

УДК 621.452-226:620.191

## ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ АДДИТИВНОСТИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСА ДИСКОВ АВИАДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ГРАНУЛИРУЕМЫХ СПЛАВОВ

© 2015 Н. В. Туманов, М. А. Лаврентьева, Н. А. Воробьёва, А. И. Калашникова

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

Предложен подход к определению ресурса дисков авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) из гранулируемых сплавов на основе концепции аддитивности циклической долговечности с учётом долговечности до образования трещин малоциклового усталости (МЦУ) и долговечности при развитии этих трещин (живучести дисков). Проведены комплексные исследования, включающие анализ металлургических дефектов в очагах развития трещин МЦУ в дисках АГТД, микрофрактографическое реконструирование кинетики трещин, математическое моделирование напряжённо-деформированного состояния (НДС) дисков. На основании анализа результатов этих исследований установлена связь между размером, типом и местоположением дефектов, наработкой до появления трещин МЦУ от этих дефектов, периодом роста указанных трещин, характеристиками НДС и температурой диска в области зарождения трещин. Проведён сравнительный анализ дефектов в гранулируемом никелевом сплаве, изготовленном по разным технологиям (при различном максимальном размере гранул). Показано, что максимальный размер дефектов и их количество в единице объёма сплава значительно снижаются при уменьшении размера гранул. В то же время количество дефектов в критических зонах дисков АГТД даже при минимальном размере гранул остаётся достаточно большим и для оценки ресурса живучести дисков следует применять детерминированный подход, рассчитывая период устойчивого роста трещины МЦУ в критической зоне диска от начального размера, равного максимальному размеру дефекта.

*Циклическая долговечность, диски авиадвигателей, гранулируемые сплавы, металлургические дефекты, малоцикловая усталость, устойчивый рост усталостных трещин.*

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-49-59

В соответствии с концепцией аддитивности циклической долговечности (КАЦД) при определении ресурса дисков учитывается как наработка до появления трещины МЦУ, так и период устойчивого роста (УР) этой трещины (ресурс живучести) [1]. Для дисков из гранулируемых никелевых сплавов КАЦД реализуется следующим образом:

1. На этапе проектирования в каждой  $i$ -й высоконапряжённой зоне диска рассчитывается значение периода УР  $N_i$  трещины МЦУ:

$$N_i = \frac{E^2}{10A} \int_{l_n}^{l_{2-3}} \frac{dl}{[\Delta K_1(l)]^2}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $l$  – длина (глубина) трещины;  $l_D$  – размер максимального металлургического дефекта, не выявляемого методами дефектоскопического контроля (ДК) перед началом эксплуатации;  $l_{2-3}$  – верхняя граница устойчивого роста трещины;  $\Delta K_1(l)$  – размах коэффициента интенсивности напряжений (КИН) при простом цикле нагружения, характерном для

дисков АГТД гражданской авиации, или размах КИН в основном (максимальном) подцикле сложного цикла нагружения дисков АГТД военной авиации. При простом цикле параметр  $A=1$ ; при сложном цикле

$$A = \max \sum_{j=1}^L n_j \left[ \frac{\Delta K_j(l)}{\Delta K_1(l)} \right]^2,$$

где  $n_j$  – число простых циклов (подциклов)  $j$ -го типа в типовом сложном цикле, содержащем  $L$  типов подциклов;  $\Delta K_j(l)$  – зависимость  $\Delta K$  от  $l$ , отвечающая подциклу  $j$ -го типа; индекс  $j = 1$  соответствует подциклу с максимальным размахом напряжений; индекс  $j = 2$  – подциклу со следующим по величине размахом напряжений и т.д. [2-3]. Значения  $l_{2-3}$  в каждой высоконапряжённой зоне вычисляются из кинетического уравнения УР трещин МЦУ [2-7]:

$$S(l) = 10 [\Delta K_1(l) / E]^2 \quad (2)$$

и расчётной зависимости  $\Delta K_1(l)$  при величине шага бороздок  $S_{2-3} = 2$  мкм, отвечающей верхней границе УР. Ресурс живуче-

сти диска  $N_{ж}$  определяется как минимальное значение  $N_i$ , соответствующая зона диска – как критическая зона (КЗ)<sub>ж</sub>.

2. Определяется безопасный ресурс до первого капитального ремонта (интервал до первого осмотра методами ДК):

$$N_I = \frac{N_1 + N_{ж}}{\kappa_I}, \quad (3)$$

где  $N_I$  – инкубационный период (наработка до начала развития трещины МЦУ от максимального невыявляемого методами ДК металлургического дефекта, расположенного в (КЗ)<sub>ж</sub>);  $\kappa_I$  – коэффициент запаса, учитывающий главным образом неопределённость при нахождении величины  $N_I$ .

3. Определяется безопасный межремонтный ресурс (интервал между последующими осмотрами методами ДК)

$$N_{II} = \frac{N_2}{\kappa_{II}},$$

где

$$N_2 = \frac{E^2}{10A} \int_{l_{ДК}}^{l_{2-3}} \frac{dl}{[\Delta K_1(l)]^2},$$

$l_{ДК}$  – минимальный размер трещины, надёжно выявляемой при ДК в процессе капитального ремонта (осмотра),  $\kappa_{II}$  – коэффициент запаса, учитывающий главным образом неопределённость при выявлении трещины в процессе ДК.

Поскольку в настоящее время отсутствуют методы расчёта инкубационного периода  $N_I$ , особое значение приобретают комплексные фрактографические и расчётные исследования долговечности дисков с дефектами.

В ходе фрактографических исследований проводится анализ поверхности разрушения по трещинам МЦУ, развившимся от металлургических дефектов при циклических испытаниях дисков и образцов из одного и того же материала, изготовленного по единой технологии. Фрактографические исследования дисков позволяют определить местоположение, тип и размер дефектов в очагах развития трещин МЦУ, вычислить период их роста  $N_*$  от границы дефекта:

$$N_* = \int_{l_A}^{l_B} \frac{dl}{S(l)}, \quad (4)$$

где  $S(l)$  – зависимость шага бороздок от длины (глубины) трещины;  $l_k$  – конечная длина (глубина) трещины при фрактографическом анализе, и определить инкубационный период

$$N_I = N - N_*, \quad (5)$$

где  $N$  – общая циклическая наработка диска.

На основе фрактографических исследований образцов определяется максимальный размер дефектов в очагах развития трещин МЦУ, распределение дефектов по размерам и количество дефектов на единицу массы материала.

В процессе расчётных исследований вычисляются характеристики термонапряжённого состояния диска в области дефекта (напряжения и деформации, температура, расчётная циклическая долговечность в отсутствие дефекта).

На основании анализа результатов фрактографических и расчётных исследований устанавливается связь между размером, типом и местоположением дефектов, приводящих к раннему зарождению трещин МЦУ в дисках, циклической нагрузкой до появления трещин и характеристиками термонапряжённого состояния диска в области дефекта. Эта связь используется при прогнозировании величины  $N_I$  на основе расчёта НДС и данных о размере максимального дефекта. Указанный размер используется также как размер начальной трещины при расчётах периодов УР  $N_i$  (1).

Рассмотрим реализацию такого подхода на примере дисков из гранулируемых никелевых сплавов. На рис.1 показаны изломы по трещинам МЦУ в дисках турбины высокого давления (ТВД) из гранулируемого никелевого сплава ЭП741НП. Трещины развились при эквивалентно-циклических испытаниях (ЭЦИ) дисков от металлургических дефектов двух типов – керамических включений (КВ) и медьсодержащих дефектов (МД)

(рис. 2). Дефекты располагались в различных местах дисков – в полотне (рис.1, а), в области перехода ступицы в полотно (рис. 1, б), вблизи отверстия во фланце (рис. 1, в) и у поверхности болтовых отверстий в полотне (рис. 1, г-д), – причём в

последних трёх случаях местоположение дефектов совпадает с высоконапряжёнными зонами, в которых размах первых главных напряжений превышает 1100 МПа (табл.1).

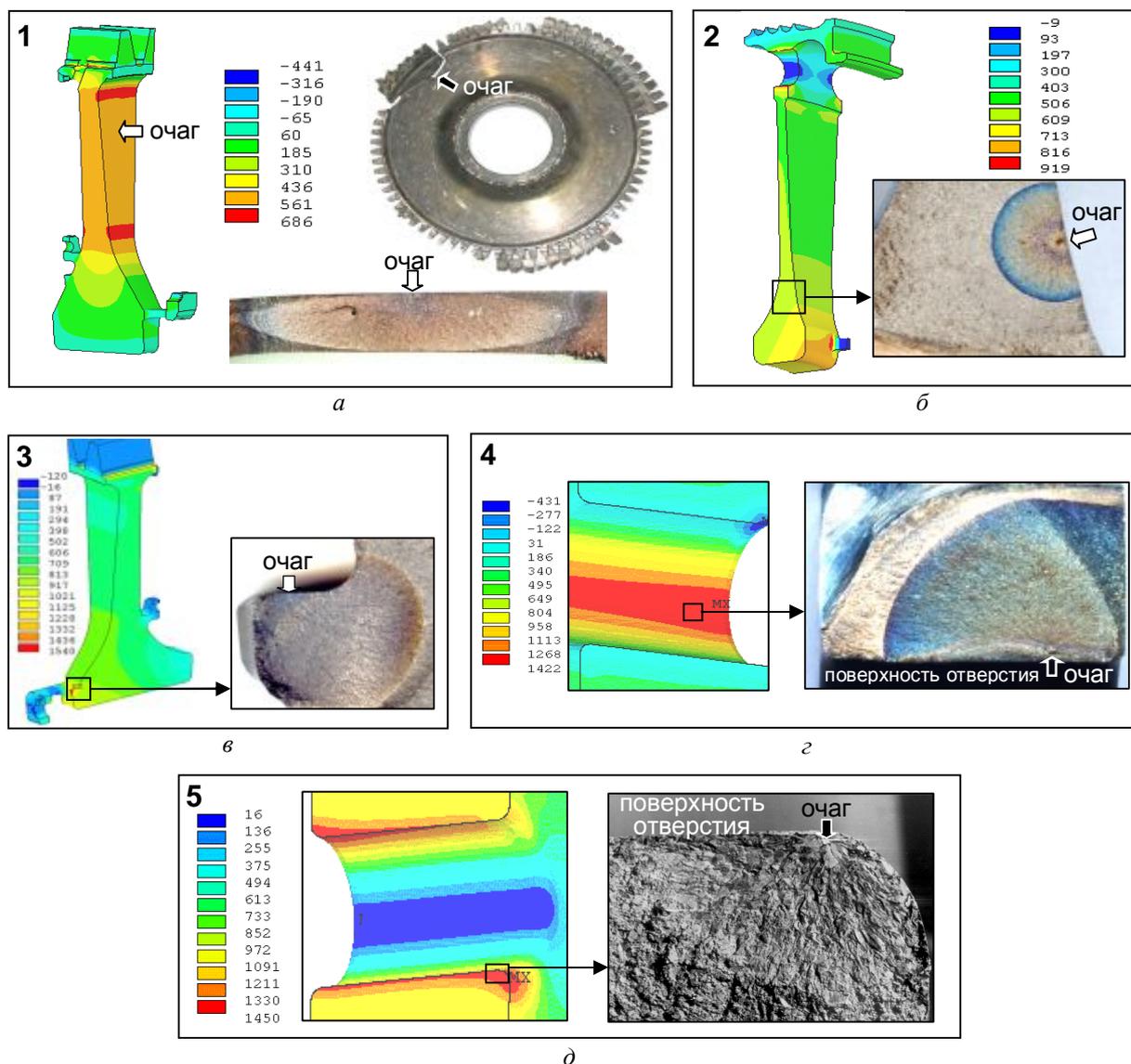


Рис.1. Результаты расчётных и фрактографических исследований металлургических дефектов в очагах развития трещин МЦУ в дисках ТВД из гранулируемого никелевого сплава ЭП741НП при ЭЦИ

Таблица 1. Результаты фрактографического реконструирования кинетики трещин

N п/п	Тип и размер дефекта, мкм	Размер трещины, мм	Размах напряжений, МПа	T, °C	Суммарная наработка, циклы	Период роста трещины от дефекта, циклы	Наработка до появления трещины, циклы, % от суммарной наработки	Расчётная долговечность в зоне дефекта, циклы
1	МД-370×300	разрушение	550	603	16088	>7000	<9000 (<56%)	>2×10 <sup>6</sup>
2	МД-350×280	7.5×4.2	610	520	9770	>4000	<5800 (<59%)	>2×10 <sup>6</sup>
3	КВ-90×70	8×10	1125	400	15000	5300	9700 (65%)	6.5 ×10 <sup>4</sup>
4	МД-200×150	14.7×11.7	1310	550	5525	>4000	<1500 (<27%)	1.65 ×10 <sup>4</sup>
5	КВ-70×70	2×1.2	1420	550	6266	>3000	<3300 (<53%)	1.5 ×10 <sup>4</sup>

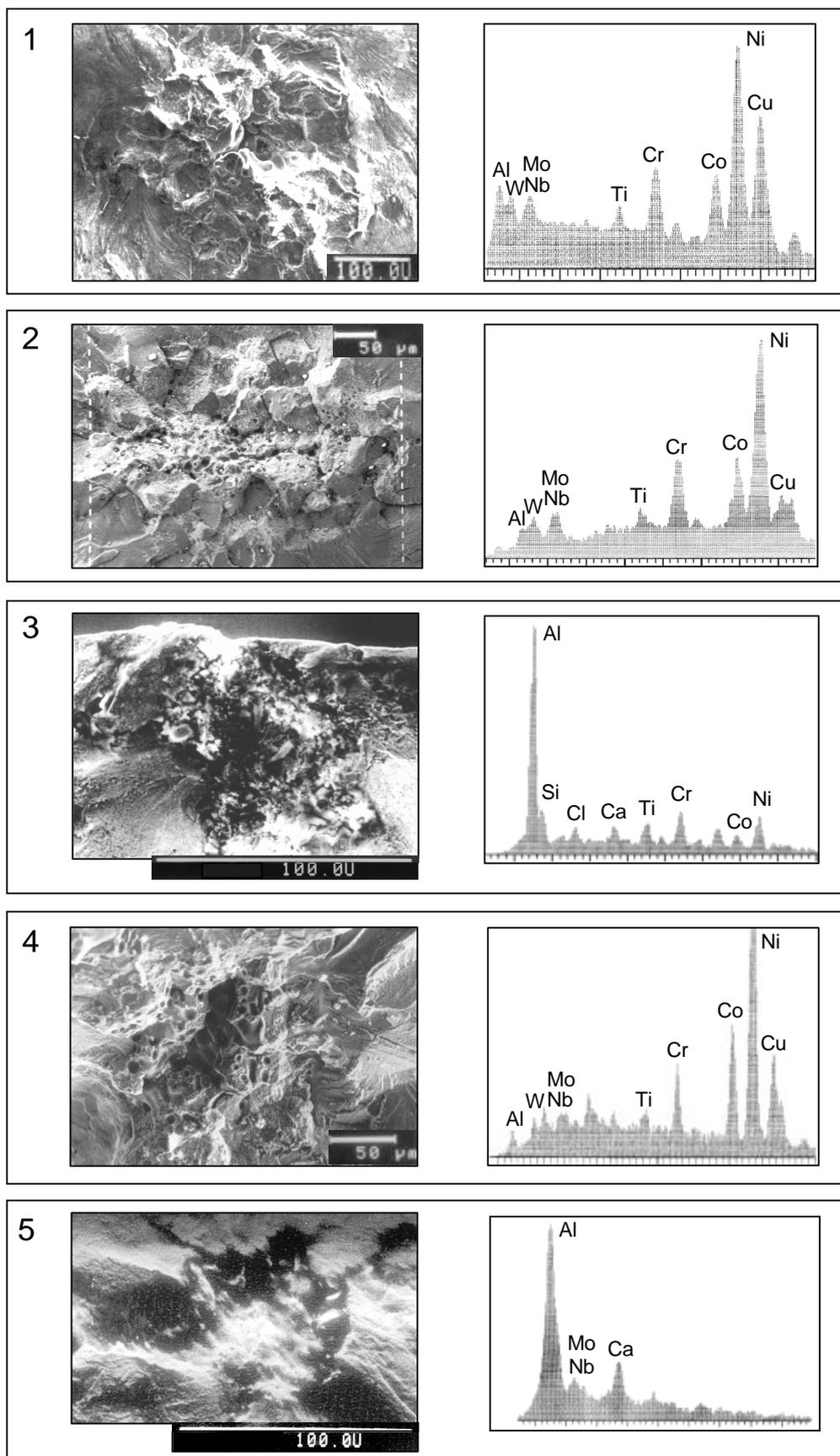


Рис.2. Металлургические дефекты в очагах развития трещин МЦУ в дисках ТВД и характеристические рентгеновские спектры дефектной зоны: а, б, г – медьсодержащие дефекты; в, д – керамические включения

Металлургические дефекты в очагах развития трещин МЦУ на рис.1 и 2 являются результатом засорения посторонними частицами при изготовлении полуфабрикатов дисков. Керамические включения связаны с засорением частицами огнеупорной керамики ( $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $SiO_2$  и их смеси); медьсодержащие дефекты – с засорением продуктами эрозии медного сопла плазмотрона: медь попадает в контейнер с гранулами, плавится в процессе горячего (выше температуры плавления меди) компактирования гранул, и расплав диффундирует в основной материал по границам рекристаллизованных зёрен. Адсорбция меди на границах зёрен вызывает снижение поверхностной энергии границ и приводит к зернограничному разрушению дефектной области, для которой характерна центральная симметрия: в центре области располагается зона с мелкими порами, вокруг которой находится зона разрушения по границам зёрен, определяющая размер дефектной области (рис.2, а, б, в).

В табл.1 и на рис.1 приведены результаты фрактографического реконструирования кинетики трещин на основании измерения шага усталостных бороздок. Знаки «>» перед величиной периода роста трещины  $N_*$  и «<» перед величиной наработки до начала её роста от границы дефекта  $N_I$  соответствуют ситуации, когда измеримые бороздки начинают выявляться не у самой границы дефекта, а несколько дальше. В результате начальный размер трещины при расчёте периода её роста по формуле (4) превышает размер дефекта, что приводит к заниженной оценке этого периода и, следовательно, к завышенной оценке вычисленной по формуле (5) величины  $N_I$ .

Из табл.1 следует, что крупные дефекты, попадающие в высоконапряжённые зоны дисков, приводят к раннему зарождению усталостных трещин, в результате чего работоспособность диска в значительной мере определяется ресурсом живучести (рис.1, в). Однако и небольшие

дефекты в высоконапряжённых зонах дисков также приводят к достаточно быстрому зарождению трещин МЦУ (рис.1, д, размер дефекта – 70мкм, инкубационный период  $N_I < 3300$  циклов). При наличии дефектов фактическая долговечность диска значительно ниже расчётной долговечности в зоне дефекта (без учёта наличия дефектов) (табл.1). Особенно велика разница между фактической и расчётной долговечностями в тех случаях, когда крупный дефект расположен в ненапряжённом месте (рис.1, а, б). В этой ситуации долговечности различаются на два порядка (табл.1).

С целью определения размера и количества включений в гранулируемом никелевом сплаве ВВ751П были проанализированы дефекты в образцах из этого сплава, изготовленного по двум технологиям – из гранул размером <100 мкм (1-я партия образцов) и <70 мкм (2-я партия) (рис. 3 и табл. 2). Каждая партия включала 40 образцов. Исследовались включения в очагах развития трещин МЦУ. Испытания образцов проводились при жёстком цикле нагружения в ЦИАМ (М.Е. Волков) и в ОАО «Авиадвигатель» (А.М. Ратчиев). Общее количество включений в первой партии – 31, во второй – 14. Количество включений размером  $\geq 80$ мкм, попадание которых в высоконапряжённые зоны дисков приводит к зарождению трещин МЦУ при наработке <10000 циклов (рис. 1, в, д), в первой партии – 25, во второй – 4, максимальный размер включений – 250мкм (гранулы <100мкм) и 100мкм (гранулы <70мкм). На рис.4 показаны включения максимальных размеров в каждой партии образцов и карты распределения химических элементов в области включений (светлые зоны на карте каждого элемента означают его повышенное содержание в этой зоне). Как видно на этих картах, включения представляют собой частицы огнеупорной керамики (смесь  $Al_2O_3$  и  $MgO$ ).

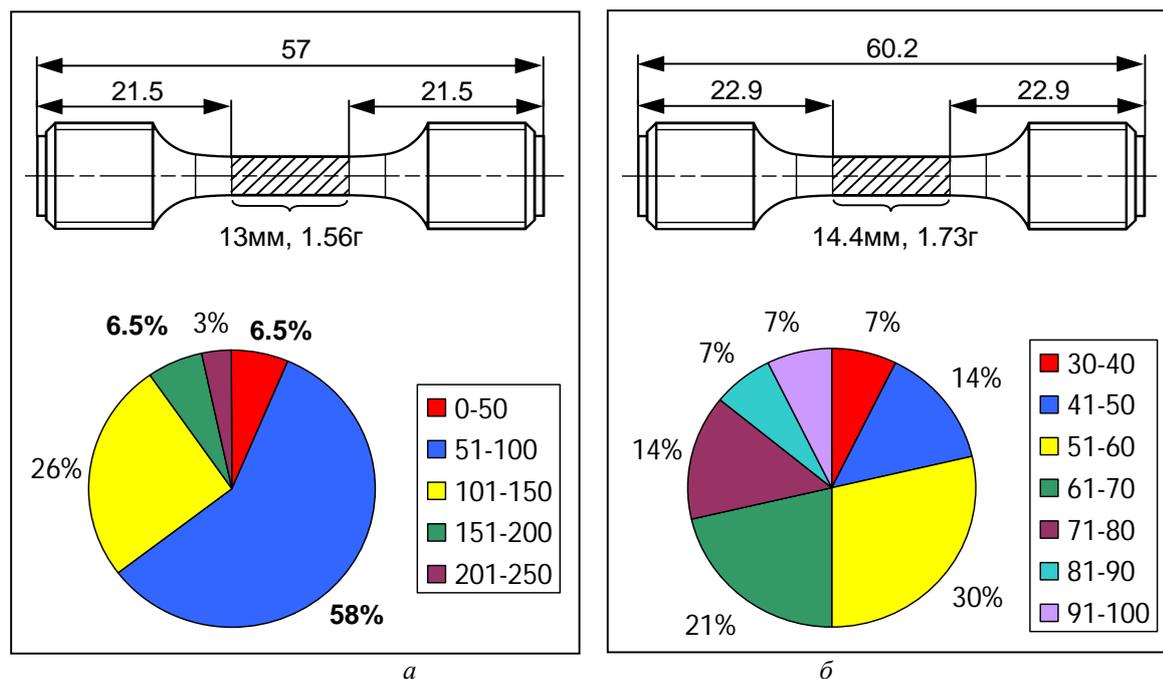


Рис.3. Эскизы испытанных на МЦУ образцов из гранулируемого никелевого сплава BV751П и круговые диаграммы распределения включений в очагах развития трещин МЦУ по размерам: а – первая партия образцов (гранулы размером <100мкм); б – вторая партия образцов (гранулы размером <70мкм)

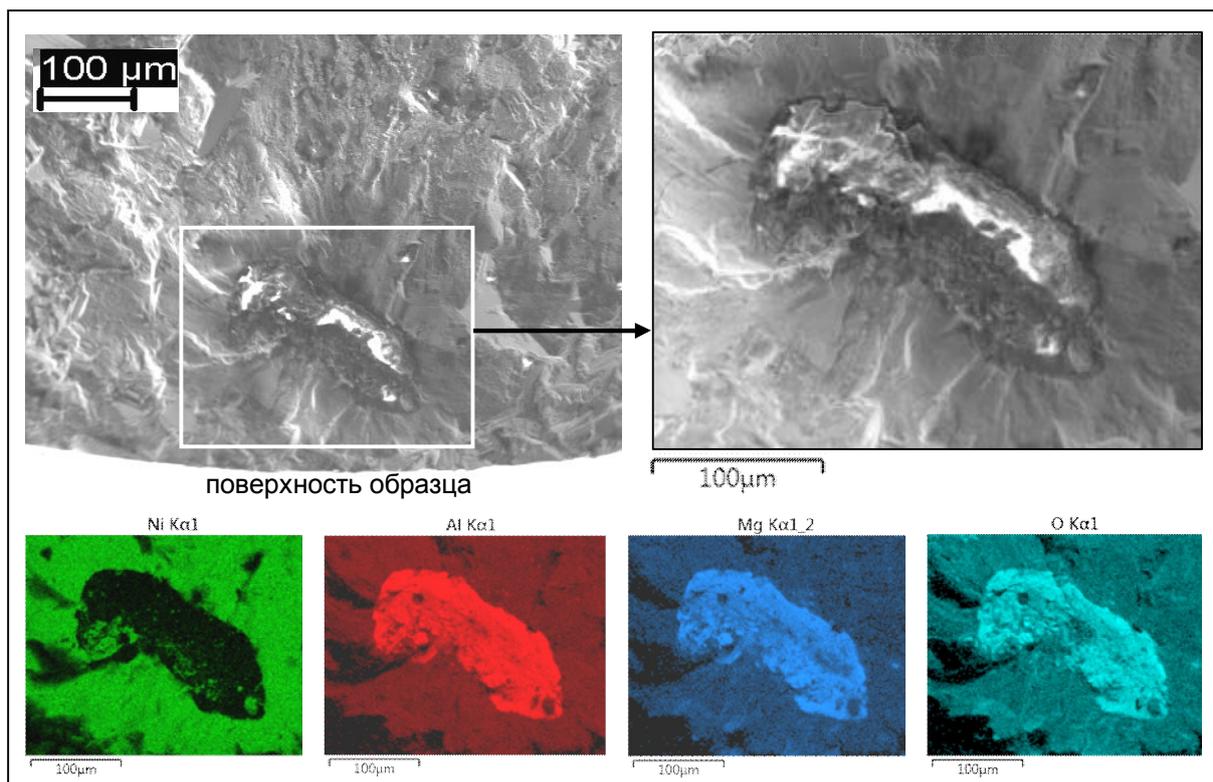
Таблица 2. Результаты исследования включений в очагах развития трещин МЦУ в образцах из гранулируемого никелевого сплава BV751П

Размер гранул, мкм	Распределение включений в очагах развития трещин МЦУ в 40 образцах по размерам, мкм						Всего включений	Количество включений в 1кг	
	0-50	51-100	101-150	151-200	201-250	≥80		всего	
<100	2	18	8	2	1	25	31	400	497
<70	3	11	0	0	0	4	14	58	203

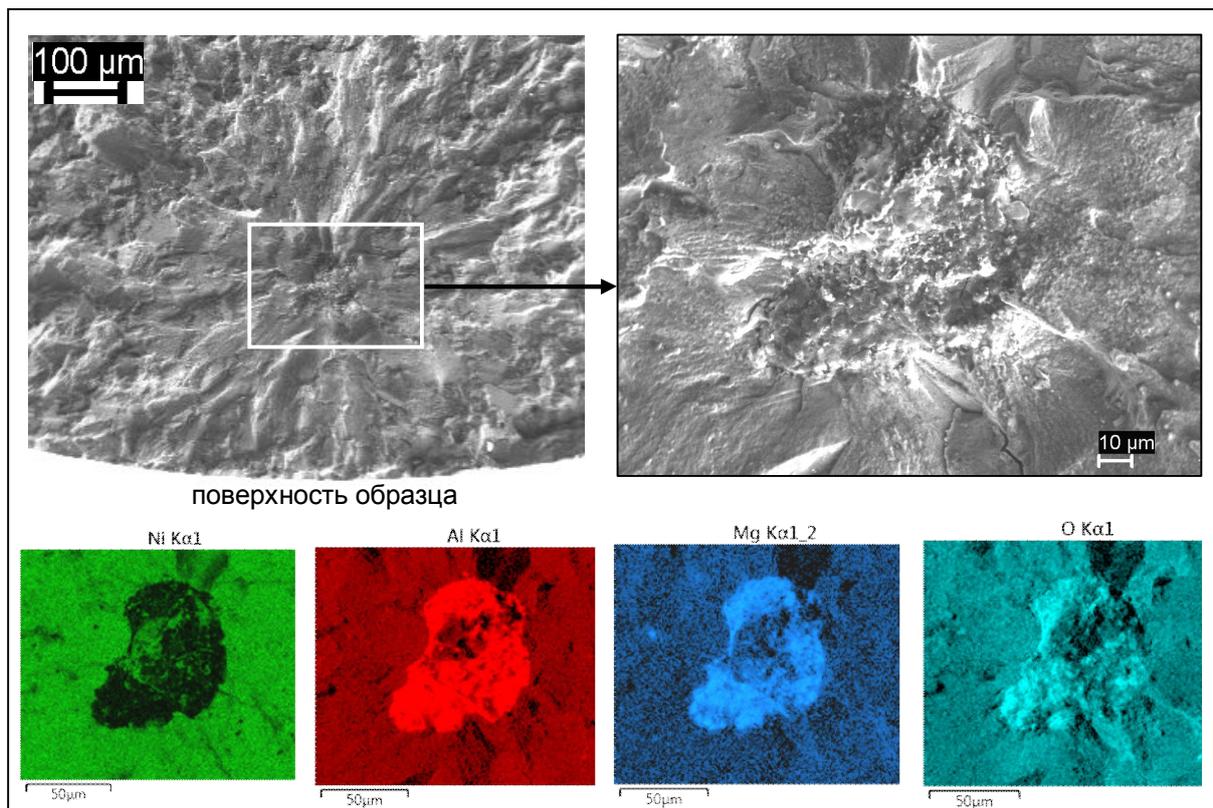
Результаты исследований позволяют оценить количество включений в единице массы (в 1 кг) сплава BV751П, изготовленного из гранул размером <100мкм и <70мкм. Заштрихованные зоны рабочей части образцов на рис. 3 соответствуют областям, в которых были выявлены все включения в очагах развития трещин МЦУ. Длина этих областей вдоль образующей рабочей части образцов –  $L_1 = 13$  мм (1-я партия) и  $L_2 = 14.4$  мм (вторая партия). При диаметре рабочей части образцов  $D = 4.3$  мм и плотности сплава  $\rho = 8.26$  г/см<sup>3</sup> масса указанных областей в каждом образце –  $m_1 = \pi D^2 \rho L_1 / 4 = 1.56$  г и  $m_2 = \pi D^2 \rho L_2 / 4 = 1.73$  г, а во всех сорока образцах –  $M_1 = 40m_1 = 62.4$  г и  $M_2 = 40m_2 = 69.2$  г. В этом количестве материала было обнаружено 31 включение в 1-

й партии образцов (из них 25 включений размером  $\geq 80$ мкм) и 14 включений во 2-й партии образцов (в том числе 4 включения размером  $\geq 80$ мкм). Тогда среднее количество включений в 1 кг сплава BV751П, изготовленного из гранул размером < 100 и < 70мкм, составляет  $n_1 = 31/M_1 \approx 500$  включений/кг и  $n_2 = 14/M_2 \approx 200$  включений/кг соответственно, из них в первом случае  $\approx 400$  включений/кг размером  $\geq 80$ мкм, во втором –  $\approx 60$  включений/кг размером  $\geq 80$  мкм (табл. 2).

Поскольку при расчёте учитывались только те включения, которые послужили очагами развития трещин МЦУ, полученные результаты представляют собой нижние оценки количества включений в 1кг сплава.



a



б

Рис.4. Включения максимальных размеров в очагах развития трещин МЦУ в образцах из первой (а) и второй (б) партий образцов из сплава ВВ751П и карты распределения элементов в области включений:  
 а – включение размером 250×120мкм, расстояние от поверхности образца – 60мкм;  
 б – включение размером 100×70мкм, расстояние от поверхности образца – 220мкм

Используем эти результаты для определения количества включений в диске компрессора высокого давления (КВД) из сплава ВВ751П и в критической зоне (КЗ) этого диска (в области перехода ступицы в полотно), в которой достигается максимальный уровень напряжений и минимальный период УР трещины МЦУ. Выделим в КЗ высоконапряжённую область, в которой первые главные напряжения составляют 1174...1273 МПа (рис. 5, а). Масса всего диска – 29.7 кг, масса высоконапряжённой области – 4.2 кг. В табл. 3 приведено количество включений в диске. Как видно, в КЗ диска, изготовленного из гранулируемого никелевого сплава с использованием гранул <70 мкм, содержится не менее 240 включений размером  $\geq 80$  мкм. Если же диск изготовлен из того же сплава при размере гранул <100 мкм, то в КЗ находится не менее 1680 включений указанного размера. Количество включений  $\geq 80$  мкм, расположенных в КЗ у поверхности (до глубины 0.2 мм – в области, где располагаются все очаги развития трещин МЦУ в дисках на рис.1) при раз-

мере гранул <70 мкм или <100 мкм составляет 28 или 4 соответственно.

Очевидно, что при таком количестве включений в КЗ дисков из гранулируемых сплавов следует применять детерминированный подход при прогнозировании ресурса живучести дисков, рассчитывая УР трещины МЦУ в КЗ от начального размера, равного максимальному размеру включения. Результаты расчёта по формуле (1) (при  $A = 1$ ) для диска КВД приведены на рис. 5, б, на котором показана зависимость периода УР в КЗ от глубины трещины:

$$N(l) = \frac{E^2}{10} \int_{l_d}^l \frac{dl}{[\Delta K_1(l)]^2}.$$

При расчёте предполагалось, что дефект максимального размера  $l_d = 100$  мкм (материал диска – сплав ВВ751П из гранул <70 мкм) располагается в наиболее напряжённой области диска; величина  $l_{2-3} = 4.3$  мм определялась из кинетического уравнения (2) при  $S_{2-3} = 2$  мкм и расчётной зависимости  $\Delta K(l)$ . Как видно, период УР трещины МЦУ (ресурс живучести)  $N_{ж} = 8000$  циклов.

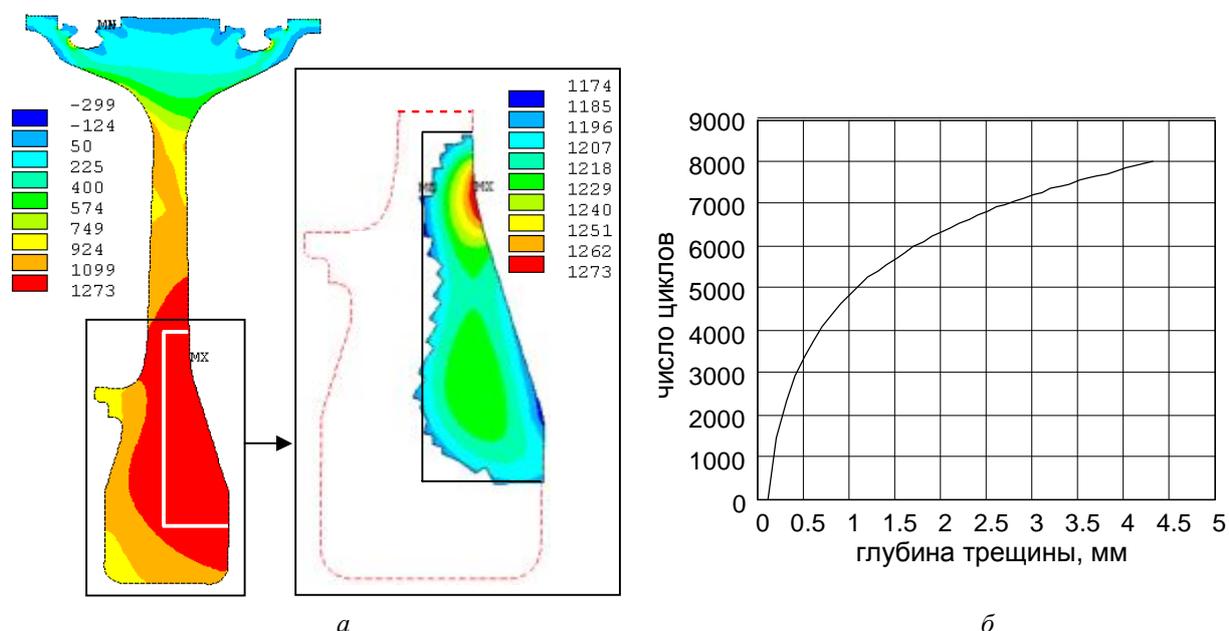


Рис.5. Распределение первых главных напряжений (МПа) на максимальном режиме в диске КВД и в критической зоне диска (а), расчётная зависимость «период устойчивого роста в критической зоне – глубина трещины» (б)

Таблица 3. Количество включений в диске КВД из гранулируемого никелевого сплава ВВ751П (по данным испытаний образцов)

Крупность гранул, мкм	Количество включений в диске		Количество включений в КЗ диска			
			Всего		У поверхности (до 0.2мм в глубину)	
	общее	≥80мкм	общее	≥80мкм	общее	≥80мкм
<100	14760	11880	2090	1680	35	28
<70	6030	1720	850	240	14	4

Приведённые на рис.1 и в табл.1 данные, несмотря на их фрагментарность, позволяют приближённо оценить величину  $N_I$  в диске КВД, поскольку уровень напряжений в КЗ и максимальный размер дефекта (100мкм) примерно соответствуют напряжениям и максимальному размеру дефекта (90мкм) во фланце диска ТВД (рис. 1, в и табл. 1), в котором развитие трещины от дефекта началось при наработке  $N_I \approx 10000$  циклов. Тогда определённый в соответствии с КАЦД ресурс диска до первого капитального ремонта (осмотра методами ДК) без учёта коэффициента запаса составляет  $N_I = N_I + N_{Ж} \approx 10000 + 8000 \approx 18000$  циклов. Консервативность такой оценки ресурса обеспечивается тем, что максимальный дефект располагается в наиболее напряжённом

месте и не учитывается период неустойчивого роста трещины. Отметим, что с уменьшением максимального размера гранул, приводящим к уменьшению размера включений, возрастает вклад в ресурс дисков наработки  $N_I$  до зарождения трещины МЦУ. В результате этого оценка ресурса на основании расчёта периода  $N_{Ж}$  роста трещины в КЗ от максимального дефекта становится всё более консервативной. В этих условиях сформулированная выше программа исследований долговечности дисков из гранулируемых сплавов, реализация которой позволит прогнозировать величину  $N_I$  и определять в соответствии с КАЦД ресурс дисков по формуле (3), приобретает особую актуальность.

### Библиографический список

1. Туманов Н.В., Лаврентьева М.А. Концепция аддитивности циклической долговечности дисков авиадвигателей // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королёва. 2014. № 5(47), ч. 1. С. 9-17.
2. 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 цикле нагружения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королёва. 2009. №3 (19), ч. 1. С. 188-199.
3. 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.
4. Туманов Н.В. Стадийность кинетики усталостных трещин и механизм периодического расслаивания-разрыва // Труды Первой международной конференции. «Деформация и разрушение материалов». Т. 1. М.: ИМЕТ РАН, 2006. С. 85-87.
5. 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.
6. Туманов Н.В. Физико-механические аспекты устойчивого роста усталостных трещин // Вестник МАИ. 2011. Т. 18, № 2. С.132-136.
7. Туманов Н.В. Кинетическое уравнение устойчивого роста трещин малоциклового усталости // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королёва. 2014. №5 (47). Ч. 1. С. 18-26.

### Информация об авторах

**Туманов Николай Ваганович**, кандидат технических наук, начальник сектора, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: [tumanov@rtc.ciam.ru](mailto:tumanov@rtc.ciam.ru). Область научных интересов: динамика и прочность авиадвигателей, анализ разрушений, кинетика усталостных трещин, электронная фрактография, конечно-элементное моделирование трещин.

**Лаврентьева Марина Александровна**, ведущий конструктор, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. Область научных интересов: кинетика уста-

лостных трещин, конечно-элементное моделирование трещин.

**Воробьева Нина Алексеевна**, ведущий инженер, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. Область научных интересов: анализ разрушений, кинетика усталостных трещин, электронная фрактография.

**Калашникова Александра Игоревна**, инженер, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. Область научных интересов: анализ разрушений, кинетика усталостных трещин, электронная фрактография.

### APPLICATION OF THE CYCLIC LIFE ADDITIVITY CONCEPT FOR THE DETERMINATION OF SERVICE LIFE OF AERO ENGINE DISKS MADE FROM POWDER ALLOYS

© 2015 N. V. Tumanov, M. A. Lavrentyeva, N. A. Vorobyeva, A. I. Kalashnikova

Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation

An approach to the estimation of cyclic life of aero engine disks made from powder alloys on the basis of the concept of cyclic durability additivity is proposed. Within the framework of this approach the durability of aero engine disks includes both the service life prior to low-cycle fatigue crack initiation and safe crack propagation life which is calculated as the crack stable growth period. Complex studies including the analysis of metallurgical defects in the areas of low-cycle fatigue crack initiation in disks of aircraft gas turbine engines, microfractographic reconstitution of crack kinetics and mathematical modeling of the disk stress-strain condition have been conducted. On the basis of these studies the connection between 1) the size, location and type of the defects, 2) the crack free life prior to low-cycle crack initiation caused by these defects, 3) the period of the crack growth and 4) the characteristics of stress-strain condition and the temperature of the disk in the area of crack initiation has been established. Comparative analysis of defects in granular nickel alloys produced by various technologies (for various maximum size of the grains) has been carried out. The maximum size of the defects and their number in a unit volume are shown to decrease considerably as the grain size decreases. The number of defects in critical areas of engine disks, however, remains quite large, even for the minimal size of the grains. The expedience of applying the deterministic approach for the calculation of disk survivability is shown.

*Cyclic life, aero engine disks, powder allows, metallurgical defects, low-cycle fatigue, stable growth of fatigue cracks.*

### References

1. Tumanov N.V. Conception of cyclic durability additivity of aero engine disks. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2014. No 5(47), part 1. P. 9-17. (In Russ.)
2. 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.)
3. Tumanov N.V., Lavrentyeva M.A., Cherkasova S.A. Residual life prediction of

aero engine turbine disks based on calculation of low cycle fatigue crack stable growth. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*. 2011. V. 18, no 5. P. 33-41. (In Russ.)

4. Tumanov N.V. Fatigue crack kinetic stages and mechanism of periodic splitting-rupture. *Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. «Deformation and fracture of materials»*. V. 1. Moscow: IMET RAN Publ., 2006. P. 85-87. (In Russ.)

5. Tumanov N.V., Lavrentyeva M.A., Cherkasova S.A. Reconstitution and prediction of fatigue crack propagation in aero en-

gine disks. *Conversion in machine building of Russia*. 2005. No 4-5. P. 98-106. (In Russ.)

6. 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.)

7. Tumanov N.V. Kinetic equation of stable growth for low cycle fatigue cracks. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2014. No 5 (47), part 1. P. 18-26. (In Russ.)

### About the authors

**Tumanov Nikolai Vaganovich**, Candidate of Science (Engineering), Head of Sector, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: [tumanov@rtc.ciam.ru](mailto:tumanov@rtc.ciam.ru). Area of Research: dynamics and strength of aero engines, fracture analysis, fatigue crack kinetics, electron fractography, finite-element crack modeling.

**Lavrentyeva Marina Alexandrovna**, Principal Design Engineer, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. Area of Re-

search: fatigue crack kinetics, finite-element crack modeling.

**Vorobyeva Nina Alekseevna**, Senior Project Engineer, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. Area of Research: fracture analysis, fatigue crack kinetics, electron fractography.

**Kalashnikova Alexandra Igorevna**, first-rank engineer, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. Area of Research: fracture analysis, fatigue crack kinetics, electron fractography.