

УДК 620.179:669.018.44:669.245

*Р.М. Назаркин<sup>1</sup>, В.Г. Колодочкина<sup>1</sup>, О.Г. Оспенникова<sup>1</sup>, М.Р. Орлов<sup>1</sup>***НЕОБРАТИМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ  
МОНОКРИСТАЛЛОВ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ  
В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТУРБИНЫХ ЛОПАТОК**

DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-3-3

*Представлены результаты исследований микро- и субструктуры монокристаллических рабочих лопаток турбины высокого давления из литейного жаропрочного никелевого сплава ЖС32-ВИ в процессе длительных ресурсных испытаний газотурбинного двигателя. Показано, что выделение частиц ТПУ фаз в сплаве в процессе высокотемпературных испытаний сопровождается уменьшением параметра кристаллической решетки  $\gamma$ -твердого раствора, что подтверждается данными рентгеновского структурного, рентгеноспектрального микроанализа и растровой электронной микроскопии. Выдвинуто положение, что уменьшение степени легирования  $\gamma$ -твердого раствора в результате выделения ТПУ фаз, богатых тугоплавкими элементами, приводит к падению жаропрочности материала. Кроме того, ТПУ фазы оказывают негативное влияние на механические характеристики сплава из-за локального нарушения когерентности межфазных границ в зоне их возникновения.*

**Ключевые слова:** монокристаллический жаропрочный никелевый сплав, растровая электронная микроскопия, рентгеноспектральный микроанализ, рентгеноструктурный фазовый анализ,  $\gamma$ -твердый раствор, упрочняющая  $\gamma'$ -фаза, мисфит, ТПУ фазы, «рафт»-структура, монокарбиды, термоусталостные трещины.

*The results of researches of single-crystal rotor blades from cast Ni-based superalloy ZhS32-VI in process of long-time life cycle testing of gas turbine engine (high-pressure turbine) are represented for microstructure and substructure. It is shown that precipitation of TCP-phases particles in the alloy during high-temperature testing is accompanied by the decreasing of crystal lattice constant of  $\gamma$ -solid solution. It is verified by data of x-ray diffraction analysis, x-Ray microanalysis and scanning electron microscopy. The point is proposed that decreasing of alloying element content in the  $\gamma$ -solid solution as result of TCP-phases precipitation (rich with the refractory elements) leads to the fall of the high-temperature resistance of the material. Also, a TCP-phases make negative influence on mechanical properties of the alloy due to the local destruction of coherency for interphase boundaries in zone of development of TCP-phases particles.*

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

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Технические характеристики авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) современных летательных аппаратов во многом обусловлены работоспособностью лопаток ротора ГТД (турбины высокого давления – ТВД) в условиях частых смен темпера-

турных режимов и нагрузок, а также периодических забросов по температуре газового потока, поступающего на рабочие лопатки ТВД.

Проблема увеличения длительной прочности и других эксплуатационных характеристик рабочих лопаток ТВД в тяжелых температурно-силовых условиях решается специалистами ВИАМ 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 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 для двигателей пятого поколения неразрывно связано с процессом конструирования лопаток по 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].

### Материалы и методы

Структуру монокристаллических лопаток ротора ТВД из литейного никелевого жаропрочного сплава ЖС32-ВИ исследовали как после полного цикла изготовления лопаток, так и после длительных ресурсных испытаний газотурбинного двигателя.

Анализ структурных изменений и повреждений никелевого жаропрочного сплава выполнили в наиболее горячем сечении пера лопатки в сравнении со структурой сплава в хвостовике лопатки. Общий вид рабочей лопатки с указанием сечения, в котором проводилось детальное исследование микро- и субструктуры, и схемой распределения температур на крейсерском режиме работы ГТД представлен на рис. 1.



Рис. 1. Рабочая лопатка турбины высокого давления ГТД (общий вид со стороны входной кромки; стрелкой указано положение восьмого перфорационного отверстия)

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

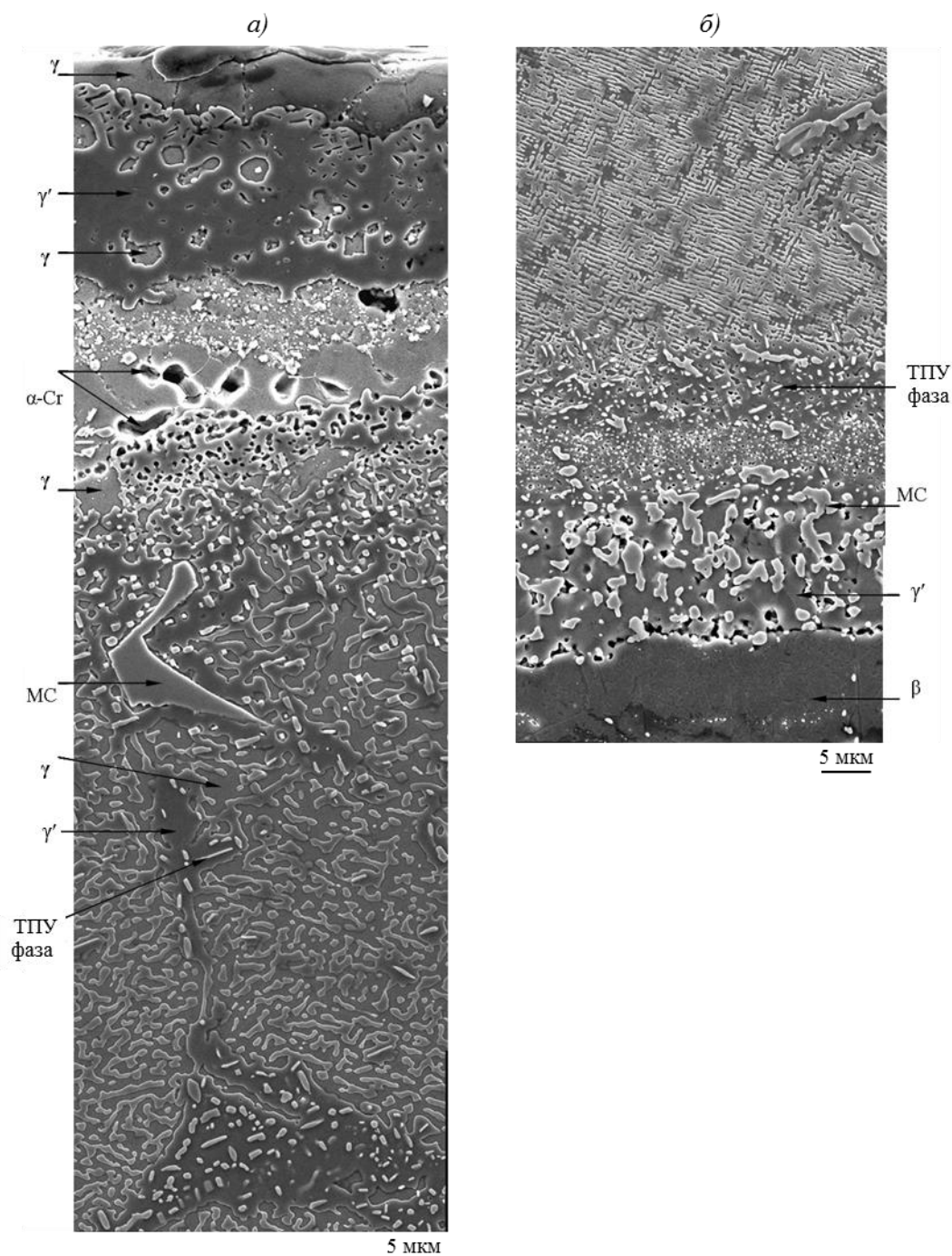


Рис. 2. Микроструктура входной кромки рабочей лопатки ТВД в сечении восьмого перфорационного отверстия

Анализ микроструктуры никелевого жаропрочного сплава проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на электронном микроскопе JSM-6490LV в режимах отраженных электронов и вторичных электронов. Определение локального состава фаз выполнили с помощью системы энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) INCA x-sight.

Определение параметров кристаллических решеток  $\gamma$ -твердого раствора на основе никеля и  $\gamma'$ -фазы на основе соединения  $\text{Ni}_3\text{Al}$  на образцах из монокристаллического жаропрочного сплава ЖС32-ВИ выполнили методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4. Съемка рентгеновской дифрактограммы для прецизионного определения параметров кристаллических решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз и их размерного несоответствия (мисфита) проведена в монокроматическом  $\text{Fe } K_\alpha$ -излучении. Методика рентгеновского структурного анализа монокристаллов жаропрочных сплавов подробно описана в работах [16, 17].

### Результаты

Исследование микроструктуры монокристаллического никелевого жаропрочного сплава после длительной высокотемпературной наработки в эксплуатационных условиях (порядка нескольких тысяч часов) методами РЭМ показало следующие значимые отличия: несмотря на то, что частицы  $\gamma'$ -фазы (когерентно сопряженные с  $\gamma$ -матричной фазой) сохранили кубоидную форму и внешне почти не изменились по сравнению с исходным состоянием (однако начавшееся огрубление микроструктуры и частичное слияние кубоидных частиц  $\gamma'$ -фазы заметно на фотографии), произошло образование пластинчатых выделений ТПУ фазы. На рис. 3 представлены трещины в рабочей лопатке ТВД, образовавшиеся по механизму термомеханической усталости.

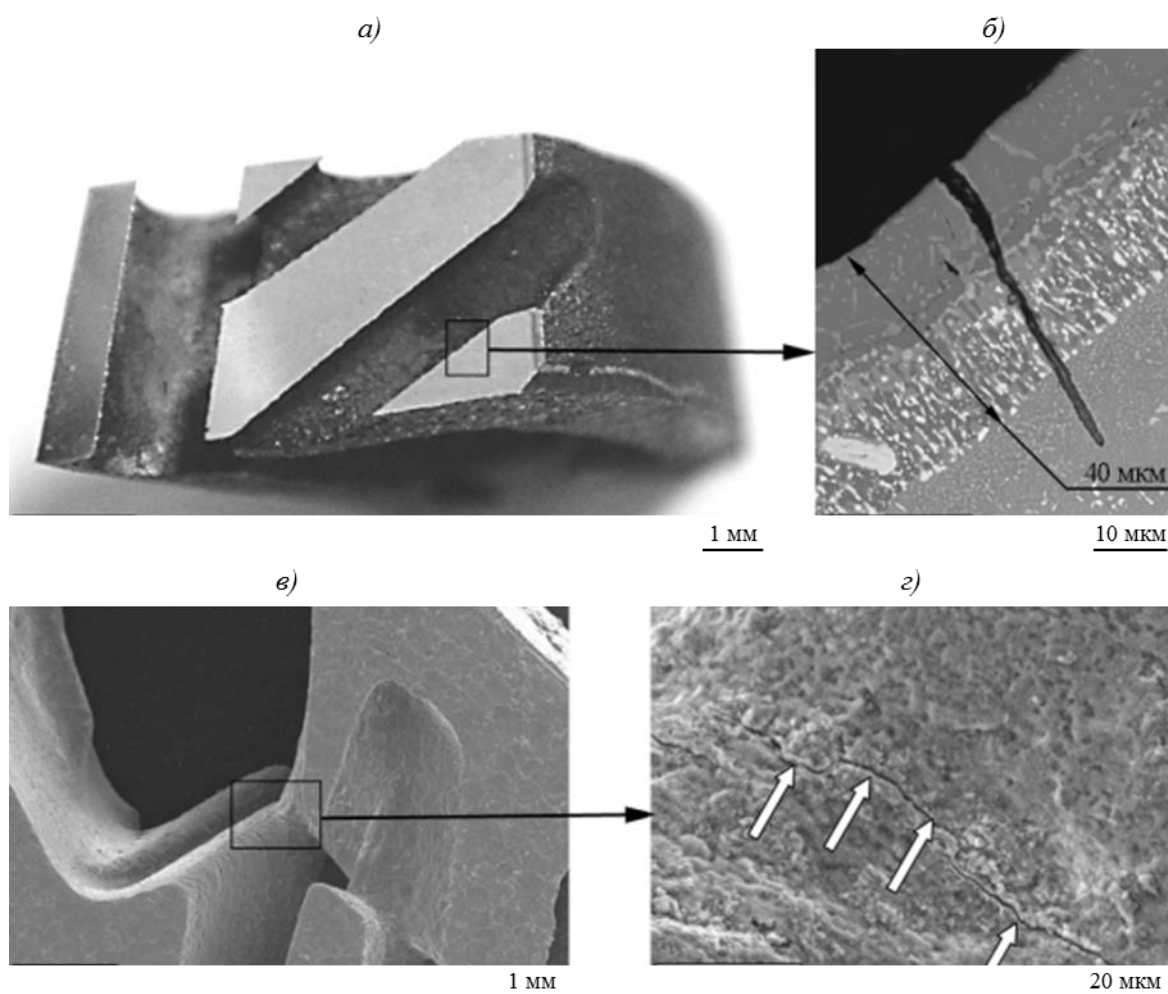


Рис. 3. Трещины в рабочей лопатке ТВД, образовавшиеся по механизму термомеханической усталости

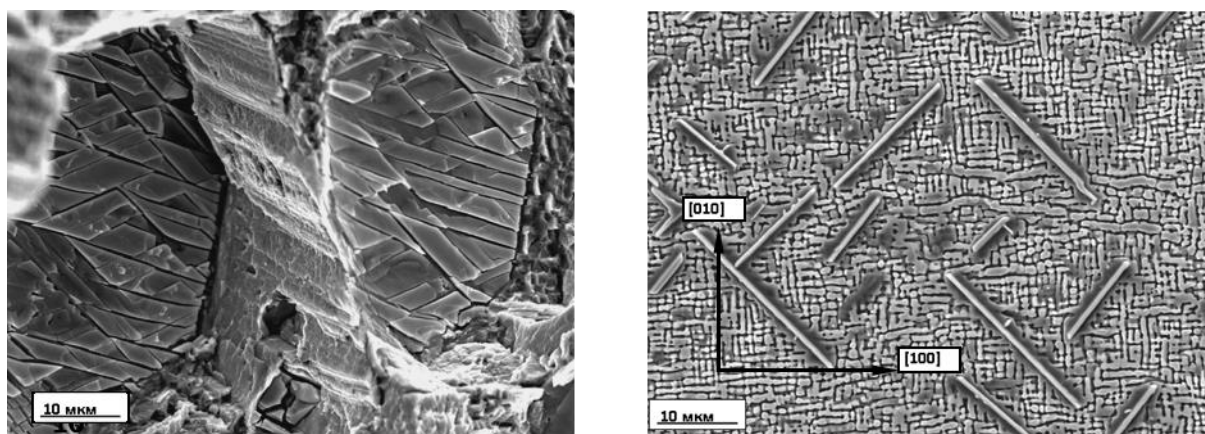


Рис. 4. Пластины ТПУ фазы в сечении шлифа и в статическом изломе рабочей лопатки турбины среднего давления (ТСД) ГТД Д-18Т из монокристаллического никелевого жаропрочного сплава после наработки при эксплуатации в течение 7835 ч

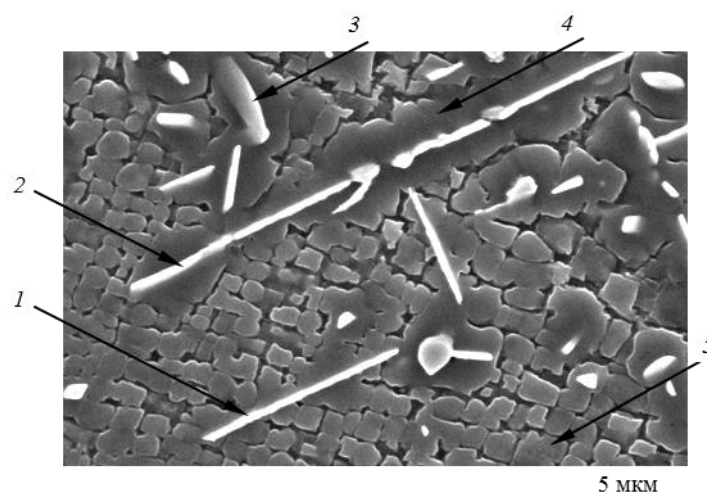


Рис. 5. Схема выбора зон (1–5 – см. табл. 1) исследования химического состава ТПУ фазы и  $\gamma'$ -фазы

Образовавшиеся в жаропрочном сплаве пластины ТПУ фазы исследовали методом РСМА. На рис. 4 приведены изображения пластин ТПУ фазы в сечении шлифа и в статическом изломе рабочей лопатки турбины среднего давления ГТД Д-18Т из монокристаллического жаропрочного никелевого сплава после наработки при эксплуатации в течение 7835 ч. Схема выбора зон исследования химического состава ТПУ фазы и  $\gamma'$ -фазы приведена на рис. 5. Химический состав ТПУ фазы и  $\gamma'$ -фазы представлен в табл. 1.

Таблица 1

**Химический состав ТПУ фазы и  $\gamma'$ -фазы в монокристаллическом никелевом жаропрочном сплаве после высокотемпературной наработки**

Фаза	Условный номер зоны анализа	Содержание элементов, % (по массе)								
		Al	Cr	Co	Ni	Nb	Mo	Ta	W	Re
ТПУ фаза	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
$\gamma'$ -фаза	4	7,19	3,00	8,72	65,03	1,72	–	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

Помимо растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа также проводили рентгеноструктурные исследования для прецизионного определения параметров кристаллических решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз на образцах из монокристаллического никелевого жаропрочного сплава как после высокотемпературной выдержки без нагружения, так и после длительных ресурсных испытаний. Проведенный рентгеноструктурный анализ показал, что происходит устойчивое снижение величины параметра кристаллической решетки  $\gamma$ -твердого раствора после длительных ресурсных испытаний (порядка 1000 часов и более) в сравнении с исходным состоянием сплава; на малых базах испытаний (несколько сотен часов) изменение параметра кристаллической решетки  $\gamma$ -фазы малозаметно. На рис. 6 представлены наиболее характерные дифрактограммы рентгеновского рефлекса (222) в монохроматизированном Fe  $K_{\alpha}$ -излучении как после воздействия высокой температуры без механических нагрузок, так и после длительных ресурсных испытаний. Результаты прецизионного определения параметров кристаллических решеток ( $\gamma/\gamma'$ )-фаз, а также размерного несоответствия кристаллических решеток фаз (мисфит) представлены в табл. 2.

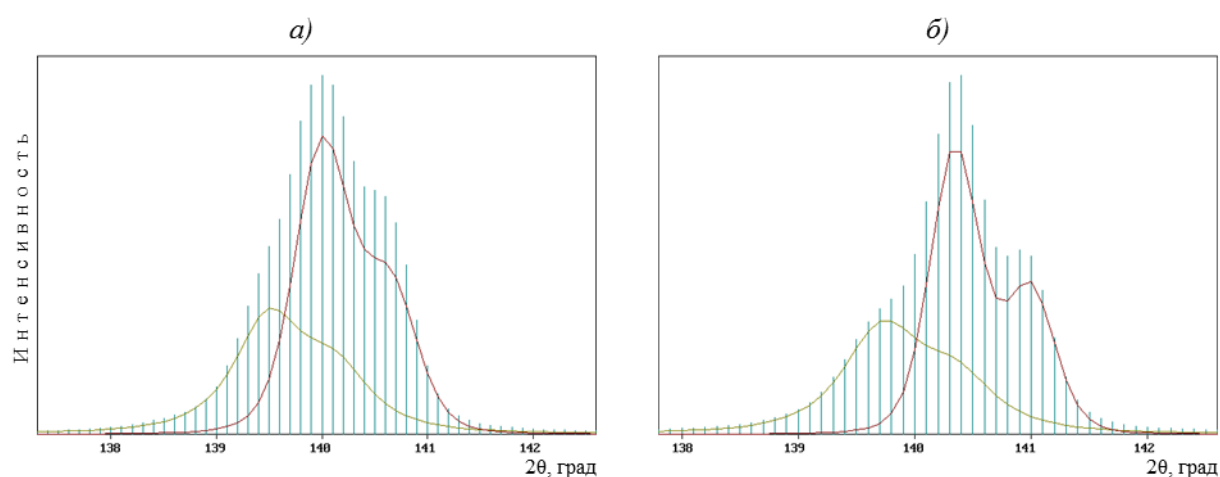


Рис. 6. Наиболее характерные дифрактограммы рентгеновского рефлекса (222) ( $\gamma/\gamma'$ )-фаз монокристаллического никелевого жаропрочного сплава в монохроматизированном Fe  $K_{\alpha}$ -излучении как после воздействия высокой температуры без механических нагрузок (а), так и после длительных ресурсных испытаний (б)

Таблица 2

**Параметры кристаллических решеток ( $\gamma/\gamma'$ )-фаз и размерное несоответствие параметров кристаллических решеток фаз при различных условиях длительных высокотемпературных испытаний**

Условия испытания при температуре 1000°C		Параметр кристаллической решетки $a$ , нм		Размерное несоответствие кристаллических решеток (мисфит), %
продолжительность, ч	нагрузка, МПа	$\gamma$ -твердого раствора	интерметаллидной $\gamma'$ -фазы	
400	200	0,3520	0,35680	0,12
	Без нагрузки	0,3521	0,35695	0,07
1800	200	0,35666	0,3592	-0,07
	Без нагрузки	0,35675	0,3590	-0,04
2600	200	0,35718	0,35646	0,20
	Без нагрузки	0,35743	0,35685	0,16

### Обсуждение и заключения

Выделение ТПУ фаз после длительной наработки подтверждается как данными РЭМ, где на снимке видны выделения фазы пластинчатой морфологии, так и данными рентгеноспектрального микроанализа, указывающими на химический состав ТПУ фазы, богатой рением и вольфрамом. Косвенно о выделении ТПУ фаз в процессе длительной эксплуатации материала свидетельствуют и данные прецизионного определения параметров кристаллических решеток  $\gamma$ -твердого раствора и  $\gamma'$ -фазы: снижение параметров кристаллической решетки характерно не только для  $\gamma$ -фазы, но и для  $\gamma'$ -фазы на основе соединения  $Ni_3Al$ . Величина снижения параметра кристаллической решетки возрастает с увеличением продолжительности ресурсных испытаний лопаток при высокой температуре.

Из результатов проведенных исследований можно сделать вывод, что снижение содержания легирующих элементов в  $\gamma$ -твердом растворе в результате выделения ТПУ фаз, богатых тугоплавкими элементами, является одной из причин понижения жаропрочности материала. Более того, ТПУ фазы оказывают отрицательное влияние на механические характеристики сплава из-за локального нарушения когерентности межфазных границ в зоне их возникновения, что неминуемо приводит к образованию клиновидных микротрещин в процессе высокотемпературной ползучести материала, по которым в дальнейшем происходит разрушение сплава.

Можно предположить, что контролировать выделение ТПУ фаз *in-situ* возможно посредством высокотемпературной рентгенографии, а также в процессе высокотемпературных испытаний жаропрочных сплавов под приложенной механической нагрузкой методами прецизионного определения параметров кристаллических решеток ( $\gamma/\gamma'$ )-фаз по величине снижения параметра решетки. Таким образом, можно будет исследовать кинетику появления ТПУ фаз в зависимости от нагрузок, продолжительности выдержки и температуры, что будет представлять большой интерес для исследователей-материаловедов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения о предоставлении субсидии №14.595.21.0002 от 22.08.2014 г., уникальный идентификатор №RFMEFI59514X0002, с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания ФГУП „ВИАМ”».*

### 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.
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. №S. 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  $\gamma'/\gamma$ -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 /В кн. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина /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. №S. С. 399–407.
16. Самойлов А.И., Назаркин Р.М., Моисеева Н.С. Определение мисфита во фрагментированных монокристаллах никелевых жаропрочных сплавов //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 02 (viam-works.ru).
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. №S. С. 117–129.