

УДК 621.74.045:669.245.018

О. В. Гнатенко¹, канд. техн. наук С. В. Гайдук², д-р техн. наук В. В. Наумик²¹ ОАО «Мотор Сич», ² Запорожский национальный технический университет
г. Запорожье

РАЗРАБОТКА ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ДЛЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОТЛИВОК

Разработан экономнолегированный жаропрочный никелевый сплав с пониженным содержанием рения и повышенным содержанием тантала, обладающий прочностными свойствами при комнатных и высоких температурах на уровне сплава ЖС32-ВИ, существенно большей стойкостью против высокотемпературной коррозии, применение которого обеспечивает снижение себестоимости ответственных отливок на 40–45 %.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, лопатка, рений, тантал, кратковременная прочность, длительная прочность, высокотемпературная коррозия.

Постановка вопроса

Ответственные отливки для силовых установок энергетического и авиационного машиностроения изготавливаются из дорогостоящих сложнолегированных жаропрочных никелевых сплавов [1, 2]. Данные отливки изготавливаются методом высокоскоростной направленной кристаллизации на установках типа УВНК-8П. Современные экономические условия требуют снижения себестоимости любого изделия с сохранением уровня его эксплуатационных свойств и надежности. Одним из путей снижения стоимости отливок из жаропрочных никелевых сплавов является использование в шихте технологического возврата. Другим перспективным направлением является разработка новых сплавов, отвечающих не только высоким эксплуатационным, но и экономическим требованиям.

Турбинные лопатки современных как авиационных, так и наземных силовых установок изготавливают, как правило, из жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ. Данный сплав отличается очень сложной системой легирования и, соответственно, высокой стоимостью, при этом не обладает коррозионной стойкостью, вследствие чего на лопатки дополнительно наносят коррозионное

покрытие. Самым дорогостоящим легирующим элементом в данном сплаве является рений, содержание которого составляет 4 %. Таким образом, снизить стоимость лопаток газотурбинных двигателей можно заменив его на другой, менее дорогостоящий элемент, который при этом обеспечит наличие у сплава механических свойств на уровне близком к сплаву ЖС32-ВИ.

Методика исследований

Изучали 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 % на его свойства.

Плавки проводили с использованием в качестве базовой паспортной шихтовой заготовки сплава ЖС32-ВИ. Из всех опытных сплавов методом высокоскоростной направленной кристаллизации на установке типа УВНК-8П в соответствии с серийной технологией со скоростью кристаллизации 10 мм/мин были получены литые образцы с монокристаллической макроструктурой.

Химический состав металла опытных плавок проводили спектральным методом на оптическом эмиссионном приборе ARL-4460. Результаты анализа химического состава приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав сплавов опытных плавок

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.

Литые заготовки монокристаллических образцов опытных плавок и сплава ЖС32-ВИ проходили 100 % контроль макроструктуры путем травления в водном растворе, содержащем на 1 дм³ 700–800 г хлорного железа и 120–150 см³ соляной кислоты, а также контроль кристаллографической ориентации (КГО) на установке ДРОН-3М.

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

Изучили стойкость опытных образцов с направленной (моно) [001] структурой против высокотемпературной коррозии (ВТК), в сравнении со сплавом ЖС32-ВИ, в синтетической золе при температурах испытаний 800 и 850 °С по методике, разработанной Никитиным В.И. (ЦКТИ им. И. И. Ползунова) [3, 4].

Для коррозионных испытаний использовались стандартные цилиндрические образцы диаметром 10 мм и длиной 12 мм, на которые после предварительного обезжиривания, измерения и взвешивания на аналитических весах с точностью ($\pm 0,0005$ г), наносилась синтетическая зола в количестве 15 мг/см², имитирующей продукты сгорания газотурбинного топлива следующего состава: Na₂SO₄ – 66,2 %; Fe₂O₃ – 20,4 %; NiO – 8,3 %; CaO – 3,3 %; V₂O₅ – 1,8 % (по массе). Затем образцы исследуемых сплавов помещались и выдерживались в печи на платформе из огнеупорного материала в воздушной атмосфере. Испытания при обеих температурах проводились в течение 600 часов. После проведения экспериментов продукты коррозии удалялись по методике водородного восстановления окислов [4]. После проведения коррозионных испытаний образцы исследовались методами весового, металлографического и рентгеноструктурного фазового анализов. Стойкость образцов опытных составов к ВТК оценивалась по средней скорости коррозии \bar{V}_q г/(м²·с).

Основной материал исследований

Температуры термической обработки образцов опытных сплавов выбирались на основании определенных методом дифференциального термического анализа соответствующих характеристических температур (табл. 2): $t_{П.Р.\gamma'}$ – температура полного растворения основной упрочняющей γ' - фазы; $t_{ЭВТ}$ – температура плавления γ - γ' эвтектики; $\Delta t = t_{ЭВТ} - t_{П.Р.\gamma'}$ – ширина интервала для проведения высокотемпературной гомогенизации первой ступени.

Первая ступень термической обработки (ТО) – $t_{ГОМ}^I$ (высокотемпературная гомогенизация) для каждого опытного сплава назначалась индивидуально, внутри интервала Δt , между температурой эвтектических превращений $t_{ЭВТ}$ и полного $t_{П.Р.\gamma'}$ растворения γ' - фазы (см. табл. 2). При данной температуре образцы выдерживали в течение 4 часов.

Вторая ступень термической обработки (низкотемпературная гомогенизация) всем опытными 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 ЖС32-ВИ термическая обработка проводилась в соответствии с паспортным режимом (см. табл. 2).

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 ЖС32-ВИ и опытными сплавами № 1–№4 (рис. 1). Сплав №4, содержащий 8% тантала и 2% рения является оптимальным с точки зрения прочностных характеристик и себестоимости.

В таблице 3 приведены результаты испытаний на длительную прочность и пластичность в течение 100 и 1000 часов при температурах 800, 900 и 1000 °С образцов с монокристаллической макроструктурой [001] с оптимальным содержанием Ta и Re (сплав №4), в сравнении со сплавом ЖС32-ВИ.

Таблица 2 – Температуры фазовых превращений в исследованных составах

Сплав №	Характеристические температуры, °С				
	$t_{П.Р.\gamma'}$	$t_{ЭВТ}$	Δt	$t_{ГОМ}^I$	$t_{ГОМ}^{II}$
ЖС32-ВИ	1273	1306	33	1280	1050
1	1270	1302	32	1275	1050
2	1265	1297	32	1270	1050
3	1260	1291	31	1265	1050
4	1255	1286	31	1260	1050
5	1250	1280	30	1255	1050

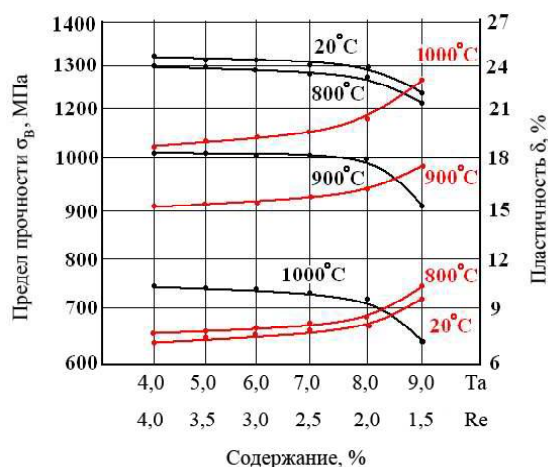


Рис. 1. Зависимость предела прочности и пластичности опытных сплавов при различных температурах от содержания Ta и Re

Анализ приведенных результатов показывает, что опытный сплав № 4 обладает прочностными характеристиками на уровне эквивалентном сплаву ЖС32-ВИ (см. рис. 1 и табл. 3).

Анализ результатов сравнительных испытаний на стойкость против высокотемпературной коррозии показал, что скорость коррозии образцов опытных сплавов № 1–№ 5 снижается во всем диапазоне исследованных концентраций тантала и рения при обеих температурах испытаний (табл. 4), что обусловлено изменением химического и фазового состава продуктов ВТК, в сравнении со сплавом ЖС32-ВИ.

Наилучшей стойкостью к высокотемпературной коррозии в синтетической золе при обеих температурах испытаний обладает сплав № 5 (см. табл. 4). По сравнению со сплавом ЖС32-ВИ, в опытном сплаве № 5 скорость ВТК снижается примерно в 2,8 раза при температуре 800 °С и в 2,5 раза при 850 °С.

Анализ полученных результатов позволил выяснить механизм и оценить влияние соотношения тантала к рению в сплаве ЖС32-ВИ на химический и фазовый состав продуктов коррозии после испытаний в синтетической золе при температурах 800 и 850 °С в течение 600 часов [5].

Исследование фазового состава продуктов коррозии методом рентгеноструктурного анализа показало, что продукты имеют достаточно сложный состав и содержат большое количество различных шпинелей, оксидных и сульфидных фаз, так как исследованные сплавы легированы большим количеством элементов. По сравнению со сплавом ЖС32-ВИ и опытными сплавами № 1 и № 2, опытные сплавы № 3–№ 5 имели достаточно плотную и неразрушающуюся пленку продуктов коррозии, в фазовом составе которой наблюдалось значительно большее количество шпинели хрома, чем шпинели алюминия.

Рентгеноструктурный анализ состава поверхностного слоя продуктов коррозии, сформированного на образцах из сплава ЖС32-ВИ после испытаний в синтетической золе при обеих температурах, выявил в качестве основных фазовых составляющих шпинель хрома $NiOCr_2O_3$ и

Таблица 3 – Пределы характеристик длительной прочности и пластичности образцов с монокристаллической макроструктурой [001] опытного сплава № 4, в сравнении со сплавом ЖС32-ВИ

Сплав	$t_{исп.}, ^\circ C$	σ_{100}, MPa	σ_{1000}, MPa	$\delta_{100}, \%$	$\delta_{1000}, \%$
ЖС32-ВИ	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
Сплав № 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

Таблица 4 – Скорость высокотемпературной коррозии образцов с монокристаллической макроструктурой [001] в синтетической золе в течение 600 часов

Сплав №	Содержание, % (по массе)		Средняя скорость ВТК, $\overline{V}_q \cdot 10^4 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ при температуре, °С	
	Ta	Re	800	850
ЖС32-ВИ	4,0	4,0	6,9	8,9
1	5,0	3,5	5,8	7,0
2	6,0	3,0	4,2	5,6
3	7,0	2,5	3,1	4,5
4	8,0	2,0	3,0	3,6
5	9,0	1,5	2,5	3,5

оксиды никеля NiO, а также в меньших количествах оксиды: никеля NiAl₂O₄, NiCr₂O₄, хрома Cr₂O₃, тантала Ta₂O₅ и сульфиды никеля Ni₃S₂.

Сравнительный анализ результатов показал [5], что с повышением соотношения тантала к рению в фазовом составе продуктов ВТК опытных сплавов № 1–№ 5 постепенно снижается концентрация оксидов никеля NiO, NiAl₂O₄ и сульфидов никеля Ni₃S₂. При этом повышается концентрация шпинели хрома NiOCr₂O₃, оксидов хрома Cr₂O₃ и тантала Ta₂O₅, что обеспечивает снижение скорости ВТК в условиях сульфидно-оксидной коррозии, по сравнению со сплавом ЖС32-ВИ.

В составе продуктов коррозии на поверхности образцов сплава ЖС32-ВИ и опытных сплавов № 1, № 2 дополнительно были выявлены Cr₂S₃, NiCr₂O₄, CoS₂. На опытных образцах сплавов № 3–№ 5 данные фазовые составляющие не обнаружены. В фазовом составе продуктов ВТК сплава ЖС32-ВИ содержится большее количество фазовых составляющих, не обладающих защитными свойствами – NiO, NiAl₂O₄, NiCr₂O₄, Ni₃S₂ и меньшее количество соединений, которые обладают защитными свойствами – шпинель хрома NiOCr₂O₃, оксиды хрома Cr₂O₃ и тантала Ta₂O₅.

В фазовом составе продуктов ВТК на поверхности образцов всех опытных сплавов с соотношением тантала к рению значительно выше базового содержится большее количество соединений, обладающих защитными свойствами – шпинель хрома NiOCr₂O₃, оксиды хрома Cr₂O₃ и тантала Ta₂O₅, сульфиды тантала TaS₂, и значительно меньшее количество соединений (либо полное их отсутствие), не обладающих защитными свойствами – оксиды NiO, NiAl₂O₄ и сульфиды Cr₂S₃, NiCr₂S₄, CoS₂, по сравнению со сплавом ЖС32-ВИ.

Увеличение содержания тантала в сплаве приводит к повышению концентрации более стойких, с точки зрения термодинамики, соединений Cr₂O₃, Ta₂O₅, TaS₂ в фазовом составе продуктов коррозии, что говорит о замедлении диффузионных процессов. Это обеспечивает снижение скорости ВТК у всех опытных составов № 1–№ 5, по сравнению со сплавом ЖС32-ВИ (см. табл. 4).

Таким образом, повышение стойкости экономнолегированного сплава на базе ЖС32-ВИ против ВТК обеспечивается за счет снижения скорости диффузионных процессов, а также изменения химического и фазового состава поверхностного слоя продуктов коррозии в результате способности тантала образовывать с серой и кислородом термодинамически более стойкие оксиды и сульфиды.

Выводы

Установлено, что в описанных условиях прочностные характеристики сплава как кратковре-

менные при комнатной, так и длительные при повышенных температурах неуклонно снижаются. При этом данное снижение сначала является относительно незначительным, а затем, с повышением содержания тантала до 9,0 %, а рения – соответственно снижения до 1,5 % – существенно увеличивается.

Исследованиями установлено, что описанное изменение химического состава опытных сплавов также приводит к увеличению стойкости образцов против высокотемпературной коррозии в 2,5–3 раза. Коррозионная стойкость опытных образцов повышалась во всем диапазоне исследованного изменения химического состава, при этом вначале значительно возрастала, а затем стремилась к стабилизации на определенном уровне, что свидетельствует о нецелесообразности продления области исследований.

Таким образом, сплав, содержащий 8 % тантала и 4 % рения, обладает прочностными характеристиками, близкими к сплаву ЖС32-ВИ, при этом почти в три раза превосходит его по стойкости против высокотемпературной коррозии и содержит в два раза меньше рения. В результате обеспечивается снижение себестоимости ответственных отливок на 40–45 %. Для получения качественных отливок из данного сплава не требуется корректировка действующей технологии литья методом высокоскоростной направленной кристаллизации.

Список литературы

1. Каблов Е. Н. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. Юбилейный научно-технический сборник ; под общ. ред. акад. РАН Е. Н. Каблова. – М. : ВИАМ, 2007. – 438 с.
2. Шалин Р. Е. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / [Р. Е. Шалин, И. Л. Светлов, Е. Б. Качанов и др.]. – М. : Машиностроение, 1997. – 336 с.
3. Никитин В. И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин / Никитин В. И. – Л. : Машиностроение, 1987. – 272 с.
4. Никитин В. И. Влияние состава никелевых сплавов на их коррозионную стойкость в золе газотурбинного топлива / В. И. Никитин, М. Б. Ревзюк, И. П. Комисарова // Труды ЦКТИ им. И. И. Ползунова. – Л., 1978. – Вып. 158. – С. 71–74.
5. Оценка влияния тантала на высокотемпературную коррозионную стойкость монокристаллов никелевых сплавов / [А. Г. Андриенко, С. В. Гайдук, Ю. М. Федорченко и др.] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2005. – № 1. – С. 61–64.

Поступила в редакцию 24.05.2011

Гнатенко О.В., Гайдук С.В., Наумик В.В. Розробка економнолегованого жароміцного сплаву для відповідальних виливків

Розроблено економнолегований жароміцний нікелевий сплав з пониженим вмістом ренію та підвищеним вмістом танталу, що володіє властивостями міцності при кімнатних та високих температурах на рівні сплаву ЖС32-В, суттєво більшою стійкістю проти високотемпературної корозії, використання якого забезпечує зниження собівартості відповідальних виливків на 40–45 %.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав, лопатка, реній, тантал, короткочасна міцність, довготривала міцність, високотемпературна корозія.

Gnatenko O., Gayduk S., Naumyk V. Development of economically alloyed heatproof alloy for the responsible casts

It is developed the economically alloyed heatproof nickel alloy with the lowered maintenance of rhenium and enhanced maintenance of tantalum, which have the strength properties at the room and high temperatures at the level of alloy of HA32-VI, substantially more resistant to high temperature corrosion, application of which is provide the responsible casts prime costs lowering on 40–45 %.

Key words: heatproof nickel alloy, cast blade, rhenium, tantalum, short-term durability, long-term durability, high temperature corrosion.