелевого сплава, обладающего механическими свойствами на уровне ЖС32-ВИ и превосходящего его по коррозионной стойкости.

Расчётным путём изучили влияние увеличения в составе жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ содержания тантала от 4,0 % до 9,0 % при одновременном снижении содержания рения от 4,0 % до 1,5 % (табл. 1) на его структурную и фазовую стабильность.

Таблица 1

Химический состав опытных сплавов

Сплав №	Содержание легирующих элементов, % (по массе)											
	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Nb	Ta	Re	Zr	B	Ni
ЖС32-ВИ	0,15	4,9	9,3	8,2	1,1	5,8	1,6	4,0	4,0	0,05	0,015	Осн.
1	0,14	5,1	9,1	8,0	1,0	5,9	1,4	5,0	3,5	0,05	0,015	Осн.
2	0,15	4,9	9,0	8,2	0,9	6,1	1,5	6,0	3,0	0,05	0,015	Осн.
3	0,14	4,8	8,9	8,1	1,0	6,0	1,6	7,0	2,5	0,05	0,015	Осн.
4	0,15	5,0	9,0	8,0	0,9	6,1	1,5	8,0	2,0	0,05	0,015	Осн.
5	0,16	5,2	9,1	7,9	1,1	6,2	1,6	9,0	1,5	0,05	0,015	Осн.
ЖС32Э-ВИ	0,08	5,0	5,0	6,0	0,6	6,0	0,7	8,0	2,0	0,03	0,010	Осн.

Одним из принятых расчётных методов является «ФАКОМП» [3], согласно которому по величине  $\bar{N}_V$ -фактора определяется среднее количество электронных вакансий в  $\gamma$ -твердом растворе.

Химический состав  $\gamma$ -твердого раствора для каждого опытного сплава и исходного сплава ЖС32-ВИ рассчитывался по среднему количеству электронных дырок  $\bar{N}_V$  путем суммирования по формуле:

$$\bar{N}_V = \sum_{i=1}^n m_i \cdot (N_V)_i, \quad (1)$$

где  $m_i$  и  $(N_V)_i$  – соответственно атомная масса  $i$ -го компонента и число электронных дырок каждого конкретного элемента;

$n$  – число компонентов в  $\gamma$ -твердом растворе.

Результаты сравнительного анализа, проведенные на группе известных промышленных сплавов [4], показали, что при малом значении параметра  $Cr/(Cr + Mo + W) < 0,5$  и более низком значении величины фактора  $\bar{N}_V \leq 2,3$  – вероятней образование  $\mu$ -фазы или двойных карбидов типа  $Me_6C$ .

При большем значении параметра  $Cr/(Cr + Mo + W) > 0,7$  и более высоком значении фактора  $\bar{N}_V \geq 2,4$  – вероятней образование  $\sigma$ -фазы.

Также известна методика оценки сбалансированности химического состава сплавов « $\Delta E$ -методом» [1, 5] по величине параметра дисбаланса системы легирования, с учетом соотношения  $Cr/(Cr + Mo + W)$  [4].

Следует отметить, что результаты анализа « $\Delta E$ -методом» группы известных сплавов показал, что сбалансированность химического состава большинства промышленных жаропрочных сплавов низка или практически отсутствует. Совершенно очевидно, что, поскольку при легировании жаропрочных никелевых сплавов используется более 12...15 элементов, найти оптимальный состав для получения желаемого комплекса свойств достаточно сложно. Для осуществления этого процесса требует длительное время и большие финансовые затраты. Особенно это касается высокожаропрочных никелевых сплавов, содержащих в составе дорогой и дефицитный рений. Применение данного метода позволило оптимизировать химический состав многих известных промышленных сплавов и существенно повысить их структурную и фазовую стабильность.

Расчет параметра дисбаланса системы легирования  $\Delta E$  для каждого опытного сплава, в сравнении со сплавом ЖС32-ВИ, производился по формуле:

$$\Delta E = \sum_{i=1}^n E_i \cdot C_i - \left( 0,0036 \cdot \sum_{i=1}^n A_i \cdot C_i - 6,28 \right), \quad (2)$$

где  $E_i$  – соответственно количество валентных электронов ( $sp$ -электроны алюминия,  $ds$ -электроны переходных металлов);

$C_i$  – концентрация  $i$ -го компонента;

$A_i$  – атомная масса  $i$ -го компонента;

$n$  – число компонентов сплава, включая основу сплава.

Сравнительный анализ результатов, полученных с помощью расчетного « $\Delta E$ -метода» для известных промышленных никелевых жаропрочных сплавов, предназначенных для направленной (моно) кристаллизации, показал, что сбалансированность химического состава большинства из них низка или практически отсутствует [1, 2, 5].

Сплавы, удовлетворяющие уравнению (2), считаются сбалансированными по химическому составу при выполнении граничных условий величины параметра дисбаланса системы легирования  $\Delta E = \pm 0,04$ .

Сплавы, имеющие большее положительное значение параметра дисбаланса системы легирования, чем величина  $\Delta E \geq 0,04$ , склонны к образованию избыточных фаз типа  $Ni_3Ti$ ,  $Ni_3Nb$ ,  $Ni_3Ta$  неблагоприятной морфологии.

Сплавы, имеющие большее отрицательное значение параметра дисбаланса системы, чем величина  $\Delta E \leq -0,04$ , склонны к образованию избыточных топологически плотноупакованных фаз ( $\mu$ -фазы) или двойных карбидов типа  $Me_6C$  [1, 2, 5].

Сплав считается идеально сбалансированным по химическому составу при соблюдении условия:  $\Delta E = 0$ .

В табл. 2 представлены рассчитанные значения  $\bar{N}_V$ -фактора и параметра дисбаланса системы легирования  $\Delta E$  для различных содержаний тантала, рения и соответствующей величины их соотношения с учетом параметра  $Cr/(Cr + Mo + W)$  в опытных сплавах, в сравнении со сплавом ЖС32-ВИ.

Таблица 2

Расчетные значения  $\bar{N}_V$ -фактора, параметра  $Cr/(Cr + Mo + W)$  и дисбаланса системы легирования  $\Delta E$  для исследованных сплавов

Сплав №	Расчетные параметры			
	Ta/Re	$\bar{N}_V$ -фактор	$Cr / (Cr + Mo + W)$	$\pm \Delta E$
ЖС32-ВИ	1,00	1,63	0,35	-0,08
1	1,43	1,66	0,36	-0,08
2	2,00	1,69	0,35	-0,07
3	2,80	1,73	0,35	-0,06
4	4,00	1,77	0,36	-0,05
5	6,00	1,82	0,36	-0,05
ЖС32Э-ВИ	4,00	1,44	0,41	-0,04

Расчеты, проведенные для различных химических составов, соответствующей марке сплава ЖС32-ВИ, показали, что значения параметра дисбаланса  $\Delta E$  находятся в диапазоне от  $-0,10$  до  $-0,06$ . Для среднемарочного состава было принято  $\Delta E = -0,08$ . При этом, металлографическими исследованиями было подтверждено, что при длительном температурном воздействии при  $1000 \dots 1000^\circ C$  образуются пластинчатые выделения  $\mu$ -фазы на основе  $Co_7W_6$  и двойных карбидов на основе  $(Ni_3, W_3)C$ .

Сравнительные исследования расчетными методами показали, что в структуре опытных сплавов и сплаве ЖС32-ВИ при значениях параметра  $Cr/(Cr + Mo + W) < 0,5$  и величинах  $\bar{N}_V \leq 2,3$  вероятней выделение  $\mu$ -фазы или двойных карбидов типа  $Me_6C$ , чем  $\sigma$ -фазы.

Из табл. 2 видно, что с повышением соотношения тантала к рению от 1 до 6, в опытных сплавах по сравнению со сплавом ЖС32-ВИ постепенно повышается величина  $\bar{N}_V$ -фактора с 1,66 до 1,82, а значение параметра дисбаланса системы легирования  $\Delta E$  при этом снижается с  $-0,08$  до  $-0,05$ , при практически постоянном соотношении  $Cr/(Cr + Mo + W)$ .

Это указывает на то, что вероятность выделения избыточных фаз типа  $\mu$ -фазы или двойных карбидов  $Me_6C$  неблагоприятной морфологии значительно снижается, но еще остается, так как данные опытные сплавы имеют большее отрицательное значение параметра  $\Delta E$ , чем граничная величина, составляющая  $-0,04$ .

Проведенними дослідженнями встановлено, що підвищення вмісту тантала вище 8 % при відповідному зниженні ренію нижче 2 % призводить до суттєвому зниженню його прочностних і пластических характеристик [6].

Оптимізація при допомозі вищеописаних розрахунків по легируючим елементам кобальту, молибдену, вольфраму, ніобію, цирконію, бору і вуглероду, при вмісті 8,0 % Ta і 2,0 % Re (відношення Ta/Re = 4,0), дозволила отримати хімічний склад сплава (ЖС32Э-ВІ) [7], характеризується величиною  $\bar{N}_V$ -фактора, зменшеною до 1,44, і величиною дисбалансу системи легування  $\Delta E$  – відповідно до –0,04 (см. табл. 2). Це свідчить про значительне зменшення ймовірності утворення небажаних топологічно щільноупакованих фаз і, відповідно, покращенні структурної і фазової стабільності сплаву.

Зниження вмісту вуглероду, цирконію і бору, в порівнянні з сплавом ЖС32-ВІ, дозволило підвищити пластичність сплаву ЖС32Э-ВІ за рахунок зменшення в структурі об'ємної частини, а також покращення термодинамічної стабільності і морфології карбидної фази.

Зменшення вмісту ренію, кобальту, вольфраму, молибдену і ніобію в розробленому сплаві в порівнянні з ЖС32-ВІ значительно знизило його вартість при збереженні механічних властивостей на еквівалентному рівні.

## ВИВОДИ

Оптимізацією хімічного складу розрахунковими методами був отриманий сплав ЖС32Э-ВІ, що містить: 0,04...0,10 % вуглероду; 5,0...6,0 % кобальту; 6,4...7,0 % вольфраму; 0,4...0,8 % молибдену; 0,6...1,0 % ніобію; 7,7...8,3 % тантала; 1,7...2,3 % ренію; 0,020...0,030 % цирконію; 0,005...0,015 % бору. Сплав характеризується покращеною сбалансованістю багатоконпонентної системи легування по величині  $\bar{N}_V$ -фактора і параметра дисбалансу системи легування  $\Delta E$ , що свідчить про його структурну і фазову стабільність, має механічними властивостями на рівні ЖС32-ВІ і при цьому більш ніж на 40 % дешевше останнього.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е. Н. 75 лет. Авиационные материалы / Е. Н. Каблов; под общ. ред. акад. РАН Е. Н. Каблова // Избранные труды «ВИАМ» 1932. – 2007 : Юбилейный научно-технический сборник [Текст]. – М. : ВИАМ, 2007. – 438 с.
2. Каблов Е. Н. Физико-химические и технологические особенности создания жаропрочных сплавов, содержащих рений / Е. Н. Каблов // Вестн. Моск. ун-та. – Сер. 2. – Химия, 2005. – Т. 46. – № 3. – С. 155–167.
3. Симс Ч. Т. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Ч. Т. Симс, Н. С. Столофф, У. К. Хагель; пер. с англ. под ред. Р. Е. Шалина. – М. : Металлургия, 1995. – Кн. 1. – 384 с.
4. Пигрова Г. Д. Условия образования  $\sigma$ - и  $\mu$ -фаз в жаропрочных сплавах на никелевой основе / Г. Д. Пигрова, Е. Е. Левин // Физика металлов и металловедение. – 1969. – Т. 28. – Вып. 5. – С. 858–861.
5. Морозова Г. И. Особенности структуры и фазового состава высокорениевого никелевого жаропрочного сплава / Г. И. Морозова, О. Б. Тимофеева, Н. В. Петрушин // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2009. – № 2. – С. 10–16.
6. Оценка влияния соотношения тантала к рению на структурную стабильность и механические свойства жаропрочного никелевого сплава ЖС-32 [Текст] / А. Г. Андриенко, С. В. Гайдук, В. В. Кононов, О. В. Гнатенко // Вестник двигателестроения. – 2010. – № 1. – С. 128–132.
7. Пат. 48242, Украина, МПК<sup>С</sup> C22C 19/05. Ливарний жароміцний нікелевий сплав [Текст] / Коваль А. Д., Андриенко А. Г., Гайдук С. В., Кононов В. В. [та ін.]: заявник і патентовласник Запорізький нац. техн. ун-т. – № і 200909668 ; заявл. 21.09.2009 ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5. – 8 с.

Статья поступила в редакцию 16.09.2011 г.