

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДОВ АВИАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА МНОГОЦИКЛОВУЮ УСТАЛОСТЬ

Руденко Е.С., Буюкли Т.В., Стадников А.Н., Куликов С.И., Бортников А.Д.
ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», Москва esrudenok@ciam.ru

Ключевые слова: трубопроводы, газотурбинный двигатель, многоцикловая усталость

В работе предложен комплексный метод оценки усталостной прочности элементов трубопроводов топливной системы авиационного газотурбинного двигателя (ГТД).

Повышенные требования к надежности авиационных ГТД обуславливают необходимость детального анализа прочностных характеристик элементов их топливной системы. Особое внимание уделяется тонкостенным трубопроводам, которые в процессе эксплуатации испытывают статические и переменные напряжения. Статические напряжения в трубопроводах возникают, например, вследствие различного теплового состояния деталей двигателя, между которыми установлена трубка, а также из-за монтажных нагрузок при сборке. Переменные напряжения в трубопроводах проявляются из-за вибрации, источниками которой могут быть пульсация потока жидкости в них или колебания роторов двигателя.

Разрушения трубопроводов, зафиксированные в известных инцидентах с ГТД GE90 [1] и НК-38СТ [2], демонстрируют недостаточную стойкость конструкции к комплексному нагружению. Это определяет актуальность разработки универсальной методики оценки усталостной прочности таких элементов.

Несмотря на большое количество разрушений трубопроводов в эксплуатации, причиной которых стало действие сразу нескольких негативных факторов, в нормативных технических документах в качестве предела выносливости рекомендуется использовать экспериментально определенное значение (пересчитанное на рабочую температуру) предела выносливости каждого типоразмера соединения трубопроводов со штуцерами, а также сварных соединений для данной технологии изготовления. Влияние асимметрии цикла нагружения принимается незначительным.

Опыт эксплуатации двигателей показывает, что при изучении характеристик сопротивления усталости трубопроводов, необходимо учитывать эксплуатационные условия их нагружения.

Существует отраслевой стандарт [3], который содержит схему испытаний и требования к экспериментальному исследованию сопротивления усталости трубопроводов как при симметричном, так и при асимметричном циклах возбуждения. Недостаток такой схемы в том, что оснастка с установленным в ней трубопроводом может иметь значительные размеры, что затрудняет ее размещение в высокотемпературной печи для проведения испытаний при эксплуатационных температурах.

Авторы данной работы предлагают более компактную схему для испытаний трубок топливного коллектора с учетом асимметрии цикла нагружения и температуры.

Основной целью работы является разработка метода экспериментальных испытаний элементов трубопроводов на многоцикловую усталость с учетом совместного действия эксплуатационных нагрузок. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: 1) разработка схемы стендовых испытаний с возможностью варьирования уровня статических, вибрационных и температурных воздействий; 2) построение расчетной модели исследуемого элемента трубопровода; 3) проведение верификационных испытаний для сопоставления расчетных и натурных данных.

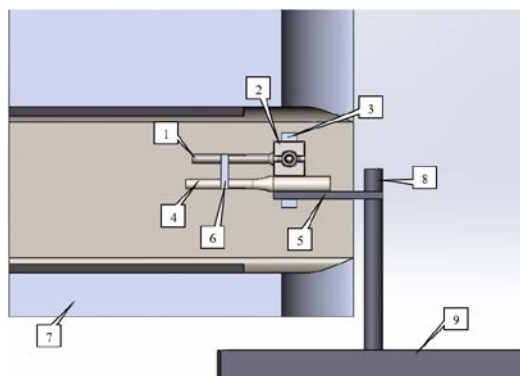


Рис. 1 - Схема испытаний

Разработанная схема испытаний (рис. 1) позволяет воспроизводить одновременно действующие статические и переменные нагрузки на элемент трубопровода. Статические напряжения регулируются усилием затяжки хомута (6). Элемент трубопровода (1), закрепленный в пуансоне (2) струбциной (3), фальш-образец (4) и элемент оснастки (5) размещаются в печи (7), что обеспечивает температурную нагрузку до 200°C. Динамическое возбуждение осуществляется на вибростенде (9). Элемент трубопровода и фальш-образец препарированы тензодатчиками, регистрирующими деформации в опасной зоне.

С целью определения зон концентрации напряжений и работоспособности предложенной схемы, создана расчетная конечно-элементная модель, учитывающая статические напряжения от сборки трубопровода, расширения камеры сгорания во время ее работы и температурное воздействие (рис. 2). Результаты расчета позволяют определить опасные участки конструкции и обеспечить корректную установку тензодатчиков в экспериментах. Результаты расчета и эксперимента качественно совпадают.

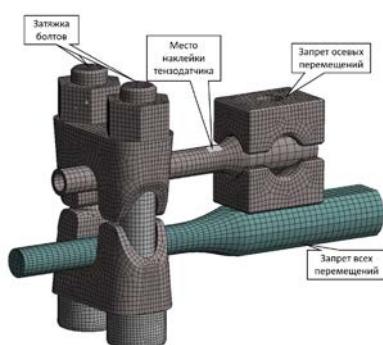


Рис. 2 - Конечно-элементная модель оснастки и используемые граничные условия и нагрузки

Временная зависимость изгибных напряжений, возникающих в месте наклейки тензодатчика, полученная в ходе решения задачи динамического поведения системы трубок, представлена на рис. 3. Полученные изгибные напряжения определены с учетом размера датчика (осреднены по площадке).

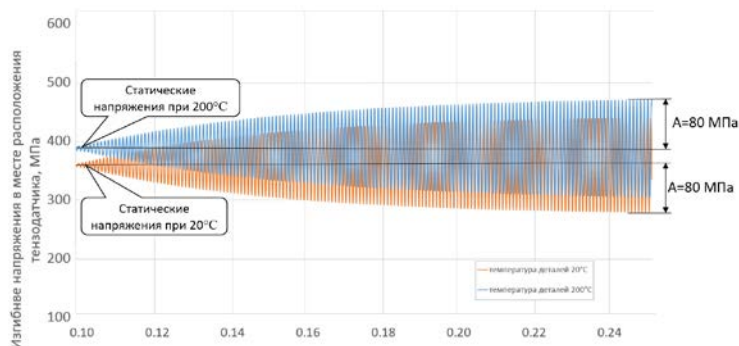


Рис. 3 - Распределение изгибных напряжений по времени в месте расположения тензодатчика при различных температурах

Анализ графика показывает, что в расчетах при 20 °С на первом шаге достигается требуемый уровень статических изгибных напряжений 354 МПа (время расчета от 0 до 0.1 с). Далее происходят колебания трубок с установившейся амплитудой изгибных напряжений в месте наклейки датчика ~80 МПа.

Уровень статических напряжений в элементе трубопровода при температуре 200 °С составляет 397 МПа, что превышает уровень статических напряжений, полученных при температуре 20 °С, и это надо учесть при проведении испытаний. Уровень динамических напряжений не увеличился, амплитуда их установившихся колебаний составляет ~ 80 МПа. Т. е. с увеличением температуры испытаний с учетом равенства остальных условий величина переменных напряжений практически не изменилась.

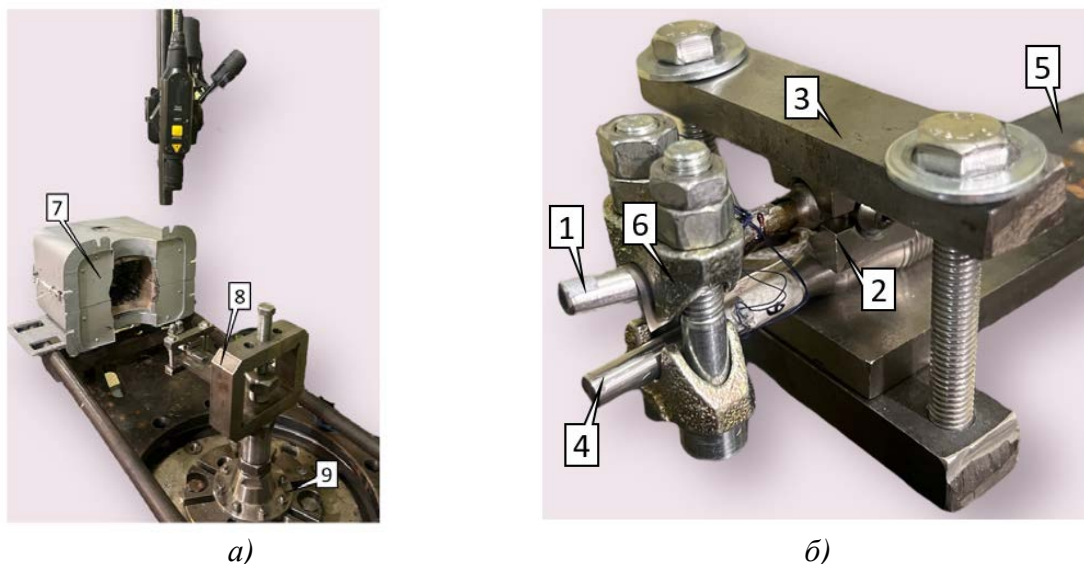


Рис. 4 - Предложенная схема испытаний трубок топливного коллектора на вибрационном электродинамическом стенде: а) общий вид стенда; б) схема закрепления образца в оснастке

Для верификации расчетных данных, была разработана и изготовлена экспериментальная оснастка. При испытаниях была реализована схема нагружения, включающая статические напряжения и динамическое возбуждение при эксплуатационной температуре. В результате испытаний получено разрушение исследуемого элемента трубопровода в опасной зоне. Измеренные значения статических и динамических напряжений соответствовали расчетным, что подтверждает адекватность модели и применимость метода для оценки усталостной прочности трубопроводов.

На рис. 5 представлена запись показаний тензодатчика 1 (ед. измерения напряжений – кгс/мм²), расположенного в опасном месте на элементе трубопровода.

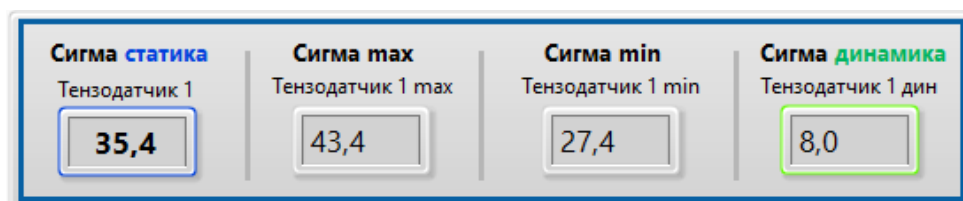


Рис. 5 - Запись одного из тензодатчиков

Значения статических и динамических напряжений, фиксируемые тензодатчиком, соответствуют значениям, полученным в расчетах, что подтверждает работоспособность данного метода.

Разработанный метод позволяет надежно оценивать усталостную прочность трубопроводов авиационного двигателя в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. Результаты работы могут быть использованы как при проектировании новых топливных систем, так и при сертификационных испытаниях серийных изделий. Метод

может применяться для оценки прочности других элементов ГТД, работающих в условиях сложного нагружения, например, лопаток.

Список литературы

1. Final report on serious incident to Emirates Boeing 777-300ER Aircraft, 2015.
2. Результаты испытания элементов крепления топливных коллекторов камеры сгорания газотурбинного двигателя НК-38СТ / А.В. Бакланов, С.П. Неумоин, А.Р. Вахитов // Известия ВУЗов. – Москва: Машиностроение, 2018. – С. 28-34.
3. ОСТ 02602. Соединения трубопроводов гидравлических систем. Общие требования к испытаниям. 1986. – 20 с.

DEVELOPMENT OF A TESTING METHOD FOR AIRCRAFT ENGINE PIPELINE COMPONENTS UNDER HIGH-CYCLE FATIGUE

Rudenok E.S., Buyukli T.V., Stadnikov A.N., Kulikov S.I., Bortnikov A.D.
P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors (CIAM), Moscow esrudenok@ciam.ru

Keywords: pipelines, gas turbine engine, high-cycle fatigue

A method has been developed to assess the fatigue resistance of gas turbine engine pipeline components, taking into account the influence of operational loads.