

## ДИАГНОСТИКА РАЗРУШЕНИЙ И ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАБОЧИХ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Киселев Ф.Д.

*«Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил»  
Министерства обороны Российской Федерации,  
Аэродромная улица, 2-5, Щелково, Московская область, 141103, Россия  
e-mail: kiselev\_fd@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 13.05.2019

Проведены исследования разрушений турбинных лопаток авиационных двигателей в процессе эксплуатации; развиты методические подходы и разработаны новые методики диагностики разрушений, оценки работоспособности, живучести лопаток; установлены причины эксплуатационных разрушений; разработаны рекомендации по предотвращению разрушений турбинных лопаток в эксплуатации. Установлены внешние, фрактографические и металлографические признаки, необходимые и достаточные для оперативной идентификации изломов лопаток по типам эксплуатационных разрушений. Представлены результаты экспериментального измерения скорости роста усталостных трещин в материале лопаток при высокотемпературных испытаниях на примере трех жаропрочных литейных сплавов на никелевой основе. Установлен интервал совпадения макро- и микроскорости роста усталостной трещины. Полученные результаты фрактографического исследования микромеханизмов и стадийности роста трещин позволяют судить об условиях нагружения и скорости развития усталостной трещины.

*Ключевые слова:* турбинные лопатки авиационных двигателей, диагностика эксплуатационных разрушений, сопротивление усталости, влияние концентраторов напряжений, скорость роста усталостной трещины, коэффициент интенсивности напряжений, порог и предел циклической трещиностойкости.

С некоторой долей условности можно утверждать, что процесс эксплуатации авиационной техники представляет собой гигантский эксперимент, выявляющий в реальных условиях применения работоспособность, надежность, долговечность, качество изготовления и конструктивное совершенство конструкций, деталей, систем самолета и двигателя.

Драматическая часть этого эксперимента нередко приводит к серьезным авиационным инцидентам, когда разрушаются детали конструкции и развивается аварийная ситуация.

Важнейшей составной частью исследований отказавшего аварийного авиационного двигателя является диагностика разрушений его деталей, позволяющая получить информацию о последовательности отказа двигателя, выявить разрушенную деталь как причину произошедшего

В связи с имеющимися место случаями разрушений рабочих лопаток турбин авиационных двига-

телей в процессе эксплуатации особую актуальность приобретают исследования связанных с этим отказов двигателей и разработки рекомендаций по предотвращению авиационных инцидентов.

Статья посвящена диагностике разрушений и оценке эксплуатационной работоспособности рабочих турбинных лопаток авиационных двигателей. Диагностика повреждаемости (трещинообразования) и разрушений деталей авиационной техники позволяет получить ценнейшую информацию, необходимую для определения характера, условий разрушения, выявления факторов, способствующих и инициировавших разрушение, для установления причины эксплуатационного разрушения (повреждения) деталей, разработки рекомендаций по предотвращению разрушений в эксплуатации и внедрению мероприятий, направленных на увеличение ресурса и надежности.

Рабочие лопатки турбины авиационных двигателей являются сложным объектом диагностиро-

вания как при оценке их эксплуатационной работоспособности, так и при установлении причин их разрушений из-за наложения при работе лопаток различных факторов механического и термического воздействия, когда необходимо учитывать взаимосвязь различных условий нагружения, конструктивных, технологических факторов, состояния структуры материала лопаток [1–3].

Для исследования и диагностирования такого объекта требуется применение комплекса методик по исследованию разрушенного авиационного двигателя в целом и по проведению фрактографических, трассологических, металлофизических исследований деталей, в том числе и таких специфических, как рабочие лопатки турбин авиационных двигателей [1] — по особенностям конструктивного исполнения, применяемым материалам и технологиям изготовления.

В работе произведена систематизация взаимосвязи видов нагружения, механизмов разрушения и типов эксплуатационных изломов рабочих лопаток турбин двигателей, дано развитие диагностических аспектов, разработаны методики диагностики [4, 5].

Предложенная классификация с учетом совместного действия в материале лопаток статических, вибрационных и термических напряжений помогает при проведении оперативной диагностики на основании систематизированных фрактографических и металлографических признаков характера разрушения выявить факторы термомеханической нагруженности, определяющие механизм разрушения, т.е. определить вид нагружения, ответственный за возникновение и развитие разрушения, выделив его из комплекса механических и термических нагрузок, действовавших на лопатку.

Систематизированы диагностические признаки, характерные для нештатных (аномальных) режимов функционирования двигателя и для разрушения лопатки при нормальном функционировании авиационных двигателей (параметры работы не выходили за пределы эксплуатационных ограничений).

В первом случае, обычно характеризующемся ужесточением термомеханических условий нагружения лопаток, вклад в исчерпание их несущей способности определялся конкуренцией механизмов ползучести и усталости, которые активизировались при соответствующих аномальных режимах работы двигателя. Это приводило (рис. 1) к образованию изломов ползучести, статико-усталостных, высокотемпературной усталости, ста-

тического надрыва с последующим усталостным развитием.

Во втором случае, когда материал лопаток также подвергается комплексному нагружению (одновременно действуют статические, циклические термомеханические и вибрационные нагрузки), эксплуатационные разрушения рабочих лопаток турбин носили, как правило, усталостный характер (рис. 1) — преобладал усталостный механизм при зарождении и развитии трещины, разрушения лопаток происходили от действия многоцикловых (вибрационных) нагрузок (МнЦУ) с доломом от действия статических сил.

Исследования эксплуатационной повреждаемости, случаев разрушений рабочих турбинных лопаток двигателей самолетов государственной авиации показывают, что несмотря на определенные достижения в области разработки новых высокожаропрочных сплавов и технологий изготовления рабочих лопаток авиационных двигателей, в отечественном двигателестроении объем экспериментальных данных по характеристикам механических свойств сплавов применительно к условиям работы лопаток недостаточен для обеспечения их надежности по критерию многоциклового усталости в пределах назначенных ресурсов. Явно недостаточно экспериментальных данных по характеристикам циклической трещиностойкости и, в частности, скорости роста усталостных трещин (РУТ) в жаропрочных сплавах на никелевой основе. Практически отсутствуют кинетические диаграммы усталостного разрушения (КДУР) применительно к условиям работы материала в критических зонах лопаток, необходимые для оценки усталостной трещиностойкости и живучести лопаток. Это касается как равноосных поликристаллических сплавов, так и сплавов с направленной кристаллизацией, в том числе в монокристаллическом исполнении.

В работе проведены экспериментальные исследования циклической трещиностойкости материала турбинных лопаток авиационных двигателей — сплавы ВЖЛ12У (равноосной кристаллизации) и ЖС26, ЖС32 (направленной кристаллизации и в монокристаллическом исполнении) при условиях нагружения, соответствующих условиям работы материала в одной из критических зон пера лопаток (температура испытания — 850 °С, асимметрия цикла 0,15 и 0,35). Проведено экспериментальное измерение скорости РУТ в процессе испытаний образцов на циклическую трещиностойкость при указанной температуре с нагружением образцов (рис. 2) на вибростенде (частоты собственных ко-

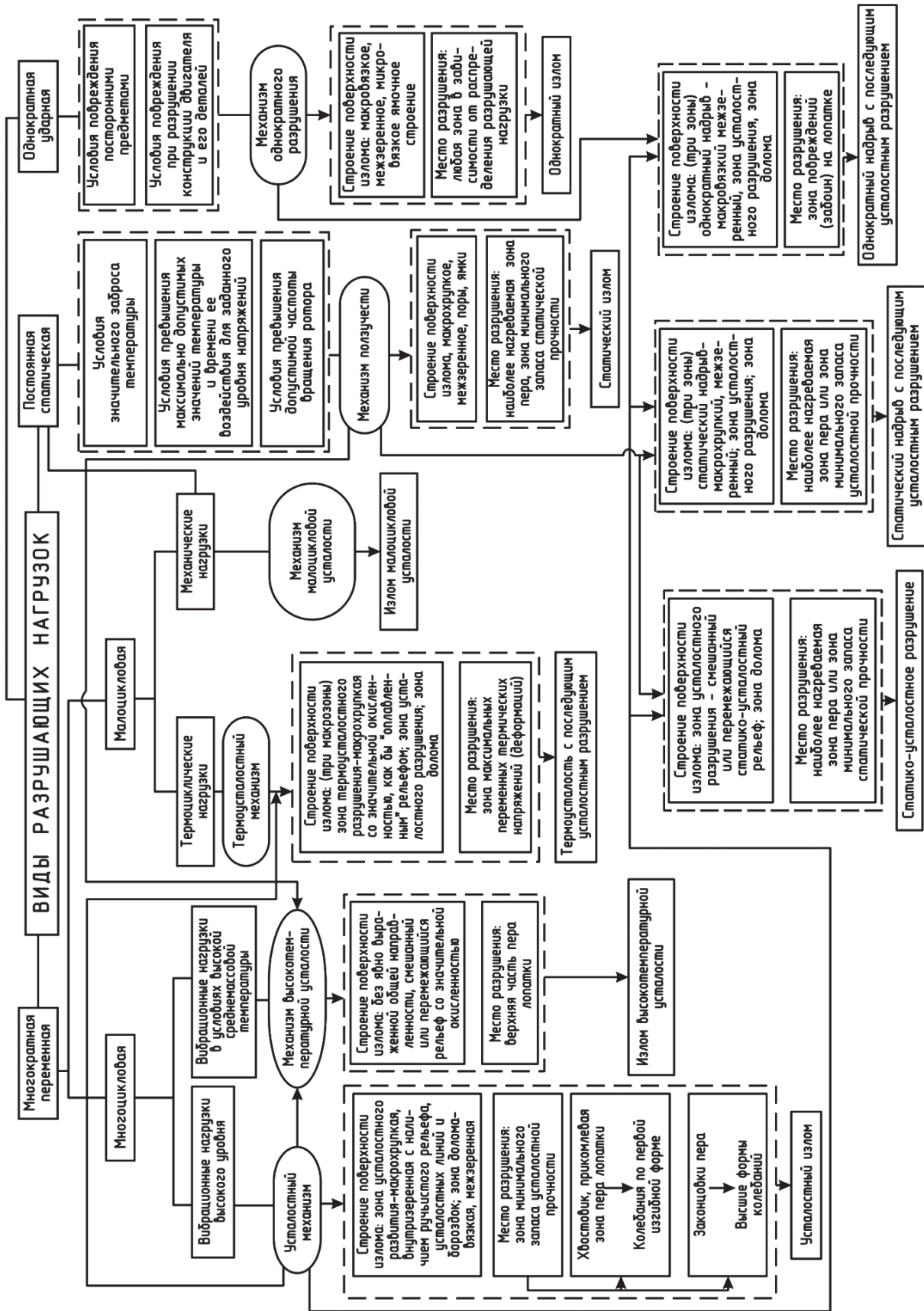


Рис. 1. Классификационная схема взаимосвязи видов нагрузки, механизмов разрушения и типов эксплуатационных изломов рабочих лопаток турбин авиационных двигателей

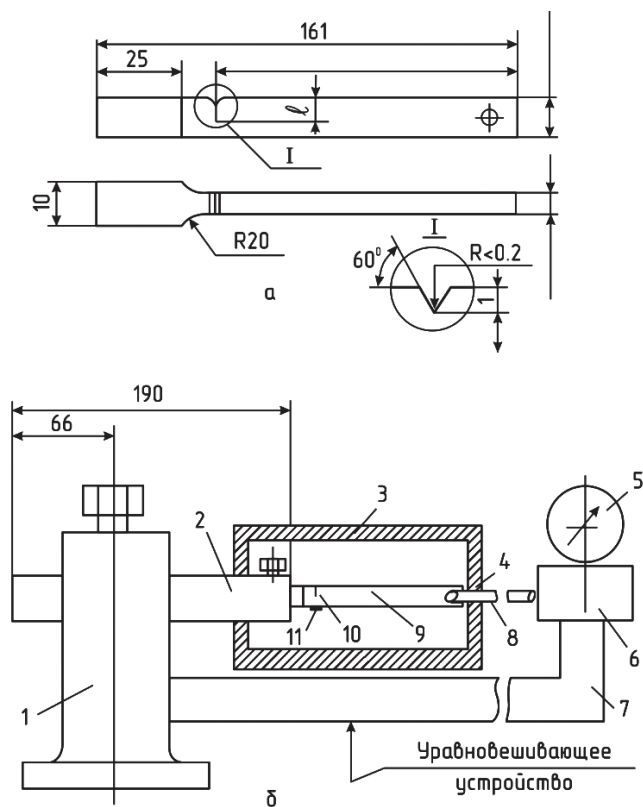


Рис. 2. Чертеж образца (а) и схема его крепления (б) при испытании на вибростенде: 1 – захват; 2 – удлинитель; 3 – печь; 4 – окно; 5 – индикатор; 6 – динамометр; 7 – плечо; 8 – тяга; 9 – образец; 10 – трещина; 11 – тензодатчик

лебаний образцов составляли 70...120 Гц) при статической подгрузке и образцов (рис. 3) по схеме пульсирующего растяжения с частотой 50 Гц. Значения коэффициента асимметрии цикла в обоих случаях составляли 0,15 и 0,35. Задав схему нагружения, асимметрию цикла и температуру испытания, измеряли скорость РУТ и определяли характеристики циклической трещиностойкости ( $K_{th}$  и  $K_{fc}$ ) в соответствии с рекомендациями [6]. Повер-

хность образцов в зоне роста трещины была отполирована, наблюдение за ростом трещины велось визуально, с применением бинокулярного микроскопа МБС-200.

По результатам высокотемпературных испытаний и измерений скорости РУТ на образцах из указанных сплавов произведено построение КДУР — зависимости скорости РУТ от значений коэффициента интенсивности напряжений (КИН).

Построенные КДУР материала рабочих турбинных лопаток из сплавов ВЖЛ12У, ЖС26 и ЖС32 при температуре 850 °С и коэффициентах асимметрии цикла  $R = 0,15$  и  $0,35$  приведены на рис. 4. В таблице представлены значения пороговых КИН, критических КИН при циклическом нагружении и эмпирические коэффициенты уравнения Париса, аппроксимирующего линейный участок диаграммы усталостного разрушения.

Анализируя приведенные данные, можно сделать вывод, что скорости роста трещин в сплавах ВЖЛ12У, ЖС26 и ЖС32 мало отличаются (сравнивая по сплавам) во всем диапазоне изменения КИН и характер влияния асимметрии цикла на скорость роста также одинаков.

В припороговой области при увеличении  $R$  от 0,15 до 0,35 скорость возрастает примерно в два раза. Изменение порогового КИН для исследуемых сплавов при увеличении асимметрии цикла носит примерно одинаковый характер и приводит к его уменьшению на 10; 14 и 17% для сплавов ЖС32, ВЖЛ12У и ЖС26 соответственно.

КИН определяет напряженно-деформированное состояние (НДС) в вершине трещины и является параметром, задающим движение трещины [8—10]. Получив зависимость скорости роста усталостной трещины от значений КИН и зная К-тарировки для образца и лопатки, можно судить о ско-

**Средние значения характеристик циклической трещиностойкости материала турбинных лопаток при температуре испытания 850 °С**

Материал	Коэффициент асимметрии, $R$	Порог трещиностойкости, $K_{th}$ МПа·√м	$K_{th0,35} / K_{th0,15}$	Коэффициенты уравнения Париса		Критический размах КИН, $K_{fc}$ МПа·√м
				$C$	$n$	
ВЖЛ12У	0,15	8,1	0,864	$7,76 \cdot 10^{-13}$	6,63	70
	0,35	7		$4,85 \cdot 10^{-11}$	5,49	
ЖС26	0,15	8,8	0,830	$1,603 \cdot 10^{-13}$	7,38	70
	0,35	7,8		$1,790 \cdot 10^{-11}$	5,83	
ЖС32	0,15	8,2	0,902	$6,28 \cdot 10^{-11}$	4,9	66
	0,35	7,4		$8,12 \cdot 10^{-10}$	4,11	

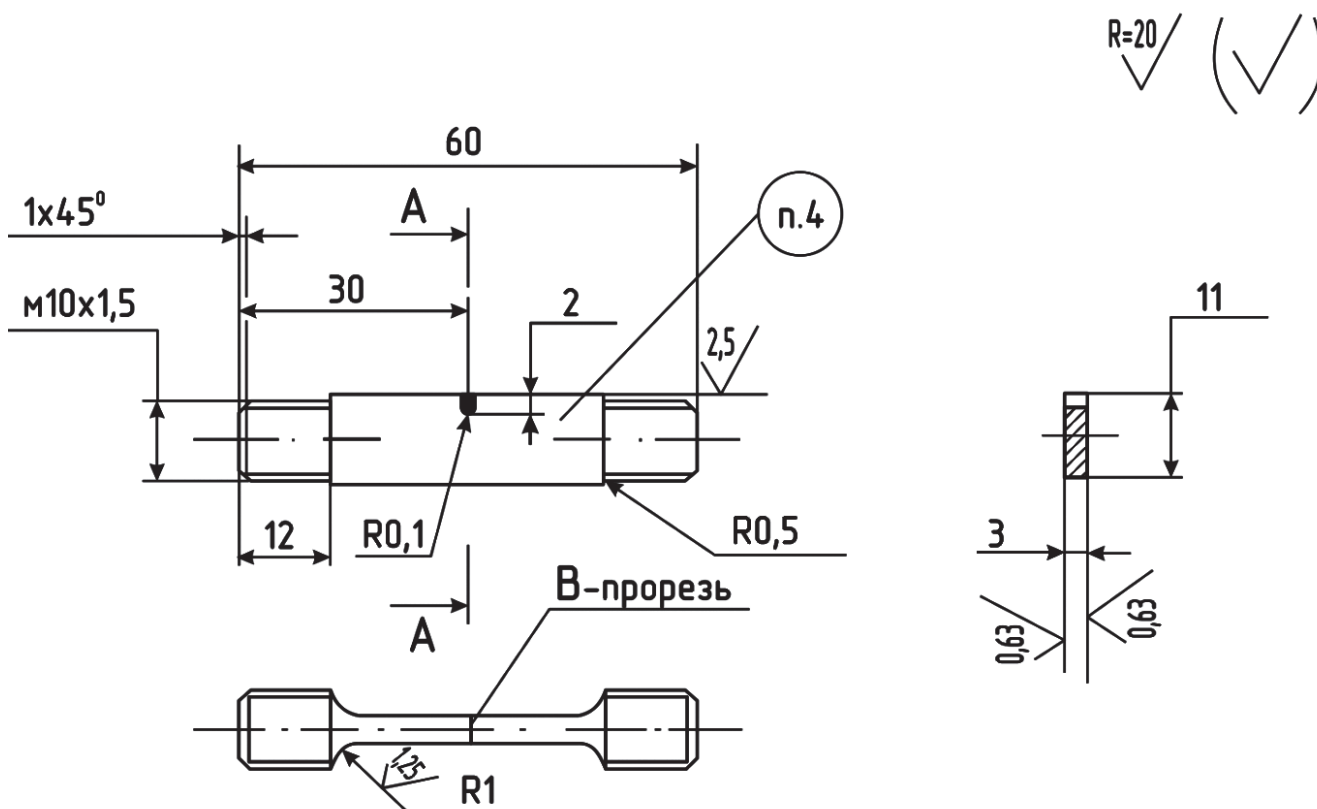


Рис. 3. Чертеж образцов для испытаний на циклическую трещиностойкость по схеме пульсирующего растяжения

ростях роста усталостной трещины в лопатке в зависимости от уровня вибрационной нагруженности.

При исследовании разрушенных лопаток с целью установления причин их разрушений в эксплуатации важно установление конкретных микромеханизмов и стадийности РУТ в материале лопаток в зависимости от величины упругого КИН, наибольшее значение которого  $K_{\max}$  или размах  $\Delta K$  при известных ограничениях являются параметрами, определяющими механическое состояние в зоне предразрушения [7–9].

Фрактографический анализ эксплуатационных разрушений турбинных лопаток и образцов после механических испытаний проводили с применением оптической и сканирующей электронной микроскопии (рис. 2, 3). Сравнивалось строение усталостных изломов образцов и лопаток.

На основании проведенных фрактографических исследований и сопоставления их результатов с экспериментально полученными (рис. 4) и схематической КДУР (рис. 5) разработаны схемы и фрактографически проиллюстрированы стадии роста усталостной трещины и различные микромеханизмы разрушения на различных участках КДУР (рис. 6, 7) в материале образцов и лопаток.

В результате исследования усталостных изломов образцов и турбинных лопаток с применением оптической и электронной микроскопии в соответствии с тремя участками кинетической диаграммы выделены три фрактографически различающиеся стадии усталостного разрушения. При интерпретации строения микрорельефа поверхности исследуемых изломов полученные в работе фрактографические данные сопоставляли с моделями механизмов усталостного разрушения [7–16].

На стадии I (первый участок КДУР — левая ветвь до перелома на кривых (рис. 4) — доминирующей деталью микрорельефа является циклический скол (рис. 7, 8).

Плоскости фасеток циклического скола имеют высокую отражательную способность при наблюдении их с малыми увеличениями и расположены наклонно к направлению прикладываемых максимальных растягивающих напряжений. На фасетках циклического скола (рис. 8) выявляются ручьи-образные узоры микрорельефа поверхности излома; участки между линиями ручьиобразного узора достаточно плоские и гладкие, имеют ступенчатый характер и представляют собой разрушение по механизму сдвига (от действия касательных напряжений) цик-

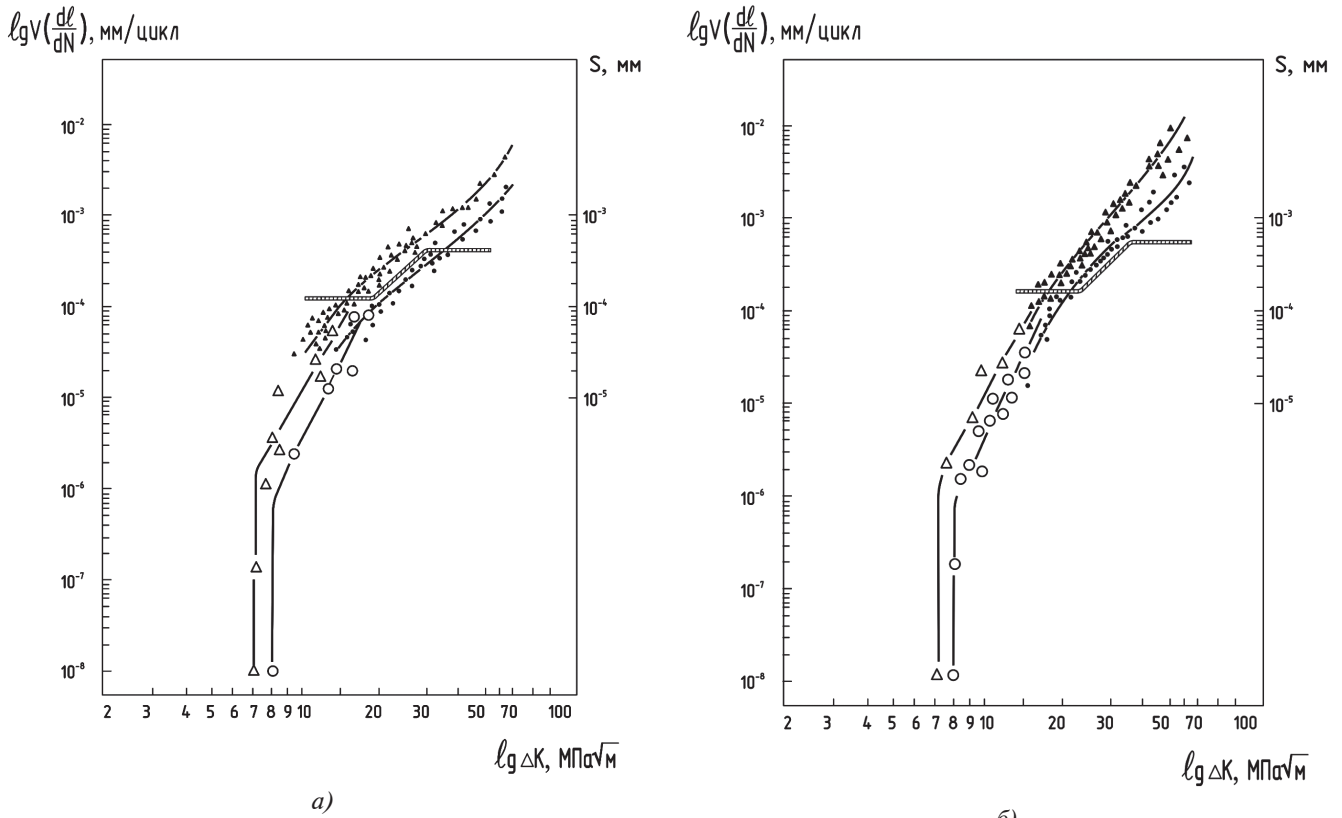
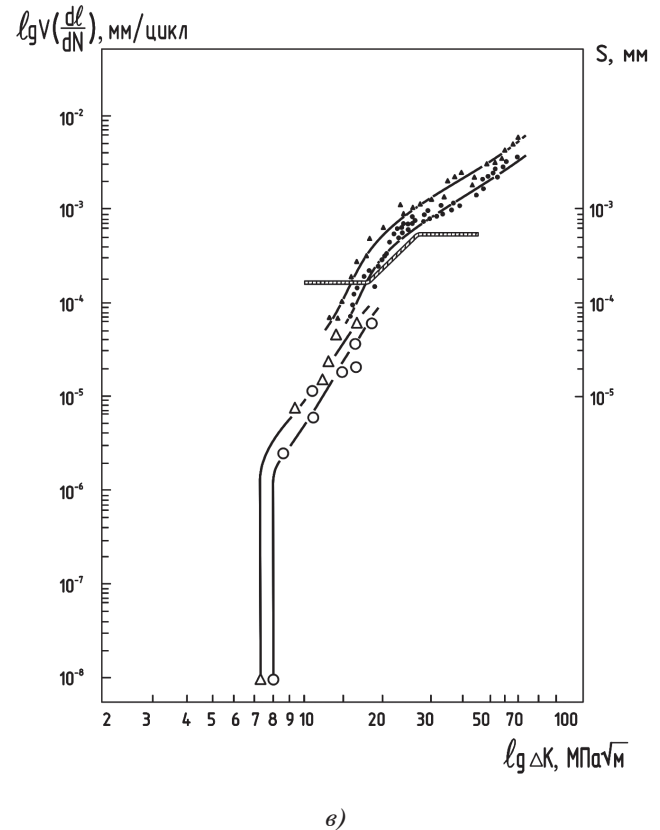


Рис. 4. Кинетические диаграммы усталостного разрушения при температуре 850 °С сплавов ВЖЛ12У (а), ЖС26 (б) и ЖС32 (в):  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$  —  $R = 0,35$ ;  $\circ$ ,  $\bullet$  —  $R = 0,15$ ;  $\Delta$ ,  $\circ$  — испытания образцов (см. рис. 2,а) на вибростенде (см. рис. 1,б);  $\blacktriangle$ ,  $\bullet$  — испытания образцов (см. рис. 3) по схеме пульсирующего растяжения (заштрихованная полоса — зависимость ширины усталостных бороздок от размаха КИН)

лический скол [10], на фасетках которого (характерно для конечного участка стадии I) выявлялся микрорельеф сдвигового характера (рис. 9), представляющий собой выход деформационных полос скольжения, которые выявляются и металлографически в микроструктуре материала (рис. 10).

Циклический скол (механизм сдвига по кристаллографическим плоскостям) необходимо отличать от статического скола по механизму отрыва (рис. 11), реализуемого при хрупком разрушении от действия статических растягивающих нагрузок, где узоры микрорельефа на поверхности фасеток являются гребнями отрыва.

Фасетки циклического скола, образовавшиеся по механизму сдвига по определенным кристаллографическим плоскостям в теле зерен, наблюдаются и в очагах усталостных эксплуатационных разрушений лопаток, изготовленных как из литейных (рис. 12), так и из деформируемых сплавов (рис. 13).



Линии ручьиного узора на поверхности излома по мере возрастания скорости РУТ постепенно исчезают, трещина начинает распространяться даже в одном зерне в нескольких плоскостях дей-

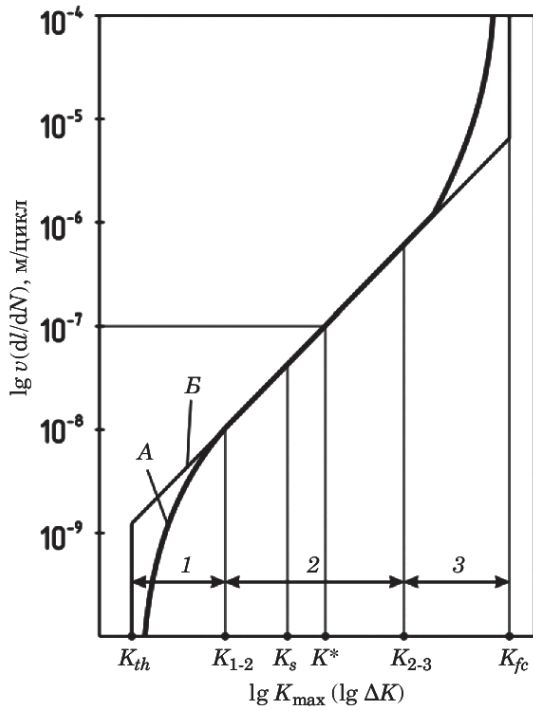


Рис. 5. Кинетическая диаграмма (А) усталостного разрушения (схема) и модель Париса (Б): 1, 3 – участки низких и высоких скоростей роста трещины; 2 – участок стабильного роста трещины (соответствующий справедливости формулы Париса);  $K_{th}$  – пороговый коэффициент интенсивности напряжений;  $K_{1-2}, K_{2-3}$  – значения  $K_{max}(\Delta K)$ , соответствующие началу и концу среднего участка 2 КДУР;  $K_{fc}$  – критический КИН при циклическом нагружении (предел циклической трещиностойкости);  $K^*$  – значение  $K_{max}(\Delta K)$ , соответствующее скорости роста трещины  $10^{-7}$  м/цикл;  $K_s$  – значение  $K_{max}(\Delta K)$ , соответствующее началу продвижения трещины за каждый цикл нагружения

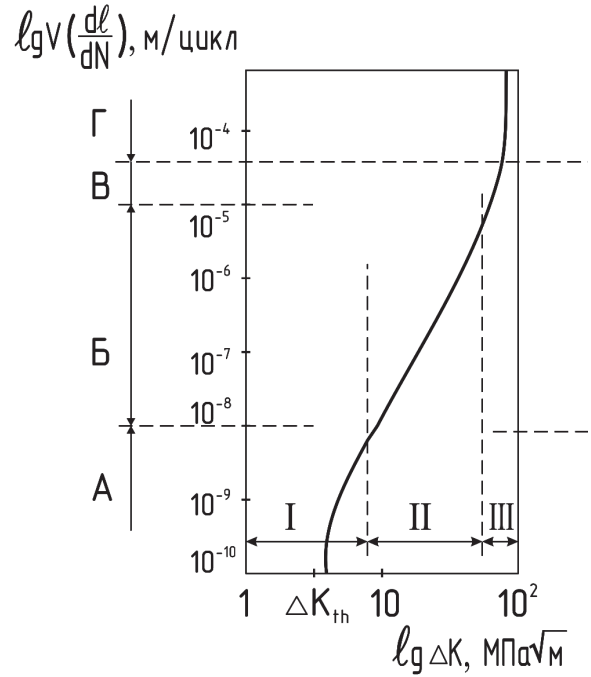


Рис. 6. Схема действия различных микромеханизмов разрушения на различных участках КДУР: А – разрушение по кристаллографическим плоскостям (плоскостям сдвига); Б – бороздчатость; В – смешанный микрорельеф (квазихрупкое разрушение по нескольким часто взаимно пересекающимся плоскостям в теле зерен, ямки, грубая бороздчатость со вторичным растрескиванием); Г – коалесценция микропор; I – пороговая область; II – область стабильного распространения усталостной трещины; III – нестабильное, критическое распространение усталостной трещины при определенном влиянии статического микромеханизма на развитие трещины

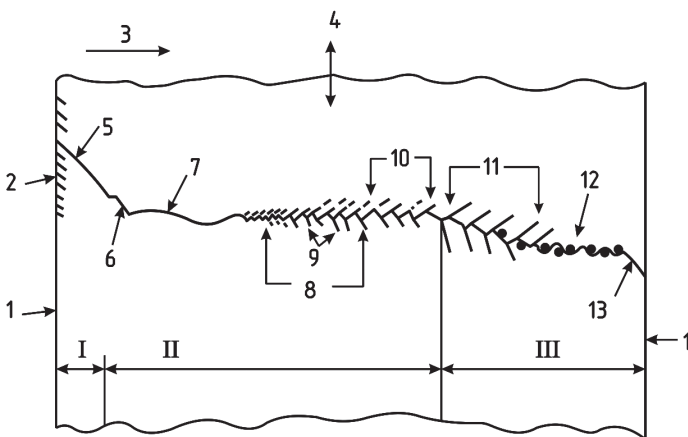
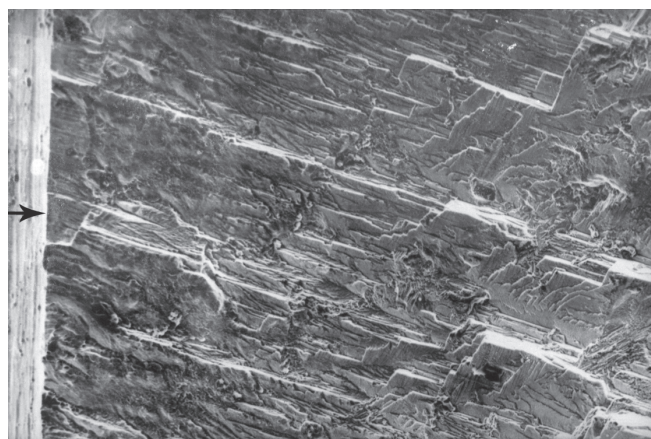
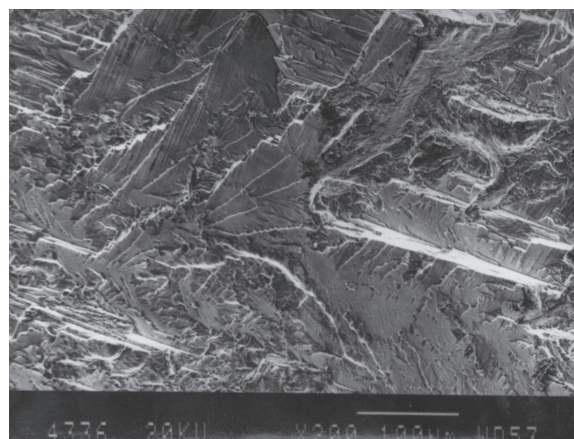


Рис. 7. Схема фрактографических стадий роста усталостной трещины в материале лопаток, связанных с соответствующими участками кинетической диаграммы усталостного разрушения на рис. 8, 9: I, II, III – стадии порогового, стабильного и нестабильного (соответственно) роста трещины: 1 – поверхность образца; 2 – полосы скольжения; 3 – главное направление роста

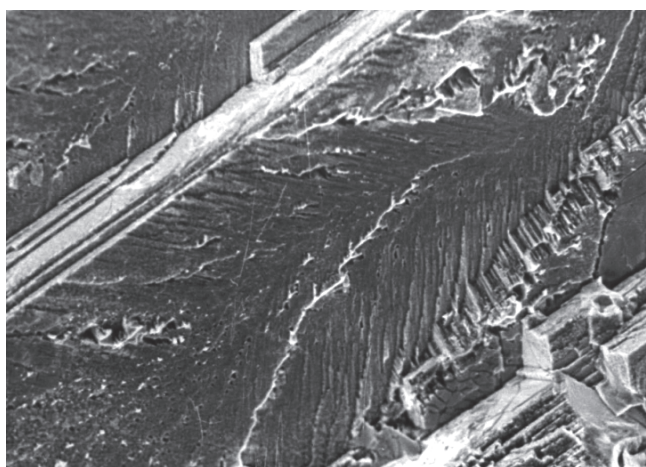
трещины; 4 – направление и действия максимальных растягивающих напряжений; 5 – рост трещины по плоскостям скольжения внутри зерна (циклический скол); 6 – комбинация плоскостей скольжения и квазискольжения трещинообразования; 7 – трещины квазискола с наличием участков развития трещины по механизму бороздкообразования; 8 – область разрушения с образованием пластических бороздок, ширина которых увеличивается с ростом длины трещины; 9 – пластические несплошности, отвечающие от поверхности излома; 10 – область грубых бороздок с неизменным шагом (иногда наблюдаются составные бороздки); 11 – преобладание квазихрупкого разрушения, развивающегося одновременно по нескольким взаимно пересекающимся плоскостям (наблюдаются участки расщепления материала, ямок и грубой бороздчатости); 12 – коалесценция микропор; 13 – окончательное разрушение срезом (под  $45^\circ$  к поверхности)



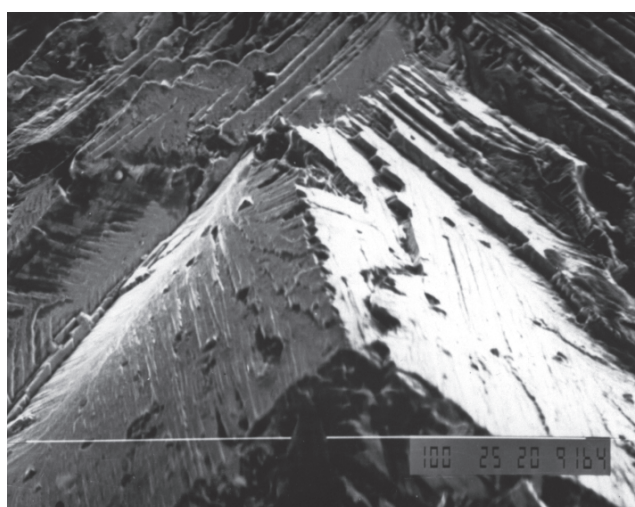
× 200  
а)



× 200  
б)



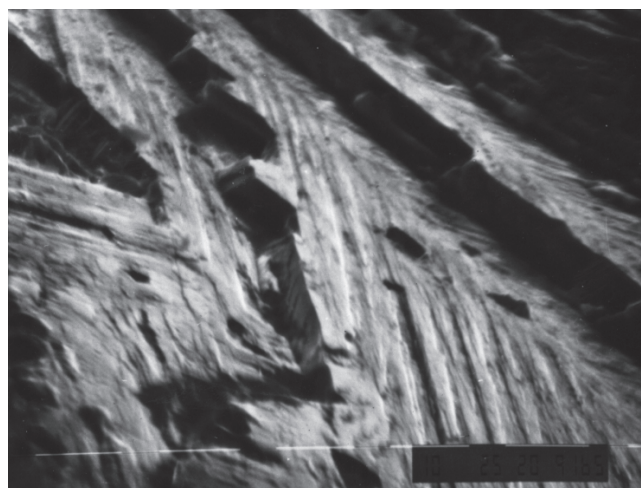
× 350  
в)



× 500  
г)

Рис. 8. Электронные фрактограммы микрорельефа фасеток циклического скола (образцы из сплавов: ЖС26НК – а; ЖС32НК – б; ЖС32моно[001] – в; ВЖЛ12У – г, д), характерные для стадии I усталостного разрушения, рис. 4–7 (механизм циклического сдвига по кристаллографическим плоскостям)

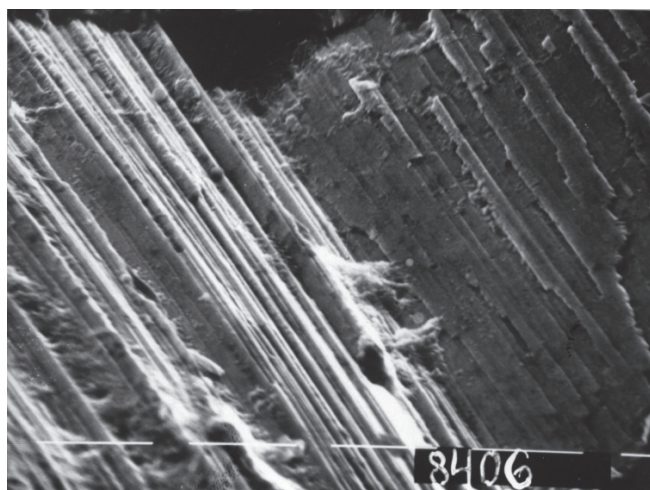
ствия максимальных касательных напряжений (см. рис. 8,г), трещина в этом случае распространяется как бы в трех измерениях. На фасетках циклического скола появляется довольно много ступенек, представляющих собой, как правило, соединение (слияние) трещин, распространяющихся по параллельным плоскостям (см. рис. 8,д). Обычно рисунок ступенек идет параллельно преобладающему направлению распространения трещины. Такое изменение строения поверхности излома свидетельствует о том, что увеличение скорости роста усталостной трещины сопровождается большим отбором подводимой энергии на образование поверхностей разрушения.



× 1500  
д)

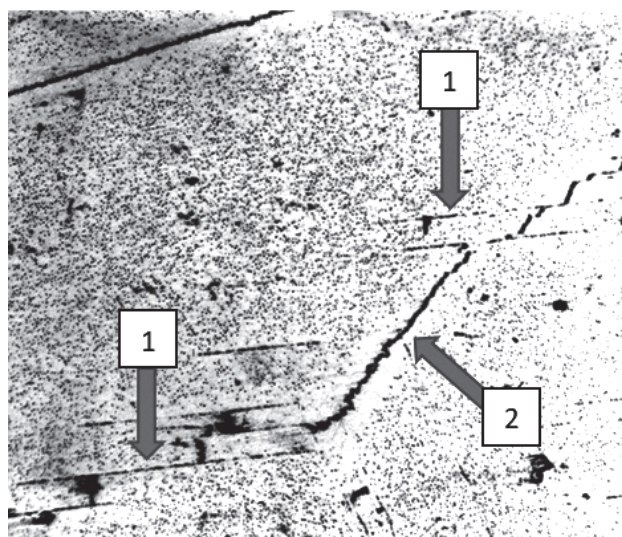
На фасетках сколов (плоскости фасеток располагаются, как правило, наклонно к оси лопатки) в очагах эксплуатационных усталостных разрушений лопаток иногда наблюдались макроусталостные линии (рис. 14), что характерно (установлено





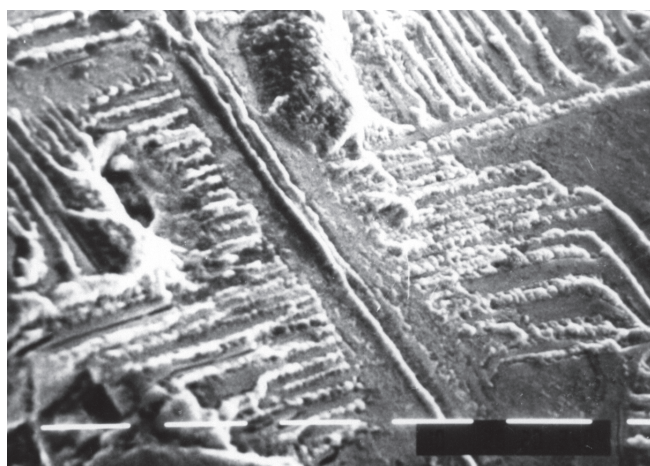
× 1500

Рис. 9. Электронная фрактограмма фасеток циклического скола с микрорельефом сдвигового характера – выходом деформационных полос скольжения вблизи места начала усталостного разрушения (выходная кромка пера) лопатки из деформируемого сплава ЭИ617



× 1000

Рис. 10. Пересечение полосами (плоскостями) скольжения (стрелки 1) границы зерна (стрелка 2) с образованием на ней ступенек в материале пера рабочей лопатки из сплава ЭП220 второй ступени турбины

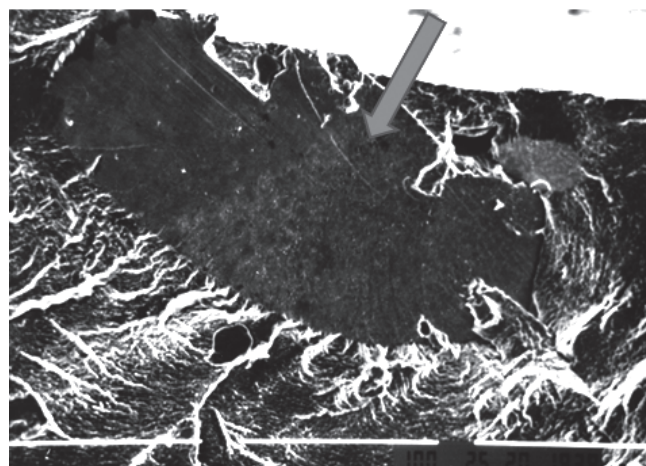


× 1500

Рис. 11. Электронная фрактограмма квазихрупкого микрорельефа с наличием внутризеренного расщепления материала по осям дендритов (соответствует окончанию стадии II – началу участка стадии III (рис. 4–7) развития усталостной трещины. Сплав ВЖЛ12У

при исследовании образцов) для развития усталостной в переходной зоне между I и II стадиями усталостного разрушения (см. рис. 4–7).

Распространение разрушения в зоне циклических сколов по определенным кристаллографическим плоскостям в теле зерен сменяется по мере развития усталостного разрушения на распространение в плоскости, ориентированной перпендикулярно к действующим максимальным растягивающим напряжениям, с образованием на поверхности излома микрорельефа с усталостными бороз-

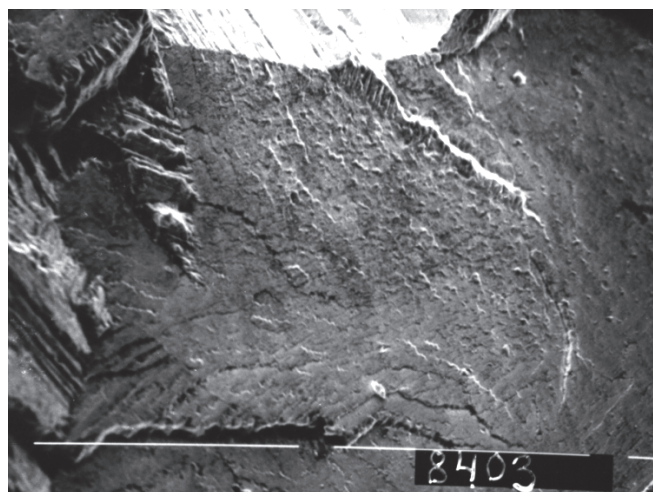


× 350

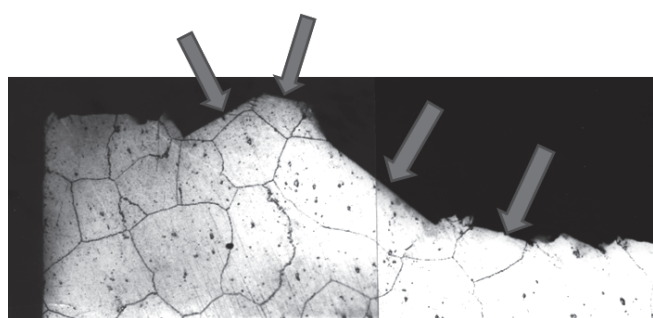
Рис. 12. Электронная фрактограмма участка поверхности излома лопатки из литейного сплава ЖС6К первой ступени турбины (равноосная кристаллизация) в зоне циклического скола (указан стрелкой) по телу зерна (рост трещины по плоскости скольжения внутри зерна в очаге усталостного разрушения – характерно для стадии I усталостного разрушения, рис. 4–7)

дками (рис. 15), микро- и макроусталостных линий (рис. 16, 17), что характерно для стадии II усталостного разрушения (см. рис. 5–7).

В зависимости от конкретных условий нагружения лопатки на двигателе стадия I усталостного разрушения иногда может затягиваться, и микрорельеф в виде циклического скола с развитием по определенным кристаллографическим плоскостям в теле зерен наблюдается на различных рас-

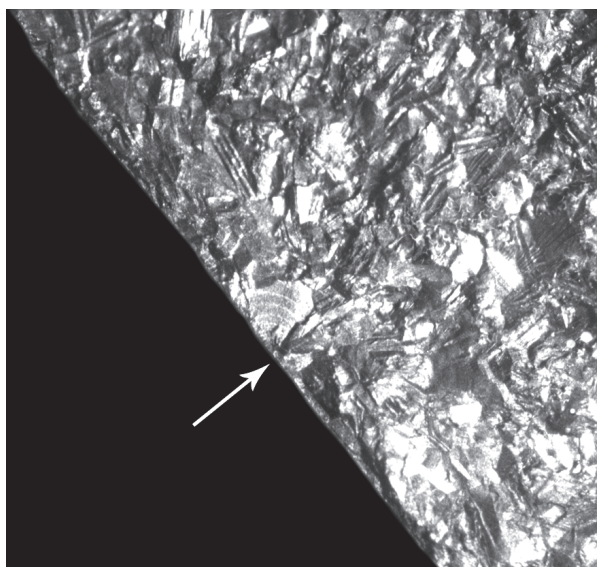


× 1000  
а)



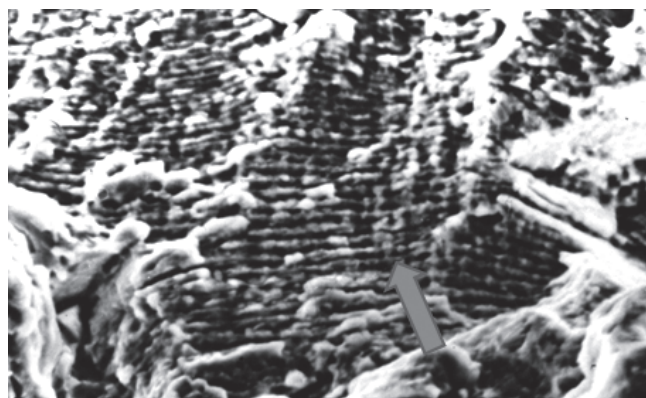
× 125  
б)

Рис. 13. Электронная фрактограмма фасеток циклического скола (а) и микроструктура материала (б) на шлифе (в плоскости перпендикулярной поверхности излома) вблизи места начала усталостного разрушения (выходная кромка пера) лопатки из деформируемого сплава ЭИ617. Стрелками указаны фасетки циклического скола



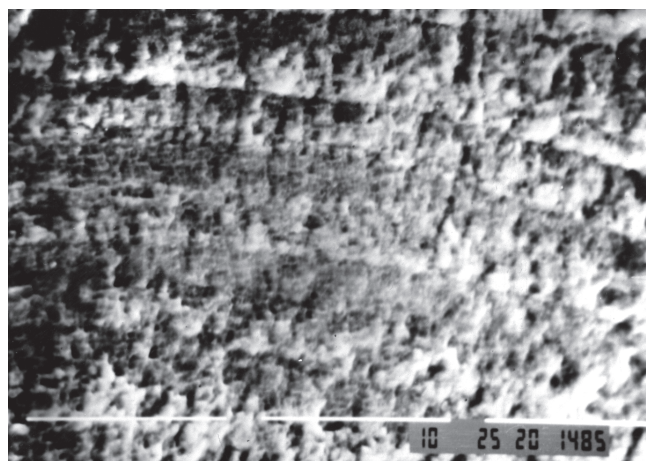
× 50

Рис. 14. Участок поверхности излома вблизи очага (указан стрелкой) усталостного разрушения по первому пазу хвостовика рабочей лопатки из деформируемого сплава ЭП109 третьей ступени турбины



× 3000

Рис. 15. Электронная фрактограмма бороздчатого микрорельефа (усталостные бороздки указаны стрелками) характерного для средней части второй стадии КДУР, (испытание образца — рис. 3 из сплава ЖС26 при температуре 850 °С и асимметрии цикла  $R = 0,15$  при пульсирующем растяжении, рис. 4,а)



× 3500

Рис. 16. Электронная фрактограмма участка поверхности излома с усталостными линиями вблизи места начала эксплуатационного усталостного разрушения по первому пазу хвостовика рабочей лопатки из литейного сплава ВЖЛ12У первой ступени турбины

стояниях от очага разрушения, в том числе и на значительном удалении от него, что объясняется особенностями резонансного нагружения лопаток, при котором по мере роста усталостной трещины, в связи с изменением жесткости лопатки, частота её собственных колебаний меняется. Это приводит к уменьшению амплитуды и уровня действующих переменных напряжений по мере роста трещины. В этих условиях КИН по мере роста трещины меняется незначительно, что и обуславливает затягивание стадии I роста усталостной трещины.

С другой стороны, при фрактографических исследованиях образцов после испытаний на виб-

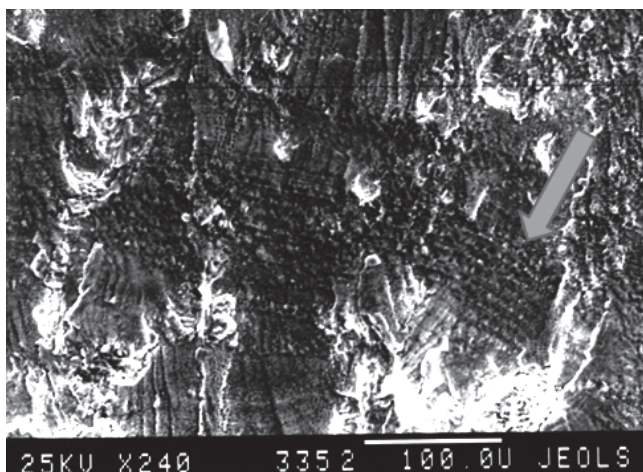


Рис. 17. Электронная фрактограмма участка поверхности излома с усталостными линиями — указаны стрелкой (испытание на вибростенде образца — рис. 2 из сплава ЖС32НК при температуре 850 °С и асимметрии цикла  $R = 0,15$ )

ростенде, а также при исследовании эксплуатационных разрушений наблюдалось, что с увеличением амплитуды разрушающих вибрационных напряжений протяженность фасеток сколов уменьшается или даже вообще эта стадия отсутствует. При этом усталостное разрушение сразу начинало развиваться с образования бороздчатого рельефа (см. рис. 15), усталостных линий (см. рис. 16, 17) нередко сразу в нескольких плоскостях со ступеньками между ними и с образованием нескольких очагов.

Стадия II стабильного роста, имеющая место на прямолинейном участке КДУР, характеризуется распространением трещины нормально приложенному напряжению и контролируется механикой сплошной среды. К началу стадии II формируется трещина такой длины, что она становится концентратором напряжений, т.е. способна формировать свою собственную зону пластической деформации.

Рассматриваемая стадия усталостного разрушения включает в себя несколько фрактографических участков, характеризующихся особенностями формирующегося микрорельефа. На участке, прилегающем к стадии I усталостного разрушения (см. рис. 6, 7), имеет место микрорельеф с комбинацией плоскостей скольжения (циклического скола) и квазискольного трещинообразования, с последующим переходом к распространению трещины путем квазискола. На отдельных участках могут наблюдаться усталостные бороздки.

В конце стадии II — на начальном участке стадии III, рис. 4—7, бороздчатость имеет специфич-

еский вид с наличием явно выраженного вторичного растрескивания (см. рис. 7), наблюдается значительная доля участков квазихрупкого микрорельефа с фасетками, расположенными во взаимно пересекающихся плоскостях (рис. 18), с наличием квазихрупкого внутризеренного расщепления материала по осям дендритов (см. рис. 11).

При высоких интенсивностях напряжений, достигаемых на стадии III, происходит нестабильный рост трещины, для которого характерны расщепление материала, рост пор, их коалесценция.

Окончательное разрушение на стадии III происходит в процессе коалесценции микропор с образованием преимущественно вязкоямочного микрорельефа.

Таким образом, представления и терминология, отвечающие стадии I распространения трещин по Форсайту [17], которые первоначально использовались для описания усталости гладких образцов, в той же степени применимы для контролируемого низким напряжением роста уже существующих трещин. В этом случае стадия I роста трещины должна (могла бы) быть опущена, но она имеет место при распространении трещины в области порога трещиностойкости. На стадии I (при низких напряжениях, низких КИН) рост усталостных трещин происходит вдоль определенных кристаллографических плоскостей путем коалесценции отдельных микротрещин, возникающих в плоскостях скольжения. Указанные плоскости скольжения являются плоскостями с индексами (111) [18]. Развитие трещины на этой стадии в одной из систем скольжения свидетельствует о сильной локализации деформации и предопределяет упругое раскрытие трещины.

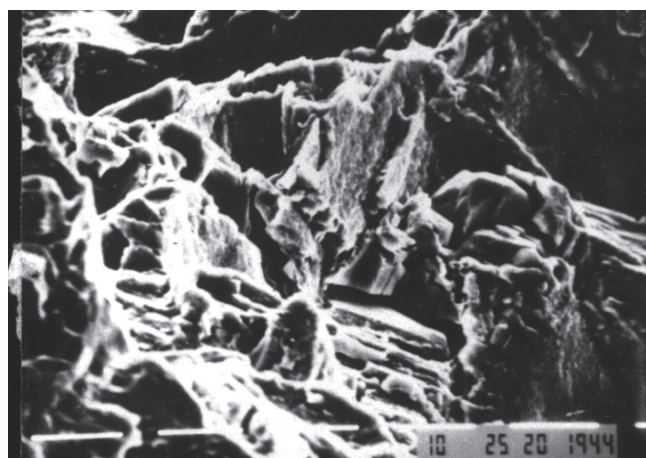


Рис. 18. Электронные фрактограммы участков поверхности изломов, характерные для окончания стадии II — начального участка стадии III (рис. 4—7) развития усталостной трещины. Образец сплава ЖС26НК ( $a$ ,  $x1500$ ), испытанный на вибростенде (рис. 2)

Поскольку в области малых нагрузок описанный механизм разрушения почти полностью вытесняет все другие механизмы, он должен определять уровень порогового КИН ( $K_{th}$ ), ниже которого трещина остается неподвижной. Эта важная характеристика имеет фундаментальное значение, так как она определяет предел способности материала сопротивляться усталостному разрушению и непосредственно относится к пределу выносливости материала.

Многие авторы используют измерение шага усталостных бороздок для определения длительности (скорости) развития усталостной трещины [19, 20]. Многочисленные исследования отечественных и зарубежных авторов показывают, что в диапазоне скоростей развития усталостной трещины от 0,1 до 2 мкм/цикл каждая микробороздка соответствует одному циклу нагружения. При этом считают, что шаг бороздки отвечает размеру микрозоны пластической деформации, в пределах которой была исчерпана пластичность, что обуславливает продвижение трещины на величину, равную размеру этой зоны [21]. В этом случае для определения длительности развития усталостной трещины в принципе достаточно получить зависимость выявленных значений шага микробороздок от длины трещины и по этим данным вычислить число микробороздок (циклов нагружения), расположенных на исследуемом участке излома.

В исследовании для повышения достоверности определения длительности развития усталостной трещины применительно к сплавам ВЖЛ12У, ЖС26, ЖС32 информацию об интервале совпадения макро- и микроскоростей роста усталостной трещины получили совмещением КДУР с зависимостью ширины усталостных бороздок от размаха КИН, построенной по результатам микрофрактографического анализа (см. рис. 4).

Измерением ширины бороздок (см. рис. 4) установлено, что при среднем расстоянии между ними  $S \approx 2 \cdot 10^{-4}$  мм ширина бороздок с изменением  $\Delta K$  почти не меняется. Скорость роста трещины, оцененная по расстоянию между рассматриваемыми бороздками в этом интервале, дает значительно большие значения по сравнению с ее значениями при макроскопических измерениях.

В области высоких значений  $\Delta K$  и макроскорости роста усталостной трещины ширина бороздок также почти постоянна ( $7 \dots 8 \cdot 10^{-4}$  мм), причем в этом диапазоне макроскорость роста усталостной трещины превышает значение шага усталостных бороздок.

Совпадение макро- и микроскорости роста усталостной трещины наблюдается между указанными диапазонами постоянства шага усталостных бороздок при значениях амплитуды интенсивности напряжений около  $18 \dots 38$  МПа $\cdot$ м<sup>1/2</sup> (заштрихованная полоса графика на рис. 4).

Установлено, что совпадение макро- и микроскорости роста усталостной трещины имеет место в интервале от  $5 \cdot 10^{-8}$  до  $10^{-6}$  мм/цикл (см. рис. 4). Это дает возможность при диагностике эксплуатационных разрушений лопаток из перечисленных сплавов оценить длительность развития усталостной трещины в указанном диапазоне скоростей ее роста вести путем непосредственного интегрирования числа бороздок на соответствующем участке излома.

Таким образом, при исследовании механизмов и кинетики развития усталостных трещин в материале лопаток и образцов из сплавов ВЖЛ12У, ЖС26, ЖС32 установлено, что фрактографическими критериями, характеризующими условия нагруженности материала и скорость роста усталостной трещины, являются доминирование на поверхности излома следующих элементов микростроения:

— циклический скол (рост трещины по плоскостям скольжения — кристаллографическим плоскостям) в диапазоне:

макроскоростей роста  $10^{-7} \leq V \leq 10^{-5}$  мм/цикл,  
нагруженности  $7 \leq \Delta K \leq 10$  МПа $\cdot$ м<sup>1/2</sup>;

— усталостные бороздки в диапазоне:

макроскоростей роста  $5 \cdot 10^{-5} \leq V \leq 10^{-3}$  мм/цикл,  
нагруженности  $14 \leq \Delta K \leq 38$  МПа $\cdot$ м<sup>1/2</sup>;

— смешанный микрорельеф (появление наряду с усталостным грубобороздчатым со вторичным растрескиванием статических микрорельефов квазихрупкого разрушения и коалесценции микропор с образованием ямочного микрорельефа) в диапазоне:

макроскоростей роста  $10^{-3} \leq V \leq 10^{-2}$  мм/цикл,  
нагруженности  $40 \leq \Delta K \leq 60$  МПа $\cdot$ м<sup>1/2</sup>.

Результаты фрактографических исследований особенностей усталостного механизма разрушения, соответствующих отдельным участкам КДУР (см. рис. 4), позволяют судить об условиях нагруженности, вызывающих продвижение усталостной трещины, и скорости ее развития в материале турбинных лопаток.

Полученные результаты о длительности развития усталостной трещины в материале лопаток в зависимости от уровня переменных напряжений свидетельствуют о необходимости дифференцированного подхода к контролю технического состо-

яния лопаток в зависимости от их вибрационной нагруженности.

### Выводы

Результаты диагностики эксплуатационных разрушений рабочих турбинных лопаток авиационных двигателей, исследование кинетики роста усталостных трещин в их материале, определение характеристик его трещиностойкости позволили получить новые знания о циклической нагруженности, работоспособности, живучести турбинных лопаток, скорости роста усталостных трещин в реальных условиях эксплуатации, установить причины эксплуатационных разрушений и разработать рекомендации по их предотвращению.

Использование результатов диагностики эксплуатационных разрушений рабочих лопаток турбин, учет и анализ полученного таким путем опыта эксплуатации при проектировании, создании и доводке авиационных двигателей является необходимым условием обеспечения высокой надежности лопаток турбин, определяющих ресурс авиационного газотурбинного двигателя.

Результаты работы могут быть использованы для разработки более совершенных модификаций лопаток турбин высокой надежности.

### Библиографический список

1. *Киселев Ф.Д.* Диагностика разрушений и оценка эксплуатационной работоспособности рабочих турбинных лопаток авиационных двигателей: Монография. — М.: Изд-во МАТИ, 2013. — 296 с.
2. *Магеррамова Л.А., Васильев Б.Е.* Влияние ориентации монокристалла на напряженно-деформированное состояние и прочность лопаток газовых турбин // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 5. С. 89-97.
3. *Авдеев А.В., Хомяков А.М.* К методологии расчетов и нормирования запасов прочности деталей двигателя // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 2. С. 112-120.
4. *Киселев Ф.Д.* Практические рекомендации по диагностике разрушений рабочих лопаток турбин ГТД // Авиационная промышленность. 2017. № 4. С. 53–58.
5. *Петухов А.Н., Киселев Ф.Д.* Диагностика эксплуатационных разрушений турбинных лопаток авиационных двигателей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 3. С. 41–51. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-3-41-51
6. РД 50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. — М.: Изд-во Стандартов, 1983. — 96 с.
7. *Броек Д.* Основы механики разрушения / Пер. с англ. — М.: Высшая школа, 1980. — 368 с.
8. *Махутов Н.А.* Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. — М.: Машиностроение, 1981. — 272 с.
9. *Партон В.З., Морозов Е.М.* Механика упругопластического разрушения. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука, 1985. — 504 с.
10. *Владимиров В.И.* Физическая природа разрушения металлов. — М.: Машиностроение, 1984. — 280 с.
11. *Фридман Я.Б.* Механические свойства металлов. Т.1. Деформация и разрушение: Монография. — М.: Машиностроение, 1972. — 472 с.
12. *Иванова В.С.* Механизмы разрушения, структура и трещиностойкость конструкционных материалов // Проблемы прочности. 1985. № 10. С. 96-102.
13. *Энгель Л., Клингеле М.* Растровая электронная микроскопия. Разрушение: Справочник / Пер. с нем. Б.Е. Левина; Под ред. М. Л. Бернштейна. — М.: Металлургия, 1986. — 232 с.
14. *Иванова В.С., Шанявский А.А.* Количественная фрактография. Усталостное разрушение. — Челябинск: Металлургия, 1988. — 400 с.
15. *Ботвина Л.Р.* Разрушение: кинематика, механизмы, общие закономерности. — М.: Наука, 2008. — 334 с.
16. *Феллоуз Дж.* (ред.) Фрактография и атлас фрактограмм: Справочник / Пер. с англ. М.Л. Бернштейна. — М.: Металлургия, 1982. — 489 с.
17. *Forsyth P.J.E.* A two stage process of fatigue crack growth // Symposium on Crack Propagation. Cronfield. 1961. Vol. 1, pp. 76-94.
18. *Weicheng Y., Jincal Y., Zhongguang W.* A study of fatigue fracture surfaces of a cast nickel-base superalloy // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 1987. Vol. 9. No. 6, pp. 425–434. DOI: 10.1111/j.1460-2695.1987.tb00469.x
19. *Екименков Л.И.* Определение скорости развития усталостных трещин методом количественной фрактографии // Стандартизация расчетов и испытаний на прочность. Вып. 5. — М.: Изд-во стандартов, 1984. С. 67-73.
20. *Ботвина Л.Р.* Кинетика разрушения конструкционных материалов: Учебник. — М.: Наука, 1989. — 230 с.

## FRACTURE DIAGNOSTICS AND OPERATIONAL WORKABILITY EVALUATION OF WORKING TURBINE BLADES OF AIRCRAFT ENGINE

Kiselev F.D.

*Air Force Central Research Institute of the Ministry of Defense of the Russian Federation,  
2-5, Aerodromnaya str., Shchelkovo, Moscow region, 141103, Russia  
e-mail: kiselev\_fd@mail.ru*

### Abstract

The topmost constituent part of the study on determining the cause parts of destruction of the aircraft in operation is fracture diagnostics employing the methods of physics-of-metals analysis of the fracture structure, material structure and composition determining, defect detection control, mechanical properties characterization, parts strength and survivability analysis.

Diagnostics of aircraft turbine blades operational fractures was performed, factors contributing to destruction were revealed, and causes of blades destruction were established. The article considers operational damageability specifics, on frequent occasions differing from the test bench ones, the systematization results of loading types, fracture mechanism, and operational fractures of gas turbine engine blades.

Methodical aspects were developed and new techniques were elaborated for fracture diagnostics were developed. The article systematizes external, fractographic and metallographic signs of diagnostics characteristic to anomalous (abnormal) modes of the engine functioning and a blade fracture at normal aircraft engine functioning (operating parameters did not outrun the operational limitations). The suggested classification allows determining blades fractures while operative diagnostics with account for joint action of static, vibration and thermal stresses in the blade material. It helps identifying blades fractures by the operational fractures types and revealing thermo-loading factors, determining the fracture mechanism, outlining it from all set of mechanical and thermal loadings acting on the blade.

The article presents the results of experimental studies of cyclic crack resistance of the blade made of VZHL12U (equiaxial crystallization) and ZHS26, ZHS32 (directional crystallization and single-crystal version correspondingly) alloys. Characterization of the blades material resistance to fatigue destruction with kinetic diagrams plotting (dependence of the crack growth rate on the stress intensity factor) was performed at the temperature of 850°C with samples loading on the vibro-bench. Eigen oscillations

frequencies of the samples were of 70–120 Hz. Pulsating stretching scheme with the frequency of 50 Hz was used as well. The values of the cycle asymmetry coefficient in both cases were 0.15 and 0.35.

According to the results of high-temperature test and fatigue crack growth rate measuring on the samples from the above said alloys, kinematic diagrams of fatigue destruction, i.e. dependence of fatigue crack growth rate on stresses intensity coefficient values were plotted.

Based on the conducted fractographic studies and their results comparison with experimentally obtained ones and schematic kinetic diagram of fatigue destruction the schemes are developed; fractographically illustrated stages of fatigue crack growth and various fracture micromechanisms at different sites of the kinetic diagram of fatigue fracture in the material of the samples and blades.

The results of the work can be applied for developing more advanced modifications of turbine blades of high reliability.

**Keywords:** turbine blades of aircraft engines, destruction diagnostics, fatigue strength, stress concentrators, stress concentrators effect, growth rate of fatigue crack, stress intensity factor, threshold and limit of cyclic crack resistance.

### References

1. Kiselev F.D. *Diagnostika razrushenii i otsenka ekspluatatsionnoi rabotosposobnosti rabochikh turbinnykh lopatok aviatsionnykh dvigatelei* (Diagnostics of fractures and assessment of operational efficiency of working turbine blades of aircraft engines), Moscow, MATI, 2013, 296 p.
2. Magerramova L.A., Vasil'ev B.E. The influence of crystal orientation on the stress-strain state and strength of a turbine blade. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 5, pp. 89-97.
3. Avdeev A.V., Homjakov A.M. On the calculating and normalizing safety factors for different parts of the rocket engine. *Aerospace MAI Journal*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 112-120.
4. Kiselev F.D. *Aviatsionnaya promyshlennost'*, 2017, no. 4, pp. 53–58.

5. Petukhov A.N., Kiselev F.D. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2019, vol. 85, no. 3, pp. 41–51. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-3-41-51
6. RD 50-345-82. *Metodicheskie ukazaniya. Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody mekhanicheskikh ispytanii metallov. Opredelenie kharakteristik treshchinostoikosti (vyazkosti razrusheniya) pri tsiklicheskom nagruzhении* (Instructional guidelines. Calculations and strength tests. Methods of mechanical tests of metals. Crack growth resistance characteristics determination (destruction viscosity) under cyclic loading. RD 50-345-82), Moscow, Standarty, 1983, 96 p.
7. Broek D. *Osnovy mekhaniki razrusheniya* (Fundamentals of fracture mechanics), Moscow, Vysshaya shkola, 1980, 368 p.
8. Makhutov N.A. *Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruksii na prochnost'* (Deformation criteria of destruction and structural elements calculation for strength), Moscow, Mashinostroenie, 1981, 272 p.
9. Parton V.Z., Morozov E.M. *Mekhanika uprugoplasticheskogo razrusheniya* (Mechanics of elastoplastic fracture), Moscow, Nauka, 1985, 504 p.
10. Vladimirov V.I. *Fizicheskaya priroda razrusheniya metallov* (Physical nature of fracture of metals), Moscow, Mashinostroenie, 1984, 280 p.
11. Fridman Ya.B. *Mekhanicheskie svoistva metallov. T.1. Deformatsiya i razrushenie* (Mechanical properties of metals. Vol.1. Deformation and fracture), Moscow, Mashinostroenie, 1972, 472 p.
12. Ivanova V.S. *Problemy prochnosti*, 1985, no. 10, pp. 96-102.
13. Engel' L., Klingele M. *Rastrovaya elektronnyaya mikroskopiya. Razrushenie: spravochnik* (Scanning electron microscopy. Destruction), Moscow, Metallurgiya, 1986, 232 p.
14. Ivanova V.S., Shanyavskii A.A. *Kolichestvennaya fraktografiya: Ustalostnoe razrushenie* (Quantitative fractography: Fatigue failure), Chelyabinsk, Metallurgiya, 1988, 400 p.
15. Botvina L.R. *Razrushenie: kinematika, mekhanizmy, obshchie zakonomernosti* (Destruction: kinematics, mechanisms, General regularities), Moscow, Nauka, 2008, 334 p.
16. Fellouz Dzh. (red.) *Fraktografiya i atlas fraktogramm: Spravochnik* (Fractography and Atlas of fractograms), Moscow, Metallurgiya, 1982, 489 p.
17. Forsyth P.J.E. A two-stage process of fatigue crack growth. *Symposium on Crack Propagation. Cronfield*, 1961, vol. 1, pp. 76-94.
18. Weicheng Y., Jincai Y., Zhongguang W. A study of fatigue fracture surfaces of a cast nickel-base superalloy. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 1987, vol. 9, no. 6, pp. 425-434. DOI: 10.1111/j.1460-2695.1987.tb00469.x
19. Ekimenkov L.I. *Standartizatsiya raschetov i ispytanii na prochnost'*, Moscow, Standarty, 1984, no. 5, pp. 67-73.
20. Botvina L.R. *Kinetika razrusheniya konstruktsionnykh materialov* (Kinetics of structural materials destruction), Moscow, Nauka, 1989, 230 p.