

УДК 629.7.036 : 539.4

А.Н. МИХАЙЛЕНКО, Т.И. ПРИБОРА

ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОСТИ ДИСКОВ КОМПРЕССОРОВ БАРАБАННО-ДИСКОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Рассмотрены особенности неразъемного ротора компрессора, условия эксплуатации, разрушающие факторы, исследования коррозии под напряжением, определение ресурса.

надежность, ресурс, напряженно-деформированное состояние, коррозия под напряжением

1. Формулирование проблемы

В настоящее время в практике эксплуатации ГТД нередки случаи обращения к двигателям с компрессорами смешанного типа, имеющими барабанно-дисковую конструкцию с последовательной напрессовкой секций и их штифтовым креплением. Преимуществом ротора такого типа является достаточно большая жесткость и большая критическая частота вращения. Это происходит из-за того, что отдельные секции, имеющие диски и барабанные участки, соединяются между собой, причем соединение делается на таком радиусе, где окружная скорость невелика и допустима по условиям прочности барабана. Соединение секций в роторах смешанной конструкции отличается сравнительно большим разнообразием. Представителем такого класса двигателей является двигатель АИ-20. Процесс конвертирования авиационных двигателей диктует применение высоконадежных двигателей АИ-20 в качестве газотурбинных приводов мощностью 2,5-3,0 МВт. Для использования в этом случае роторов компрессора в наземных установках различного применения актуальным становится вопрос оценки состояния деталей ротора, определения ресурса работы.

2. Постановка задачи исследования

Данные о состоянии основных деталей, в частности деталей ротора компрессора двигателей

АИ-20, находившихся в эксплуатации в разных географических регионах, представляют ценную информацию для установления ресурса этим деталям при работе в составе наземной установки. Компрессор осевой, десятиступенчатый, дозвуковой предназначен для всасывания, сжатия и направления воздуха в камеру сгорания. Проточная часть компрессора выполнена в виде суживающегося кольцевого канала за счет уменьшения наружного и увеличения внутреннего диаметров тракта на первых двух ступенях и увеличения внутреннего диаметра при постоянном наружном на остальных ступенях. Ротор компрессора представляет собой неразъемную конструкцию, состоящую из 10 дисков и валов, переднего и заднего. Диски и задний вал соединяются друг с другом путем напрессовки и дополнительно крепятся радиально расположенными штифтами. Диски выполнены из стали ДИ-1Ш. География эксплуатации этих двигателей – всеклиматические зоны, включая и районы с влажной морской атмосферой. На двигателе АИ-20М за всю эксплуатацию не было разрушений дисков и лопаток. Диски компрессора для двигателя АИ-20М изготавливаются из штамповок с мелко зернистой структурой.

Неразъемность ротора компрессора обусловила сложность исследования состояния дисков, невозможность оценить состояние внутренней поверхности барабана и мест сочленения основных деталей. Для такой конструкции показателем зон повышен-

ного риска ротора компрессора может служить такое явление, как коррозия под напряжением.

При эксплуатации ГТД может иметь место повреждение дисков компрессора из-за появления коррозии и усталостных трещин на поверхности полотна в зонах максимальных напряжений, возникающих от центробежных сил и вибрационных нагрузок.

Для горячего тракта авиационных двигателей большую опасность представляет разновидность газовой коррозии – соленая коррозия, возникающая при наличии в газовой среде солей некоторых металлов, чаще всего натрия и оксидов натрия, серы и ванадия. Она протекает с большой скоростью, еще более возрастающей с повышением температуры. С повышением температуры и давления кислорода в коррозионной среде скорость процессов увеличивается, поскольку возрастают скорости химических реакций, диффузии и растворимости компонентов агрессивной среды в материале. Коррозия под напряжением – процесс разрушения при совместном действии коррозионной среды и растягивающих напряжений, не превышающих предела текучести. Напряжение инициирует увеличение общей коррозии и коррозионное растрескивание вследствие образования и распространения внутрь металла тонкой сетки трещин. Материалы, склонные к коррозии под напряжением, могут быстро разрушаться от коррозионного растрескивания даже при хорошей общей коррозионной стойкости. Этот вид коррозии является чрезвычайно опасным для конструкций. Поэтому для используемого в роторе компрессора материала ДИ-1Ш необходимо оценить склонность к коррозии под напряжением.

Роль напряжения, как фактора, приводящего к коррозионному растрескиванию, связана с действием нормальных растягивающих напряжений.

Целью настоящего исследования было установление ресурса деталям ротора компрессора газотурбинного двигателя АИ-20М для работы в качестве газотурбинной электростанции (ГТЭ).

3. Решение задачи

3.1. Опыт и анализ результатов эксплуатации в различных климатических условиях

Решалась конкретная задача использования ротора компрессора с двигателя АИ-20М в газотурбинной электростанции АИ-2500, с приводом, разработанным на основе этого двигателя. Газотурбинная электростанция АИ-2500 может эксплуатироваться в умеренной и тропической климатических зонах; работает в базовом, пиковом и резервном режимах. Данная электростанция предназначена для использования в качестве источника электропитания для промышленных и бытовых потребителей, покрытия пиковых нагрузок и резервирования. При всеклиматической эксплуатации газоздушный тракт подвергается воздействию потока атмосферного воздуха, включая воздух любого макроклиматического района, в том числе воздух морского тропического климата. Возможно попадание брызг морской воды и ее солей, песка, пыли, воздействие горячего газового потока продуктов сгорания. Теоретически компрессор в составе газогенератора работает на одном режиме с постоянной частотой вращения длительное время (25000 ч до капитального ремонта), т.е. речь идет о длительной работе в отсутствии цикличности нагрузок. При этом ГТП должен обеспечить режимы работы в соответствии с ГОСТ 29328-92 «Установки газотурбинные для привода турбогенераторов», указанные в табл. 1.

Таблица 1

Режимы работы

Класс использования	Показатели использования	
	Время работы, ч/год	Число пусков, пуск/год
Базовый	Св. 6000	Не более 100 вкл
Пиковый	Св. 500 до 2000	200...500 вкл.
Резервный	До 500	Св. 500 вкл.

ГТП в соответствии с ГОСТ 23377-84 в случае нестабильных электрических сетей, должны обеспечить необходимые характеристики электрического тока (по частоте и напряжению).

Гарантией надежной работы компрессора в составе ГТЭ может служить его работа в составе авиационных ГТД. Условия работы компрессора в составе двигателя в летной эксплуатации, конечно, отличаются от условий работы в составе электростанции.

Кроме условия длительной работы, присутствует фактор цикличности нагрузок, полетный цикл (2,2 ч), число которых на назначенный ресурс составляет около 9000 циклов. Однако, парк двигателей семейства АИ-20 с начала эксплуатации и до настоящего времени составляет более 13000 единиц. Общий налет двигателей семейства АИ-20 на восьми типах самолетов составляет более 89,5 млн. часов. Такая эксплуатация данных двигателей подтверждает их высокую надежность при низком уровне отказов. Поэтому наличие бездефектной наработки деталей компрессора в летной эксплуатации можно считать гарантией надежной работы их в качестве ГТЭ.

Материал дисков компрессора сталь ДИ-1Ш обладает определенным достаточно высоким уровнем коррозионных свойств. Степень поражения коррозией деталей при работе на изделии зависит не только от свойств стали, но и от агрессивности окружающей среды.

3.2. Расчетное определение напряженно-деформированного состояния диска компрессора

Ободная часть ротора компрессора находится в зоне присутствия некоторого количества воды и соли в случаях эксплуатации двигателя в морских районах. Важно определить, какие именно области обода являются наиболее напряженными. Задача решалась, в два этапа.

Первоначально был выполнен расчет напряженно-деформированного состояния ротора компрессора в осесимметричной постановке, на максимальное расчетное температурное поле, максимальную частоту вращения (рис. 1).

Далее для расчетного исследования был выбран диск 9 ступени компрессора. Температура в нем

выше, чем в предшествующих дисках, крепление штифтами предусмотрено и на входе в диск и на выходе.

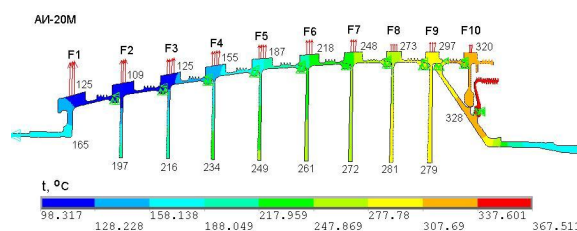


Рис. 1. Вид ротора компрессора двигателя АИ-20М

Построена трехмерная модель сектора 9 ступени компрессора. По доньшку паза выполнены два отверстия на входе и на выходе из замка. Отверстия располагаются радиально. Из предыдущего расчета в двухмерной постановке взяты граничные условия.

Диск сплошной, без центрального отверстия. На приведенном рис. 2, видно, что в качестве нормальных напряжений выступают окружные напряжения, величина которых в зоне концентрации составляет величину, меньшую предела текучести. Номинальные напряжения в этой зоне не превышают 350 МПа.

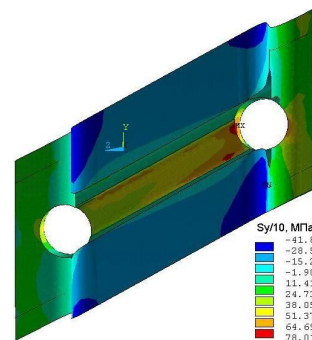


Рис. 2. Распределение окружных напряжений

Зоной повышенного риска, определяющей ресурс диска является область радиальных отверстий под штифты.

На рис. 2 (вид сверху) видно, что нормальными являются окружные напряжения.

На рис. 3 видно, что максимальные растягивающие эквивалентные напряжения располагаются по цилиндрической поверхности радиальных отверстий

под штифты. Именно здесь и возможно расположение зон, подверженных коррозии.

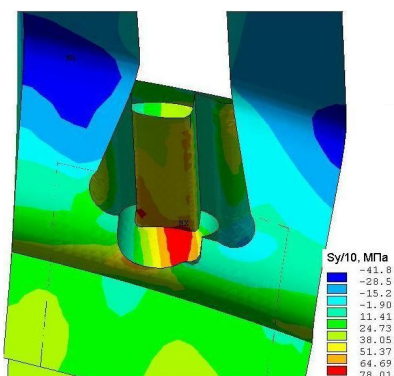


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений в ободной части диска

3.3. Оценка ресурса дисков компрессора

Двигатели АИ-20М при возвращении из летной эксплуатации, имеют значительную наработку. Производится осмотр и дефектация основных деталей двигателя. Обращается внимание на наличие или отсутствие зон, подверженных коррозии. Состояние деталей ротора компрессора, проработавшего в составе двигателя большое число полетных (около 9000) циклов может служить гарантией надежной работы этих роторных деталей в условиях наземной установки.

Явление коррозии ободов дисков вызвало необходимость исследовать склонность стали ДИ-1Ш к растрескиванию при одновременном воздействии коррозионной среды и напряжений. Из полотна диска компрессора изготавливались специальные образцы. Исследовалась склонность стали ДИ-1Ш к растрескиванию при одновременном воздействии коррозионной среды и напряжений. Нагружение специальных образцов производилось из расчета $0,3$, $0,5$, $0,8\sigma_{0,2}$. Испытания на склонность к коррозионному растрескиванию проводились в условиях соляной камеры ($t = 20^\circ\text{C}$, влажность 98% с подачей раствора NaCl) и по ускоренной методике в растворе: HCl – 50%, уротропин – 1%, SiO_2 – 1%, $t = 20^\circ\text{C}$, время испытания – 50 ча-

сов. Результаты испытания приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний

Условия испытания	Напряжения, МПа		
	339	662	1059
	Время до появления трещин, сутки		
Влажная камера	За 90 суток трещин нет		
Соленая камера, 3%соли NaCl	117	28, 40, 43	6, 16, 28
Тропическая камера	За 90 суток трещин нет		76

Из табл. 2 видно, что образцы из стали ДИ-1Ш, отпущенного по серийному (570°C) режиму при испытании во влажной камере при всех исследуемых напряжениях и в тропической камере не склонны к коррозии под напряжениям. При испытании в соляной камере образцы из стали ДИ-1Ш проявили склонность к коррозионному растрескиванию. Образцы из стали ДИ-1Ш, отпущенные по рекомендованному (630°C) режиму не проявили склонности к коррозии в соляной камере на протяжении всего хода испытания.

Построен график зависимости времени до появления трещин (вариант серийного режима) в сутках от уровня относительных напряжений (рис. 4)

В результате расчета методом конечных элементов в трехмерной постановке диска получены напряжения концентрации в зоне отверстий под штифты, равные $0,8\sigma_{0,2}$. Из анализа экспериментальных исследований и полученных уровней действующих напряжений в дисках компрессора следует, что в зоне концентрации напряжений при высоком уровне напряжений и соответственно в условиях морской (соленой) атмосферы возможно появление трещин на дисках, отпущенных по серийному режиму.

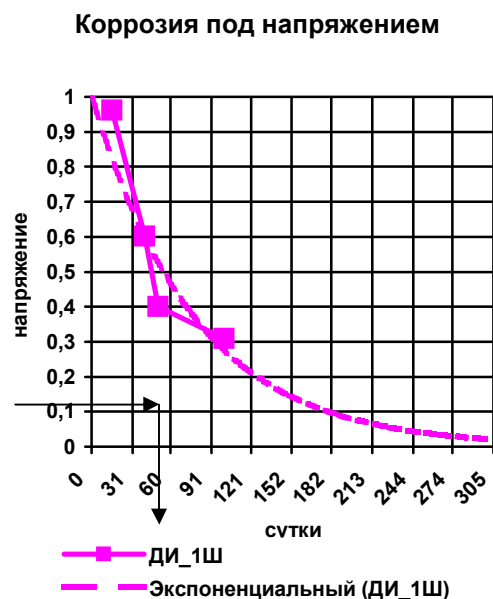


Рис. 4. График зависимости времени до появления трещин от величины напряжения

Проведенный численный анализ напряженно-деформированного состояния дисков ротора компрессора показал критические зоны диска, определяющие его ресурс.

Последующие технические мероприятия позволяют назначить деталям ротора компрессора достаточный ресурс работы в установках ГТЭ.

3.4. Мероприятия, способствующие увеличению ресурса дисков компрессоров

Наличие сжимающих напряжений в поверхностном слое весьма благотворно влияет на сопротивление коррозионной усталости. Положительное влияние средних сжимающих напряжений на сопротивление коррозионной усталости используется при применении методов поверхностного упрочнения к деталям, работающим в условиях коррозии. В этих случаях в поверхностных слоях детали создаются значительные остаточные сжимающие напряжения, приводящие к резкому повышению пределов коррозионной выносливости.

Проводилось исследование влияния алмазного выглаживания поверхности полотна. Поскольку в реальном диске невозможно полностью выгладить

все поверхности, были исследованы различные варианты контакта выглаженной поверхности и невыглаженной.

Исследования показали, что алмазное выглаживание в условиях, когда возможны границы перехода от поверхности с алмазным выглаживанием и шлифованной поверхностью (что может иметь место в реальных условиях изготовления дисков компрессоров) приводит к повышению склонности к коррозионному растрескиванию.

Закаливание при 960 °С с последующим отпуском при 630 – 640 °С значительно повышает сопротивление стали коррозии под напряжением, что подтвердили проведенные испытания. Структура материала заготовок (крупнозернистая, мелкозернистая) значительно влияет на склонность материала к коррозии. Предпочтение отдается мелкозернистой структуре.

Коррозионная стойкость сталей зависит от вида и режима механической обработки (токарная, шлифовка, фрезерование и др). Механическая обработка должна производиться согласно отраслевой нормативно-технической документации.

Заключение

Фактическая информация по результатам эксплуатации изделия, результаты численного анализа напряженно-деформированного состояния на модели высокого уровня, и результаты проведенных испытаний, позволили осуществить оценку работоспособности ротора компрессора и обратить особое внимание на предотвращение коррозионного процесса поверхностей деталей газозвдушного тракта.

Надежную работу ГТП обеспечат высокие требования к условиям работы.

Поступила в редакцию 19.05.2005

Рецензент: д-р техн. наук, доцент А.В. Олейник, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.