

Кочерова Е.Е., Сургутанова Ю.Н., Анохин Д.В., Кондрякова А.В.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ТИПОВЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В настоящее время всё чаще встаёт вопрос о возможности предупреждения возникновения дефектов, связанных с влиянием отрицательной технологической наследственности на усталость деталей авиационных двигателей, что подразумевает, в том числе, возможность предварительной оценки величины остаточных напряжений, возникающих в процессе изготовления деталей и сборочных единиц. Выполнение этих работ должно существенно повысить качество и надёжность изготавливаемых изделий, сократить затраты на доводку, исследования и разработку мероприятий по устранению дефектов и затраты, связанные с досрочным снятием изделий с эксплуатации.

На предприятиях, если и проводят оценку влияния отрицательной технологической наследственности на надёжность деталей, то делают это весьма приблизительно, ориентируясь на опыт производства. В прочностных расчётах в процессе разработки нового изделия этот фактор практически никогда не учитывается, так как необходимо в кратчайшие сроки провести большой объём расчётов. Нередко это приводит к разрушению детали, съёму изделия с эксплуатации, а иногда и к катастрофам.

В рамках работ по исследованию влияния остаточных напряжений на циклическую долговечность типовых деталей авиационных двигателей, работающих в условиях малоциклового нагружения, в данной работе рассмотрена проблема оценки влияния остаточных напряжений на прочность дефлектора турбины высокого давления двигателя НК-25. В техническом проекте на двигатель НК-25 был проведён анализ эксплуатационного цикла напряжённо-деформированного состояния и циклической долговечности. Расчёты не выявили проблем в обеспечении узлом назначенного ресурса двигателей НК-25 [1]. Однако при эквивалентно-циклических испытаниях (ЭЦИ) одного из двигателей было получено разрушение дефлектора с началом по полотну в зоне между первым и вторым лабиринтами. Аналогичный дефект на двигателе стал причиной катастрофы самолёта. На ряде дефлекторов после соответствующих циклических наработок Z_0 (от 480 до 780 циклов) были обнаружены трещины различной протяжённости и глубины (табл. 1).

Таблица 1 – Статистика обнаружения трещин в межлабиринтной зоне дефлекторов

Порядковый № испытываемого двигателя	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Часы	800	768	506	448	316	783	398	647	711
Циклы	480	650	484	345	310	780	310	550	540

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

Разрушения во всех случаях квалифицировались как усталостные (малоцикловая усталость (МЦУ)) [2] и связывались как с повышенной циклической нагруженностью дефлектора, 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 турбины высокого давления 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 ЭЦИ.

На базе этого анализа, а также имеющихся данных по МЦУ, полученных на образцах из сплава ЭК-79, проводился 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 вероятности $P = 0,995$ и коэффициенте запаса $K_N = 5$ 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 также 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 наблюдался 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]. Поэтому 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, коррекция направления обработки микрошариками межлабиринтной зоны, которая улучшает исходное состояние поверхности детали, в том числе и зоны проявления дефекта.

Для двигателей, на которых установлены дефлекторы 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 циклов (запуска). Две другие методики, иногда применяемые в инженерной практике, дают несколько бóльшую разрушающую долговечность на уровне 3000 – 4800 циклов, что с учётом коэффициента запаса $K_N = 5$ соответствует разрешённой наработке 600-960 циклов.

Исследования остаточных напряжений на 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. Стендовыми испытаниями дефлекторов с технологическими мероприятиями по межлабиринтной зоне на двигателях подтверждена эффективность проведённых мероприятий по предотвращению дефектов (табл. 2).

Таблица 2 – Нарботки в полных циклах для двигателей с дефлектором с технологическими мероприятиями по результатам проведённых ЭЦИ

Порядковый № испытываемого двигателя	1	2	3	4
Минимальная наработка при ЭЦИ (Z_0)	3030	3010	2094	1889
Подтверждённая наработка (Z_0)	757	980	772	539

Отсутствие случаев проявления дефектов показывает, что мероприятия по устранению отрицательной технологической наследственности эффективны.

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: Изд-во СамНЦ РАН, 2012. – 125 с.