

УДК 669.245.018: 620.193.53

**Канд. техн. наук А. Г. Андриенко, канд. техн. наук С. В. Гайдук,  
канд. техн. наук В. В. Кононов, О. В. Гнатенко**

*Национальный технический университет, г. Запорожье*

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СООТНОШЕНИЯ ТАНТАЛА К РЕНИЮ НА СТРУКТУРНУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖС-32**

*Расчетными методами исследовано влияние соотношения концентрации тантала к рению на структурную и фазовую стабильность сплава ЖС-32. Оценено влияние данного соотношения в интервале от 1 до 6 на прочностные характеристики сплава в температурном диапазоне 800–1000 °С. Приведены результаты механических испытаний на кратковременную и длительную прочность исследованных составов, в сравнении со сплавом ЖС-32.*

***Жаропрочные никелевые сплавы, направленная (моно) кристаллизация, термическая обработка, структурная и фазовая стабильность, дисбаланс системы легирования, кратковременная и длительная прочность***

### **Введение**

В настоящее время предприятия, выпускающие авиационные газотурбинные двигатели, проектируют и осваивают выпуск наземных энергетических и газоперекачивающих агрегатов [1, 2]. На промышленных предприятиях ЗМКБ «Прогресс» и ОАО «Мотор Сич» освоен технологический процесс отливки рабочих лопаток для наземных установок Д-336 из сплавов ЖС-26, ЖС-26У методом направленной (моно) кристаллизации. Практика показала, что данные сплавы не обеспечивают необходимого эксплуатационного ресурса рабочим лопаткам из-за пониженной высокотемпературной коррозионной (ВТК) стойкости, повышенного трещинообразования и низких запасов прочности.

Взамен сплавов ЖС-26, ЖС-26У применяется известный промышленный никелевый сплав ЖС-32, полностью удовлетворяющий требованиям к рабочим лопаткам, но имеющий высокую стоимость, в основном, из-за легирования очень дорогим и дефицитным элементом рением (4 % по массе), что делает его применение для рабочих лопаток стационарных газовых турбин экономически нецелесообразным. Поэтому, возникла необходимость в разработке жаропрочного сплава с уровнем механических характеристик, приближающихся к сплаву ЖС-32, но имеющего меньшую стоимость.

Известно, что структурная и фазовая стабильность жаропрочных никелевых сплавов является одним из важнейших факторов, обеспечивающих надежность длительного эксплуатационного ресурса лопаткам газовых турбин [3–5]. Помимо

высокой стоимости, сплав ЖС-32 при длительном воздействии высоких температур (до 1000 °С) показывает структурную и фазовую нестабильность, которая проявляется в выделении значительного количества топологически плотноупакованных (ТПУ) фаз различного типа ( $\mu$ -фаза, двойные карбиды типа  $Me_6C$ ), заметно снижающих прочностные и пластические характеристики.

В данной работе исследовалось влияние соотношения тантала к рению в сплаве ЖС-32 на его структурную и фазовую стабильность, характеристики жаропрочности в температурном диапазоне 800–1000 °С с целью оптимизации данного соотношения для повышения сбалансированности системы легирования.

### **Постановка задачи**

Для этой цели на базе паспортной шихтовой заготовки сплава ЖС-32 отливались монокристаллические образцы из опытных составов № 1–5 с различным соотношением тантала к рению, в исследуемом диапазоне от 1 до 6. Заливка образцов осуществлялась в специальные керамические формы с применением монозатравок из никель-вольфрамового сплава кристаллографической ориентации (КГО) [001] вдоль направления роста на установке УВНК-8П для направленной (моно) кристаллизации в соответствии с серийной технологией. Скорость кристаллизации образцов составляла  $R = 10$  мм/мин. Литые заготовки образцов имели форму цилиндров диаметром 16 мм и высотой 180 мм.

Химический анализ опытных плавок проводился стандартными методами согласно требованиям ТУ 14-1689-73 и ОСТ 1.90127-85. Спект-

ральный химический анализ проводился на оптическом эмиссионном приборе ARL-4460 (квантометр одновременного многоканального анализа). Химические составы опытных плавок приведены в таблице 1.

Литые заготовки монокристаллических образцов опытных составов № 1–5 и сплава ЖС-32 проходили 100 % контроль макроструктуры путем травления в растворе, содержащем хлорное железо (700–800 г), соляную кислоту (120–150 см<sup>3</sup>) и воду до 1 дм<sup>3</sup>, а также контроль кристаллографической ориентировки (КГО) на установке ДРОН-3М.

Далее из литых заготовок изготавливались цилиндрические образцы для испытаний по стандартным методикам: на кратковременную прочность по ГОСТ 9651-73 при температурах 20, 800, 900, 1000 °С и длительную прочность по ГОСТ 10145-81 при температурах 800, 900 и 1000 °С. Механические испытания образцов проводились после соответствующей термической обработки.

В таблице 2 представлены характеристические температуры, определенные методом дифференциального термического анализа (ДТА) для исследованных составов: ( $t_{П.Р.γ}$ ) – температура полного растворения основной упрочняющей γ'- фазы; ( $t_{ЭВТ}$ ) – температура плавления γ-γ' эвтектики; ( $t_L$ ) – температура ликвидус; ( $t_S$ ) – температура солидус;  $Δt_1 = t_L - t_S$  – ширина интервала кристаллизации сплава;  $Δt_2 = t_{ЭВТ} - t_{П.Р.γ}$  – ширина интервала для проведения высокотемпературной гомогенизации первой ступени.

Первая ступень термической обработки (ТО) –  $t_{ГОМ}^I$  (высокотемпературная гомогенизация) для каждого опытного состава № 1–5 назначалась индивидуально, внутри интервала  $Δt_2$ , между температурой эвтектических превращений ( $t_{ЭВТ}$ ) и

полного ( $t_{П.Р.γ}$ ) растворения γ'- фазы.

Вторая ступень ТО (низкотемпературная гомогенизация) всем опытным составам проводилась при  $t_{ГОМ}^{II} = 1050$  °С и была выбрана с учетом технологической температуры нанесения защитного покрытия. Охлаждение между ступенями ТО проводилось на воздухе. Для сплава ЖС-32 термическая обработка проводилась в соответствии с паспортным режимом (см. табл. 2).

### Анализ результатов

С целью исследования структурной стабильности и вероятности выделения ТПУ – фаз различного типа, в химическом составе сплава ЖС-32 была реализована частичная замена рения менее дорогим и дефицитным танталом в исследуемом диапазоне их соотношений Ta/Re от 1 до 6, без изменения содержания остальных легирующих элементов (см. табл. 1).

Расчеты проводились методом ФАКОМП [6] по величине  $\bar{N}_V$  - фактора и ΔE-методом [1, 7] по величине параметра дисбаланса системы легирования, с учетом соотношения Cr/(Cr+Mo+W) [8]. Химический состав γ- твердого раствора для каждого опытного состава № 1–5 и сплава ЖС-32 рассчитывался по среднему количеству электронных дырок  $\bar{N}_V$  путем суммирования по формуле:

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

где  $m_i$  и  $\bar{N}_V$  – соответственно атомная масса  $i$ -го компонента и число электронных дырок каждого конкретного элемента,  $n$  – число компонентов в γ- твердом растворе.

Таблица 1 – Химический состав опытных сплавов

Сплав №	Содержание легирующих элементов, %, по массе											
	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Nb	Ta	Re	Zr	B	Ni
ЖС-32	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.

Таблица 2 – Температуры фазовых превращений в исследованных составах

Сплав №	Характеристические температуры, °С								
	$t_{П.Р.γ}$	$t_{ЭВТ}$	$t_L$	$t_S$	$Δt_1$	$Δt_2$	$t_{ГОМ}^I$	$t_{ГОМ}^{II}$	
ЖС-32	1273	1306	1412	1345	67	33	1280	1050	
1	1270	1302	1407	1342	65	32	1275	1050	
2	1265	1297	1403	1339	64	32	1270	1050	
3	1260	1291	1397	1335	62	31	1265	1050	
4	1255	1286	1393	1332	61	31	1260	1050	
5	1250	1280	1390	1330	60	30	1255	1050	

Результаты сравнительного анализа, проведенные на группе известных промышленных сплавов [8] 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. При большем значении параметра  $Cr/(Cr+Mo+W) > 0,7$  и более высоком значении фактора  $\bar{N}_V > 2,4$  – вероятней образование  $\sigma$ - фазы.

Расчет параметра дисбаланса системы легирования  $\Delta E$  для каждого опытного состава № 1–5, в сравнении со сплавом ЖС-32, производился по формуле:

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

где  $E_i$ ,  $C_i$ ,  $A_i$  – соответственно количество валентных электронов ( $sp$ -электроны алюминия,  $ds$ -электроны переходных металлов), концентрация и 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, 5, 7]. При этом, совершенно очевидно, что при легировании данного класса жаропрочных никелевых сплавов используется более 12–15 элементов и найти оптимальный состав для получения желаемого комплекса свойств достаточно сложно, поскольку требуется длительное время и большие финансовые затраты. Особенно это касается высокожаропрочных никелевых сплавов, содержащих в составе дорогой и дефицитный рений.

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, чем величина  $\Delta E \geq 0,04$ , склонны к образованию избыточ-

ных фаз типа  $Ni_3Ti$ ,  $Ni_3Nb$ ,  $Ni_3Ta$ . Сплавы, имеющие большее отрицательное значение параметра, чем величина  $\Delta E \leq -0,04$ , склонны к образованию  $\mu$ - фазы или двойных карбидов типа  $Me_6C$  [1, 5, 7]. Расчеты для внутримарочных составов сплава ЖС-32 показали, что значения параметра дисбаланса  $\Delta E$  находятся в диапазоне от  $-0,10$  до  $-0,06$ . При этом, металлографическими исследованиями было подтверждено, что при длительном температурном воздействии (до  $1000^\circ C$ ) образуются пластинчатые выделения  $\mu$ - фазы на основе  $(Co_7W_6)$  и двойных карбидов на основе  $(Ni_3, W_3)C$ .

В таблице 3 представлена зависимость  $\bar{N}_V$ - фактора и параметра дисбаланса системы легирования  $\Delta E$  от величины соотношения тантала к рению с учетом параметра  $Cr/(Cr+Mo+W)$  в опытных составах «1»–«5», в сравнении со сплавом ЖС-32.

Сравнительные исследования расчетными методами показали, что в структуре опытных составов № 1–5 и сплаве ЖС-32 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 таблицы 3 видно, что с повышением соотношения тантала к рению от 1 до 6, в опытных составах № 1–5 повышается величина  $\bar{N}_V$ - фактора с 1,66 до 1,82, а значение параметра дисбаланса системы легирования  $\Delta E$  снижается с  $-0,08$  до  $-0,05$  при практически постоянном соотношении  $Cr/(Cr+Mo+W)$ .

Вместе с тем, сопоставление расчетных значений  $\bar{N}_V$ - фактора для  $\gamma$ - твердых растворов опытных составов № 1–5 показывает, что с увеличением соотношения тантала к рению величина параметра дисбаланса системы легирования  $\Delta E$  постепенно снижается, а величина  $\bar{N}_V$ - фактора повышается, по сравнению со сплавом ЖС-32. Это указывает на то, что вероятность выделения избыточных фаз типа  $\mu$ - фазы или двойных карбидов  $Me_6C$  неблагоприятной морфологии еще остается, но значительно снижается, так как опытные составы «1»–«5» имеют большее отрицатель-

**Таблица 3** – 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	$N_V$ - фактор	Cr / (Cr+Mo+W)	$\pm \Delta E$
ЖС-32	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

ное значение параметра  $\Delta E$ , чем граничная величина  $-0,04$ .

Механические испытания на кратковременную прочность образцов моно [001] опытных составов № 1–5 показали, что в опытном составе № 5, содержащем 9 % тантала и 1,5 % рения, прочностные характеристики заметно снижаются, по сравнению со сплавом ЖС-32 и опытными составами № 1–4. Сравнительный анализ полученных результатов показал, что в сплаве ЖС-32 наиболее оптимальным является соотношение  $Ta/Re = 4$ , как с точки зрения структурной стабильности и прочностных характеристик, так и экономических подходов, которые имеет опытный состав № 4, содержащий 8 % тантала и 2 % рения (см. табл. 3, 4).

В таблице 5 приведены результаты механи-

ческих испытаний при температурах 800, 900 и 1000 °С на 100- и 1000- часовую длительную прочность и пластичность образцов моно [001] с оптимальным соотношением  $Ta/Re = 4$  (состав № 4), в сравнении со сплавом ЖС-32, где соотношение  $Ta/Re = 1$  (см. табл. 3).

Таким образом, анализ результатов показал, что опытный состав № 4 при эквивалентном уровне прочностных характеристик обладает лучшей структурной стабильностью, чем сплав ЖС-32 (см. табл. 3, 4). При этом содержит в 2 раза меньшее содержание рения, что существенно снижает стоимость сплава. Следует отметить, что при получении лопаток методом направленной (моно) кристаллизации по серийной технологии не требуется изменений в существующем технологическом процессе.

**Таблица 4** – Результаты сравнительных механических испытаний на кратковременную прочность монокристаллических образцов [001] исследованных составов

Сплав №	$t_{исп.},$ °С	$\sigma_B,$ МПа	$\sigma_{0,2},$ МПа	$\delta,$ %
ЖС-32	20	1310	1000	7,5
1		1305	995	7,7
2		1305	995	7,9
3		1300	990	8,2
4		1300	990	8,5
5		1240	880	9,5
ЖС-32	800	1300	1020	6,5
1		1300	1020	6,8
2		1295	1015	7,1
3		1290	1010	7,6
4		1290	1010	7,9
5		1220	930	9,1
ЖС-32	900	1010	850	16,0
1		1010	845	16,3
2		1005	845	16,8
3		1005	840	17,2
4		1000	840	17,6
5		920	760	19,1
ЖС-32	1000	730	610	16,0
1		725	610	16,4
2		725	605	16,9
3		720	600	17,1
4		720	600	17,8
5		640	520	23,0

**Таблица 5** – Пределы характеристик длительной прочности и пластичности образцов моно [001] опытного состава № 4, в сравнении со сплавом ЖС-32

Сплав	$t_{исп.},$ °С	$\sigma_{100},$ МПа	$\sigma_{1000},$ МПа	$\delta_{100},$ %	$\delta_{1000},$ %
ЖС-32	800	615 / 695	495 / 580	7,5 / 11,5	12,0 / 16,5
	900	420 / 480	305 / 355	7,0 / 10,0	33,0 / 37,5
	1000	215 / 250	140 / 185	10,5 / 14,0	9,5 / 14,5
Состав № 4	800	610 / 685	480 / 570	8,0 / 12,0	13,5 / 18,0
	900	410 / 470	300 / 350	8,5 / 11,5	34,0 / 38,0
	1000	210 / 240	135 / 175	9,0 / 13,5	11,0 / 15,5

**Выводы**

1. Увеличение соотношения тантала к рению в исследованном диапазоне от 1 до 6 приводит к снижению величины параметра дисбаланса  $\Delta E$  системы легирования сплава ЖС-32 с - 0,08 до -0,05, в результате чего повышается структурная и фазовая стабильность.

2. Замена в химическом составе сплава ЖС-32 части рения танталом (при оптимальном соотношении  $Ta/Re = 4$ ) экономически целесообразно, так как при сохранении характеристик жаропрочности на эквивалентном уровне, снижается его стоимость на 40–45 %.

**Перечень ссылок**

1. Каблов Е. Н. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. Юбилейный науч.-техн. сб. / Каблов Е. Н.; [под общ. ред. акад. РАН Е. Н. Каблова]. – М. : ВИАМ, 2007. – 438 с.
2. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / [Р. Е. Шалин, И. Л. Светлов, Е. Б. Качанов и др.]. – М. : Машиностроение, 1997. – 336 с.
3. Каблов Е. Н. Монокристаллические ренийсодержащие сплавы для турбинных лопаток ГТД / Е. Н. Каблов, В. Н. Толораия, Н. Г. Орехов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2002. – № 7. – С. 7–11.
4. Каблов Е. Н. Перспективы применения литейных жаропрочных сплавов для производства турбинных лопаток ГТД / Е. Н. Каблов, С. Т. Кишкин // *Газотурбинные технологии*. – 2002. – Январь-февраль. – С. 34–37.
5. 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.
6. Симс Ч. Т. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Симс Ч. Т., Столофф Н. С., Хагель У. К. ; [пер. с англ. под ред. Р. Е. Шалина]. – М. : Металлургия, 1995. – Кн. 1. – 384 с.
7. 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.
8. 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.

*Поступила в редакцию 01.10.2009*

**A. G. Andriyenko, S. V. Gayduk, V. V. Kononov, O. V. Gnatenko**

**EVALUTION OF TANTALUM/RHENIUM RATIO INFLUENCE UPON THE STRUCTURAL STABILITY AND MECHANICAL PROPERTIES OF ЖС-32 HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY**

*Розрахунковими методами досліджено вплив співвідношення концентрації танталу до ренію на структурну і фазову стабільність сплаву ЖС-32. Оцінено вплив даного співвідношення в інтервалі від 1 до 6 на характеристики міцності сплаву в температурному діапазоні 800–1000 °С. Приведено результати механічних випробувань на короткочасну і довготривалу міцність досліджених складів, в порівнянні зі сплавом ЖС-32.*

***Жароміцні нікелеві сплави, спрямована (моно) кристалізація, термічна обробка, структурна і фазова стабільність, дисбаланс системи легування, короткочасна і довготривала міцність***

*Influence of Ta / Re ratio on the structural and phase stability of ЖС-32 alloy was investigated by means of calculation techniques. Influence of Ta / Re ratio ranging from 1 to 6 on the strength parameters of the alloy in the temperature range of 800–1000 °C was evaluated. There were presented results of mechanical testing for long-term and short-term strength of the investigated compositions in comparison with ЖС-32 alloy.*

***Heat-resistant nickel alloys, direct (mono) crystallization, heat treatment, structural and phase stability, disbalance of alloying system, short-term and long-term strength***