

**МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
МАЛОЦИКЛОВОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД
НА ОСНОВЕ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ С КОНЦЕНТРАТОРОМ НАПРЯЖЕНИЙ**

© 2018 С.А. Букатый¹, А.В. Пахоменков¹, Г.А. Солнцев¹, А.С. Букатый²

¹ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск;

²Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

**EQUIVALENT TESTS METHOD FOR THE LARGE GTE PARTS LOW CYCLE DURABILITY
PREDICTION ON THE BASIS OF SPECIMENS
WITH A STRESS CONCENTRATOR TESTS**

Bukatyy S.A., Pakhomenkov A.V., Solntsev G.A. (Public Joint-Stock Company «UEC-Saturn», Rybinsk, Russian Federation),

Bukatyy A.S. (Samara National Research University, Samara, Russian Federation)

The low cycle fatigue equivalent test method based on the application of development specimens whose stress and strain state shall be similar to stress and strain state of the part to be investigated is given in this examination. Stiffness ratio of the stressed state is used as the similarity criterion of stress and strain state of specimens and part. The method was successfully applied on gas turbine engine low pressure compressor disk. Round specimens with V-concentrator were used as equivalent specimens.

Чтобы получить более достоверные данные о циклической прочности ответственных деталей на практике применяют натурные испытания. В силу сложности и невозможности проведения испытаний для крупногабаритных деталей более перспективным является проведение эквивалентных испытаний (ЭИ) на специальных образцах, моделирующих НДС исследуемого объекта. На основе работы [1] в ПАО «НПО «Сатурн» разработаны методика анализа НДС и метод прогнозирования малоциклового усталости (МЦУ), в которых в качестве критерия подобия НДС детали и эквивалентных образцов используется коэффициент жёсткости напряжённого состояния (ЖНС)

$$K_{жс} = \frac{3\sigma_0}{\sigma_i} = \frac{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}},$$

где $\sigma_0 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ – октаэдрическое напряжение; σ_i – интенсивность нормальных напряжений; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Метод прогнозирования МЦУ на основе ЭИ состоит из следующих этапов.

1. На основе конечно-элементного (КЭ) моделирования детали определяются характеристики наиболее опасного места: величина коэффициента $K_{жс}$ и интенсивности деформаций ε_i в опасной точке – элементе.

2. Разрабатывается КЭ модель эквивалентного образца с концентратором напряжений, характеристики НДС которого должны быть подобны детали.

3. Из материала, из которого изготавливается деталь, изготавливаются образцы и проводятся испытания на МЦУ не менее 4-х вариантов, подбирая нагрузку таким образом, чтобы охватить необходимый интервал долговечности исследуемой детали.

4. На основе аппроксимации полученных данных по долговечности (например, в системе Excel) в координатах $\varepsilon_i - \lg N$ строится кривая долговечности образцов и определяется её аналитическое выражение.

5. При полном соблюдении подобия НДС в образцах и детали полученная кривая долговечности образцов характеризует долговечность исследуемой детали: по величине ε_i детали определяется соответствующее количество циклов до разрушения.

Данная методика позволяет также осуществлять проектирование деталей по допускаемой долговечности: по заданному количеству циклов определяется величина допускаемой интенсивности деформаций, по которой при заданном уровне нагрузок подбираются геометрические параметры детали. В тех случаях, когда при равенстве коэффициентов $K_{жс}$ эквивалентных образцов

и детали не удаётся достичь полного подобия НДС по соотношению главных напряжений, необходимо установить коэффициент соответствия K_c между интенсивностями деформаций детали и образцов, т.е. $\epsilon_{i\text{дет}} = K_c \cdot \epsilon_{i\text{обр}}$. При отсутствии необходимых экспериментальных данных для определения K_c предлагается апробированный в данной работе коэффициент соответствия, учитывающий неоднородность главных напряжений по величине отношения максимальных касательных напряжений к интенсивности напряжений для детали и образцов

$$K_c = \left[\frac{\tau_{\max_{\text{д}}} / \sigma_{i_{\text{д}}}}{\tau_{\max_{\text{о}}} / \sigma_{i_{\text{о}}}} \right]^2. \quad (1)$$

Апробация метода проводилась на диске 1-й ступени компрессора низкого давления (КНД) двигателя Д-30КП, изготавливаемом из сплава ВТ3-1. В силу сложности изготовления опытных образцов, моделирующих замок «ласточкин хвост», в качестве эквивалентных образцов использовались круглые образцы с V-образным концентратором. Заготовки образцов вырезали из некондиционного диска. КЭ моделирование диска и опытных образцов осуществляли в системе Ansys v.18, с использованием элементов Solid 186. Расчёты и испытания проводили для серийного диска в исходном состоянии и для диска с доработанным замком (рис. 1). Испытания на МЦУ по отнулевому

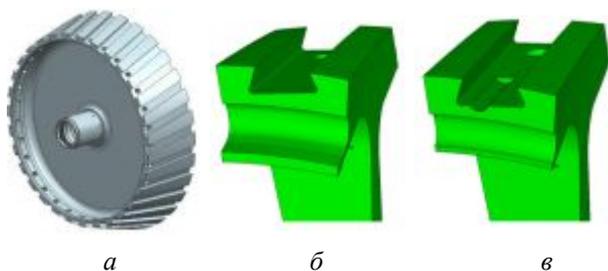


Рис. 1. КЭ модели: а - диск 1-й ступени КНД; б - серийный диск; в - доработанный диск

циклу проводили: дисков на специализированном стенде УИР-3, образцов на установке MTS 810 при растяжении-сжатии. Нанесение канавки привело к уменьшению уровня НДС, уменьшению $K_{ж}$ и значительному увеличению малоциклового долговечности: с 10763 до 29485 циклов. Кривая выносливо-

сти и графики её аппроксимации полиномом 3-й степени и экспоненциальной функцией приведены на рис. 2.

Результаты расчётов интенсивностей деформаций для дисков в системе Ansys v.18

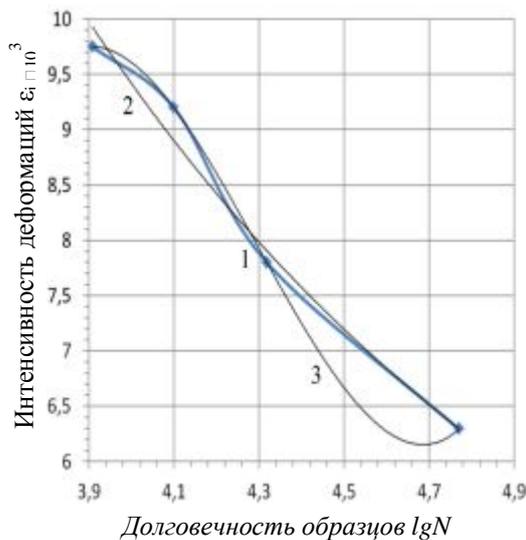


Рис. 2. Результаты испытаний на МЦУ опытных образцов:

- 1 - аппроксимация сплайнами в Excel,
- 2 - аппроксимация степенной функцией,
- 3 - аппроксимация полиномом 3-й степени

и для образцов на основе аппроксимационных уравнений с учётом коэффициентов соответствия K_c показывают, что ошибка в прогнозировании долговечности серийного диска не превышает 1 %, а для доработанного диска в пределах 8 %. Учёт в выражении (1) изменения ЖНС доработанного диска в соответствии с (2) уменьшает погрешность расчётов до 2,24 %

$$K_c = \left[\frac{\tau_{\max_{\text{д}}} / \sigma_{i_{\text{д}}}}{\tau_{\max_{\text{обр}}} / \sigma_{i_{\text{обр}}}} \cdot \frac{K_{ж_{\text{исх}}}}{K_{ж_{\text{дораб}}}} \right]^2. \quad (2)$$

Библиографический список

1. Букатый А.С., Букатый С.А., Андреев И.Б. Оптимизация конструкции ответственных деталей ГТД на основе критериев напряжённого состояния / Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьёва. – Рыбинск, 2016 г. – № 4 (39). – С. 4-12.