

УДК 669.018.44:669.245

П.Г. Мин<sup>1</sup>, В.В. Сидоров<sup>1</sup>, В.Е. Вадеев<sup>1</sup>**ПОВЕДЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ И ЛАНТАНА  
ПРИ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ  
ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-4-4

*Исследовано поведение кремния, фосфора и лантана при направленной кристаллизации монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов ЖС32-VI и ВЖМ5-VI, применяемых для литья лопаток авиационных газотурбинных двигателей.*

*Показано, что насыщение сплавов кремнием при отливке монокристаллов происходит за счет взаимодействия углерода с несвязанным оксидом кремния, входящим в состав керамической формы. При этом в безуглеродистых жаропрочных сплавах насыщение металла кремнием происходит в 4 раза медленнее, чем в углеродсодержащих. Для обеспечения высокой чистоты по примеси кремния и гарантированно высоких стабильных свойств отливок рекомендуется применение безуглеродистых жаропрочных никелевых сплавов.*

*Экспериментально установлено, что микролегирование лантаном жаропрочных никелевых сплавов, содержащих повышенное количество фосфора (0,014% (по массе)), позволяет повысить долговечность монокристаллов благодаря связыванию фосфора в термически прочное тугоплавкое соединение (фосфид лантана) и нейтрализации его отрицательного влияния. Показано, что при многократном переплаве сплава изменяется содержание макро- и микролегирующих элементов и, как следствие, снижается количество упрочняющей  $\gamma'$ -фазы и долговечность монокристаллов.*

*Для обеспечения гарантированно высоких эксплуатационных характеристик монокристаллов рекомендуется долегиловать сплав до оптимального химического состава при переплаве в вакуумной индукционной печи с применением экспресс-анализа.*

**Ключевые слова:** кремний, фосфор, керамика, литейная форма, жаропрочный сплав, примеси, направленная кристаллизация, рафинирование, нейтрализация.

*The silicon, phosphorus and lanthanum behavior during directional solidification of single-crystals ZhS32-VI and VZhM5-VI superalloys for gas turbine blades was studied.*

*It is proved that saturation with silicon during directional solidification of single-crystals took place for a reason of interaction of carbon with free silicon oxide included in the composition of the ceramic mold. It is founded that saturation with silicon of non-carbon single-crystal alloys occurs four times slower than carbon-containing alloys. The utilization of non-carbon nickel-based superalloys is recommended for high pure provision from silicon impurity and guaranteed high properties of casts.*

*Experimentally established that lanthanum microalloying of nickel-based superalloys with high phosphorus contain (0,014 wt. %) allows to increase high temperature strength of single-crystals on account strong, refractory compound (lanthanum phosphide) and neutralization harmful phosphorus influence. It is shown that repeated remelting leads to a change in the content of macro- and microalloying elements and consequently reduction in the amount of  $\gamma'$ -phase and single-crystals service life.*

*It is recommended to remelt nickel-based superalloys in vacuum induction furnace with optimal composition control by chemical express analysis for provision guaranteed high operational of single-crystals.*

**Keywords:** silicon, phosphorus, ceramic, mold, superalloy, impurities, directional solidification, refinement, neutralization.

<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

Кремний и фосфор являются одними из наиболее вредных примесей в современных жаропрочных никелевых сплавах (ЖНС), применяемых при литье лопаток с монокристаллической структурой для авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Кремний способствует образованию ТПУ фаз, двойных карбидов  $M_6C$ , огрублению структуры и увеличению количества пор гомогенизации после термической обработки [1–5]. Фосфор концентрируется в основном в междендритных областях и образующаяся фосфорсодержащая фаза является местом преимущественного образования и распространения трещин, что ускоряет процесс разрушения сплава при высоких температурах [6]. Проведенные исследования показали, что долговечность монокристаллов сплава ЖС32-ВИ не удовлетворяет паспортным характеристикам сплава при содержании кремния  $>0,2\%$  (по массе) [7]. В статье [8] обоснованы предельно допустимые содержания кремния ( $0,2\%$  (по массе)) и фосфора ( $0,010\%$  (по массе)) в сплаве ВЖМ4-ВИ, при которых не происходит снижения длительной прочности.

Источником поступления кремния в сплавы являются металлические шихтовые материалы, однако основное загрязнение ЖНС с монокристаллической структурой происходит при длительном взаимодействии керамики литейных форм и стержневых масс, содержащей свободный (несвязанный)  $SiO_2$ , с расплавом в процессе направленной кристаллизации [9]. Механизм процесса насыщения расплава кремнием при взаимодействии с керамическими материалами ранее не был изучен. При выплавке в вакуумной индукционной печи (ВИП) фосфор может неконтролируемо переходить в расплав из керамики плавильного тигля, для повышения прочности которого используют связующие, содержащие до  $4\% P_2O_5$ .

В настоящее время отсутствуют эффективные способы снижения содержания кремния и фосфора в условиях выплавки в ВИП. Исследования по снижению содержания кремния в расплаве путем введения закиси никеля [10] или редкоземельных металлов (РЗМ) в повышенных количествах [11] и направленной кристаллизации в условиях высокотемпературного градиента с малыми скоростями перемещения фронта [12, 13] имеют фундаментальный или экспериментальный характер.

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны ресурсосберегающие технологии переработки до  $100\%$  отходов ЖНС [14–28], позволяющие существенно снизить стоимость сплавов. Однако в условиях циркуляции отходов за счет вышеописанных процессов происходит постоянное повышение содержания в них примесей кремния и фосфора. Это вызывает необходимость применения свежих шихтовых материалов для обеспечения чистоты сплавов в соответствии с требованиями технических условий, что приводит к повышению стоимости сплавов.

Лантан связывает фосфор в термически прочные тугоплавкие соединения, нейтрализуя его отрицательное влияние на механические свойства ЖНС. В статьях [4, 11–14, 29–33] описана возможность повышения длительной прочности и малоциклового усталости монокристаллов сплавов ВЖМ4-ВИ, ВЖМ5-ВИ и ЖС36-ВИ с повышенным ( $>0,01\%$  (по массе)) содержанием фосфора за счет присадки лантана. Ввиду высокой химической активности лантана его содержание при плавке в ВИП снижается за счет взаимодействия с керамикой плавильного тигля и испарения в виде субоксидов. С учетом того, что при промышленном литье лопаток ГТД на моторостроительных заводах имеет место подшихтовка к свежему сплаву собственных отходов в виде элементов литниковой системы и бракованных лопаток, возникает вопрос: насколько эффективен данный метод нейтрализации отрицательного влияния фосфора?

В связи с вышеизложенным, целью данной работы являлось изучение поведения кремния, фосфора и лантана при получении монокристаллов ЖНС методом направленной кристаллизации.

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») [34].

*Представленные результаты получены при выполнении работ по проекту ориентированных фундаментальных научных исследований №13-08-12055\_офи\_м.*

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбраны серийные ЖНС с монокристаллической структурой: ренийсодержащий сплав ЖС32-ВИ, который широко распространен в качестве материала для рабочих лопаток первой ступени турбины высокого давления серийных ГТД (АЛ-31-Ф, РД-33, ПС-90 и их модификаций), и безуглеродистый ренийсодержащий сплав ВЖМ5-ВИ, применяемый для изготовления рабочих лопаток перспективного ГТД – ПД-14 для самолета МС-21. 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 УВНС-4 (типа ВИАМ-2002) в тигле емкостью 20 кг. Разливку металла проводили в стальные трубы  $\varnothing 90$  мм через керамическую воронку.

Направленную кристаллизацию литых прутковых заготовок из данных сплавов проводили методом LMC (liquid metal cooling) на промышленной установке УВНК-9А с компьютерным управлением процессом.

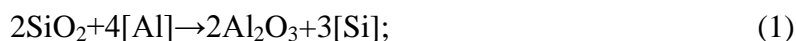
Содержание легирующих элементов определяли на атомно-эмиссионном спектрометре VARIAN 730-ES. Содержание кремния и фосфора определяли масс-спектрометрическим методом на спектрометре с индуктивно связанной плазмой ICP-AES с приставкой лазерного пробора NWR 266 [35].

Исследования микроструктуры и локального химического состава проводили на оптическом микроскопе Olympus GX51 и растровом электронном микроскопе Hitachi SU 8010\* с приставкой для микрорентгеноспектрального анализа EDS X-Max 80.

### Результаты

С целью определения возможных реакций восстановления кремния из керамики при отливке монокристаллов методом направленной кристаллизации проведен термодинамический анализ основных реакций взаимодействия  $\text{SiO}_2$  со всеми легирующими элементами, входящими в состав сплавов ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ, при температуре  $1600^\circ\text{C}$ . В результате анализа установлено, что наиболее вероятными реакциями восстановления кремния из керамики формы являются:

\* Исследования микроструктуры и локального химического состава проведены совместно с сотрудником ФГУП «ВИАМ» Ф.Н. Карачевцевым.



Для исследования закономерностей восстановления кремния из керамики литейной формы, содержащей несвязанный  $\text{SiO}_2$ , сплавы ЖС32-ВИ (С: 0,15%) и ВЖМ5-ВИ (С:  $\leq 0,005\%$ ) пятикратно переплавили с заливкой расплава в керамическую форму и последующей направленной кристаллизацией по стандартному для каждого сплава режиму. Таким образом, проведена имитация возврата литейных отходов в производство, что происходит при серийном литье лопаток из монокристаллических ЖНС. После каждого переплава в сплавах определяли содержание кремния, углерода и алюминия (табл. 2 и 3).

Таблица 2

## Содержание кремния, углерода и алюминия в сплаве ЖС32-ВИ

Условный номер переплава	Содержание элементов, % (по массе)					
	Si		C		Al	
	0,121	изменение содержания	0,145	изменение содержания	6,30	изменение содержания
1	0,144	+0,023	0,105	-0,040	6,30	0
2	0,154	+0,010	0,069	-0,036	6,33	+0,03
3	0,183	+0,029	0,035	-0,034	6,40	+0,07
4	0,192	+0,009	0,023	-0,012	6,43	+0,03
5	0,232	+0,040	0,014	-0,009	6,54	+0,11

Таблица 3

## Содержание кремния, углерода и алюминия в сплаве ВЖМ5-ВИ

Условный номер переплава	Содержание элементов, % (по массе)					
	[Si]		C		Al	
	0,012	изменение содержания	0,0033	изменение содержания	5,92	изменение содержания
1	0,020	+0,008	0,0023	-0,0010	5,82	-0,10
2	0,031	+0,011	0,0023	0	5,84	+0,02
3	0,035	+0,004	0,0021	-0,0002	5,83	-0,01
4	0,040	+0,005	0,0007	-0,0014	5,87	-0,04
5	0,044	+0,004	<0,0005	-0,0002	5,87	0

Как видно из результатов химического анализа, повышение содержания кремния в сплаве сопровождается снижением содержания углерода, но не алюминия, т. е. насыщение сплавов кремнием происходит за счет взаимодействия углерода со свободным (несвязанным)  $\text{SiO}_2$  керамической формы по реакции (2). При этом в безуглеродистом сплаве после пятого переплава содержание кремния увеличилось на 0,032%, а в углеродистом сплаве – на 0,11%. Таким образом, при отливке лопаток из безуглеродистых ЖНС с монокристаллической структурой насыщение металла кремнием происходит в 4 раза медленнее, чем из углеродистых.

Микроструктуры сплавов ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ после первого и пятого переплавок представлены на рис. 1.

После первого переплава микроструктура сплава ЖС32-ВИ является типичной для данного сплава (рис. 1, а): отчетливо видны карбиды в межосных пространствах дендритов, однако после пятого переплава (рис. 1, б) карбиды не наблюдаются и структура схожа со структурой безуглеродистого сплава ВЖМ5-ВИ (рис. 1, в, г). Это согласуется с результатами химического анализа (табл. 2): содержание углерода в сплаве ЖС32-ВИ после пятого переплава снижается до 0,014% (по массе), что соответствует уровню содержания углерода в безуглеродистом сплаве ВЖМ5-ВИ ( $\leq 0,015\%$  (по массе)).

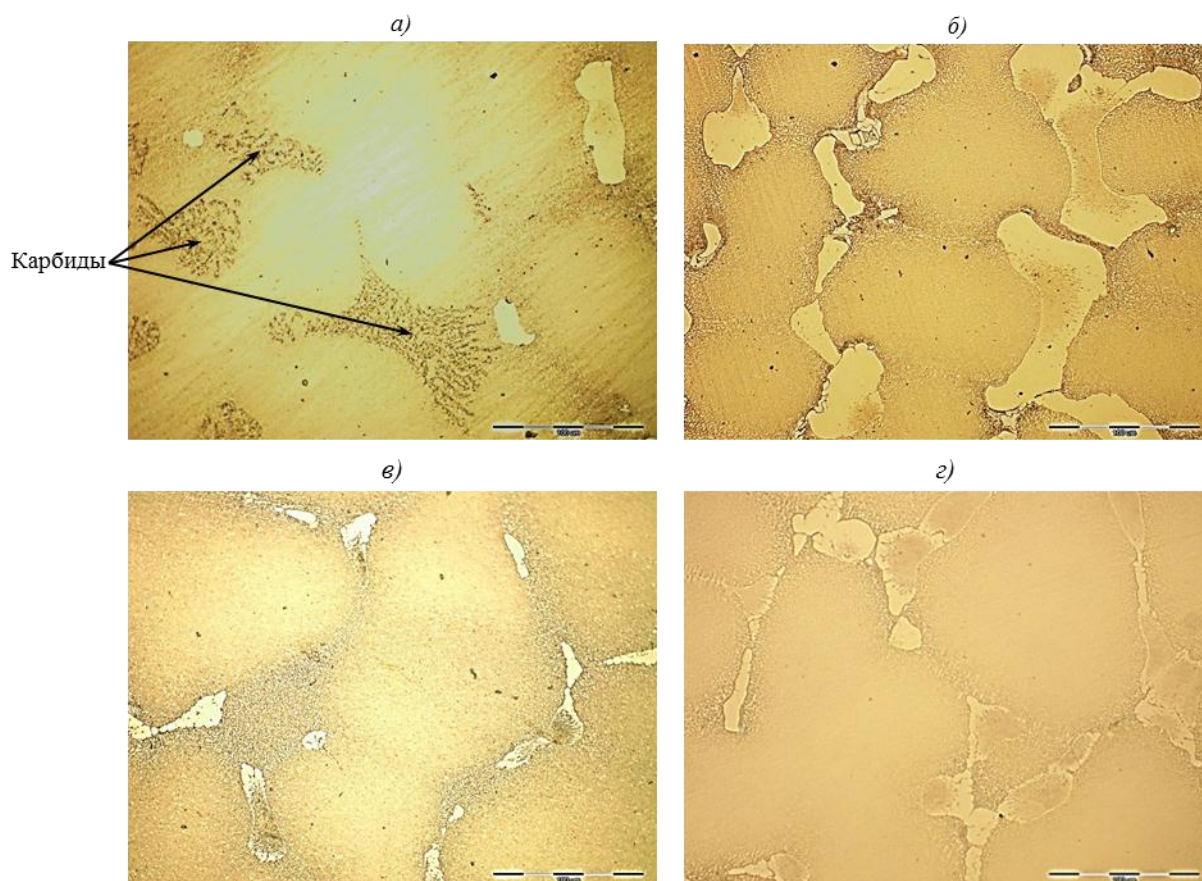


Рис. 1. Микроструктуры ( $\times 500$ ) сплавов ЖС32-ВИ (а, б) и ВЖМ5-ВИ (в, г) после первого (а, в) и пятого переуплавок (б, г)

При исследовании локального химического состава сплавов ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ после пятого переуплава обнаружены фазы на основе тугоплавких металлов, содержащие кремний. Внешний вид этих фаз представлен на рис. 2, химический состав приведен в табл. 4.

Таблица 4

**Состав фаз, содержащих кремний, в сплавах ЖС32-ВИ и ВЖМ5-ВИ  
после пятого переуплава**

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)										
	Si	Ni	Co	Re	Nb	Ta	W	Mo	Cr	Ti	Al
ЖС32-ВИ	0,5	2,6	—	—	50,2	26,1	3,6	—	0,3	0,3	—
	0,8	4,7	2,1	3,6	41,9	17,8	6,9	2,4	1,7	—	—
	2,7	26,4	10,9	10,0	8,8	3,6	13,5	7,4	5,8	—	0,7
	3,1	21,9	10,1	9,6	9,1	4,3	15,3	8,5	5,6	—	0,3
	1,0	16,6	7,8	20,4	3,6	3,1	23,5	6,5	5,5	—	0,3
ВЖМ5-ВИ	1,2	17,7	9,6	13,6	—	3,2	9,1	21,0	7,8	0,2	0,2
	2,1	21,6	9,6	5,0	—	4,6	5,6	20,3	6,3	0,6	0,1
	1,2	17,4	8,9	13,6	—	3,3	8,4	19,3	6,9	0,4	0,2

Анализ результатов, приведенных в табл. 4 и на рис. 2, показывает, что в сплаве ЖС32-ВИ после пяти последовательных переуплавок с направленной кристаллизацией образуется два типа кремнийсодержащих фаз на основе тугоплавких металлов: фазы на основе ниобия и тантала, содержащие  $< 1\%$  (по массе) кремния, и фазы на основе вольфрама, рения, молибдена и ниобия, в состав которых может входить от 1 до

3% (по массе) кремния. В сплаве ВЖМ5-ВИ также образуется фаза на основе тугоплавких металлов (молибдена, рения и вольфрама), содержащая от 1 до 2% (по массе) кремния. Эти фазы выделяются вокруг эвтектической  $\gamma'$ -фазы. На рис. 2 видно, что в структуре сплава ВЖМ5-ВИ количество и размер этих фаз значительно меньше, чем в сплаве ЖС32-ВИ, что объясняется более низким содержанием кремния (табл. 3).

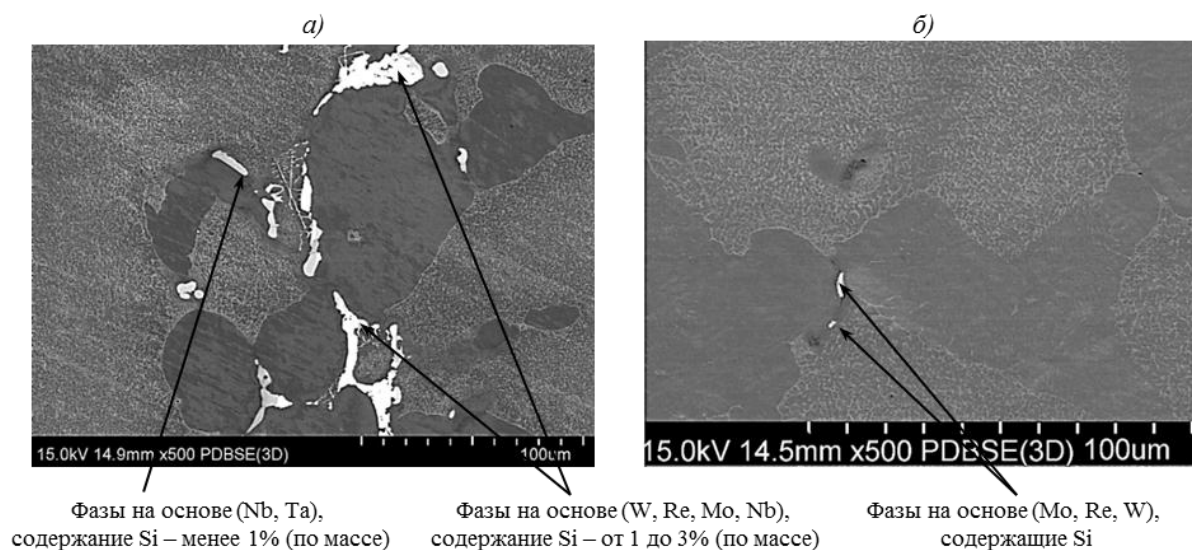


Рис. 2. Микроструктура сплавов ЖС32-ВИ (0,23% Si) (а) и ВЖМ5-ВИ (0,044% Si) (б) после пятого переплава

Таким образом, показано, что проблема повышения содержания кремния при направленной кристаллизации актуальна как для углеродистых, так и безуглеродистых ЖНС. Однако за счет того, что основным элементом, участвующим в реакции восстановления кремния из  $\text{SiO}_2$  керамической формы, является углерод, безуглеродистые сплавы менее склонны к насыщению кремнием. Следовательно, для обеспечения высокой чистоты по примеси кремния и гарантированно высоких стабильных свойств рекомендуется применять безуглеродистые ЖНС.

Другой целью данной работы являлась проверка эффективности нейтрализации вредного влияния фосфора путем микролегирования лантаном в условиях нескольких последовательных переплавов, поскольку при этом не происходит удаления фосфора из расплава, а остаточное содержание лантана снижается с каждым переплавом.

Для оценки эффективности данного способа нейтрализации вредного влияния фосфора сплав ВЖМ5-ВИ (0,014% (по массе) P) последовательно переплавили четыре раза с отливкой монокристаллов, при этом во время второго и четвертого переплавов сплав микролегировали лантаном. После каждого переплава исследовали химический состав сплава и механические свойства монокристаллов (табл. 5).

Анализ данных, приведенных в табл. 5, показывает, что у монокристаллов сплава, отлитых на первом переплаве с присадкой фосфора, среднее время до разрушения ( $\tau$ ) составляет 367,5 ч (318 и 417 ч), что почти в 2 раза меньше, чем у монокристаллов, отлитых на втором переплаве, когда в металл присадили лантан. При этом повысилось остаточное содержание лантана – с 0,0002 до 0,0030% (по массе).

Таблица 5

**Влияние кратности переплава на изменение химического состава и жаропрочных свойств монокристаллов <001> сплава ВЖМ5-ВИ**

Кратность переплава	Особенности плавки в ВИП	$\tau$ , ч (при 1100°C и $\sigma=115$ МПа)	Содержание элементов, % (по массе)										
			Al	Cr	Co	W	Mo	Ti	Ta	Re	La	P	
1	Сплав с добавкой 0,01% P	318; 417	6,0	4,4	8,5	5,9	1,9	0,75	5,7	4,2	0,0002	0,014	
2	Присадка 0,20% La	596,5	5,9	4,4	8,8	5,8	1,9	0,85	5,7	4,2	0,0030	0,014	
3	Переплав без присадки La	367; 401	5,9	3,6	8,5	6,0	1,9	0,75	5,5	4,2	0,0002	0,014	
4	Присадка 0,20% La	219; 258; 246	5,7	3,4	8,2	5,7	1,85	0,73	5,2	4,1	0,0080	0,014	
Изменение химического состава			-0,30	-1,0	-0,30	-0,20	-0,05	-0,02	-0,50	-0,10	-	-	
По паспорту и ТУ на сплав			$\geq 500$	5,7–6,2	4,0–5,0	8,0–10,0	5,5–6,5	1,6–2,2	0,6–1,0	5,5–6,5	3,6–3,9	-	$\leq 0,01$

Исследования локального химического состава показали, что после первого переплава и полной термической обработки (ПТО) в монокристаллах образуются фазы (рис. 3, а), обогащенные тугоплавкими металлами – вольфрамом, рением и молибденом (табл. 6).

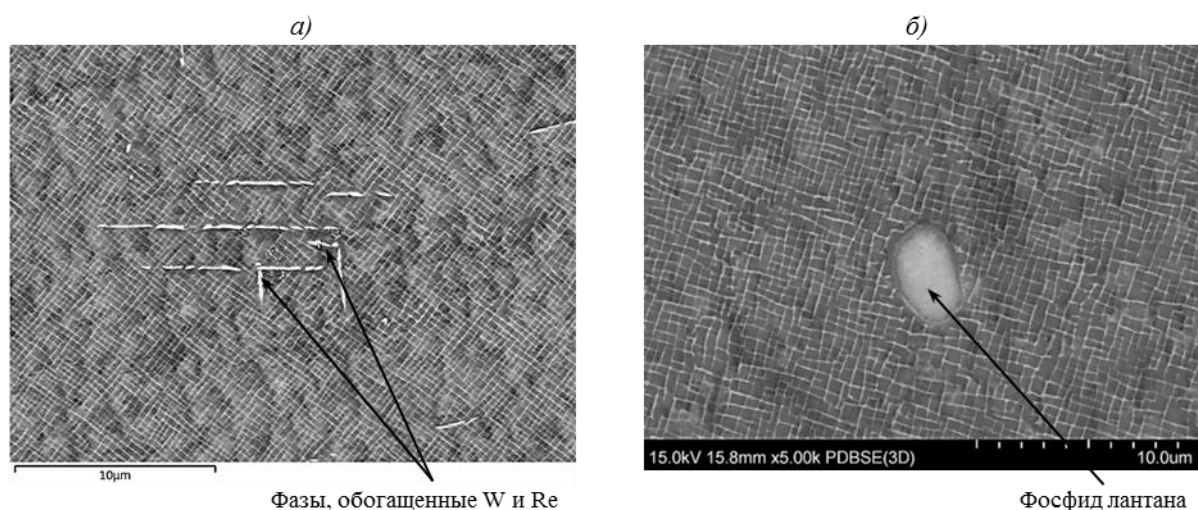


Рис. 3. Микроструктура монокристалла сплава ВЖМ5-ВИ после первого переплава и ПТО (0,014% P) (а) и после второго переплава и ПТО (0,014% P; 0,003% La) (б)

Таблица 6

**Локальный химический состав фаз в сплаве ВЖМ5-ВИ после первого переплава и ПТО**

Содержание элементов, % (по массе)								
Ni	Co	Re	Ta	W	Mo	Cr	Ti	Al
37,1	6,8	15,5	3,6	10,4	2,8	3,7	0,6	3,1
15,1	8,6	27,4	1,1	12,3	7,3	6,4	1,9	0,9

При образовании этих фаз, по-видимому, происходит обеднение твердого раствора и  $\gamma'$ -фазы тугоплавкими металлами, что приводит к снижению жаропрочных свойств сплава.

В структуре сплава после второго переплава (когда ввели лантан) обнаружены фосфиды лантана (рис. 3, б, табл. 7).

Таблица 7

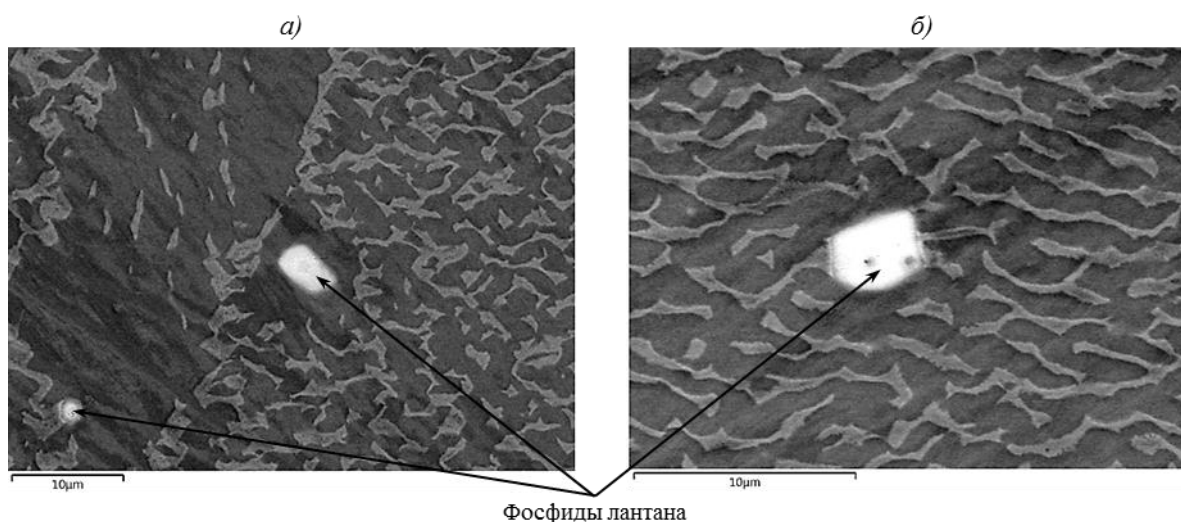
**Локальный химический состав фосфида лантана в сплаве ВЖМ5-ВИ  
после второго переплава и ПТО**

Содержание элементов, % (по массе)			
P	Ni	Co	La
12,1	25,7	0,8	52,7

На третьем переплаве лантан не присаживали и за счет взаимодействия с материалом тигля ( $Al_2O_3$ ), а также частичного испарения в виде субоксидов его содержание в монокристалле снизилось до 0,0002% (по массе) (табл. 5), соответственно снизилась долговечность монокристаллов.

На четвертом переплаве дополнительно присадили лантан, однако долговечность не повысилась, а снизилась, несмотря на увеличение остаточного содержания лантана с 0,0002 до 0,008% (по массе).

Проведены исследования разрушенных образцов из сплава ВЖМ5-ВИ после испытания на длительную прочность на базе 500 ч. В образцах после второго и четвертого переплавок обнаружены фосфиды лантана (рис. 4).



Фосфиды лантана

Рис. 4. Микроструктура монокристаллов сплава ВЖМ5-ВИ после испытаний на длительную прочность при температуре 1100°C и  $\sigma=115$  МПа:

*а* – после второго переплава (0,014% P; 0,003% La),  $\tau=596,5$  ч; *б* – после четвертого переплава (0,014% P; 0,008% La),  $\tau=219$  ч

Наличие фосфидов лантана в микроструктуре образцов после испытаний на длительную прочность, а также сохранение их округлой формы подтверждает их термическую стабильность. В структуре сплава с лантаном после ПТО и испытаний на длительную прочность при 1100°C не наблюдается признаков локального оплавления, которое отмечено в сплаве с повышенным содержанием фосфора (0,025% (по массе)) без лантана [5].

Снижение долговечности монокристаллов после четвертого переплава объясняется тем, что после каждого переплава изменяется химический состав сплава – в основном по алюминию, хрому и титану, поэтому в металле после четвертого переплава содержание алюминия по отношению к первичному содержанию в сплаве снизилось на 0,30% (по массе), хрома – на 1,0% (по массе), тантала – на 0,50% (по массе), в результате долговечность снизилась даже после присадки лантана.

Проведено сравнение микроструктур сплава ВЖМ5-ВИ после первого и четвертого переплавов и ПТО (рис. 5).

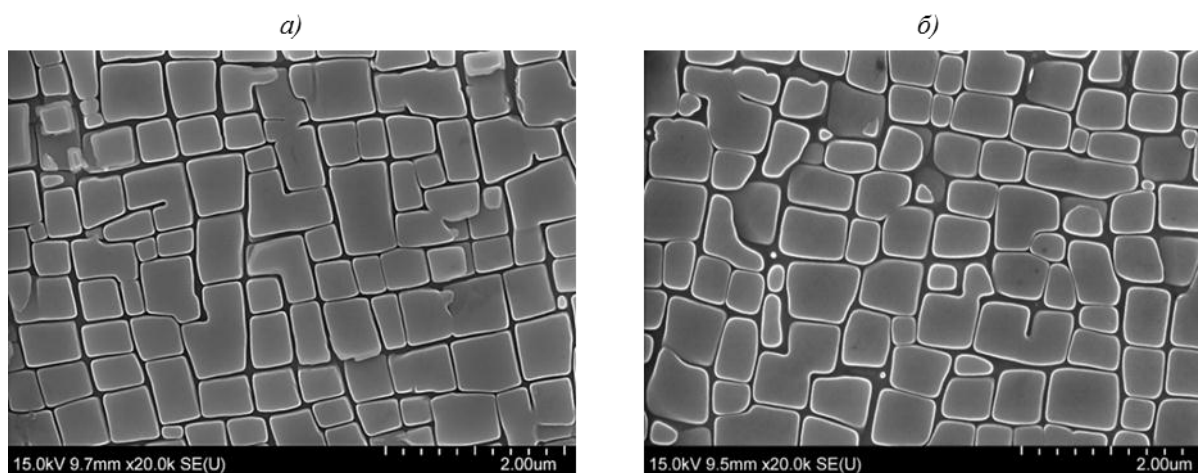


Рис. 5. Микроструктура монокристаллов сплава ВЖМ5-ВИ после ПТО после первого (а) и четвертого переплавов (б)

Анализ микроструктур, представленных на рис. 5, показал, что в сплаве после первого переплава и ПТО огранка  $\gamma'$ -фазы имеет кубическую форму и типична для данного сплава. В сплаве после четвертого переплава ячейки  $\gamma'$ -фазы имеют более округлую форму, а прослойки твердого раствора шире, чем после первого переплава. Исследование микроструктуры показало, что в монокристалле, полученном на четвертом переплаве, приблизительно на 10% меньше упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, чем в монокристалле, полученном на первом переплаве.

Результаты исследования микроструктуры согласовываются с данными химического анализа: после четвертого переплава в сплаве отмечено сниженное содержание легирующих элементов – алюминия, тантала и хрома, входящих в состав упрочняющей  $\gamma'$ -фазы, что привело к потере когерентности между  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фазами, разупрочнению сплава и снижению долговечности при рабочей температуре.

Проведенное исследование показало, что при многократном использовании образующихся литейных отходов в собственном производстве при отливке деталей возможно снижение жаропрочных свойств вследствие изменения химического состава сплавов. Для восстановления жаропрочности до первоначального уровня необходимо проводить долегиrowание сплава до его оптимального состава путем присадки макро- и микролегирующих металлов. Получение оптимального химического состава можно обеспечить только при выплавке сплава в ВИП с проведением экспресс-анализа во время плавки и корректировкой содержания легирующих и микролегирующих элементов выплавляемого сплава.

### Обсуждение и заключения

Представлены результаты анализа химического состава и структурных исследований, доказывающие, что при отливке монокристаллов ЖНС насыщение кремнием происходит за счет взаимодействия углерода с  $\text{SiO}_2$ , содержащимся в керамической форме. Показано, что с каждым последующим переплавом происходит насыщение сплавов кремнием, сопровождающееся снижением содержания углерода. После пяти переплавов углеродистый сплав ЖС32-ВИ по структуре схож с безуглеродистым: в межосных пространствах отсутствуют колонии карбидов, которые типичны для сплава

после первого переplava. При отливке монокристаллов из безуглеродистых жаропрочных сплавов насыщение металла кремнием происходит в 4 раза медленнее, чем из углеродсодержащих, поэтому для обеспечения высокой чистоты по примеси кремния и гарантированно высоких стабильных свойств отливок рекомендуется применение безуглеродистых ЖНС.

Экспериментально показано, что микролегирование лантаном ЖНС, содержащих повышенное количество фосфора (0,014% (по массе)), позволяет повысить долговечность монокристаллов за счет связывания фосфора в термически прочное тугоплавкое соединение (фосфид лантана) и нейтрализации его вредного влияния. Многократный переplав ЖНС приводит к изменению содержания макро- и микролегирующих элементов и, как следствие, к снижению количества упрочняющей  $\gamma'$ -фазы и долговечности монокристаллов. Для обеспечения гарантированно высоких эксплуатационных характеристик монокристаллов ЖНС не рекомендуется использовать собственные литейные отходы в процессе направленной кристаллизации деталей. Обеспечить оптимальный химический состав сплавов возможно только путем переработки литейных отходов в ВИП с применением экспресс-анализа и дошихтовкой макро- и микродобавок до их оптимального содержания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тигрова Г.Д., Коркка С.И., Гребцова Т.М. Влияние кремния на фазовый состав сплавов на никелевой основе // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 1980. №4. С. 38–41.
2. Сидоров В.В., Морозова Г.И., Петрушин Н.В. и др. Фазовый состав и термостабильность литейного жаропрочного никелевого сплава с кремнием // *Металлы*. 1990. №1. С. 94–98.
3. 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).
4. 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 // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2015. №6 (720). С. 55–59.
5. 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.
6. 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.
7. 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*. 2011. С. 31–38.
8. 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.
9. *Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технологии, покрытия* / под ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2006. 632 с.
10. Сидоров В.В., Мин П.Г., Бурцев В.Т., Каблов Д.Е., Вадеев В.Е. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование реакций рафинирования в вакууме сложнолегируемых ренийсодержащих никелевых расплавов от примесей серы и кремния // *Вестник РФФИ*. 2015. №1 (85). С. 32–36.

11. 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 (52). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017- 0-4-4-4.
12. Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г., Вадеев В.Е. Рафинирование сложнлегированного никелевого сплава ЖС32-ВИ от примеси кремния и фосфора путем однонаправленного затвердевания расплава при малых скоростях перемещения фронта кристаллизации // Технология металлов. 2016. №3. С. 2–7.
13. Мин П.Г., Сидоров В.В., Вадеев В.Е. Рафинирование монокристаллических никелевых жаропрочных сплавов от примесей кремния, фосфора и серы методом направленной кристаллизации расплава с весьма низкой скоростью перемещения фронта // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №3 (51). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-2-2.
14. 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.
15. 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.
16. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Каблов Д.Е. Особенности технологии выплавки современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №SP. С. 68–78.
17. 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.
18. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Крамер В.В. Ресурсосберегающая технология получения деформируемого никелевого жаропрочного сплава ВЖ175 с применением некондиционных отходов // Metallurg. 2016. №9. С. 88–94.
19. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Калицев В.А., Крамер В.В. Технология получения деформируемого сплава ВЖ175 для дисков ГТД из кондиционных отходов // Metallurg. 2015. №9. С. 76–80.
20. 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 // Metallurg. 2014. №1. С. 86–90.
21. 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.
22. 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.
23. 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 // Электрометаллургия. 2016. №9. С. 30–41.
24. Sidorov V.V., Rigin V.E., Goryunov A.V., Min P.G. Processing Superalloy Foundry Waste Generated at Engine Building and Repair Plants: Experience of the All-Russia Research Institute of Aviation Materials // Metallurgist. 2014. Vol. 58. No. 1–2. P. 69–74.
25. Sidorov V.V., Rigin V.E., Goryunov A.V., Min P.G. Resources-saving technology for recycling off-grade waste products cast from superalloys // Metallurgist. 2014. Vol. 58. No. 5–6. P. 360–366.
26. Min P.G., Goryunov A.V., Vadeev V.E. Modern Nickel Superalloys and the Efficient Resource-Saving Technologies of Their Production // Russian Metallurgy (Metally). 2015. Vol. 2015. No. 13. P. 1060–1068.
27. 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.

28. 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 (38). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.05.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-1-1.
29. Мин П.Г., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Ригин В.Е., Вадеев В.Е. Влияние примеси на структуру и механические свойства литейных никелевых жаропрочных сплавов и разработка эффективных способов их рафинирования // Климовские чтения–2015. Перспективные направления развития авиадвигателестроения. СПб.: Скифия-принт, 2015. С. 275–283.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. 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.
34. 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.
35. 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.