

УДК 669.018.44

*Д.Е. Каблов¹, В.В. Сидоров¹, П.Г. Мин¹, Ю.А. Пучков²***ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ПРИМЕСЕЙ И ДОБАВКИ ЛАНТАНА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖС36**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-2-2

Показано, что, являясь примесными поверхностно-активными элементами, кислород и сера способствуют образованию «паразитных» кристаллов, ускоряют диффузию на межфазных границах, рост пор, трещин и огрубление упрочняющей γ' -фазы.

Лантан превосходит по рафинирующей способности другие редкоземельные металлы и магний, и введение добавки лантана позволяет получить ультрачистый по содержанию кислорода и серы сплав ЖС36, а также увеличить количество годных монокристаллов из этого сплава. Сегрегируя на межфазных границах, лантан вытесняет серу, снижая зернограницную диффузию и подвижность межфазных дислокаций. Показано, что лантан является высокоэффективной рафинирующей, микролегирующей и модифицирующей добавкой, увеличивающей жаропрочность, циклическую прочность и жаростойкость монокристаллов из сплава ЖС36.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 10.1. «Ресурсосберегающие технологии выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов с учетом переработки всех видов отходов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы, поверхностно-активные примеси, кислород, сера, редкоземельные металлы, лантан, структура, сегрегация, жаропрочность, сопротивление ползучести, циклическая долговечность, усталость, жаростойкость.

It is shown that impurity surface-active elements oxygen and sulfur contribute to the formation of misaligned (stray) grains and accelerate the diffusion at interfaces, growth of pores, cracks and coarsening of the hardening γ' -phase. Lanthanum is superior in refining capacity than the other rare-earth metals and magnesium, and the introduction of lanthanum addition allows to obtain ultrapure in the content of oxygen and sulfur alloy ZhS36, and to decrease misaligned grain defect formation. Segregating at interfaces, lanthanum replaces sulfur and decrease interface diffusion and mobility of interface dislocations. It is shown that lanthanum is a highly effective refining, microalloying and modifying addition that increase high temperature strength, cyclic strain life and heat resistance of ZhS36 single crystals.

The work was performed with in the scope of complex scientific direction 10.1. realization: «The resource saved technology of perspective cast and wrought super alloy melting with allowance for all scrap forms processing» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: single crystal superalloys, surface-active impurities, oxygen, sulfur, rare earth metals, lanthanum, structure, segregation, high temperature strength, creep resistance, fatigue life, fatigue strength, oxidation resistance.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана [Bauman Moscow State Technical University]; e-mail: bauman@bmstu.ru

Введение

Развитие газотурбинных двигателей и установок невозможно без совершенствования жаропрочных сплавов, в том числе снижения в них содержания вредных примесей, в частности примесей поверхностно-активных элементов – кислорода и серы [2–7], которые уменьшают величину поверхностного натяжения, оказывая влияние на процессы кристаллизации [8].

Кислород и сера являются элементами VI группы Периодической системы Д.И. Менделеева и сильно превосходят по электроотрицательности компоненты жаропрочного сплава. Взаимодействие этих примесей с атомами, находящимися на поверхности жидкого сплава, на малоугловых и высокоугловых границах закристаллизовавшегося сплава, где часть связей атомов нереализована, переводит сплав в термодинамически более устойчивое состояние. Склонность этих примесей к сегрегации на высокоугловых и малоугловых границах обусловлена также их низкой растворимостью в основных фазах сплава [9]. В табл. 1 приведены сведения о растворимости и парциальных коэффициентах диффузии этих примесей в никеле [10]. Из данных табл. 1 следует, что по диффузионной подвижности кислород почти на 4 порядка уступает сере. Температуры плавления соединений, которые сера и кислород образуют с компонентами сплава, также сильно отличаются. В частности, в отличие от оксидов, сульфиды никеля являются легкоплавкими. Наличие сульфидов крайне отрицательно сказывается на статической и циклической долговечности, а также жаростойкости [11, 12]. Оксиды являются структурными концентраторами напряжений и снижают циклическую долговечность.

В монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах (ЖНС) отсутствуют границы зерен, емкость стоков для примесных атомов существенно снижена, поэтому в качестве монокристаллических сплавов используются ультрачистые по содержанию примесей сплавы [3].

Таблица 1

Атомные радиусы ($R_{ат}$), максимальная растворимость (S_{max}) и коэффициенты диффузии (D) легирующих элементов, примесей и добавок в никеле

Параметр	Значения параметра									
	для легирующих элементов					для примесей		для добавок		
	Ni	Al	Cr	W	Re	O	S	Mg	La	Ce
$R_{ат}$, пм	135	125	140	135	135	60	100	150	195	185
S_{max} , %	100	12	47	39,5	41	0,01	0	0	0	1
$D \cdot 10^{-14}$, см ² /с (при 1000°C)	361	1882	720	108	28	28	144424	6992	>1455	1455

За последнее время применение редкоземельных металлов (лантана, лантаноидов, иттрия и скандия) в качестве рафинирующих, модифицирующих и микролегирующих добавок к ЖНС показало высокую эффективность [13–16]. Редкоземельные металлы (РЗМ) оказывают комплексное положительное влияние на жаропрочность, выносливость и жаростойкость ЖНС. Однако выбор РЗМ в качестве добавки часто недостаточно обоснован. Кроме того, влияние РЗМ на структуру и свойства монокристаллических жаропрочных сплавов изучено еще сравнительно мало.

В качестве рафинирующей и модифицирующей добавки в данной работе выбран лантан. По содержанию в земной коре (39 мг/кг) лантан уступает среди лантаноидов только церию (66,5 мг/кг) и неодиму (41,5 мг/кг). Лантана в земной коре сравнительно много, его содержание в 3 раза больше, чем содержание такого широко применяемого металла, как олово.

Лантан наиболее активен при нейтрализации серы и кислорода [17], о чем свидетельствуют данные табл. 2, где в качестве меры химического сродства примеси к

добавке выбрана разница их электроотрицательностей. Эти данные объясняют возможность получения ультрачистых по кислороду и сере жаропрочных сплавов за счет образования и удаления при вакуумно-индукционной плавке и фильтрации через пенокерамические фильтры тугоплавких оксидов и сульфидов лантана [18].

Таблица 2

Разность электроотрицательностей примесей и добавок ($\Delta\chi=\chi_{пр}-\chi_{доб}$)

Добавки Примеси	La	Ce	Y	Hf	Mg
O	2,34	2,32	2,22	2,14	2,13
S	1,48	1,46	1,36	1,28	1,27

По величине электроотрицательности и активности лантан уступает кальцию. Но по сравнению с кальцием и магнием температура кипения лантана выше (табл. 3), упругость пара ниже, поэтому он лучше кальция сохраняется при вакуумно-индукционной плавке, что существенно упрощает контроль за его содержанием в сплаве при плавке. По величине поверхностного натяжения лантан превосходит магний, но уступает никелю и алюминию. Поверхностное натяжение γ_m и его температурный коэффициент $d\gamma_m/dT$ при температурах плавления составляют для никеля и алюминия соответственно:

- для Ni: $\gamma_m=1796$ мН/м; $d\gamma_m/dT=-0,35$ мН/(м·°С);
- для Al: $\gamma_m=871$ мН/м; $d\gamma_m/dT=-0,155$ мН/(м·°С).

Таблица 3

Физические свойства щелочноземельных и редкоземельных металлов

Металл	Плотность, г/см ³	Температура, °С		γ_m , мН/м	$d\gamma_m/dT$, мН/(м·°С)
		плавления	кипения		
Mg	1,737	650	1105	557	-0,26
Ca	1,55	839	1484	–	–
La	6,16	920	3447	728	-0,10
Ce	6,77	804	3467	–	–

С использованием метода большой капли в работе [8] определена зависимость поверхностного натяжения γ_m никеля и сплава никеля с 0,0330% (по массе) серы. Установлено [8], что сера сильно снижает поверхностное натяжение никеля и обладает высокой поверхностной активностью. Целью данной работы является исследование влияния поверхностно-активных примесей кислорода, серы и добавки лантана на структуру и служебные свойства монокристаллов из сплава ЖС36.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран серийный литейный высокожаропрочный безуглеродистый ренийсодержащий сплав для монокристаллического литья – ЖС36 (ТУ1-595-4-473), который в настоящее время широко применяется в авиационной промышленности для изготовления рабочих лопаток ГТД и ГТУ. Состав сплава приведен в табл. 4.

Таблица 4

Содержание основных легирующих элементов в сплаве ЖС36

Содержание элементов, % (по массе)									
Ni	C	Cr	W	Mo	Co	Al	Ti	Nb	Re
Основа	≤0,015	3,5–4,5	10,5–13,0	1,0–2,2	5,0–9,0	5,5–6,2	0,7–1,5	0,7–1,5	1,8–2,3

Сплав выплавляли в вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002 с массой тигля 10–20 кг под вакуумом 0,13–0,67 Па. Содержание легирующих элементов определяли во ФГУП «ВИАМ» методами оптико-эмиссионной спектроскопии с искровым возбуждением пробы на установке ARL 4460 (Швейцария) и волно-дисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопией на установке S4 EXPLORER (Германия).

Для снижения содержания примесей в сплавах при плавке в печи ВИАМ-2002 последовательно вводили магний и непосредственно перед заливкой расплава – лантан. Металл заливали в стальную трубу с внутренним диаметром 90 мм. Часть плавки заливали через пенокерамический фильтр, нагретый до 1000°C.

Полученные слитки подвергали механической обработке поверхности, а затем переплавляли методом направленной кристаллизации на вакуумных индукционных установках УВНК-9А и УВНС-5 для получения монокристаллических заготовок с кристаллографической ориентацией <001>. Предварительно в готовые прокаленные керамические формы из оксида алюминия устанавливали затравки из сплава системы Ni–W с аксиальной ориентацией <001>. Расплавленный металл заливали в нагретые керамические формы, после чего начинали процесс направленной кристаллизации монокристаллов при движении формы с заданной скоростью (4–6 мм/мин) из зоны нагрева в зону охлаждения.

Величина теплового градиента на установке УВНК-9А составляла 70°C/см, тогда как на высокоградиентной установке УВНС-5 она составляла 150°C/см, т. е. в 2 раза выше. Это позволяет получать в отливках совершенную тонкодендритную структуру монокристалла с минимальными значениями междендритного расстояния и микропористости.

Монокристаллические заготовки термообработаны по режиму в соответствии паспортом №1618 на сплав ЖС36. Из термически обработанных по ТУ монокристаллических заготовок готовили образцы и проводили испытания на длительную прочность – на машине Карра 50LA фирмы Zwick (ГОСТ 10145), а также на малоцикловую усталость – на машине DSB-10 (ГОСТ 25.502).

При выплавке сплавов применяли наиболее чистые шихтовые материалы, предусмотренные технологическими инструкциями на производство литейных никелевых жаропрочных сплавов.

Результаты и обсуждение

Введение добавки лантана в сплав ЖС36, содержащий примеси серы, в условиях вакуумной индукционной плавки в печи ВИАМ-2002 с применением фильтрации при разливе позволило получить монокристаллические заготовки с ультранизким содержанием кислорода (<0,001%) и серы (<0,0005%). Это можно объяснить тем, что при их взаимодействии именно с лантаном сплав переходит в термодинамически наиболее устойчивое состояние (ΔH_{298}^0 – энтальпия), при котором образуются твердые включения (табл. 5), адсорбирующиеся на плавильном тигле и пенокерамическом фильтре [18]. Остаточное содержание лантана в монокристаллах составляло от 0,014 до 0,018% (по массе), что соответствует максимальному упрочняющему эффекту при введении этой добавки [19].

Таблица 5

Физические свойства оксидов, сульфидов и оксисульфидов лантана

Свойства	Значения свойств		
	La ₂ O ₃	La ₂ S ₃	La ₂ O ₂ S
Температура плавления, °С	2315	2100	1940
ΔH_{298}^0 , кДж/моль	-1840	-1500	–
Плотность, г/см ³	6,56	4,91	5,8

Распространенным браком монокристаллического литья является образование «паразитных» зерен. Добавка лантана увеличила количество годных монокристаллов, отлитых на установках УВНК-9А и УВНС-5 (табл. 6). Известно, что «паразитные» зерна появляются в местах с резко отличающимся температурным градиентом вследствие изменения конвективного потока жидкого металла в междендритном пространстве. Но наличие градиента поверхностного натяжения $d\gamma/dT$, также как и градиента температур dT/dx , может вызывать изменение в движении жидкого металла [20] и способствовать образованию «паразитных» зерен.

Таблица 6

Результаты контроля макроструктуры заготовок из сплава ЖС36 с различным содержанием серы

Установка	Условный номер плавки	Содержание [S], % (по массе)	Результаты контроля макроструктуры, шт.	
			МОНО	НК
УВНК-9А	1	0,0072	15	3 (16%)
	3	0,0007	17	1 (6%)
УВНС-5	1	0,0072	6	4 (40%)
	3	0,0007	8	2 (20%)

При испытании сплава ЖС36 на длительную прочность по ТУ (при 975°С, $\sigma=320$ МПа, $\tau \geq 40$ ч) показано, что значения долговечности плавов с пониженным и повышенным уровнем примеси серы приблизительно одинаковы, однако при испытаниях на базе 500 ч (при 1000°С, $\sigma=185$ МПа) долговечность повышается при снижении содержания серы в сплаве с 0,0072 до 0,0007% (по массе) после присадки лантана – особенно на металле, полученном на установке УВНК-9А (рис. 1). При исследовании разрушенных образцов с использованием МРСА обнаружена сегрегация серы и лантана на межфазной границе γ/γ' -фаз.

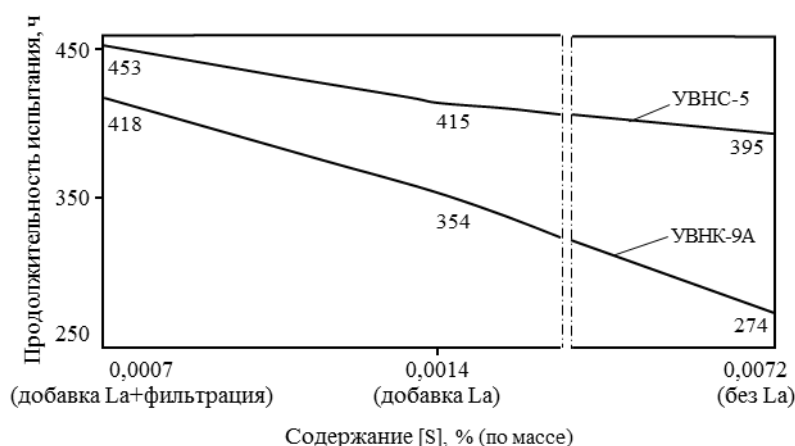


Рис. 1. Влияние переменного содержания серы на долговечность монокристаллов $\langle 001 \rangle$ сплава ЖС36, отлитых с различным температурным градиентом на установках УВНК-9А (70°С/см) и УВНС-5 (150°С/см)

Исследовали влияние примесей серы на характеристики малоциклового усталости (МЦУ) монокристаллов при температуре 900°C, отлитых на установках УВНК-9А и УВНС-5. Установлена прямая зависимость между содержанием серы в металле и средним числом циклов до разрушения: со снижением содержания серы среднее число циклов до разрушения увеличивается (рис. 2) – особенно у монокристаллов, полученных в установке УВНК-9А.

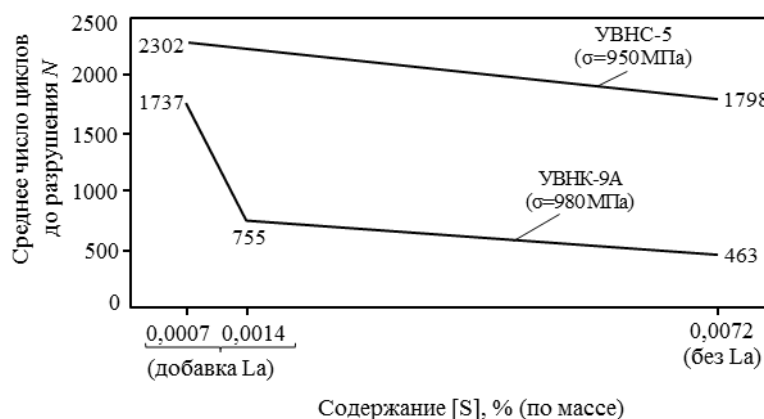


Рис. 2. Влияние серы на МЦУ монокристаллов сплава ЖС36 (МОНО <001>) при температуре испытания 900°C

Изменение вышеуказанных служебных характеристик можно объяснить комплексным (рафинирующим, модифицирующим и микролегирующим) влиянием лантана на структуру монокристалла.

Модифицирующее и микролегирующее действие лантана связано с его поверхностной активностью, способностью сегрегировать на малоугловых и высокоугловых границах, изменять диффузионные потоки, силы межатомного взаимодействия и поверхностное натяжение.

Радиус атома лантана (0,187 нм) намного превосходит радиус атома никеля (0,124 нм), различие в электроотрицательности этих элементов также велико, что снижает растворимость лантана в никеле и приводит к сегрегации растворенного в монокристалле лантана на мало- и высокоугловых границах и прилегающих к ним областях, снижая энергию этих границ и энергию сплава в целом [21].

Последовательность заполнения поверхностно-активными элементами (S, O, La) границ сплава и кинетика сегрегации может быть определена и описана следующим уравнением [22]:

$$\frac{X_b(t) - X_b(0)}{X_b(\infty) - X_b(0)} = 1 - \exp\left(-\frac{FDt}{\beta^2 f^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{FDt}{\beta^2 f^2}\right)^{1/2}, \quad (1)$$

где $X_b(0)$, $X_b(\infty)$, $X_b(t)$ – концентрация сегрегирующего компонента на границе в начальный момент, через бесконечно большой промежуток времени и в момент времени t ; D – коэффициент диффузии в кристалле; β – отношение концентрации растворенного компонента на границе к концентрации растворенного компонента в атомной плоскости, примыкающей к границе; $F=4$, $f=a^3b^2$, где a и b соответственно размеры атома растворителя и растворенного вещества.

Сегрегация приводит к появлению поверхностного натяжения, которое можно рассчитать по уравнению Батлера [23]:

$$\gamma = \frac{\mu_i^S - \mu_i^B}{a_i}, \quad (2)$$

где μ_i^S и μ_i^B – химические потенциалы на границе и внутри кристалла соответственно; a_i – количество атомов на единице площади поверхности.

Для идеального раствора бинарного сплава

$$\gamma = \gamma_1 + \frac{RT}{a_1} \log\left(\frac{C_1^S}{C_1^B}\right) = \gamma_2 + \frac{RT}{a_2} \log\left(\frac{C_2^S}{C_2^B}\right), \quad (3)$$

где γ_1 и γ_2 – поверхностное натяжение для первого и второго компонента; C_1^S и C_2^S – концентрации первого и второго компонента на границе; C_1^B и C_2^B – концентрации первого и второго компонента внутри кристалла.

Диффузионная подвижность серы значительно выше диффузионной подвижности лантана (табл. 1), поэтому в первую очередь на высокоугловых и малоугловых границах сегрегирует сера (уравнение 1), которая ослабляет поверхностное натяжение (уравнения 2 и 3) и силы межатомного взаимодействия [10]. Позднее в условиях эксплуатации на межфазных границах сегрегирует лантан, вытесняя и нейтрализуя на них серу. В данном исследовании с использованием МРСА экспериментально показано, что сера и лантан являются поверхностно-активными металлами, сегрегирующими не только на поверхности пор, но и на границах γ/γ' -фаз. Лантан – активный металл и взаимодействует с имеющей высокую электроотрицательность серой с образованием на межфазной границе γ/γ' тонкой пленки, соизмеримой по толщине с размерами атома, которая является барьером для массообмена между γ - и γ' -фазами.

Лантан заполняет часть вакансий на межфазных границах, где он сегрегирует, увеличивает энергию образования вакансий, что ведет к снижению плотности вакансий, а следовательно, скорости диффузии атомов сплава. В результате лантан снижает скорость ползучести и увеличивает долговечность [20]. Влияние лантана на скорость диффузии аналогично влиянию церия. Микролегирование 0,04% церия снижает коэффициент самодиффузии никеля по границам зерен при 800°C в ~2 раза и увеличивает энергию активации диффузии по границам зерен при температурах от 700 до 900°C – с 96 до 118,6 кДж/моль [22]. При введении в сплав ЖС36 церия в количестве 0,01% (по массе) коэффициент диффузии по границам зерен при 800°C уменьшается в 15 раз. Снижение скорости диффузии по границам замедляет процесс направленного массопереноса, который является одним из основных механизмов ползучести и приводит к появлению рафтированной структуры.

В результате глубокой очистки сплава от серы в монокристалле резко снижается содержание сульфидов, причем вместо легкоплавких включений сульфида никеля в сплаве остаются немногочисленные мелкодисперсные (<1 мкм) тугоплавкие включения сульфида лантана. Сульфиды никеля, являясь при температурах эксплуатации жидким веществом, служат источником вакансий, ускоряющих диффузионные процессы, приводящие к огрублению структуры и потере функциональных свойств. Рафинирование позволяет снизить в монокристалле содержание не только серы, но и кислорода, а следовательно, и оксидов.

При длительной высокотемпературной выдержке, сегрегирующий на границах пор лантан нейтрализует серу, образуя внутри пор химически инертные тугоплавкие глобулярные включения, восстанавливая силы поверхностного натяжения, замедляющие рост пор и образование на них трещин.

Влияние напряжений (σ), создаваемых внешними силами, и поверхностного натяжения (γ) на скорость роста радиуса (r) поры, возникающей в результате деформации, описывается уравнением [24]:

$$\frac{dr}{dt} = -\frac{D\Omega}{rRT} \left[\sigma + \frac{2\gamma}{r} \right]. \quad (4)$$

Чем меньше пора, тем больше поток вакансий с поверхности поры в кристалл и выше скорость уменьшения радиуса поры. Влияние поверхностного натяжения сказывается, когда $2\gamma/r$ при малом значении радиуса достигает значения порядка σ , т. е. когда радиус поры деформационного происхождения сравнительно мал и составляет 20–100 нм, если $\sigma=30\text{--}150$ МПа. Сера, адсорбирующаяся на поверхности поры, ослабляет поверхностное натяжение, ускоряя рост деформационной поры, а лантан, являющийся (как и сера) поверхностно-активным элементом, имея более низкую подвижность, адсорбируется на поверхности поры позднее, нейтрализует влияние серы, образуя с ней сульфиды и увеличивая поверхностное натяжение. Влияние поверхностного натяжения на рост сравнительно крупных пор кристаллизационного и гомогенизационного происхождения, вероятно, незначительно.

Авторы работы [19] полагают, что повышение жаропрочных свойств при введении в сплав лантана происходит в результате выделения при термической обработке и эксплуатации в прослойках γ -фазы и на межфазных границах γ/γ' -фаз сравнительно мелких (20–70 нм) включений γ' -фазы, при этом стабилизируется дислокационная структура и затрудняется движение межфазных дислокаций при высокотемпературной ползучести.

При введении лантана в сплав ЖС36 не образуются пластинчатые включения сульфида титана, являющиеся структурными концентраторами напряжений, замедляется появление и рост включений топологически плотноупакованных фаз.

Одним из главных требований, предъявляемых к сплавам, применяемым для изготовления рабочих лопаток ГТД, является их высокая жаростойкость или сопротивление газовой коррозии. Сопротивление поверхности литых лопаток высокотемпературному окислению является непременным условием их высокой эксплуатационной надежности.

Исследовали влияние переменного содержания серы (0,0072; 0,0014; 0,0007 и 0,0002% (по массе)) на изотермическую жаростойкость монокристаллов сплава ЖС36 при температуре 1150°C. Снижение содержания серы улучшает жаростойкость и без введения добавок лантана (рис. 3). Однако введение лантана позволяет дополнительно снизить удельное изменение массы образцов при испытании продолжительностью 500 ч. Очень важным обстоятельством, улучшающим жаростойкость, является фильтрация, в результате которой оксиды и сульфиды лантана, образовавшиеся при плавке, не попадают в монокристалл.

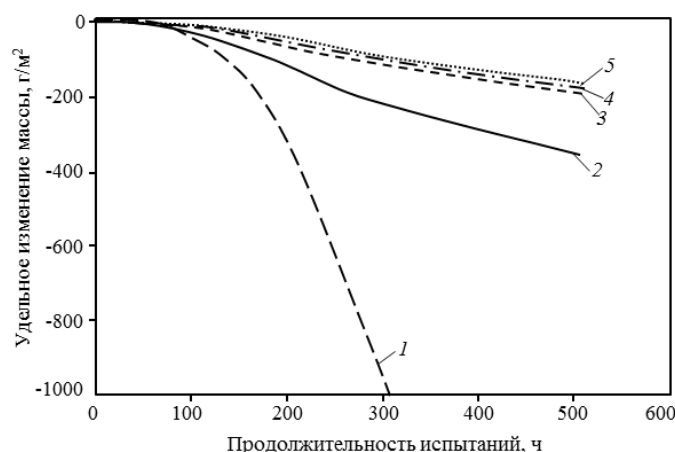


Рис. 3. Зависимости удельного изменения массы от продолжительности испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1150°C монокристаллических образцов из сплава ЖС36 с лантаном (3), с лантаном и фильтрацией (4, 5) и без лантана (1, 2) с содержанием серы 0,0072 (1); 0,0002 (2, 3); 0,0007 (4) и 0,0014 (5)

Лантан замедляет скорость роста оксидной пленки и увеличивает ее адгезию к поверхности сплава, нейтрализует сегрегации серы на межфазной границе «оксидная пленка–сплав», на поверхности пор в поверхностной зоне сплава, на границах зерен оксидной пленки, тем самым устраняя образование легкоплавких сульфидов никеля, ускоряющих диффузию и снижающих адгезию защитной пленки.

Заключения

Упругость пара лантана на несколько порядков ниже упругости пара щелочно-земельных металлов, что создает преимущества в контроле за его содержанием при вакуумно-индукционной плавке. По химическому сродству к кислороду и сере, являющимися примесями монокристаллического жаропрочного никелевого сплава ЖС36, лантан превосходит лантаноиды, магний и приближается к кальцию. При вакуумно-индукционной плавке и фильтрации лантан взаимодействует с примесями кислорода и серы с образованием твердых оксидов и сульфидов с чрезвычайно низким изобарно-изотермическим потенциалом, при этом содержание кислорода, серы, оксидов и сульфидов в закристаллизовавшемся сплаве снижается. При получении отливок из этого ультрачистого по примесям металла увеличивается выход годных монокристаллов, так как уменьшается вероятность образования «паразитных» зерен на включениях оксидов и сульфидов. Превосходя по величине атомного радиуса и имея практически нулевую растворимость в никеле, лантан, как поверхностно-активный металл, превосходит по эффективности лантаноиды, в том числе церий.

При высокотемпературной выдержке лантан сегрегирует на границах γ/γ' -фаз, замедляя на них и через них диффузию атомов и вакансий, что замедляет огрубление структуры, в том числе развитие рафтинга.

Лантан нейтрализует сегрегации серы на и вблизи поверхности пор с образованием тугоплавких, химически инертных глобулярных включений, восстанавливая поверхностное натяжение на поверхности пор и замедляя их рост и развитие на поверхности трещин.

Выступая в качестве высокоактивной рафинирующей, модифицирующей и микролегирующей добавки, лантан позволяет существенно увеличить жаропрочность, циклическую прочность и жаростойкость сплава ЖС36.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г. Повышение эксплуатационных характеристик монокристаллов сплава ЖС36-ВИ путем его рафинирования от примеси серы // Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»: сб. докл. III Всерос. науч.-технич. конф. М.: ВИАМ, 2016. С. 13.
3. Сидоров В.В., Мин П.Г., Бурцев В.Т., Каблов Д.Е., Вадеев В.Е. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование реакций рафинирования в вакууме сложнолегированных ренийсодержащих никелевых расплавов от примесей серы и кремния // Вестник РФФИ. 2015. №1 (85). С. 32–36.
4. Каблов Е.Н., Логунов А.В., Сидоров В.В. Обеспечение ультравысокой чистоты металла – гарантия качества литейных жаропрочных сплавов // Металлы. 2000. №6. С. 40–46.
5. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г., Герасимов В.В., Бондаренко Ю.А. Влияние примесей серы и фосфора на свойства монокристаллов жаропрочного сплава ЖС36-ВИ и разработка эффективных способов его рафинирования // Авиационные материалы и технологии. 2015. №3 (36). С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-3-9.

6. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г., Пучков Ю.А. Влияние лантана на качество и эксплуатационные свойства монокристаллического жаропрочного никелевого сплава ЖС36-ВИ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №12. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 02.02.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-2-2.
7. Мин П.Г., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Вадеев В.Е. Исследование серы и фосфора в литейных жаропрочных никелевых сплавах и разработка эффективных способов их рафинирования // Технология металлов. 2015. №12. С. 2–9.
8. Бурцев В.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Исследование поверхностного натяжения и плотности расплавов никеля, содержащего примеси серы, фосфора и азота // Физика и химия обработки материалов. 2013. №1. С. 52–56.
9. McLean D. Grain Boundaries in Metals. Oxford University Press, 1957. P. 347.
10. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Пучков Ю.А. Особенности диффузионного поведения примесей и рафинирующих добавок в никеле и монокристаллических жаропрочных сплавах // Авиационные материалы и технологии. 2016. №1 (40). С. 24–31. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-24-31.
11. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Будиновский С.А., Мин П.Г. Влияние примеси серы на жаростойкость монокристаллов жаропрочного сплава ЖС36-ВИ с защитным покрытием // Авиационные материалы и технологии. 2016. №1 (40). С. 20–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-20-23.
12. Каблов Д.Е., Беляев М.С., Сидоров В.В., Мин П.Г. Влияние примесей серы и фосфора на малоцикловую усталость монокристаллов жаропрочного сплава ЖС36-ВИ // Авиационные материалы и технологии. 2015. №4 (37). С. 25–28. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-25-28.
13. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнолегированного никелевого расплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи. Часть 1 // Электromеталлургия. 2014. №3. С. 18–23.
14. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнолегированного никелевого расплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи. Часть 2 // Электromеталлургия. 2014. №5. С. 26–30.
15. Сидоров В.В., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И., Вадеев В.Е. Влияние скорости фильтрации сложнолегированного никелевого расплава через пенокерамический фильтр на содержание примеси серы в металле // Электromеталлургия. 2015. №5. С. 12–15.
16. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И. Исследование процессов рафинирования в вакууме сложнолегированных никелевых расплавов от примеси серы // Металлы. 2015. №6. С. 57–63.
17. Смирнов Л.А., Ровнушкин В.А., Орыщенко А.С., Калинин Г.Ю., Милуц В.Г. Модифицирование стали и сплавов редкоземельными элементами. Сообщение 1 // Металлург. 2015. №11. С. 57–63.
18. Каблов Д.Е., Симонов В.Н., Алексеева М.С. Исследование строения фильтра и особенностей фильтрации примесей пористой керамикой из оксида алюминия Al_2O_3 // Авиационные материалы и технологии. 2016. №4 (45). С. 47–53. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-47-53.
19. Горюнов А.В., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Зайцев В.Е. Формирование наноструктурированного состояния в литейном жаропрочном сплаве ВЖМ4-ВИ при микролегировании его лантаном // Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 39–43.
20. Wang S., Nates R., Pasang T., Ramesany M. Modelling of gas tungsten arc welding under Maragony convection // Universal Journal of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 3 (5). P. 185–201.
21. Kuang-Di Xu, Zhong-Ming Ren, Chuan-Jun Li. Progress in application of rare metals in superalloys // Rare Met. 2014. Vol. 33 (2). P. 111–126.
22. Seah M.P. Grain boundary segregation // Journal of Physics F: Metal Physics. 1980. Vol. 10. P. 1043–1064. DOI:10.1088/0305-4608/10/6/006.
23. Kaptay G. Partial Tension of components of a solution // Langmuir. 2015. Vol. 31. P. 5796–5804. DOI: 10.1021/acs.langmuir.5b00217.
24. Бокштейн Б., Епишин А., Есин В. и др. Рост и залечивание пор в монокристаллах жаропрочных сплавов на никелевой основе // Журнал функциональных материалов. 2007. Т. 1. №5. С. 162–169.