

УДК 669.018.44:669.245

Р.М. Назаркин¹, В.Г. Колодочкина¹, О.Г. Оспенникова¹, М.Р. Орлов¹**ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ МОНОКРИСТАЛЛОВ
ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ
В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК**

DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-9-17

Представлены результаты исследований микроструктуры и субструктуры монокристаллических рабочих лопаток турбины высокого давления из литейных жаропрочных никелевых сплавов ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ в процессе длительных ресурсных испытаний газотурбинных двигателей. Показано, что выделение частиц избыточных фаз, обогащенных тугоплавкими элементами, в сплаве в процессе высокотемпературных испытаний сопровождается уменьшением параметра кристаллической решетки γ -твердого раствора, что подтверждается данными рентгеновского структурного анализа, рентгеноспектрального микроанализа и растровой электронной микроскопии. Выдвинуто предположение, что уменьшение степени легирования γ -твердого раствора в результате выделения фаз, богатых тугоплавкими элементами, может приводить к падению жаропрочности материала. Кроме того, данные фазы могут оказывать негативное влияние на механические характеристики сплавов из-за локального охрупчивания материала в зоне их возникновения.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 2.1. «Фундаментально-ориентированные исследования» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

Ключевые слова: монокристаллический жаропрочный никелевый сплав, растровая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, рентгеноструктурный фазовый анализ, γ -твердый раствор, упрочняющая γ' -фаза, несоответствие параметров кристаллических решеток (мисфит), избыточные фазы, ТПУ фазы, «рафт»-структура, монокарбиды, термоусталостные трещины.

The research results of microstructure and substructure of the single-crystal rotor blades from cast Ni-based superalloys ZhS26-VI and ZhS32-VI in process of long-time life cycle testing of gas turbine engine (high-pressure turbine) are presented. It is shown that precipitation of excess phases particles enriched by refractory elements in the alloy during high-temperature testing is accompanied with the γ -solid solution crystal lattice constant decreasing which is confirmed by x-ray diffraction analysis, x-ray spectrum analysis and scanning electron microscopy. The theory is proposed that decreasing the concentration level of the γ -solid solution as result of TCP phases precipitation rich with the refractory elements may lead to falling of high-temperature strength of material. Besides these phases have negative influence on mechanical properties of alloy because of the local embrittling effect of the material in the zone they arise.

The work is executed within the implementation of the complex scientific direction 2.1. «Fundamentally oriented researches» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].

Keywords: single crystal superalloy, scanning electron microscopy, x-ray microanalysis, Ni-based superalloy, x-ray phase diffraction analysis, crystal lattice constants, lattice misfit, γ -solid solution, strengthened γ' -phase, excess phases, TCP phases, raft structure, monocarbides, thermo-fatigue cracks.

¹Федеральное 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

Технические характеристики авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) современных летательных аппаратов во многом обусловлены работоспособностью лопаток ротора турбины высокого давления (ТВД) в условиях частых смен температурных режимов и нагрузок, а также периодических забросов температуры газового потока, поступающего на рабочие лопатки ротора турбины из камеры сгорания.

Проблема увеличения длительной прочности и других эксплуатационных характеристик рабочих лопаток ТВД в тяжелых температурно-силовых условиях решается специалистами ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ в соответствии со Стратегическими направлениями развития материалов и технологий [1–3], ориентированными на обеспечение безопасности [4] и конкурентоспособности российской авиационной техники. В ВИАМ также ведутся исследования и разработка

новых литейных жаропрочных сплавов для деталей турбины ГТД на основе никеля [5–7] и новых жаростойких и теплозащитных покрытий для деталей горячего тракта ГТД [2, 8].

Высокая анизотропия механических свойств монокристаллических жаропрочных сплавов на основе никеля [9–11] и значительное различие упругих, прочностных, пластических и теплофизических характеристик литейных жаропрочных сплавов, жаростойких интерметаллидных и теплозащитных керамических покрытий предопределили смену традиционных подходов к задачам разработки конструкций литых охлаждаемых рабочих лопаток ТВД. В связи с вышеуказанными проблемами создание литых охлаждаемых монокристаллических лопаток ТВД двигателя V поколения неразрывно связано с процессом конструирования лопаток с применением технологии современного производства. Химический и фазовый состав жаропрочных материалов – основной фактор, определяющий свойства изделий для работы в условиях высоких температур и переменных механических нагрузок [12, 13].

Оценка точности расчета запасов статической и динамической прочности рабочих лопаток ГТД и назначенного ресурса двигателя доказывается данными стендовых испытаний и, кроме того, последующими всесторонними исследованиями структуры и свойств конструкционных материалов и функциональных покрытий, входящих в состав лопаток [14–18].

Задача данной работы – исследование необратимых изменений в структурном состоянии рабочих лопаток из литейных никелевых жаропроч-

ных сплавов ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ. Для этого проведены длительные стендовые испытания ГТД, имитирующие условия эксплуатации авиационного двигателя.

Материалы и методы

Структуру монокристаллических лопаток ротора турбины высокого давления авиационных газотурбинных двигателей из литейных никелевых жаропрочных сплавов ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ исследовали как после полного цикла изготовления лопаток (включая термическую обработку), так и после длительных ресурсных испытаний газотурбинного двигателя.

Анализ структурных изменений и повреждений монокристаллических лопаток из никелевых жаропрочных сплавов выполняли в наиболее горячем сечении пера лопатки в сравнении со структурой сплава в хвостовиках лопаток. Общий вид рабочей лопатки с указанием сечения, в котором проводилось детальное исследование микро- и субструктуры, и схемой распределения температур при крейсерском режиме работы ГТД представлен на рис. 1.

Исследование микроструктуры и химического состава фаз выполнили на металлографических шлифах после пробоподготовки на комплексе Struers: резки, механического шлифования и полирования образцов, электрохимического травления в насыщенном растворе хромового ангидрида в ортофосфорной кислоте. Типичная микроструктура входной кромки рабочей лопатки ГТД приведена на рис. 2.

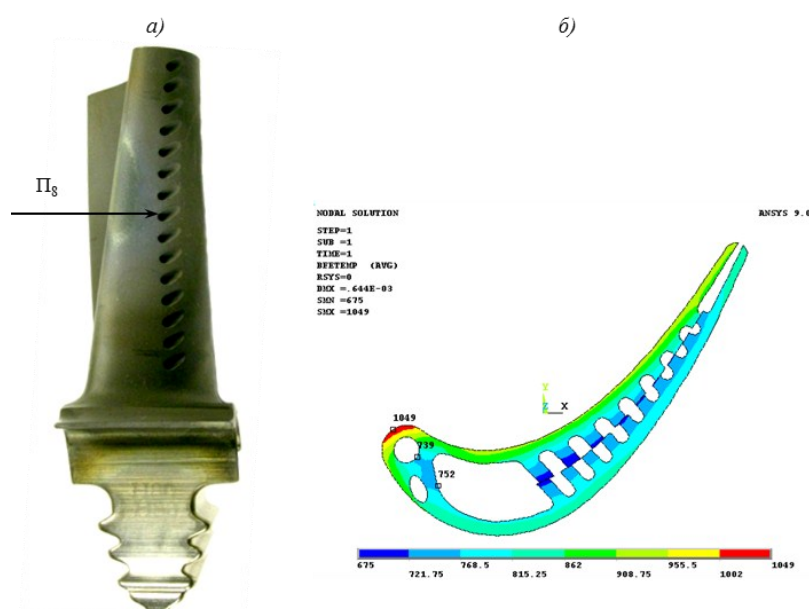


Рис. 1. Рабочая лопатка турбины высокого давления ГТД:

a – общий вид со стороны входной кромки; стрелкой указано положение восьмого перфорационного отверстия, соответствующего зоне наиболее горячего сечения пера лопатки; *б* – распределение температур в сечении восьмого перфорационного отверстия пера лопатки при крейсерском режиме работы ГТД

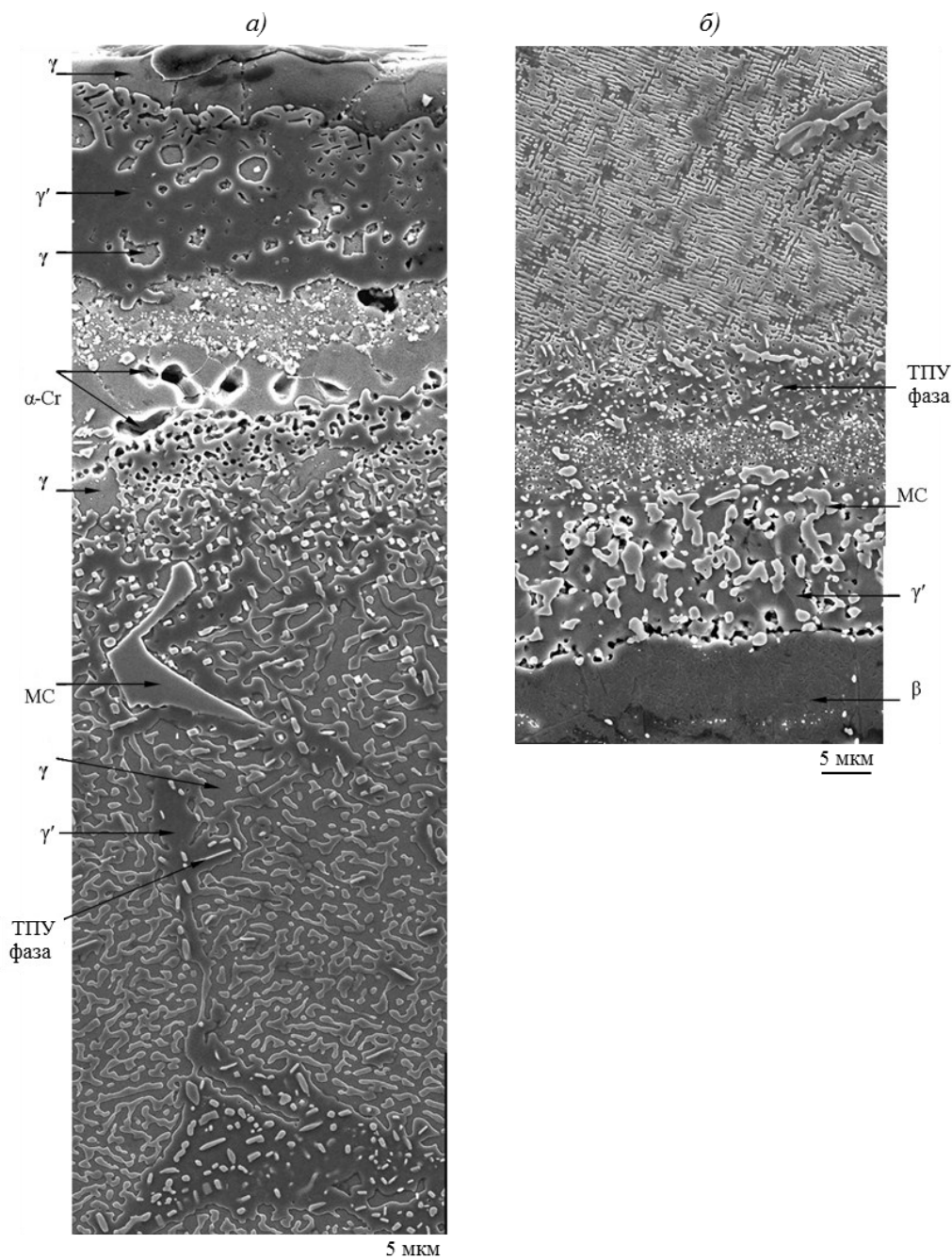


Рис. 2. Микроструктура входной кромки рабочей лопатки турбины высокого давления (сплав ЖС32-ВИ) в сечении восьмого перфорационного отверстия:

a – участок входной кромки со стороны проточной поверхности; *б* – участок входной кромки со стороны охлаждаемого канала

Анализ микроструктур никелевых жаропрочных сплавов ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на электронном микроскопе в режимах отраженных электронов и вторичных электронов. Полуколичественное определение локального состава фаз выполнили с помощью системы энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) INCA X-sight.

Определение параметров кристаллических решеток γ -твердого раствора на основе никеля и γ' -интерметаллидной фазы на основе соединения Ni_3Al на образцах из монокристаллического жаропрочного сплава ЖС32-ВИ выполнили методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на рентгеновском дифрактометре общего назначения ДРОН-4. Съемка рентгенограмм для определения параметров кристаллических решеток

γ - и γ' -фаз и их размерного несоответствия (мисфита) проведена в Fe K_{α} -излучении (использовался графитовый кристалл-монокроматор на дифрагированном пучке). Несответствие параметров кристаллических решеток (мисфит) фаз определяли по формуле:

$$\delta = \frac{(a_{\gamma} - a_{\gamma'})}{a_{\gamma}} \cdot 100\%,$$

где a_{γ} – параметр кристаллической решетки γ -твердого раствора; $a_{\gamma'}$ – параметр кристаллической решетки интерметаллидной γ' -фазы.

Методика рентгеновского структурного анализа монокристаллических никелевых жаропрочных сплавов с использованием пакета программ «X-Ray» для записи и анализа рентгенограмм подробно описана в работах [16, 17].

Результаты

Исследование микроструктуры литейного монокристаллического никелевого жаропрочного сплава ЖС32-ВИ после проведения длительных (порядка нескольких тысяч часов) высокотемпературных испытаний в условиях, приближенных к эксплуатационным, методами РЭМ выявило значимые отличия, несмотря на то, что частицы γ' -фазы (когерентносопряженные с γ -матричной фазой) сохранили форму, близкую к кубической, и внешне почти не изменились по сравнению с исходным состоянием (микроструктура сплава ЖС32-ВИ в исходном состоянии приведена на рис. 3). Однако начавшееся огрубление микроструктуры и частичное слияние частиц γ' -фазы кубической формы заметно на рис. 2: произошло образование пластинчатых выделений избыточной фазы, вероятно ТПУ фазы, в сечении шлифа. Кроме того, происходило образование клиновидных трещин на пластинах выделившейся фазы в процессе высокотемпературной ползучести лопатки из монокристаллического жаропрочного сплава. На рис. 4 представлены трещины в рабочей

лопатке ТВД из сплава ЖС32-ВИ, образовавшиеся по механизму термомеханической усталости.

Образовавшиеся в жаропрочных сплавах ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ пластины избыточной ТПУ фазы исследовали с помощью энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). На рис. 5 приведены изображения пластин ТПУ фазы в сечении шлифа и в статическом изломе рабочей лопатки турбины высокого давления из монокристаллического жаропрочного никелевого сплава ЖС26-ВИ после наработки при эксплуатации в течение 7835 ч. Схема выбора зон исследования химического состава γ - и γ' -фаз после высокотемпературной наработки рабочей лопатки турбины высокого давления для сплава ЖС32-ВИ приведена на рис. 6, а; для сплава ЖС26-ВИ – на рис. 6, б. Химический состав избыточной фазы и γ' -фазы для сплава ЖС32-ВИ представлен в табл. 1; для сплава ЖС26-ВИ – в табл. 2.

Помимо исследования микроструктуры лопаток ГТД методами растровой электронной микроскопии (сплавы ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ) и энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа с локальным определением состава выделившейся избыточной фазы и γ' -интерметаллидной фазы (сплавы ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ), для образцов из монокристаллического никелевого жаропрочного сплава ЖС32-ВИ дополнительно проводили рентгеновский структурный анализ для определения параметров частично когерентных кристаллических решеток γ - и γ' -фаз как в исходном состоянии, так и после выдержки при высоких температурах без механического нагружения (хвостовик лопаток), а также после длительных ресурсных испытаний (перо лопаток). Проведенный рентгеновский структурный анализ показал, что происходит устойчивое снижение величины параметра кристаллической решетки γ -твердого раствора после длительных ресурсных испытаний в сравнении с исходным состоянием сплава (после литья и полной термической

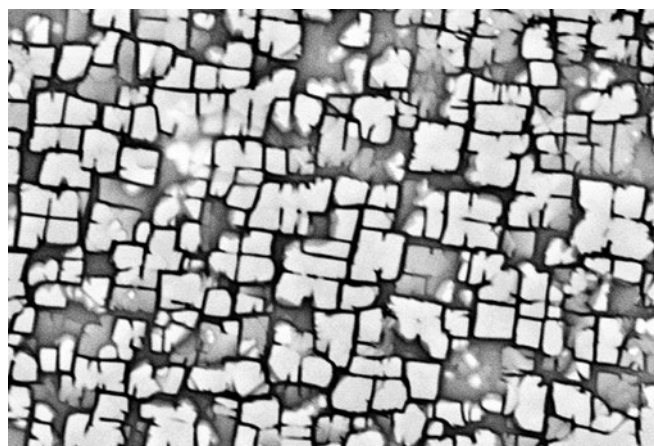


Рис. 3. Микроструктура ($\times 10000$) рабочей лопатки из сплава ЖС32-ВИ (после полной термической обработки)

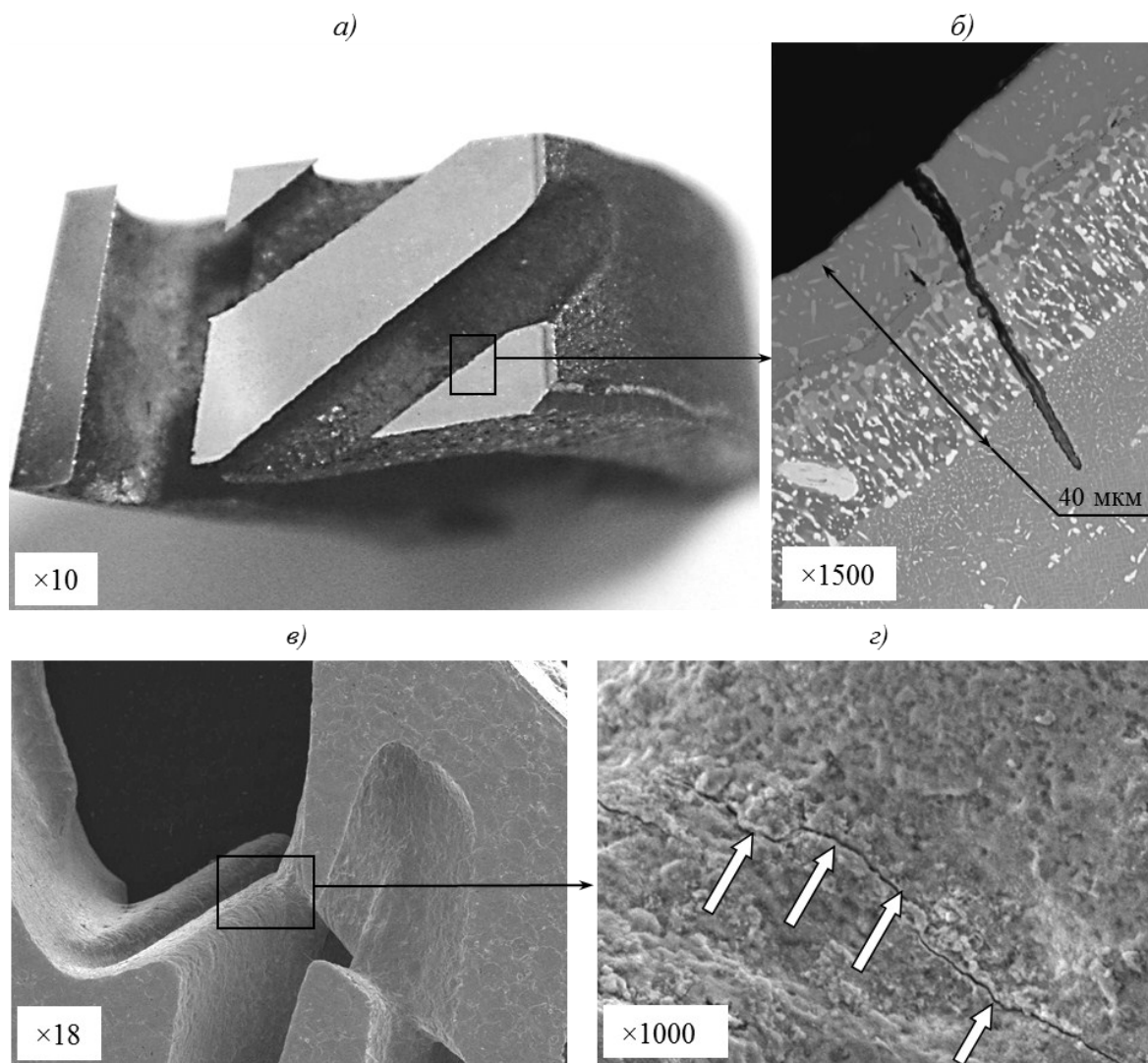


Рис. 4. Трещины в рабочей лопатке турбины высокого давления из сплава ЖС32-ВИ, образовавшиеся по механизму термомеханической усталости:

а – шлиф в плоскости осевого сечения перфорационных каналов; *б* – трещина термомеханической усталости в стенке восьмого перфорационного канала; *в*, *г* – трещина термомеханической усталости в зоне пересечения ребер вихревой матрицы (отмечена белыми стрелками)

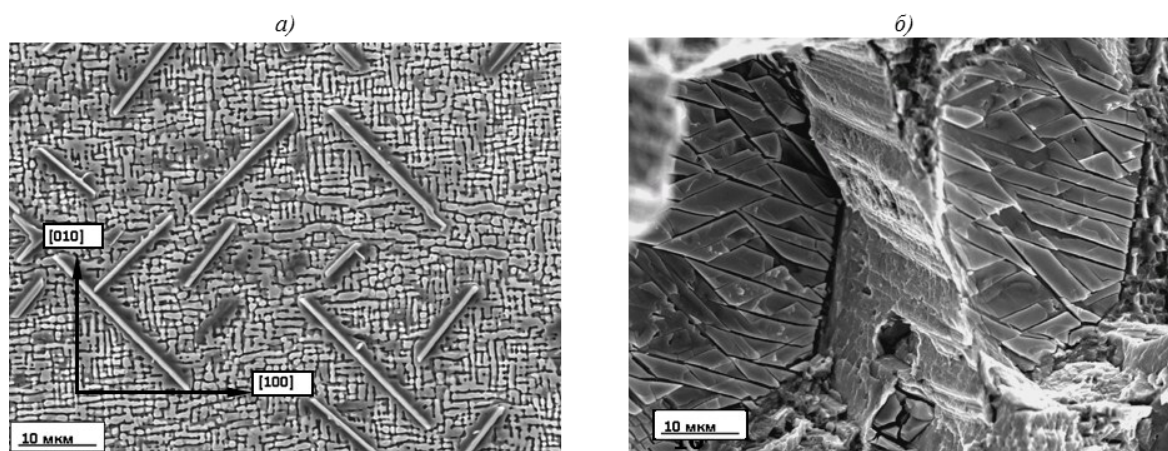


Рис. 5. Пластины избыточной фазы в сечении шлифа и в статическом изломе рабочей лопатки ТВД из монокристаллического никелевого жаропрочного сплава ЖС26-ВИ после наработки при эксплуатации в течение 7835 ч:

а – металлографический шлиф после электрохимического травления (стрелками указаны кристаллографические направления никелевой матрицы сплава); *б* – хрупкое разрушение избыточной фазы при статическом нагружении

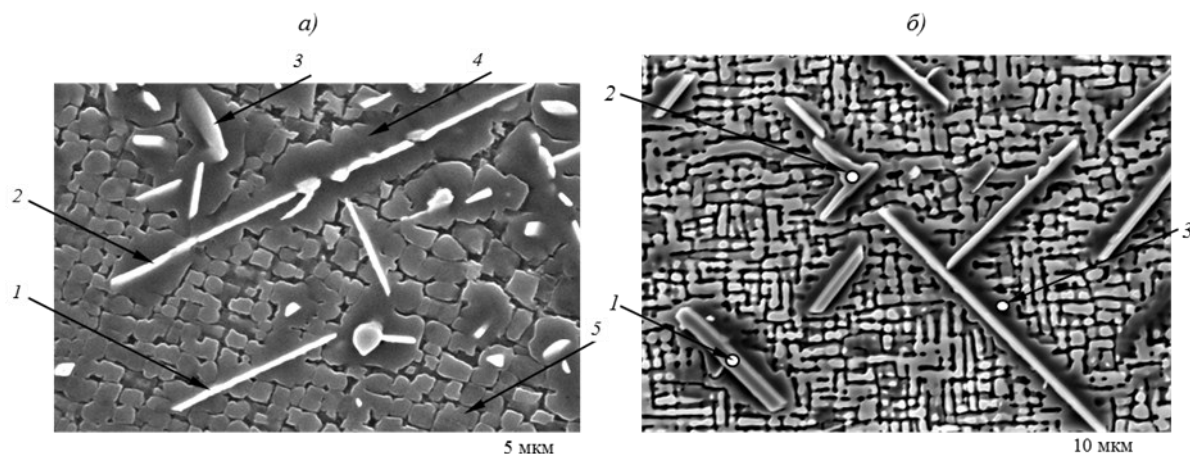


Рис. 6. Структура и состав избыточной и γ' -фаз в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах ЖС32-ВИ (а – см. табл. 1) и ЖС26-ВИ (б – см. табл. 2) для рабочих лопаток турбины высокого давления (стрелками указаны зоны проведения локального рентгеноспектрального микроанализа)

Таблица 1

Химический состав выявленной избыточной фазы и γ' -фазы в литейном монокристаллическом никелевом жаропрочном сплаве ЖС32-ВИ после высокотемпературной наработки рабочей лопатки ТВД

Фаза	Условный номер зоны анализа	Содержание элементов, % (по массе)								
		Al	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	Ta	W	Re
Избыточная	1	2,75	4,02	6,30	35,14	1,05	2,81	2,19	24,28	21,45
	2	3,87	3,96	5,52	32,91	1,00	2,05	3,41	29,46	18,83
	3	2,54	4,99	8,84	33,45	1,20	2,33	3,35	27,84	15,47
γ' -фаза	4	7,19	3,00	8,72	65,03	1,72	0	2,41	10,17	1,77
	5	5,46	7,22	11,55	59,96	1,51	1,20	4,35	7,69	5,57
По ТУ1.92.177-91		5,7-6,2	4,5-5,3	9,0-9,5	Основа	1,4-1,8	0,9-1,3	3,7-4,4	8,1-8,9	3,6-4,3

Таблица 2

Химический состав выявленной избыточной фазы и γ' -фазы в литейном монокристаллическом никелевом жаропрочном сплаве ЖС26-ВИ после высокотемпературной наработки рабочей лопатки ТВД после эксплуатации в течение 7835 ч

Фаза	Условный номер зоны анализа	Содержание элементов, % (по массе)								
		Al	Ti	V	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	W
Избыточная	1	1,36	0,40	1,15	4,24	5,95	22,87	3,70	4,88	55,45
	2	1,20	0,61	1,31	4,44	5,70	19,89	2,65	5,33	58,87
γ' -фаза	3	7,47	1,24	0,92	2,69	7,35	69,65	1,45	0,64	9,60
По ТУ1.92.177-91		5,7-6,2	0,9-1,3	0,8-1,2	4,3-5,3	8,7-9,3	Основа	1,4-1,8	0,8-1,2	11,2-12,0

обработки). Параметр кристаллической решетки интерметаллидной γ' -фазы снижается на малых базах испытаний, однако несколько возрастает на больших базах испытаний. Результаты рентгеновского структурного анализа дополнительно подтверждают данные растровой электронной микроскопии и локального энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа о появле-

нии в сплаве после длительных испытаний новой фазы, некогерентной γ - и γ' -фазам.

На рис. 7 представлены наиболее характерные рентгенограммы моноиндексной рентгеновской линии типа (hhh) –(222), снятые при геометрической дифракции по Брэггу–Брентано в монохроматическом K_{α} -излучении. Рентгенограммы получены как от образцов в исходном состоянии (после

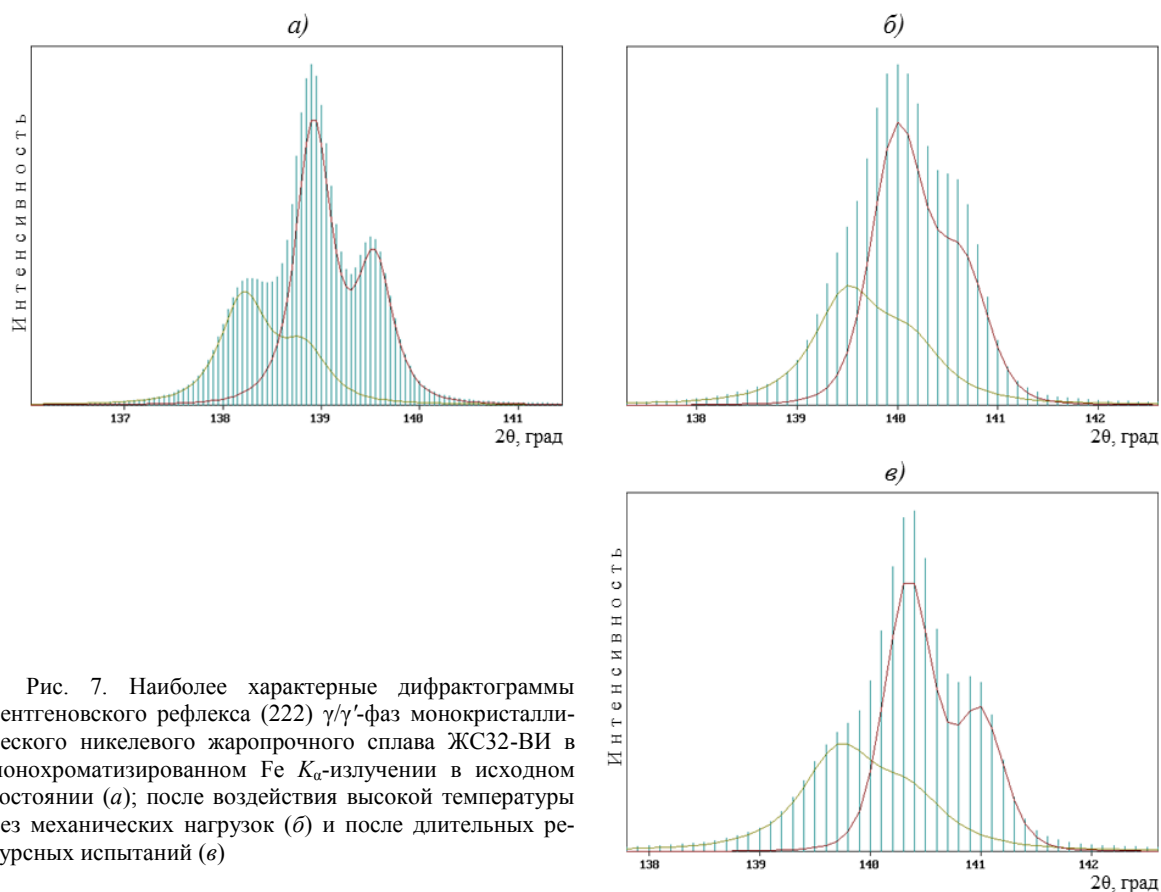


Рис. 7. Наиболее характерные дифрактограммы рентгеновского рефлекса (222) γ/γ' -фаз монокристаллического никелевого жаропрочного сплава ЖС32-ВИ в монохроматизированном $Fe K_{\alpha}$ -излучении в исходном состоянии (а); после воздействия высокой температуры без механических нагрузок (б) и после длительных ресурсных испытаний (в)

Таблица 3

Параметры кристаллических решеток γ - и γ' -фаз и размерное несоответствие параметров кристаллических решеток фаз при различных условиях длительных высокотемпературных испытаний сплава ЖС32-ВИ

Условия испытаний при температуре 1000°C		Параметр кристаллической решетки a , нм		Размерное несоответствие кристаллических решеток (мисфит), %
продолжительность, ч	нагрузка, МПа	γ -твердого раствора	интерметаллидной γ' -фазы	
В исходном состоянии (до проведения стендовых испытаний)		0,3589	0,3579	0,24
400	200	0,3520	0,3568	0,12
	Без нагрузки	0,3521	0,3570	0,07
1800	200	0,3567	0,3592	-0,07
	Без нагрузки	0,3568	0,3590	-0,04
2600	200	0,3572	0,3565	0,20
	Без нагрузки	0,3574	0,3569	0,16

литья и полной термической обработки); а также после воздействия высокой температуры без приложения механических нагрузок (хвостовик лопаток), так и после длительных ресурсных испытаний (перо лопаток). Результаты определения параметров кристаллических решеток γ - и γ' -фаз, а также размерного несоответствия кристаллических решеток фаз (мисфит) представлены в табл. 3.

Обсуждение и заключения

Выделение избыточной фазы после длительных стендовых испытаний лопаток ГТД подтверждается данными растровой электронной микроскопии, где на снимках видны выделения фазы пластинчатой морфологии. Предположительно, исходя из данных рентгеноспектрального микроанализа, обнаруженная фаза может принадлежать к классу топологически плотноупакованных фаз (ТПУ фаз). Данные микроанализа

указывают на химический состав обнаруженной фазы, богатой рением и вольфрамом. Рений не является карбидообразующим элементом – это указывает на то, что выявленная фаза не принадлежит к карбидам тугоплавких металлов. Косвенно о выделении избыточной фазы в процессе длительной эксплуатации никелевого жаропрочного сплава свидетельствуют и данные определения параметров кристаллических решеток γ -твердого раствора и γ' -фазы: значительное снижение параметров кристаллической решетки характерно для γ -фазы. Однако для γ' -фазы на основе соединения Ni_3Al снижение параметра кристаллической решетки с увеличением продолжительности ресурсных испытаний лопаток при высокой температуре менее значимо.

Из результатов проведенных исследований можно сделать вывод, что снижение содержания легирующих элементов в γ -твердом растворе в результате выделения избыточной фазы, богатой тугоплавкими элементами, приводит к обеднению твердого раствора легирующими элементами (особенно вольфрамом и рением), а это может отрицательно сказаться на длительной прочности сплава.

Для проведения окончательной идентификации выделившейся фазы желательнее продол-

жить исследования с использованием методик физико-химического фазового анализа с изолированием частиц ТПУ фазы.

Выделение фазы, некогерентной γ - и γ' -фазам, наиболее вероятно, будет способствовать увеличению внутренних напряжений в сплаве и таким образом приводить к ухудшению прочностных свойств материала.

Исходя из полученных результатов можно дать следующие рекомендации: для того чтобы увеличить продолжительность службы монокристаллических лопаток (ротора турбины высокого давления ГТД) следует оптимизировать химический состав вновь создаваемых жаропрочных сплавов. Необходимо также продолжить совершенствовать режимы эксплуатации высоконагруженных деталей ГТД таким образом, чтобы максимально отсрочить выделение избыточных фаз (ренийсодержащих ТПУ фаз и карбидных фаз) под воздействием механических нагрузок и высоких температур. При этом особое внимание следует уделять недопущению либо, по крайней мере, минимизации работы авиационного двигателя во внестатных режимах с забросами температур газа перед турбиной высокого давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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: 10.18577/2071-9240-2015-0-1-3-33.
2. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 19–36.
3. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения // *Крылья Родины*. 2012. №3–4. С. 34–38.
4. Орлов М.Р. Стратегические направления развития Испытательного центра ФГУП «ВИАМ» // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 387–393.
5. 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.
6. Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Висик Е.М., Рассохина Л.И., Тимофеева О.Б. Жаропрочные никелевые сплавы низкой плотности // *Литейное производство*. 2012. №6. С. 5–11.
7. Каблов Е.Н. Физико-механические и технологические особенности создания жаропрочных сплавов, содержащих рений // *Вестник Московского университета*. Сер. 2: Химия. 2005. Т. 46. №3. С. 155–167.
8. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №5. С. 60–70.
9. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Бронфин М.Б., Алексеев А.А. Особенности монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением // *Металлы*. 2006. №5. С. 47–57.
10. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом // *МиТОМ*. 2002. №7. С. 20–23.
11. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н., Морозова Г.И. Влияние высокоградиентной направленной кристаллизации на структуру и фазовый состав жаропрочного сплава типа Rene-N5 // *МиТОМ*. 1999. №2. С. 15–18.
12. Морозова Г.И. Закономерность формирования химического состава γ/γ' -матрицы многокомпонентных никелевых сплавов // *Доклады Академии наук*. 1991. Т. 320. №6. С. 1413–1416.
13. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В. Компьютерный метод конструирования литейных жаропрочных никелевых сплавов // *Литейные жаропрочные сплавы*. Эффект С.Т. Кишкина: науч.-технич. сб. / под ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука, 2006. С. 56–78.

-
14. Оспенникова О.Г., Орлов М.Р., Колодочкина В.Г., Назаркин Р.М. Структурные изменения и повреждение монокристаллических рабочих лопаток турбины в процессе ресурсных испытаний авиационного газотурбинного двигателя // Деформация и разрушение материалов. 2014. №8. С. 22–29.
 15. Орлов М.Р., Якимова М.С., Летов А.Ф. Анализ работоспособности монокристаллических лопаток турбины высокого давления в составе наземных газотурбинных установок // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 399–407
 16. Самойлов А.И., Назаркин Р.М., Моисеева Н.С. Определение мисфита во фрагментированных монокристаллах никелевых жаропрочных сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №5. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 11.01.2016).
 17. Самойлов А.И., Назаркин Р.М., Моисеева Н.С. Мисфит как источник и критерий работоспособности жаропрочных никелевых сплавов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. №6. С. 33–36.
 18. Каблов Е.Н., Орлов М.Р., Оспенникова О.Г. Механизмы образования пористости в монокристаллических лопатках турбины и кинетика ее устранения при горячем изостатическом прессовании // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 117–129.