

УДК 669.018.44:669.245

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-3-9

*Д.Е. Каблов¹, В.В. Сидоров¹, П.Г. Мин¹, В.В. Герасимов¹, Ю.А. Бондаренко¹***ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ СЕРЫ И ФОСФОРА НА СВОЙСТВА
МОНОКРИСТАЛЛОВ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ЖС36-ВИ
И РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ СПОСОБОВ ЕГО РАФИНИРОВАНИЯ**

Исследовано влияние примесей серы и фосфора на жаропрочные свойства монокристаллов из сплава ЖС36-ВИ, предназначенного для литья монокристаллических лопаток газотурбинных двигателей. Установлено, что обе примеси при повышенном их содержании снижают жаропрочные свойства монокристаллов данного сплава. Для устранения вредного влияния этих примесей предложено микролегировать сплав лантаном.

Ключевые слова: сера, фосфор, монокристалл, жаропрочный сплав, свойства, лантан.

The sulfur and phosphorus influence on stress rupture properties of single crystal GhS36-VI superalloy for single crystal blades casting of gas turbine engines was investigated. It was established that both impurities in case of their high content reduce stress rupture properties of the alloy single crystal. For eliminating the harmful impurities influence it is suggested the microalloying of alloy by lanthanum.

Keywords: sulfur, phosphorus, single crystal, superalloys, properties, lanthanum.

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

В настоящее время на всех моторостроительных предприятиях и в авиационных КБ для серийных и разрабатываемых газотурбинных двигателей (ГТД) широко применяются рабочие лопатки с монокристаллической структурой, поскольку это направление является одним из способов повышения эффективности ГТД вследствие дополнительного увеличения температуры газа перед турбиной [1–4]. Поэтому создание современных высокоресурсных авиационных ГТД невозможно без применения в них лопаток с монокристаллической структурой. Наряду с высокими жаропрочными свойствами такие лопатки отличаются повышенной термостойкостью и более медленным темпом разупрочнения металла при эксплуатации, а также повышенной механической и термической выносливостью. Такое уникальное сочетание различных свойств в монокристаллах позволяет эффективно использовать их в качестве материала лопаток турбины для работы в условиях сверхвысоких температур и напряжений.

В отличие от традиционных литейных жаропрочных сплавов с равноосной и направленной структурой, к монокристаллическим сплавам предъявляются повышенные требования по обеспечению ультравысокой чистоты по вредным примесям, в частности – по сере и фосфору [5–9]. Это гарантирует бездефектный рост монокристаллов с заданной кристаллографической ориентацией, получение высокого уровня свойств, отсутствие образования ТПУ фаз, стабильность их микроструктуры при длительной эксплуатации лопаток в двигателе.

Присутствуя в сплаве, сера и фосфор могут образовывать с компонентами сплава неметаллические включения в виде сульфидов и фосфидов, которые являются концентраторами напряжений, инициирующими зарождение трещин при эксплуатации лопаток и ухудшающими тем самым их свойства, в первую очередь – жаропрочность. Кроме того, сера и фосфор имеют низкую растворимость в никеле и образуют легкоплавкие эвтектики с температурой плавления: 650°C – NiS, 850°C – NiP.

В последнее время появились работы [10–12], в которых отмечается отрицательное влияние серы, находящейся в литейных жаропрочных сплавах даже на уровне нескольких ppm (1 ppm=0,0001%), на стойкость защитных покрытий к высокотемпературному окислению и сульфидной коррозии. Установлено, что при содержании в сплаве серы >1 ppm ухудшается адгезия защитного покрытия к основному металлу из-за диффузии серы в покрытие. При этом снижается надежность и ресурс защитного покрытия на деталях двигателя. Отмечается, что при выплавке сплавов в вакуумных индукционных печах из шихтовых материалов в сплав может переходить до 0,009%* S [13]. В отличие от плавки на воздухе, где сера удаляется из металла благодаря применению шлаков, при плавке в вакууме испарения серы из расплава практически не происходит из-за низкой упругости паров серы при температурах проведения процесса плавки.

* Здесь и далее – % (по массе).

Одной из малоизученных примесей в литейных жаропрочных сплавах является фосфор. В научно-технической литературе имеются противоречивые сведения о влиянии фосфора на свойства жаропрочных сплавов. В работе [14] показано, что в сплаве DZ125L при повышении содержания фосфора с 0,0005 до 0,0052% долговечность при испытании на длительную прочность (при 760°C, $\sigma=804$ МПа) снизилась с 336 до 126 ч соответственно. В работе [15] показано, что в литейном жаропрочном сплаве M963 с повышением содержания фосфора с 0,002 до 0,01% существенно снижаются длительная прочность и пластичность при повышенных температурах.

Влияние фосфора на микроструктуру и сопротивление разрушению при 650°C и напряжении 600 МПа модельного деформируемого жаропрочного сплава IN783, содержащего от 0,0034 до 0,016% фосфора, исследовано в работе [16]. Авторы данной работы показали, что фосфор способствует образованию на границах зерен выделений фазы β -NiAl и фосфидов ниобия. Выделения β -NiAl существенно улучшают сопротивление коррозии по границам зерен в поверхностном слое сплава. Однако при увеличении в сплаве содержания фосфора его зернограницная сегрегация увеличивается, силы межзатомного взаимодействия на межфазной границе β/γ внутри сплава ослабевают, что приводит к образованию трещин на границах зерен и снижению долговечности сплава. В отличие от трех предыдущих работ в работе [17] установлено, что в сплаве IN718 с увеличением содержания фосфора с 0,003 до 0,02% повысились значения длительной прочности (при температурах 650 и 750°C) и ползучести.

По ТУ на отечественные литейные жаропрочные сплавы содержание серы и фосфора в них должно быть соответственно: не более 0,01 и 0,015% – для сплавов с равноосной структурой; не более 0,005 и 0,01% – для сплавов с направленной и монокристаллической структурой. Однако специальных исследований по влиянию серы и фосфора на свойства современных литейных жаропрочных сплавов с монокристаллической структурой не проводилось.

В связи с вышеизложенным цель данной работы заключалась в экспериментальном исследовании влияния серы и фосфора на комплекс свойств монокристаллических литейных высокожаропрочных сплавов и разработке эффективных способов их рафинирования от этих примесей.

Материалы и методы

Исследования проводили на литейном высокожаропрочном сплаве для монокристаллического литья марки ЖС36-ВИ (ТУ1-595-4-473), предназначенном для изготовления охлаждаемых лопаток методом направленной кристаллизации с использованием затравки заданной ориентации. Химический состав сплава, %: (3,5–4,5) Cr; (5–9) Co;

(1–2,2) Mo; (11–12,5) W; (1,8–2,3) Re, (0,7–1,5) Nb; (0,7–1,5) Ti; (5,5–6,2) Al; не более 0,015 C; остальное – Ni.

Сплав ЖС36-ВИ относится к классу безуглеродистых монокристаллических сплавов ($C \leq 0,015\%$); содержит в 2 раза меньшую концентрацию рения (2%), чем сплав ЖС32-ВИ; не содержит тантала, вследствие чего его стоимость ниже более чем в 2 раза. Сплав может длительно работать при температурах до 1100°C, с забросами – до 1150°C.

Плавку сплава осуществляли в вакуумной индукционной печи ВИАМ 2002 в тигле вместимостью 20 кг на чистых шихтовых материалах. Для нейтрализации и удаления из сплава серы и фосфора в расплав, предварительно рафинированный магнием, добавляли лантан в виде присадки.

Содержание легирующих элементов определяли методами оптико-эмиссионной спектроскопии с искровым возбуждением пробы и волнодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии на установке S4 EXPLORER. Содержание серы определяли на анализаторе CS600 фирмы Leco [18], а содержание фосфора – методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на установке iCAPQ фирмы Thermo Fisher Scientific.

Металл заливали в стальную трубу с внутренним диаметром 90 мм, часть металла – через пеночеромагический фильтр, нагретый до 1000°C. Поверхность полученных слитков подвергали механической обработке, а затем переплавляли методом направленной кристаллизации на установках УВНК-9А и УВНС-5 для получения монокристаллических заготовок с кристаллографической ориентацией $\langle 001 \rangle$ [19]. Предварительно в готовые прокаленные черомагические формы устанавливали затравки из сплава системы Ni–W с азимутальной ориентацией $\langle 001 \rangle$. Расплавленный металл заливали в нагретые черомагические 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/мм, тогда как на высокоградиентной установке УВНС-5 она составляла 150°C/мм, т. е. в 2 раза выше. Это позволяет получать в отливках совершенную тонкодendirитную структуру монокристалла с минимальными значениями междendirитного расстояния и микропористости.

Из металла каждой плавки с различным содержанием серы и из металла с повышенным содержанием фосфора (без La и с La) отлили заготовки с монокристаллической структурой: 18 шт. – на установке УВНК-9А, 10 шт. – на установке УВНС-5.

С помощью визуального контроля и методом КГО выявили заготовки, которые имели направленную структуру (два и более зерен). Результаты контроля приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты контроля макроструктуры заготовок из сплава ЖС36-ВИ с различным содержанием серы

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

Таблица 2

Результаты контроля макроструктуры заготовок из сплава ЖС36-ВИ с фосфором

Условный номер плавки	Установка	Содержание [P], %	Результаты контроля макроструктуры, шт.	
			МОНО	НК
1	УВНК-9А	0,019	16	2 (11%)
3		0,019+La	18	0
1	УВНС-5	0,019	8	2 (20%)
3		0,019+La	9	1 (10%)

Видно, что если примеси серы и фосфора не связаны в сплаве в тугоплавкие соединения с лантаном, то при кристаллизации они могут нарушать условия роста монокристаллов и способствовать образованию паразитных зерен, тем самым снижая выход годных отливок.

Из термически обработанных монокристаллических заготовок готовили образцы и проводили испытания на кратковременную и длительную прочность с записью деформации ползучести.

Результаты и обсуждение

Проведены работы по удалению серы из сплава ЖС36-ВИ с использованием присадки в виде редкоземельных металлов (РЗМ) – в частности лантана [20–24]. РЗМ являются эффективными рафинирующими добавками, поскольку из-за своей высокой химической активности нейтрализуют вредное влияние примесей, образуя с ними тугоплавкие (термически прочные) химические соединения [25]. Содержание серы контролировали до и после введения лантана в виде присадки, а также после фильтрации расплава через пенокерамический фильтр. Полученные результаты приведены в табл. 3.

Анализ результатов (табл. 3) показывает, что лантан является весьма эффективным элементом для нейтрализации и удаления серы из сплава. Поскольку температура плавления сульфидов лантана составляет $>2000^{\circ}\text{C}$ (2200°C – LaS, 2150°C – La_2S_3 , 2100°C – La_3S_4), в расплаве они находятся в твердом состоянии и могут удаляться путем сорбирования на стенки плавильного тигля, а также, возможно, путем всплывания, так как плотность сульфидов лантана ниже, чем плотность расплава (соответственно 5,2–5,7 и 7–7,5 г/см³) [25].

Сера в виде сульфидов лантана дополнительно удаляется при прохождении расплава через пенокерамический фильтр за счет их адгезии на фильтре. В результате степень десульфурации сплава составила ~90%.

Исследована керамика плавильного тигля до и после проведения плавки металла, содержащего сульфиды лантана, а также – материал пенокерамического фильтра до и после фильтрации. Установлено, что при плавке и разливе через пенокерамический фильтр имеет место насыщение серой как керамики плавильного тигля, так и материала фильтра. Если в рабочем слое тигля до проведения плавки содержание серы составляло 0,0027%, то после окончания плавки оно увеличилось до 0,045%; содержание серы в материале фильтра после окончания плавки также повысилось – с 0,0005 (до фильтрации) до 0,0013% (после фильтрации). Содержание серы в металле, взятом с материала фильтра после проведения плавки (0,029%), и особенно – в гарнисаже на стенках тигля (1,29%), в несколько раз превышает содержание серы в готовом металле (0,0005–0,0009%).

Проведены работы по изучению возможности рафинирования от фосфора сплава ЖС36-ВИ. Для нейтрализации и удаления фосфора, также как и для удаления серы, в расплав вводили лантан в виде присадки. Фосфор (как и сера) образует с РЗМ, в частности с лантаном, тугоплавкие соединения с температурой плавления 2150°C [25]. Контролировали содержание фосфора до и после введения лантана в виде присадки, а также после фильтрации. Полученные результаты приведены в табл. 4.

Анализ полученных данных показывает, что в результате введения лантана в виде присадки и последующей фильтрации расплава соединения фосфора (в отличие от серы) из металла не удаляются, что подтверждают результаты химического анализа.

В то время как сера является сильным поверхностно-активным элементом [26], фосфор, наоборот – слабым, поэтому, хотя он образует тугоплавкие соединения с РЗМ, они практически не сорбируются на поверхности тигля и фильтра.

После проведения плавки контролировали содержание фосфора в гарнисаже на стенках тигля и

Таблица 3

Влияние присадки лантана и фильтрации расплава при разливке на содержание серы в сплаве ЖС36-ВИ

Условный номер плавки	Вид рафинирования от включений серы	Содержание [S], %	Степень десульфурации*, %
1	До присадки серы	0,0002	–
	После присадки 0,01% S	0,0094	–
	После фильтрации	0,0094	0
2	До присадки серы	0,0004	–
	После присадки 0,005% S	0,0047	–
	После присадки La После фильтрации	0,0015 0,0005	68 89
3	До присадки серы	0,0026	–
	После присадки 0,005% S	0,0079	–
	После присадки La После фильтрации	0,0016 0,0009	79 89

* $([S]_{\text{нач}} - [S]_{\text{конеч}}) \cdot 100 / [S]_{\text{нач}}$.

Таблица 4

Влияние присадки лантана и фильтрации расплава при разливке на содержание фосфора в сплаве ЖС36-ВИ

Условный номер плавки	Вид рафинирования от включений фосфора	Содержание [P], %	Степень дефосфорации*, %
1	До присадки фосфора	0,0029	–
	После присадки 0,012% P	0,013	–
	После присадки La	0,013	0
2	После присадки 0,015% P	0,017	–
	После присадки La	0,0195	–
	После фильтрации	0,02	0

* $([P]_{\text{нач}} - [P]_{\text{конеч}}) \cdot 100 / [P]_{\text{нач}}$.

в готовом металле – установлено, что оно практически одинаковое: 0,014 и 0,013–0,018% соответственно.

Испытания на длительную прочность (по ТУ1-595-4-473 время до разрушения $\tau \geq 40$ ч) проводили при температурах 975°C и напряжении 320 МПа и при 1000°C и напряжении 185 МПа на базе 500 ч. Результаты испытаний приведены в табл. 5 и 6.

Видно, что при испытании сплава ЖС36-ВИ на длительную прочность по ТУ (база 40 ч) значения долговечности образцов плавки с пониженным и повышенным содержанием серы приблизительно одинаковые (табл. 5). Однако при испытаниях на базе 500 ч образцов, отлитых на установке УВНК-9А, долговечность плавки с повышенным содержанием серы (0,0072%) в 1,3–1,5 раза ниже, чем с пониженным (0,0014 и 0,0007%) содержанием.

Такая же закономерность отмечается для образцов, отлитых на установке УВНС-5, однако при испытаниях на базе 500 ч долговечность образцов сплава с повышенным содержанием серы только в 1,05–1,15 раза ниже, чем с низким содержанием.

Следует отметить, что по мере снижения содержания серы в сплаве его долговечность повышается.

При проведении испытаний на длительную прочность образцов, отлитых на установке УВНК-9А (табл. 5 и 6), проводили запись дефор-

мации ползучести. Получены первичные кривые ползучести монокристаллов сплава ЖС36-ВИ (см. рисунок).

Как видно из данных, представленных в табл. 5 и на рисунке, а, при уменьшении содержания серы в сплаве с 0,0072 до 0,0007% увеличивается время накопления деформации ползучести, т. е. повышается сопротивление ползучести.

Анализ данных табл. 6 показывает, что, как и в случае испытаний образцов с серой, значения долговечности всех плавки на базе 40 ч (по ТУ) приблизительно одинаковые, однако при испытаниях на базе 500 ч заметно влияние присадки лантана, особенно в образцах, отлитых на установке УВНС-5. В сплаве с присадкой лантана долговечность увеличилась в 1,15–1,2 (УВНК-9А) и 1,44–1,47 раза (УВНС-5).

Как видно из данных, представленных в табл. 6 и на рисунке, б, присадка лантана в сплав ЖС36-ВИ с повышенным содержанием фосфора позволила увеличить время накопления деформации ползучести и тем самым повысить сопротивление ползучести.

Монокристаллы сплава ЖС36-ВИ с примесями серы и фосфора испытывали также при кратковременном растяжении при температурах 20, 900 и 1100°C (табл. 7 и 8).

Анализ данных табл. 7 и 8 показывает, что свойства сплава ЖС36-ВИ при кратковременном разрыве (предел прочности при растяжении σ_b , предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ

Таблица 7

Результаты испытаний на кратковременное растяжение монокристаллов сплава ЖС36-ВИ с серой

Условный номер плавки	Установка	Особенности технологии плавки	Содержание [S], % (исходное состояние/МОНО)	Испытания на растяжение образцов											
				при 20°C				при 900°C				при 1100°C			
				σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
				МПа		%		МПа		%		МПа		%	
1	УВНК-9А	Присадка 0,01% S с фильтрацией	0,0085/0,0072	950	850	19	18	955	915	21,5	20,5	420	405	17,5	35
				940	865	19,5	23,5	960	930	21,5	20,5	425	390	22	45
				950	840	20,5	20,5	960	900	30	29	435	410	18,5	38
2	УВНК-9А	Присадка 0,005% S и La с фильтрацией	0,0013/0,0014	850	815	19	21	965	960	28	29	440	420	19,5	37
				930	850	22	17	950	835	26	30	420	405	19,5	39
3	УВНК-9А	Присадка 0,0005/0,0007	0,0005/0,0007	980	845	19	15	945	865	26	27	430	410	19	38
1	УВНС-5	Присадка 0,01% S с фильтрацией	0,0085/0,0077	1020	820	20	14	935	925	25	25	435	410	20	44
				1080	845	21	21	915	875	27	25	420	395	20	46
				1010	800	19,5	19,5	970	915	35	33	455	435	20,5	49
2	УВНС-5	Присадка 0,005% S и La с фильтрацией	0,0013/0,0012	1050	835	19,5	19,5	965	960	35	36	450	425	23	55
				1090	845	20,5	20,5	965	950	37	36	345	335	20,5	47
3	УВНС-5	Присадка 0,0005/0,0006	0,0005/0,0006	1130	855	20,5	23,5	935	870	38	39	435	415	20,5	51

Таблица 8

Результаты испытаний на кратковременный растяжение монокристаллов сплава ЖС36-ВИ с фосфором

Условный номер плавки	Установка	Особенности технологии плавки	Содержание [P], % (исходное состояние/МОНО)	Испытания на растяжение образцов											
				при 20°C				при 900°C				при 1100°C			
				σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ
				МПа		%		МПа		%		МПа		%	
1	УВНК-9А	Присадка 0,017% P	0,018/0,017	935	855	20	23	920	910	28	30	455	435	21,5	51
				810	805	20	23	920	885	27	30	460	435	20,5	40
				980	845	22	23	940	935	28	31	435	405	19	39
2	УВНК-9А	Присадка 0,017% P и La	0,017/0,017	820	850	20	20	975	905	26	29	425	400	18	36
				835	810	25	27	955	895	27	28	440	425	17,5	41
3	УВНК-9А	Присадка 0,017% P и La с фильтрацией	0,018/0,0175	925	845	18,5	18,5	970	955	26	28	445	430	17	37
1	УВНС-5	Присадка 0,017% P	0,018/0,017	1020	835	19	21	955	950	33	29	460	445	20	44
				1050	775	23	20	940	905	33	31	460	435	19,5	41
				1000	835	22	23	925	870	33	29	430	405	17	37
2	УВНС-5	Присадка 0,017% P и La	0,017/0,017	1020	850	15,5	19	935	915	31	29	430	395	19,5	42
				1050	850	18	19,5	975	970	32	33	445	420	16,5	47
3	УВНС-5	Присадка 0,017% P и La с фильтрацией	0,018/0,017	1020	820	21	24	980	880	36	31	450	430	16,5	37

и относительное сужение ψ) на всех плавках с серой и фосфором при трех значениях температур практически одинаковые. Исключение составляют только величины относительного удлинения и сужения при температуре 900°C, которые снижаются в монокристаллах, отлитых на обеих установках из металла, содержащего повышенное количество серы.

Таким образом, можно констатировать, что введение присадки на основе РЗМ, в частности лантана, в литейные жаропрочные сплавы эффективно для нейтрализации вредного влияния примесей серы и фосфора. Однако механизм положительного влияния лантана различен. При введении лантана в расплав с повышенным содержанием серы и фосфора образуются тугоплавкие соединения лантана с этими примесями и таким образом нейтрализуется их вредное влияние. При этом соединения с серой удаляются из расплава за счет их адгезии на стенках плавильного тигля и на пенoкерамическом фильтре при последующей разливке расплава. В отличие от серы, соединения лантана с фосфором из расплава не удаляются, что подтверждают результаты химического анализа при определении фосфора в сплаве.

Заключение

Установлено отрицательное влияние серы и фосфора на жаропрочные свойства монокристаллов сплава ЖС36-ВИ при испытаниях на длительную прочность на базе 500 и более часов, которые определяют ресурс работы изготовленных из него монокристаллических лопаток.

Для нейтрализации вредного влияния серы и фосфора сплав ЖС36-ВИ следует дополнительно микролегировать лантаном, который связывает серу и фосфор в термически прочные тугоплавкие соединения.

Предложен механизм положительного влияния лантана для нейтрализации вредного влияния примесей серы и фосфора, который предполагает удаление серы из расплава в виде тугоплавких соединений путем их адгезии на стенках плавильного тигля при плавке и на пенoкерамическом фильтре при разливке. При этом фосфор, связанный в тугоплавкие соединения с лантаном, из расплава не удаляется.

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.
2. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. и др. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных и интерметаллидных сплавов с монокристаллической структурой //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 20–25.
3. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 25–31.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения //Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54.
5. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г. Влияние примеси азота на структуру монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ЖС30-ВИ и разработка эффективных способов его рафинирования //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 32–36.
6. Каблов Д.Е., Чабина Е.Б., Сидоров В.В., Мин П.Г. Исследование влияния азота на структуру и свойства монокристаллов из литейного жаропрочного сплава ЖС30-ВИ //МиТОМ. 2013. №8. С. 3–7.
7. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г. Закономерности поведения азота при получении монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ЖС30-ВИ и его влияние на эксплуатационные свойства //МиТОМ. 2014. №1. С. 8–12.
8. 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.
9. Мин П.Г., Горюнов А.В., Вадеев В.Е. Современные жаропрочные никелевые сплавы и эффективные ресурсосберегающие технологии их изготовления //Технология металлов. 2014. №8. С. 12–23.
10. Sarioglu C., Stinner C., Blanchere J.R., Birks N., Pettit F.S., Meier G.H. The control of sulfur content in nickel-base, single crystal superalloys and its effect on cyclic oxidation resistance //In: Superalloys–1996. P. 71–80.
11. Simpson T.M., Price A.R. Oxidation improvements of low sulfur processed superalloys //In: Superalloys–2000. P. 387–392.
12. Ultra low sulfur superalloy casting and method of making: pat. 5922148 US; publ. 13.07.1999.
13. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнолегированного никелевого сплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи. Ч. 1 //Электрометаллургия. 2014. №3. С. 18–23.
14. Yaoxiao Zhu, John Radavich et al. The development and Long-Time Structural Stability of a Low Segregation Hf Free Superalloys – DZ125L //In: Superalloys–2000. P. 329–339.
15. Chao Yuan, Fengshi Yin. Effect of Phosphorus on Microstructure and High Temperature Properties of a Cast Ni-base Superalloy //J. Mater. Sci. Technol. 2002. V. 18. №6. P. 555–557.
16. Yu L.X., Sun Y.R., Sun W.R., Sub X.F., Guo S.R., Hu Z.Q. The influence of phosphorus on the microstructure and stress-rupture properties in low thermal expansion superalloy //Mater. Sci. And Eng. A. 2010. V. 527. №4–5. P. 911–916.
17. Zhuanggi Hv, Hongwei Song. Effect of Phosphorus on Microstructure and Creep Property of IN718 Superalloy //J. Mater. Sci. Technol. 2005. V. 21. P. 73–76.
18. 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. 2014. №9. Ст. 12 (viam-works.ru).
19. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.
20. Каблов Е.Н., Сидоров В.В. Микролегирование РЗМ – современная технология повышения свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов //Перспективные материалы. 2001. №1. С. 23–24.
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 //Электрометаллургия. 2015. №5. С. 12–15.
22. Сидоров В.В., Мин П.Г. Рафинирование сложнолегированного никелевого расплава от примеси серы при плавке в вакуумной индукционной печи. Ч. 2 //Электрометаллургия. 2014. №5. С. 26–30.
23. Мин П.Г., Сидоров В.В. Рафинирование отходов жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ от примеси кремния в условиях вакуумной индукционной плавки //Труды ВИАМ. 2014. №9. Ст. 01 (viam-works.ru).
24. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Крамер В.В. Рафинирование некондиционных отходов деформируемых никелевых сплавов в вакуумной индукционной печи //Технология металлов. 2015. №4. С. 8–13.
25. Самсонов Г.В., Веницкий И.М. Тугоплавкие соединения. М.: Металлургия. 1976. 240 с.
26. 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.