

УДК 669.018.44:669.245

Е.А. Стоякина<sup>1</sup>, В.Н. Симонов<sup>2</sup>, М.С. Алексеева<sup>1</sup>

## ИЗУЧЕНИЕ ВОПРОСОВ ФИЛЬТРАЦИИ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖС32 ОТ ПРИМЕСИ КРЕМНИЯ

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-12-20

*Рассмотрены вопросы фильтрации жаропрочных никелевых сплавов от вредных примесей при пропускании расплава через пенокерамический фильтр. Изучена микроструктура с определением локального элементного состава двух образцов жаропрочного никелевого сплава ЖС32 с различным содержанием кремния: 0,15 и 0,32% (по массе). Установлено, что примеси (сера, кремний, кислород) располагаются вблизи и в порах материала, что влияет на прочностные характеристики. Проведено микроструктурное исследование образца лигатуры на основе  $Y_5Si_3$ . В результате рентгенофазового анализа обнаружены пять фаз:  $Al_2Si_2Y$ ,  $Al_3Si_2Y_2$ ,  $Y_2AlSi_2$ ,  $Al$ ,  $Al_3Y$ , три из которых содержат кремний.*

**Ключевые слова:** жаропрочный никелевый сплав, примеси, кремний, микроструктура, фильтрация, пенокерамика.

Е.А. Stoyakina<sup>1</sup>, V.N. Simonov<sup>2</sup>, M.S. Alekseeva<sup>1</sup>

## RESEARCH THE PROBLEMS OF FILTRATION OF A HIGH-TEMPERATURE NICKEL ALLOY ZhS32 AGAINST AN IMPURITY OF SILICON

*The paper studies the filtration of high-temperature nickel alloys from harmful impurities when the melt is passed through a foam ceramic filter. A microstructure was studied with the determination of the local element composition of two samples of the high-temperature nickel alloy ZhS32 with a different silicon content (0,15 and 0,32%). It is established that impurities (sulfur, silicon, oxygen) are located near and in the pores of the material, which affects the strength characteristics. A microstructural study of a master alloy sample based on  $Y_5Si_3$  was carried out. As a result of x-ray phase analysis, five phases were detected:  $Al_2Si_2Y$ ,  $Al_3Si_2Y_2$ ,  $Y_2AlSi_2$ ,  $Al$ ,  $Al_3Y$ , three of which contain silicon.*

**Keywords:** high-temperature nickel alloy, impurities, silicon, microstructure, filtration, foam ceramics.

---

<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

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» [Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology)]; e-mail: bauman@bmstu.ru

### Введение

Литейные жаропрочные сплавы активно разрабатывались в период развития авиационной техники. В процессе создания турбореактивных и реактивных двигателей потребовались новые материалы, способные работать при повышенных температурах без окисления и без потери прочности, которыми и являются жаропрочные никелевые сплавы [1–4].

Разработка специально легированных сплавов для направленной кристаллизации марок ЖС26-ВНК, ЖС30-НК, ЖС32-ВНК позволила создать лопатки первой ступени, способные работать при температуре 1700 К. Особое место среди сплавов с направленной кристаллизацией занимает сплав ЖС32 [3–6], разработанный в 1984 г., который позволил повысить ресурс лопаток турбины высокого давления (ТВД) двигателя РД-33 – с 300 до 1000 ч. Несмотря на высокую стоимость, сплав ЖС32 (4% Re) является одним из наиболее перспективных и внедрен на ряде изделий двигателей АЛ-31Ф, РД-33, Д18Т, Д-27, что позволило увеличить ресурс двигателей в 2–3 раза [3–5].

Многочисленные исследования структуры, а также анализ данных об эксплуатационных повреждениях лопаток с равноосной структурой показывают, что в большинстве случаев зарождение трещин и их развитие при статическом, циклическом и термоциклическом нагружении связаны с границами зерен, прочность которых и определяет свойства материала лопаток и их поведение при эксплуатации [6–11].

Развитие реактивных и турбореактивных двигателей невозможно без совершенствования литейных жаропрочных никелевых сплавов, особенно без их очистки от примесей, таких как сера, фосфор, кислород, кремний [12, 13]. Эти вредные примеси негативно влияют на технологические параметры сплавов, их прочностные характеристики и процессы кристаллизации. Примеси склонны располагаться вблизи и в порах металла, что приводит к уменьшению прочности связей между атомами основного металла и, как следствие, к зарождению трещин [14].

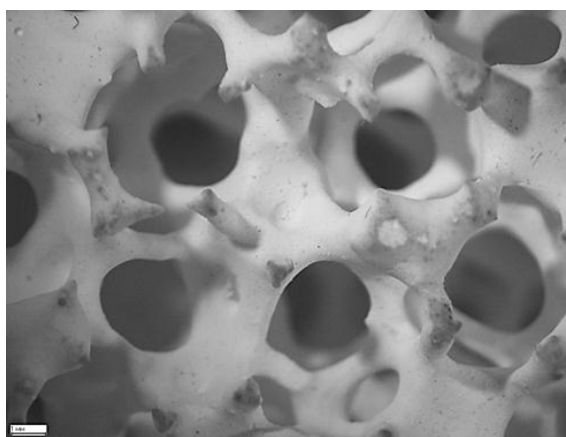


Рис. 1. Макроструктура ( $\times 5$ ) пенокерамического фильтра

Для удаления примесей из жаропрочных никелевых сплавов может быть применен способ фильтрации через пенокерамический фильтр из оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Выбор материала фильтра зависит от температуры плавления фильтрующегося расплава. В работе [6] приведены подробные расчеты процесса фильтрации и выполнено моделирование, в результате которого установлено, что процесс фильтрации необходимо проводить при небольших скоростях подачи расплава материала в фильтр с соблюдением ламинарного режима течения. Макроструктура пенокерамического фильтра (рис. 1) представляет собой ретикулярно расположенные поры  $\varnothing 5$  мм с перешейками между порами  $\varnothing 2$  мм. Так, для фильтра с такими размерами пор и перешейков рекомендуемая скорость подачи расплава составляет 0,01 м/с. Увеличение этой скорости может негативно повлиять на качество фильтрации. Моделирование процесса движения частиц расплава в гидроканалах фильтра (гидроканал – элементарная часть фильтра) показало, что сферические поверхности пор наиболее благоприятны для оседания частиц примесей. Такое заключение было сделано по результатам моделирования скоростей движения частиц примесей, распределения давления и времени пребывания этих частиц

в гидроканалах [6]. Для того чтобы произошло оседание частиц примесей, необходимо чтобы они были связаны в тугоплавкие соединения и взаимодействовали с материалом пенокерамического фильтра путем адгезии. Необходимо также, чтобы сила, действующая на частицы примесей, осевшие на материале фильтра, не превышала силу адгезионного взаимодействия, иначе произойдет отрыв в области спайки частицы с материалом фильтра.

Процесс изготовления пенокерамического фильтра заключается в следующем: открытопористый пенополиуретан покрывают керамической суспензией, затем удаляют излишки этой суспензии и проводят сушку; полученную заготовку подвергают высокотемпературному отжигу при температуре  $\sim 1000^\circ\text{C}$ , в процессе которого происходит выжигание пенополиуретана [6]. Особенность данного способа фильтрации от примесей – то, что непосредственно перед процессом в расплав необходимо добавлять определенные элементы, которые создадут тугоплавкие соединения с примесями [15, 16]. В качестве такого элемента используют лантан [16], который активен при нейтрализации серы и кислорода. На рис. 2 представлен график зависимости долговечности монокристаллов сплава ЖС36 от процентного содержания серы, доля которой уменьшилась за счет фильтрации с добавлением лантана. Видно, что фильтрация с добавлением лантана повышает долговечность сплава в среднем на 100 ч [17].

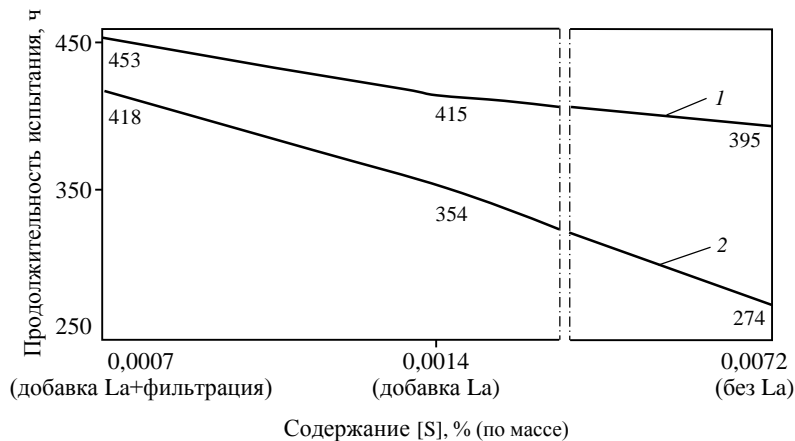


Рис. 2. Влияние переменного содержания серы на долговечность монокристаллов сплава ЖС36, отлитых с различным температурным градиентом на установках УВНС-5 (1;  $150^\circ\text{C}/\text{см}$ ) и УВНК-9А (2;  $70^\circ\text{C}/\text{см}$ )

В результате очистки сплава от серы резко снижается содержание сульфидов в монокристалле, при этом вместо легкоплавких включений сульфида никеля в сплаве остается незначительное количество тугоплавкого сульфида лантана. При длительной высокотемпературной выдержке сегрегирующий на границах пор лантан нейтрализует серу, образуя внутри пор химически инертные тугоплавкие глобулярные включения, восстанавливая силы поверхностного натяжения, замедляющие рост пор и образование на них трещин. Лантан способен удалять и нейтрализовать не только серу, но и кислород [16, 18, 19].

Несмотря на успешную фильтрацию жаропрочных никелевых сплавов от примесей серы и кислорода, вопрос с фильтрацией кремния остается открытым. Как показано ранее, необходимо связывать примеси в тугоплавкие соединения путем добавления определенных элементов. Известно, что иттрий способен создавать с кремнием тугоплавкое соединение  $\text{Y}_5\text{Si}_3$ , температура плавления которого  $\sim 2600^\circ\text{C}$  [5].

Целью данной работы является изучение микроструктуры жаропрочного никелевого сплава ЖС32, профильтрованного через пенокерамический фильтр, а также микроструктуры и фазового состава лигатуры на основе соединения  $\text{Y}_5\text{Si}_3$ .

### Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбран литейный монокристаллический ренийсодержащий жаропрочный никелевый сплав ЖС32 с содержанием кремния, % (по массе): 0,15 (образец 1) и 0,32 (образец 2) [9]. Данный сплав выплавлен в условиях вакуумной индукционной печи ВИАМ-2002 с применением фильтрации через пенокерамический фильтр. Перед началом фильтрации в расплав образца 2 добавляли иттрий для образования тугоплавкого соединения с кремнием. Химический состав сплава приведен в таблице.

**Химический состав сплава ЖС32 (для образцов 1 и 2)\***

| Содержание элементов, % (по массе) |         |          |         |         |         |         |         |           |         |      |       |
|------------------------------------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|---------|------|-------|
| Ni                                 | Cr      | Co       | W       | Al      | Re      | Ta      | Nb      | C         | Mo      | B    | Ce    |
| Основа                             | 4,3–5,6 | 8,0–10,0 | 7,7–9,5 | 5,6–6,3 | 3,5–4,5 | 3,5–4,5 | 1,4–1,8 | 0,12–0,18 | 0,8–1,4 | 0,02 | 0,025 |

\* Для образцов 1 и 2 содержание Si, % (по массе): 0,15 и 0,32 соответственно.

Объектом исследования также выбран образец лигатуры на основе  $Y_5Si_3$  следующего состава, % (по массе): 80 Y и 20 Si. Лигатуру выплавляли в керамическом тигле из оксида алюминия в индукционной вакуумной печи.

Микрошлифы изготавливали по традиционной технологии, включающей следующие этапы: резку, запрессовку, шлифование, полирование, травление. Резку образцов 1 и 2 из сплава ЖС32 осуществляли на лабораторной установке Discotom-6. После резки с помощью алмазных надфилей удаляли грубые заусенцы, полученные образцы запрессовывали в электропроводящую смолу на установке CitoPress-20. Запрессовка обеспечивает следующие преимущества: удобные средства для крепления образцов, предотвращение «завала» краев образцов, необходимую ориентацию, удобную маркировку и хранение образцов. После запрессовки образцы шлифовали и полировали на установке для шлифования образцов. Процесс шлифования осуществляли по режиму для никелевых сплавов – использовали суспензии с различным размером абразивных частиц: 9; 3 и 1 мкм. После каждого этапа шлифования и полирования образцы и установку промывали для удаления частиц металла, которые могли оставить риски на поверхности микрошлифа.

Микроструктурные исследования с определением химического состава некоторых областей образцов 1 и 2 из сплава ЖС32 и образца лигатуры проводили на растровом электронном микроскопе. Принцип работы микроскопа заключается в сканировании участка образца узким электронным зондом и фиксировании возникающих при этом сигналов.

Рентгенофазовый анализ образца лигатуры проведен на рентгеновском дифрактометре Emprean фирмы Panalytical в монохроматическом  $Cu K_\alpha$ -излучении в геометрии параллельного пучка. Расшифровка дифрактограммы проведена с применением специализированной программы Highscore+ и базы данных PDF-2 2014. Определены межплоскостные расстояния и интенсивности экспериментально полученных рефлексов. Предварительный отбор фаз, которые, возможно, присутствуют в исследуемом образце, проведен на основании результатов МРСА.

### Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований на растровом электронном микроскопе установлено, что микроструктуры образцов 1 и 2 из жаропрочного никелевого сплава ЖС32 не различаются и представлены матрицей из  $\gamma$ -твердого раствора (рис. 3, а) с распределенной в ней эвтектикой и карбидами (рис. 3, б). Формирование данной литой

микроструктуры начинается при кристаллизации с образованием в небольшом интервале температур кристаллов  $\gamma$ -твердого раствора в виде дендритных ветвей. Затем, параллельно с процессом затвердевания жидкости междендритных областей, образуются монокарбиды типа MC. Формирование литой структуры жаропрочного никелевого сплава заканчивается кристаллизацией фаз эвтектического происхождения.

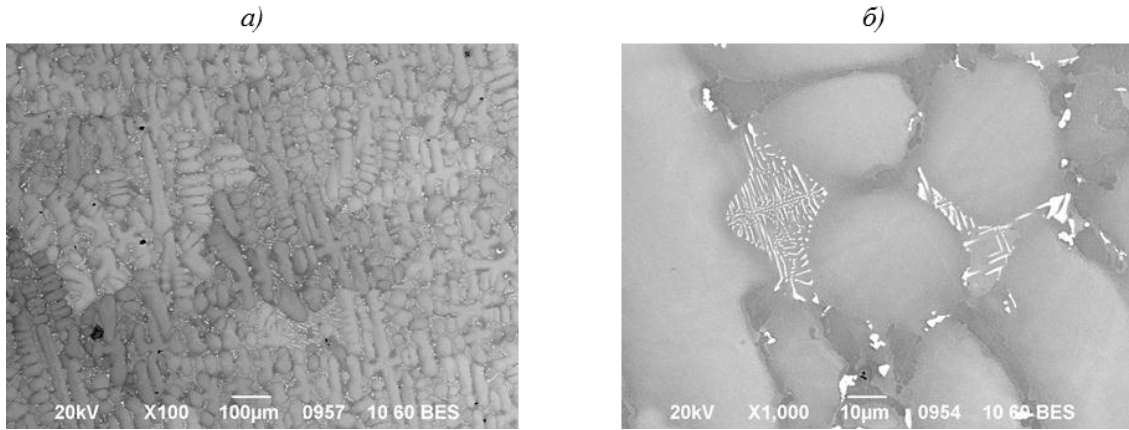


Рис. 3. Микроструктура образца 2 с 0,35% (по массе) Si (а) и карбиды в сплаве ЖС32 (б)

Локальное исследование химического состава на растровом электронном микроскопе показало, что в обоих образцах примеси располагаются вблизи и внутри пор металла. На рис. 4, а представлена микроструктура образца 1 из сплава ЖС32 с порой вблизи карбидной фазы со следующим химическим составом, % (по массе):

| C     | O     | Mg   | Al   | Si   | S    | Ca   | Cr   | Co   | Ni    | Sr   | Ta   |
|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|
| 15,30 | 12,89 | 1,12 | 4,46 | 2,05 | 2,62 | 3,30 | 3,40 | 6,32 | 37,79 | 5,22 | 5,52 |

В данном дефекте наблюдаются такие примеси, как кремний, сера, а также кислород, причем последний в достаточно большом количестве, что свидетельствует о том, что присутствуют оксиды, которые обладают повышенной хрупкостью и усиливают эффект поры в качестве концентратора напряжений.

Скопление примесей найдено и в других областях материала. На рис. 4, б представлена микроструктура образца 1 с трещиновидным дефектом, в котором присутствуют следующие примеси, % (по массе): 5,81 O и 3,21 Si.

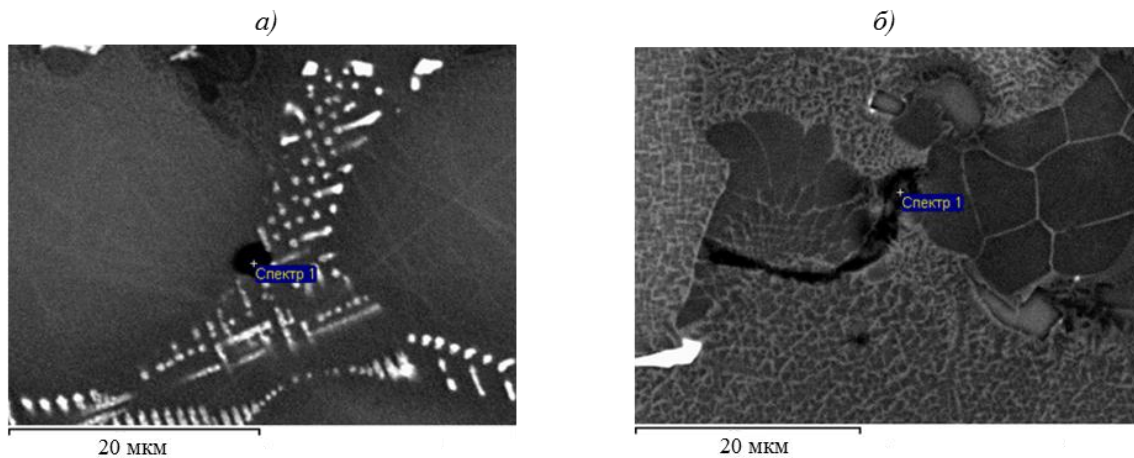


Рис. 4. Пора вблизи карбидной фазы (а) и трещиновидный дефект (б) в образце 1 из сплава ЖС32 с 0,15% (по массе) Si

При исследовании образца 2 установлено, что примеси, также как и в образце 1, располагаются вблизи и внутри пор металла. При этом поры и другие дефекты локализуются вблизи скоплений добавленного иттрия, что подтверждено локальным исследованием химического состава. На рис. 5, а представлен один из таких дефектов, имеющий следующий химический состав, % (по массе):

| C     | O    | Al   | Si   | Sc   | Cr   | Co   | Ni    | Y    |
|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| 14,99 | 3,96 | 1,72 | 7,17 | 3,08 | 1,62 | 5,17 | 55,40 | 6,88 |

Обнаружен и дефект в виде трещины в иттриевом скоплении (рис. 5, б), имеющий следующий химический состав, % (по массе):

| Al   | Si   | Sc   | Cr   | Co   | Ni    | Y     |
|------|------|------|------|------|-------|-------|
| 2,20 | 4,28 | 2,58 | 1,83 | 5,70 | 67,94 | 15,46 |

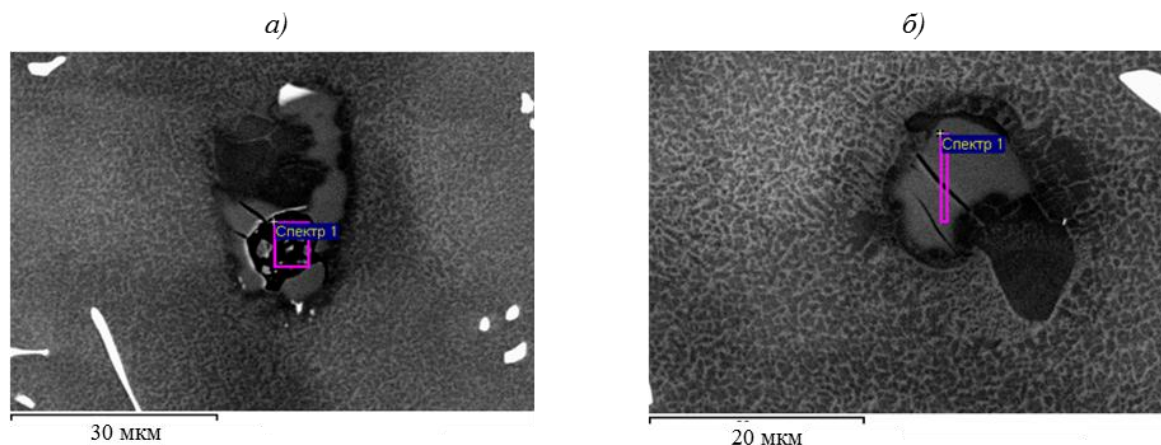


Рис. 5. Дефект с примесями вблизи скоплений иттрия (а) и трещина в скоплении иттрия (б) в образце 2 из сплава ЖС32 с 0,35% (по массе) Si

Ранее показано, что иттрий при взаимодействии с кремнием способен создавать тугоплавкое соединение  $Y_5Si_3$ , температура плавления которого  $\sim 2600^\circ C$ . Ввиду сложности выполнения рентгенофазового анализа монокристаллов сплава ЖС32 проведено рентгенофазовое изучение лигатуры иттрия с кремнием на наличие тугоплавких соединений.

Исследование на растровом электронном микроскопе показало, что, помимо твердого раствора на основе алюминия, в образце присутствуют еще три фазы со следующим соотношением компонентов:  $2Al-2Si-Y$ ,  $Al-2Si-2Y$  и  $4,5Al-3Si-2,5Y$ . Установлен локальный химический состав данных фаз (рис. 6).

Наличие в микроструктуре области, которая практически полностью состоит из алюминия, объясняется тем, что в процессе выплавки алюминий из материала тигля попал в лигатуру. Остальные области также содержат алюминий, но в небольшом количестве.

Для выявления фазы в образце лигатуры на основе  $Y_5Si_3$  проведено рентгенофазовое исследование. Поверхность образца неровная, поэтому применена геометрия параллельного пучка, что привело к уширению рентгеновских рефлексов. Для регистрации дифракционной картины выбрана наименее искривленная область образца. На дифрактограмме (рис. 7) присутствует большое количество рефлексов, поэтому множество штрих-диаграмм интерметаллидов из базы данных PDF-2 2014 совпадает с полученным рентгеновским спектром. Отбор фаз проведен на основе результатов МРСА и из соображений минимально необходимого количества фаз для полного описания рентгеновского спектра. Таким образом, установлено, что в материале присутствуют следующие фазы:  $Al_2Si_2Y$ ,  $Al_3Si_2Y_2$ ,  $Y_2AlSi_2$ , Al,  $Al_3Y$ . Несмотря на большое количество рефлексов на дифрактограмме, штрих-диаграммы интерметаллида  $Y_5Si_3$  из базы данных PDF-2 2014 не совпадают с полученным спектром, поэтому сделан вывод

об отсутствии соединения  $Y_5Si_3$  в структуре исследуемого образца. Полученные фазы, содержащие кремний, не являются тугоплавкими, а следовательно, не способны нейтрализовать его или же отфильтроваться в процессе очистки.

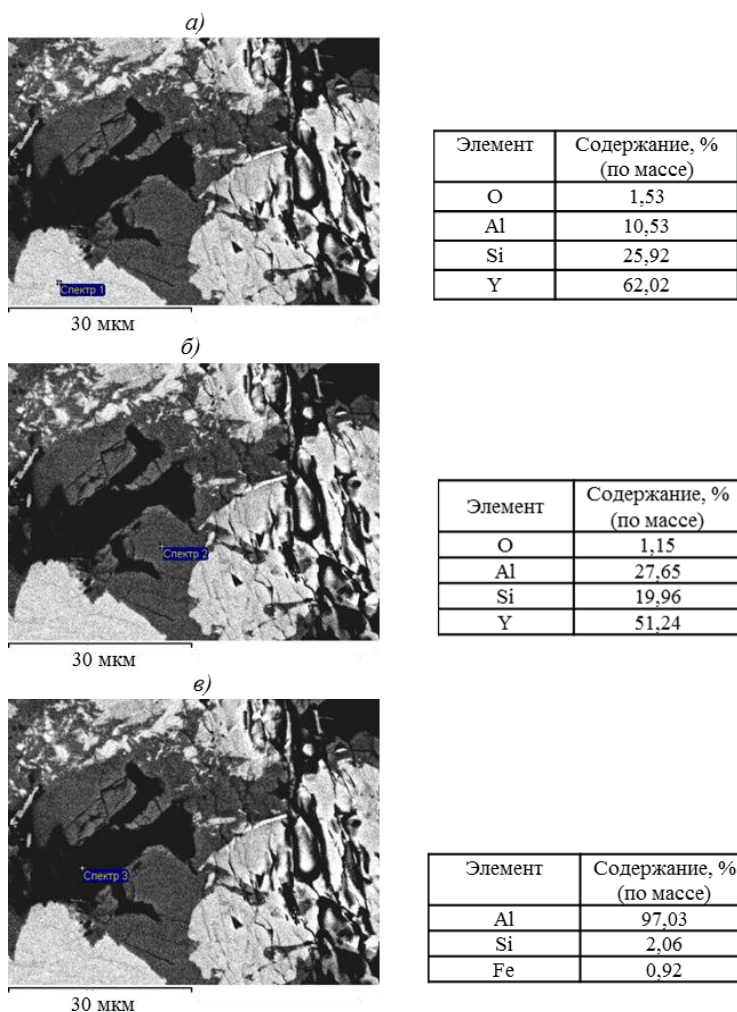


Рис. 6. Микроструктура и локальный химический состав некоторых фаз:  
*а* – светло-серая область; *б* – темно-серая область; *в* – черная область

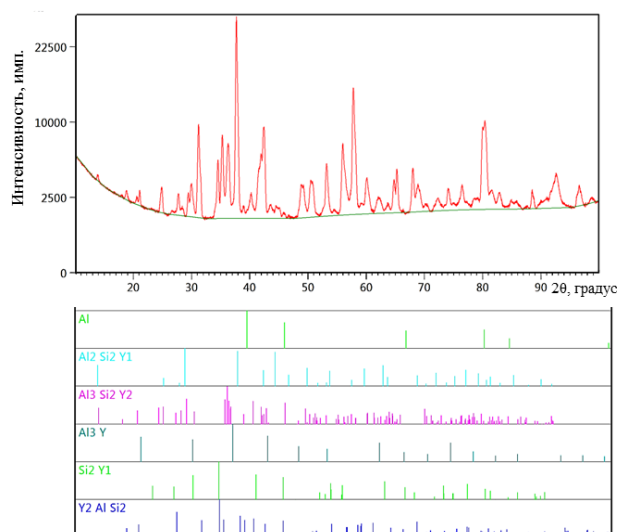


Рис. 7. Результаты фазового анализа образца лигатуры на основе  $Y_5Si_3$

## Заключения

1. По результатам растровой электронной микроскопии показано, что микроструктуры образцов 1 и 2 из жаропрочного никелевого сплава марки ЖС32 с различным содержанием кремния представлены эвтектикой и карбидами в виде белых ветвей. Содержание кремния на микроструктуру не влияет.

2. Изучение локального химического состава образца 1 из жаропрочного никелевого сплава с 0,15% (по массе) Si позволило установить, что такие примеси, как кислород, сера и кремний преимущественно располагаются вблизи и внутри пор металла. В образце 2 с 0,32% (по массе) Si вышеперечисленные примеси концентрируются в основном около дефектов (пор, микротрещин) и скоплений иттрия, что предполагает наличие соединений кремния с иттрием.

3. Микроструктура образца лигатуры на основе соединения  $Y_5Si_3$  представлена тремя фазами. Проведено исследование локального химического состава данных фаз. Установлено, что две фазы содержат алюминий в небольшом количестве, а третья – практически полностью состоит из алюминия, что объясняется проведением выплавки лигатуры в тигле из оксида алюминия.

4. Рентгенофазовый анализ образца лигатуры показал, что в образце присутствуют пять фаз, три из которых содержат кремний, а именно:  $Al_2Si_2Y$ ,  $Al_3Si_2Y_2$ ,  $Y_2AlSi_2$ . Исходя из того, что данные фазы представляют собой тройные соединения и содержат легкоплавкий алюминий, можно сделать вывод о том, что температуры плавления данных фаз невысокие, а значит, они не являются годными для процессов фильтрации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 23–47.
2. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники // 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007. М.: ВИАМ, 2007. С. 20–26.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. №4. С. 28–29.
4. 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. 36–52.
5. Арзамасов В.Б., Волчков А.Н., Головин В.А. и др. Материаловедение и технология конструкционных материалов. М.: Академия, 2007. 538 с.
6. Стоякина Е.А., Дягтерева А.Г. Механизм удаления серы и фосфора из стали У8 фильтрацией расплава через пенокерамику // Политехнический молодежный журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. №12. С. 37–40.
7. Смирнов Л.А., Ровнушкин В.А., Орыщенко А.С., Калинин Г.Ю., Миллюц В.Г. Модифицирование стали и сплавов редкоземельными элементами. Сообщение 1 // Металлург. 2015. №11. С. 57–63.
8. Голубовский Е.Р., Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Черкасова С.А., Волков М.Е. Малоцикловая усталость монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов при повышенных температурах // Деформация и разрушение материалов. 2009. №8. С. 41–48.
9. Петрушин Н.В., Елютин Е.С., Чабина Е.Б., Тимофеева О.Б. О фазовых и структурных превращениях в жаропрочных ренийсодержащих сплавах монокристаллического строения // Литейное производство. 2008. №7. С. 2–6.
10. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД // Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 6–16.
11. 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.
12. Морозова Г.И. Закономерность формирования химического состава  $\gamma'/\gamma$ -матрицы многокомпонентных никелевых сплавов // ДАН СССР. 1991. Т. 320. №6. С. 1413–1416.
  13. 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.
  14. 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.
  15. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Пучков Ю.А. Особенности диффузионного поведения примесей и рафинирующих добавок в никеле и монокристаллических жаропрочных сплавах // Авиационные материалы и технологии. 2016. №1 (40). С. 24–31. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-1-24-31.
  16. 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: 13.08.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-2-2.
  17. Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г., Пучков Ю.А. Влияние поверхностно-активных примесей и добавки лантана на структуру и свойства монокристаллического жаропрочного никелевого сплава ЖС36 // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. №4 (52). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.08.2018). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-2-2.
  18. 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.
  19. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1997. 336 с.