

## Об оценке ресурса лопаточного аппарата газотурбинного двигателя при асимметричном циклическом нагружении центробежными и аэродинамическими силами

Завойчинская Э.Б.

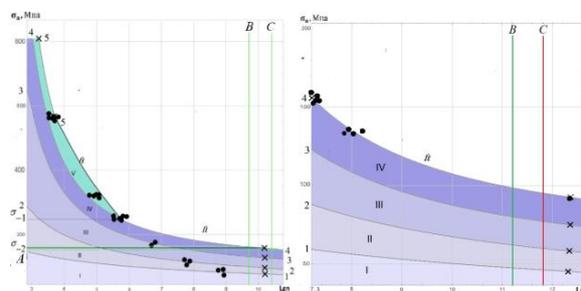
МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

В докладе предлагается метод оценки ресурса охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей, учитывающий их осевые вынужденные резонансные колебания. При заданных параметрах: геометрии лопаток и диска, числе лопаток, частоте вращения диска и характеристиках потока газа, определяется постоянная составляющая осевого напряжения и область ее наибольших значений. Рассматривая разные прогибы лопатки, из решения задачи изгиба консольной балки, жестко закрепленной в обод диска, без связей, определяются амплитуды колебаний. Метод основывается на теории масштабного-структурного разрушения материала [1,2], согласно которой стохастический процесс разрушения рассматривается на шести уровнях, отвечающих разным стадиям эволюции материала по различным физическим механизмам, для которых определяется иерархическая система соотношений для вероятности разрушения. Проводится идентификация базовых констант в областях многоциклового и гигациклового усталости. Строятся кривые усталости по уровням дефектности. Метод подтверждается сравнением теоретических результатов с известными данными эксплуатации и фрактографических исследований поврежденных лопаток из алюминиевых и никелевого сплавов [3-5].

Для алюминиевого сплава ВД17 [1] на рис.1 (1) представлены расчетные кривые усталости по четырем уровням дефектности при симметричном нагружении при  $N \in [2 \cdot 10^7, 2 \cdot 10^{12}]$  циклов. В результате анализа данных [1] получено, что в разрушенных лопатках при наработке около 18 000 часов (линия В на рис. 1 (1)) имела место концентрация напряжений с эффективным коэффициентом концентрации, в среднем, равным  $K = 4.7$ , вероятно, возникшая из-за резонансных колебаний. Найдены амплитуды напряжений возможного образования микро- и коротких трещин и макроразрушения при наработке 50 000 часов (линия С на рис. (1)).

Проведен расчет лопатки турбокомпрессора из никелевого сплава ЖС6К по данным [1]. Определены области развития дефектов пяти

уровней в диапазоне по числу  $N \in [2 \cdot 10^3, 2 \cdot 10^{10}]$  циклов при симметричном нагружении и с асимметрией цикла. Получено, что при прогибе  $w = 1.7$  мм в лопатках возможно зарождение дефектов четвертого уровня (коротких трещин). При прогибе  $w = 2.5$  мм и числе циклов  $N = 5 \cdot 10^9$  циклов, возможно макро-разрушение по коротким трещинам. По модели установлено, что при наработке 370-1670 часов ( $N_f \in (0.53 - 2.4) \cdot 10^{10}$  циклов) возможно макро-разрушение в интервале предельных амплитуд  $\sigma_f \in [155, 165]$  МПа (линии В и С на рис. (2)). Из проведенных расчетов следует, что в разрушенных лопатках с большой вероятностью возникли резонансные колебания с амплитудой, в 3.3 раза превышающей номинальную расчетную амплитуду вынужденных колебаний.



### Список литературы:

- 1) Завойчинская, Э.Б. Усталостное масштабное-структурное разрушение и долговечность конструкций при пропорциональных процессах нагружения: автореф. дис. докт. физ.-мат. наук. М.: Генезис. 2018. 46 с.
- 2) Zavoychinskaya E.B. On the Theory of Scale Structural Fatigue of Metals at the Proportional Loading// J. Physics. 2020. v. 1431, pp. 012024-012032.
- 3) Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации. Уфа: Изд.н.-т. лит.-ры "Монография", 2007. 500с.
- 4) Bathias C., Paris P.C., Huang Z., Wagner D. Subsurface crack initiation and propagation mechanisms in gigacycle fatigue. Acta Materialia. 2010. V.58. p.60466054.
- 5) Burago N., Nikitin I. Multiaxial Fatigue Criteria and Durability of Titanium Compressor Disks in Low- and Very-high-cycle Fatigue Modes //Math. Modeling and Optimization of Complex Structures, Computational Methods in Applied Sciences 40, Springer, 2016. p. 117-130.