

УДК 621.452-226:620.191

КОНЦЕПЦИЯ АДДИТИВНОСТИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ЕЁ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА ДИСКОВ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ

©2014 Н.В. Туманов, М.А. Лаврентьева

Центральный институт авиационного моторостроения (ЦИАМ), г. Москва

С учётом универсальности и высокой энергоёмкости механизма устойчивого роста трещин малоциклового усталости (МЦУ), обеспечивающего длительный безопасный период роста этих трещин, предложена концепция аддитивности циклической долговечности. В соответствии с ней ресурс дисков авиадвигателей, для которых основным повреждающим фактором является МЦУ, определяется до предельного состояния, связанного с переходом трещины МЦУ в критической зоне диска к неустойчивому росту. При этом ресурс до первого капитального ремонта аддитивно складывается из ресурса до появления трещины МЦУ и периода её устойчивого роста (ресурса живучести); межремонтный ресурс определяется ресурсом живучести. Последний является также нижней оценкой ресурса диска на этапе проектирования. Для определения межремонтного ресурса предложено использовать диаграммы живучести, представляющие собой зависимость периода устойчивого роста трещины МЦУ в критической зоне диска от размера этой трещины. Разработаны методы построения диаграмм живучести при простых и сложных циклах нагружения, характерных для дисков авиадвигателей гражданской и манёвренной авиации. Приведены примеры применения разработанной концепции для определения ресурса дисков из деформируемых и гранулируемых сплавов.

Циклическая долговечность, предельные состояния, диски авиадвигателей, малоцикловая усталость, устойчивый рост усталостных трещин.

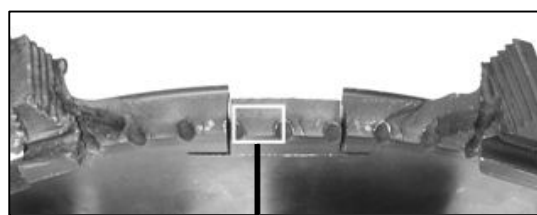
Развивающиеся в эксплуатационных условиях трещины малоциклового усталости (МЦУ) в высоконапряжённых зонах дисков авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) проходят через стадию устойчивого роста (УР), на которой реализуется высокоэнергоёмкий механизм периодического расслаивания-разрыва (МПРР), задерживающий развитие трещины [1-6]. При действии МПРР перед фронтом трещины в каждом цикле нагружения формируются локальные стоперы в виде поперечных расслоений, ограничивающих рас-

пространение трещины. В таких условиях безопасное развитие трещины МЦУ может происходить в течение многих тысяч циклов и составлять значительную часть наработки диска от начала эксплуатации до разрушения, что следует учитывать при разработке методов определения показателей циклической долговечности дисков АГТД, для которых МЦУ является основным повреждающим фактором.

В качестве примера на рис.1,а показан разрушенный в условиях эксплуатации диск турбины высокого давления (ТВД).



а



б

Рис.1. Разрушенный в результате развития трещин МЦУ диск ТВД (а) и поверхность разрушения (б)

Разрушение произошло в результате развития трещин МЦУ, которые зародились в области перехода от полотна к ободу в нескольких соседних перемычках между отверстиями для подвода охлаждающего воздуха, а затем объединились, приведя к обрыву фрагмента обода.

Реконструированный по результатам микрофрактографических исследований период роста трещин составил около 80% общей долговечности диска ТВД, из них период УР занял 75%, т.е. около 60% долговечности, причём УР продолжался только до глубины трещины ≈ 2 мм (рис.1,б) [3], в то время как толщина полотна в зоне развития трещин – около 15мм. На стадии УР трещины в каждой перемычке между отверстиями развивались независимо и имели простую удобную для расчётного моделирования полуэллиптическую конфигурацию.

Долговечностью называют свойство объекта, заключающееся в его способности не достигать предельного состояния (ПС) в течение некоторой наработки, а ресурсом – показателем долговечности, характеризующий её по наработке от начала или возобновления эксплуатации; в зависимости от выбора начальной наработки и ПС разли-

чают ресурсы до первого ремонта, между ремонтами, остаточный, на этапе развития трещины и т.д. [7-8]. Введём следующие определения и обозначения: $(ПС)_1$ – появление трещины МЦУ; $(ПС)_2$ – начало её неустойчивого роста; D_{i1} и P_{i1} , D_{i2} и P_{i2} – локальные долговечность и ресурс до наступления $(ПС)_1$ и $(ПС)_2$ в i -й высоконапряжённой зоне диска. Определим локальную живучесть ($Ж_i$) как свойство диска с трещиной МЦУ в i -й зоне не достигать в этой зоне $(ПС)_2$ в течение некоторой наработки; при этом показатель живучести по наработке назовём локальным ресурсом живучести ($РЖ_i$). Тогда

$$РЖ_i = P_{i2} - P_{i1},$$

откуда

$$P_{i2} = P_{i1} + РЖ_i. \quad (1)$$

Определённая таким образом локальная долговечность в каждой высоконапряжённой зоне диска обладает аддитивными свойствами, а локальный ресурс является аддитивной величиной, т.е. долговечность D_{i2} (ресурс P_{i2}) до наступления $(ПС)_2$ равна сумме долговечности D_{i1} (ресурса P_{i1}) до наступления $(ПС)_1$ и живучести $Ж_i$ (ресурса живучести $РЖ_i$) (рис.2).

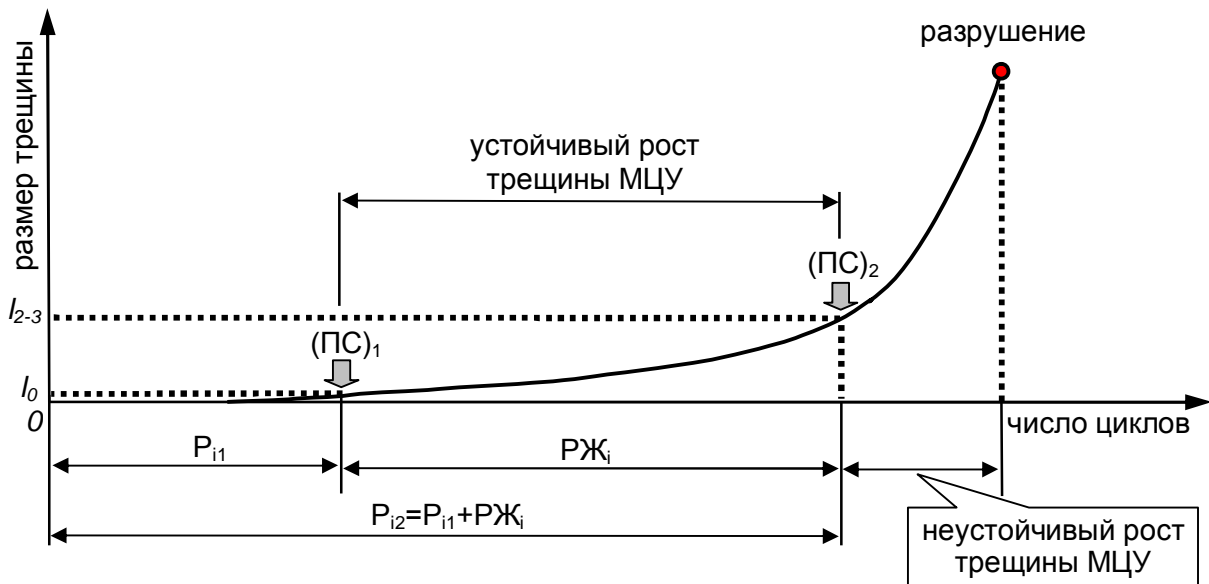


Рис.2. Схема развития МЦУ в высоконапряжённой зоне диска авиадвигателя

В качестве ресурса P диска примем ресурс P_2 до первоочередного наступления $(ПС)_2$, т.е.

$$P = P_2 = \min(P_{i2}). \quad (2)$$

Ресурс диска до первоочередного наступления $(ПС)_1$ и ресурс живучести диска определяются следующим образом:

$$P_1 = \min(P_{i1}), \quad (3)$$

$$PЖ = \min(PЖ_i). \quad (4)$$

Зону диска с минимальным значением P_{i2} назовём критической зоной (КЗ). Зоны с минимальными значениями P_{i1} и $PЖ_i$ обозначим как $(КЗ)_1$ и $(КЗ)_2$. Если $(КЗ)_1$ и $(КЗ)_2$ совпадают (и, следовательно, совпадают с КЗ), то аддитивными являются также ресурсы диска (2)-(4):

$$P = P_2 = P_1 + PЖ.$$

В этом случае P_1 (3) и $PЖ$ (4) можно определить независимо друг от друга, а затем найти P_2 (5). Если $(КЗ)_1$ и $(КЗ)_2$ не совпадают, то необходимо в каждой высоконапряжённой зоне определить P_{i1} и $PЖ_i$, вычислить значения P_{i2} (1) и выбрать в качестве P_2 минимальное из этих значений. При этом КЗ может совпадать с $(КЗ)_1$ или с $(КЗ)_2$, а может и не совпадать ни с одной из этих зон.

Составляющие ресурс P_2 величины обусловлены разными процессами, уровень понимания которых (и, соответственно, возможность адекватного моделирования) принципиально различаются. Ресурс P_1 до появления трещины связан с накоплением в высоконапряжённых зонах диска рассеянных усталостных повреждений, не имеющих в настоящее время измеримой характеристики, что затрудняет проведение верифицируемых расчётов. Этот ресурс устанавливается на основании эквивалентно-циклических испытаний или с использованием расчёта НДС диска и результатов испытаний образцов на МЦУ. Что касается ресурса живучести, то он обусловлен устойчивым ростом трещин МЦУ, который имеет измеримую характеристику скорости роста трещины (СРТ) (шаг усталостных бороздок) и описывается физически обоснованной верифицированной математической моделью [1-4], в рамках которой шаг бороздок S связан с размахом коэффициента интенсивности напряжений (КИН) ΔK кинетическим уравнением

$$S(l) = 10 [\Delta K(l) / E]^2 \quad (6)$$

(E – модуль Юнга, l – длина (глубина) трещины), а период УР при простых циклах нагружения (ПЦН), характерных для дисков двигателей гражданской авиации, определяется по формуле

$$N_{ПЦН} = \frac{E^2}{10} \int_{l_0}^{l_{2-3}} \frac{dl}{[\Delta K(l)]^2}, \quad (7)$$

где l_0 – начальная длина (глубина) трещины, l_{2-3} – длина (глубина) трещины, соответствующая $(ПС)_2$ (верхней границе УР) [1-4]. При сложных циклах нагружения (СЦН), типичных для двигателей манёвренной авиации (рис.3), период УР может быть определён по формуле [3]

$$N_{СЦН} = \frac{E^2}{10A} \int_{l_0}^{l_{2-3}} \frac{dl}{[\Delta K_I(l)]^2}, \quad (5) \quad (8)$$

где

$$A = \max A_L(l), A_K(l) = \sum_{j=1}^k n_j \left[\frac{\Delta K_j(l)}{\Delta K_I(l)} \right]^2. \quad (9)$$

Здесь n_j – число простых циклов (подциклов) j -го типа в СЦН, содержащем L типов подциклов; $\Delta K_j(l)$ – зависимость ΔK от l , отвечающая подциклу j -го типа (значения ΔK_j для всех подциклов каждого СЦН цикла вычисляются при величине l , соответствующей началу этого СЦН); индекс $j=1$ соответствует подциклу с максимальным размахом напряжений, индекс $j=2$ – подциклу со следующим по величине размахом напряжений и т.д. Величина модуля Юнга E определяется при максимальной для подциклов температуре. При полётных СЦН $n_1=1$, $A_1=1$ и функция $A_K(l)$ (9) характеризует увеличение СРТ в полётном цикле (ПЦ) (по сравнению с простым циклом с размахом КИН ΔK_I) при действии подциклов от 2-го до k -го типа (при $k=L$ – при действии всех подциклов). Сравнивая соотношения (7) и (8), получим следующие условия эквивалентности между простыми и сложными циклами нагружения при УР трещин МЦУ:

1) $N_{ПЦН} = N_{СЦН}$, если $\Delta K = A^{1/2} \Delta K_I$, т.е. СЦН с максимальным размахом КИН ΔK_I эквивалентен простому циклу с размахом КИН $A^{1/2} \Delta K_I$;

2) $N_{ПЦН} = AN_{СЦН}$, если $\Delta K = \Delta K_I$, т.е. СЦН с максимальным размахом КИН ΔK_I эквивалентен A простым циклам с тем же размахом КИН;

3) $N_{СЦН} = N_{ПЦН}/A$, если $\Delta K = \Delta K_I$, т.е. период УР при СЦН с максимальным размахом КИН ΔK_I в A раз меньше, чем при простых циклах с тем же размахом КИН.

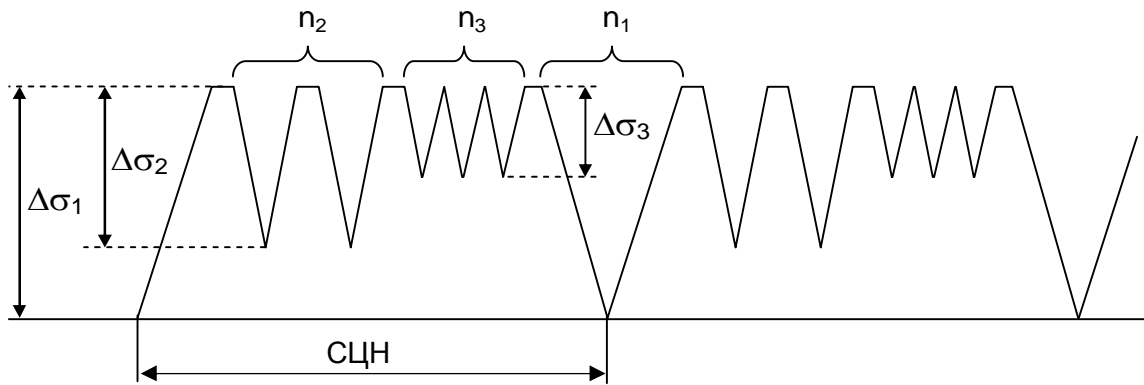


Рис.3. Схема сложного цикла нагружения (СЦН)

Существенное отличие РЖ от P_1 состоит также в том, что если P_1 изменяется в широких пределах в зависимости от различных технологических факторов (в частности, от состояния поверхности) и может вообще отсутствовать (при наличии крупного дефекта в высоконапряжённой зоне диска), то РЖ слабо зависит от технологических факторов (не зависит от состояния поверхности) и реализуется во всех случаях (за исключением зон с неблагоприятной кристаллографической текстурой в дисках из жаропрочных титановых сплавов [6]), поскольку трещины МЦУ всегда (за указанным исключением) проходят через стадию УР перед достижением $(ПС)_2$. Следовательно, РЖ (4) является гарантированным ресурсом и может использоваться как нижняя оценка ресурса дисков АГТД.

Таким образом, в соответствии с изложенной концепцией аддитивности циклической долговечности (КАЦД) ресурс диска до первого капитального ремонта (осмотра методами дефектоскопического контроля (ДК)) и между капитальными ремонтами (осмотрами методами ДК) целесообразно определять следующим образом:

1. На этапе проектирования диска рассчитываются с использованием соотношений (7) (при ПЦН) или (8) (при СЦН) значения периодов УР N_i трещин МЦУ в высоконапряжённых зонах и определяется РЖ

$$РЖ = \min(N_i), \quad (10)$$

который является нижней оценкой ресурса диска, и соответствующая ему $(КЗ)_2$. Для дисков из деформируемых сплавов расчёты проводятся от нижней границы устойчивого роста l_{1-2} ($l_0=l_{1-2}$), а для дисков из гранулируемых сплавов – от размера l_D максимального дефекта, не выявляемого метода-

ми ДК перед началом эксплуатации ($l_0=l_D$). Значения l_{1-2} и l_{2-3} в каждой зоне вычисляются из уравнения (6) и зависимости $\Delta K(l)$ при величинах шага бороздок $S_{1-2}=0,1$ мкм и $S_{2-3}=2$ мкм, отвечающих нижней и верхней границам УР; значение l_D определяется на основе предварительных фрактографических исследований дефектов в образцах из материала диска.

2. Для дисков из деформируемых сплавов:

2.1. при ЭЦИ устанавливается циклическая наработка N_0 до появления трещины МЦУ длиной (глубиной) l_1 в $(КЗ)_2$; если $(КЗ)_2$ не совпадает с $(КЗ)_1$, то при этой наработке в $(КЗ)_1$ и, возможно, в других высоконапряжённых зонах диска образуются трещины длиной (глубиной) $l_i > l_1$;

2.2. по формулам (7) или (8) рассчитываются периоды УР трещины МЦУ в $(КЗ)_2$ – N_1 (от l_1 до l_{2-3}) и N_2 (от размера l_{DK} минимальной трещины, надёжно выявляемой при ДК в процессе капитального ремонта (осмотра), до l_{2-3}) и периоды УР N_i во всех остальных высоконапряжённых зонах, где выявлены трещины МЦУ с $l_i > l_1$ (от l_i до l_{2-3});

2.3. определяется безопасный ресурс до первого капитального ремонта (интервал до первого осмотра методами ДК)

$$N_I = \frac{N_0 + \min(N_1, N_i)}{\kappa_I}, \quad (11)$$

где κ_I – коэффициент запаса, учитывающий главным образом неопределённость при нахождении величины N_0 ;

2.4. определяется безопасный межремонтный ресурс (интервал между последующими осмотрами методами ДК)

$$N_{II} = \frac{N_2}{\kappa_{II}}, \quad (12)$$

где κ_{II} – коэффициент запаса, учитывающий главным образом неопределённость при выявлении трещины в процессе ДК.

3. Для дисков из гранулируемых сплавов:

3.1. рассчитываются периоды УР трещины МЦУ в $(K3)_2 - N_3$ (от l_D до $l_{2.3}$) и N_2 (от l_{DK} до $l_{2.3}$);

3.2. определяется безопасный ресурс до первого капитального ремонта (интервал до первого осмотра методами ДК)

$$N_I = \frac{N_3}{\kappa_I}, \quad (13)$$

или при наличии данных об инкубационном периоде N_4 (наработке до начала развития трещины МЦУ от максимального не выявляемого методами ДК дефекта, расположенного в $(K3)_2$)

$$N_I = \frac{N_3 + N_4}{\kappa_I}; \quad (14)$$

3.3. определяется по формуле (12) безопасный межремонтный ресурс (интервал между последующими осмотрами методами ДК).

При определении показателей долговечности (10) - (14) используются расчёты периода УР при различных начальных размерах трещин, соответствующих: 1) нижней границе УР $l_{1.2}$; 2) размеру выявленных при ЭЦИ трещин l_i ; 3) размеру минимальной трещины l_{DK} , надёжно выявляемой применяемыми при ремонтах (осмотрах) методами ДК; 4) размеру максимального дефекта l_D , не выявляемого методами ДК перед началом эксплуатации. Для нахождения всех этих значений удобно использовать диаграмму живучести (ДЖ) – график зависимости периода УР от начального размера трещины [6, 9]. Расчётная ДЖ описывается функцией

$$R(l) = \frac{E^2}{10A} \int_l^{l_{2.3}} \frac{dl}{[\Delta K(l)]^2}. \quad (15)$$

При простых циклах нагружения $A=1$, при сложных циклах параметр A вычисляется по формуле (9) (в этом случае ΔK – размах КИН в максимальном подцикле СЦН). Диаграммы живучести (15) определяют наработку диска с трещиной МЦУ (размером $l < l_{2.3}$) до наступления $(ПС)_2$, т.е. до достижения трещиной размера $l_{2.3}$. При

$l=l_{1.2}$, $l=l_i$, $l=l_I$ и $l=l_D$ по ДЖ находятся значения N_i , N_I и N_3 , которые используются для определения показателей долговечности (10), (11), (13) и (14). При $l=l_{DK}$ по ДЖ определяется безопасный межремонтный ресурс (интервал ДК) (12), при котором не обнаруженные при ремонте (осмотре) трещины гарантированно не достигнут $(ПС)_2$ до следующего ремонта (осмотра). Консервативность такой оценки обеспечивается тем, что: 1) после достижения трещиной величины $l_{2.3}$ трещина может распространяться ещё значительное число циклов без потери диском функциональной способности; 2) расчёт ведётся от длины надёжно выявляемой трещины, в то время как не обнаруженные при контроле трещины должны иметь меньшую длину; 3) применяется коэффициент запаса κ_{II} .

В качестве примера на рис.4 показаны ДЖ (15) диска ТВД двигателя манёвренной авиации с поверхностными полуэллиптическими трещинами, которые развивались в процессе натурных испытаний в цилиндрическом сечении диска в критической зоне – в области сопряжения поверхностей полотна и полки лабиринта (рис.5). Диаграммы приведены в зависимости от глубины трещины (рис.4а) и её длины на поверхности полотна (рис.4б) (соотношение между глубиной и длиной максимальных трещин в диске на всём протяжении их развития определялось в процессе фрактургического анализа [9]). Как видно на рис.4, если при ДК минимальная глубина надёжно выявляемой трещины составляет 0,2; 0,4 или 0,6мм (что отвечает длине трещины на поверхности полотна 3,6; 5,8 или 7,5мм), то безопасный межремонтный ресурс (интервал ДК) (12) (с коэффициентом запаса $\kappa_{II}=2$) составляет 600, 450 или 350 ПЦ, соответственно. В этом случае не обнаруженные при контроле трещины не достигнут $(ПС)_2$ до следующего ремонта (осмотра). Первую диаграмму целесообразно использовать в том случае, когда при ДК контролируется глубина трещины, вторую – когда контролируется длина трещины на поверхности диска (например, при капиллярной дефектоскопии).

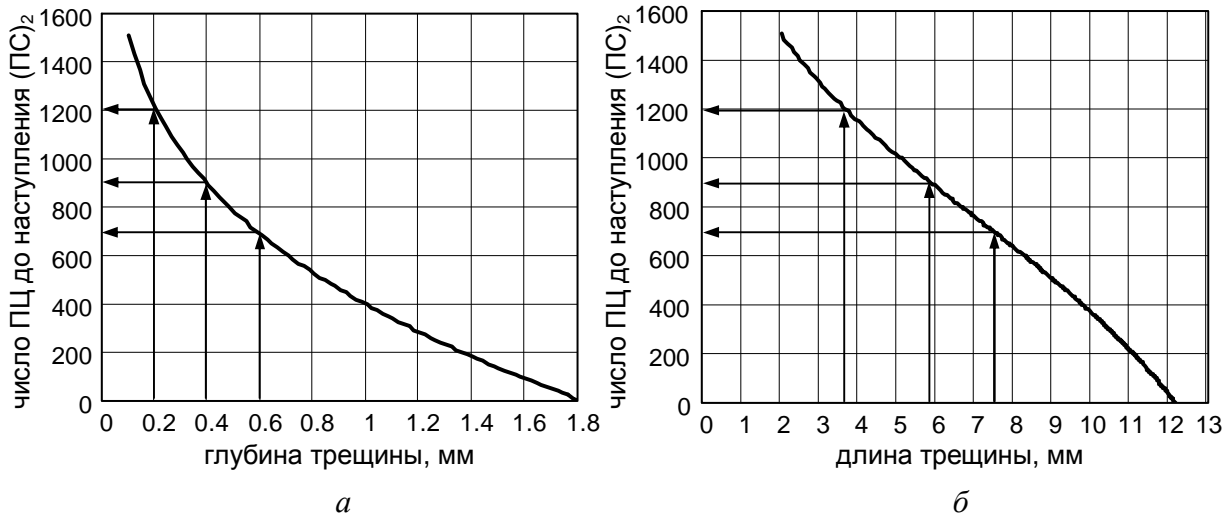


Рис.4. Диаграммы живучести диска ТВД с трещинами в критической зоне диска

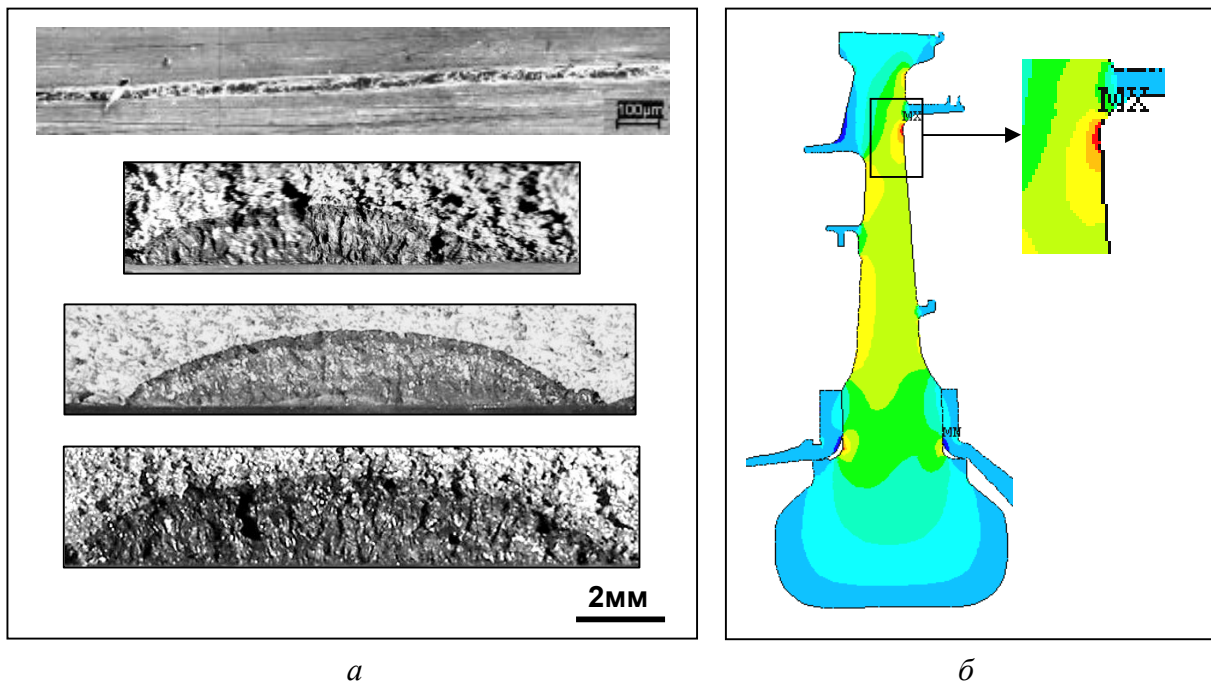


Рис.5. Трещины в критической зоне диска ТВД (показан фрагмент трещины на поверхности полотна и изломы по вскрытым трещинам) (а); распределение радиальных напряжений в диске на максимальном режиме (б)

В заключение рассмотрим применение КАЦД для определения ресурса дисков из гранулируемых сплавов. На рис.6а показано распределение на максимальном режиме окружных напряжений в проектируемом диске КВД (из гранулируемого никелевого сплава ВВ751П) двигателя гражданской авиации: КЗ находится в области перехода ступицы в полотно. При расчёте ресурса живучести диска с дефектами (РЖ_д) по формуле (7) предполагалось, что керамическое включение максимального

размера $l_D=100\text{мкм}$, обнаруженное в очагах развития трещин МЦУ в образцах из материала диска, располагается у поверхности в наиболее напряжённой области диска. Верхняя граница УР $l_{2-3}=4.3\text{мм}$ определялась из кинетического уравнения (6) (при шаге бороздок $S_{2-3}=2\text{мкм}$, соответствующем верхней границе УР) и расчётной зависимости $\Delta K(l)$. Как видно на рис.6б, период УР трещины МЦУ (РЖ_д) $N_3 = 8000$ циклов.

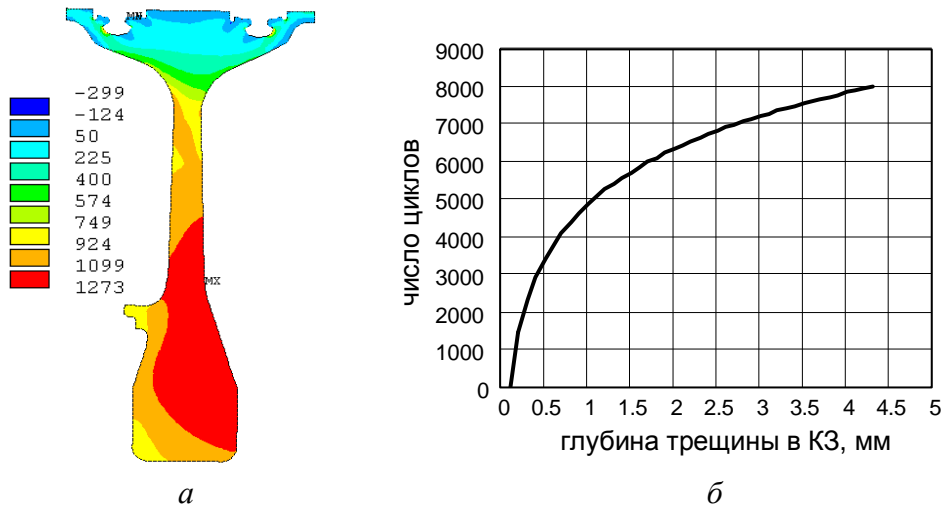


Рис.6. Распределение окружных напряжений в диске КВД на максимальном режиме (МПа) (а) и расчётная зависимость «период устойчивого роста трещины в КЗ – глубина трещины» (б)

Для определения периода N_4 до появления трещины МЦУ в КЗ диска КВД могут использоваться полученные ранее экспериментальные данные о развитии трещин МЦУ при ЭЦИ дисков из гранулируемых никелевых сплавов. На рис.7 показан излом по трещине МЦУ в диске ТВД (из

сплава ЭП741НП), зародившейся от керамического включения размером около 100мкм. Включение располагалось у поверхности фланца; уровень напряжений в области дефекта примерно соответствовал (отличался на 10%) уровню напряжений в КЗ диска КВД.

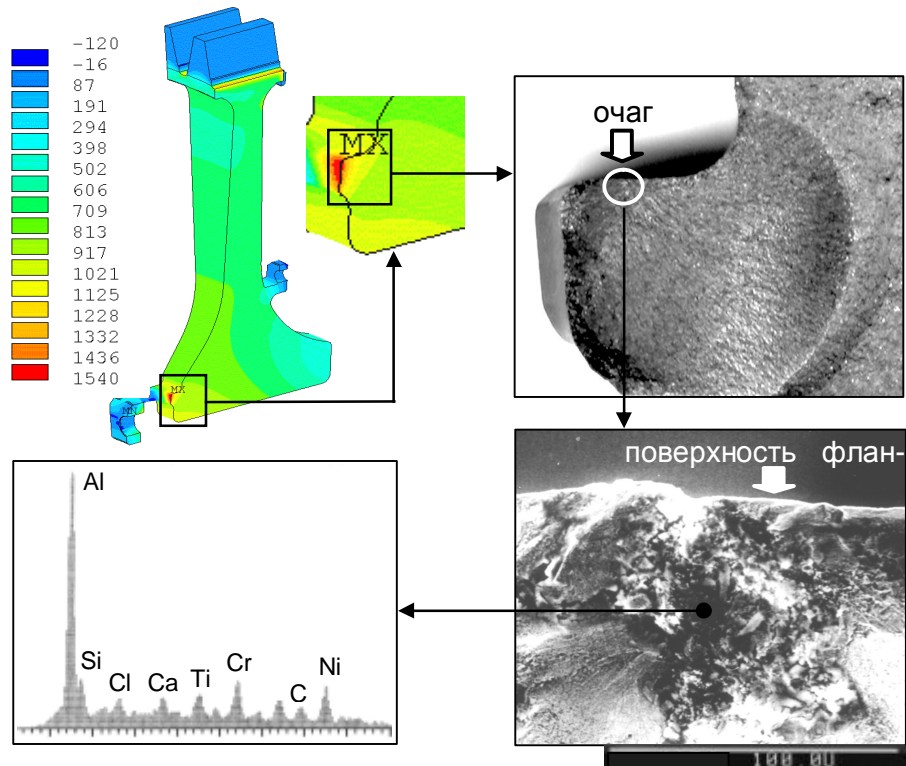


Рис.7. Распределение окружных напряжений в диске ТВД на максимальном режиме (МПа), металлургический дефект в очаге развития трещины МЦУ у поверхности фланца и характеристический рентгеновский спектр дефектной зоны

Наработка диска составила 15000 циклов, при этом, как показали микрофрак-

тографические исследования, трещина от границы дефекта развивалась ≈ 5000 цик-

лов, т.е. ресурс диска ТВД с дефектами $R_{д1}$ до наступления $(ПС)_1$ $N_4 \approx 10000$ циклов. Учитывая, что размер, местоположение (непосредственно у поверхности диска) и тип реального дефекта в диске ТВД те же, что и у предполагаемого дефекта в диске КВД, а уровень напряжений в области дефекта у дисков КВД и ТВД близки, при оценке ресурса диска КВД можно в первом приближении использовать величину наработки $N_4 \approx 10000$ циклов до появления трещины МЦУ от дефекта в диске ТВД. Тогда

определённый в соответствии с КАЦД ресурс диска КВД с дефектами до первого капитального ремонта (осмотра методами ДК) $R_{д2} = R_{д1} + R_{Жд}$ без учёта коэффициента запаса составляет $N_j = N_4 + N_3 = 10000 + 8000 = 18000$ циклов (формула (14)). Консервативность этой оценки обеспечивается тем, что максимальный дефект располагается в наиболее напряжённом месте диска и не учитывается период неустойчивого роста трещины МЦУ.

Библиографический список

1. Туманов Н.В. Стадийность кинетики усталостных трещин и механизм периодического расслаивания-разрыва // Труды Первой междунар. конференции «Деформация и разрушение материалов». Т. 1. М.: ИМЕТ РАН, 2006. С. 85-87.

2. 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.

3. Туманов Н.В., Лаврентьева М.А., Черкасова С.А., Серветник А.Н. Моделирование устойчивого роста усталостных трещин в дисках турбины авиадвигателей при простом и сложном циклах нагружения // Вестник СГАУ. 2009. № 3(19), ч. 1. С. 188-199.

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

5. Ножницкий Ю.А., Туманов Н.В., Черкасова С.А., Лаврентьева М.А. Фрактографические методы определения остаточного

ресурса дисков авиационных газотурбинных двигателей // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, № 4(44). С. 39-45.

6. Туманов Н.В., Черкасова С.А., Лаврентьева М.А., Воробьева Н.А. Исследование механизмов развития трещин малоциклового усталости в дисках авиадвигателей в условиях эксплуатации и оценка остаточной долговечности дисков // Вестник СГАУ. 2011. № 3(27), ч. 2. С. 175-184.

7. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1990. 448 с.

8. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2-х томах. Т.2: Обоснование ресурса и безопасности. Новосибирск: Наука, 2005. 610 с.

9. Туманов Н.В., Лаврентьева М.А., Черкасова С.А. Прогнозирование остаточного ресурса дисков турбины авиадвигателей на основании расчёта периода устойчивого роста трещин малоциклового усталости // Вестник МАИ. 2011. Т. 18, № 5. С. 33-41.

Информация об авторах

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

электронная фрактография, конечно-элементное моделирование трещин.

Лаврентьева Марина Александровна, ведущий конструктор, Центральный институт авиационного моторостроения. Область научных интересов: кинетика усталостных трещин, конечно-элементное моделирование трещин.

CONCEPTION OF CYCLE LIFE ADDITIVITY AND ITS APPLICATION FOR DETERMINING THE RESOURCE OF AERO ENGINE DISKS

© 2014 N.V. Tumanov, M.A. Lavrentyeva

Central Institute of Aviation Motors (CIAM), Moscow, Russian Federation

Taking into account the universal character and high energy intensity of the mechanism of low cycle fatigue (LCF) crack stable growth which ensures a long safety period for the growth of such cracks a conception of cycle life additivity is proposed. According to the conception the cycle life of an aero engine disk is determined up to the limiting state connected with the transition of a LCF crack to unstable growth in the critical area of a disk. The cycle life prior to the first overhaul is calculated by adding the life cycle before the crack origination and that of stable crack growth (survivability resource); the overhaul period is determined by the survivability resource. The latter is also the lower bound of the disk life at the design stage. To estimate the overhaul period we suggest using survivability diagrams representing the dependence of LCF crack stable growth in the critical area of the disk on the size of the crack. Methods of constructing survivability diagrams have been developed for simple and complex loading cycles. Examples of applying the conception for the estimation of cycle life of aero engine disks made of wrought and powder alloys are presented.

Cycle life, aero engine disks, limiting states, low cycle fatigue, stable growth of fatigue cracks.

References

1. Tumanov N.V. Fatigue crack kinetic stages and mechanism of periodic splitting-rupture // Proceedings of the 1st International Conference «Deformation and fracture of materials». V. 1. Moscow: IMET RAN Publ., 2006. P. 85-87. (In Russ.)
2. Tumanov N.V., Lavrentyeva M.A., Cherkasova S.A. Reconstitution and prediction of fatigue crack propagation in aero engine disks // Conversion in machine building of Russia. 2005. No. 4-5. P. 98-106. (In Russ.)
3. Tumanov N.V., Lavrentyeva M.A., Cherkasova S.A., Servetnik A.N. Modeling stable growth of fatigue cracks in aero engine turbine disks under simple and complex loading cycles // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2009. No. 3(19), part 1. P. 188-199. (In Russ.)
4. Tumanov N.V. Physical and mechanical aspects of fatigue crack stable growth // Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta. 2011. V. 18, no. 2. P. 132-136. (In Russ.)
5. Nozhnitsky Yu.A., Tumanov N.V., Cherkasova S.A., Lavrentyeva M.A. Fractographic methods of residual life estimation for aero engine disks // Vestnik UGATU. 2011. V. 15, no. 4(44). P. 39-45. (In Russ.)
6. Tumanov N.V., Cherkasova S.A., Lavrentyeva M.A., Vorobyeva N.A. Study of mechanisms of low cycle fatigue crack propagation in aero engine disks under operating conditions and disk residual life estimation // Vestnik of the Samara State Aerospace University. 2011. No. 3(27), part 2. P. 175-184. (In Russ.)
7. Bolotin V.V. Resurs mashin i konstruktsiy [Life of machines and structures]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 1990. 448 p.
8. Makhutov N.A. Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost' [Structural integrity, life and technotronic security]. V. 2. Life and safety substantiation. Novosibirsk: Nauka Publ., 2011. 610 p.
9. Tumanov N.V., Lavrentyeva M.A., Cherkasova S.A. Prediction of residual life of aero engine turbine disks based on the calculation of low cycle fatigue crack stable growth // Vestnik MAI. 2011. V. 18, no. 5. P. 33-41. (In Russ.)

About the authors

Tumanov Nikolai Vaganovich, Candidate of Science (Engineering), Head of Sector, Central Institute of Aviation Motors (CIAM). E-mail: tumanov@rtc.ciam.ru. Area of Research: dynamics and strength of aero engines, failure analysis, fracture mechanisms, fatigue

crack kinetics, electronic fractography, finite element crack modeling.

Lavrentyeva Marina Alexandrovna, Leading Designer of Central Institute of Aviation Motors. Area of Research: fatigue crack kinetics, finite element crack modeling.