

МНОГОМАСШТАБНАЯ КОМПЛЕКСНАЯ ФРАКТОДИАГНОСТИКА РАЗРУШЕНИЯ ДИСКОВ КОМПРЕССОРА АВИАДВИГАТЕЛЕЙ

© 2010 Н. В. Туманов¹, А. М. Портер², М. А. Лаврентьева¹, С. А. Черкасова¹,
Н. А. Воробьёва¹, Д. П. Лёшин²

¹ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г. Москва,
²ОАО «НПО «Сатурн», г. Рыбинск

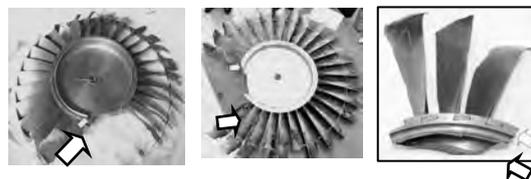
Проведены расчётные и фрактографические исследования трещин, развитие которых привело к разрушению дисков компрессора авиадвигателей. Определены очаги, характер и продолжительность развития разрушения. Результаты фрактодиагностики подтверждены данными прямых наблюдений за ростом трещины в процессе циклических испытаний диска по типовому полётному циклу.

Малоцикловая усталость, кинетика усталостных трещин, электронная фрактография, конечно-элементное моделирование трещин.

Введение

В течение 2008-2009 гг. произошли три аналогичных случая разрушения дисков 1-й ступени компрессора низкого давления (КНД) одинаковой конструкции (материал дисков – титановый сплав ВТЗ-1). На рис. 1 представлены фрагменты разрушенных дисков 1-й ступени КНД (вид со стороны потока, стрелка – область зарождения трещины). В настоящей работе кратко изложены результаты исследования процесса разрушения каждого диска. Целью исследования являлось определение очагов, характера и продолжительности разрушения. Исследования носили комплексный многомасштабный характер и включали:

- моделирование напряжённого состояния диска (неповреждённого и с трещинами различной конфигурации),
- электронно-микроскопическое фрактографическое реконструирование процесса развития трещин в условиях эксплуатации и при испытаниях диска по типовому полётному циклу,
- непосредственное наблюдение за ростом трещины во время этих испытаний.



а б в
Рис.1. Фрагменты разрушенных дисков
а – диск 1, б – диск 2, в – диск 3

Исследование процесса разрушения дисков

Конечно-элементная модель фрагмента рабочего колеса, состоящая из сектора диска с двумя лопатками и присоединёнными к ним фрагментами бандажных полок соседних лопаток, приведена на рис. 2. При построении конечно-элементной сетки использовались объёмные элементы 1-го порядка в основной и вырожденной формах. Для моделирования контактного взаимодействия между деталями модели применялись специальные контактные элементы. Области контактов показаны на рис.2, б.

Расчёт проводился на взлётном режиме при следующих граничных условиях и нагрузках:

1. На боковых поверхностях сектора рабочего колеса задавались условия циклической симметрии.

2. В месте перехода диска к валу ограничивались перемещения в осевом направлении.

3. Осевые перемещения на выступающей части заднего торца составляли 0.8 мм (имитация условий сборки ротора).

4. Перемещение хвостовика лопатки вдоль замкового паза диска ограничивалось фиксатором.

5. Задавались центробежная сила, вызванная вращением диска и лопаток с бандажными полками, и нагрузка от газовых сил на профильную часть лопаток в виде осевого и окружного компонентов.

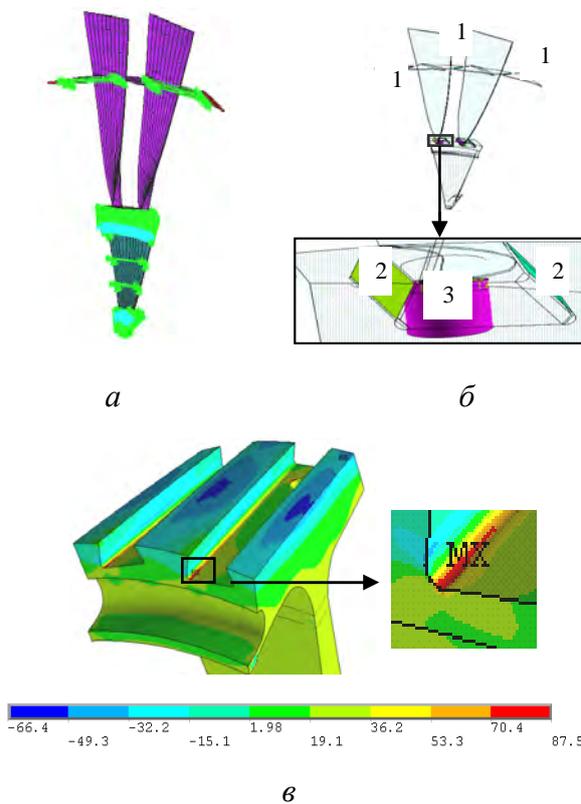


Рис.2. Моделирование напряжённого состояния диска

а - конечно-элементная модель рабочего колеса 1-й ступени КНД,

б - контактные грани в модели

1 контакты по бандажным полкам

2 контакты по боковой поверхности паза

3 контакты по фиксатору

в - распределение окружных напряжений, кгс/мм², в ободе диска (вид со стороны выхода потока)

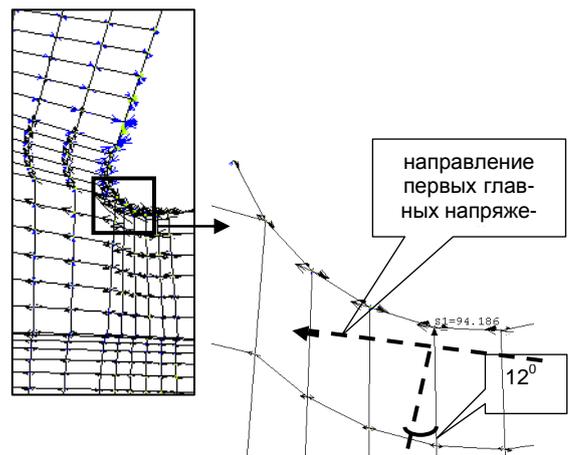


Рис.3. Поле направлений первых главных напряжений в критической зоне диска 1-й ступени КНД (см. рис.2в) и ориентация первой главной площадки в месте максимума окружных напряжений

Распределение окружных напряжений в колесе приведены на рис. 2, в: наиболее напряжённая (критическая) зона располагается у заднего торца обода в области перехода поверхности дна паза под лопатку к боковой поверхности межпазового выступа. Поле направлений первых главных напряжений в этой зоне показано на рис. 3: в точке максимума окружных напряжений первая главная площадка располагается под углом 12° к меридиональному сечению диска.

При моделировании напряжённого состояния диска с трещиной конфигурация фронтов устанавливалась на основании данных фрактографического анализа и отражала эволюцию фронта трещины при ее развитии. Фронты моделировались в виде фрагментов эллипсов; в окрестности каждого фронта создавался слой призматических элементов с характерным размером $0,05l$, где l – глубина трещины (рис. 4).

Значения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в различных точках фронта трещины рассчитывались прямым методом напряжений [1], а соответствующие величины шага бороздок S – по формуле [2-4]

$$S = 10 \left(\frac{\Delta K}{E} \right)^2, \quad (1)$$

где

ΔK – размах КИН в цикле нагружения 0-М-0 (М – режим с максимальной частотой вращения КНД),

E – модуль Юнга.

Формула (1) описывает устойчивый рост трещин малоциклового усталости (МЦУ), когда высокоэнергетичный механизм периодического расслаивания-разрыва (МПРР) [2], приводящий к образованию усталостных бороздок на поверхности разрушения, действует вдоль всего фронта трещины. В случае смешанного микрорельефа поверхности разрушения типа «микросколы + бороздки» фор-

мула (1) может использоваться для приближённых расчётных оценок величины S на начальном этапе развития трещин МЦУ.

Моделирование напряжённого состояния детали (неповрежденной и с развивающейся трещиной) с целью определения критических зон, ориентации первой главной площадки в этих зонах и оценки шага усталостных бороздок является важным элементом фрактодиагностики. Сравнение результатов моделирования с местоположением очага разрушения и ориентацией поверхности излома вблизи очага, а также с измеренными значениями шага бороздок позволяет определить характер разрушения и уровень переменных напряжений.

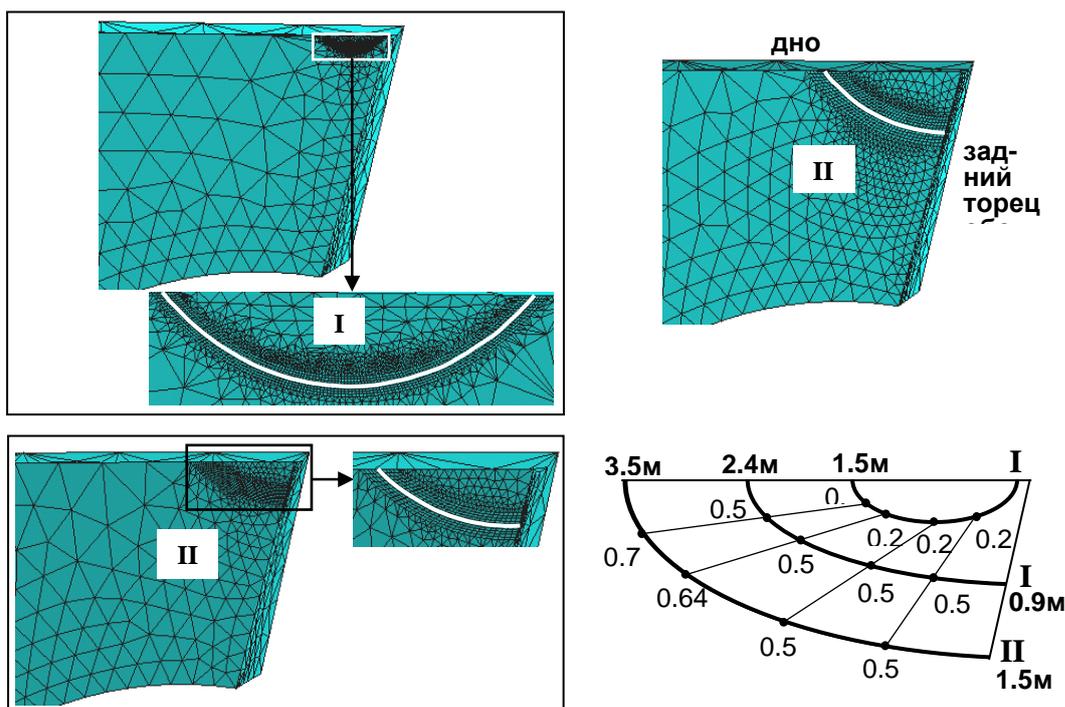


Рис.4. Фрагменты конечно-элементных моделей диска 1-й ступени КНД с трещинами (фронты I-III отражают эволюцию фронта реальной трещины на начальном этапе её развития) и расчётные значения шага бороздок, мкм, в различных точках фронта (указаны размеры трещин на поверхности дна паза и заднего торца обода)

Поверхности излома и дна паза в области очагов разрушения повреждены у всех трех дисков. Наименее поврежден-

ной является зона очагов в диске 1 (рис. 5 и 6). На основании исследования микрорельефа излома вблизи границы повреж-

дённой области было установлено, что очаги разрушения располагаются в области перехода дна паза к боковой поверхности межпазового выступа на поверхности дна паза на расстоянии 0,5–1,2 мм от заднего торца обода, т.е. в зоне максимальных окружных напряжений (см. рис.2. в). На начальном этапе развития трещина является поверхностной (т.е. выходит только на одну поверхность – дно паза), а за-

тем – после выхода на поверхность заднего торца обода – трансформируется в угловую. Эти выводы следуют из анализа фрактографически реконструированного поля локальных направлений развития трещины: указанные направления располагаются вдоль ручьев микросколов перпендикулярно микрофронтам и усталостным бороздкам (рис. 6).

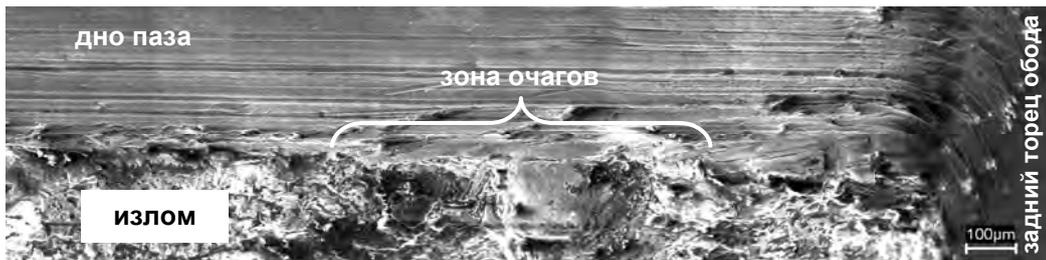


Рис.5. Диск 1: поверхность дна паза и излом в области очагов разрушения

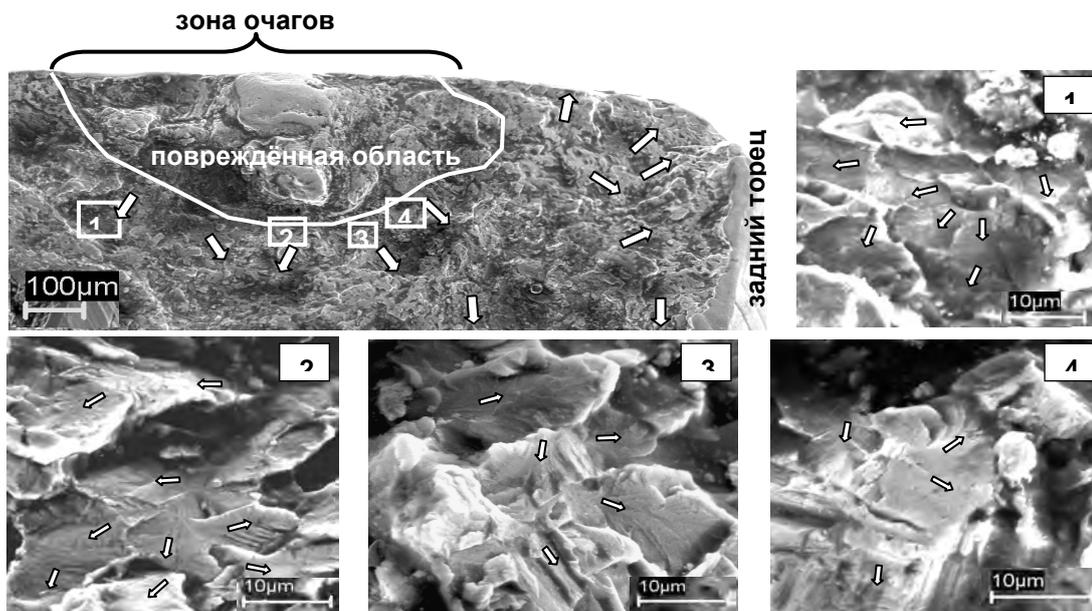


Рис.6. Диск 1: поле локальных направлений развития трещины вблизи зоны очагов, и микрофотографии участков 1 - 4 (стрелки – локальные направления роста трещины)

Излом диска 2 у заднего торца обода полностью повреждён (на расстоянии до 20 мм вдоль поверхности паза и обода), что делает невозможным точное определение местоположения

очага разрушения (рис. 7). Микрорельеф излома за пределами повреждённой зоны свидетельствует о том, что трещина развивалась от заднего торца обода.



Рис.7. Диск 2: повреждённая область у заднего торца обода и микрорельеф излома за границей повреждённой зоны (стрелки – локальные направления роста трещины)

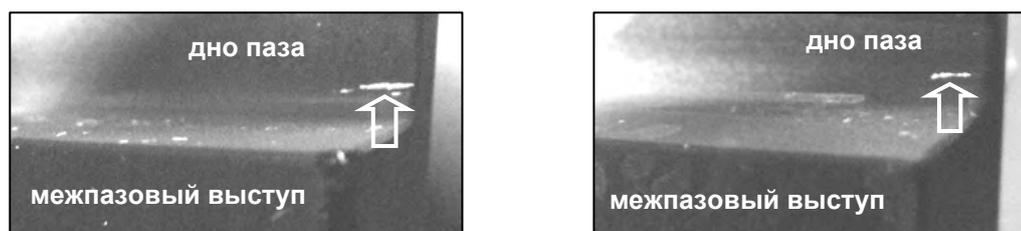


Рис.8. Диск 2: усталостные трещины, выявленные при ЛЮМ-контроле

При дефектоскопическом контроле диска 2 после его разрушения в двух пазах были обнаружены небольшие трещины (рис. 8). Фрактографический анализ этих трещин важен для понимания начального этапа разрушения, поскольку они расположены в той же области, откуда развивались трещины, приведшие к разрушению дисков. Излом по наиболее глубокой из вскрытых трещин (глубиной около 250 мкм) показан на рис. 9. Край трещины находится на расстоянии ≈ 1 мм от заднего торца обода. Очагом развития трещины является риска глубиной ≈ 6 мкм на поверхности дна паза (рис. 9, 1). Имеются локальные участки с усталостными бороздками: приведенный на рис. 9, 2 уча-

сток расположен на расстоянии ≈ 150 мкм от поверхности дна паза; шаг бороздок S составляет около 0,2 мкм, что близко к расчётным значениям S для трещин МЦУ, фронт которой имеет примерно такую же глубину (рис. 4; I фронт). Как видно на рис. 9, между ближайшим к заднему торцу обода краем трещины и поверхностью этого торца располагается статический излом, который образовался при вскрытии трещины. Следовательно, в полном соответствии с выполненной ранее фрактографической реконструкцией (рис. 6) трещина зародилась на поверхности дна паза на небольшом расстоянии от заднего торца обода.

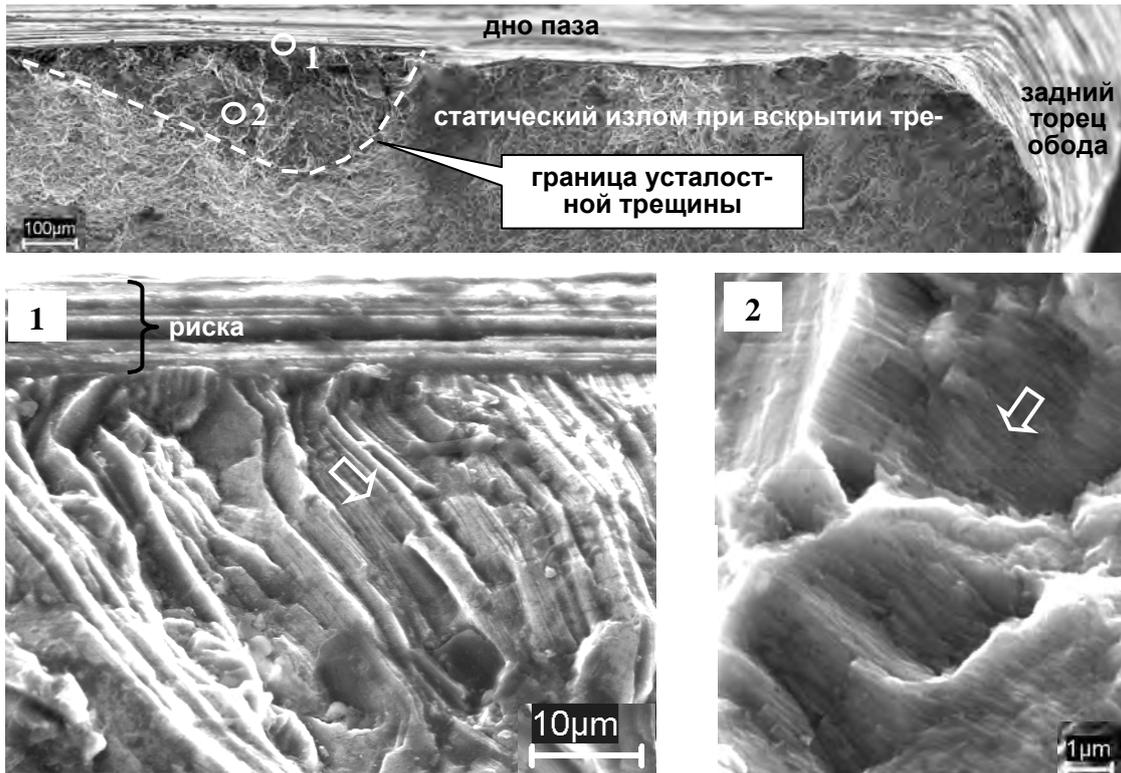


Рис.9. Диск 2: фрагмент излома по вскрытой усталостной трещине, выявленной при ЛЮМ-контроле

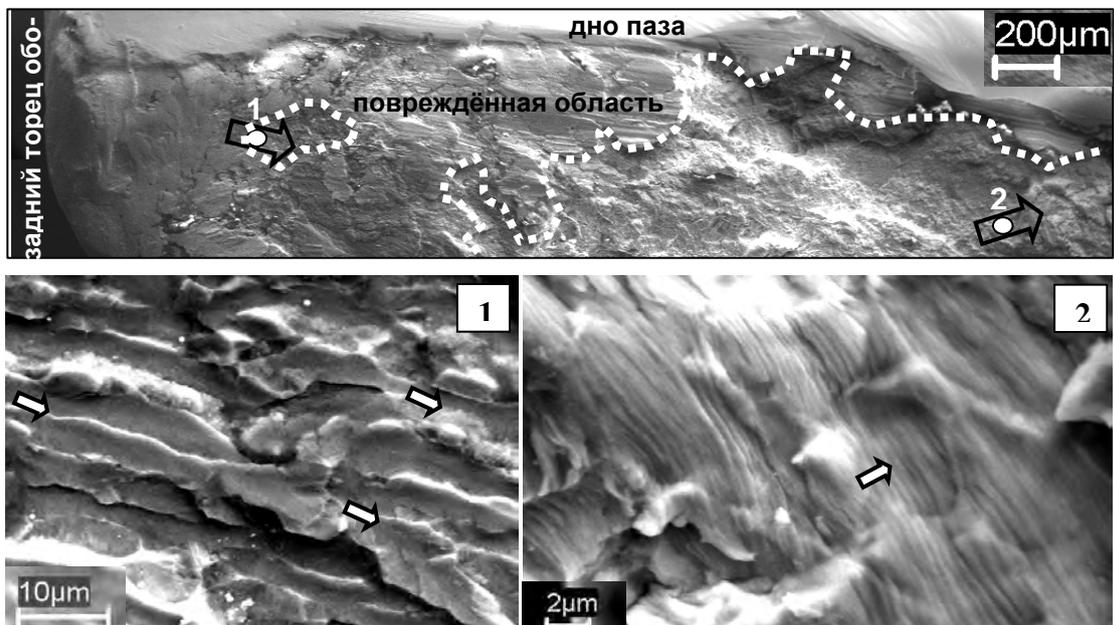


Рис.10. Диск 3: фрагмент излома у заднего торца обода и микрорельеф излома на повреждённых участках 1 и 2 (стрелки – локальные направления роста трещины)

Излом диска 3 у заднего торца обода также повреждён (рис.10), хотя и в меньшей степени, чем излом диска 2. Морфология микросколов (рис.10, 1) и усталост-

ных бороздок (рис.10, 2) на сохранившихся участках излома свидетельствует о том, что очаг разрушения расположен вблизи заднего торца обода. Шаг усталостных бороздок на участке, расположенном на расстоянии ≈ 3 мм от заднего торца ступицы и около 0,4 мм от поверхности дна паза, составляет $S = 0,5 - 0,7$ мкм (рис 10, 2), что практически совпадает с расчётными значениями S для трещины МЦУ соответствующей конфигурации (рис. 4; область между фронтами II и III вблизи дна паза).

Таким образом, очаги разрушения располагаются в критической зоне дисков (рис. 11), определённой при моделирова-

нии их статического напряжённого состояния, а ориентация поверхности разрушения совпадает с ориентацией первой главной площадки в этой зоне (рис. 2, в и 3). Кроме того, шаг усталостных бороздок на начальном этапе развития трещины близок к расчётным значениям S для трещины МЦУ. Всё это свидетельствует о том, что разрушение дисков произошло в результате зарождения и развития трещин МЦУ, период роста которых может быть определён на основании подсчёта усталостных бороздок по методике, изложенной ниже.



Рис.11. Расположение очагов и поверхности разрушения дисков

Микрорельеф поверхности разрушения всех исследованных дисков в области заднего торца обода состоит из микросколов и усталостных бороздок, причем доля бороздчатого рельефа уменьшается по мере развития трещины. Такой тип поверхности разрушения характерен для трещин МЦУ, развивающихся в высоконапряжённых зонах дисков из титановых сплавов с неблагоприятной кристаллографической текстурой при повторно-статическом нагружении со значительной выдержкой в цикле нагружения, типичной для условий эксплуатации. При простых полётных циклах (ПЦ) нагружения, характерных для дисков двигателей гражданской авиации, в каждом цикле образуется одна усталостная бороздка, поэтому их подсчёт позволяет определить период роста трещины. В соответствии с разработанной методикой исходными дан-

ными при этом являются следующие характеристики: число n_i последовательно образовавшихся бороздок в каждой из i последовательно образовавшихся зон с бороздками и значения длины (глубины) трещины l_i в конце этих зон. Тогда зависимость $N(l)$ периода роста трещины от ее длины находится в результате аппроксимации значений

$$N(l_j) = \sum_{i=1}^j n_i. \quad (2)$$

Главная проблема при реализации этого метода – правильное определение последовательности образования зон с бороздками в условиях смешанного микрорельефа «микросколы + бороздки». Задача решается на основании совместного анализа качественных (фронты трещины и ручки микросколов) и количественных (усталостные бороздки) фрактографических характеристик, позволяющего определить последовательные положения фронта трещины и направления, по которым она развивается, а также

оценить продолжительность развития трещины в ПЦ.

Результаты фрактографического реконструирования кинетики усталостной трещины (КУТ) в диске 1 показаны на рис.12: приведены 6 положений фронта трещины (1-й фронт соответствует выходу трещины на поверхность

заднего торца обода, а 6-й – достижению нижнего края этой поверхности) и отмечены 13 последовательно образовавшихся участков с усталостными бороздками, на основании анализа которых определялась зависимость (2). Количество бороздок на этих участках изменяется от 200 – 300 (участки 1 и 2) до 10 – 15 (участки 12 и 13).

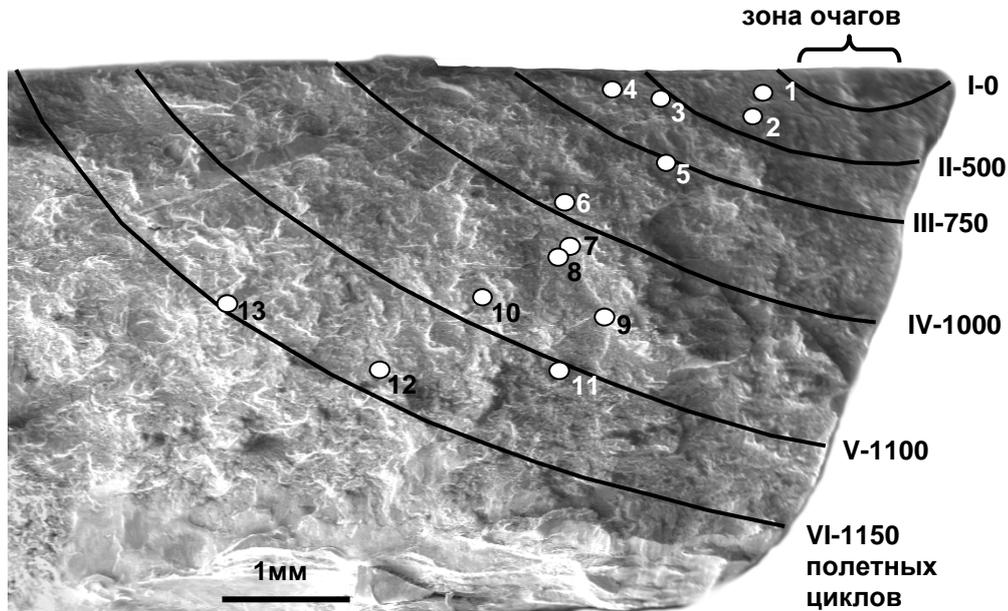


Рис.12. Диск 1: фрактографическая реконструкция КУТ в области заднего торца обода: I-VI – положения фронта трещины; 1 - 13 – последовательно образовавшиеся при развитии трещины участки с усталостными бороздками, по которым реконструировалась КУТ

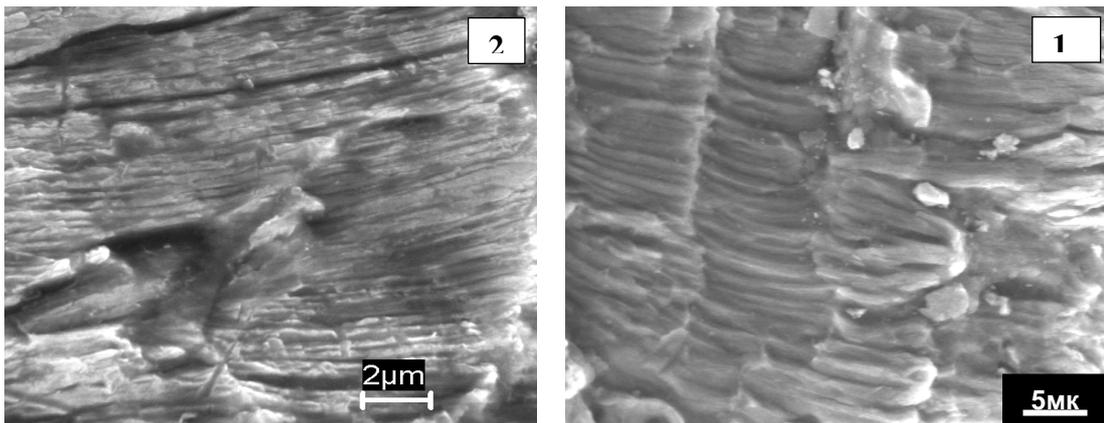


Рис.13. Диск 1: усталостные бороздки на участках 2 и 10 (рис. 12)

Усталостные бороздки на участках 2 и 10 (рис. 12) приведены на рис.13. Измеренные значения S на участке 2 изменя-

ются в диапазоне 0,25 – 0,7 мкм, этот участок располагается слева от очага между фронтами I и II, на которых расчётные

значения S для трещин МЦУ изменяются в диапазоне 0.2 – 0.55 мкм (рис. 4).

Кинетические зависимости $n_i(l_i)$ и $N(l)$ приведены на рис.14. В качестве длины трещины l_i , соответствующей окончанию i -й зоны с бороздками, принималась координата пересечения ближайшего из показанных на рис.12 фронтов, расположенного после этой зоны, с поверхностью заднего торца обода. За начало координат принята точка пересечения 1-го фронта с указанной поверхностью. Как видно на рис.14, б, период роста трещины от этого начального положения до длины $l = 2$ мм вдоль поверхности заднего торца обода составляет ≈ 950 полётных циклов. От $l = 2$ мм (размер выявляемой методами дефек-

тоскопического контроля трещины) и до нижнего края заднего торца обода (6-й фронт, $l_6 \approx 4,2$ мм) трещина развивалась еще ≈ 200 полётных циклов со средней скоростью ≈ 1 мм/100 циклов.

Реконструкция КУТ в диске 2 оказалась невозможной из-за полного повреждения излома в области заднего торца обода. Значительное повреждение этой области в диске 3 не позволило провести такой же детальный анализ КУТ, как в диске 1. Полученная по описанной выше методике оценка показывает, что период роста трещины в диске 3 за пределами повреждённой зоны составил не менее 200 полётных циклов.

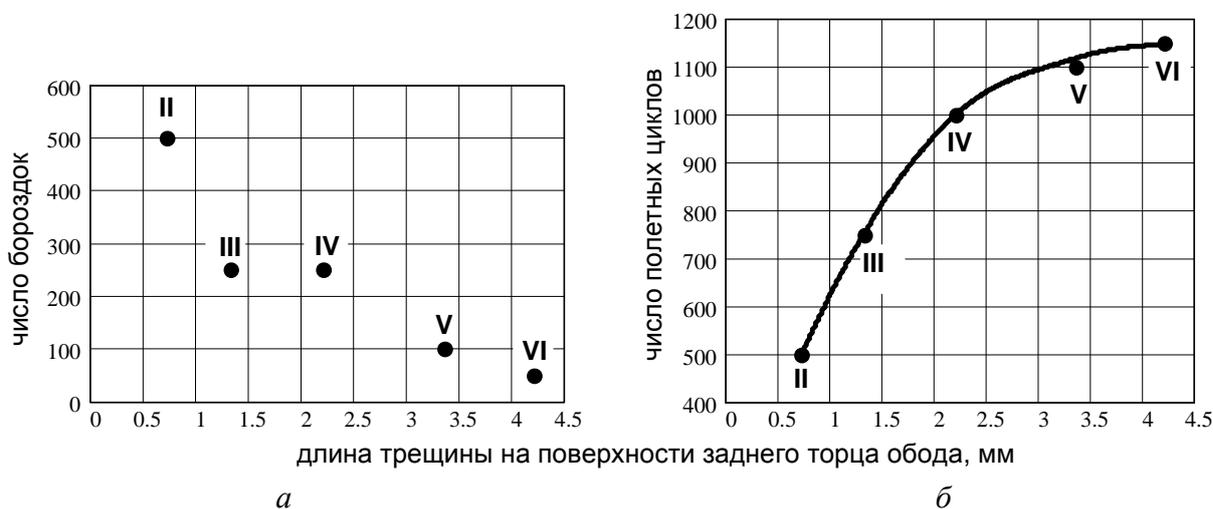


Рис.14. Диск 1: кинетические зависимости (фрактографическая реконструкция)

Верификация результатов фрактографического реконструирования КУТ в разрушенных дисках проводилась в процессе циклических испытаний диска 1-й ступени КНД на установке для испытания роторов (рис.15, а). Диск был доработан перепротяжкой радиусов перехода дна паза под лопатку к боковой поверхности паза с последующим упрочнением обода дробью. Для моделирования радиального усилия, дейст-

вующего на ободу диска, использовались имитаторы лопаток. Испытательный цикл воспроизводил типовой полётный цикл (ТПЦ) нагружения диска и продолжался 1 час 44 мин 25 с (рис.15, б). Поскольку к началу испытаний по ТПЦ трещина уже имела значительную глубину (Таблица), указанная выше доработка поверхности обода диска не оказала существенного влияния на кинетику трещины в процессе этих испытаний.

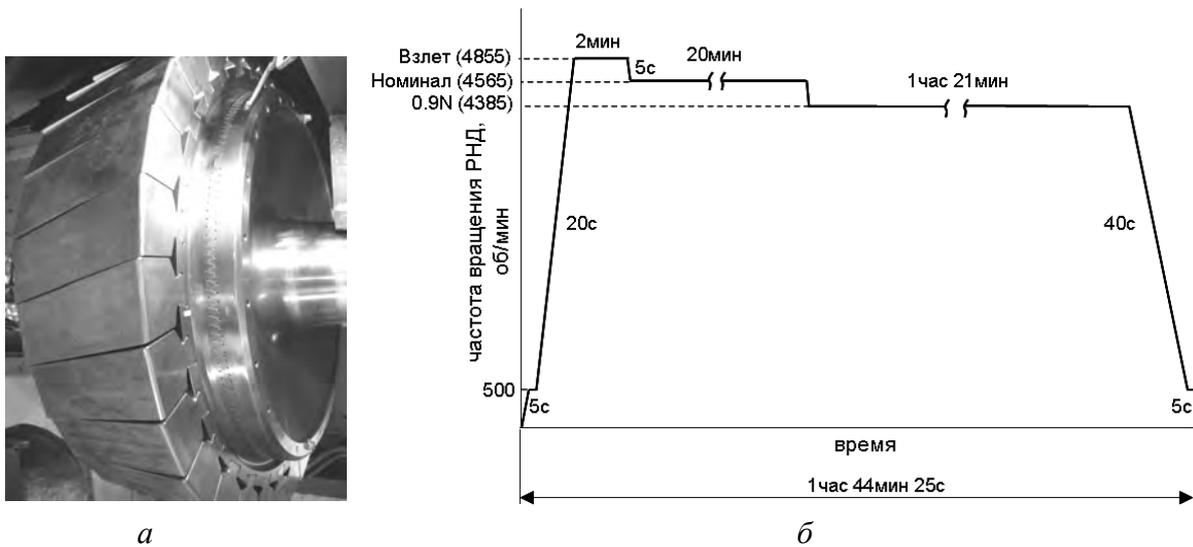


Рис.15. Диск 1-й ступени КНД с имитаторами рабочих лопаток на установке для испытания роторов (а) и испытательный цикл нагружения, воспроизводящий типовой полётный цикл (б)

Трещина МЦУ в диске распространилась в той же области, что и в условиях эксплуатации в дисках 1, 2 и 3 (при испытаниях диска с имитаторами появление трещины многоциклового усталости в ободе диска исключено из-за отсутствия возбудителей многоциклового нагружения обода – рабочих лопаток). Размеры трещины в зависимости от наработки приведены в таблице (рядом со свечениями показаны маркеры длины трещины, которые перенесены на линейку). Перед началом испытаний по ТПЦ размер трещины на поверхности заднего торца обода составлял 2 мм, на поверхности дна паза – 7,5 мм (размеры трещины измерены от конца фаски, соединяющей поверхности дна паза и заднего торца обода). Трещина контролировалась визуально через каждые 3-4 ТПЦ, а при наработках 24, 51, 100, 135 и 164 ТПЦ имитаторы лопаток снимались, и проводился ЛЮМ-контроль с измерением длины трещины на поверхностях торца и дна паза. При первом контроле (24 ТПЦ) не было обнаружено увеличение длины трещины (т.е. приращение длины трещины не вышло за пределы погрешности измерения), при втором контроле (51 ТПЦ) длина трещины на торце увеличилась на 0,3 мм, а по дну паза – на 0,5 мм; при третьем контроле (100 ТПЦ) увеличение

длины трещины вдоль указанных поверхностей составило 1 и 2 мм, соответственно, и трещина подошла к нижнему краю заднего торца обода. Между 100 и 135 ТПЦ трещина вышла за пределы заднего торца, после 135 ТПЦ длина трещины на поверхности паза составила около 12 мм. Испытания были закончены после 164-го ТПЦ, в течение которого трещина на поверхности торца обода подросла примерно на 1 мм; при этом длина трещины вдоль поверхности паза составила 22 мм.

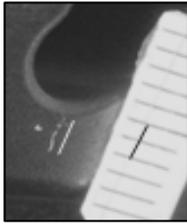
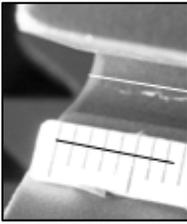
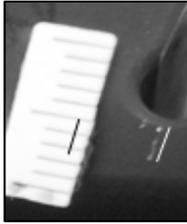
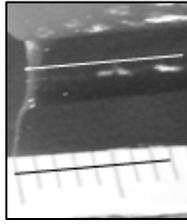
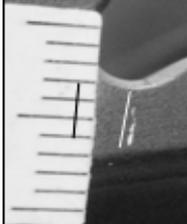
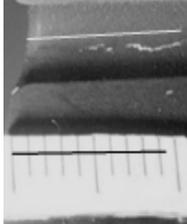
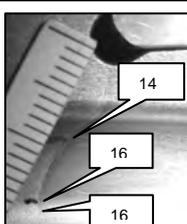
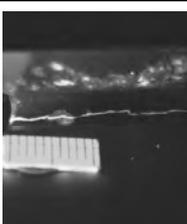
Число ТПЦ	Трещина на поверхности торца обода, мм	Трещина на поверхности дна паза, мм	
0	 2	 7.	
51	 2.	 8	
100	 3	 9.	
164	 14 16 16	 15	22

Таблица – Развитие трещины в диске при испытаниях по ТПЦ

Как видно, в нижней части заднего торца обода трещина развивалась со средней скоростью $\approx 1\text{мм}/100$ циклов, что совпадает со средней скоростью роста трещины в этой области в условиях эксплуатации, определённой ранее на основании фрактографического реконструирования КУТ в диске 1.

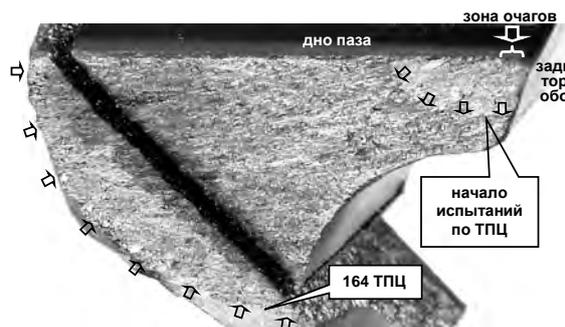


Рис.16. Диск: излом по вскрытой трещине МЦУ

После окончания испытаний трещина была вскрыта для фрактографических исследований (рис.16). Усталостный излом при вскрытии трещины был разрезан на два фрагмента. Как и в дисках 1 – 3, зона очагов развития трещины в диске (рис. 17) находится вблизи заднего торца обода на поверхности дна паза в области перехода к боковой поверхности межпазового выступа, т.е. в зоне максимальных окружных напряжений (рис. 2, в). В этой области на начальном этапе происходило развитие нескольких независимых трещин от близко расположенных очагов (рис. 17). Вблизи очагов (на расстоянии 0,1 мм от дна паза) выявляются усталостные бороздки с шагом $S \approx 0,2$ мкм (рис.17, 1); бороздки такого же шага примерно в той же области – на расстоянии 0,14 мм от дна паза и $\approx 1,5$ мм от заднего торца обода – были обнаружены ранее в изломе по вскрытой трещине в диске 2 (рис. 9).

Микрорельеф излома диска при развитии трещины МЦУ в условиях ТПЦ, состоящий в основном из микросколов и локальных участков с усталостными бороздками, аналогичен микрорельефу соответствующей области поверхности разрушения дисков 1 – 3. Фрактографически реконструированные положения фронта трещины в начале испытаний по ТПЦ и после 100 ТПЦ приведены на рис.18. Там же отмечены участки с бороздками (рис.19), на основании анализа которых установлено, что в течение первых 100 ТПЦ продвижение фронта трещины в области заднего торца обода составило ≈ 1

мм, что совпадает с данными непосредственного наблюдения за развитием трещины (Таблица). При этом в указанной области излома после начала испытаний по ТПЦ отсутствуют усталостные макролинии, по расстоянию между которыми определяют развитие трещины в течение ПЦ в некоторых исследованиях. Реконструк-

ция кинетики трещины в диске по такой методике привела бы к выводу, что в течение первого же ТПЦ трещина достигла нижнего края заднего торца обода и распространилась дальше, т.е. к ошибке в определении периода роста трещины более чем в 100 раз.

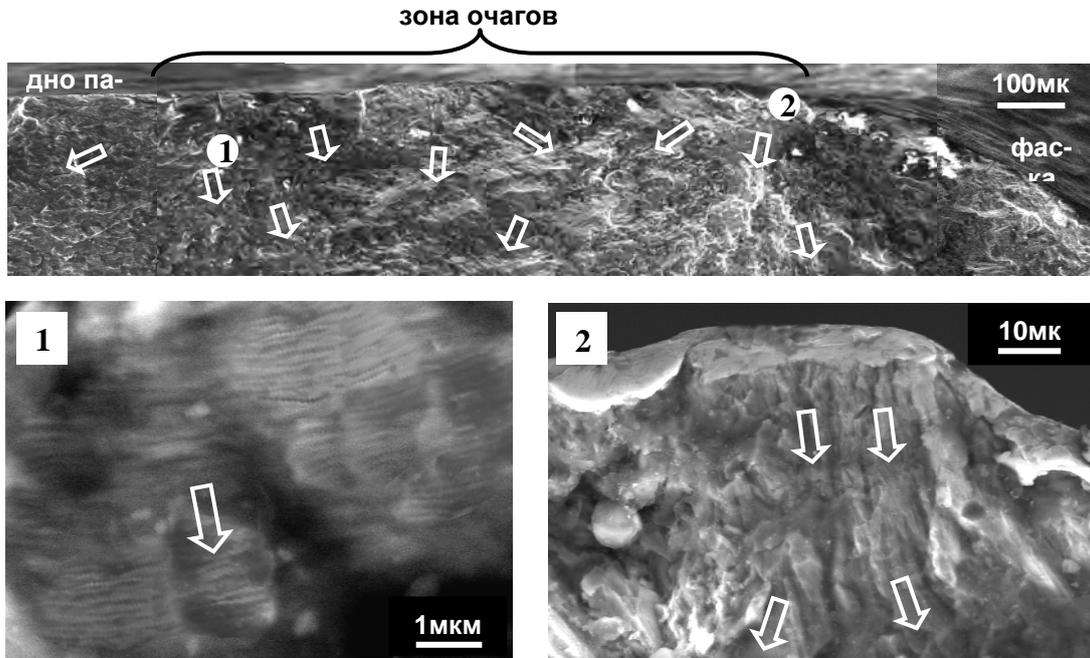


Рис.17. Диск: поле направлений развития трещин вблизи зоны очагов и микрофотографии участков 1 и 2

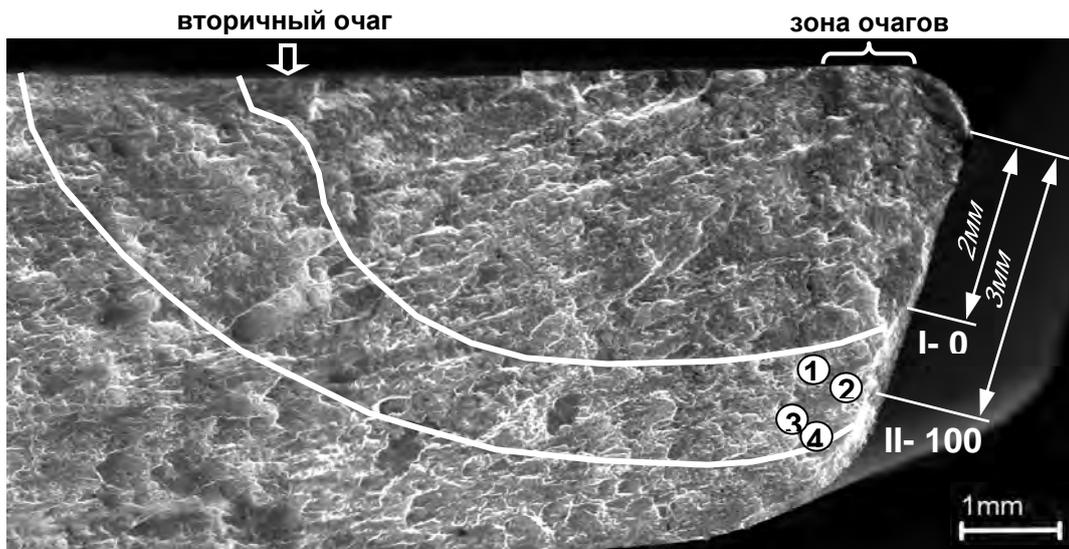


Рис.18. Диск: фрактографическая реконструкция КУТ при испытаниях по ТПЦ: I и II – положения фронта трещины в начале испытаний и после 100 ТПЦ, 1 - 4 – участки с усталостными бороздками,
109

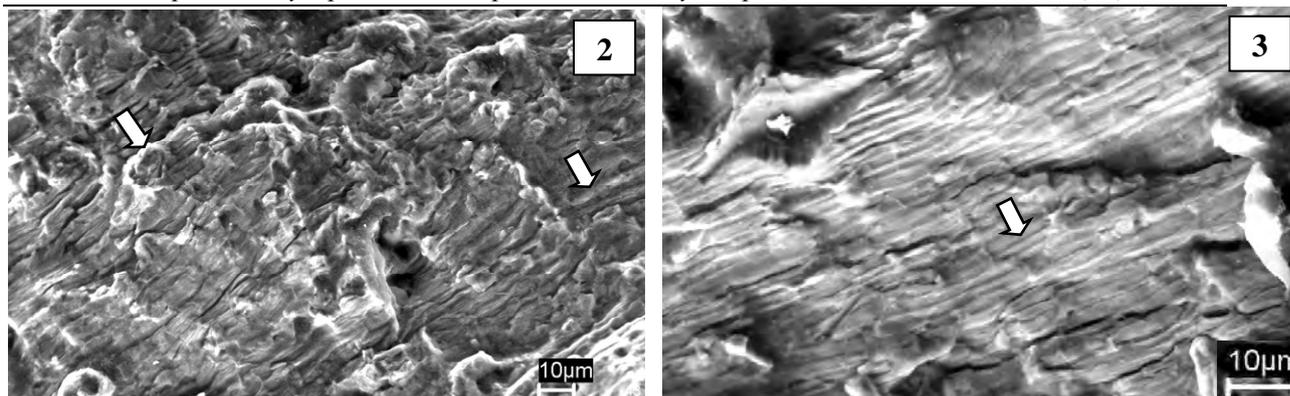


Рис.19. Диск: усталостные бороздки на участках 2 и 3 (см. рис.18)

Заключение

1. Разработан и применён для анализа разрушения дисков 1-й ступени КНД метод многомасштабной комплексной фрактодиагностики. Метод позволяет реконструировать зарождение и развитие усталостной трещины на основании электронно-микроскопических исследований поверхности разрушения и расчётного моделирования напряжённого состояния детали (неповреждённой и с трещиной).

2. Установлено, что разрушение дисков произошло в результате развития трещин МЦУ. Очаги разрушения располагаются вблизи заднего торца обода на поверхности дна паза в зоне ее перехода к боковой поверхности межпазового выступа. Область очагов находится в зоне максимальных окружных напряжений; при этом ориентация плоскости развития трещин совпадает с ориентацией первой главной площадки в месте максимальных окружных напряжений, а шаг усталостных бороздок S на начальном этапе развития трещины близок к расчётным значениям S для трещин МЦУ.

3. Определён период роста трещины МЦУ, выявляемой методами дефектоскопического контроля: после достижения длины 2 мм (на доступной для контроля в условиях эксплуатации поверхности заднего торца обода диска) трещина развивается ещё не менее 200 полётных циклов.

4. Результаты фрактодиагностики верифицированы на основании сравнения

фрактографически реконструированной кинетики трещины с данными непосредственного наблюдения за развитием трещины на поверхности диска при его циклических испытаниях по типовому полётному циклу.

Библиографический список

1. Сиратори, М. Вычислительная механика разрушения [Текст] / М.Сиратори, Т. Миёси, Х. Мацусита. - М.: Мир, 1986. - 334 с.
2. Туманов, Н.В. Стадийность кинетики усталостных трещин и механизм периодического расслаивания разрыва [Текст] // Деформация и разрушение материалов: тр. I междунар. конф. в 2 т. - Т.1. - М.: ИМЕТ РАН, 2006. - С. 85-87.
3. Туманов, Н.В. Реконструкция и прогнозирование развития усталостных трещин в дисках авиационных газотурбинных двигателей [Текст] // М.А. Лаврентьева., С.А. Черкасова // Конверсия в машиностроении. - 2005. - №4, 5. - С. 98-106.
4. Моделирование устойчивого роста усталостных трещин в дисках турбины авиадвигателей при простом и сложном цикле нагружения [Текст] // Н.В. Туманов [и др.] // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та. - 2009. - №3 (19). Ч. 1. - С. 188-199.

References

1. Siratori, M. Computational fracture mechanics [Text] / M. Siratori, T. Miesi, H. Matsusita. - Moscow: Mir, 1986. - 334 p.

2. Tumanov, N. V. Fatigue crack kinetic stages and mechanism of periodic splitting-rupture [Text] / N. V. Tumanov // Deformation and structure of materials: I Int. conf. – Vol.1. Interkontakt Nauka, 2006. – pp. 85-87.

3. Tumanov, N. V. Reconstitution and prediction of fatigue crack propagation in aero engine discs [Text] / N. V. Tumanov, M. A. Lavrenteva, S. A. Cherkasova //

Conversion in machine building in Russia. – 2005. – №4,5. – pp 98-106.

4. Tumanov, N. V. Modeling stable growth of fatigue cracks in aero engine turbine discs under simple and complex loading cycles [Text] / N. V. Tumanov, M. A. Lavrenteva, S. A. Cherkasova, A. N. Servetnik // Vestnik SSAU. – 2009. №3(19). Part 1. pp. 188-199.

MULTI-SCALE COMPLEX FAILURE ANALYSIS OF AERO ENGINE COMPRESSOR DISKS

© 2010 N. V. Tumanov¹, A. M. Porter², M. A. Lavrentyeva¹, S. A. Cherkasova¹,
N. A. Vorobyova¹, D. P. Lyoshin²

¹Central Institute of Aviation Motors (CIAM)

²NPO «Saturn»

Multi-scale complex failure analysis of aero engine compressor disks has been performed which includes microfractographic observations and 3D finite element crack analysis. Fracture origins and crack growth period have been determined. The analysis has been verified by the data of crack growth direct observations.

Low cycle fatigue (LCF), fatigue crack kinetics, electron fractography, finite element crack modeling.

Информация об авторах

Туманов Николай Ваганович, кандидат технических наук, начальник сектора. Центральный институт авиационного моторостроения (ЦИАМ). Область научных интересов: анализ разрушений, механизмы разрушения, кинетика усталостных трещин, электронная фрактография, конечно-элементное моделирование трещин. E-mail: tumanov@rtc.ciam.ru.

Портер Александр Маркович, кандидат технических наук, начальник отдела. НПО «Сатурн». Область научных интересов: прочность и ресурс деталей авиадвигателей. E-mail: aleksandr.porter@npo-saturn.ru.

Лаврентьева Марина Александровна, ведущий конструктор. Центральный институт авиационного моторостроения (ЦИАМ). Область научных интересов: конечно-элементное моделирование трещин. E-mail: tumanov@rtc.ciam.ru.

Черкасова Светлана Александровна, ведущий конструктор. Центральный институт авиационного моторостроения (ЦИАМ). Область научных интересов: анализ разрушений, электронная фрактография. E-mail: tumanov@rtc.ciam.ru.

Воробьёва Нина Алексеевна, ведущий инженер. Центральный институт авиационного моторостроения (ЦИАМ). Область научных интересов: анализ разрушений, электронная фрактография. E-mail: tumanov@rtc.ciam.ru.

Лёшин Дмитрий Павлович, ведущий конструктор. НПО «Сатурн». Область научных интересов: прочность и ресурс деталей авиадвигателей. E-mail: aleksandr.porter@npo-saturn.ru.

Tumanov Nikolai Vaganovich, candidate of technical sciences, head of sector. Central Institute of Aviation Motors. Area of research: failure analysis, fracture mechanisms, fatigue crack kinetics, electron fractography, finite element crack modeling. E-mail: tumanov@rtc.ciam.ru.

Porter Aleksander Markovich, candidate of technical sciences, head of division. NPO «Saturn». Area of research: strength and life of aero engine parts. E-mail: aleksandr.porter@npo-saturn.ru.

Lavrentyeva Marina Alexandrovna, leading designer. Central Institute of Aviation Motors. Area of research: finite element crack modeling. E-mail: tumanov@rtc.ciam.ru.

Cherkasova Svetlana Alexandrovna, leading designer. Central Institute of Aviation Motors. Area of research: failure analysis, electron fractography. E-mail: tumanov@rtc.ciam.ru.

Vorobyova Nina Alekseevna, leading engineer. Central Institute of Aviation Motors. Area of research: failure analysis, electron fractography. E-mail: tumanov@rtc.ciam.ru.

Lyoshin Dmitriy Pavlovich, leading designer. NPO «Saturn». Area of research: strength and life of aero engine parts. E-mail: aleksandr.porter@npo-saturn.ru.