

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРОЧНЕНИЯ МЕТОДОМ ППД НА МАЛОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ГТД С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ

Портер А.М.¹, Букатый С.А.², Лёшин Д.П.¹, Букатый А.С.³

¹ОАО «Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск,

²Рыбинская государственная авиационная технологическая академия

³Ярославский государственный технический университет

EXPERIMENT-CALCULATED RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE SHOT-PEENING STRENGTHENING UPON THE LOW-CYCLE FATIGUE OF THE GAS TURBINE PARTS WITH THE STRESS CONCENTRATOR

Porter A.M., Bukaty S.A., Leshin D.P¹, Bukaty A.S. The finite-element technique of the deflected mode of the gas turbine parts in the stress concentration zone with the residual stress after shot-peening strengthening has been developed here. The deflected mode in the interlock of the type “dovetail” after shot-peening strengthening is examined on the example of the low pressure compressor disc. Calculations and low-cycle fatigue tests of the samples and disks performed on the test stand “UIR-3” verified the effectiveness of the surface plastic deformation strengthening in the stress concentration zone.

В настоящее время повышение надёжности и ресурса ГТД связано с увеличением сопротивления малоциклового усталости (МЦУ) основных деталей, к числу которых относятся диски 1-й ступени компрессора низкого давления (КНД). Опыт эксплуатации двигателей и натурные испытания дисков показывают, что наиболее нагруженными областями диска являются зоны концентрации напряжений в замковом соединении типа «ласточкин хвост» (рис. 1). На ОАО «НПО «Сатурн» были проведены исследовательские работы по устранению возможного дефекта.

Конечно-элементный анализ напряжённо-деформированного состояния (НДС) в системе ANSYS показал, что в зоне концентрации напряжения, превышающие предел текучести, локализованы в тонком поверхностном слое и на глубине 0.4 мм они становятся меньше 800 МПа, т. е. находятся в упругой области для материала ВТЗ-1. Поэтому, для восстановления работоспособности дисков было предложено [1] удалять поверхностный слой материала с повреждениями, образующимися в процессе эксплуатации. С этой целью была внедрена

операция перепротяжки радиусной части пазов дисков на глубину 0.5 ± 0.1 мм.



Рис. 1 Образование трещины в замке диска 1 ст. КНД при испытаниях на установке

Для повышения работоспособности дисков после перепротяжки используется ППД – упрочнение обода и пазов диска микрошариками, которое наводит в поверхностном слое материала детали сжимающие остаточные напряжения (ОН). Упрочнение дисков осуществляется на роботизированной установке Varog Blast фирмы Rösler стальными микрошариками диаметром 300–500 мкм при давлении воздуха

0,1 МПа. Эффективный режим упрочнения определяли по эпюре распределения ОН.

Для определения эффективности мероприятий и проведения испытаний на МЦУ вырезали образцы из следующих типов дисков: а) нового без наработки (брак при изготовлении); б) прошедшего эквивалентно-циклические испытания (ЭЦИ) на УИР-3; в) бывшего в эксплуатации на двигателе Д-30КУ-154 с наработкой 17995 часов / 5545 циклов; г) из диска варианта в) с доработкой перепротяжкой и упрочнением.

Испытания образцов на МЦУ проводили при консольной схеме закрепления на установке фирмы MTS модели 322 с толкающим усилием $P = 2,5 \pm 0,1$ кН по отнулевому трапецеидальному циклу нагружения частотой $f = 0,25$ Гц. Уровень напряжений $\sigma_{\max} = 1160 \pm 15$ МПа контролировали тензометрическим методом. Испытание прекращалось, когда падение нагрузки при появлении трещин составляло $\sim 0,10 \dots 0,15$ кН.

Для расчётной оценки влияния перепротяжки и последующего упрочнения на НДС и долговечность в системе ANSYS на основе [2] была разработана специальная методика моделирования эпюры остаточных напряжений, образовавшихся в поверхностном слое детали при упрочнении перепротянутого паза. В моделях диска компрессора и образца, вырезанного из диска, использовались элементы Solid 45 и Solid-Shell 190.

Расчёт циклической долговечности образцов и дисков проводился методом универсальных наклонов по модифицированной в ЦИАМ формуле Мэнсона

$$\Delta \varepsilon = \frac{3,5(s_{\text{дл}} - s_m)}{E(t)} N_{\text{ц}}^{-0,12} + \left(\ln \frac{1}{1-y(t)} \right)^{0,6} N_{\text{ц}}^{-0,6}. \quad (1)$$

Интенсивность размахов деформаций $\Delta \varepsilon$ с разделением на упругую $\Delta \varepsilon_i^e$ и $\Delta \varepsilon_i^{pl}$ пластическую составляющие в опасной точке детали определяли по формуле:

$$\Delta \varepsilon = \frac{3}{2(1+\mu)} \Delta \varepsilon_i^e + \Delta \varepsilon_i^{pl}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Определение среднего напряжения σ_m при сложном напряженном состоянии осуществлялся в зависимости от положительной величины (растягивающих) средних напряжений $\sigma^{\text{нагр}}$ и $\sigma^{\text{разгр}}$. При этом, в соответствии с гипотезой о наибольшем влиянии на циклическую прочность двух наибольших по величине главных напряжений принимаем

$$s^{\text{нагр}} = \frac{1}{2} (s_1^{\text{нагр}} + s_2^{\text{нагр}}), \quad (3)$$

$$s^{\text{разгр}} = \frac{1}{2} (s_1^{\text{разгр}} + s_2^{\text{разгр}}).$$

Тогда в качестве σ_m принимаем

$$s_m = \max(s^{\text{нагр}}; s^{\text{разгр}}). \quad (4)$$

Результаты расчётов долговечности образцов и дисков без упрочнения и с упрочнением удовлетворительно согласуются с результатами испытаний и показывают увеличение количества циклов до разрушения в 3-4 раза. Это свидетельствует о достаточно большой эффективности применения методов ППД для повышения долговечности не только в многоцикловой, но и в малоцикловой области.

Библиографический список

1. Портер, А.М. Разработка мероприятий по повышению ресурса дисков 1 и 11 ступеней КВД двигателей Д-30КП и Д-30КУ-154 / А.М. Портер, С.А. Букатый, Н.Г. Маслова, Д.П. Лёшин // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьёва: Сб. научных трудов. – Рыбинск, 2007. – № 2 (12). – 179с. С. 67–71.
2. Букатый, А.С. Разработка метода определения режимов упрочнения тонкостенных деталей ГТД на основе исследования технологических остаточных напряжений и деформаций / А.С. Букатый – Автореф. ... канд. техн. наук: 01.02.06; 05.07.05 / СГАУ. – Самара, 2009. – 16 с.