

УДК 669018.44:669.245

П.Г. Мин¹, В.В. Сидоров¹, В.Е. Вадеев¹, Ю.А. Бондаренко¹

МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ ПУТЕМ ПОНИЖЕНИЯ СКОРОСТИ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО ГРАДИЕНТА

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-3-3

Предложен эффективный метод выделения неметаллических включений, содержащих повышенные концентрации примесей серы, фосфора и кремния, из расплава жаропрочных никелевых сплавов в условиях высокого температурного градиента и пониженной скорости перемещения фронта кристаллизации ($V=6$ мм/ч). Показано, что применение данного метода позволяет сконцентрировать основную часть неметаллических включений, содержащих примеси серы, фосфора и кремния, в ограниченном объеме верхней части заготовки, что облегчает их обнаружение, изучение состава, морфологии и локализации в структуре сплава. При этом в нижней части заготовки происходит снижение содержания примесей до весьма низкого уровня.

Ключевые слова: кремний, фосфор, сера, жаропрочный сплав, примеси, неметаллические включения, кристаллизация, метод выделения, металлографические исследования.

The efficiency method for concentration of nonmetallic inclusions with sulfur, phosphorus and silicon from melt of nickel-based superalloys in high gradient conditions and reduced rate of moving the crystallization front ($V=6$ mm/h). Experimentally established that using of this method allows to concentrate a main part of nonmetallic inclusions with sulfur, phosphorus and silicon in casting top limited volume. It makes enable detection of inclusions, chemical composition research, morphology and location in structure of alloy. In this case occurs reducing of impurities content in bottom part of casting.

Keywords: silicon, phosphorus, sulfur, superalloy, impurities, nonmetallic inclusions, crystallization, method of impurities concentration, metallographic research.

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 качестве материала рабочих лопаток для производства современных газотурбинных двигателей (ГТД) применяются жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС) с монокристаллической структурой [1, 2]. Помимо системы легирования, решающее влияние на комплекс механических и эксплуатационных свойств монокристаллов ЖНС оказывают примесные элементы [3–8].

К числу наиболее вредных примесей в ЖНС относят серу, фосфор и кремний, поскольку они оказывают отрицательное влияние на основную характеристику этих сплавов – жаропрочность [3, 6–8]. С никелем эти примеси могут образовывать легкоплавкие эвтектики (Ni–S и Ni–Si) или соединения (NiP), а с компонентами сплавов – соединения, которые являются концентратами напряжений, инициирующими зарождение трещин при эксплуатации лопаток. Кроме того, в работах [9–11] отмечается отрицательное влияние серы на жаростойкость монокристаллов ЖНС с защитным покрытием, даже при содержании на уровне нескольких ppm.

Полностью исключить попадание вредных примесей в ЖНС невозможно, поскольку они содержатся в шихтовых материалах, в том числе в литейных отходах [12–19], а также могут неконтролируемо переходить в расплав из футеровки плавильного тигля (фосфор) и керамики литейной формы (кремний), в состав которых входят фосфор- и кремнийсодержащие связующие. Однако общие тенденции развития технологий производства современных ЖНС направлены на снижение содержания вредных примесей в сплавах, что требует изучения их поведения при выплавке и направленной кристаллизации ЖНС, а также исследования их влияния на структуру и свойства монокристаллов.

Немаловажной частью изучения поведения примесей в монокристаллах и разработки эффективных методов рафинирования ЖНС являются металлографические исследования. Как правило, примеси в ЖНС присутствуют в небольших количествах, что при изучении микроструктуры осложняет поиск неметаллических включений (НВ) и фаз, в состав которых они входят. Предложенный в данной работе метод позволяет сконцентрировать примеси серы, фосфора и кремния, содержащиеся в сплаве, в ограниченном объеме верхней части заготовки, путем направленной кристаллизации расплава в условиях высокого температурного градиента и пониженной скорости перемещения фронта кристаллизации, что облегчит обнаружение НВ, содержащих эти примеси, изучить их состав, морфологию, узнать локализацию их преимущественного расположения в структуре сплава и т. д.

Выделение НВ, содержащих повышенные количества примесей серы, фосфора и кремния, позволит экспериментально установить с какими именно компонентами сплава примеси образуют соединения, а также выбрать элементы-дезактиваторы [20] для их нейтрализации или удаления за счет микролегирования редкоземельными элементами [21–29].

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») [30].

Материалы и методы

В работе использованы основные принципы зонной плавки, основанной на различной растворимости примесей в твердой и жидкой фазе. Содержание примесей, понижающих температуру плавления растворителя, в затвердевшей части будет меньше, чем в жидкости, поэтому примесь оттесняется затвердевающим веществом и собирается в жидкой зоне. При этом жидкость обедняется примесями, повышающими температуру плавления растворителя. На этом принципе основано «зонное рафинирование» [31], при котором через образец в определенном направлении перемещается ряд расплавленных зон. Примеси движутся либо вместе с зонами, либо в обратном направлении, что зависит от того, повышают или понижают они температуру плавления материала образца. Примеси концентрируются на какой-либо одной части образца, в то время как противоположная сторона очищается. В случае с примесями серы, фосфора и кремния, понижающими температуру плавления сплава, происходит их оттеснение в верхнюю часть образца.

В качестве объекта исследования выбраны серийные ЖНС для литья деталей с монокристаллической структурой: ренийсодержащий сплав ЖС32-ВИ и безуглеродистый ренийсодержащий сплав ВЖМ5-ВИ, которые в настоящее время применяются для изготовления рабочих лопаток серийных и перспективных ГТД. Состав сплавов приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав жаропрочных никелевых сплавов ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)										
	Ni	C	Cr	Co	Mo	W	Re	Nb	Al	Ti	Ta
ЖС32-ВИ*	Основа	0,12–0,17	4,5–5,3	9,0–9,5	0,9–1,3	8,1–8,9	3,6–4,3	1,4–1,8	5,7–6,2	–	3,7–4,4
ВЖМ5-ВИ**	Основа	≤0,015	4,0–5,0	8,0–10,0	1,6–2,2	5,5–6,5	3,6–3,9	–	5,7–6,2	0,6–1,0	5,5–6,5

* Патент РФ №2148099 от 27.04.2000.

** Патент РФ №2318030 от 27.02.2008.

Выплавку сплавов проводили в вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002, на этапе выплавки в сплав ЖС32-ВИ дополнительно вводили кремний и фосфор, а в сплав ВЖМ5-ВИ – кремний, фосфор и серу. В результате исходное содержание примесей в полученных заготовках для направленной кристаллизации составило в % (по массе):

- для сплава ЖС32-ВИ: 0,26 кремния; 0,010 фосфора; <0,0002 серы;
- для сплава ВЖМ5-ВИ: 0,15 кремния; 0,039 фосфора; 0,0056 серы.

Направленную кристаллизацию заготовок со скоростью 6 мм/ч при тепловом градиенте 150°С/см проводили в алундовых тиглях \varnothing 18 мм и высотой 150 мм на лабораторной плавильно-литейной электропечи сопротивления УНК-1.

Количественный анализ НВ проводили на оптическом комплексе фирмы Leica на 10 полях зрения для каждого образца при увеличении \times 200. Исследование локального химического состава образцов проводили методом качественного и количественного микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на аппарате «Суперпроб-733» (JСМА-733, фирма Jeol, Япония) с использованием энергодисперсионного микроанализатора Inca Energy.

Содержание легирующих элементов определяли на атомно-эмиссионном спектрометре VARIAN 730-ES. Определение содержания примеси серы проводили инфракрасным методом на газоанализаторе ТС-600 [32] фирмы Лесо. Содержание примесей фосфора и кремния определяли масс-спектрометрическим методом на спектрометре с индуктивно связанной плазмой IСAPQ с приставкой лазерного пробоотбора NWR 266 [33]. Содержание вышеуказанных примесей, НВ и химический состав сплава по основным легирующим металлам контролировали по высоте, проводя отбор проб из различных частей заготовки.

Результаты

На основании рассмотренных положений процесса зонной плавки исследована возможность выделения НВ, содержащих повышенные концентрации примесей серы, фосфора и кремния, из никелевого расплава путем его направленного затверждения в условиях высокотемпературного градиента с малыми скоростями перемещения фронта кристаллизации. Для этого заготовки из сплавов ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ, содержащие (в % (по массе)) соответственно: 0,26 кремния; 0,01 фосфора; <0,0002 серы и 0,15 кремния; 0,039 фосфора; 0,0056 серы, кристаллизовали со скоростью перемещения фронта кристаллизации 6 мм/ч. Контролировали по высоте заготовки содержание вышеуказанных примесей и НВ*. Полученные результаты приведены в табл. 2 и 3.

* Количественную оценку НВ проводила И.В. Исходжанова.

Таблица 2

**Содержание примесей в заготовках из сплавов ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ
после направленного затвердевания со скоростью кристаллизации 6 мм/ч**

Сплав	Расстояние от низа заготовки, мм	Содержание элементов, % (по массе)		
		Si	P	S
ЖС32-ВИ	Исходная плавка	0,26	0,010	<0,0002
	150	0,590	0,036	0,0005
	120	0,240	0,0021	<0,0002
	90	0,167	0,0007	<0,0002
	60	0,140	0,0005	<0,0002
	30	0,120	0,0004	<0,0002
ВЖМ5-ВИ	Исходная плавка	0,150	0,0390	0,0056
	160	0,270	0,1750	0,0300
	150	0,130	0,0120	0,0014
	120	0,130	0,0047	0,0004
	90	0,110	0,0033	0,0005
	60	0,100	0,0027	0,0002
	30	0,100	0,0046	<0,0002

Из полученных результатов (табл. 2) видно, что предложенный метод выделения примесей из расплава эффективен и позволяет, с одной стороны, получить из верхней части заготовки образец с повышенным содержанием примесей, который можно использовать для изучения состава и морфологии включений, а с другой – сплав из нижней и средней частей заготовки с весьма низким содержанием примесей кремния, фосфора и серы. Содержание примесей в нижней части заготовки в сплаве ЖС32-ВИ снизилось по сравнению с их первичным содержанием: по кремнию – в 1,5–2,2 раза, по фосфору – в 14–25 раз, по сере – в 2,5 раза; в сплаве ВЖМ5-ВИ: по кремнию – в 1,5–1,6 раза, по фосфору – в 8–10 раз, по сере – в 25–28 раз, при этом основная часть примесей и НВ, содержащих повышенные количества примесей, сконцентрировалась в верхней части заготовки.

Таблица 3

Распределение неметаллических включений по высоте заготовок из сплавов ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ после направленного затвердевания со скоростью кристаллизации 6 мм/ч

Расстояние от низа заготовки, мм	Объемная доля частиц НВ, %, в сплаве	
	ЖС32-ВИ	ВЖМ5-ВИ
150	4,46	1,66
120	2,04	–
90	0,04	0,86
60	0,01	–
30	0,02	0,0016

Анализ данных табл. 3 показывает, что НВ, содержащие повышенные количества примесей, отесняются фронтом кристаллизации в верхнюю часть заготовки, их объемная доля и максимальная площадь значительно превышают эти значения в нижней части заготовки, что коррелирует с результатами, представленными в табл. 2. Для наглядности результаты исследований представлены в виде схемы на рис. 1.

В табл. 4 приведен локальный химический состав обнаруженных фаз*, а на рис. 2 и 3 – микроструктура по высоте заготовки.

* Исследование локального химического состава проводила Е.А. Давыдова.

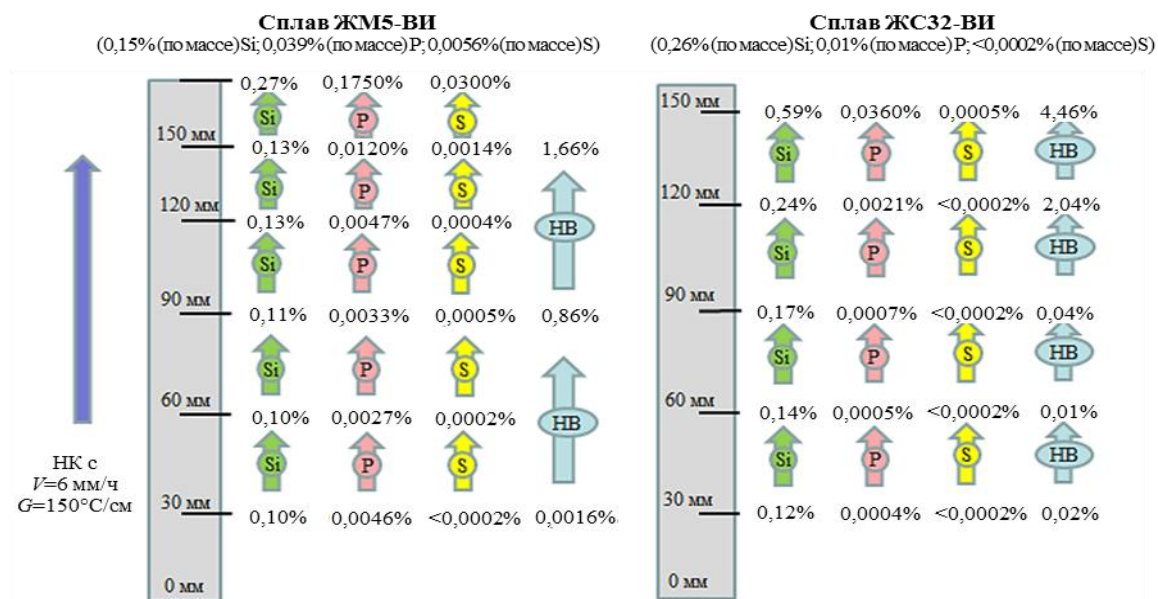


Рис. 1. Изменение содержания примесей и неметаллических включений (НВ) по высоте заготовок, полученных в условиях направленной кристаллизации со скоростью 6 мм/ч

Таблица 4

Локальный химический состав сплава ЖС32-ВИ (данные МРСА)

Место отбора на заготовке	Место анализа	Содержание элементов, % (по массе)															
		Al	Si	P	S	Sc	Cr	Co	Ni	Y	Nb	Mo	Nd	Ta	W	Re	Σ
Верх	Фаза 1	15,6	1,6	H/o*	H/o	H/o	4,3	6,6	68,0	H/o	H/o	H/o	H/o	2,5	1,3	H/o	99,9
	Фаза 3	7,0	1,5	H/o	H/o	H/o	6,4	9,4	61,7	H/o	1,4	H/o	H/o	2,8	6,4	3,5	100,1
	Фаза 5 (черная)	1,4	37,8	H/o	H/o	H/o	5,8	5,6	28,8	H/o	H/o	H/o	H/o	H/o	H/o	H/o	79,4**
	Фаза 6 (черная)	H/o	3,7	2,4	15,6	14,2	7,2	10,1	33,2	H/o	4,2	H/o	3,0	2,5	2,2	1,7	100,0
Середина	Матрица	6,4	H/o	H/o	H/o	H/o	4,8	9,5	65,2	H/o	H/o	H/o	H/o	1,6	8,2	4,2	99,9
	Фаза 1	0,7	H/o	H/o	H/o	H/o	1,8	2,6	18,2	H/o	18,0	3,8	H/o	35,2	8,9	1,6	92,3**
Низ	Матрица	5,6	H/o	H/o	H/o	H/o	4,3	10,1	63,1	H/o	H/o	H/o	H/o	3,2	8,9	4,8	100,0
	Фаза 1	H/o	H/o	H/o	H/o	H/o	1,0	0,8	4,4	H/o	22,7	H/o	H/o	52,5	8,1	H/o	89,5**

* H/o – не обнаружен.

** Остальное от 100% по результатам качественного анализа – углерод.

Состав НВ с кремнием, фосфором и серой, обнаруженных в верхней части заготовки из сплава ВЖМ5-ВИ, приведен в табл. 5.

Таблица 5

Химический состав неметаллических включений с кремнием, фосфором и серой, обнаруженных в верхней части заготовки из сплава ВЖМ5-ВИ (данные МРСА)

Обнаруженное включение	Содержание элементов, % (по массе)												
	Al	Si	P	S	Cr	Co	Ni	Mo	La	Ta	W	Re	Σ
Фаза 1	0,48	2,14	H/o*	H/o	9,24	8,91	17,09	14,71	0,22	5,89	17,6	18,26	94,54**
Фаза 2	0,37	4,55	0,37	0,21	8,91	10,52	23,37	16,13	H/o	10,87	9,96	7,65	92,91**
Фаза 3	0,7	2,71	3,7	0,35	11,01	10,32	37,91	2,3	0,05	4,26	1,51	1,57	76,39***
Фаза 4	0,5	0,84	5,72	4,51	9,87	8,55	26,82	4,84	H/o	9,24	1,16	0,58	72,63***

* H/o – не обнаружен.

** Остальное от 100% по результатам качественного анализа – углерод.

*** Остальное от 100% по результатам качественного анализа – кислород и углерод.

Как видно из приведенных данных, в нижней и средней части заготовки НВ, содержащие примеси кремния, фосфора и серы, не обнаружены (табл. 4, рис. 2, а, б и 3 а, б). Зато в верхней части заготовки наблюдаются крупные скопления НВ, содержащих в своем составе переменное количество кремния и фосфора, а также серы (табл. 4 и 5, рис. 2, в, г и 3, в, г).

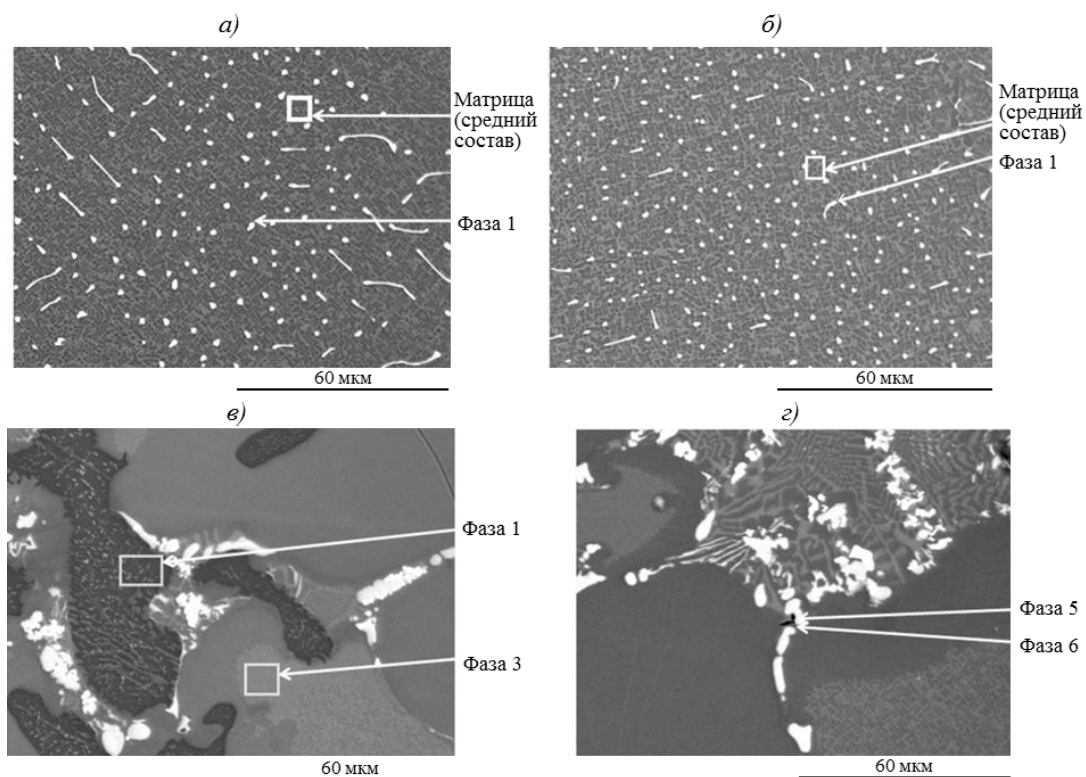


Рис. 2. Микроструктура сплава ЖС32-ВИ после направленного затвердевания со скоростью кристаллизации 6 мм/ч:

а – низ заготовки; б – середина заготовки; в, г – верх заготовки

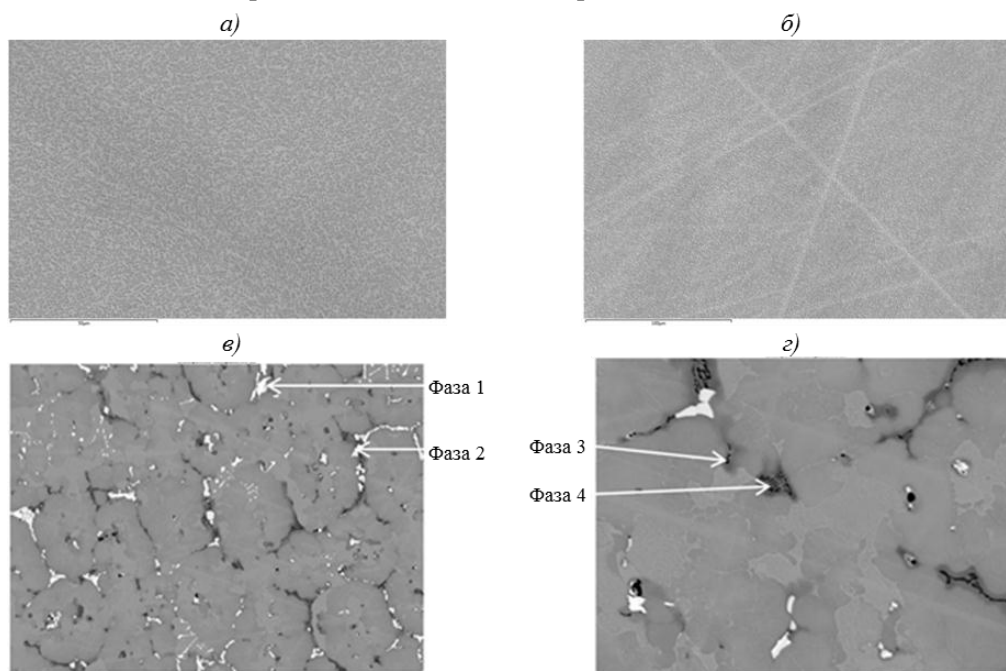


Рис. 3. Микроструктура сплава ВЖМ5-ВИ после направленного затвердевания со скоростью кристаллизации 6 мм/ч:

а – низ заготовки; б – середина заготовки; в, г – верх заготовки

Исследования показали, что наряду с изменением содержания примесей кремния, фосфора и серы по высоте полученных заготовок, происходит изменение химического состава сплавов по основным легирующим элементам (табл. 6 и 7).

Таблица 6

**Содержание легирующих элементов в заготовке из сплава ЖС32-ВИ
после направленного затвердевания со скоростью кристаллизации 6 мм/ч**

Расстояние от низа заготовки, мм	Содержание элементов, % (по массе)							
	Cr	Co	Mo	W	Nb	Ta	Al	Re
150	4,89	7,96	1,59	5,36	2,54	3,03	7,95	2,20
120	4,39	8,70	1,24	7,29	1,60	3,53	6,70	3,15
90	4,16	8,92	1,13	8,19	1,50	3,56	6,28	3,76
60	3,91	9,13	1,04	8,88	1,38	3,59	5,87	4,33
30	3,87	9,12	0,97	8,78	1,05	Н/о*	5,79	4,47
Плотность, г/см ³	7,19	8,90	10,2	19,3	8,57	16,6	2,7	21,01
Содержание элементов в сплаве	4,5–5,3	9,0–9,5	0,9–1,3	8,1–8,9	1,4–1,8	3,7–4,4	5,7–6,2	3,6–4,3

* Н/о – не определяли.

Таблица 7

**Содержание легирующих элементов в заготовке из сплава ВЖМ5-ВИ
после направленного затвердевания со скоростью кристаллизации 6 мм/ч**

Расстояние от низа заготовки, мм	Содержание элементов, % (по массе)							
	Cr	Co	Mo	W	Ti	Ta	Al	Re
160	4,46	7,78	2,44	3,62	1,62	7,61	6,91	2,24
150	4,41	8,47	2,22	4,87	1,09	6,59	6,47	3,04
120	4,26	8,64	2,05	5,80	0,78	5,23	5,81	3,77
90	4,27	8,89	2,02	6,50	0,67	4,79	5,56	4,33
60	4,47	9,56	2,12	7,60	0,61	4,56	5,55	5,30
30	5,33	11,18	2,71	9,47	0,72	5,58	6,23	6,66
Плотность, г/см ³	7,19	8,90	10,2	19,3	4,51	16,6	2,7	21,01
Содержание элементов в сплаве	4,0–5,0	8,0–10,0	1,6–2,2	5,5–6,5	0,6–1,0	5,5–6,5	5,7–6,2	3,6–3,9

Как видно из данных табл. 5 и 6, повышенное содержание элементов в нижней части заготовки отмечается у элементов с высокой плотностью, в то время как элементы с низкой плотностью концентрируются в верхней части заготовки. Следует отметить, что данное обстоятельство не уменьшает объективности разработанного метода, поскольку в качественном отношении все элементы, входящие в состав сплава, присутствуют как в верхней, так и в нижней частях заготовки, хотя и в разных количествах.

Обсуждение и заключения

Различное распределение Nb, содержащих примеси серы, фосфора и кремния, по высоте заготовок можно объяснить тем, что при малой скорости кристаллизации (6 мм/ч) наступает термодинамическое равновесие между жидкой и твердой фазами. Поскольку примеси кремния, фосфора и серы снижают температуру плавления основы жаропрочных сплавов – никеля, то их концентрация в затвердевшей части будет меньше, чем в жидкой. Поэтому при перемещении фронта кристаллизации, Nb, содержащие примеси, оттесняются затвердевающим сплавом и собираются в жидкой зоне, которая перемещается к верхней части заготовки.

Сплав ЖС32-ВИ, на котором проведено данное исследование, содержал низкое количество серы (<0,0002% (по массе)), поэтому результаты по данной примеси не выглядят так наглядно, как для кремния и фосфора. Однако следует предположить, что в нижней части заготовки, содержание серы снизилось до гораздо более низкого уровня,

чем предел обнаружения используемого газоанализатора Leco CS600 [32]. Подобные образцы с ультранизким содержанием примесей могут быть использованы в качестве стандартных для калибровки более чувствительного оборудования – например, масс-спектрометров высокого разрешения с тлеющим разрядом постоянного тока (GDMS) [34].

Экспериментально показана возможность выделения НВ, содержащих повышенные количества примесей серы, фосфора и кремния, в ограниченном объеме верхней части заготовки. Из результатов МРСА, представленных в табл. 4 и 5, видно, что в рассмотренных образцах включения содержат комплексный состав по примесям, отдельные включения обнаружены только с кремнием в обоих сплавах. По-видимому, это связано с тем, что среди исследуемых примесей содержание кремния было наибольшим. На полученных образцах, содержащих НВ с данными примесями, можно будет проводить глубокие структурные исследования, включающие подробное изучение всех обнаруженных видов НВ.

Таким образом, разработанный метод позволяет сконцентрировать в ограниченном объеме верхней части заготовки НВ, содержащие повышенные количества примесей серы, фосфора и кремния, а в нижней и средней частях многократно снизить их содержание.

Представленные результаты получены при выполнении работ по проекту ориентированных фундаментальных научных исследований в рамках РФФИ №13-08-12055_Офи_м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия / под ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2006. 632 с.
2. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г. Металлургические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №8. С. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-55-71.
3. 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.
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. 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.
6. 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 их высокожаропрочного сплава ВЖМ4-ВИ // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 32–38.
7. 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.
8. 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: 19.06.2017).
9. 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.

10. 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: 10.18577/2071-9140-2016-01-20-23.
11. 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.
12. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Крамер В.В. Ресурсосберегающая технология получения деформируемого никелевого жаропрочного сплава ВЖ175 с применением некондиционных отходов // *Металлург*. 2016. №9. С. 88–94.
13. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Калицев В.А., Крамер В.В. Технология получения деформируемого сплава ВЖ175 для дисков ГТД из кондиционных отходов // *Металлург*. 2015. №9. С. 76–80.
14. 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.
15. 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.
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. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Min P.G., Rigin V.E. Resource-Saving Technologies of Making Advanced Cast and Deformable Superalloys with Allowance for Processing All Types of Wastes // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2016. Vol. 2016. No. 12. P. 1187–1195.
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: 19.06.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-1-1.
19. Мин П.Г., Сидоров В.В. Опыт переработки литейных отходов сплава ЖС32-ВИ на научно-производственном комплексе ВИАМ по изготовлению литых прутковых (шихтовых) заготовок // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №4. С. 20–25.
20. 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: 19.06.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-4-4.
21. 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.
22. Мин П.Г., Сидоров В.В. Рафинирование отходов жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ от примеси кремния в условиях вакуумной индукционной плавки // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №9. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.06.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-1-1.
23. 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.
24. 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. 37–43.
25. 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.

26. Сидоров В.В., Мин П.Г., Фоломейкин Ю.И., Вадеев В.Е. Влияние скорости фильтрации сложнелегированного никелевого расплава через пенокерамический фильтр на содержание примеси серы в металле // *Электromеталлургия*. 2015. №5. С. 12–15.
27. 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: 19.06.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-2-2.
28. Сидоров В.В., Мин П.Г., Каблов Д.Е. Десульфурация монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов при плавке в вакууме // *Металлург*. 2017. №5. С. 57–62.
29. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г., Пучков Ю.А. Влияние поверхностно-активных примесей и добавки лантана на структуру и свойства монокристаллического жаропрочного никелевого сплава ЖС36 // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №4. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.06.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-2-2.
30. 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.
31. Пфанн В. Зонная плавка. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Мир, 1970. 336 с.
32. 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: 19.06.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-12-12.
33. 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: 19.06.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-2-2.
34. Jakubowski N., Prohaska T., Rottmann L., Vanhaecke F. Inductively coupled plasma- and glow discharge plasma-sector field mass spectrometry // *J. Anal. At. Spectrom.* 2011. Vol. 26. P. 693–726.