

УДК 629.7.018.4:669.245

М.Р. Орлов¹, О.Г. Оспенникова¹, В.В. Автаев¹, А.М. Терехин², Е.В. Филонова¹**ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО
РАЗРУШЕНИЯ ДИСКА РОТОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ
АВИАЦИОННОГО ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ
ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ЭП741-НП**

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-5-12

Изучены химический состав, макро- и микроструктура, а также механические характеристики материала диска ротора высокого давления (РВД) после ресурсных стендовых испытаний в составе ГТД. Методами фрактографии с использованием растровой электронной микроскопии проведены исследования кинетики усталостного разрушения диска РВД высокоманевренного двигателя из жаропрочного никелевого сплава ЭП741-НП в процессе ресурсных эквивалентно-циклических испытаний ГТД. Проведено моделирование усталостного разрушения образцов из сплава ЭП741-НП в условиях МнЦУ и МЦУ, что позволило воспроизвести механизм эксплуатационного разрушения диска РВД.

Ключевые слова: жаропрочные сплавы, пластическая деформация, усталостное разрушение, ГТД.

Chemical composition, macro- and microstructure, as well as mechanical characteristics of high pressure rotor disk material included in gas-turbine engine after endurance testing are investigated. The research of the fatigue destructure kinetics of high-maneuverable gas-turbine engine rotor disk material of nickel-base superalloy EP741-NP at the equivalent-cyclic endurance testing process is performed by scanning electron microscopy fractography methods. The fatigue destructure simulation is studied on EP741-NP alloy specimens at low- and high-cycle fatigue loading which allow reproducing operational fracture mechanism of high pressure rotor disk.

Keywords: superalloy, plastic deformation, fatigue fracture, gas-turbine engine.

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

²Акционерное общество «Научно-производственный центр газотурбостроения „Салют”» [Joint-stock company «Gas-turbine engineering research and production center „Salut”»] E-mail: info@salut.ru

Введение

В связи с непрерывной тенденцией повышения интенсивности эксплуатации и ресурса авиационной техники, в ВИАМ разработаны Стратегические направления развития материалов и технологий [1, 2], базирующиеся на фундаментально-прикладных исследованиях фазовых и структурных изменений авиационных материалов [3–6] с использованием современного испытательного, аналитического и исследовательского оборудования [7, 8].

Безопасная эксплуатация авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) во многом определяется работоспособностью и надежностью ответственных деталей ротора турбины. Наиболее высокие требования предъявляются к дискам турбины, разрушение которых в процессе эксплуатации приводит, как правило, к катастрофическим последствиям. Материал и конструкция дисков должны обеспечивать назначенный ресурс работы двигателя с учетом концепции безопасной повреждаемости. Концепция безопасной повреждаемости предполагает безопасное развитие дефекта в виде трещины мало-

цикловой усталости в дисках в течение длительного времени эксплуатации, превышающего периодичность проведения регламентных работ, а также безусловное обнаружение усталостных трещин методами неразрушающего контроля.

Обеспечение ресурса ГТД основано на расчетах запасов прочности и долговечности основных деталей ГТД, подтверждается их ресурсными испытаниями в составе двигателя или на автономных стендах и исследованиями кинетики малоциклового разрушения материалов дисков, определяющей периодичность проведения контроля неразрушающим методом.

В соответствии с требованием определения безопасного периода развития трещины в течение длительного времени эксплуатации [9], методом фрактографии с использованием растровой электронной микроскопии выполнено исследование кинетики усталостного разрушения диска ротора высокого давления (РВД) высокоманевренного двигателя из жаропрочного никелевого сплава ЭП741-НП в процессе ресурсных эквивалентно-циклических испытаний ГТД.

Материалы и методы

Высокоманевренный ГТД, в составе которого находился исследуемый диск РВД, прошел эквивалентно-циклические стендовые испытания на подтверждение заявленного ресурса, после чего был разобран и исследован. При выполнении неразрушающего контроля капиллярным люминесцентным методом ЛЮМ1-ОВ на полотне диска в зоне радиуса скругления компенсационного отверстия выявлена эксплуатационная трещина.

Материалом диска РВД является жаропрочный никелевый сплав ЭП741-НП, полученный по технологии распыления гранул с последующим горячим изостатическим прессованием и термической обработкой заготовки диска.

Определение химического состава материала диска на соответствие требованиям нормативной документации выполнили оптико-эмиссионным методом на спектрометре.

Исследование характеристик прочности, пластичности, твердости и ударной вязкости материала диска при комнатной температуре, испытания на длительную прочность и малоцикловую усталость (МЦУ) выполнены на оборудовании Walter+Baiaq.

Испытания образцов на многоцикловую усталость (МНЦУ) проводили в условиях резонансно-высокочастотного одноосного нагружения при комнатной температуре на пульсаторе Zwick/Roell Amsler 100 HFP 5100.

Фрактографический анализ поверхности вскрытой эксплуатационной трещины (рис. 1), изломов образцов после усталостных испытаний и исследование структуры материала диска выполне-

ны методом растровой электронной микроскопии на электронном микроскопе, оснащенный системой рентгеноспектрального микроанализа.

Результаты и обсуждение

Анализ состава сплава ЭП741-НП

По результатам анализа материала диска, выполненного методом оптико-эмиссионной спектроскопии, состав жаропрочного сплава по содержанию основных легирующих элементов и примесей соответствует марке ЭП741-НП согласно требованиям нормативной документации (см. таблицу).

Определение механических свойств материала диска

С целью изучения механических свойств материала диска РВД из его ступичной части изготовлены стандартные образцы для механических испытаний на кратковременную прочность при растяжении, для испытаний на ударный изгиб и определение твердости, для испытаний на длительную прочность и малоцикловую усталость при 650°C.

В результате выполненных исследований установлено, что полученные значения механических характеристик (при 20°C) превосходят требования нормативной документации на сплав ЭП741-НП:

- $\sigma_b=1530$ МПа, $\sigma_{0,2}=1075$ МПа, $\delta=32\%$, $\psi=25\%$;
- ударная вязкость $KCU=670$ кДж/м²;
- твердость по Бринеллю (НВ) – диаметр отпечатка составляет 1,56 мм;
- длительная прочность при температуре 650°C и нагрузке 1000 МПа превышает 100 ч;

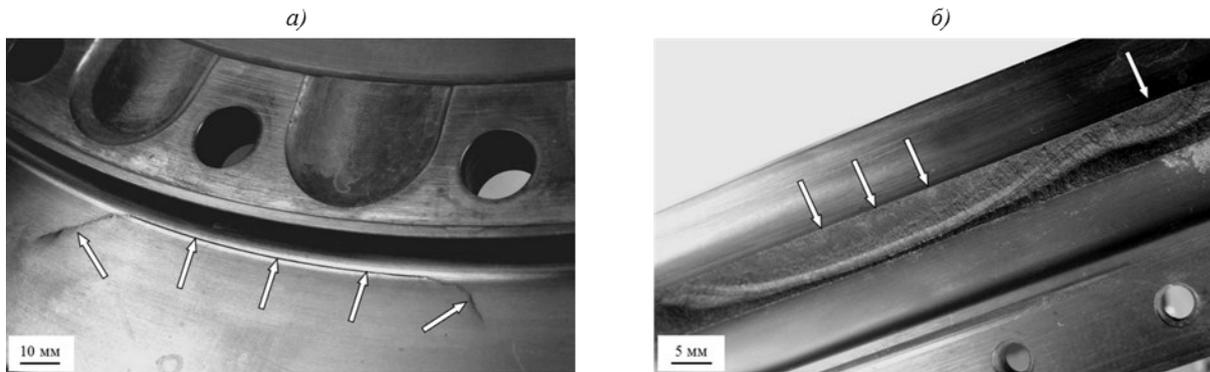


Рис. 1. Результаты фрактографического анализа:

а – внешний вид эксплуатационной трещины на поверхности полотна диска ротора высокого давления (стрелками указан линейный участок усталостного развития и зоны пластической деформации при развитии трещины по механизму статического отрыва); *б* – поверхность вскрытой трещины (стрелками указаны очаги зарождения усталостного разрушения)

Химический состав* материала диска из сплава ЭП741-НП

Содержание химических элементов, % (по массе)												
Ni	Cr	Co	Mo	Al	Ti	W	Nb	Hf	Fe	C	Si	Mn
Основа	8,5	15,5	3,8	4,9	1,8	5,3	2,5	0,28	0,06	0,05	0,02	0,002
	(8–10)	(15–16,5)	(3,5–4,2)	(4,8–5,2)	(1,6–2)	(5,2–5,9)	(2,4–2,8)	(0,1–0,4)	(≤0,5)	(0,02–0,06)	(≤0,5)	(≤0,5)

* В скобках – допустимые значения по ТУ1-809-530–2008.

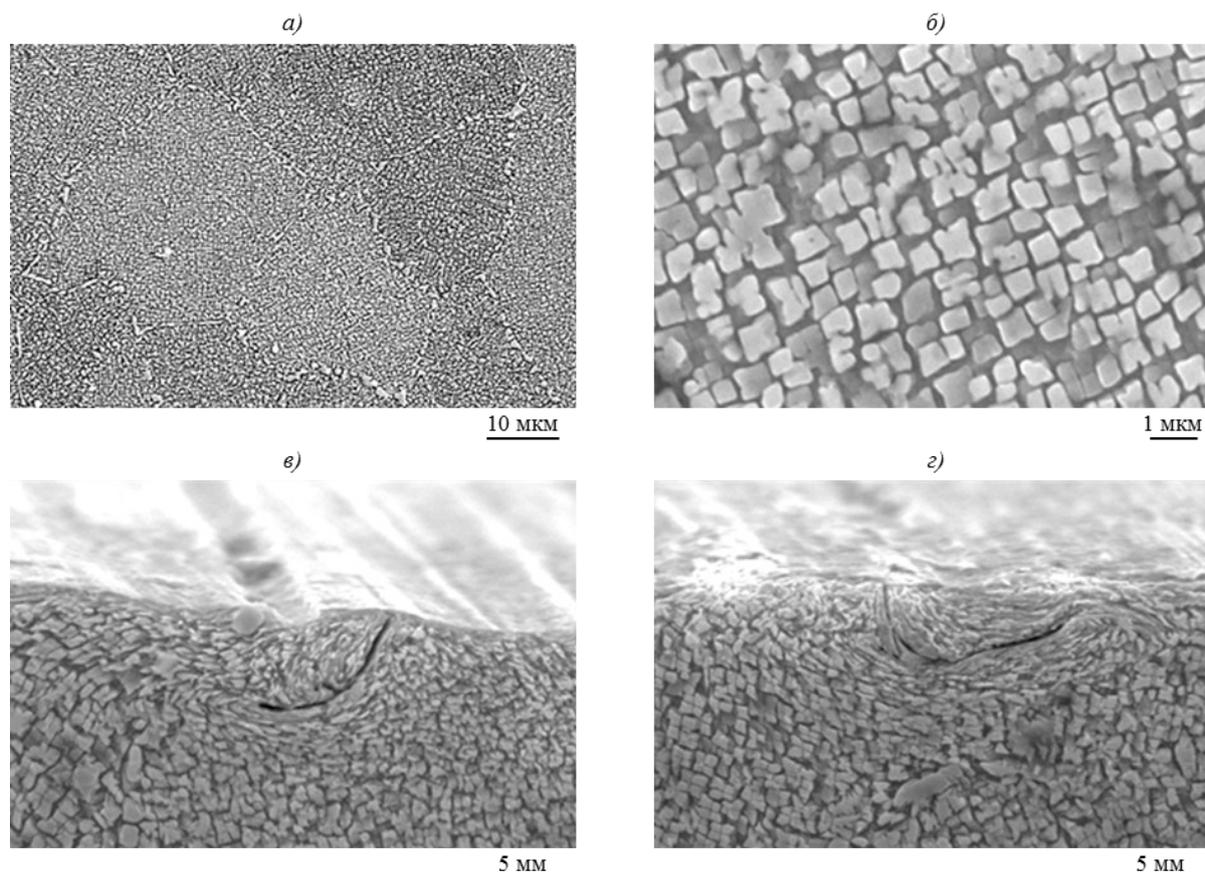


Рис. 2. Микроструктура диска ротора высокого давления из сплава ЭП741-НП:
 а – декорирование границ зерен частицами некогерентной γ' -фазы; б – морфология упрочняющей γ' -фазы;
 в, г – деформация поверхностного слоя полотна диска и образование складок в зоне зарождения усталостной трещины

– живучесть в условиях малоциклового усталости при 650°C , нагрузке 1000 МПа, частоте нагружения $f=1$ Гц и коэффициенте асимметрии цикла нагружения $R=0$ для двух испытанных образцов соответствует 97793 и 33770 циклам (до разрушения).

Исследование структуры материала диска

Исследование микроструктуры материала диска РВД из сплава ЭП741-НП проводили на шлифах, вырезанных из фрагмента диска вблизи эксплуатационной трещины.

Исследования макро- и микроструктуры материала диска (рис. 2, а, б), проведенные методами оптической и растровой электронной микроскопии, показали, что структура диска представляет собой зерна γ -твердого раствора (20–40 мкм), упрочненного кубоидными частицами γ' -фазы (0,5–1,0 мкм). Границы зерен упрочнены частицами γ' -фазы неправильной формы (2–3 мкм) и карбидами. Микроструктура материала диска является характерной для сплава ЭП741-НП.

Анализ приповерхностной зоны диска в области зарождения эксплуатационной усталостной трещины выявил следы пластической деформации

металла от воздействия режущего инструмента и образование складок (рис. 2, в, г), являющихся очаговыми зонами усталостного разрушения.

Фрактографический анализ эксплуатационного разрушения диска РВД

Методами оптической и растровой электронной микроскопии установлено, что зарождение усталостного разрушения имеет многоочаговый характер. Трещина распространялась по усталостному механизму. На поверхности излома видны макролинии остановки трещины, наблюдаются зоны развития усталостной трещины с различным рельефом поверхности разрушения, указывающие на изменение режимов нагружения диска РВД (рис. 3).

При приближении усталостной трещины к поверхности диска со стороны, противоположной очаговой зоне, на расстоянии до поверхности диска $\sim 0,5$ мм развитие трещины происходит по статическому механизму с выходом на поверхность диска РВД (рис. 3). Переход развития усталостной трещины к статическому механизму отмечается и на поверхности полотна диска в виде интенсивной пластической деформации его поверхности в

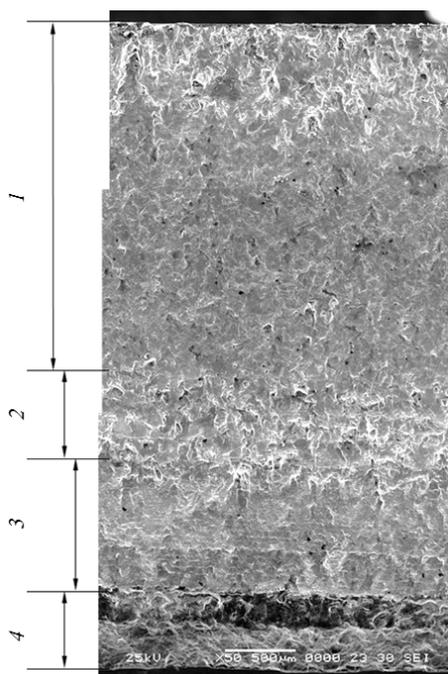


Рис. 3. Поверхности эксплуатационной трещины, образовавшейся по различным механизмам разрушения:

1 – зона развития усталостной трещины в условиях воздействия высокого уровня динамических нагрузок (МнЦУ); 2 – первая зона МЦУ; 3 – вторая зона МЦУ; 4 – зона статического разрушения

зонах разворота краев трещины в радиальном направлении (рис. 1, а).

Вскрытый излом эксплуатационной трещины интенсивно окислен на всем протяжении ее развития, включая усталостную и статическую фазы разрушения. Окисление статического участка эксплуатационного разрушения свидетельствует о том, что в процессе стендовых испытаний двигателя раскрытие усталостной трещины по статическому механизму не привело к обрыву фрагмента диска РВД, а завершилось его разгрузкой и остановкой трещины. Фрактографический анализ краевых зон трещины подтвердил отсутствие признаков усталостного развития трещины после статического разрушения на последующих этапах стендовых испытаний двигателя.

На поверхности излома наблюдаются три зоны развития усталостной трещины, указывающие на изменение режимов нагружения детали, и зона статического долома (рис. 3).

Начальная зона усталостного разрушения имеет рельеф, характерный для высокочастотного многоциклового разрушения (рис. 4, а), формирующийся по кристаллографическим плоскостям систем наилегчайшего скольжения жаропрочных никелевых сплавов $\{111\}$ и $\langle 011 \rangle$ [10, 11].

При дальнейшем развитии трещины ее макро-рельеф сглаживается, при этом в процессе разрушения участвует одновременно несколько систем наилегчайшего скольжения, формирующих поперечные надрывы и сдвиги, выходящие на поверхность разрушения (рис. 4, б). Такое строение излома свидетельствует о развитии усталостной трещины в условиях действия высокого уровня динамических нагрузок. Начальная зона усталостного разрушения, соответствующая механизму

МнЦУ в условиях высоких амплитудных нагрузок, имеет протяженность $\sim 2,6$ мм (рис. 3).

В следующих двух зонах развития трещины наблюдается наличие четко выраженных блоков усталостных бороздок, ограниченных линиями остановки трещины в процессе испытаний ГТД, характерных для МЦУ жаропрочных никелевых сплавов [12, 13]. Первая зона малоциклового усталости имеет протяженность $\sim 0,6$ мм. В зоне прослеживается три блока усталостных бороздок шириной $\sim 150\text{--}210$ мкм (рис. 4, в, г). Протяженность второй зоны малоциклового усталости составляет ~ 1 мм от границы первой зоны. Во второй зоне наблюдается 18 блоков усталостных бороздок шириной от 32 до 54 мкм (рис. 4, д).

Морфология зоны статического разрушения характерна для сплава ЭП741-НП. Разрушение происходит с образованием мелкоячеистого пластичного рельефа и участков скола по карбидной фазе, расположенной преимущественно по границам зерен.

Фрактографический анализ разрушения сплава ЭП741-НП в условиях МнЦУ и МЦУ

Для идентификации механизмов эксплуатационного усталостного разрушения диска РВД в процессе ресурсных эквивалентно-циклических испытаний ГТД из сплава ЭП741-НП изготовлены и испытаны образцы на МнЦУ и МЦУ при комнатной и повышенной температурах соответственно.

В связи с высокой трудоемкостью и длительностью испытаний дисковых жаропрочных сплавов на МЦУ с выдержками в цикле нагружения, моделирующих работу двигателя при различных режимах, на образцах, изготовленных согласно ГОСТ 25.502, предварительно выращивали тре-

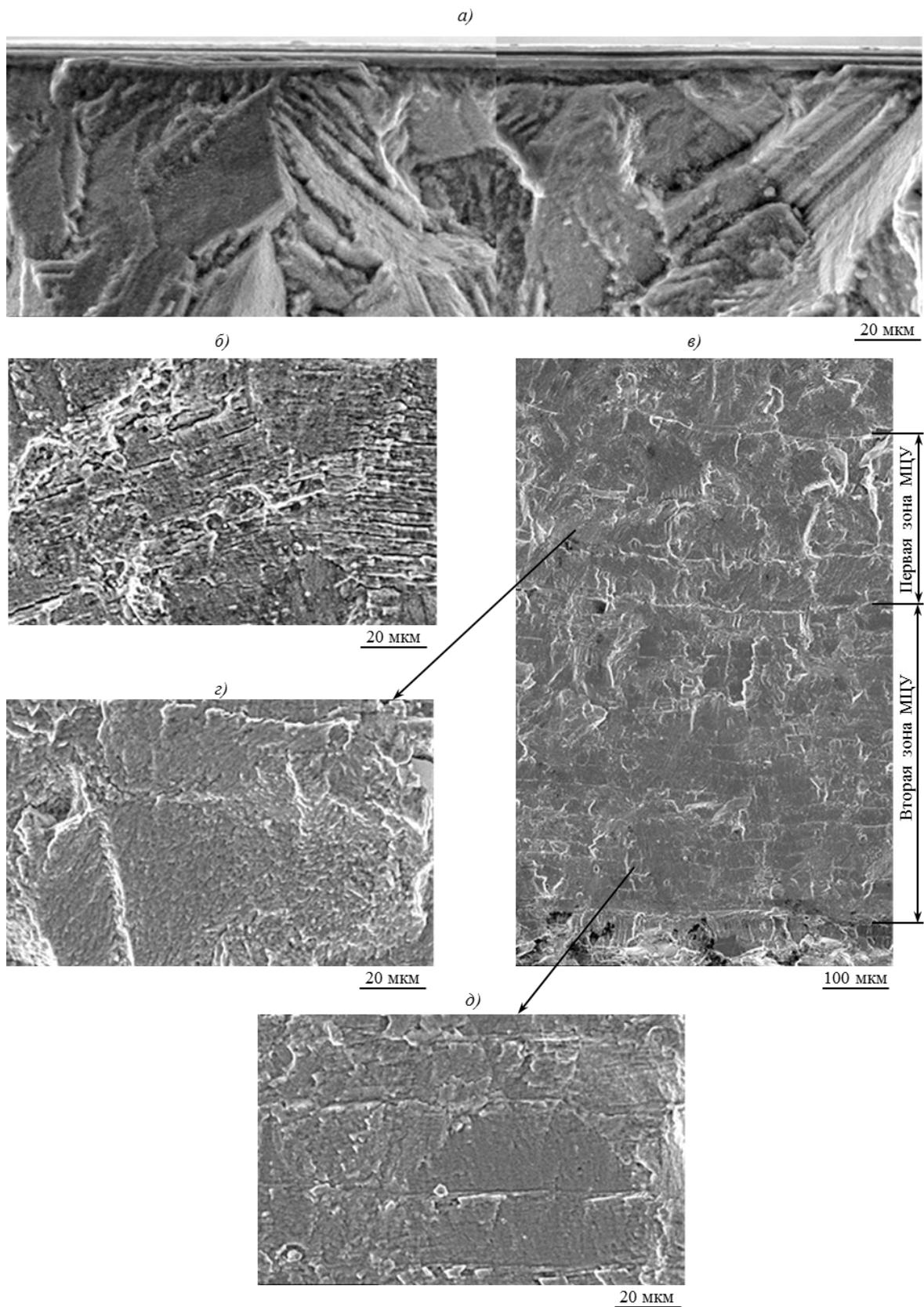


Рис. 4. Эксплуатационное усталостное разрушение диска ротора высокого давления:
 а – очаговая зона МнЦУ; б – первая зона развития усталостной трещины по механизму МнЦУ; в – две зоны развития усталостной трещины по механизму МЦУ; г – первая зона развития трещины по механизму МЦУ; д – вторая зона развития трещины по механизму МЦУ

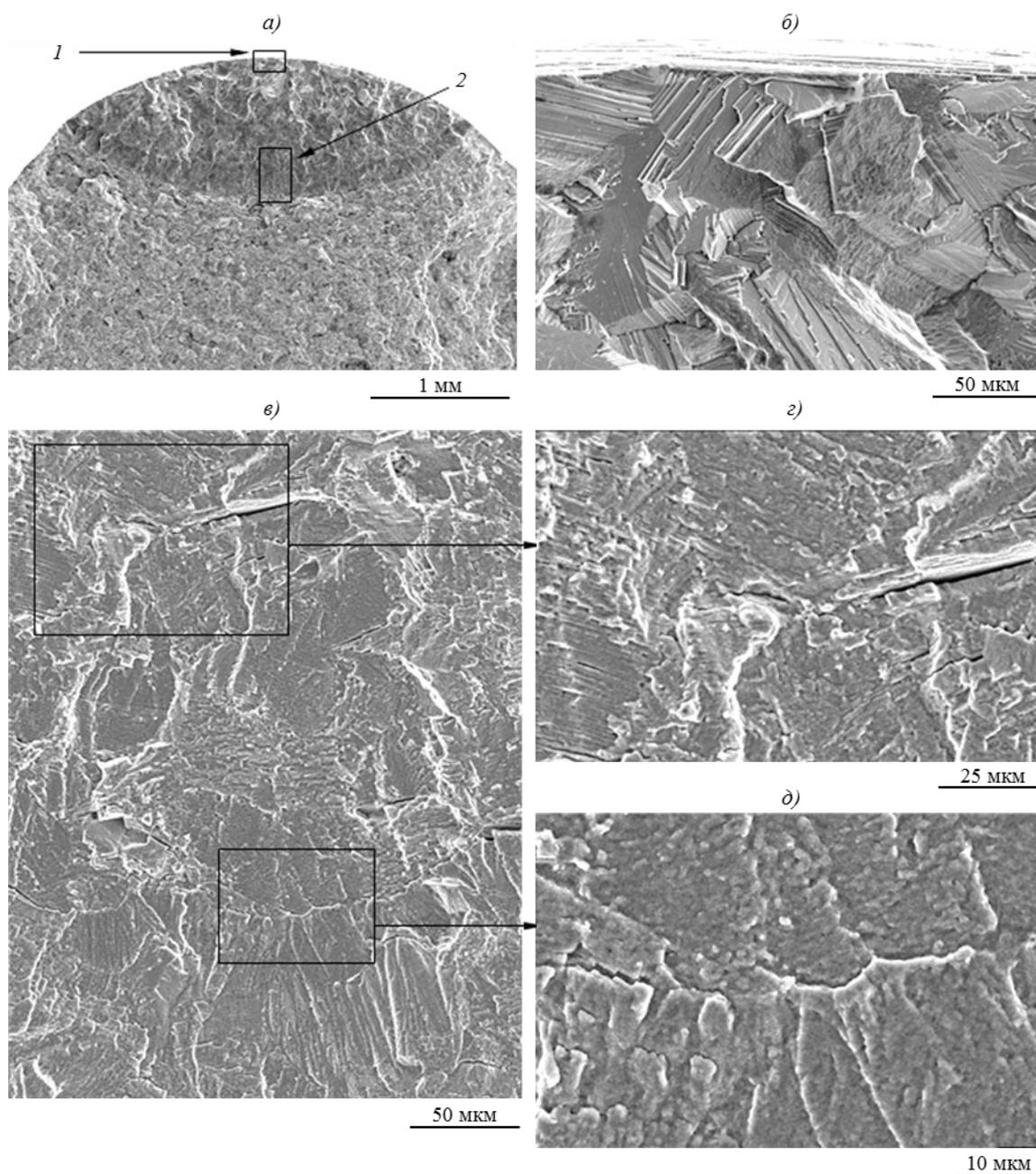


Рис. 5. Поверхность разрушения образца из сплава ЭП741-НП, испытанного в условиях многоциклового и малоциклового разрушения:

a – общий вид разрушения с указанием зон: *1* – очаговая зона разрушения в условиях многоциклового усталостного разрушения при 20°C; *2* – переход многоциклового усталостного разрушения при 20°C к малоцикловоу усталостному разрушению при 550°C; *б* – зона *1*, усталостное разрушение по системам наилегчайшего скольжения; *в* – зона *2*, переход от многоциклового усталостного разрушения к малоцикловоу; *г* – формирование рельефа МнЦУ разрушения с участием нескольких систем скольжения; *д* – формирование рельефа МЦУ разрушения с формирова-

щины МнЦУ в условиях резонансного высокочастотного одноосного нагружения при комнатной температуре. Испытания образцов прекращали при отклонении резонансной частоты на величину 0,5–1 Гц, что соответствовало развитию трещины на глубину ~0,5 мм. В процессе испытаний образцов на МнЦУ варьировали значения коэффициен-

та асимметрии R и максимального напряжения σ_{\max} цикла нагружения.

Образцы с предварительно выращенными трещинами МнЦУ испытывали в условиях МЦУ при температурах 400, 550 и 700°C с коэффициентами асимметрии цикла нагружения 0,05 и 0,5. В процессе испытаний образцов варьировали величину

амплитудной нагрузки, продолжительность выдержки в цикле нагружения и профиль цикла нагружения (треугольный и трапециевидный).

Результаты фрактографических исследований образцов из сплава ЭП741-НП, испытанных при МнЦУ и МЦУ, приведены на рис. 5 для следующих условий испытаний.

Для МнЦУ:

– коэффициент асимметрии цикла нагружения $R=0,05$;

– напряжение в цикле нагружения $\sigma_{\max}=1000$ МПа;

– частота нагружения $f=62$ Гц;

– количество циклов нагружения $N=73600$.

Для МЦУ:

– температура испытаний 550°C ;

– коэффициент асимметрии цикла нагружения $R=0,5$;

– форма цикла нагружения – трапеция;

– напряжение в цикле нагружения $\sigma_{\max}=780$ МПа;

– блок испытаний: 20 циклов с выдержкой 100 с + 20 циклов с выдержкой 50 с + 20 циклов с выдержкой 20 с;

– количество блоков: 17.

В результате выполненных исследований установлено, что формирование развитого рельефа, ограниченного кристаллографическими плоскостями систем наилегчайшего скольжения жаропрочного никелевого сплава, характерно для очаговой зоны высокочастотной МнЦУ (рис. 5, а, б). По мере развития трещины МнЦУ происходит уменьшение рельефности усталостного излома, при этом на поверхность разрушения выходят вторичные системы скольжения, образующие поперечные надрывы и расслоения (рис. 5, в, г).

В условиях МЦУ при повышенной температуре на поверхности усталостного разрушения формируется фасеточный рыхлый микрорельеф, содержащий микробороздки (рис. 5, в, д). На представленном образце не удалось зафиксировать блоки нагружения по той причине, что в данном случае все циклы нагружения имели одинаковую амплитудную нагрузку. Это согласуется с уравнением Париса, описывающим зависимость скорости роста усталостной трещины (в размерности шага бороздок) от размаха коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины при постоянном значении коэффициента асимметрии цикла нагружения R [14]. Формирование блоков бороздок в процессе эксплуатационного разрушения диска РВД определяется как изменением размаха коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины в процессе стеновых испытаний ГТД, так и чувствительностью жаропрочных никелевых сплавов к асимметрии цикла нагружения согласно кинетическим моделям усталостного разрушения Волкера, Формана и Элбера [15, 16].

В результате выполненных исследований установлено следующее. Сквозная трещина в диске РВД из сплава ЭП741-НП имеет многоочаговый усталостный характер. Очагами зарождения тре-

щины являются складки от механической обработки на поверхности полотна.

В начальной зоне наблюдается ускоренное развитие трещин в условиях действия высокого уровня динамических нагрузок. Дальнейшее развитие трещин происходит с образованием зон малоциклового усталости с блоками усталостных бороздок, соответствующих 21 блоку эквивалентно-циклических испытаний ГТД. По мере развития усталостной трещины происходила разгрузка диска РВД, о чем свидетельствует снижение размера блоков в процессе развития трещины.

После раскрытия усталостной трещины по механизму статического разрушения в процессе стеновых испытаний ГТД произошла разгрузка диска РВД, что остановило дальнейшее развитие трещины.

Моделирование усталостного разрушения на образцах из сплава ЭП741-НП в условиях МнЦУ и МЦУ позволило воспроизвести механизм эксплуатационного разрушения диска РВД.

При испытаниях образцов из сплава ЭП741-НП на МнЦУ при 20°C усталостные трещины во всех случаях зарождались на рабочей поверхности образцов. В очаговых зонах усталостных трещин разрушение развивалось по механизму сдвига в действующих системах наилегчайшего скольжения никелевого сплава $\{111\}$ и $\langle 011 \rangle$, образуя развитый фасеточный микрорельеф, представленный кристаллографическими плоскостями плотной упаковки $\{111\}$. По мере развития усталостных трещин шероховатость микрорельефа снижается, в усталостном изломе формируется микрорельеф, представленный хрупкими микронадрывами и расслоениями по системам скольжения $\{111\}$ и $\langle 011 \rangle$.

Переход к механизму МЦУ при температурах 400 , 550 и 700°C сопровождался изменением морфологии поверхности усталостных трещин: в изломе формируется рыхлый рельеф, на поверхности фасеток наблюдаются усталостные бороздки. Различие в форме цикла нагружения (трапеция, треугольник), а также продолжительность выдержки в цикле нагружения не сказываются на характере усталостного разрушения.

Заключение

Материал диска РВД, прошедшего ресурсные стеновые испытания в составе ГТД, соответствует сплаву ЭП741-НП.

Макро-, микроструктура и механические характеристики сплава ЭП741-НП в составе диска РВД соответствуют требованиям нормативной документации.

Эксплуатационное разрушение диска РВД происходило по усталостному механизму. Первая фаза разрушения проходила по механизму многоциклового усталости в условиях высокого уровня амплитудных напряжений, дальнейшее разрушение развивалось по механизму малоциклового усталости в течение 21 блока стеновых испытаний ГТД, после чего произошло раскрытие усталост-

ной трещины по статическому механизму разрушения и это остановило ее дальнейшее развитие.

Очагами зарождения усталостной трещины явились поверхностные дефекты – складки от механической обработки.

Моделирование механизмов многоциклового и малоциклового усталости на образцах из сплава ЭП741-НП при комнатной и повышенной температурах позволило воспроизвести морфологию поверхности усталостного эксплуатационного

разрушения диска РВД и подтвердить рассмотренную модель его разрушения.

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. №S. С. 19–36.
3. Мубояджян С.А., Луценко А.Н., Александров Д.А., Горлов Д.С. Исследование возможности повышения служебных характеристик лопаток компрессора ГТД методом ионного модифицирования поверхности //Труды ВИАМ. 2013. №1. Ст. 02 (viam-works.ru).
4. Проходцева Л.В., Ерасов В.С., Лаврова О.Ю., Лавров А.В. Влияние формы цикла на усталостные свойства и микростроение изломов титанового сплава ВТ3-1 //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 54–58.
5. 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.
6. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP4. С. 13–19.
7. Орлов М.Р. Стратегические направления развития Испытательного центра ФГУП «ВИАМ» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 387–393.
8. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. Особенности высокоградIENTной направленной кристаллизации и со-
временное оборудование, используемое при производстве лопаток газотурбинных двигателей //Труды ВИАМ. 2014. №12. Ст. 03 (viam-works.ru).
9. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневиц А.В., Терехин А.Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость //Труды ВИАМ. 2013. №10. Ст. 06 (viam-works.ru).
10. Оспенникова О.Г., Орлов М.Р., Автаев В.В. Анизотропия упругопластических характеристик жаропрочных никелевых сплавов – основа конструирования монокристаллических лопаток турбин //Деформация и разрушение материалов. 2013. №11. С. 12–19.
11. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Автаев В.В. Деформация и разрушение монокристаллов жаропрочных никелевых сплавов при кратковременном и длительном статическом нагружении //Деформация и разрушение материалов. 2014. №3. С. 17–23.
12. Орлов М.Р., Колотников М.Е., Высотский А.В. Исследование кинетики усталостного разрушения диска турбины высокого давления из сплава ЭП742 //Деформация и разрушение материалов. 2013. №7. С. 7–15.
13. Иноземцев А.А., Ратчиев А.М., Нихамкин М.Ш. и др. Малоцикловая усталость и циклическая трещиностойкость никелевого сплава при нагружении, характерном для дисков турбин //Тяжелое машиностроение. 2011. №4. С. 30–33.
14. Нотт Дж. Ф. Основы механики разрушения: Пер. с англ. М.: Металлургия. 1978. 256 с.
15. Zhang G., Yuan H., Li G. Analysis of creep-fatigue life prediction models for nickel-based super alloys //Comp. Mat. Sci. 2012. №57. P. 80–88.
16. Newman J. C. Jr., Annigeri B.S. Fatigue-life prediction method based on small-crack theory in an engine material //J. Eng. Gas Turbines Power. 2012. V. 134. P. 032501-1–032501-8.