



УДК 669.018.44

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-2-2

**СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И СВОЙСТВА
МОНОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВОВ ВЖМ4-ВИ И ВЖМ5-ВИ,
СОДЕРЖАЩИХ ПОВЫШЕННОЕ
КОЛИЧЕСТВО ФОСФОРА**

В.В. Сидоров

доктор технических наук

В.Е. Ригин

кандидат технических наук

Е.В. Филонова

О.Б. Тимофеева

Март 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 669.018.44

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-3-2-2

В.В. Сидоров, В.Е. Ригин, Е.В. Филонова, О.Б. Тимофеева

СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ СПЛАВОВ ВЖМ4-ВИ И ВЖМ5-ВИ, СОДЕРЖАЩИХ ПОВЫШЕННОЕ КОЛИЧЕСТВО ФОСФОРА

Исследовано влияние фосфора на структурные превращения и жаропрочность монокристаллов сплавов ВЖМ4-ВИ и ВЖМ5-ВИ. Установлено, что содержание в сплавах 0,01% фосфора приводит к снижению их жаропрочных свойств. Методом растровой электронной микроскопии выявлено, что при повышенном содержании фосфора (свыше 0,01%) увеличивается количество микротрещин вблизи места разрушения, более интенсивно протекают процессы коагуляции упрочняющей γ' -фазы и обогащения области около эвтектической γ' -фазы, в результате чего происходит оплавление структурных составляющих при термической обработке.

Для нейтрализации вредного влияния фосфора в указанных сплавах эффективно применение редкоземельного элемента – лантана.

Ключевые слова: *фосфор, лантан, структура, длительная прочность, монокристаллы.*

V.V. Sidorov, V.E. Rigin, E.V. Filonova, O.B. Timofeeva

THE STRUCTURE INVESTIGATIONS AND PROPERTIES OF VGM4-VI AND VGM5-VI SINGLE CRYSTAL ALLOYS WITH INCREASED PHOSPHORUS QUANTITY

The effect of phosphorus impurity on structure transformation and stress rupture properties of VGM4-VI and VGM5-VI single crystal alloys was investigated. It was established that a phosphorus at increased content (above 0,01%) reduces the stress rupture properties.

Using the scanning electron microscope method it was established that a phosphorus at increased content (above 0,01%) increases a quantity of microcracks near rupture place, favours more intensive proceeding the process of hardenable γ' -phase coagula-

tion, enriches the areas near eutectic γ' -phase and favours melt of the structure components at heat treatment.

For neutralization of harmful phosphorus influence in alloys the rare earth metal – lanthanum application is effective.

Keywords: *phosphorus, lanthanum, structure, stress rupture, single crystal.*

Введение

Для получения высоких и стабильных свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов необходимо обеспечить в них минимальное содержание примесных элементов: кислорода, азота, серы, фосфора, кремния, примесей цветных металлов. В научно-технической литературе многочисленны данные свидетельствуют об отрицательном влиянии этих примесных элементов на свойства и структурное состояние литейных жаропрочных никелевых сплавов [1–6].

Одной из малоизученных примесей в литейных жаропрочных сплавах является фосфор, который попадает в сплав из металлических шихтовых материалов и футеровки плавильного тигля. В научно-технической литературе имеются противоречивые сведения о влиянии фосфора на свойства жаропрочных сплавов. В работе [7] показано, что в сплаве DZ125L при повышении содержания фосфора с 0,0005 до 0,0052% долговечность при испытании на длительную прочность (при 760°C, $\sigma=804$ МПа) снизилась – с 336 до 126 ч соответственно. В работе [8] показано, что в литейном жаропрочном сплаве M963 с повышением содержания фосфора с 0,002 до 0,010% 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% повысились значения длительной прочности при температурах 650 и 750°C и ползучести.

По ТУ на отечественные литейные жаропрочные сплавы содержание фосфора в них должно быть: для сплавов с равноосной структурой – не более 0,015%, для сплавов с направленной и монокристаллической структурой – не более 0,010%. Однако специальные исследования по влиянию фосфора на свойства современных литейных жаропрочных сплавов с монокристаллической структурой не проводились.

В связи с вышеизложенным, цель данной работы заключалась в экспериментальном исследовании влияния фосфора на структурно-фазовые превращения и свойства в монокристаллах литейных высокожаропрочных сплавов на никелевой основе. Для исследований выбраны безуглеродистые ренийсодержащий сплав ВЖМ5-ВИ и рений-рутенийсодержащий сплав ВЖМ4-ВИ [10, 11].

Методика проведения исследований

Выплавку сплавов ВЖМ4-ВИ и ВЖМ5-ВИ проводили в вакуумных индукционных печах ВИАМ-2002 и VIM50: в тигле емкостью 20 и 350 кг соответственно. Полученные слитки подвергали механической обработке, а затем переплавляли методом направленной кристаллизации на установке УВНК-9 для получения монокристаллических заготовок с кристаллографической ориентацией $\langle 001 \rangle$ [12, 13]. Из полученных заготовок (после термической обработки) изготовлены образцы. Проведены испытания на длительную прочность по ГОСТ 10145. Электронно-микроскопический анализ (РЭМ) проводили с помощью растрового электронного микроскопа JSM6490LS (фирмы Jeol, Япония).

Для получения изображения структуры материала использовали сигнал вторичных электронов (secondary electron image (SEI)). Вторичные электроны – это электроны с низкой энергией, образующиеся только в тонком слое материала (1–10 нм), внутри пятна, на которое упал первичный луч. Сигнал от вторичных электронов позволяет получить лучшее разрешение (< 10 нм), чем в случае отраженных электронов.

Отраженные (обратнорассеянные) электроны (backscattered electron image (BEI)) – это электроны, поступающие из глубоких слоев материала, с высокой энергией, которые испускаются из сравнительно протяженной области объекта вокруг первичного электронного луча. Разрешающая способность при использовании отраженных электронов: 10–20 нм.

Для получения информации о распределении фаз и их элементном составе использовали специальный режим микроскопа СОМРО, контраст изображения в котором формируется отраженными электронами (BEI) за счет разницы средних атомных масс компонентов сплава (\bar{A}) в исследуемых областях или фазах. Причем, чем меньше \bar{A} , тем темнее выглядит данный участок на фотографии. На фотографиях фазы на основе элементов с небольшой атомной массой (например, фосфор) выглядят в виде темных образований, а на основе элементов с большой атомной массой (например, никель) – в виде светлых частиц.

Подготовку образцов осуществляли на оборудовании 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. Металл исследовали до испытаний в литом состоянии и после полной термической обработки. Образцы запрессовывали в полистирол на установке Laboress-3. Микрошлифы изготовляли на шлифовально-полировальном станке RotoPol-21.

Результаты исследования и их обсуждение

Для исследования влияния фосфора на структуру и жаропрочные свойства сплава ВЖМ4-ВИ на установке ВИАМ-2002 выплавлены слитки, содержащие 0,008 и 0,018% фосфора. Из полученного металла отлиты заготовки под образцы с монокристаллической структурой $\langle 001 \rangle$. Проведены испытания на длительную прочность при 1100°C в течение 500 ч. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Влияние фосфора на длительную прочность монокристаллов сплава ВЖМ4-ВИ

| Условный номер плавки | Содержание фосфора, % | | | Долговечность, ч (при 1100°C, $\sigma=137$ МПа) |
|-----------------------|-----------------------|----------|--------------------------|--|
| | расчетное | в слитке | в моноотливке (низ/верх) | |
| 1 | 0,008 | 0,0098 | – | 798 488 (среднее 623) |
| 2 | 0,018 | 0,0191 | 0,0193/0,019 | 530 258 360 (среднее 383) |

Примечание. В плавке 1 – испытано 2 образца; в плавке 2 – испытано 3 образца.

Анализ данных табл. 1 показывает, что при содержании в сплаве около 0,01% фосфора долговечность сплава при испытании на длительную прочность высокая и полностью удовлетворяет паспортным характеристикам на сплав ВЖМ4-ВИ. При повышении содержания фосфора в сплаве до 0,019% долговечность снизилась почти в 2 раза. При этом следует отметить, что содержание фосфора как в слитке, так и в полученном монокристалле практически одинаковое.

Аналогичные результаты получены при исследовании влияния фосфора на жаропрочные свойства монокристаллов сплава ВЖМ5-ВИ с кристаллографической ориентацией $\langle 001 \rangle$. Для этого исследовали металл двух плавок данного сплава, которые отличались по содержанию фосфора: 0,007 и 0,014% соответственно. Испытания на длительную прочность проводили на базе 40 ч (по ТУ 1-595-1-1073–2009) и при 1100°C в течение 500 ч. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Влияние фосфора на длительную прочность монокристаллов сплава ВЖМ5-ВИ

| Условный номер плавки* | Содержание фосфора, % | Долговечность, ч | |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | | при 975°C, $\sigma=352$ МПа | при 1100°C, $\sigma=120$ МПа |
| 1 | 0,007 | 62 | 381 |
| | | 79 | 390 |
| | | (среднее 70,5) | (среднее 385,5) |
| 2 | 0,014 | 81 | 217 |
| | | 72 | 251 |
| | | (среднее 76,5) | (среднее 234) |
| По ТУ 1-595-1-1073-2009 | | ≥ 40 | – |

* В каждой плавке испытано по 2 образца.

Как видно из данных табл. 2, при испытании сплава ВЖМ5-ВИ на длительную прочность по ТУ (40 ч) значения долговечности металла с пониженным и повышенным содержанием фосфора примерно одинаковые. Однако при испытаниях на базе 500 ч в металле с повышенным содержанием фосфора (0,014%) значения долговечности в 1,5 раза ниже, чем в металле с пониженным (0,007%) содержанием фосфора.

Для изучения отрицательного влияния повышенного количества фосфора на жаропрочные свойства сплавов ВЖМ4-ВИ и ВЖМ5-ВИ проведены структурные исследования монокристаллов этих сплавов со стандартным и повышенным содержанием этой примеси.

Фосфор как примесь внедрения концентрируется на границах фаз и структурных дефектах. Повышенная концентрация фосфора наблюдается в областях, прилегающих к образовавшейся эвтектической γ' -фазе (рис. 1), что подтверждается результатами качественного микрорентгеноспектрального анализа этой области: наряду с Ni, Co, Cr, Al, Mo, Ru в ней обнаружен и фосфор.

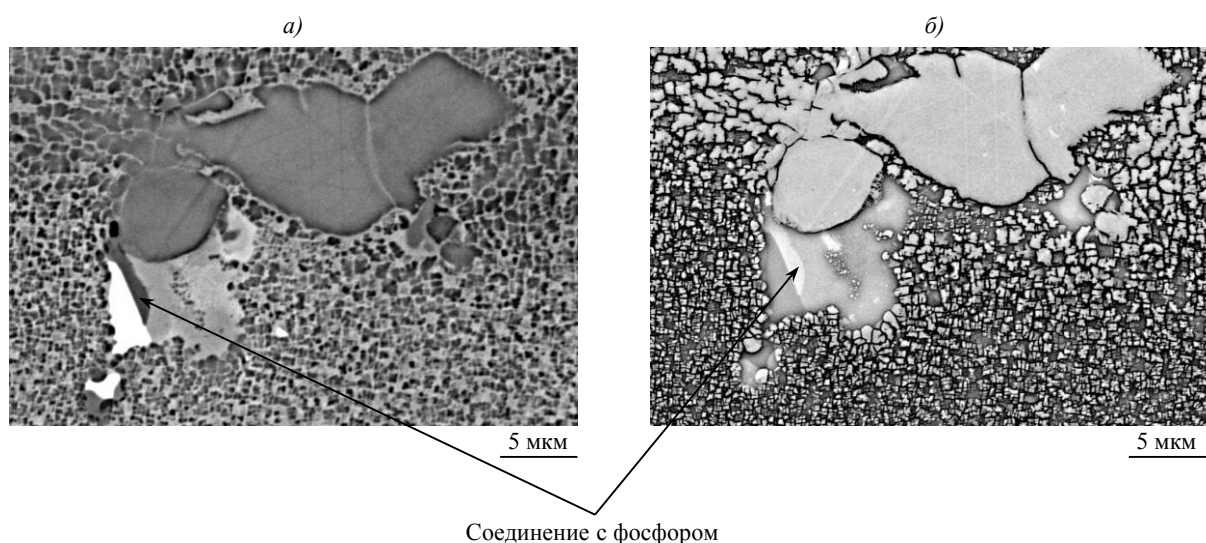


Рисунок 1. Микроструктура ($\times 3500$) монокристалла сплава ВЖМ4-ВИ в литом состоянии с повышенным (0,019%) содержанием фосфора, полученная на растровом электронном микроскопе с помощью отраженных электронов (а) и с помощью вторичных электронов (б)

Установлено, что в сплаве ВЖМ4-ВИ при повышении содержания фосфора до 0,019% происходит увеличение микропористости вблизи места разрушения (по сравнению с металлом со стандартным содержанием фосфора).

Электронно-микроскопические исследования показали, что в металле с повышенным содержанием фосфора более интенсивно протекает процесс коагуляции дисперсных частиц упрочняющей γ' -фазы. На рис. 2, *а*, *б* видно, что, хотя долговечность образца с повышенным содержанием фосфора в 2 раза меньше ($\tau=360$ ч), чем у образца со стандартным содержанием фосфора ($\tau=798$ ч), размер рафтированных пластин γ' -фазы шире, т. е. коагуляция γ' -фазы протекает более интенсивно.

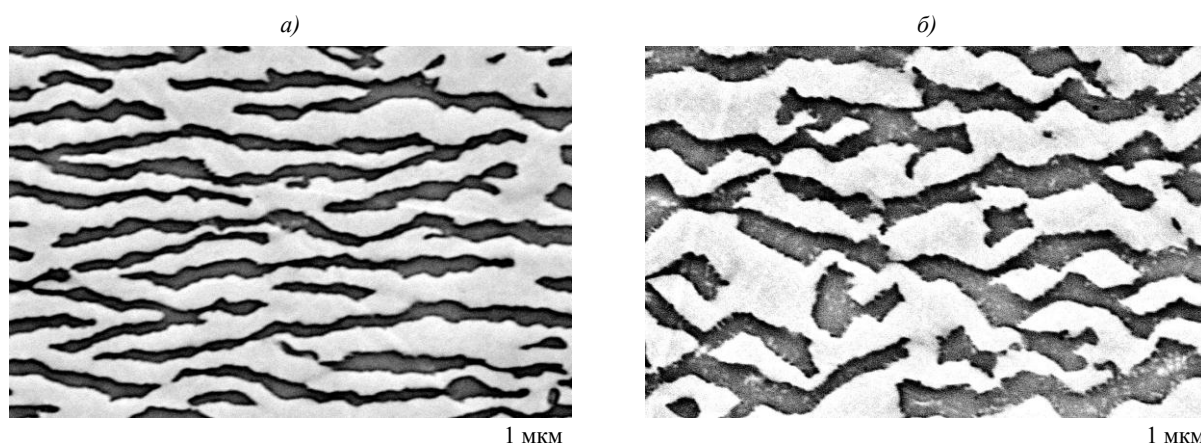


Рисунок 2. Микроструктура ($\times 10000$) монокристалла сплава ВЖМ4-ВИ со стандартным (*а*) и повышенным (*б*) содержанием фосфора после испытаний на длительную прочность при 1100°C , $\sigma=137$ МПа:

а – 0,010% Р ($\tau=798$ ч); *б* – 0,019% Р ($\tau=360$ ч)

При исследовании микроструктуры монокристаллических образцов сплава ВЖМ5-ВИ в литом состоянии (см. табл. 2) установлено, что микроструктура образца, содержащего 0,007% фосфора, является типичной для данного сплава (рис. 3, *а*); в микроструктуре образца, содержащего 0,014% фосфора, около частиц эвтектической γ' -фазы наблюдаются области с повышенным количеством вольфрама и рения и области, обогащенные фосфором (рис. 3, *б*). Качественный микрорентгеноструктурный анализ фаз вблизи эвтектической γ' -фазы подтвердил наличие фосфора в этой области.

Исследование микроструктуры монокристаллических образцов сплава ВЖМ5-ВИ с содержанием фосфора 0,007 и 0,014% после полной термической обработки (закалка при 1325°C , старение при 1110 и 870°C) показало, что в обоих образцах наблюдается микроструктура, типичная для данного сплава, видимого оплавления около частиц эвтектической γ' -фазы не обнаружено (рис. 4, *а*, *б*).

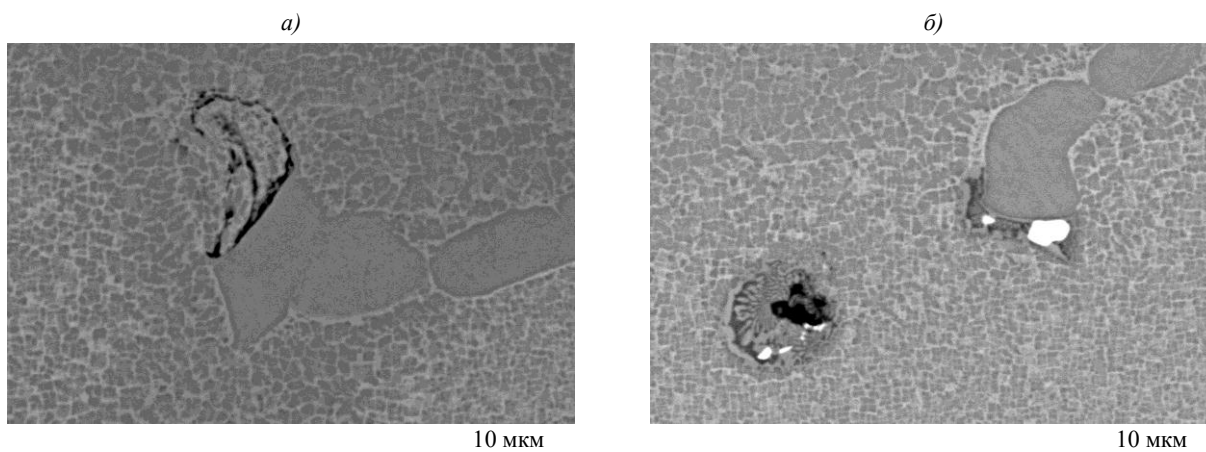


Рисунок 3. Микроструктура ($\times 2500$) монокристалла сплава ВЖМ5-ВИ в литом состоянии, содержащего 0,007% (а) и 0,014% фосфора (б)

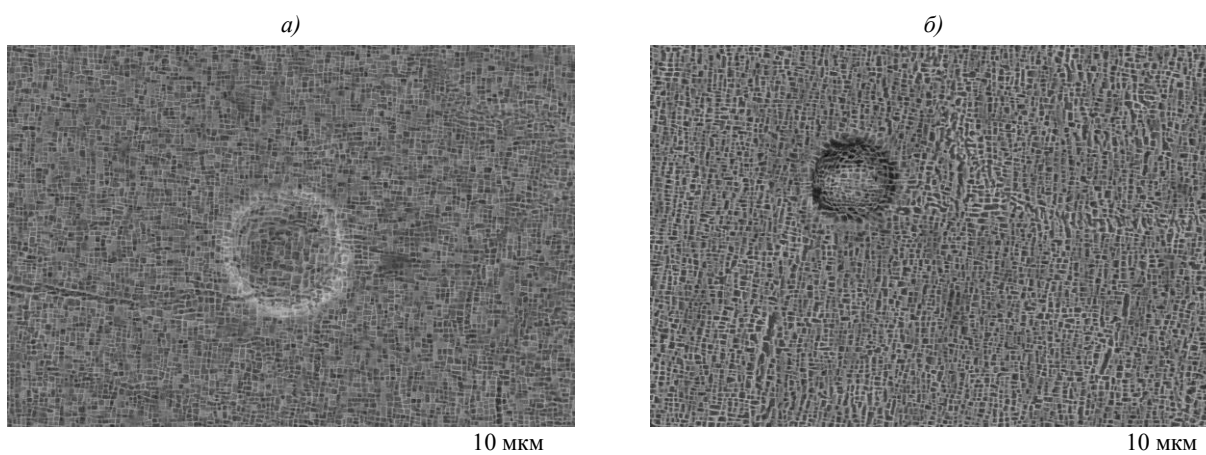


Рисунок 4. Микроструктура ($\times 2500$) монокристалла сплава ВЖМ5-ВИ после полной термической обработки, содержащего 0,007 (а) и 0,014% фосфора (б)

Исследована микроструктура монокристаллов сплава ВЖМ5-ВИ с более высоким содержанием фосфора (0,025%). В литом состоянии, как и в образцах с содержанием 0,007% фосфора, около частиц эвтектической γ' -фазы наблюдаются области, обогащенные фосфором (рис. 5, а). В процессе термической обработки образца, содержащего 0,025% фосфора, происходит оплавление границ зерен в местах расположения легкоплавких фаз, содержащих фосфор (рис. 5, б).

Нейтрализовать вредное влияние фосфора на свойства литейных жаропрочных сплавов можно путем их дополнительного микролегирования редкоземельными элементами, в частности – лантаном. Редкоземельные элементы широко применяются при выплавке жаропрочных никелевых сплавов благодаря высокой химической активности: взаимодействуя в расплаве с вредными примесями, они нейтрализуют их отрицательное воздействие [14–21].

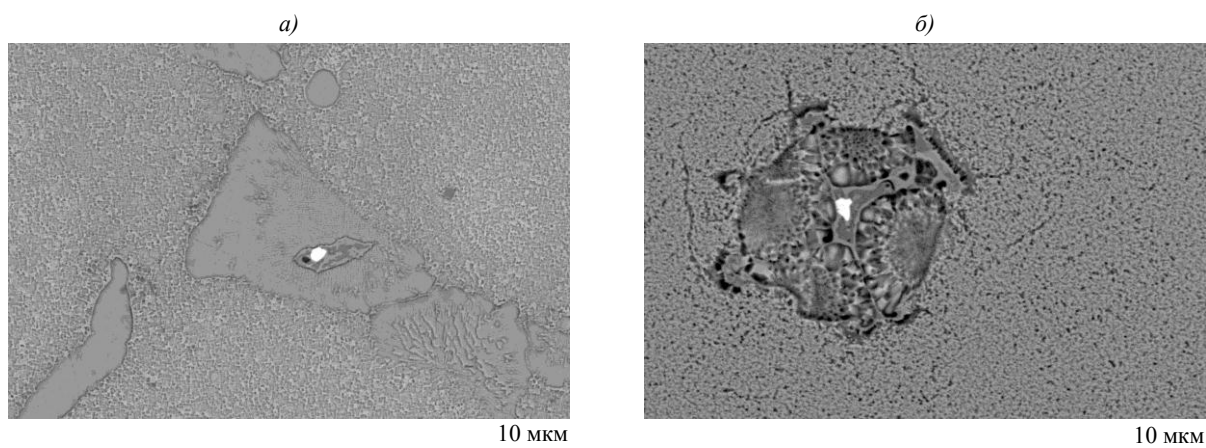


Рисунок 5. Микроструктура (*a* – $\times 1000$; *b* – $\times 1500$) монокристалла сплава ВЖМ5-ВИ, содержащего 0,025% Р, в литом состоянии (*a*) и после полной термической обработки (*b*)

В сплав ВЖМ4-ВИ, содержащий 0,019% фосфора (см. табл. 1, плавка 2), дополнительно введен лантан. Отлиты образцы с монокристаллической структурой $\langle 001 \rangle$. Результаты испытаний на длительную прочность подтвердили эффективность применения лантана для нейтрализации вредного влияния фосфора: при температуре испытаний 1100°C и напряжении 137 МПа время до разрушения составило 646 и 502 ч (среднее 574 ч), тогда как в металле, содержащем 0,019% фосфора, без лантана долговечность составила 530, 258 и 360 ч (среднее 383 ч) (см. табл. 1).

По данным МРСА при введении в сплав ВЖМ4-ВИ лантана образуется химическое соединение никель–фосфор–лантан, в состав которого в небольших количествах входят легирующие элементы, представленные в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав сплава ВЖМ4-ВИ по данным МРСА

| Содержание легирующих элементов, % (по массе) | | | | | | | | | | |
|---|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| Ni | P | La | Al | Re | Cr | Co | Mo | Ru | Ta | W |
| 36,7 | 13,3 | 9,3 | 0,7 | 3,3 | 4,7 | 6,7 | 7,7 | 4,7 | 10,2 | 1,5 |

Эффективность влияния лантана на свойства сплавов объясняется тем, что лантан связывает фосфор в термически прочное тугоплавкое соединение с температурой плавления свыше 1200°C , нейтрализуя тем самым его вредное влияние, тогда как температура плавления несвязанного фосфора составляет $\sim 500^{\circ}\text{C}$.

Выводы

Таким образом, в результате работы установлено отрицательное влияние примеси фосфора на жаропрочные свойства монокристаллов сплавов ВЖМ4-ВИ и ВЖМ5-ВИ при его содержании более 0,01%. Для нейтрализации вредного влияния фосфора сплав

следует дополнительно микролегировать лантаном, который связывает фосфор в термически прочные тугоплавкие соединения.

При исследовании влияния фосфора на структурно-фазовое состояние монокристаллов сплавов ВЖМ4-ВИ и ВЖМ5-ВИ, методом растровой электронной микроскопии установлено, что содержание фосфора свыше 0,01% приводит к увеличению количества микротрещин вблизи места разрушения монокристаллов, более интенсивному протеканию процессов коагуляции дисперсных частиц упрочняющей γ' -фазы, обогащению фосфором области около эвтектической γ' -фазы и оплавлению структурных составляющих при термической обработке (при его содержании в сплавах в количестве 0,025% и выше).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., 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.
2. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–51.
3. 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.
4. 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. Спец. вып. «Перспективные конструкционные материалы и технологии». С. 68–78.
5. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Горюнов А.В., Каблов Д.Е. Высокоэффективные технологии и современное оборудование для производства шихтовых заготовок из литейных жаропрочных сплавов //Металлург. 2012. №5. С. 26–30.
6. Каблов Д.Е., Чабина Е.Б., Сидоров В.В., Мин П.Г. Исследование влияния азота на структуру и свойства монокристаллов из литейного жаропрочного сплава ЖС30-ВИ //МиТОМ. 2013. №8. С. 3–7.

7. Каблов Д.Е., Беляев М.С., Сидоров В.В., Комарова Т.И. Исследование влияния примеси азота на малоцикловую усталость монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ЖС30-ВИ //МиТОМ. 2012. №7. С. 46–47.
8. Yaoxiao Zhu, John Radavich et al. The development and Long-Time Structural Stability of a Low Segregation Hf Free Superalloy – DZ 125 /In: Superalloys-2000. 2000. P. 329–339.
9. Chao Yuan, Fengshi Yin et al. 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.
10. Zhuanggi H.V., Hongwei Song et al. Effect of Phosphorus on Microstructure and Creep Property of IN718b Superalloy //J. Mater. Sci. Technol. 2005. V. 21. P. 73–76.
11. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Морозова Г.И., Светлов И.Л. Физико-химические факторы жаропрочности никелевых сплавов, содержащих рений /В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. «Высокорениевые жаропрочные сплавы, технологии и оборудование для производства сплавов и литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД». М.: ВИАМ. 2004. С. 37–47.
12. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы, легированные рутением /В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. «Высокорениевые жаропрочные сплавы, технологии и оборудование для производства сплавов и литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД». М.: ВИАМ. 2004. С. 80–90.
13. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 25–31.
14. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.
15. Каблов Е.Н., Сидоров В.В. Микролегирование РЗМ – современная технология повышения свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов //Перспективные материалы. 2001. №1. С. 23–24.

16. 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.
17. 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.
18. Горюнов А.В., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Зайцев Д.В. Формирование наноструктурированного состояния в литейном жаропрочном сплаве ВЖМ4-ВИ при микролегировании его лантаном //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 39–43.
19. Sidorov V.V., Goryunov A.V., Kolmakova N.A. Effect of lanthanum on the high-temperature strength of single-crystals of highly refractory alloy VZhM4-VI containing rhenium and ruthenium //Metal science and heat treatment. 2012. V. 54. №3–4. P. 126–130.
20. Pang H.T., Edmonds I.M., Jones C.N., Stone H.J., Rae C.M. Effect of Y and La additions on the processing and properties of a second generation single crystal nickel-base superalloy CMSX-4 /In: Superalloys-2012: International symposium on superalloys. 2012. P. 301–310.
21. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Зайцев Д.Е., Горюнов А.В. Формирование наноструктурированного состояния в литейном жаропрочном сплаве при микролегировании его лантаном //Труды ВИАМ. 2013. №1. Ст. 01 (viam-works.ru).

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N., Sidorov V.V., Rigin V.E., Gorjunov A.V. Sovremennye tehnologii poluchenija prutkovyh zagotovok iz litejnyh zharoprochnyh splavov novogo pokolenija [Modern technologies for bar stock of casting superalloys new generation] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 97–105.
2. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L., Demonis I.M. Nikelevye litejnye zharoprochnye splavy novogo pokolenija [Casting nickel superalloys new generation] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 36–51.
3. Kablov D.E., Sidorov V.V., Min P.G. Vlijanie primesi azota na strukturu monokristallov zharoprochnogo nikelovogo splava ZhS30-VI i razrabotka jeffektivnyh sposobov ego rafinirovanija [Influence of nitrogen impurities on the structure of single-crystal superalloy nickel alloy ZHS30-VI and develop effective ways of refining its] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 32–36.

4. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Sidorov V.V., Rigin V.E., Kablov D.E. Osobennosti tehnologii vyplavki i razlivki sovremennyh litejnyh vysokozharoprochnykh nikelovykh splavov [Technology features modern smelting and casting casting nickel-base superalloys] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. Spec. vyp. «Perspektivnye konstrukcionnye materialy i tehnologii». S. 68–78.
5. Sidorov V.V., Rigin V.E., Gorjunov A.V., Kablov D.E. Vysokoeffektivnye tehnologii i sovremennoe oborudovanie dlja proizvodstva shihtovykh zagotovok iz litejnykh zharoprochnykh splavov [Enabling technologies and modern equipment for production of charge billets casting superalloys] //Metallurg. 2012. №5. S. 26–30.
6. Kablov D.E., Chabina E.B., Sidorov V.V., Min P.G. Issledovanie vlijanija azota na strukturu i svoystva monokristallov iz litejnogo zharoprochnogo splava ZhS30-VI [Investigation of the influence of nitrogen on the structure and properties of single crystals of cast superalloy ZHS30-VI] //MiTOM. 2013. №8. S. 3–7.
7. Kablov D.E., Beljaev M.S., Sidorov V.V., Komarova T.I. Issledovanie vlijanija primesi azota na malociklovuju ustalost' monokristallov zharoprochnogo nikelovogo splava ZhS30-VI [Investigation of the influence of nitrogen impurity on the low-cycle fatigue of single crystals heat-resistant nickel alloy ZHS30-VI] //MiTOM. 2012. №7. S. 46–47.
8. Yaoxiao Zhu, John Radavich et al. The development and Long-Time Structural Stability of a Low Segregation Hf Free Superalloy – DZ 125 /In: Superalloys-2000. 2000. P. 329–339.
9. Chao Yuan, Fengshi Yin et al. 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.
10. Zhuanggi H.V., Hongwei Song et al. Effect of Phosphorus on Microstructure and Creep Property of IN718b Superalloy //J. Mater. Sci. Technol. 2005. V. 21. P. 73–76.
11. Kablov E.N., Petrushin N.V., Morozova G.I., Svetlov I.L. Fiziko-himicheskie faktory zharoprochnosti nikelovykh splavov, sodержashhih renij [Physico-chemical factors of heat resisting nickel alloys containing rhenium] /V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Vysokorenivnye zharoprochnye splavy, tehnologii i oborudovanie dlja proizvodstva splavov i lit'ja monokristallicheskih turbinykh lopatok GTD». M.: VIAM. 2004. S. 37–47.
12. Kablov E.N., Svetlov I.L., Petrushin N.V. Nikelevye zharoprochnye splavy, legirovannye ruteniem [Nickel superalloys, ruthenium doped] /V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Vysokorenivnye zharoprochnye splavy, tehnologii i oborudovanie

- dlja proizvodstva splavov i lit'ja monokristallicheskih turbinskih lopatok GTD». M.: VIAM. 2004. S. 80–90.
13. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Kablov D.E. Osobnosti struktury i zharoprochnyh svojstv monokristallov $\langle 001 \rangle$ vysokorenievogo nikeljevogo zharoprochnogo splava, poluchennogo v usloviyah vysokogradientnoj napravlennoj kristallizacii [Structure and properties of single crystals of high-temperature $\langle 001 \rangle$ high-rhenium nickel superalloy prepared under the high-gradient directional crystallization] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 25–31.
 14. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A. Razvitie processa napravlennoj kristallizacii lopatok GTD iz zharoprochnyh splavov s monokristallicheskoj i kompozicionnoj strukturoj [The development process of directional solidification of GTE blades with single crystal superalloys and composite structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 3–8.
 15. Kablov E.N., Sidorov V.V. Mikrolegirovanie RZM – sovremennaja tehnologija povshenija svojstv litejnyh zharoprochnyh nikelovyh splavov [Microalloying REM - modern technology enhancing properties of cast heat-resistant nickel alloys] //Perspektivnye materialy. 2001. №1. S. 23–24.
 16. Sidorov V.V., Timofeeva O.B., Kalicev V.A., Gorjunov A.V. Vlijanie mikrolegirovanija RZM na svojstva i strukturno-fazovye prevrashhenija v intermetallidnom splave VKNA-25-VI [Effect of microalloying REM on properties and structural phase transitions in the intermetallic alloy VKNA-25-VI] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №4. S. 8–13.
 17. 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.
 18. Gorjunov A.V., Sidorov V.V., Rigin V.E., Zajcev D.V. Formirovanie nanostrukturirovannogo sostojanija v litejnom zharoprochnom splave VZhM4-VI pri mikrolegirovanii ego lantanom [Formation of nanostructured state in casting superalloy VZHM4-VI in his microalloying lanthanum] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 39–43.
 19. Sidorov V.V., Goryunov A.V., Kolmakova N.A. Effect of lanthanum on the high-temperature strength of single-crystals of highly refractory alloy VZhM4-VI containing rhenium and ruthenium //Metal science and heat treatment. 2012. V. 54. №3–4. R. 126–130.
 20. Pang H.T., Edmonds I.M., Jones C.N., Stone H.J., Rae C.M. Effect of Y and La additions on the processing and properties of a second generation single crystal nickel-base

superalloy CMSX-4 /In: Superalloys-2012: International symposium on superalloys. 2012. P. 301–310.

21. Sidorov V.V., Rigin V.E., Zajcev D.E., Gorjunov A.V. Formirovanie nanostrukturirovannogo sostojanija v litejnom zharoprochnom splave pri mikrolegirovanii ego lantanom [Formation of nanostructured state in casting superalloy with microalloying its lanthanum] //Trudy VIAM. 2013. №1. St. 01 (viam-works.ru).