

Кочерова Е.Е., Злобин А.С., Анохин Д.В., Рунова К.В.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ ПЕРЕДНЕГО ДЕФЛЕКТОРА ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Работа по исследованию влияния остаточных напряжений на циклическую долговечность дефлектора турбины высокого давления была проведена в связи с массовым проявлением дефекта «трещины в радиусе перехода центрирующего пояса фланца дефлектора ТВД 152.416.003-1». В техническом проекте на двигатель НК-25 был проведён имевшимися на тот момент времени средствами анализ эксплуатационного цикла напряжённо-деформированного состояния и циклической долговечности. Расчёты не выявили проблем в обеспечении узлом проектного назначенного ресурса двигателей НК-25 и НК-32 [1].

Однако при эквивалентно-циклических испытаниях одного из двигателей было получено разрушение дефлектора 152.416.003-1 с началом по полотну в зоне между первым и вторым лабиринтами. Аналогичный дефект на двигателе стал причиной катастрофы самолёта. На ряде дефлекторов 152.416.003-1 после соответствующих циклических наработок  $Z_0$  (от 480 до 780 циклов) были обнаружены трещины различной протяжённости и глубины (таблица 1).

Таблица 1 – Статистика обнаружения трещин в межлабиринтной зоне дефлекторов 152.416.003-1

| Порядковый № испытываемого двигателя | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| часы                                 | 800 | 768 | 506 | 448 | 316 | 783 | 398 | 647 | 711 |
| циклы ( $Z_0$ )                      | 480 | 650 | 484 | 345 | 310 | 780 | 310 | 550 | 540 |

На одном из двигателей с исследуемым дефлектором обнаружены трещины при наработке  $Z_0 = 637$ . Нарботка на момент последнего контроля, при котором трещины обнаружены не были, составила  $Z_0 = 607$ .

Разрушения во всех случаях квалифицировались как малоцикловые усталостные (МЦУ) [2] и связывались как с повышенной циклической нагруженностью, так и с неблагоприятной технологической наследственностью материала, проблематичной при механической обработке межлабиринтной зоны (повышенный уровень остаточных

напряжений, наклёп, низкая чистота обработки). Для выявления причин возникновения дефекта, а также для разработки мероприятий по его устранению проводился анализ:

- нестационарного теплового состояния диска ТВД с дефлекторами с использованием граничных условий конвективного теплообмена, полученных на базе расчётно-экспериментальных корреляций;
- цикла изменения напряжённо-деформированного состояния дефлектора в упругопластической постановке с моделированием контактов и использованием реальных кривых деформирования сплава ЭК-79 для принятого упрощённого типового полётного цикла и типового цикла эквивалентных циклических испытаний (ЭЦИ).

На базе этого анализа, а также имеющихся данных по МЦУ, полученных на образцах из сплава ЭК-79, проводится расчёт циклической долговечности дефлектора, коэффициентов соответствия полных испытательных и полных полётных циклов и коэффициентов соответствия полных и элементарных циклов при ЭЦИ.

По результатам расчётного анализа при  $P = 0,995$  и  $K_N = 5$  в зависимости от метода оценки расчётная долговечность дефлектора без учёта технологического повреждения составила 580 полных циклов при использовании уравнения Мэнсона-Коффина и 520 – 960 полных циклов нагружения при трёх различных вариантах использования данных испытаний стандартных образцов.

Были проведены исследования остаточных напряжений в поверхностном и подповерхностном слое полотна между лабиринтами [3]. По результатам исследований зафиксирован большой разброс в распределении остаточных напряжений, в их уровне, а также глубины их распространения. На поверхности полотна наблюдается высокий (до 800 МПа) уровень растягивающих остаточных напряжений с подповерхностным максимумом.

По литературным источникам удаление грубого наклёпа и стабилизирующая остаточные напряжения обработка микрошариками при исследовании на образцах может обеспечить существенное, иногда многократное, увеличение циклической долговечности по МЦУ [4].

Был введён комплекс технологических мероприятий по снижению уровня технологического повреждения материала в труднообрабатываемых (межлабиринтных) зонах дефлекторов данной конструкции: перевод мехобработки на станки с ЧПУ, удаление слоя материала с грубым наклёпом от лезвийной обработки посредством АЖО, коррекция направления обработки микрошариками межлабиринтной зоны – улучшающие исходное состояние поверхности детали, в том числе и зоны проявления дефекта.

Для двигателей, на которых установлены дефлекторы 152.416.003-1 с технологическими мероприятиями по межлабиринтной зоне, расчётное значение разрушающей наработки в полётных циклах с использованием уравнения Мэнсона-Коффина составляет 2800 циклов, а по наиболее достоверной на наш взгляд методике анализа на базе испытания стандартных образцов с учётом формы цикла 2600 циклов (с  $P=0,995$ ,  $K_N=5$ ), что соответствует разрешённой наработке 520-580 полных полётных цикла (запуска). Две другие методики, иногда применяемые в инженерной практике, дают несколько бóльшую разрушающую долговечность на уровне 3000-4800 циклов, что с учётом запаса  $K_N=5$  соответствует разрешённой наработке 600-960 циклов.

Исследования остаточных напряжений по поверхности полотна в дефлекторах с технологическими мероприятиями по межлабиринтной зоне показали, что мероприятия обеспечивают стабильный уровень остаточных напряжений в поверхностном слое от  $-80$  до  $+40$  МПа, что существенно снижает риск возникновения трещин.

Стеновыми испытаниями дефлекторов 152.416.003-3Р с технологическими мероприятиями по межлабиринтной зоне на двигателях подтверждена эффективность проведённых мероприятий по предотвращению дефектов (таблица 2).

Таблица 2 – Нарботки в полных циклах для двигателей с дефлектором 152.416.003-1 с технологическими мероприятиями по результатам проведенных ЭЦИ

| Порядковый № испытываемого двигателя | 1    | 2    | 3    | 4    |
|--------------------------------------|------|------|------|------|
| Мин. нароб. при ЭЦИ ( $Z_0$ )        | 3030 | 3010 | 2094 | 1889 |
| Подтвержд. наработка ( $Z_0$ )       | 757  | 980  | 772  | 539  |

Отсутствие случаев проявления дефектов показывает, что мероприятия по устранению отрицательной технологической наследственности эффективны и позволяют в очередной раз сделать вывод о том, что неучтённая технологическая наследственность может привести к аварийным, а в ряде случаев и катастрофическим ситуациям. И вновь обратить внимание на необходимость предварительной расчётной оценки влияния тех или иных остаточных напряжений на надёжность изделия на этапе проектирования и разработки технологии изготовления деталей двигателя.

### **Библиографический список**

1. Нормы прочности авиационных газотурбинных двигателей гражданской авиации [Текст] / М.:ЦИАМ, 2004. – 260 с.
2. Терентьев, В.Ф. Усталость высокопрочных металлических материалов [Текст] / В.Ф. Терентьев, А.Н. Петухов. – М.: ИМЕТ РАН-ЦИАМ, 2013. – 515 с.
3. Иванов, С.И. Определение остаточных напряжений в пластинках методом полосок [Текст] / С.И. Иванов // Куйбышев: Труды КуАИ. – 1971. – Вып. 48. – С. 139-152.
4. Павлов, В.Ф. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочнённых деталей по остаточным напряжениям [Текст] / В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Издательство СНЦ РАН, 2012. – 125 с.