

Анализ повреждений лопаток газотурбинных двигателей

Проведен анализ повреждений лопаток газотурбинных двигателей, указаны виды и причины разрушений, снижения их несущей способности. Показаны факторы, ограничивающие долговечность лопаток, работающих в условиях высоких температур и напряжений.

Ключевые слова: лопатки газотурбинных двигателей, долговечность, эрозионно-коррозионный износ, ползучесть

Надежность и долговечность газотурбинных двигателей (ГТД) в целом определяются работоспособностью наиболее ответственных и нагруженных элементов, каковыми являются рабочие лопатки ГТД.

Силовая напряженность, теплонагруженность и повреждаемость деталей ГТД зависят от режимов работы двигателя, то есть зависят от функционального назначения двигателя (авиационный двигатель на самолете, корабельный двигатель на судне или стационарный двигатель различного назначения).

Так, стационарные ГТД в течение сотен тысяч часов работают на расчетных режимах при высокой экономичности и в меньшей степени при переменных режимах.

В то же время транспортные (авиационные, судовые и локомотивные) ГТД работают значительное время в условиях переменных режимов нагружения.

В свою очередь, для судовых ГТД (по сравнению с авиационными) характерна более частая смена режимов при более низком среднем уровне действующих нагрузок, и меньшая длительность работы на режимах предельной и близкой к ней мощности.

Кроме того, рабочие лопатки компрессора и турбины работают в различных силовых и температурных условиях и, как следствие, имеют различную степень повреждения от тех или иных факторов.

Все повреждения можно разбить на три большие категории в соответствии с закономерностями их возникновения: первоначальные; случайные; подчиняющиеся закону распределения.

Первоначальные повреждения – дефектность детали еще до начала эксплуатации (различные технологические дефекты при изготовлении детали или нарушения нормальных условий хранения, перевозки и т. п.).

Случайные повреждения появляются непредвиденным образом из-за причин, обусловленных окружающими условиями, в которых эксплуатируется двигатель. Основная особенность случайного повреждения заключается в том, что такое повреждение в равной степени вероятно в течение всего периода эксплуатации двигателя, то есть вероятность появления повреждений в двигателе не зависит от продолжительности его эксплуатации. Опыт эксплуатации и ремонта одного из типов двигателей показал, что количество двигателей с забоинами на ра-

бочих лопатках по отношению к общему количеству обследованных двигателей мало изменяется с увеличением наработки: 2000 ч – 39 %; 2500 ч – 37 %; 3000 ч – 39 % [1]. Это свидетельствует о случайном характере процесса повреждения лопаток от попадания посторонних предметов, хотя интенсивность процесса будет зависеть от типа двигателя, места его расположения на самолете, размеров входного устройства и т. д.

Повреждения, подчиняющиеся закону распределения, происходят вследствие уменьшения работоспособности некоторых материалов или ухудшения свойств элементов двигателя, важных для их нормальной работы. Процесс ухудшения может происходить вследствие истирания, коррозии или при выработке ресурса, когда повреждения возникают из-за усталости. В этих случаях вероятность появления повреждений возрастает с увеличением времени эксплуатации детали или элементов двигателя, например, повреждения турбинных лопаток в результате длительной работы при высокой температуре [2, 3, 4, 5].

Повреждения рабочих лопаток в процессе эксплуатации можно рассматривать как неисправности (риски, износ бандажных полок и торцов лопатки), если они устраняются восстановительным ремонтом, или как отказы (трещины, коррозия, эрозия поверхности и др.), если лопатки разрушаются или бракуются при переборке двигателя [1].

Повреждения лопаток осевого компрессора.

Основными причинами неисправности и отказов компрессора в порядке наиболее частого их возникновения являются: повреждения от попадания посторонних предметов; разрушения от усталости; эрозия и коррозия.

Повреждение посторонними предметами. При попадании во входное устройство двигателя постороннего предмета первыми движущимися деталями на его пути являются лопатки рабочего колеса осевого компрессора. Так как в компрессорах каждый следующий за рабочим колесом ряд направляющих лопаток неподвижен и препятствует любому движению посторонних частиц, сообщаемому им рабочими лопатками, то в многоступенчатом компрессоре при попадании посторонних предметов повреждения наносятся большей части всех лопаток. Чувствительность осевого компрессора к повреждению от

попадания посторонних предметов определяется консольным типом крепления лопаток и наличием у них тонких входных и выходных кромок.

Если постороннее тело небольшое, а лопатки обычно изготавливают из легированных сталей и титановых сплавов, то непосредственный удар тела редко приводит к разрушению лопатки. Повреждение заключается, главным образом, в появлении небольших забоин и рисок на профиле лопатки. Эти повреждения сами по себе не опасны, но они, являясь концентраторами напряжений, увеличивают уровень локальных вибронпряжений и повышают вероятность разрушения лопаток от усталости.

Появление забоин около основания лопаток или на входных и выходных кромках более опасно, чем у внешних концов лопаток.

В авиационной промышленности действует отраслевой стандарт [6], который предназначен для определения механических повреждений, допустимых при эксплуатации или подлежащих исправлению при различного вида ремонтах, или требующих замены поврежденных лопаток на двигателе.

Стандарт четко определяет величины механических повреждений, допустимых при эксплуатации. Стандарт нормирует величины повреждений, которые подлежат ремонту или не допустимы на лопатках при эксплуатации, а также зоны, в которых такие повреждения не допускаются.

Повреждения отличаются не только размерами, но и формой, а также местом расположения.

На рис. 1 показаны примеры измерения величины повреждений.

В руководстве по технической эксплуатации на каждый вид двигателя существуют разделы, регламентирующие допустимые нормы повреждений на рабочих лопатках компрессора.

На рис. 2 показана рабочая лопатка компрессора низкого давления (КНД) двигателя Д-36 с разделением на зоны, где допускаются или не допускаются повреждения. В зоне А, расположенной у ножки рабочей лопатки и составляющей $\frac{1}{2}$ высоты пера лопатки, повреждения не допускаются.

Повреждения от попадания посторонних предметов создают серьезную проблему, так как она связана с досрочным съемом двигателей из-за повреждений лопаток забоинами [7], переборкой двигателя, заменой большого количества лопаток и балансировкой ротора компрессора.

Разрушение от усталости. В большинстве случаев отказы рабочих лопаток компрессора происходят от усталости [1, 7].

Причинами разрушения рабочих лопаток компрессора от усталости могут быть следующие факторы [7]:

- конструктивные (наличие резонансных, срывных, связанных колебаний и т. п.);
- технологические (нарушение режимов штамповки или термообработки; отклонение геометрии профильной части лопатки от ТУ чертежа; локальная структурная неоднородность – прижоги; насыщения материала водородом; остаточные напряжения, перенаклеп кромок и т. п.);
- эксплуатационные (попадание крупных посторонних предметов; нарушение режимов эксплуатации или условий консервации и хранения и т. п.).

Статистика распределения этих дефектов следующая 29 % – конструктивные (К); 17 % – технологические (Т); 11 % – эксплуатационные (Э); 43 % – сочетание конструктивных, технологических и эксплуатационных (рис. 3).

Известно, что процесс усталостного повреждения вообще, в том числе и в лопатке, условно разделяется

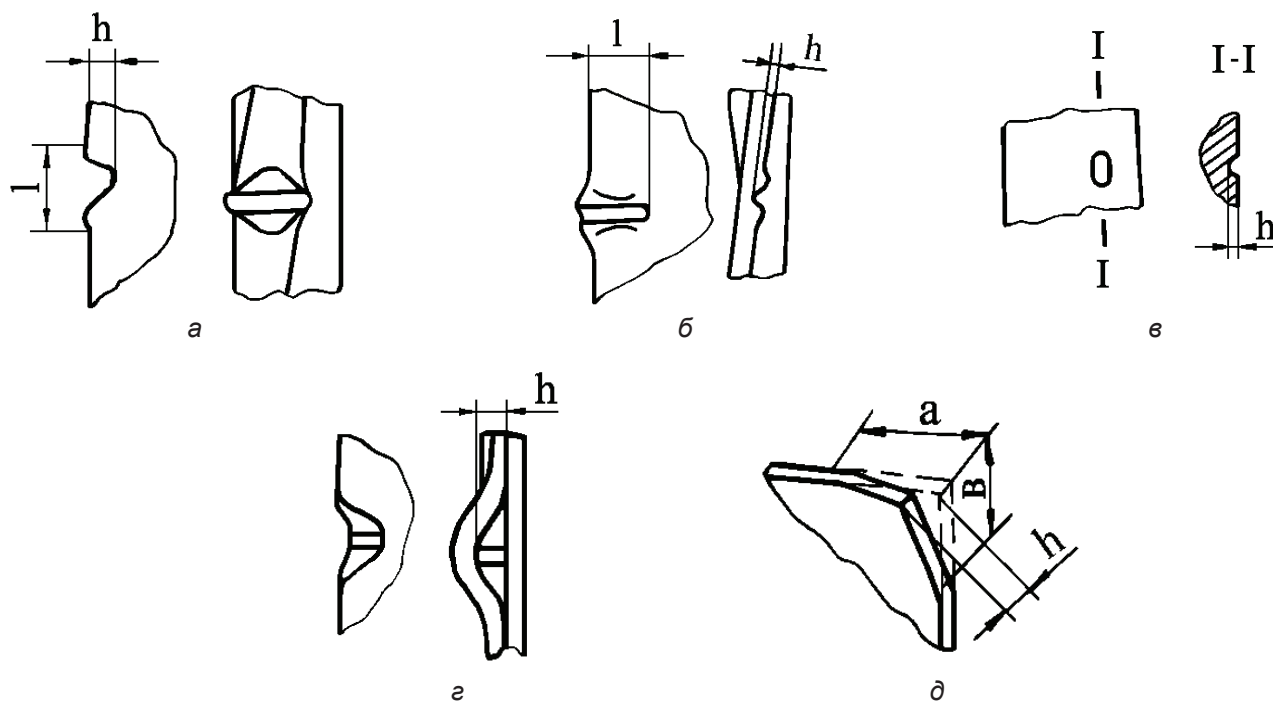


Рис. 1. Виды повреждений лопаток от попадания посторонних предметов: а – забоина на входной кромке (лобовой удар); б – забоина на входной кромке по касательной к радиусу закругления кромки; в – забоина (вмятина) на профильной части пера; г – выпучивание (погнутость); д – отгиб угла лопатки

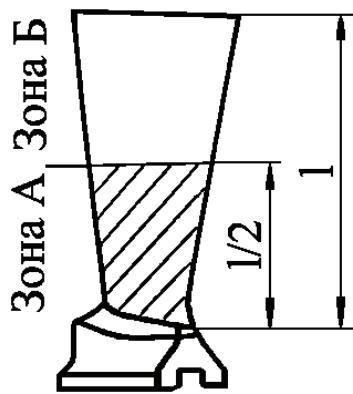


Рис. 2. Рабочая лопатка компрессора низкого давления (КНД) двигателя Д36 с разбивкой на зоны, где повреждения допускаются и не допускаются: зона А – повреждения не допускаются; зона Б – повреждения допускаются определенного размера.

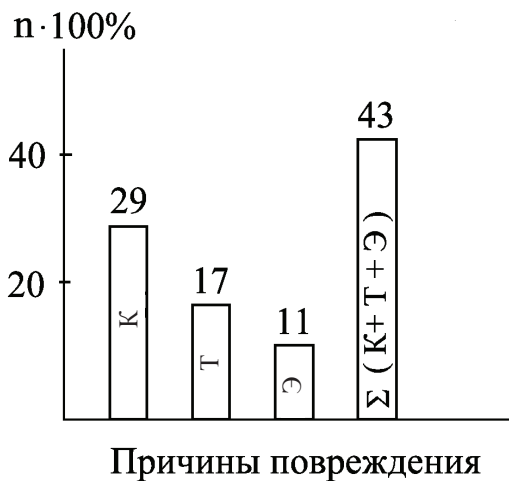


Рис. 3. Статистика причин разрушения рабочих лопаток компрессора от усталости [7]

на три стадии: зарождение макротрещины и ее устойчивое, стабильное развитие; ускоренное движение (рост) трещины; статический долом.

Технические условия и требования к лопаткам не допускают наличия трещин в рабочих лопатках двигателей, находящихся в эксплуатации. Однако безотказная работа лопаток возможна и при появлении первой стадии усталостного повреждения материала, если период стабильного роста трещины больше времени между регламентными осмотрами двигателей.

Эрозия и коррозия. Эрозионный износ поверхности пера лопаток происходит под действием песка, пыли, частиц воды и т. п., которые засасываются воздушным потоком в тракт двигателя.

В работе [8] исследовали лопатки первой ступени компрессора из стали 14X17H2 после наработки в эксплуатации 1000, 2000 и 4000 часов, которые имели эрозионный износ поверхности. Поверхность лопаток имела мелкие точечные забоины и вмятины,

а шероховатость поверхности была ниже на 1-2 класса по сравнению с лопатками без наработки (окончательная обработка пера ручным полированием). Износ входной кромки достигал 0,1-0,3 мм. Как показали дальнейшие исследования, их предел выносливости снизился на 5-12 % (рис. 4).

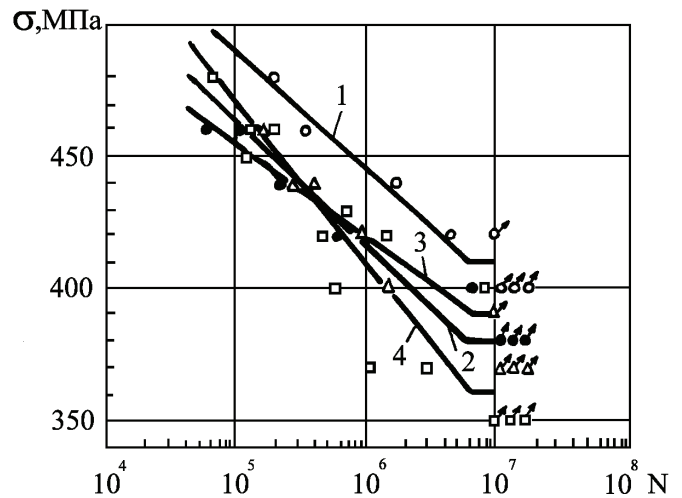


Рис. 4. Кривые усталости рабочих лопаток компрессора из стали 14X17H2Ш: 1 – без наработки (исходные); 2 – с наработкой 1000 ч; 3 – 2000 ч; 4 – 4000 ч

В работе [9] описаны результаты дефектации лопаток компрессора из стали 13X12H2B2MФ (ЭИ961) после эксплуатации (~2000 ч). Лопатки проходили первичную обработку (промывка и очистка от нагара) и после этого имели матовую поверхность с темным блеском, покрытую тонкой окисной пленкой серого цвета. Места эрозии имеют вид черно-серых точек диаметром от 0,1 до 1,0 мм с рыхлой поверхностью и охватывают около 45-50 % поверхности пера лопатки, в основном, возле выходной кромки со стороны корыта и возле входной кромки на спинке. Шероховатость поверхности достаточно равномерная и имеет величину $R_a = 0,1-0,3$ мкм, то есть отвечает требованиям по R_a для новых деталей.

Общий вид этих лопаток показан на рис. 5.

Кроме эрозионных повреждений на поверхности лопаток компрессоров часто встречаются коррозионные повреждения в виде язв, которые появляются при работе в морских условиях или когда используется недостаточно чистое топливо.

При работе компрессора судового ГТД в морских условиях в его рабочем тракте неизбежно присутствие раствора морской соли. При длительной эксплуатации такая коррозионная среда приводит к изменению поверхностного слоя деталей компрессора и возникновению коррозионных язв, которые, являясь концентраторами напряжений, могут существенно снижать циклическую прочность лопаток.

Повреждения лопаток турбины. Рабочие лопатки турбины находятся в наиболее тяжелых условиях эксплуатации. Перо лопатки и хвостовик, кроме растяжения и изгиба от центробежных сил, изгиба и кручения от газового потока, испытывают переменные напряжения от вибрационных нагрузок, которые по амплитуде и частоте изменяются в широких пределах.

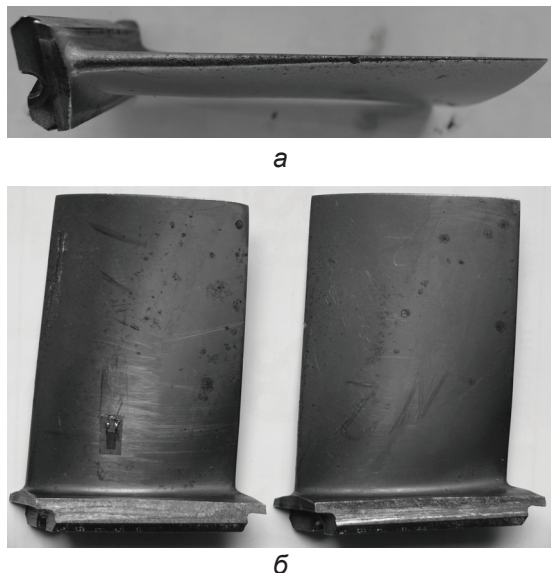


Рис. 5. Лопатки компрессора из стали ЭИ961 после эксплуатации (~2000 ч): а – входная кромка лопатки со следами эрозионного повреждения; б – поверхности пера лопаток с эрозионными повреждениями (черно-серые точки)

На лопатки турбин, кроме действия высоких температур, воздействуют термические напряжения, возникающие при сменах режимов работы турбины, а также высокотемпературный коррозионно-эрозионный газовый поток.

Основными причинами разрушения и снижения несущей способности турбинных лопаток являются:

- вибрационные напряжения и, как следствие, разрушение от усталости;
- термическая усталость;
- изменение свойств и структуры поверхностных слоев металла лопаток от длительной работы при высокой температуре;
- коррозионно-эрозионные повреждения;
- повреждения по механизму ползучести.

Вибрационные напряжения. Источником возбуждения вибраций лопаток являются импульсы, возникающие при прохождении рабочих лопаток мимо сопловых лопаток. Вибрации могут возбуждаться также в результате неравномерностей, создаваемых газовыми потоками из отдельных камер сгорания. Частота возбуждающих импульсов определяется количеством сопловых лопаток, камер сгорания и числом оборотов ротора.

Если собственная частота колебаний лопатки равна частоте возбуждения или ее гармонике (условие резонанса), то амплитуда колебаний и вибрационные напряжения резко возрастают, что может привести к разрушению от усталости. Такие условия могут быть реализованы в эксплуатации на переходных режимах работы двигателя.

Наиболее распространенным видом разрушения лопаток турбины являются усталостные по профильной части пера [1]. Характерны также разрушения от совместного действия статической и вибрационной нагрузок. В этом случае разрушение происходит в корневом сечении пера или по ножке хвостовика елочного типа.

Обычно трещины располагаются на входной и выходной кромках, иногда со стороны спинки лопатки.

Скорость развития трещины зависит от ее положения по длине лопатки. Радиальные трещины на конце лопатки развиваются медленно и менее опасны по сравнению с поперечными, которые развиваются быстрее под действием центробежных сил, особенно у корневого сечения и по хвостовику лопатки.

Термическая усталость. При эксплуатации транспортных ГТД неизбежны переходные режимы работы двигателей (пуск, остановка, изменения режима), при которых температуры входной и выходной кромок турбинной лопатки изменяются быстрее, чем температура более массивной части, то есть присутствует градиент температуры по толщине элемента. Значительная разность температур определяет появление термонапряжений. При остывании лопатки в ее кромках возникают большие напряжения растяжения, а при нагревании – сжимающие напряжения.

Многочисленное повторение такого цикла нагружения может привести к разрушению от термической усталости. При термических циклических нагрузках, в основном, на входной кромке лопатки возникает сетка мелких трещин, которые, достигнув определенных размеров, тормозятся, но являются источником образования магистральной трещины усталости от основных нагрузок.

Для стационарных газотурбинных установок (ГТУ) повреждение рабочих лопаток от термической усталости не происходит, так как эксплуатация предусматривает плавные режимы пуска и остановки турбины, при которых не возникают значительные термические напряжения. Как показывает практика длительной эксплуатации агрегатов ГТК-10 на магистральных газопроводах, случаев отказов турбинных лопаток из-за разрушений от термической усталости не наблюдалось [10].

Изменение свойств и структуры поверхностных слоев металла лопаток. При эксплуатации ГТД возможны случайные превышения расчетных чисел оборотов. Превышение чисел оборотов в большинстве случаев является следствием подачи избыточного топлива и, следовательно, сопровождается перегревом лопаток. Перегрев лопаток может получиться при горячем пуске, при любом случае увеличения расхода топлива, при отставании показаний или неисправности термомпар, из-за падения КПД компрессора [1].

Перегрев металла лопаток выше температуры старения приводит к перестариванию материала, растворению упрочняющих фаз, изменению микроструктуры, а следовательно, и к снижению характеристик прочности.

Стационарные ГТУ работают при более однородных режимах эксплуатации, чем транспортные ГТД, так как имеют намного меньшее количество переходных режимов работы (пуск, остановка, изменение режима).

Однако стационарные ГТУ имеют намного более длительный рабочий режим, при котором детали турбины находятся под действием высоких температур, что приводит к изменению химического состава и структуры поверхностных слоев металла лопаток.

Исследования рабочих лопаток из сплава ЭИ893 турбины ГТУ-10 показали, что в поверхностном слое

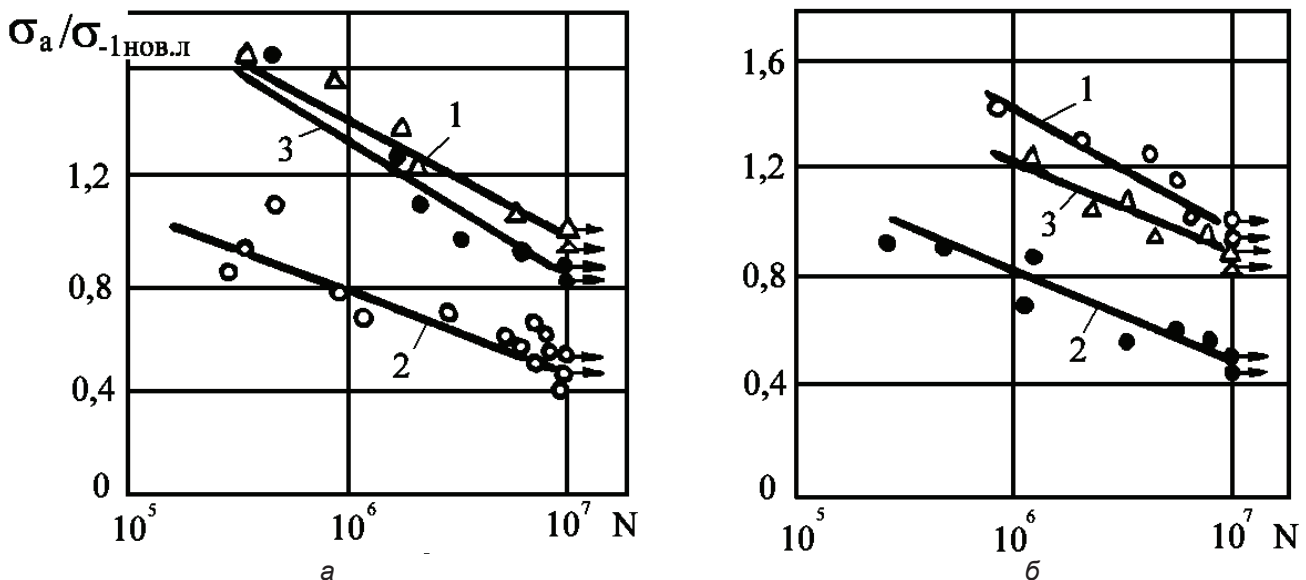


Рис. 6. Кривые усталости рабочих лопаток I (а) и II (б) ступеней турбины стационарного ГТД: 1 – новые лопатки; 2 – с эксплуатационной наработкой 20000 ч; 3 – с наработкой 20000 ч и с зачищенными кромками. Стрелками обозначены экспериментальные точки, соответствующие неразрушившимся лопаткам

лопаток с эксплуатационной наработкой (до 100000 часов) значительно снизилось содержание легирующих элементов (хрома, алюминия, титана и вольфрама), а глубина обедненного слоя достигала 40 мкм [10].

Коррозионно-эрозионные повреждения. Опыт эксплуатации показывает, что рабочие лопатки турбины стационарных ГТУ повреждаются высокотемпературной коррозией, причиной которой являются агрессивные примеси в топливе и воздухе.

Осмотр рабочих лопаток I-VII ступеней турбины стационарного газотурбинного двигателя (лопатки I и II ступеней из сплава ЭИ826, III – VII ступени – из сплава ЭИ617) после эксплуатационной наработки 20000 ч показал значительное коррозионное повреждение поверхности пера лопаток I и II ступеней [11]. У рабочих лопаток I ступени 80 % поверхности пера оказалось повреждено коррозией. Для лопаток II ступени характерен нагар и наличие небольших, по сравнению с лопатками I ступени коррозионных повреждений.

Рабочие лопатки III ступени турбины имели только нагар, а лопатки последующих ступеней – только окисленную поверхность.

Результаты испытаний на усталость (рис. 6) рабочих лопаток I и II ступеней (новых и с эксплуатационной наработкой) показали, что повреждения, полученные лопатками при эксплуатационной наработке 20000 ч, вызывает значительное снижение выносливости исследованных лопаток.

Испытания на усталость лопаток, у которых был механически зачищен поверхностный слой на входных и выходных кромках пера лопаток показали, что циклическая прочность таких и новых лопаток близка (рис.6, кривые 1, 3).

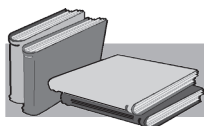
Металлофизические исследования лопаток после эксплуатационной наработки 20000 ч, показали, что в поверхностных слоях лопаток происходят существенные изменения, которые проникают на значи-

тельную глубину. Поверхностный слой весьма разнообразен по своей структуре. Послойный химический анализ показал значительные изменения химического состава поверхностного слоя, вызванные длительной эксплуатационной наработкой.

Сами по себе коррозионные язвы и эрозионные повреждения не являются критическими для прочности лопаток, но находясь в зоне больших вибрационных напряжений и являясь концентраторами напряжений, могут привести к зарождению трещины усталости и дальнейшему разрушению.

Повреждения по механизму ползучести. Воздействие высоких температур на структуру никелевых сплавов стимулирует повреждения и разрушения от высокотемпературной ползучести. Такой вид разрушения особенно характерен для стационарных ГТУ, которые менее подвергаются переходным режимам нагружения.

Все лопатки турбины, а иногда и лопатки компрессора ступеней высокого давления, подвергаются ползучести, как следствие эксплуатации при высоких температурах и напряжениях. Повреждения от ползучести в конечном счете являются теми факторами, которые ограничивают долговечность лопаток, работающих длительное время в условиях высоких температур и напряжений. Обычно ползучесть проявляется в виде удлинения лопатки в процессе нормальной эксплуатации, которое измеряется во время регламентных осмотров, а затем восстанавливается необходимый просвет между кончиком лопатки и кожухом. Лопатки бракуются, когда накопленная деформация ползучести достигает установленной допустимой величины [12].



ЛИТЕРАТУРА

1. Трощенко В. Т., Матвеев В. В., Грязнов Б. А. и др. Несущая способность рабочих лопаток ГТД при вибрационных нагрузения. – Киев: Наук. думка, 1981. – 314 с.
2. Термопрочность деталей машин / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, И. В. Демьянушко и др. – М.: Машиностроение. 1975. – 455 с.
3. Кузнецов Н. Д., Цейтлин В. И. Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1976. – 212 с.
4. Исследование долговечности рабочих лопаток турбины в условиях нестационарного трехкомпонентного нагружения / Л. П. Лоцицкий, В. Ф. Лапшов, Е. Н. Карповы и др. Надежность и долговечность авиационных газотурбинных двигателей. – Киев: КИИГА, 1973. – Вып. 4. – С. 3-13.
5. Несущая способность лопаток газовых турбин при нестационарном тепловом и силовом воздействии / Г. Н. Третьяченко, Л. В. Кравчук, Р. И. Куриат и др. – Киев: Наук. думка, 1975. – 294 с.
6. ОСТ 1 00304-79 Лопатки газотурбинных двигателей Нормирование повреждений лопаток компрессоров от попадания посторонних предметов. – Введ. 01.07.79.
7. Петухов А. Н. Сопrotивление усталости деталей ГТД. – М.: Машиностроение. 1993. – 233 с.
8. Богуслаев В. А., Яценко В. К., Притченко В. Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. – Киев: Изд-кая фирма «Манускрипт». – 1993. – 332 с.
9. Исследование влияния видов обработки поверхности и многослойного покрытия пера лопаток на их характеристики сопротивления усталости / Б. А. Грязнов, В. С. Майборода, Ю. С. Налимов и др. // Пробл. прочности. – 1999. – № 5. – С. 109-116.
10. Шайдак Б., Иванов А., Иванов С. Продление ресурса турбинных лопаток стационарных ГТД // Газотурбинные технологии, май-июнь 2003. – С. 42-45.
11. Влияние температурно-временных факторов на повреждение металла и характеристики выносливости рабочих лопаток ГТД / В. Т. Трощенко, Б. А. Грязнов, И. А. Маковецкая и др. // Промышленная теплотехника, 1982. – № 4, № 2, – С. 65-68.
12. Tim J. Carter. Failures in gas turbine blades Engineering Failure Analysis 12 (2005). – P. 237-247.

Анотація

Налимов Ю. С.

Аналіз пошкоджень лопаток газотурбінних двигунів

Проведено аналіз пошкоджень лопаток газотурбінних двигунів, вказано види та причини руйнувань, зниження їх несучої здатності. Показано фактори, що обмежують довговічність лопаток й працюють в умовах високих температур та напруг.

Ключові слова

лопатки газотурбінних двигунів, довговічність, ерозійно-корозійне зношення, повзучість

Summary

Nalimov Yu.

The analysis of the damage blades of gas-turbine engines

It was done the analysis of the damage blades of gas-turbine engines, and was indicated the types and causes of damage, reducing their load-carrying capacity. It was shown factors that limits the durebility of the blades operating at high temperature and voltage.

Keywords

blades of gas-turbine engines, durability, erosion-corrosion wear, creep

Поступила 22.12.2014