

УДК 669.018.44:669.245

П.Г. Мин<sup>1</sup>, В.В. Сидоров<sup>1</sup>, В.Е. Вадеев<sup>1</sup>

## РАФИНИРОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ОТ ПРИМЕСЕЙ КРЕМНИЯ, ФОСФОРА И СЕРЫ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ РАСПЛАВА С ВЕСЬМА НИЗКОЙ СКОРОСТЬЮ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ФРОНТА

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-2-2

*Показана эффективность снижения содержания примесей кремния, фосфора и серы в монокристаллических жаропрочных ренийсодержащих никелевых сплавах ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ путем направленного перемещения фронта кристаллизации расплава со скоростью 6 мм/ч. Установлено значительное снижение содержания примесей кремния, фосфора и серы в нижней и средней частях заготовок обоих сплавов. Показано, что неметаллические включения вытеснены в верхнюю часть заготовки вследствие направленного затвердевания расплава.*

*Представленные результаты получены при выполнении работ по проекту ориентированных фундаментальных научных исследований №13-0812055\_офи\_м.*

**Ключевые слова:** кремний, фосфор, сера, жаропрочный сплав, примеси, неметаллические включения, кристаллизация.

*The efficiency of silicon, phosphorus and sulfur contain reducing in single-crystal rhenium-containing superalloys ZhS32-VI and VZhM5-VI by directed moving the crystallization front with rate 6 mm/h. The reducing of silicon phosphorus and sulfur in bottom and middle parts of the casting was founded. The displacing due to directed melt solidification of nonmetallic inclusions to top part of casting was shown.*

*The results were obtain during performance the project of oriented fundamental research №13-0812055\_ofi\_m.*

**Keywords:** silicon, phosphorus, sulfur, superalloy, impurities, nonmetallic inclusions, crystallization.

---

<sup>1</sup>Федеральное 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

К современным никелевым жаропрочным сплавам предъявляется ряд высоких требований, в том числе по обеспечению ультранизкого содержания вредных примесей (серы, фосфора, кремния, кислорода, азота), примесей цветных металлов (свинца, висмута, сурьмы, олова и др.), неметаллических включений (НВ), что достигается совершенствованием технологий их производства [1–11].

Повышенные требования к чистоте сплавов по примесям особенно важно обеспечить при получении рабочих лопаток с монокристаллической структурой, которые нашли широкое применение в современных серийных и перспективных авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) [12–17].

К числу наиболее вредных примесей в этих сплавах относятся кремний, фосфор и сера. Они оказывают отрицательное влияние на механические свойства монокристаллических никелевых жаропрочных сплавов (МНЖС) [2, 6–12] – прежде всего на харак-

теристики длительной прочности и ползучести. Кроме того, сера отрицательно влияет на стойкость к высокотемпературному окислению, что также является важной характеристикой этого класса материалов [18, 19]. Основными источниками поступления этих примесей в литейные жаропрочные сплавы, получаемые методом направленной кристаллизации, являются металлические шихтовые материалы, в том числе литейные отходы [20–24], обладающие повышенной загрязненностью примесями, футеровка плавильного тигля и керамические материалы, применяемые для получения деталей авиационных ГТД.

В условиях вакуумной индукционной плавки удаление указанных примесей затруднено, поскольку данный метод, как правило, не предусматривает использования шлаковых смесей, а испарение данных примесей из расплава не происходит в связи с их низкой упругостью пара. В работах [25–34] рассмотрены пути и методы рафинирования литейных жаропрочных сплавов от примесей кремния, фосфора и серы за счет связывания их в тугоплавкие соединения с редкоземельными элементами и последующей фильтрацией расплава через пенокерамический фильтр. Если в случае с серой и фосфором получены значительные результаты (разработаны эффективные способы снижения содержания серы и нейтрализации вредного влияния фосфора на свойства МНЖС), то в случае кремния данный метод позволил снизить его содержание в сплаве ЖС32-ВИ всего на 0,057% при введении повышенного количества РЗМ (0,5% (по массе)), остаточное содержание которого может отрицательно повлиять на механические свойства полученного сплава.

В работе [26] также рассмотрен другой метод рафинирования расплава от примеси кремния путем введения в расплав окислителя – закиси никеля. Эффективность от введения закиси никеля была выше: максимальная степень удаления кремния составила 29% отн., однако при этом содержание алюминия в сплаве за счет окисления снизилось на 50% отн. Очевидно, что применение данного способа на практике вызовет определенные сложности, связанные с изменением химического состава сплава (исследования показали, что содержание алюминия при использовании закиси никеля в опробованных количествах снижается на 50,7% отн., похожая тенденция может наблюдаться и для других активных компонентов, входящих в состав сплава, например ниобия, тантала, титана). Кроме того, поскольку содержание кислорода в МНЖС также ограничено – после удаления кремния данным методом – потребуется дополнительное рафинирование расплава от кислорода.

Авторами предложен новый подход к рафинированию МНЖС от примесей кремния, фосфора и серы путем направленной кристаллизации расплава с весьма низкой скоростью перемещения фронта.

### **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», 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 качестве объекта исследования выбраны серийные МНЖС: 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.

Направленную кристаллизацию заготовок из данных сплавов проводили в алундовых тиглях  $\varnothing 18$  мм и высотой 150 мм со скоростью 6 мм/ч при тепловом градиенте  $150^\circ\text{C}/\text{см}$ . Направленную кристаллизацию сплава ЖС32-ВИ со скоростью 7 мм/мин осуществляли методом LMC (Liquid Metal Cooling) на промышленной установке УВНК-9А с компьютерным управлением процессом.

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 [35] фирмы Лесо. Содержание примесей фосфора и кремния определяли масс-спектрометрическим методом на спектрометре с индуктивно связанной плазмой IСAPQ с приставкой лазерного пробоотбора NWR 266 [36]. Содержание вышеуказанных примесей, НВ и химический состав сплава по основным легирующим металлам контролировали по высоте, проводя отбор проб из различных частей заготовки.

**Результаты и обсуждение**

Рассмотренные положения процесса зонной плавки применили для очистки монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов от примесей – в частности от кремния, фосфора и серы. Для этого заготовки из сплавов ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ, содержащие соответственно 0,26% Si; 0,01% P; <0,0002% S и 0,15% Si; 0,039% P; 0,0056% S, кристаллизовали со скоростью перемещения фронта кристаллизации 6 мм/ч. Контролировали по высоте заготовки содержание вышеуказанных примесей, НВ и химический состав сплава по основным легирующим металлам. Полученные результаты приведены в табл. 2 и 3.

Из полученных результатов (табл. 2) видно, что предложенный метод очистки расплава от примесей эффективен и позволяет получить сплав с весьма низким содержанием примесей кремния, фосфора и серы путем их вытеснения в верхнюю часть отливки. Содержание примесей в сплаве ЖС32-ВИ снизилось в нижней части отливки по сравнению с их первичным содержанием в сплаве: по Si – в 1,5–2,2 раза, по P –

в 14–25 раз, по S – в 2,5 раза. Аналогичные результаты получены для безуглеродистого сплава ВЖМ5-ВИ, содержание примесей снизилось: по Si – в 1,5–1,6 раза, по P – в 8–10 раз, по S – в 25–28 раз. Следует отметить, что у сплава ВЖМ5-ВИ содержание серы снизилось более заметно, поскольку изначально оно было выше, чем в сплаве ЖС32-ВИ.

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

В табл. 3 приведены результаты по распределению НВ по высоте заготовки. Поскольку классификация НВ по типам из-за небольшого их размера затруднена, определяли суммарную загрязненность НВ.

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 оттесняются фронтом кристаллизации в верхнюю часть заготовки, их объемная доля и максимальная площадь значительно превышают значения этих характеристик в нижней части заготовки, что коррелирует с результатами, представленными в табл. 2. Для наглядности результаты исследований представлены в виде схемы на рис. 1.

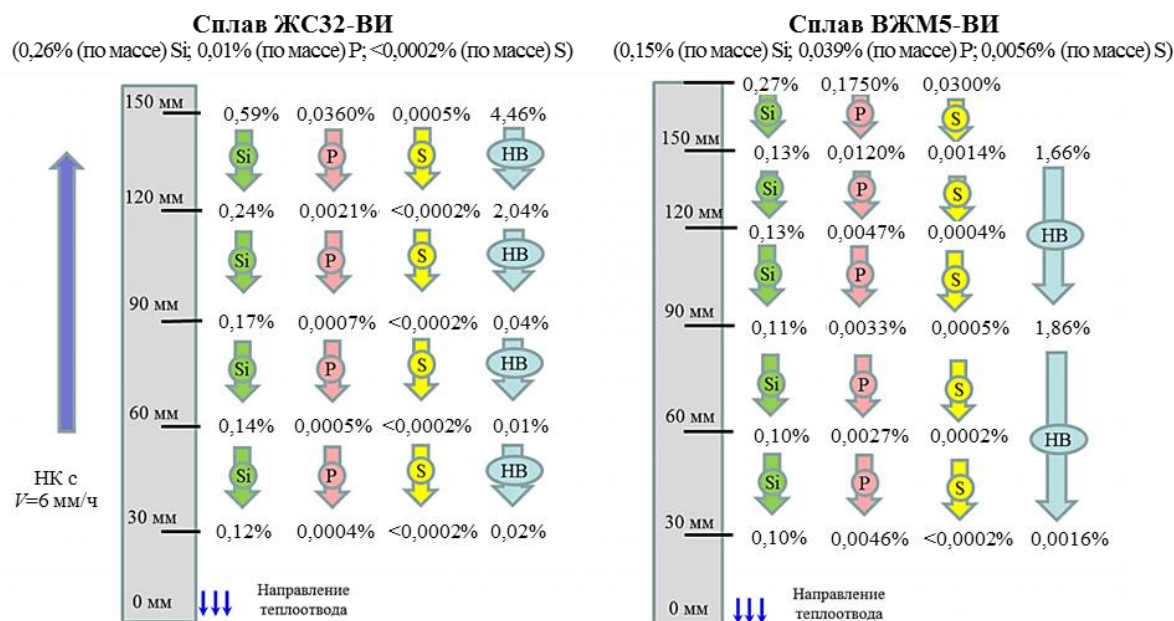


Рис. 1. Изменение содержания примесей и неметаллических включений (НВ) по высоте заготовок, полученных в условиях направленной кристаллизации со скоростью 6 мм/ч

В табл. 4 приведен локальный химический состав обнаруженных фаз\*, а на рис. 2 и 3 – микроструктура по высоте заготовки. Как видно из приведенных данных, в нижней и средней части заготовки НВ, содержащие примеси кремния, фосфора и серы, не обнаружены (рис. 2, а, б и 3, а, б). Зато в верхней части заготовки наблюдаются крупные скопления НВ, содержащие в своем составе переменное количество кремния и фосфора, а также серы (рис. 2, в, г и 3, в, г).

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	Н/о*	Н/о	Н/о	4,3	6,6	68,0	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	2,5	1,3	Н/о	99,9
	Фаза 3	7,0	1,5	Н/о	Н/о	Н/о	6,4	9,4	61,7	Н/о	1,4	Н/о	Н/о	2,8	6,4	3,5	100,1
	Фаза 5 (черная)	1,4	37,8	Н/о	Н/о	Н/о	5,8	5,6	28,8	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	79,4**
	Фаза 6 (черная)	Н/о	3,7	2,4	15,6	14,2	7,2	10,1	33,2	Н/о	4,2	Н/о	3,0	2,5	2,2	1,7	100,0
Середина	Матрица	6,4	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	4,8	9,5	65,2	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	1,6	8,2	4,2	99,9
	Фаза 1	0,7	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	1,8	2,6	18,2	Н/о	18,0	3,8	Н/о	35,2	8,9	1,6	92,3**
Низ	Матрица	5,6	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	4,3	10,1	63,1	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	3,2	8,9	4,8	100,0
	Фаза 1	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	Н/о	1,0	0,8	4,4	Н/о	22,7	Н/о	Н/о	52,5	8,1	Н/о	89,5**

\* Н/о – не обнаружен.

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

\* Исследование выполнила Е.А. Давыдова.

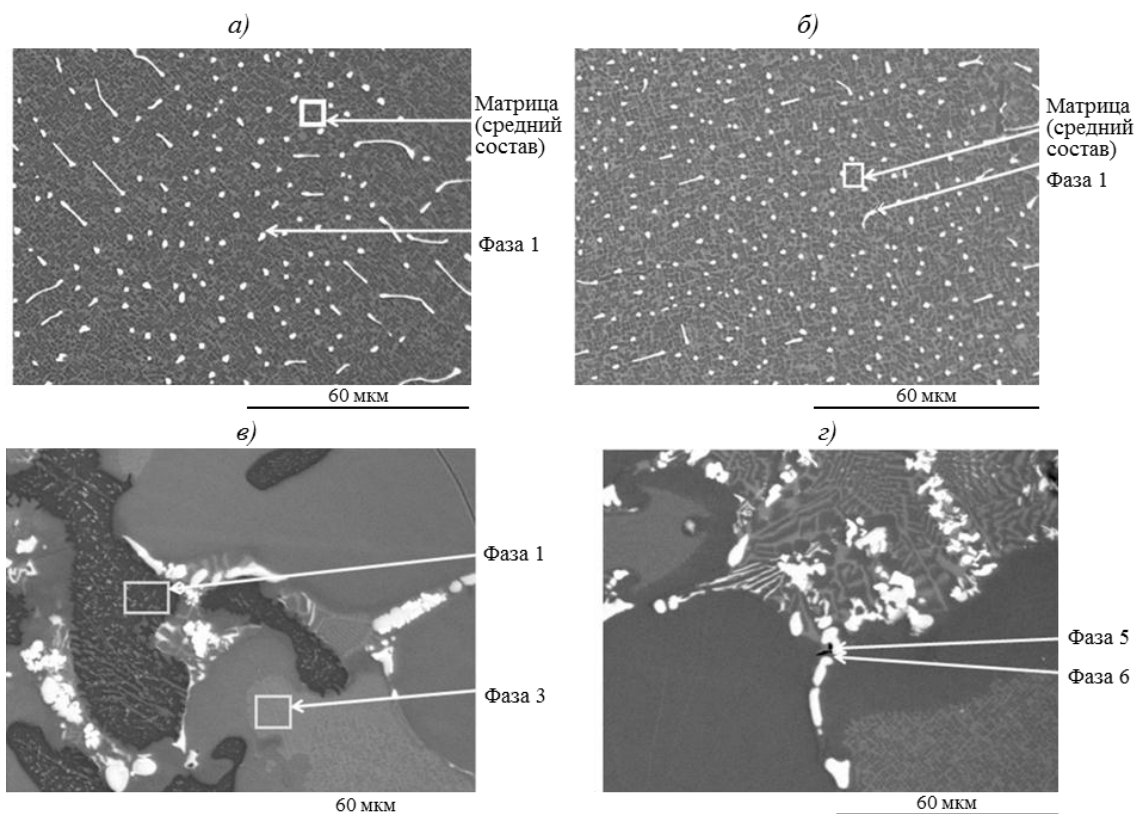


Рис. 2. Неметаллические включения в заготовке из сплава ЖС32-ВИ после направленного затвердевания со скоростью кристаллизации 6 мм/ч:

*a* – низ заготовки; *б* – середина заготовки; *в*, *г* – верх заготовки

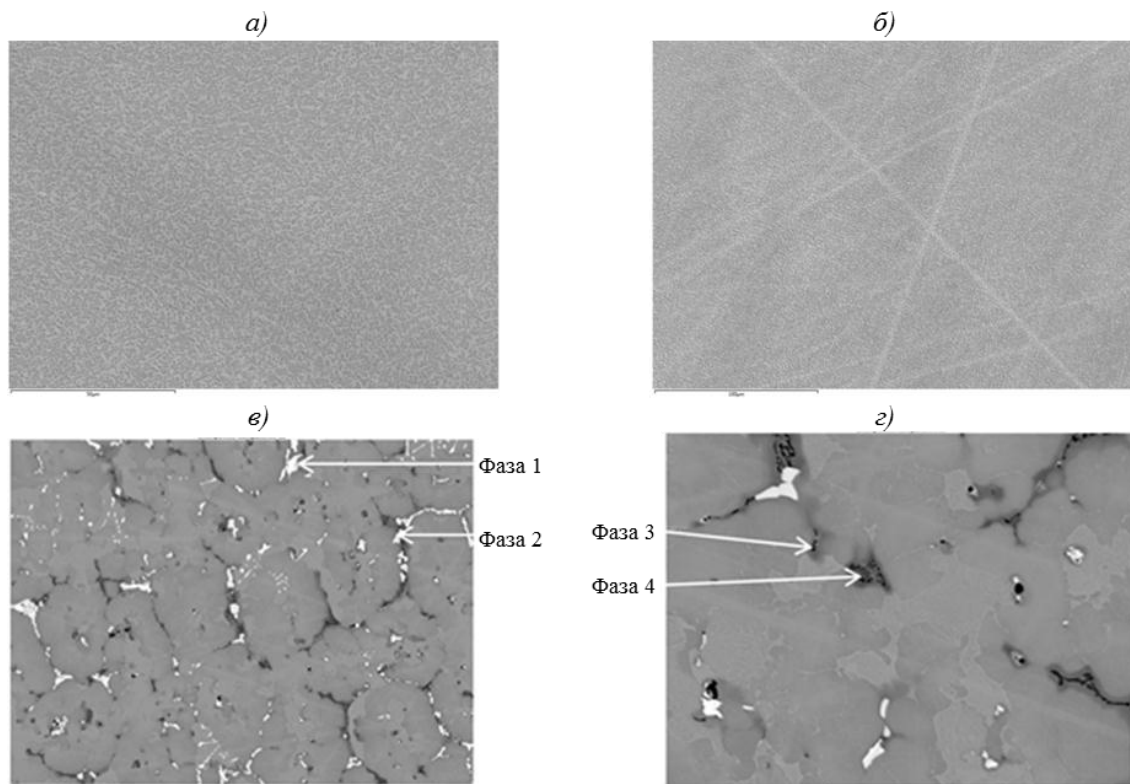


Рис. 3. Неметаллические включения в заготовке из сплава ВЖМ5-ВИ после направленного затвердевания со скоростью кристаллизации 6 мм/ч:

*a* – низ заготовки; *б* – середина заготовки; *в*, *г* – верх заготовки

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	Н/о*	Н/о	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	Н/о	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	Н/о	9,24	1,16	0,58	72,63***

\* Н/о – не обнаружен.

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

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

Следует отметить, что в составе обнаруженных НВ в верхней части заготовки, (по сравнению с ее нижней частью) содержатся в повышенных количествах кислород и углерод, которые также являются вредными примесями в данном сплаве.

Для сравнения из металла той же плавки сплава ЖС32-ВИ отлили заготовки, которые кристаллизовали в электрокорундовой керамической форме  $\varnothing 16$  мм и высотой 160 мм со скоростью 7 мм/мин, т. е. по стандартному режиму для данного сплава. Полученные результаты по распределению Si, P и S показали, что их содержание в нижней части отливки не снизилось, а содержание Si в верхней части заготовки даже несколько выросло, по-видимому, за счет взаимодействия расплава с керамикой формы, содержащей несвязанный оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ).

Такое различное распределение примесей по высоте заготовок в зависимости от скорости направленного затвердевания 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 понижают температуру плавления основы жаропрочных сплавов – никеля, то их концентрация в затвердевшей части будет меньше, чем в жидкой. Поэтому при перемещении фронта кристаллизации примеси оттесняются затвердевающим сплавом и собираются в жидкой зоне, которая перемещается к верхней части заготовки.

Наряду с изменением содержания кремния, фосфора и серы по высоте полученных заготовок, одновременно изменяется также химический состав сплавов по основным легирующим элементам. Полученные результаты химического анализа сплавов по высоте заготовок приведены в 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 <sup>3</sup>	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 <sup>3</sup>	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 полученных результатов анализа, имеет место неравномерность распределения элементов по высоте заготовок обоих сплавов: повышенное содержание элементов в нижней части заготовки отмечается, как правило, у элементов с высокой плотностью, в то время как повышенное содержание элементов в верхней части заготовки отмечается у элементов с низкой плотностью. С практической точки зрения данное обстоятельство играет скорее положительную, нежели отрицательную роль: наиболее дорогостоящие элементы, например рений и тантал, концентрируются внизу заготовки, в то время как верхняя часть, содержащая основную массу примесей, обогащается легким алюминием, который является дешевым материалом относительно дефицитных тугоплавких металлов. Полученная отрафинированная данным способом заготовка может являться исходной шихтой для выплавки марочных сплавов с доведением до заданного состава путем долегиования свежих шихтовых материалов.

### Заключения

В результате проведенных исследований установлено, что путем направленного перемещения фронта кристаллизации расплава со скоростью 6 мм/ч в заготовках литейных жаропрочных сплавов ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ, загрязненных кремнием, фосфором и серой, существенно снижается содержание примесей в нижней и средней частях заготовок.

Содержание примесей в сплаве ЖС32-ВИ снизилось в нижней части отливки по сравнению с их первичным содержанием в сплаве: по Si – в 1,5–2,2 раза, по P – в 14–25 раз, по S – в 2,5 раза. Аналогичные результаты получены для безуглеродистого сплава ВЖМ5-ВИ, содержание примесей снизилось: по Si – в 1,5–1,6 раза, по P – в 8–10 раз, по S – в 25–28 раз. Следует отметить, что в сплаве ВЖМ5-ВИ содержание серы снизилось более существенно, поскольку изначально оно было выше, чем в сплаве ЖС32-ВИ.

*Работа выполнена в рамках проекта РФФИ №13-08-12055 Офи\_м.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Металлургия литейных жаропрочных сплавов // Авиационные материалы. Избранные труды 1932–2007: юбил. науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 125–132.
2. Мин П.Г., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е. Влияние примесей на структуру и механические свойства литейных никелевых жаропрочных сплавов и разработка эффективных способов их рафинирования // Сб. докл. науч.-техн. конф. «Климовские чтения–2015. Перспективные направления развития авиадвигателестроения». СПб.: Скифия-принт, 2015. С. 275–283.
3. 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. 3–11.

4. 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.
5. 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.
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 из высокожаропрочного сплава ВЖМ4-ВИ // *Авиационные материалы и технологии*. 2013. №3. С. 32–38.
7. 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.
8. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Филонова Е.В., Тимофеева О.Б. Структурные исследования и свойства монокристаллов сплавов ВЖМ4-ВИ и ВЖМ5-ВИ, содержащих повышенное количество фосфора // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №3. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.01.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-2-2.
9. 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.
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. 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: 09.01.2017).
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. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е., Горюнов А.В. Современные технологии получения прутковых заготовок из литейных жаропрочных сплавов нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 97–105.
14. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Производство литых прутковых (шихтовых) заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // *Сб. тр. науч.-технич. конф., посвященной 310-летию уральской металлургии и созданию технико-внедренческого центра металлургии и тяжелого машиностроения. Екатеринбург: Наука Сервис, 2011. Т. 1. С. 31–38.*
15. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД // *Технология легких сплавов*. 2007. №2. С. 6–16.
16. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Особенности технологии выплавки и разлива современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*. 2011. №SP2. С. 68–78.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г., Каблов Д.Е. Получение Re–Ru содержащего сплава с использованием некондиционных отходов // *Металлургия машиностроения*. 2012. №3. С.15–17.

21. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г. Опыт переработки в условиях ФГУП «ВИАМ» литейных отходов жаропрочных сплавов, образующихся на моторостроительных и ремонтных заводах // *Металлург.* №1. 2014. С. 86–90.
22. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г. Ресурсосберегающая технология переработки некондиционных отходов литейных жаропрочных сплавов // *Металлург.* №5. 2014. С. 35–39.
23. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Мин П.Г. Инновационная технология производства жаропрочного сплава ЖС32-ВИ с учетом переработки всех видов отходов в условиях сертифицированного серийного производства ФГУП «ВИАМ» // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2014. №6. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.01.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-6-1-1.
24. 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.
25. 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.
26. 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: 09.01.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-1-1.
27. 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.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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: 09.01.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-2-2.
35. 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: 09.01.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-12-12.
36. 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 09.01.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-2-2.