

## НАПРАВЛЕНИЕ «ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ТУРБОМАШИН» / «STRENGTH OF TURBOMACHINE PARTS»

УДК 621.45.017; 620.187, 519.6

### ФРАКТОГРАФИЧЕСКИ-ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЁННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В РАБОЧЕЙ ЛОПАТКЕ ГТД ВО ВРЕМЯ ЕЁ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Артамонов М.А., Пахомов Н.А., Терешко А.Г.

ОКБ им. А. Люльки – филиал ПАО «ОДК-УМПО», г. Москва, i@artamaks.ru

*Ключевые слова:* усталостное разрушение, фрактографический анализ, моделирование трещины, лопатка ГТД, определение напряжённого состояния в лопатке с трещиной.

Рабочие лопатки ГТД работают в широком диапазоне динамического нагружения. Важно не допустить зарождение усталостной трещины в лопатке, так как в условиях высокочастотного нагружения, развитие трещины по механизму МнЦУ занимает очень короткое время. При внедрении лопатки в эксплуатацию проводят обширные исследования по определению динамического нагружения на всём диапазоне резонансных частот, для того чтобы исключить выход динамического нагружения за пределы усталостной выносливости. В случае, если подобное разрушение всё-таки произошло, важно точно определить основную причину зарождения усталостной трещины. Такие работы важны как для опытных лопаток, ещё не внедрённых в эксплуатацию, так и для лопаток, прошедших государственные испытания. Для этого необходимо узнать, при каких динамических нагружениях работала лопатка во время разрушения, была она разбандажирована или разрушение происходило в условиях работы бандажной полки.

Ранее была разработана методика, которая основывалась на фрактографическом исследовании и статическом численном расчёте [1, 2]. Недостатком данного метода является невозможность учесть работу бандажной полки и ограниченность в расчётах для различных форм колебаний динамического нагружения. В данной работе предложена модификация методики, которая исправляет подобные недостатки. Если раньше моделирование нагружения лопатки осуществлялось статическим способом – отклонение верхнего торца лопатки, то сейчас проводят модальный анализ по колебанию лопатки (где возможно учесть влияние бандажной полки или её отсутствие). Далее полученные данные по деформации лопатки загружаются в модуль уже для статического анализа (модуль в ANSYS – «static structure»), где возможно определить коэффициент интенсивности напряжений (КИН) трещины. Для определения напряжений подбирают амплитуду колебания, чтобы  $\Delta$ КИН, полученный по уравнению Пэриса, соответствовал КИН, определённого путём фрактографического анализа.

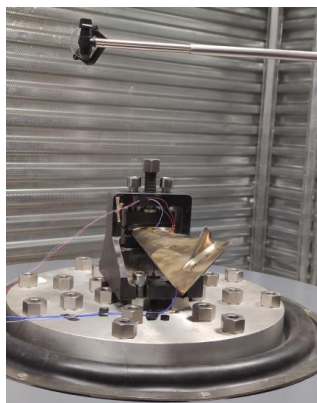
Данная методика была верифицирована на лопатке 1 степени КНД, разрушенной при испытании на вибростенде (рис. 1а) [2]. Для материала ВТ6 наибольшую сходимость показало использование уравнения Пэриса, где показатели Пэриса были получены в ходе стандартных испытаний на СРТУ образцов, нагруженных на внецентровое растяжение при температуре 20 С<sup>0</sup>. Сравнение происходило по определению напряжения фрактографически-динамическим способом в зоне нахождения тензодатчика. Сходимость методики – отклонение значений напряжений в месте нахождения тензодатчика, полученные по измерениям размеров усталостных бороздок на различных локальных участках излома от напряжения, зафиксированного тензодатчиком, показана на рис. 1 (б). Видно, что отклонения не превышают 10%.

Использование данной методики открывает возможности по моделированию зарождения усталостной трещины при её повреждении посторонним предметом. Ведутся

работы по верификации данной методики путём имитации центробежного растяжения при испытании лопатки на вибростенде.

### Выводы

Была разработана методика, позволяющая моделировать напряжённое состояние детали с трещиной путём имитации колебательного процесса в статической задаче. Верификация данной методики показала хорошую сходимость для диапазона скоростей/размеров усталостных бороздок от 0,3 мкм/цикл до 0,8 мкм/цикл.



а)



б)

Рисунок 1 – Испытание лопатки на вибростенде (а) и результат определения напряженного состояния в лопатке в месте нахождения тензодатчика по размерам усталостных бороздок (б)

### Список литературы

1. Артамонов М.А., Говоров А.А., Старшинов Д.С. Реконструкция динамического нагружения лопатки вентилятора перед её разрушением / Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение, 2022. Т. 21. №1. С. 24-34.
2. Артамонов М.А., Пахомов Н.А., Терешко А.Г., Говоров А.А., Кузьмин С.А. Определение напряжённого состояния лопатки первой ступени КНД, испытанной на вибростенде, фрактографически-расчётным способом / Климовские чтения, 2022: перспективные направления развития авиадвигателестроения: сборник статей научно-технической конференции, 2022. С. 293-300.

### Сведения об авторах

Артамонов Максим Анатольевич, кандидат физико-математических наук, начальник бригады. Область научных интересов: фрактографический анализ.

Пахомов Николай Андреевич, инженер-конструктор. Область научных интересов: численное моделирование.

Терешко Антон Герольдович, начальник отдела прочностных испытаний. Область научных интересов: проектирование оснастки для испытаний.

## FRACTOGRAPHIC-DYNAMIC ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE IN THE LPC BLADE DURING FATIGUE FAILURE

Artamonov M.A., Pakhomov N.A., Tereshko A.G.

Lyulka Design Bureau – subsidiary company of PJSC «UEC-UMPO», Moscow  
i@artamaks.ru

*Keywords: fracture fatigue, fractographic analysis, crack modeling, GTD blade, determination of the stress state in a blade with a crack.*

A technique has been developed to simulate the stress state of a part with a crack by simulating an oscillatory process in a static problem. Verification of this technique showed good convergence for the speed range from 0.3 microns/cycle to 0.88 microns/cycle.