

УДК 669.018.44:621.745.55

П.Г. Мин¹, В.В. Сидоров¹, Д.Е. Каблов¹, В.Е. Вадеев¹, Д.В. Зайцев¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФОСФОРА И СЕРЫ В γ - И γ' -ФАЗАХ МОНОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВА ЖС36-ВИ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-3-3

Исследовано распределение содержания примесей фосфора и серы в γ - и γ' -фазах монокристаллов сплава ЖС36-ВИ высокоразрешающими методами просвечивающей электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа. Показано, что эти примеси преимущественно концентрируются в γ -твердом растворе, в котором встречаются локальные участки их повышенного содержания. Характер этого распределения сохраняется после испытаний на длительную прочность, причем неоднородность содержания серы между (γ/γ')-фазами приобретает более выраженный характер, особенно для сплава с высоким содержанием серы. Предложен механизм нарушения когерентной связи между γ - и γ' -фазами в присутствии повышенного содержания примесей и снижения жаропрочности монокристаллов.

Ключевые слова: фосфор, сера, жаропрочный сплав, монокристалл, примеси, нейтрализация, когерентность, структура, γ - и γ' -фазы, лантан, длительная прочность.

The distribution of phosphorus and sulfur impurities in γ and γ' -phases of single-crystals was investigated by high-resolution transmission electron microscopy and micro X-ray spectral analysis. It is proved that impurities concentrates principally in γ -solid solution, and there are local areas of increased content in there. The nature of this distribution remains after high temperature long-term strength tests at that heterogeneity of sulfur content between (γ/γ')-phases becomes more pronounced, especially for alloy with high sulfur content. A mechanism for destruction of coherent coupling between γ - and γ' -phases at high impurities content and reducing of single-crystals high temperature strength was suggested.

Keywords: phosphorus, sulfur, superalloy, single-crystal, impurities, neutralization, coherence, structure, γ - and γ' -phases, lanthanum, long-term strength.

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

Введение

Современные металлургические приемы рафинирования жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) направлены на достижение в них ультранизких содержаний вредных примесей, газов и неметаллических включений (НВ) с целью обеспечения стабильно высокого уровня эксплуатационных свойств и выхода годного по монокристалличности рабочих лопаток авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) [1, 2]. Однако полностью отрафинировать расплав от вредных примесей или исключить их поступление в сплав невозможно, поэтому важным металловедческим направлением является изучение влияния примесей на структуру и свойства монокристаллов ЖНС.

Одними из наиболее вредных примесей в ЖНС являются фосфор и сера, которые неизбежно поступают в сплавы из шихтовых материалов при выплавке в вакуумной индукционной печи (ВИП). Особенно загрязнены этими примесями отходы литейных жаропрочных сплавов и детали, отработавшие свой ресурс в условиях сгорающего

топлива, содержащего серу. Кроме того, фосфор может неконтролируемо переходить в расплав при выплавке в вакуумной индукционной печи (ВИП) из керамики плавильного тигля, для повышения прочности которого используют связующие, содержащие до 4% (по массе) P_2O_5 .

Отрицательное влияние серы на свойства ЖНС объясняется образованием НВ в виде сульфидов с компонентами сплавов, которые являются концентраторами напряжений, инициирующими зарождение трещин при эксплуатации лопаток. Сера имеет низкую растворимость в никеле и образует с ним легкоплавкую эвтектику с температурой плавления 643°C [3], что может отрицательно влиять на жаропрочность [4–6]. Кроме того, в работах [7–9] отмечается отрицательное влияние серы на жаростойкость монокристаллов ЖНС с защитным покрытием.

Опубликован ряд работ о вредном влиянии фосфора на механические свойства литейных ЖНС, в том числе с монокристаллической структурой [4–6, 10–12]. Фазы, содержащие фосфор, являются местом преимущественного образования и распространения трещин, что ускоряет процесс разрушения сплава при высоких температурах [13] и снижает показатели прочности и пластичности [14]. Кроме того, соединение NiP имеет низкую температуру плавления 850°C , что также может отрицательно влиять на долговечность сплавов при рабочей температуре. В работе [5] отмечено более интенсивное протекание коагуляции дисперсных частиц упрочняющей γ' -фазы в монокристаллах сплава ВЖМ4-ВИ с повышенным содержанием фосфора и установлено предельно допустимое содержание фосфора (0,01% (по массе)) в сплаве ВЖМ4-ВИ, при котором не происходит снижение длительной прочности.

В настоящее время разработаны эффективные способы рафинирования ЖНС от примеси серы при выплавке в ВИП путем присадки редкоземельных металлов (РЗМ) [4–6, 15–20]. При этом сера связывается в термически прочные тугоплавкие соединения на основе РЗМ, которые адсорбируются на стенках плавильного тигля при плавке и на поверхности пенокерамического фильтра [21] при разливке расплава.

В работе [22] приведено теоретическое обоснование выбора РЗМ (лантана и иттрия) для рафинирования расплавов ЖНС от примесей серы, фосфора и кремния, а также результаты экспериментальных исследований, в которых благодаря введению лантана сера удаляется из расплава, а фосфор, ввиду его слабой поверхностной активности [23], остается в расплаве в виде тугоплавких соединений на основе фосфида лантана, при этом его отрицательное влияние на механические свойства нейтрализуется. Кроме того, отмечено, что, несмотря на отсутствие снижения содержания фосфора в сплавах ВЖМ4-ВИ, ВЖМ5-ВИ, ЖС36-ВИ, в отлитых из них монокристаллах наблюдается повышение длительной прочности и малоциклового усталости [4–6, 10, 11, 22, 24–27].

Основные исследования, связанные с изучением влияния серы и фосфора на структуру ЖНС, выполняли на сплавах с поликристаллической структурой. Многие современные работы в направлении изучения поведения примесей в монокристаллах ЖНС [4–6, 10, 15–22, 24–27] имеют большое прикладное значение, но объяснения механизмов разупрочнения сплавов с монокристаллической структурой в процессе эксплуатации не подкреплены глубокими структурными исследованиями. Главная причина отсутствия таких исследований связана с невозможностью до настоящего времени изучить распределение и определить содержание примесных элементов в монокристаллах высокоразрешающими методами при локальности элементного анализа на уровне нанометра. Благодаря постоянному развитию технологической и исследовательской баз ФГУП «ВИАМ» специалистам института становятся доступны самые

современные методы получения и исследования материалов, в том числе в области изучения влияния примесей в ЖНС с монокристаллической структурой.

В связи с вышеизложенным целью данной работы являлось изучение локального распределения фосфора и серы в структуре монокристаллов ЖНС для установления причины снижения длительной прочности сплавов с повышенным содержанием этих примесей.

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») [28].

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран безуглеродистый ренийсодержащий ЖНС марки ЖС36-ВИ с монокристаллической структурой, являющийся перспективным материалом для лопаток ГТД благодаря экономичной системе легирования и относительно низкой стоимости. Состав сплава приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплава ЖС36-ВИ*

Содержание элементов, % (по массе)									
Ni	C	Cr	Co	Mo	W	Re	Nb	Al	Ti
Основа	≤0,015	3,5–4,5	5,0–9,0	1,0–2,2	11,0–12,5	1,8–2,3	0,7–1,5	5,5–6,2	0,7–1,5

* Патент РФ №1513934 от 10.04.1995.

Выплавку сплава проводили в вакуумной индукционной печи УВНС-4 (типа ВИАМ-2002) в тигле емкостью 20 кг. Всего выплавлено четыре плавки: две плавки с различным (0,0007 и 0,0072% (по массе)) содержанием серы и две плавки с повышенным (0,014% (по массе)) содержанием фосфора (с лантаном и без лантана). Низкое (0,0007% (по массе)) содержание серы обеспечивали путем введения лантана и фильтрации расплава через пенокерамический фильтр при разливке. Разливку металла проводили в стальные трубы $\varnothing 90$ мм через керамическую воронку.

Содержание фосфора определяли масс-спектрометрическим методом на спектрометре с индуктивно связанной плазмой ICA PQ с приставкой лазерного пробоотбора NWR 266 [29], содержание серы – на газоанализаторе Leco TC-600 [30].

Из полученных после механической обработки (резка, обточка) литых прутковых заготовок отливали монокристаллы с кристаллографической ориентацией [001] методом направленной кристаллизации (LMC – liquid metal cooling) на промышленной установке УВНК-9А.

Монокристаллические заготовки подвергали полной термической обработке (ПТО) по стандартному режиму для сплава ЖС36-ВИ, включающему высокотемпературную гомогенизацию в вакууме и старение на воздухе.

Испытания на длительную прочность (табл. 2) проводили в соответствии с ГОСТ 10145 на машине ZST2/3 ВИАТ фирмы Schenck при температуре 1000°C, $\sigma=185$ МПа (база 500 ч) и при 1000°C, $\sigma=160$ МПа (база 1000 ч) на образцах, изготовленных из термически обработанных монокристаллических заготовок.

Таблица 2

Длительная прочность монокристаллов из сплава ЖС36-ВИ

Условный номер образца	Содержание [S]	Содержание [P]	Время до разрушения при испытаниях на длительную прочность при 1000°C
	% (по массе)		
1	0,0002	0,017	579,5 (база 1000 ч, $\sigma=160$ МПа)
2	0,0002	0,017+La	826 (база 1000 ч, $\sigma=160$ МПа)
3	0,0072	0,0015	274 (база 500 ч, $\sigma=185$ МПа)
4	0,0007+La	0,0015	418 (база 500 ч, $\sigma=185$ МПа)

Образцы для исследований методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) вырезали в плоскости (001) для монокристаллов после термической обработки и в плоскости (011) рабочей части образцов после испытаний на длительную прочность. Резку заготовок производили на электроэрозионном станке. Заготовки из рабочей части испытанных образцов вырезали вблизи излома (на расстоянии 1,5–2 мм). Ориентацию заготовок для нахождения плоскости вырезки (011) определяли при помощи рентгеновского дифрактометра D-MAX 2500 без предварительного травления.

Полученные заготовки (диски диаметром 3 мм и толщиной 300 мкм) механически утоняли до толщины 100 мкм. Дальнейшую полировку производили методом струйной электролитической полировки на установке Тепурол-5 в спиртовом электролите с 15% азотной кислоты при температуре -40°C.

Исследования распределения легирующих и примесных элементов в структуре монокристаллов проводили на просвечивающем электронном микроскопе Tecnai F20 S-TWIN (фирма FEI Europe B.V., P.O., Нидерланды), оснащенный энергодисперсионным анализатором X-Max80. Распределение элементного состава определяли по профилю вдоль линии, пересекающей интересующие участки структуры (γ - и γ' -фаз). Локальность рентгеноспектрального анализа на просвечивающем микроскопе определяется диаметром пучка электронов и в режиме сканирования составляет не более 2 нм. Ориентировку образца относительно пучка электронов производили таким образом, чтобы одновременно удовлетворять условиям максимальной интенсивности детектируемого характеристического рентгеновского излучения (угол наклона относительно детектора – не менее 15 град) и получения контраста элементов структуры на изображении (дифракционные условия съемки). Кроме перечисленных условий ориентировки образца, с учетом его не нулевой толщины, линию профиля по возможности строили через межфазные (γ/γ')-границы, ориентированные вдоль пучка электронов (плоскость границы параллельна пучку электронов, т. е. ее ширина на изображении при этом минимальна).

Результаты

Исследования проводили на монокристаллах сплава ЖС36-ВИ с различным содержанием примесей: 0,0072% (по массе) S; 0,0007% (по массе) S и 0,0015% (по массе) P; 0,017% P и 0,017% P+La – после проведения полной термической обработки (ПТО) и после испытаний на длительную прочность при температуре 1000°C на базе 500–1000 ч. Установлено, что до проведения испытаний фосфор и сера в монокристаллах преимущественно концентрируются в твердом растворе, при этом они распределены неравномерно: в локальных участках твердого раствора встречаются отдельные пики повышенной концентрации как фосфора (рис. 1), так и серы (рис. 2) (распределение алюминия на рисунках приведено для наглядного отображения границ (γ/γ')-фаз).

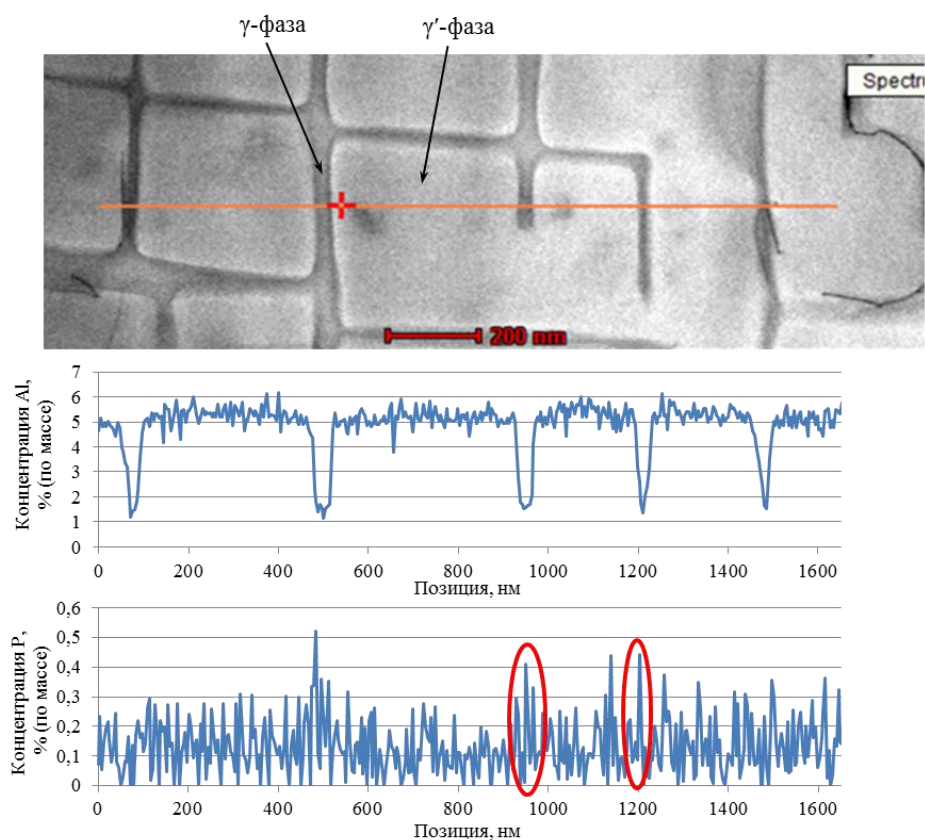


Рис. 1. Локальное распределение концентрации фосфора между фазами (0,017% P после ПТО)

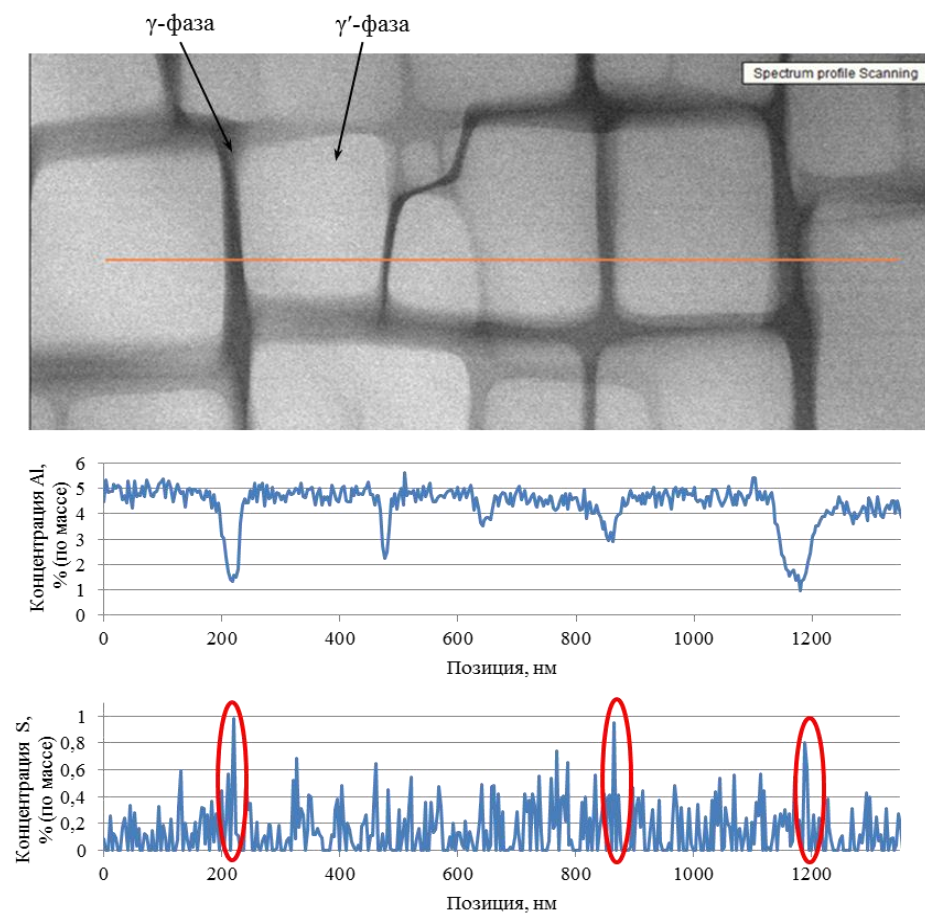


Рис. 2. Локальное распределение концентрации серы между фазами (0,0072% S после ПТО)

Данная неравномерность в распределении концентрации примесей имеет место как в сплаве с 0,0072% (по массе) S (рис. 2), так и с 0,0007% (по массе) S и 0,0015% (по массе) P (рис. 3), а также в сплаве с 0,017% (по массе) P как с лантаном (рис. 4), так и без лантана (рис. 1).

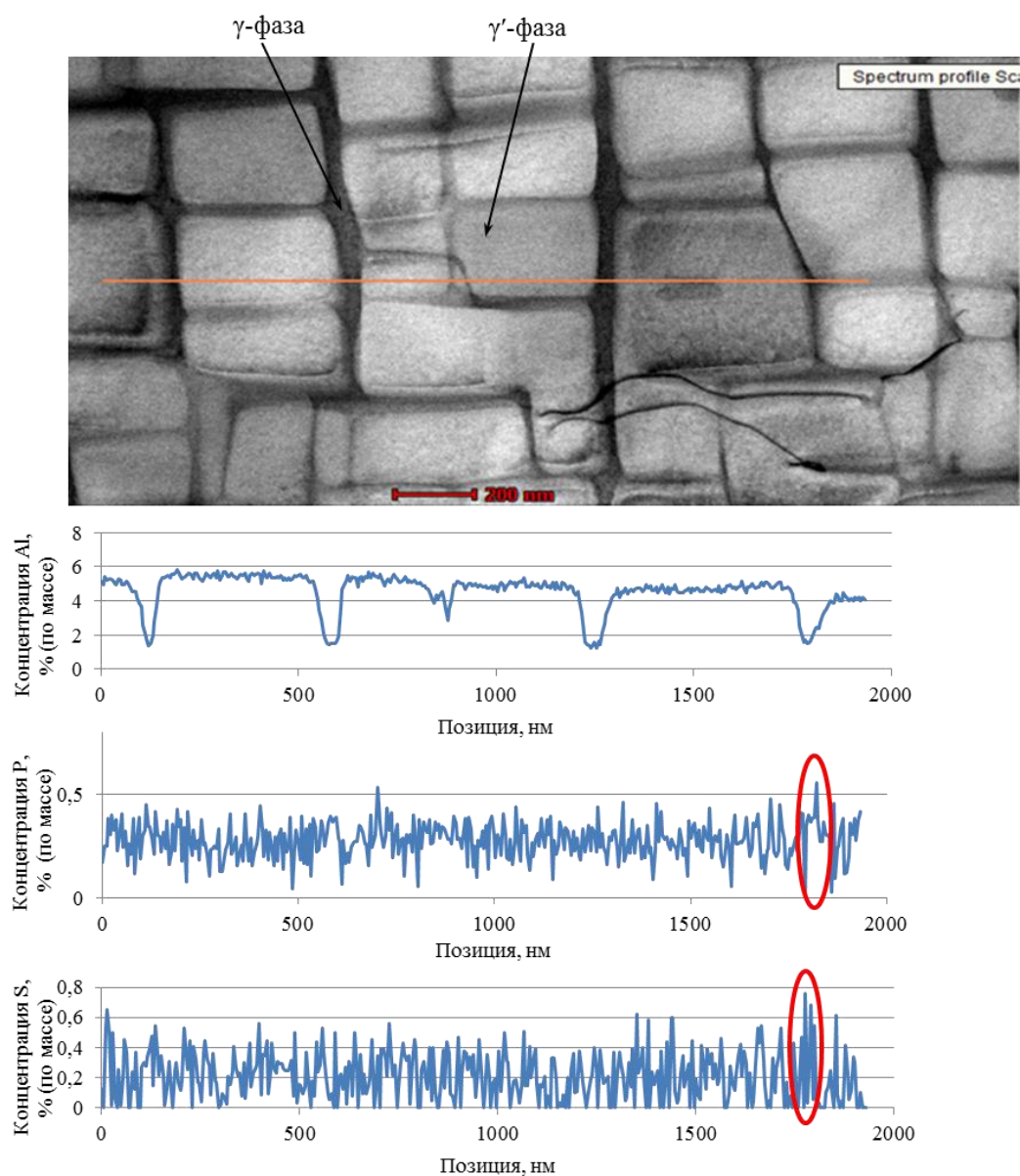


Рис. 3. Локальное распределение концентраций серы и фосфора между фазами (0,0007% S; 0,0015% P+La после ПТО)

Аналогичное распределение примесей серы и фосфора сохраняется после испытаний на длительную прочность: пики повышенной концентрации зафиксированы в локальных участках твердого раствора (рис. 5–8). Причем в случае с серой неоднородность ее распределения между (γ/γ')-фазами после испытаний приобретает более выраженный характер, особенно в образце с содержанием 0,0072% (по массе) S (рис. 6). Следовательно, при длительных испытаниях при температуре 1000°C в монокристаллах сплава ЖС36-ВИ, не содержащего лантан, происходит перераспределение концентрации серы: снижение содержания в γ' -фазе и повышение – в твердом растворе.

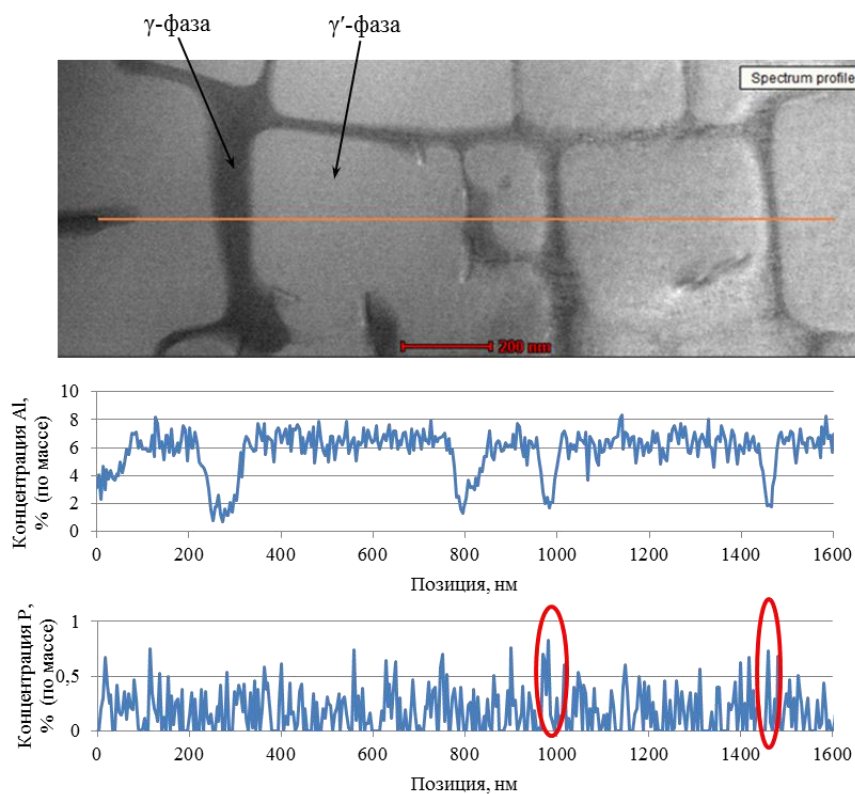


Рис. 4. Локальное распределение концентрации фосфора между фазами (0,017% P+La после ПТО)

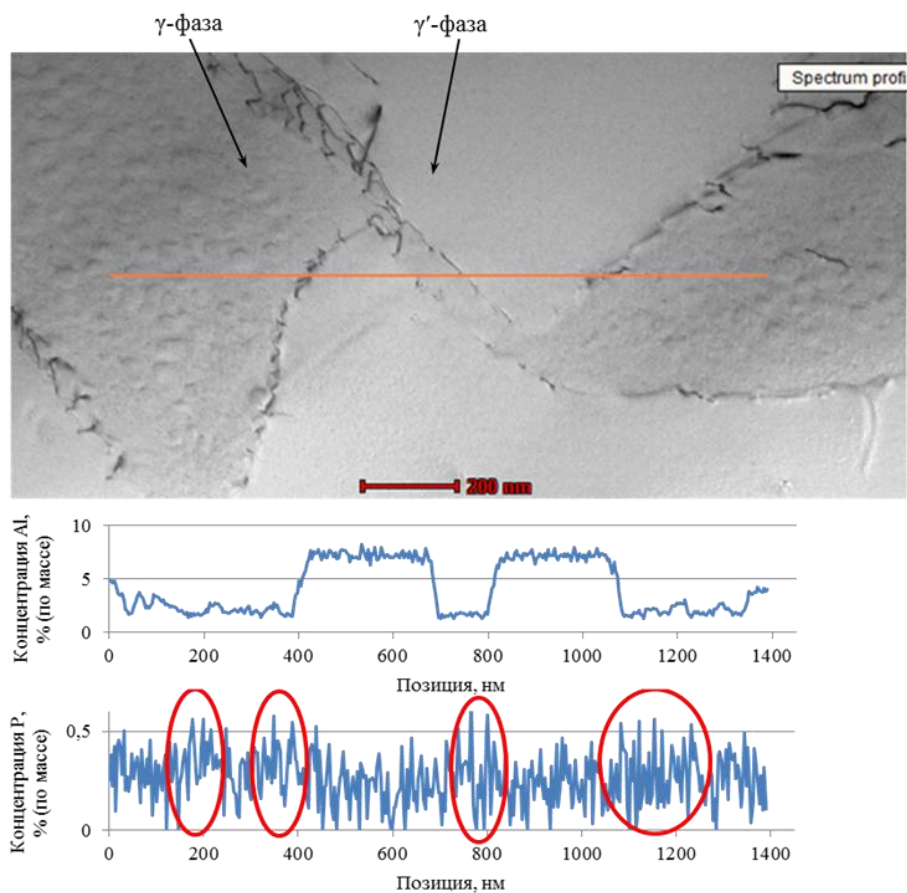


Рис. 5. Локальное распределение концентрации фосфора между фазами (0,017% P после испытаний на длительную прочность)

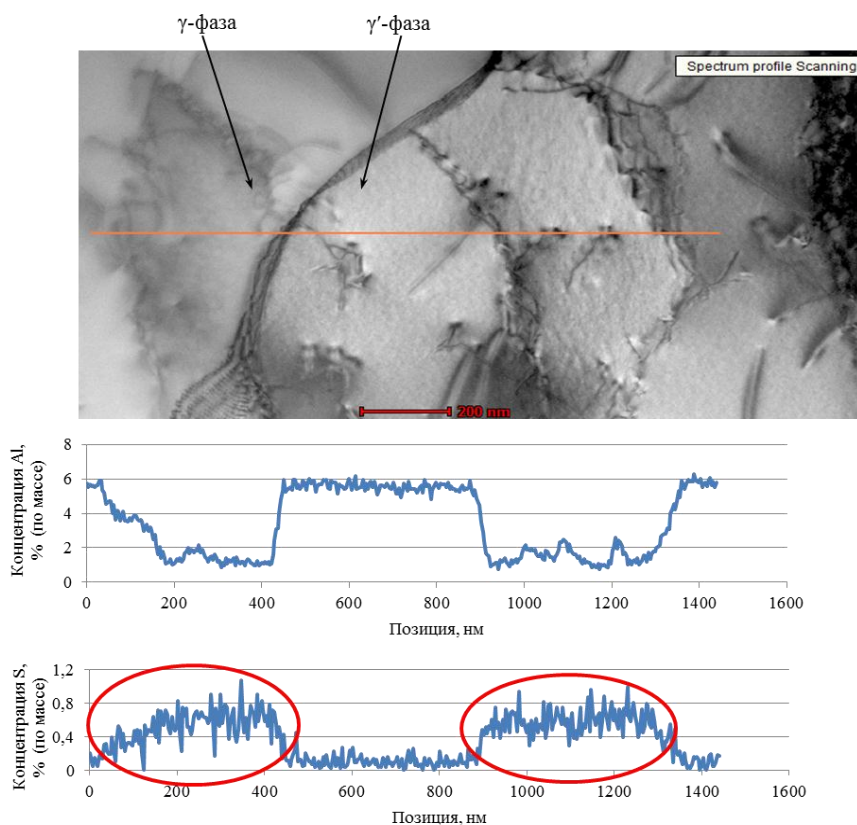


Рис. 6. Локальное распределение концентрации серы между фазами (0,0072% S после испытаний на длительную прочность)

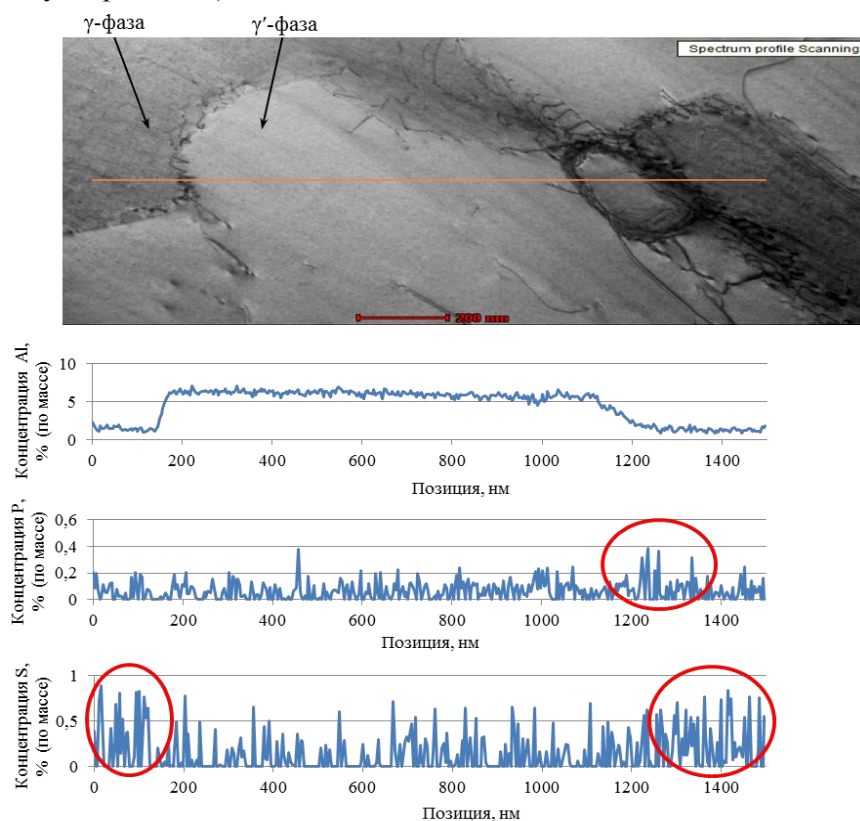


Рис. 7. Локальное распределение концентраций серы и фосфора между фазами (0,0007% S; 0,0015% P+La после испытаний на длительную прочность)

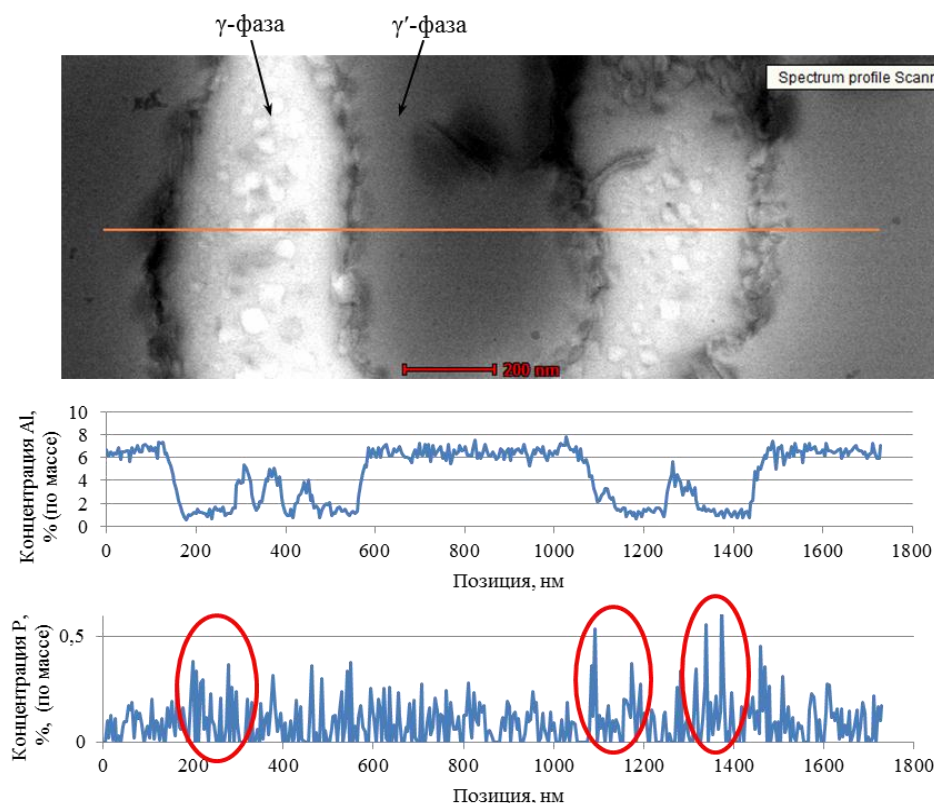


Рис. 8. Локальное распределение концентрации фосфора между фазами (0,017% P+La после испытаний на длительную прочность)

В монокристалле с содержанием серы 0,0007% (по массе), отрафинированным путем введения лантана, наблюдаются отдельные пики ее концентрации в γ' -фазе как после ПТО (рис. 3), так и после испытаний на длительную прочность (рис. 7). Перераспределение серы в данном случае затруднено, что может быть объяснено связыванием серы в термически прочные соединения с лантаном, имеющие низкую диффузионную подвижность, либо снижением диффузионной проницаемости межфазных границ путем введения РЗМ, описанным в работе [31].

Вследствие неоднородности распределения примесей серы и фосфора в структуре монокристалла, а также их повышенной концентрации в локальных участках твердого раствора, его структурная и термодинамическая стабильность нарушается. В процессе коагуляции упрочняющей фазы под нагрузкой при рабочих температурах, оказываясь на границе раздела фаз, эти примеси нарушают когерентную связь между γ - и γ' -фазами и повышают диффузионную проницаемость межфазных границ [31], что ведет к разупрочнению монокристаллов с повышенным содержанием примесей фосфора и серы (образцы 1 и 3 – см. табл. 2). Кроме того, возможно, такие участки являются местами выделения фаз на основе тугоплавких металлов, которые обнаружены в структуре монокристаллов сплава ВЖМ5-ВИ в работе [32].

Высокие значения долговечности монокристаллов с низким содержанием примесей серы и фосфора (0,0007% (по массе) S и 0,0015% (по массе) P) (образец 4, см. табл. 2) объясняются малым количеством участков с повышенной локальной концентрацией этих примесей в твердом растворе, его более высокой структурной и термодинамической стабильностью, и соответственно, меньшей степенью нарушения когерентной связи между γ - и γ' -фазами. В монокристаллах с добавкой лантана (образцы 2 и 4, см. табл. 2) дополнительный вклад в повышение жаропрочности вносит связывание

лантаном фосфора и серы в тугоплавкие соединения на основе фосфидов и сульфидов лантана, которые не влияют на термостабильность твердого раствора.

Следует отметить, что крупные (несколько мкм в диаметре) частицы фосфидов лантана, аналогичные обнаруженным в структуре монокристаллов ВЖМ5-ВИ в работе [32] методом растровой электронной микроскопии, не попадают в поле зрения в связи с особенностями пробоподготовки для ПЭМ: частицы фосфида лантана могут быть вытравлены при электрохимической полировке образцов, к тому же исследуемый образец значительно меньше микрошлифа для растрового электронного микроскопа. Являются ли частицы этих НВ концентраторами напряжений и очагами разрушения монокристалла пока не установлено. Этот вопрос требует дальнейшего изучения, однако, очевидно, что введение лантана положительно влияет на время до разрушения монокристаллов с повышенным (более 0,01% (по массе)) содержанием фосфора.

Таким образом, снижение содержания примесей в сплаве либо связывание их (как в случае с фосфором) в тугоплавкие соединения приводит к повышению термодинамической стабильности твердого раствора и сохранению когерентной связи между γ - и γ' -фазами, благодаря чему повышаются механические свойства монокристаллов.

Обсуждение и заключения

Проведенные исследования распределения содержания примесей фосфора и серы между фазами в монокристаллах сплава ЖС36-ВИ показали, что после проведения ПТО эти примеси преимущественно концентрируются в твердом растворе, причем в нем встречаются локальные участки с их повышенным содержанием. Такие участки обнаружены в образцах с различным содержанием серы и фосфора, а также в образцах с добавкой лантана.

Характер этого распределения сохраняется после испытаний на длительную прочность, причем неоднородность содержания серы между (γ/γ')-фазами приобретает более выраженный характер, особенно для образца с содержанием 0,0072% (по массе) S, что позволяет предположить наличие проходящих при испытаниях диффузионных процессов в монокристаллах, приводящих к снижению содержания серы в γ' -фазе и повышению – в твердом растворе.

Концентрируясь в локальных участках твердого раствора, примеси фосфора и серы снижают его структурную и термодинамическую стабильность. В процессе коагуляции частиц упрочняющей γ' -фазы под нагрузкой при рабочих температурах эти примеси, оказываясь на границе раздела фаз, нарушают когерентную связь между γ - и γ' -фазами и повышают диффузионную проницаемость межфазных границ, что ведет к ускоренному разупрочнению монокристаллов.

Снижение содержания примесей в сплаве приводит к повышению структурной и термодинамической стабильности твердого раствора и сохранению когерентной связи между γ - и γ' -фазами, за счет чего повышаются механические свойства монокристаллов.

Редкоземельный металл (лантан) связывает примеси фосфора и серы в тугоплавкие соединения, тем самым нейтрализуется их вредное влияние, а также снижается диффузионная проницаемость межфазных границ γ - и γ' -фаз, что способствует повышению длительной прочности и ресурса монокристаллических лопаток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Производство литых прутковых (шихтовых) заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // «Проблемы и перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР»: тр. Всерос. науч.-технич. конф. к 310-летию Уральской металлургии. Екатеринбург, 2011. С. 31–38.

2. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия /под ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2006. 632 с.
3. Holt R.T., Wallace W. Impurities and Trace Elements in Nickel-Base Superalloys // Intern. metals reviews. 1976. Vol. 21. No. 1. P. 1–24.
4. 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.
5. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И., Тимофеева О.Б., Филонова Е.В., Исходжанова И.В. Влияние примесей на структуру и свойства высокожаропрочных литейных сплавов и разработка эффективных методов устранения их отрицательного влияния // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №2. Ст. 03. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 07.03.2017).
6. Мин П.Г., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.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.
7. Мин П.Г., Сидоров В.В., Будиновский С.А., Вадеев В.Е. Влияние серы на жаростойкость монокристаллов жаропрочного никелевого сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ta–Mo–W–Ru–Cr // Материаловедение. 2016. №7. С. 9–12.
8. 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.
9. Min P.G., Sidorov V.V., Budinovskiy S.A., Vadeev V.E. Influence of Sulfur on Heat Resistance of Single Crystals of Heat-Resistant Nickel Alloy of Ni–Al–Co–Re–Ta–Mo–W–Ru–Cr System // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. No. 1. P. 90–93.
10. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И. Влияние фосфора и кремния на структуру и свойства высокожаропрочных литейных сплавов и разработка эффективных методов устранения их отрицательного влияния // МиТОМ. 2015. №6 (720). С. 55–59.
11. 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.
12. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Тимофеева О.Б., Мин П.Г. Влияние кремния и фосфора на жаропрочные свойства и структурно-фазовые превращения в монокристаллах из высокожаропрочного сплава ВЖМ4-ВИ // Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 32–38.
13. Chao Yuan, Fengshi Yin. Effect of Phosphorus on Microstructure and High Temperature Properties of a cast Ni-base Superalloy // J. mater Sci. Technol. 2002. Vol. 18. No. 6. P. 555–557.
14. Yaoxiao Zhu, John Radavich et al. Development and Long-Time Structural Stability of a Low Segregation Hf Free Superalloys – DZ 125L // Superalloys-2000. 2000. P. 329–339.
15. 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.
16. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г., Ригин В.Е. Ресурсосберегающие технологии выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов с учетом переработки всех видов отходов // Электromеталлургия. 2016. №9. С. 30–41.
17. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Калицев В.А., Крамер В.В. Рафинирование некондиционных отходов деформируемых никелевых сплавов в вакуумной индукционной печи // Технология металлов. 2015. №4. С. 8–13.
18. Оспенникова О.Г., Мин П.Г., Вадеев В.Е., Калицев В.А., Крамер В.В. Ресурсосберегающая технология переработки некондиционных отходов деформируемого сплава ВЖ175 для дисков ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-1-1.

19. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнолегированного никелевого расплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи. Часть 1 // Электротметаллургия. 2014. №3. С. 18–23.
20. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнолегированного никелевого расплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи. Часть 2 // Электротметаллургия. 2014. №5. С. 26–30.
21. 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 // Электротметаллургия. 2015. №5. С. 12–15.
22. Мин П.Г., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Вадеев В.Е. Рафинирование монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов от примесей серы и кремния и нейтрализация вредного влияния фосфора // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №4. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-4-4.
23. Филиппов К.С., Бурцев В.Т., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Исследование поверхностного натяжения и плотности расплава никеля, содержащего примеси серы, фосфора и азота // Физика и химия обработки материалов. 2013. №1. С. 52–56.
24. 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: 25.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-2-2.
25. Sidorov V.V., Rigin V.E., Min P.G., Folomeikin Yu.I. Effect of phosphorus and silicon on structure and properties of highly refractory cast alloys and development of effective methods for eliminating their unfavorable effect // Metal Science and Heat Treatment. 2015. Vol. 57. No. 5–6. P. 364–368.
26. 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.
27. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г., Вадеев В.Е. Влияние примесей и лантана на эксплуатационные свойства сплава ЖС36-ВИ // Металлургия машиностроения. 2015. №6. С. 19–23.
28. 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. С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
29. Якимович П.В., Алексеев А.В., Мин П.Г. Определение низких содержаний фосфора в жаропрочных никелевых сплавах методом ИСП-МС // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №10. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.03.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-2-2.
30. Механик Е.А., Мин П.Г., Гундобин Н.В., Растегаева Г.Ю. Определение массовой доли серы в жаропрочных никелевых сплавах и сталях в диапазоне концентраций от 0,0001 до 0,0009% (по массе) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №9. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 23.03.2017) DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-12-12.
31. Бокштейн С.З., Гинзбург С.С., Кишкин С.Т., Разумовский И.М., Строганов Г.Б. Авторадиография поверхностей раздела и структурная стабильность сплавов. М.: Металлургия, 1987. 272 с.
32. Мин П.Г., Сидоров В.В., Вадеев В.Е. Поведение примесей и лантана при направленной кристаллизации монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №7. URL: <http://www.viam-works.ru> (в печати).