

В.В. Сидоров<sup>1</sup>, В.Е. Ригин<sup>1</sup>, О.Б. Тимофеева<sup>1</sup>, П.Г. Мин<sup>1</sup>

## ВЛИЯНИЕ КРЕМНИЯ И ФОСФОРА НА ЖАРОПРОЧНЫЕ СВОЙСТВА И СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ИЗ ВЫСОКОЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ВЖМ4-ВИ

*Исследовано влияние примесей кремния и фосфора на жаропрочные свойства монокристаллов из сплава ВЖМ4-ВИ, предназначенного для литья монокристаллических лопаток газотурбинных двигателей. Установлено, что обе примеси при повышенном их содержании понижают жаропрочные свойства монокристаллов данного сплава. Определены предельно допустимые содержания этих примесей в сплаве. Методом растровой электронной микроскопии установлено, что обе примеси при их повышенных содержаниях увеличивают микропористость в монокристаллах и способствуют более интенсивному протеканию процесса коагуляции дисперсных частиц упрочняющей  $\gamma'$ -фазы.*

**Ключевые слова:** жаропрочный сплав, кремний, фосфор, монокристалл, структура.

V.V. Sidorov<sup>1</sup>, V.E. Rigin<sup>1</sup>, O.B. Timofeeva<sup>1</sup>, P.G. Min<sup>1</sup>

## AN EFFECT OF SILICON AND PHOSPHORUS ON HIGH TEMPERATURE PROPERTIES AND STRUCTURE-PHASE TRANSFORMATIONS OF SINGLE CRYSTALS OF VGM4-VI SUPERALLOY

*An effect of silicon and phosphorus on high-temperature properties of single crystals of VGM4-VI alloy used for single crystal blade castings of gas turbine engines was studied. It was stated that the both impurities (in case of their high content) reduce high-temperature properties of single crystals alloy. The maximum allowable content of impurities in the alloy was determined. With the help of the scanning electron microscopy, it was stated that the high content of these impurities allows one to increase microporosity of single crystals and intensify the coagulation process of dispersed particles of strengthening  $\gamma'$ -phase.*

**Keywords:** superalloy, silicon, phosphorus, single crystal, structure.

---

<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

В литейных жаропрочных никелевых сплавах кремний является вредной примесью, который понижает свойства сплавов, поэтому его содержание ограничено: в сплавах с равноосной структурой – до 0,25% (сплавы ЖС6К-ВИ, ЖС6У-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ и др.), с направленной и монокристаллической структурой – до 0,20% (сплавы ЖС32-ВИ, ЖС26-ВИ, ЖС26У-ВИ и др.) [1–4].

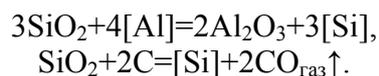
В основном кремний переходит в сплавы с равноосной структурой из металлических шихтовых материалов, поскольку кристаллизация расплава в отливках протекает быстро и взаимодействия расплава с керамическим блоком практически не происходит.

Для сплавов с направленной и монокристаллической структурой источниками поступления кремния являются металлические шихтовые и керамические материалы, применяемые при отливке деталей (керамическая форма, керамический стержень).

С учетом содержания кремния в металлических шихтовых материалах (никеле, хrome, кобальте, вольфраме, алюминии и др.), применяемых при выплавке литейных жаропрочных сплавов, в готовый сплав может перейти 0,02–0,03% кремния.

Основным источником поступления кремния в литейные жаропрочные сплавы, получаемые методом направленной кристаллизации, являются керамические материалы, применяемые для получения деталей авиационных ГТД. При технологическом процессе получения керамических форм в них остается несвязанный  $\text{SiO}_2$ : в формах на основе электрокорунда 4–8%, а в формах на основе дистен-силлиманита 10–12%. Кроме того, в керамических стержнях может содержаться 2–7% несвязанного  $\text{SiO}_2$ .

При длительном взаимодействии расплава с керамическими формой и стержнем, которые содержат в своем составе несвязанный  $\text{SiO}_2$ , что имеет место при отливке деталей с направленной или монокристаллической структурой на моторных заводах, алюминий (как наиболее активный компонент сплава) и углерод восстанавливают кремний по реакциям:



Анализ динамики (2007–2011 гг.) изменения содержания кремния в сплаве ЖС32-ВИ, выплавленного в условиях ВИАМ с использованием отходов моторных заводов, показал, что по мере загрязнения сплава кремнием при отливке деталей с направленной и монокристаллической структурой содержание кремния в литых прутковых заготовках выросло в среднем с 0,065 до 0,185%.

Изучено влияние кремния на длительную прочность сплава ЖС32-ВИ при температурах 900 и 1000°C в сравнении с паспортными характеристиками [5]. Установлено, что при содержании в сплаве 0,1% Si долговечность при этих температурах находится между средними и минимальными значениями, а при 0,2% Si – снижается, и ее значения, как правило, находятся около минимальных паспортных значений.

Отрицательное влияние кремния на структуру и свойства ЖС6Ф-ВИ показано в работе [6]. Методом фазового анализа выявлено, что >60% кремния (от его содержания в сплаве) входит в состав  $\gamma'$ -фазы, замещая в ней гафний, титан и ниобий в эквивалентных количествах. Обеднение  $\gamma'$ -фазы легирующими элементами приводит к ухудшению фазовой стабильности, вследствие чего более интенсивно протекает процесс ее коагуляции при повышенных температурах. С увеличением содержания кремния понизились долговечность сплава при испытании на длительную прочность и пластичность при комнатной температуре.

Вышеуказанные исследования по влиянию кремния на свойства монокристаллов проводились на углеродистых литейных жаропрочных сплавах, содержащих 0,1–0,15% С. Результаты исследований по влиянию кремния на свойства безуглеродистых ( $\text{C} \leq 0,005\%$ ) высоколегированных жаропрочных сплавов для монокристаллического литья в научно-технической литературе отсутствуют.

Одной из малоизученных примесей в литейных жаропрочных сплавах является фосфор, который попадает в сплав из металлических шихтовых материалов и футеровки плавильного тигля. В литературных источниках имеются противоречивые сведения о влиянии фосфора на свойства жаропрочных сплавов. В работе [7] показано, что при повышении содержания фосфора в сплаве DZ 125L с 0,0005 до 0,0052% долговечность при испытании на длительную прочность (при температуре 760°C,  $\sigma = 804$  МПа) понизилась с 336 до 126 ч. В работе [8] показано, что с повышением в литейном жаропрочном сплаве M963 содержания фосфора с 0,002 до 0,01% существенно снижаются длительная прочность и пластичность при повышенных температурах.

В отличие от двух предыдущих работ, в работе [9] установлено, что в сплаве IN718 с увеличением содержания фосфора с 0,003 до 0,02% значения длительной прочности при температурах 650 и 750°C и ползучести повысились.

В работе [10] изучали влияние фосфора на длительную прочность жаропрочного сплава на никелевой основе GH 4133. Как и в предыдущей работе, выявлено положительное влияние фосфора на длительную прочность сплава. Оптимальное содержание

фосфора в сплаве составляет 0,011%, однако с повышением содержания фосфора долговечность снижается. Показано, что эффективность положительного влияния фосфора на длительную прочность на сплаве Inconel 718 выше, чем на сплаве GH 4133.

По действующим техническим условиям на отечественные литейные жаропрочные сплавы содержание фосфора в них должно быть не более: 0,015% – для сплавов с равноосной структурой, 0,01% – для сплавов с направленной и монокристаллической структурой. Однако специальные исследования по влиянию фосфора на свойства современных литейных жаропрочных сплавов с монокристаллической структурой не проводились.

В связи с вышеизложенным, целью данной работы являлось экспериментальное исследование влияния Si и P на свойства и структурно-фазовые превращения в литейных жаропрочных никелевых сплавах. В качестве объекта исследования выбран безуглеродистый рений-рутенийсодержащий сплав ВЖМ4-ВИ.

### **Методика проведения исследований**

Выплавку сплава проводили в вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002 в тигле емкостью 20 кг. Полученные слитки после механической обработки переплавляли методом направленной кристаллизации на установке УВНК-9 для получения монокристаллических заготовок с кристаллографической ориентацией <001>. Из полученных заготовок изготовлены образцы и проведены испытания на длительную прочность по ГОСТ 10145 при температуре 1100°C и напряжении 137 МПа.

Анализ микроструктуры проводили с помощью растрового электронного микроскопа JSM-840.

Подготовку образцов проводили на оборудовании металлографического центра фирмы «Струерс». С помощью отрезного станка Labotom вырезали образцы в продольном (рабочая часть) и поперечном (головка) направлениях из разрушенных в результате испытаний на длительную прочность образцов. Затем образцы запрессовывали в полистирол на установке Labopress-3 и готовили микрошлифы на шлифовально-полировальном станке RotoPol-21.

Следует отметить, что структурные изменения в головке образцов в процессе испытаний на длительную прочность происходят только под воздействием температуры, тогда как в рабочей части образцов такие структурные изменения происходят при совместном влиянии температуры и напряжения.

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»\*. Диапазон регистрируемых микроанализатором элементов – от В (атомный номер  $Z=5$ ) до U ( $Z=92$ ). Локальность анализа 1 мкм<sup>2</sup>, глубина анализа 1 мкм.

Фотографии образцов выполнены в режиме СОМРО, изображение в котором формируется обратноотраженными электронами. Его контраст определяется средним атомным номером фазы. Чем выше средний атомный номер исследуемой области (фазы), тем светлее данный участок выглядит на фотографии.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

Для исследования влияния кремния на установке ВИАМ-2002 проведены 4 плавки из сплава ВЖМ4-ВИ с дополнительным введением в металл кремния – от 0,1 до 0,3%. Из полученного металла отлиты образцы с монокристаллической структурой и проведены испытания на длительную прочность. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

---

\* Исследования проводила Т.В. Фесенко.

Таблица 1

**Влияние кремния на длительную прочность монокристаллов сплава ВЖМ4-ВИ**

Условный номер плавки	Содержание кремния, %		Время до разрушения $\tau^{**}$ , ч (при 1100°C, $\sigma=137$ МПа)
	расчетное	полученное	
1	—	0,042	263 и 317 (290)
2	0,1	0,085	295 и 292 (293)
3	0,2	0,19	229 и 225 (227)
4	0,3	0,27/0,25*	207 и 170 (188)

\* Содержание кремния в монокристалле (низ/вверх).

\*\* Приведены значения для нескольких образцов, в скобках – среднее значение  $\tau$ .

Из данных табл. 1 видно, что с повышением содержания кремния долговечность сплава снижается. На рис. 1 приведены средние и минимальные значения долговечности по паспорту на сплав ВЖМ4-ВИ при испытании на длительную прочность при температуре 1100°C. (На паспортные характеристики сплава нанесены полученные средние значения долговечности металла с содержанием кремния от 0,04 до 0,27%.)

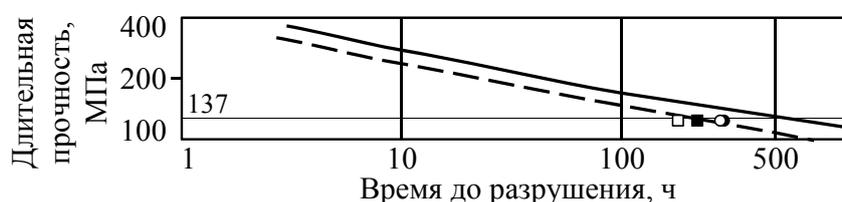


Рис. 1. Влияние кремния на длительную прочность монокристаллов <001> сплава ВЖМ4-ВИ-МОНО при температуре испытаний 1100°C:

○ – 0,042% Si; ● – 0,085% Si; ■ – 0,19% Si; □ – 0,27% Si; —, - - - средние и минимальные значения длительной прочности по паспорту на сплав ВЖМ4-ВИ

При содержании в сплаве от 0,04 до 0,19% кремния свойства находятся в пределах паспортных характеристик, причем при содержании 0,19% кремния значение долговечности находится на минимальном уровне. При содержании в сплаве 0,27% Si значение долговечности существенно понижается и уже не удовлетворяет паспортным характеристикам. Предельно допустимое содержание кремния в сплаве ВЖМ4-ВИ составляет 0,2%.

Для исследования влияния фосфора на жаропрочные свойства сплава ВЖМ4-ВИ в установке ВИАМ-2002 проведены три плавки с введением 0,008 и 0,018% фосфора. Из полученного металла отлили заготовки под образцы с монокристаллической структурой <001> и провели испытания на длительную прочность. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Влияние фосфора на длительную прочность монокристаллов сплава ВЖМ4-ВИ**

Условный номер плавки	Содержание фосфора, %			Время до разрушения $\tau^*$ , ч (при 1100°C, $\sigma=137$ МПа)	Примечание
	расчетное	полученное в слитке	полученное в моноотливке (низ/верх)		
1	0,008	0,0098	—	798 и 448 (623)	—
2	0,018	0,0191	0,0193/0,0190	530, 258 и 360 (383)	—
3	0,018	0,0198	0,0196/0,0195	535 и 502 (518)	Присадка лантана

\* Приведены значения для нескольких образцов, в скобках – среднее значение  $\tau$ .

Из данных табл. 2 видно, что при содержании в сплаве ~0,01% фосфора долговечность сплава при испытании на длительную прочность высокая и полностью удо-

влетворяет паспортным характеристикам на сплав ВЖМ4-ВИ. При повышении содержания фосфора в сплаве до 0,019% долговечность снижается почти в 2 раза.

Для восстановления жаропрочных свойств сплава ВЖМ4-ВИ, содержащего 0,019% Р, в сплав ввели присадку редкоземельного металла – лантана. Редкоземельные металлы нашли самое широкое применение при производстве жаропрочных никелевых сплавов, поскольку обладают высокой химической активностью – при плавке взаимодействуют с вредными примесями и нейтрализуют их вредное влияние [11–13].

После введения в сплав с повышенным содержанием фосфора лантана долговечность сплава почти восстановилась (см. табл. 2).

Для исследования отрицательного влияния повышенного содержания кремния и фосфора на свойства сплава ВЖМ4-ВИ проведены структурные исследования монокристаллов.

По результатам исследований видно, что в микроструктуре монокристалла с повышенным содержанием кремния (0,27%) наблюдается увеличение количества эвтектической  $\gamma'$ -фазы и образование вокруг нее областей, обогащенных кремнием. Это наблюдение подтверждает ранее известный факт о распределении кремния между фазами жаропрочного никелевого сплава [6]: 60% от общего содержания Si в сплаве входит в  $\gamma'$ -фазу, 30% – в твердый раствор, 10% – образуют интерметаллидное соединение системы Ni–Mo–Si.

Внешний вид включения, содержащего кремний, представлен на рис. 2, химический состав приведен в табл. 3.

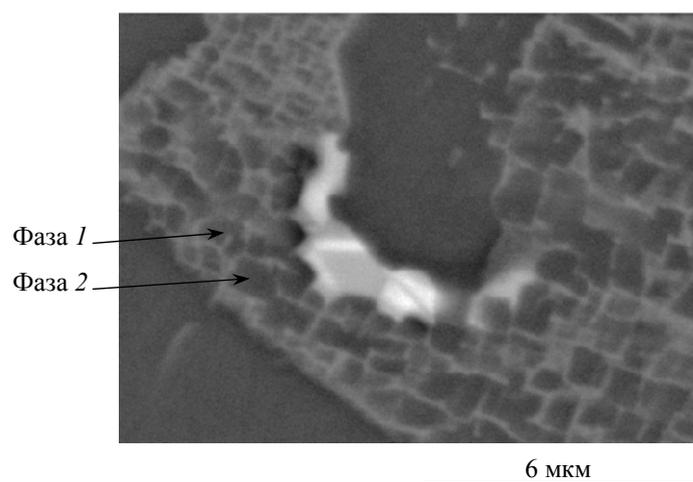


Рис. 2. Кремнийсодержащее включение в монокристалле сплава ВЖМ4-ВИ

Таблица 3

**Количественный анализ кремнийсодержащего включения в монокристалле сплава ВЖМ4-ВИ с повышенным до 0,27% содержанием кремния (данные МРСА)**

Фаза (см. рис. 2)	Содержание элементов, % (по массе)											
	Al	Si	Cr	Co	Ni	Mo	Ru	Ta	W	Re	P	$\Sigma$
1	0,7	3,9	3,1	6,5	35,5	24	6,6	6,3	3	7,1	1,4	98,1
2	0,9	3,1	4,3	7	31,1	22,9	8,5	4,4	3,1	11,2	1,3	97,8

После полной термической обработки сплава ВЖМ4-ВИ, содержащего повышенное количество кремния (0,27%), увеличивается число микропор гомогенизации в объеме металла в сравнении со сплавом со стандартным содержанием кремния (0,085%), наблюдается огрубление структуры и неоднородное распределение частиц  $\gamma'$ -фазы в междендритных участках. В металле с 0,27% Si более интенсивно протекает процесс коагуляции дисперсных частиц упрочняющей  $\gamma'$ -фазы и последующее ее рас-

творение (рис. 3): рафтированные пластины  $\gamma'$ -фазы шире, чем в металле со стандартным содержанием кремния. Кроме того, в металле с повышенным содержанием кремния между пластинами  $\gamma'$ -фазы в  $\gamma$ -твердом растворе наблюдаются дисперсные выделения, свидетельствующие о том, что в процессе испытаний происходит процесс частичного растворения  $\gamma'$ -фазы в твердом растворе и ее выпадение при охлаждении образца на воздухе в виде мелкодисперсной фракции.

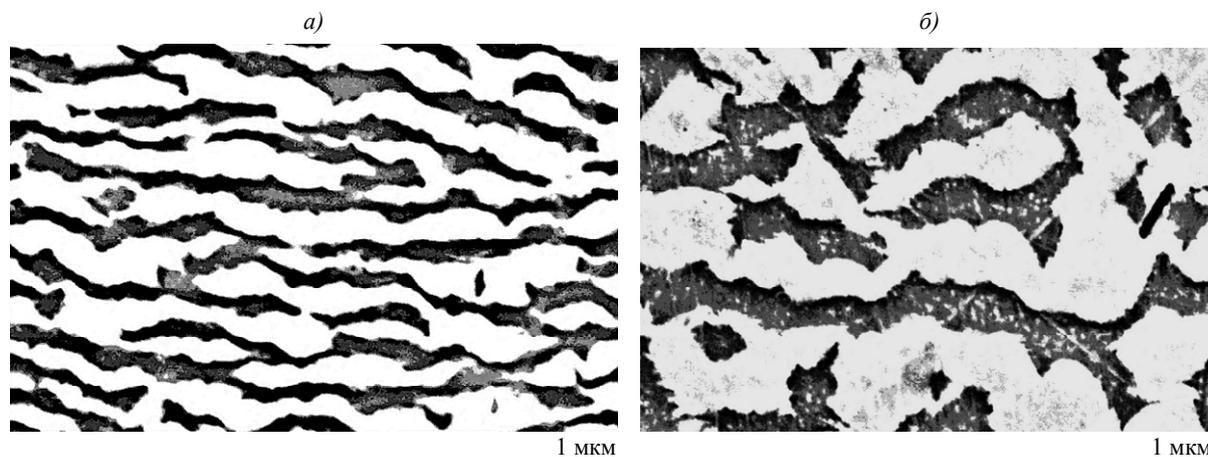


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 10000$ ) монокристалла сплава ВЖМ4-ВИ со стандартным (*a*; 0,085% Si,  $\tau=295$  ч) и повышенным (*б*; 0,27% Si,  $\tau=170$  ч) содержанием кремния после испытаний на длительную прочность при  $1100^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma=137$  МПа

Скопление фосфора как примеси внедрения наблюдается на границах фаз и структурных дефектах, его повышенная концентрация – в зоне эвтектической  $\gamma'$ -фазы.

При присадке в сплав ВЖМ4-ВИ повышенного количества фосфора (0,019%) увеличивается микропористость вблизи места разрушения в сравнении с металлом со стандартным содержанием (0,01%) фосфора (рис. 4). Как и в случае кремния, в металле с повышенным содержанием фосфора более интенсивно протекает процесс коагуляции дисперсных частиц упрочняющей  $\gamma'$ -фазы. По результатам металлографического исследования (рис. 4, *a*, *б*) видно, что хотя долговечность образца с повышенным содержанием фосфора в 2 раза меньше, чем образца со стандартным содержанием фосфора, размер рафтированных пластин  $\gamma'$ -фазы в нем шире. При введении в сплав с повышенным содержанием фосфора лантана коагуляция дисперсных частиц упрочняющей  $\gamma'$ -фазы замедляется (рис. 4, *в*). Несмотря на то, что образец с лантаном простоял до разрушения в 1,5 раза больше, чем образец без лантана, размер рафтированных пластин  $\gamma'$ -фазы уже и рафт-структура более тонкая. Добавка фосфора в меньшей степени, чем кремний, влияет на огрубление частиц  $\gamma'$ -фазы в междендритных участках, образование кластеров и субграниц.

По данным микрорентгеноспектрального анализа эффективное влияние лантана на свойства сплава с повышенным содержанием фосфора можно объяснить тем, что, связывая фосфор в термически прочные тугоплавкие включения с температурой плавления свыше  $1500^{\circ}\text{C}$ , присадка La нейтрализует вредное влияние P [14]. Такие включения с фосфором образуются в междендритных участках и зоне образования эвтектической  $\gamma'$ -фазы. Температура плавления несвязанного фосфора составляет  $\sim 500^{\circ}\text{C}$ , поэтому при температуре  $1100^{\circ}\text{C}$  в сплаве образуются легкоплавкие эвтектики, нарушающие сплошность металла.

Внешний вид включений с повышенным содержанием фосфора (0,019%), образующихся в сплаве ВЖМ4-ВИ с микродобавкой лантана и без, приведен на рис. 5, химический состав – в табл. 4.

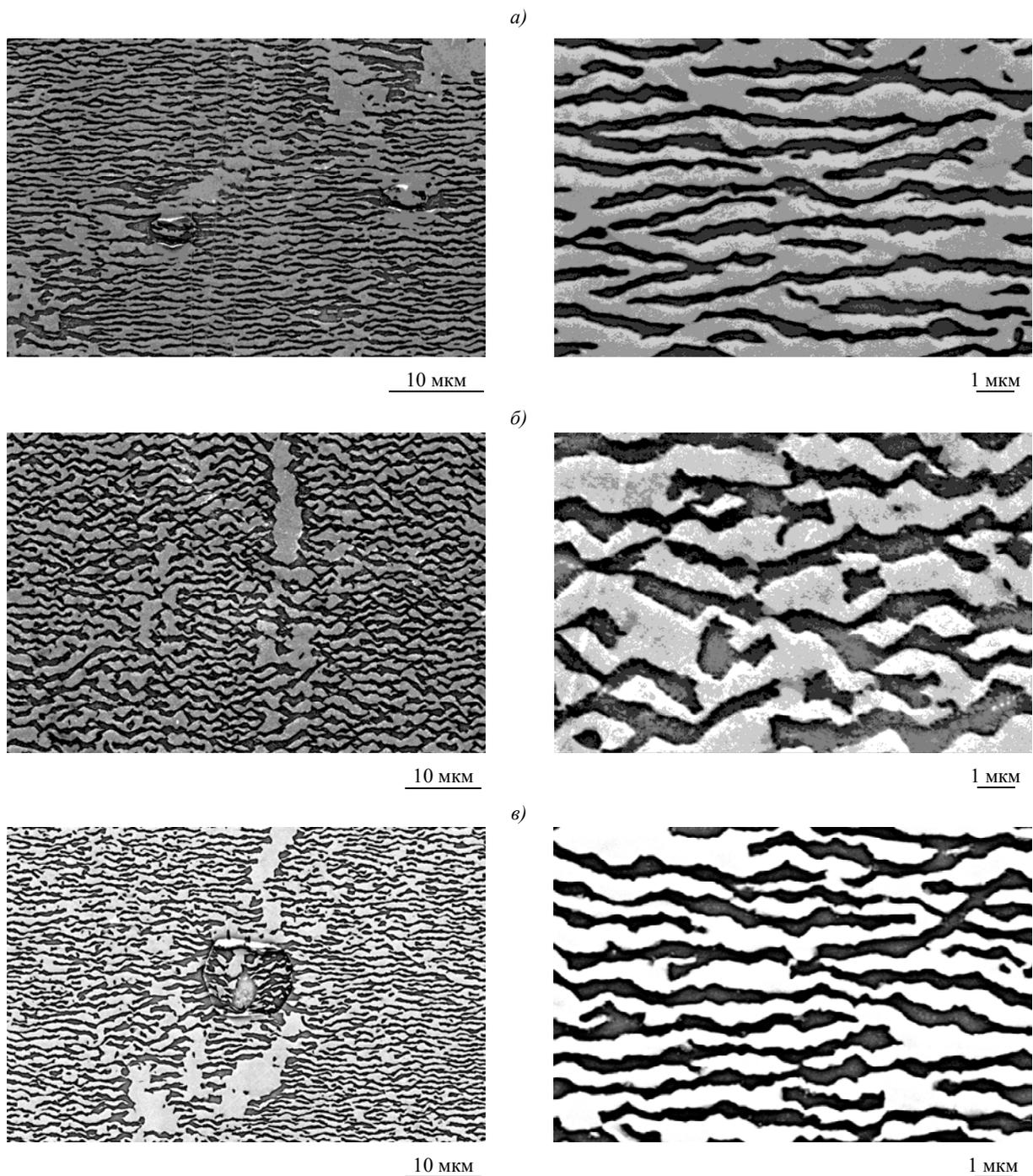


Рис. 4. Микроструктура монокристалла сплава ВЖМ4-ВИ со стандартным (а; 0,01% Р,  $\tau=798$  ч) и повышенным (б; 0,019% Р,  $\tau=360$  ч) содержанием фосфора, а также с присадкой лантана (в; 0,019% Р+La,  $\tau=535$  ч) после испытаний на длительную прочность при 1100°C,  $\sigma=137$  МПа

Таблица 4

**Количественный анализ включений с повышенным до 0,019% содержанием фосфора (данные МРСА)**

При- сдка	Фаза (см. рис. 5)	Содержание элементов, % (по массе)											
		Al	Re	Cr	Co	Ni	Mo	Ru	Ta	W	P	La	$\Sigma$
Без La	3	0,7	0,8	10,5	8,1	32,3	22,1	5,8	2,5	Н/о*	15,5	Н/о	98,3
	4	1,5	12	6,1	8,3	45,6	12	8,2	1,9	2,9	Н/о	Н/о	98,5
С La	2	0,8	41,2	2,8	4,7	24,7	7,1	11,5	1,3	3,7	1,1	Н/о	98,9
	3	0,7	3,3	4,7	6,7	36,7	7,7	4,7	10,2	1,5	13,3	9,3	98,8

\* Н/о – не обнаружен.

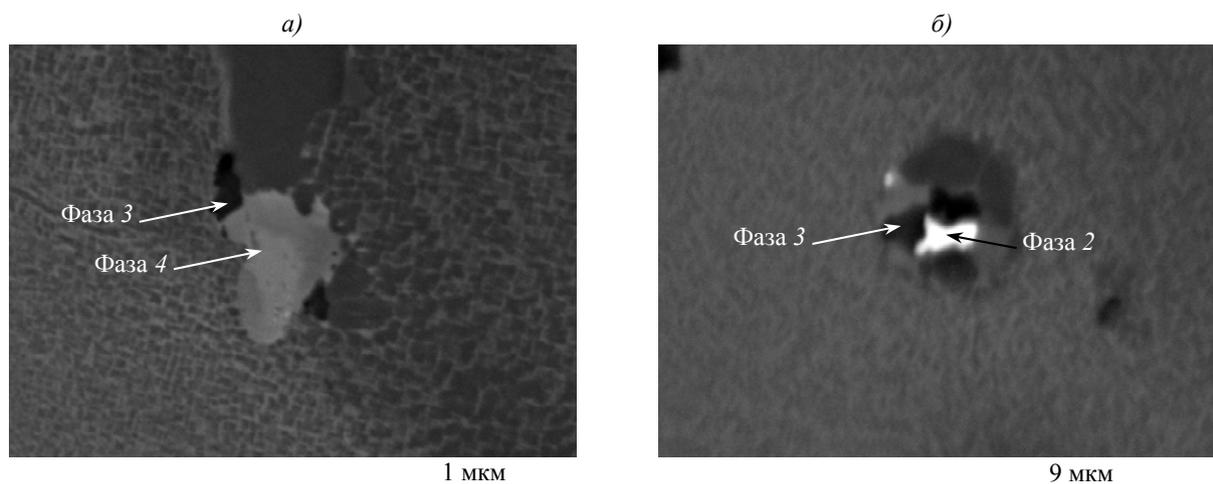


Рис. 5. Включения с повышенным содержанием фосфора (0,019%) в сплаве ВЖМ4-ВИ без лантана (а) и с лантаном (б)

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

– Установлено отрицательное влияние примеси фосфора на жаропрочные свойства монокристаллов сплава ВЖМ4-ВИ при его содержании в сплаве  $\sim 0,02\%$ . Для нейтрализации вредного влияния фосфора сплав ВЖМ4-ВИ следует дополнительно микролегировать лантаном, который связывает фосфор в термически прочные тугоплавкие включения.

– Установлено отрицательное влияние примеси кремния на жаропрочные свойства монокристаллов сплава ВЖМ4-ВИ при его содержании  $>0,20\%$ .

– При исследовании влияния фосфора и кремния на структурно-фазовое состояние монокристаллов сплава ВЖМ4-ВИ методом растровой электронной микроскопии установлено, что обе примеси при их повышенных содержаниях увеличивают микропористость в монокристаллах и способствуют более интенсивному протеканию процесса коагуляции дисперсных частиц упрочняющей  $\gamma'$ -фазы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 19–36.
3. 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. №S. С. 97–105.
4. Самонов Г.В., Дворина Л.А., Рудь Б.М. Силициды. М: Металлургия. 1979. 253 с.
5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Сидоров В.В., Ригин В.Е. Производство литых прутковых (шихтовых) заготовок из современных литейных высокожаропрочных никелевых сплавов //Труды науч.-технич. конф., посвященной 310-летию уральской металлургии и созданию технико-внедренческого центра металлургии и тяжелого машиностроения. Екатеринбург. «Издат Наука Сервис». 2011. Т. 1. С. 31–38.
6. Сидоров В.В., Морозова Г.И., Петрушин Н.В., Кулешова Е.А., Кулебякина А.М., Дмитриева Л.И. Фазовый состав и термостабильность литейного жаропрочного никелевого сплава с кремнием //Металлы. 1990. №1. С. 94–98.
7. Yaохiao Zhu, John Radavich и др. The development and Long-Time Structural Stability of a Low Segregation Hf Free Superalloys – DZ 125L //In.: Superalloys-2000. 2000. P. 329–339.
8. 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.

9. 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.
10. Wenru SUN, Shouren GUO, Baiyun TONG, Dezhong LU. Effect of Phosphorus on Stress Rupture Properties of GH 4133 Ni-Base Superalloy //J. Mater. Sci. Technol. 2003. V. 19. № 4. P. 289–291.
11. Каблов Е.Н., Сидоров В.В. Микролегирование РЗМ – современная технология повышения свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов //Перспективные материалы. 2001. №1. С. 23–24.
12. Сидоров В.В., Тимофеева О.Б., Калицев В.А., Горюнов А.В. Влияние микролегирования РЗМ на свойства и структурно-фазовые превращения в интерметаллидном сплаве ВКНА-25-ВИ //«Авиационные материалы и технологии». 2012. №4. С. 8–13.
13. Harris G.K., Wahl J.B. Development in superalloy castability and new applications for advanced superalloys //Materials Science and Technology. 2009. V. 25. №2. P. 147–153.
14. Бондарь И.А., Виноградова Н.В., Дельянец Л.Н. и др. Соединения редкоземельных элементов. Силикаты, германаты, фосфаты, арсенаты, ванадаты. М: Наука. 1983. 288 с.

#### REFERENS LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 g. [The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Ospennikova O.G. Strategija razvitija zharoprochnyh spлавov i stalej special'nogo naznachenija, zashhitnyh i teplozashhitnyh pokrytij [Strategy of development of heat resisting alloys and steels special purpose, protective and heat-shielding coverings] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 19–36.
3. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Rigin V.E., Gorjunov A.V. Sovremennye tehnologii poluchenija prutkovykh zagotovok iz litejnyh zharoprochnyh spлавov novogo pokolenija [Modern technologies of receiving the bar stock from foundry heat resisting alloys of new generation] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 97–105.
4. Samonov G.V., Dvorina L.A., Rud' B.M. Silicidy [Silicides]. M: Metallurgija. 1979. 253 s.
5. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E. Proizvodstvo lityh prutkovykh (shihtovyh) zagotovok iz sovremennyh litejnyh vysokozharoprochnyh nikelovyh spлавov [Production cast the bar stock(charge billets) from modern foundry high-heat resisting nickel alloys] /Trudy nauch.-tehnic. konf., posvjashhennoj 310-letiju ural'skoj metallurgii i sozdaniju tehniko-vnedrencheskogo centra metallurgii i tjazhelogo mashinostroenija. Ekaterinburg. «Izdat Nauka Servis». 2011. T. 1. S. 31–38.
6. Sidorov V.V., Morozova G.I., Petrushin N.V., Kuleshova E.A., Kulebjakina A.M., Dmitrieva L.I. Fazovyj sostav i termostabil'nost' litejnogo zharoprochnogo nikelovogo splava s kremniem [Phase structure and heat stability of a foundry heat resisting nickel alloy with silicon] //Metally. 1990. №1. S. 94–98.
7. Yaoxiao Zhu, John Radavich i dr. The development and Long-Time Structural Stability of a Low Segregation Hf Free Superalloys – DZ 125L /In.: Superalloys-2000. 2000. P. 329–339.
8. 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.
9. 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.
10. Wenru SUN, Shouren GUO, Baiyun TONG, Dezhong LU. Effect of Phosphorus on Stress Rupture Properties of GH 4133 Ni-Base Superalloy //J. Mater. Sci. Technol. 2003. V. 19. № 4. P. 289–291.
11. Kablov E.N., Sidorov V.V. Mikrolegirovanie RZM – sovremennaja tehnologija povyshenija svojstv litejnyh zharoprochnyh nikelovyh spлавov [Microalloying REM (rare-earth metals) – modern technology of increase of properties of foundry heat resisting nickel alloys] //Perspektivnye materialy. 2001. №1. S. 23–24.
12. Sidorov V.V., Timofeeva O.B., Kalicev V.A., Gorjunov A.V. Vlijanie mikrolegirovanija RZM na svojstva i strukturno-fazovyje prevrashhenija v intermetallidnom splave ВКНА-25-VI [Influ-

- ence of a microalloying of REM on properties and structural and phase transformations in an intermetallic alloy VKNA-25-VI] //«Aviacionnye materialy i tehnologii». 2012. №4. S. 8–13.
13. Harris G.K., Wahl J.B. Development in superalloy castability and new applications for advanced superalloys //Materials Science and Technology. 2009. V. 25. №2. P. 147–153.
  14. Bondar' I.A., Vinogradova N.V., Del'janec L.N. i dr. Soedinenija redkozemel'nyh jelementov. Silikaty, germanaty, fosfaty, arsenaty, vanadaty [Connections of rare-earth elements. Silicates, germanates, phosphates, arsenates, vanadates]. M: Nauka. 1983. 288 s.