

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 повышенной

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 отсутствие 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.

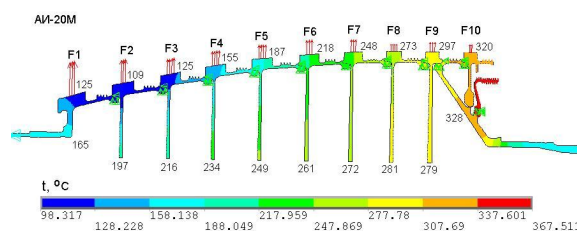


Рис. 1. Вид ротора компрессора двигателя АИ-20М

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 двумерной 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.

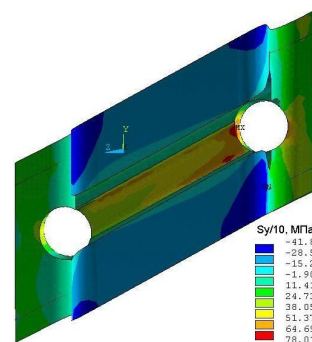


Рис. 2. Распределение окружных напряжений

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.

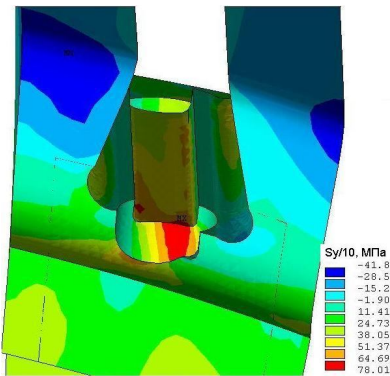


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений в ободной части диска

### 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 ( $t = 20$  °С, влажность 98% с подачей раствора NaCl) и по ускоренной методике в растворе: HCl – 50%, уротропин – 1%, SiO<sub>2</sub> – 1%,  $t = 20$  °С, 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 °С) 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 °С) 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.

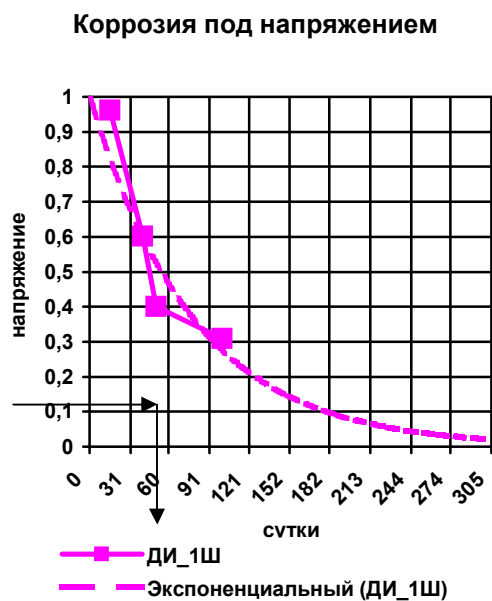


Рис. 4. График зависимости времени до появления трещин от величины напряжения

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.

Закаливанию 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 газоздушного 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.