

В состоянии после эксплуатации в материале лопаток зарегистрированы средний уровень микродеформаций и однородное распределение плотности дислокаций внутри и на границах субзеренных блоков. Наплавка приводит к значительному размельчению субзерен и резкому повышению плотности граничных дислокаций (почти на 2 порядка), что в свою очередь, может охрупчивать границы. Термообработка способствует укрупнению блоков мозаики и снижению плотности дислокационных дефектов на границе.

На основании проведенных исследований можно сделать заключение, что материал лопаток с разной наработкой от 53000 до 112000 часов имеет деградированную мик-

роструктуру и нуждается в восстановительной термической обработке. Эксплуатация рабочих лопаток из сплава ХН65ВМТЮ более 62000 часов без восстановительного ремонта нежелательна, так как отрицательные изменения в микроструктуре могут привести к разрушению лопаток.

#### Библиографический список

1. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. Кн.1 – Рыбинск: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2010. – 611 с.

2. Филатов М.А., Судаков В.С. Влияние термической обработки на структуру и свойства жаропрочных никелевых сплавов. //МиТОМ, 1995, №6. С.12-15.

УДК 621.452-226:620.191

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ В ДИСКАХ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДИСКОВ

Туманов Н.В., Черкасова С.А., Лаврентьева М.А., Воробьева Н.А.

Центральный институт авиационного моторостроения (ЦИАМ), г. Москва

#### STUDY OF MECHANISMS OF LOW CYCLE FATIGUE CRACK PROPAGATION IN AERO ENGINE DISKS UNDER OPERATING CONDITIONS AND DISK RESIDUAL LIFE ESTIMATION

*Tumanov N.V., Cherkasova S.A., Lavrentyeva M.A., Vorobyeva N.A. Using microfractographic observations the mechanisms of low cycle fatigue crack kinetics in aero engine disks under operating conditions have been established. On this basis the techniques for disc residual life estimation have been developed. The techniques have been verified with the data of crack growth microfractographic reconstitution and crack kinetics direct observation on a disk surface.*

Остаточная долговечность  $N_{ост}$  дисков авиадвигателей (долговечность дисков с трещинами) определяется периодом роста трещины малоциклового усталости (МЦУ) от начального  $l_0$  до критического  $l_{кр}$  размеров

$$N_{ост} = \int_{l_0}^{l_{кр}} \frac{dl}{V(l)},$$

где  $V(l)$  – зависимость скорости роста трещины от ее размера  $l$  (длины или глубины). Эта зависимость может быть определена экспериментальными или расчётными методами. В

последнем случае величину  $V$  связывают с расчётными параметрами механики разрушения (МР), наиболее распространенным из которых является размах коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta K$ . Зависимость  $V(\Delta K)$  (кинетическая диаграмма) определяется в процессе испытаний стандартных образцов в регламентируемых условиях. Однако её использованию для определения  $N_{ост}$  препятствуют два обстоятельства:

1) область применения зависимости  $V(\Delta K)$  в соответствии с представлениями

МР ограничена ситуацией, когда пластическая зона локализована у фронта трещины и ее размер значительно меньше длины трещины, в то время как трещины МЦУ в дисках, как правило, зарождаются и распространяются в высоконагруженных (критических) зонах упруго-пластической деформации;

2) условия циклического нагружения при получении диаграммы  $V$ - $\Delta K$ , существенно отличаются от эксплуатационных условий, для которых характерны значительные выдержки в циклах при максимальной (или близкой к ней) нагрузке.

Другой подход к расчету  $N_{ост}$  предложен в работах [1-2]. Он базируется на моделировании устойчивого роста (УР) трещин МЦУ с использованием свободной от ограничений линейной МР теоретической кинетической зависимости, которая получена на основании анализа физического механизма УР (механизма периодического расслаивания-разрыва – МПРР) [3-4]. Для практического применения такого подхода необходимо предварительно определить вклад МПРР в кинетику трещин МЦУ в условиях эксплуатации.

Кинетика усталостных трещин обусловлена действующими на их фронте механизмами разрушения, каждый из которых оставляет на поверхности разрушения характерный микрорельеф (фрактурельеф). Это позволяет установить на основании фрактографических исследований эксплуатационных трещин те механизмы разрушения, которые реализуются в условиях эксплуатации. Поскольку МПРР приводит к формированию фрактурельефа в виде усталостных бороздок, расстояние  $S$  между которыми (шаг бороздок) характеризует подрастание трещины в каждом цикле нагружения, с использованием результатов фрактографического анализа можно также оценить период УР трещин МЦУ.

В работе исследованы механизмы развития трещин МЦУ в критических зонах дисков компрессора и турбины двигателей гражданской авиации (ГА) и маневренной авиации (МА) в условиях эксплуатации. Показано, что в дисках, изготовленных из сплавов на основе никеля и железа, реализуется один и тот же тип фрактурельефа (усталостные бороздки), свидетельствующий об устойчивом росте трещины в результате реализации МПРР вдоль всего ее фронта. Установлено, что пе-

риод УР в этих дисках составляет значительную часть их общей циклической нагрузки. Для определения  $N_{ост}$  предложено использовать диаграмму остаточной долговечности (ДОД), которая характеризует период устойчивого роста трещины МЦУ в зависимости от ее начального размера, т.е. безопасный остаточный ресурс диска. При известном минимальном размере надежно выявляемой трещины ДОД определяет безопасный интервал дефектоскопического контроля, при котором невыявленные при очередном осмотре трещины не выйдут за границу устойчивого роста до следующего осмотра. Изложена методика расчёта ДОД при простых (двигатели ГА) и сложных (двигатели МА) циклах нагружения, и приведены результаты экспериментальной проверки расчётных оценок. Их надёжность обусловлена использованием верифицированной теории УР (т.е. уменьшением доли эмпиризма), а консервативность обеспечивается тем, что не учитывается период неустойчивого роста трещины (от верхней границы УР до разрушения диска).

В дисках, изготовленных из жаропрочных титановых сплавов, развитие трещин МЦУ происходит при одновременном действии на различных участках фронта двух механизмов разрушения – высокоэнергетического МПРР и низкоэнергетического механизма разрушения сколом (МРС), который приводит к значительному ускорению роста трещины. В этой ситуации для достоверного расчетного прогнозирования  $N_{ост}$  необходимо определить и включить в расчётную модель факторы, влияющие на вклад МРС в кинетику трещин МЦУ в условиях эксплуатации.

Одновременное действие двух механизмов разрушения (МПРР+МРС) затрудняет не только расчётное прогнозирование, но и фрактографическое реконструирование кинетики трещин МЦУ в дисках из титановых сплавов. Главная проблема при реализации фрактографического метода заключается в необходимости установить в условиях смешанного фрактурельефа (бороздки+микросколы) количественную связь между продвижением макрофронта трещины и усталостными бороздками.

Разработан фрактографический метод определения ДОД в этих условиях, и проведена его верификация на основании сравнения фрактографически реконструированной кинетики трещины МЦУ с данными непосредственного наблюдения за развитием трещины на поверхности диска.

#### **Библиографический список**

1. Туманов Н.В., Лаврентьева М.А., Черкасова С.А. Реконструкция и прогнозирование развития усталостных трещин в дисках авиадвигателей // Конверсия в машиностроении. 2005. №4-5. С. 98-106.
2. Туманов Н.В., Лаврентьева М.А., Черкасова С.А., Серветник А.Н. Моделирование устойчивого роста усталостных трещин в дис-

ках турбины авиадвигателей при простом и сложном цикле нагружения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. №3(19). Часть 1. С. 188-199.

3. Туманов Н.В. Стадийность кинетики усталостных трещин и механизм периодического расслаивания-разрыва // Деформация и разрушение материалов: Труды I Международной конференции. В 2-х томах. Т.1. М.: ИМЕТ РАН, 2006. С. 85-87.

4. Туманов Н.В. Физико-механические аспекты устойчивого роста усталостных трещин // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т.18, №2. С.132-136.

УДК 621.56/.59

### **СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ГАЗОВОЙ КРИОГЕННОЙ МАШИНЫ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ**

Гальперин Р.Н., Коломин И.В., Логашкин А.П., Угланов Д.А.

Самарский государственный аэрокосмический университет

#### **THE WORKBENCH FOR INVESTIGATION OF COOLING SYSTEM'S GAS CRYOGENIC REFRIGERATOR**

*Galperin R.I., Kolomin I.V., Logashkin A.P., Uglanov D.A. In this paper it is shown creating description of gas cryogenic refrigerator's investigation workbench. According to scoping calculation it is taken a test equipment choice, measuring method and testing technique.*

Развитие ракетно-космической техники требует создания энергетических систем позволяющих выполнить космическому аппарату поставленную перед ним задачу.

Одним из устройств, входящих в оптико-электронные системы (ОЭС) (лазерные дальномеры, прицелы, системы наведения, лидары, гироскопы) [1], независимо от их назначения, является фотоприемное устройство (ФПУ) инфракрасного диапазона, которое эффективно работает только при его охлаждение до уровня температуры 80К и ниже. Требуемые температурные уровни обеспечиваются бортовыми системами охлаждения. Применительно к аэрокосмической технике это, как правило, микрокрио-

генные системы, которые выполняют задачи как военного, так и гражданского назначения. В виду их узкой специализации для каждой такой системы необходим индивидуальный подход при её исследовании и испытании.

Основными реально существующими в настоящее время криоохладителями для бортовых систем являются дроссельные микрокриогенные системы (ДМКС) и газовые криогенные машины (ГКМ) с уровнем температуры термостатирования 80...120К и холодопроизводительностью 0,1...10Вт. Достижение температуры 20К и ниже обеспечивается многокаскадными системами.