

УДК 629.7.036.3:620.193.53(045)

Эль-Хожайри Хуссейн (Ливан)

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аэрокосмический институт НАУ, e-mail: sad @ nau.edu.ua

Проанализированы факторы, определяющие характер и интенсивность коррозионных повреждений лопаток газовых турбин. Выполнена классификация вредных включений, загрязняющих проточную часть газотурбинных двигателей и вызывающих эрозионно-коррозионные повреждения лопаток турбин. Приведены кинетические характеристики коррозии и принцип линейного суммирования повреждений жаропрочных материалов с использованием таких характеристик.

Постановка проблемы и ее связь с практическими заданиями

Требования к уровню надежности и экономической эффективности эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и стационарных газотурбинных установок (ГТУ) различного назначения при увеличении их сроков службы, достигающих $(30...100) \cdot 10^3$ ч, вызывают необходимость совершенствования методов расчета на прочность и долговечность деталей, ограничивающих ресурсные возможности этих двигателей. К таким деталям относятся диски и рабочие лопатки компрессоров и турбин, валопроводы, жаровые трубы камер сгорания и т.п. Современные методы проектирования двигателей большого ресурса с учетом трехмерности течения газового потока в проточной части, высокоточным определением теплового и механического нагружения деталей, прочностными расчетами с использованием характеристик длительной прочности и малоциклового усталости позволяют обеспечить высокие показатели уровня надежности ГТД. Кроме того, повышение уровня надежности обеспечивается вибрационной доводкой двигателя, в результате которой исследуется высокочастотное вибрационное нагружение деталей двигателя для устранения всех видов резонансов.

Важным направлением в повышении надежности двигателей является обеспечение стабильности прочностных характеристик конструкционных материалов, используемых при изготовлении высоконагруженных деталей и, в первую очередь, рабочих лопаток турбины. Однако даже при стабильности прочностных характеристик лопаточных материалов, обеспечиваемых строгим соблюдением в процессе производства химического и фазового состава и технологии изготовления, в эксплуатации наблюдаются разрушения лопаток турбины (рис. 1), причиной которых является интенсивное коррозионное повреждение материала на значительную глубину (рис. 1, а) и последующее разрушение лопаток под воздействием статических или вибрационных нагрузок (рис. 1, б).

В ряде случаев высокотемпературная коррозия выступает в роли самостоятельного повреждающего фактора [1]. При этом изменения формы и геометрии лопаток могут быть настолько существенными, что нарушается характер их обтекания газовым потоком, значительно снижается коэффициент полезного действия турбины и возрастает удельный расход топлива. Эксплуатация двигателей с такого рода повреждениями лопаток турбины недопустима.

В связи с этим исследование механизмов высокотемпературной коррозии лопаток турбин и кинетики их коррозионного разрушения является базой как для разработки новых коррозионно-стойких жаропрочных сплавов и защитных покрытий, так и для создания систем мониторинга технического состояния лопаток турбин и других деталей «горячей» части двигателей. Такие системы мониторинга обеспечивают минимум затрат, связанных с выводом двигателей из эксплуатации, их разборкой и исследованием технического состояния.

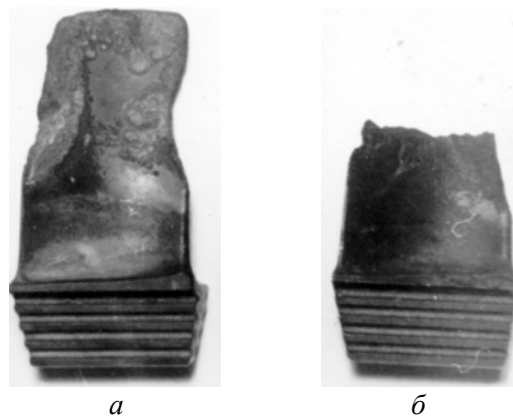


Рис.1. Характерные разрушения рабочих лопаток турбины:

а – интенсивное коррозионное повреждение пера лопатки; б – обрыв лопатки после коррозионного повреждения

Анализ исследований и публикаций

Результаты исследований Л.М. Акимова, А.Ф. Матвеевко и В.В. Сидоренко, приведенные в работе [1], показывают, что характер и интен-

сивность высокотемпературных коррозионных повреждений лопаток турбин определяются следующими факторами:

- характеристиками коррозионной стойкости лопаточных материалов;
- антикоррозионными свойствами защитных покрытий;
- уровнями действующих статических и вибрационных нагрузок;
- температурой лопаток турбин;
- концентрацией коррозионно-активных веществ в продуктах сгорания топлива.

Результаты исследования, приведенные в работах [2 – 4], показывают, что механизмы взаимодействия жаропрочных лопаточных материалов с коррозионно-активными веществами, содержащимися в газовом потоке, можно представить как процесс изменения физико-химических свойств поверхностных слоев в виде следующей схемы:

- расходование или разрушение защитных покрытий вследствие их эрозионно-коррозионного повреждения или растрескивания при значительных амплитудах изменения термонапряжений;
- образование и расходование защитных окисных пленок на поверхности лопаток в результате взаимодействия легирующих элементов и основы сплава с кислородом;
- образование и конденсация на поверхности лопаток серосодержащих соединений щелочных и ряда других коррозионно-активных металлов при попадании их в проточную часть двигателя;
- разрушение защитных окисных пленок вследствие растворения в солях и соединение серы с компонентами сплава;
- образование сульфидов никеля и хрома на границе “сплав – окалина”;
- автокаталитическое окисление эвтектики Ni_3S_2-Ni с освобождением и диффузией серы вглубь сплава фронтально или по границам зерен и образование на поверхности лопатки окиси никеля.

Такая схема повреждения жаропрочных материалов справедлива для различных видов высокотемпературной коррозии – солевой, язвенной, межкристаллитной, сульфидной, ванадиевой и т.п. Конкретная форма внешнего проявления высокотемпературной коррозии зависит от состава и свойств коррозионно-активных соединений, их концентрации, температуры газового потока, состава и структуры поверхностных слоев, уровня и вида механических нагрузок.

На характеристики коррозионной стойкости и механической прочности при высоких температурах, что важно для лопаточных материалов, решающее влияние оказывает комплекс легирующих элементов и присадок [5, 6].

Основную роль в сопротивлении материала высокотемпературной коррозии играют хром, алюминий и титан. Вместе с тем, высокое содержание хрома в сочетании с повышенной концентрацией алюминия, вольфрама и молибдена вызывает образование фаз, резко снижающих пластичность материала, а следовательно, и долговечность лопаток турбины.

Анализируя химический состав жаропрочных материалов, используемых для изготовления лопаток турбин авиационных ГТД и стационарных ГТУ, можно выявить тенденцию увеличения содержания хрома до 15...30 % при снижении содержания алюминия до 1,2...1,5 % и стабилизации содержания титана на уровне 2,5...3,5 %.

Роль защитных покрытий в обеспечении высокой коррозионной стойкости лопаток турбин трудно переоценить. Однако современные покрытия, обладая высокими защитными свойствами, имеют относительно малый ресурс [2]. Такие покрытия успешно применяются для тепловой и коррозионной защиты лопаток турбин авиационных ГТД, но очень редко используются в конструкциях турбин стационарных ГТУ большого ресурса. В этом случае для изготовления лопаток турбин целесообразнее применять коррозионно-стойкие сплавы без защитных покрытий.

Существенного влияния на скорость высокотемпературной коррозии статических нагрузок не обнаружено [7]. В то же время циклические нагрузки значительно интенсифицируют процессы коррозионного повреждения [8, 9], а при глубокой поверхностной или межкристаллитной коррозии приводят к обрыву лопаток (рис. 1, б).

Цель исследований

Основной целью исследования является разработка модели суммирования высокотемпературной коррозионной повреждаемости лопаток турбин.

Для выбора, обоснования и реализации такой модели, используемой в качестве базовой для системы мониторинга технического состояния лопаток турбин и других деталей «горячей» части двигателя, необходимо:

- исследовать пути попадания различных соединений в проточную часть двигателя;
- проанализировать состав соединений, попадающих в проточную часть двигателя с воздухом и топливом;
- оценить концентрацию соединений, попадающих в проточную часть двигателя и их коррозионную активность;
- разработать модель суммирования повреждений с использованием кинетических кривых высокотемпературной коррозии.

Результаты исследований

Важнейшими факторами, определяющими скорость высокотемпературной коррозии лопаточных материалов, являются коррозионная активность газового потока и тепловое состояние лопаток. Температура газового потока, а следовательно, и тепловое состояние лопаток определяются заданным режимом работы двигателя, и управлять температурой газового потока по произвольной программе невозможно. Исходя из этого выбор материала для изготовления лопаток должен производиться с учетом его коррозионных свойств при рабочих температурах.

Практически во всех работах, посвященных изучению высокотемпературной коррозии, основной предпосылкой этого явления называют попадание на лопатки турбины соединений щелочных металлов, ванадия, свинца, цинка, вольфрама и молибдена. При этом предполагают, что двигатель эксплуатируется на топливах, содержащих не менее 0,05...0,25 % серы.

Относительно путей попадания коррозионно-активных соединений в проточную часть двигателя единой точки зрения не существует. Двигатели, эксплуатирующиеся в морских условиях, подвергаются высокотемпературной коррозии при относительно небольших наработках. В связи с этим очевидно, что такой вид коррозии лопаток турбин инициируют соединения, содержащиеся в атмосфере. В двигатели, эксплуатирующиеся в континентальных условиях, коррозионно-активные соединения попадают с топливом или воздухом.

Вредные включения, загрязняющие проточную часть двигателя, классифицируют по характеру образований на внешние (естественные и промышленные) и внутренние, по характеру действия на лопатку турбины – на эрозионно-опасные и коррозионно-опасные (табл. 1).

Таблица 1

Классификация вредных включений, загрязняющих проточную часть двигателя

Тип включений	Состав включений
Внешние:	
естественные	Взвешенная пыль, соли морской воды
промышленные	Продукты сгорания, летучие промышленные отходы
Внутренние	Отслаивающиеся частицы окалины, продукты износа деталей
Эрозионно-опасные	Промышленная пыль, капли воды, окислы металлов, продукты износа проточной части
Коррозионно-опасные	Сернистые соединения, соединения ванадия, свинца, цинка, щелочных металлов

Отложения на топливных фильтрах содержат органические и неорганические соединения приблизительно в равных долях. Анализ отложений на топливных фильтрах и лопатках турбины ряда авиационных ГТД, эксплуатирующихся в континентальных условиях, показывает, что органические соединения составляют значительную часть отложений на лопатках турбины, неорганические соединения (зола), составляют 6 % (табл. 2). Химический состав этих отложений приведен в табл. 3.

Таблица 2

Состав отложений на лопатках турбин и ячейках фильтра

Состав отложений	Отложения, %	
	Лопатки	Фильтр
Органические отложения	94,0	54,5
Углерод	56,2	36,2
Водород	8,8	6,0
Сера	Следы	5,0
Кислород	29,0	7,3
Неорганические отложения (зола)	6,0	45,5

Таблица 3

Состав неорганических отложений на лопатках турбин

Химические соединения	Процент отложений
Na ₂ SO ₄	4,3
CaSO ₄ ·2H ₂ O	22,7
Fe ₂ O ₃	22,3
ZnSO ₄ ·H ₂ O	20,6
K ₂ SO ₄	10,4
HgO	2,8
Al ₂ O ₃	4,5
SiO ₂	10,4

Как видно из табл. 2 и 3 в продуктах сгорания содержится значительное количество коррозионно-активных соединений. Их концентрация достигает 5 млн⁻¹ [2], что способствует протеканию коррозионных процессов на поверхности лопаток турбины с относительно высокими скоростями.

При исследовании коррозионных процессов важно правильно выбрать критерий коррозионной стойкости. В качестве таких критериев в настоящее время наиболее широко используют:

– относительную потерю массы: $\Delta \bar{M} = \Delta M / F$;

– глубину коррозионного повреждения:

$$h = \Delta \bar{M} / \rho ;$$

– средней скорости относительной коррозионной потери массы: $V = \Delta \bar{M} / t$,

где ΔM – абсолютная потеря массы объекта исследования после удаления пораженного корро-

зией слоя, кг; F – площадь пораженной поверхности, m^2 ; ρ – плотность материала, kg/m^3 ; t – время наработки, ч.

Анализируя характер разрушения рабочих лопаток турбины при их значительном коррозионном повреждении можно отметить:

– изменение характеристик пластичности, длительной и усталостной прочности материала пера лопаток и антивибрационных полок в зонах коррозионных повреждений;

– износ торцов антивибрационных полок;

– изменение геометрии лопаток и, в первую очередь, уменьшение площади поперечного сечения в средней части лопатки.

Такие повреждения лопаток и изменения свойств материала приводят к усталостным и статическим разрушениям лопаток или их антивибрационных полок, ослаблению коррозией антивибрационных полок под действием центробежных сил, касанию их о корпус и разрушению как полок, так и лопаток.

Исходя из этого при оценке степени повреждения лопаток необходимо определить уровень предельно допустимого повреждения, т.е. повреждения, при котором лопатка в каждом сечении будет иметь достаточный коэффициент запаса прочности. В ряде случаев уровень предельных повреждений можно оценивать по предельно допустимому снижению экономичности двигателя вследствие возрастания потерь в турбине за счет ухудшения характера обтекания лопаток.

В тех случаях, когда критическим является коррозионное повреждение антивибрационных полок, в соответствии со статистикой разрушения лопаток турбин предельная глубина повреждения составляет 0,4...0,5 % от длины лопатки.

Для оценки уровня повреждения лопаток необходимо располагать кинетическими характеристиками окисления (рис. 2).

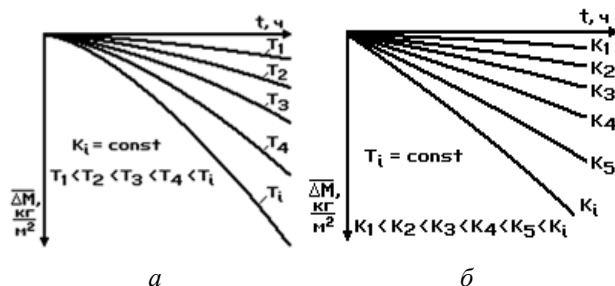


Рис. 2. Качественный вид кинетических кривых высокотемпературной коррозии лопаточных материалов:

a – при постоянной концентрации коррозионно-активных соединений в газовом потоке и различных рабочих температурах; *б* – при постоянной температуре поверхности материала и различных концентрациях коррозионно-активных соединений в газовом потоке

Кинетические характеристики окисления определяются экспериментально для каждого лопаточного материала и описываются уравнением регрессии:

$$\Delta \bar{M} = f(T, K, \tau),$$

где T – температура поверхности сплава, $^{\circ}C$; K – концентрация коррозионно-активных соединений в газовом потоке, $млн^{-1}$; τ – время, ч.

Получение таких характеристик возможно на газодинамических стендах на образцах или моделях из соответствующих жаропрочных сплавов. Контроль теплового состояния испытываемых объектов осуществляется их термометрированием, а заданная концентрация коррозионно-активных соединений в газовом потоке достигается введением в топливо необходимого количества этих соединений.

В некоторых случаях испытания на коррозионную стойкость проводят покрывая объекты исследования синтетической золой, содержащей коррозионно-активные соединения в той пропорции, которая соответствует реальным отложениям на лопатках турбины.

Используя кинетические кривые окисления, можно определить относительную потерю массы $\Delta \bar{M}_i$ и глубину коррозионных повреждений материала лопаток в процессе работы двигателя на определенном i -м режиме, с известными температурой лопаток T_i , концентрацией коррозионно-активных соединений в газовом потоке K_i и временем непрерывной работы на этом режиме t_i .

При этом повреждаемость материала лопаток при известных условиях работы двигателя составляет

$$D_i = \frac{\Delta \bar{M}_i(T_i, K_i, t_i)}{\Delta \bar{M}_{\text{пред}}},$$

где $\Delta \bar{M}_{\text{пред}}$ – предельная относительная потеря массы материала лопатки.

Используя линейную гипотезу суммирования коррозионных повреждений, которая на первом этапе коррозионных исследований является наиболее простой в реализации и обеспечивает достаточную точность оценки повреждений при переходе с одного рабочего режима на другой, можно определить повреждаемость материала лопаток при сложной программе работы, состоящей из n режимов эксплуатации:

$$D_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta \bar{M}_i(T_i, K_i, t_i)}{\Delta \bar{M}_{\text{пред}}}$$

На рис.3 показана схема линейного суммирования повреждений материала лопаток с использованием кинетических кривых высокотемпературной газовой коррозии до достижения предельного состояния.

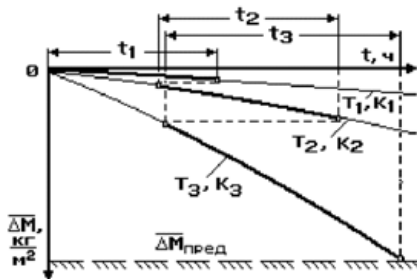


Рис. 3. Принцип линейного суммирования коррозионных повреждений материала лопаток турбин

В процессе проведения дальнейших исследований коррозионной стойкости жаропрочных лопаточных материалов при программном изменении температуры и концентрации коррозионно-активных соединений в газовом потоке возможен переход к более точной нелинейной модели суммирования коррозионных повреждений.

Выводы

Предложенная модель линейного суммирования высокотемпературной коррозии лопаток турбины при известных условиях эксплуатации двигателя и качестве применяемого топлива может быть использована при реализации системы мониторинга технического состояния деталей «горячей» части ГТД различного назначения и, в первую очередь, энергетических стационарных ГТУ. Последнее связано с тем, что для таких ГТУ можно с большой достоверностью учитывать качество применяемого топлива, оценивать состав воздушной массы окружающей среды и концентрацию коррозионно-активных соединений в газовом потоке. Кроме того, для таких ГТУ проще организовать учет эксплуатационных режимов, а для реализации системы мониторинга использовать традиционные средства вычислительной техники.

Ель-Хожайри Хусейн

Оцінка пошкоджуваності лопаток турбін газотурбінних двигунів в експлуатації

Проаналізовано фактори, що визначають характер та інтенсивність корозійних пошкоджень лопаток газових турбін. Виконано класифікацію шкідливих домішок, які забруднюють проточну частину газотурбінних двигунів і викликають ерозійно-корозійне пошкодження лопаток турбін. Наведено кінетичні характеристики корозії та принцип лінійного підсумовування пошкоджень жароміцних матеріалів з використанням таких характеристик.

Al-Ноjuуry Husseyn

Gas turbine engine turbine blade damaging estimate in maintenance

The factors determining character and intensity of corrosive damages of gas turbine blades are analyzed in the article. The classification of detrimental impurities polluting gas turbine airflow duct and injuring blade erosion damages are given. Common features of the method of turbine blade corrosive damage estimation are shown in the article.

Список литературы

1. Акимов Л.М., Матвеев А.Ф., Сидоренко В.В. Высокотемпературная коррозия, повреждение и защита лопаток газотурбинных установок // Газовая промышленность. – 1983. – Вып. 4. – С. 1–39.
2. Кулик Н.С., Карпов Е.Н., Эль-Хожайри Хуссейн. Коррозионные повреждения лопаток газовых турбин // Вісн. НАУ. – 2001. – № 2. С. 30–34.
3. Архаров В.И., Баланева Н.А., Богословский В.Н., Стафеева Н.М. К вопросу о теоретических основах высокотемпературной коррозии металлов // Высокотемпературная коррозия и методы защиты от нее. – М.: Наука, 1973. – С. 5–19.
4. Ли С.И., Янг В.Е., Хасси С.Е. Влияние температуры на высокотемпературную коррозию жаропрочных сплавов в газовых турбинах // Энергетические машины и установки. – 1972. – № 2. – С. 77–82.
5. Беликов С.Б. Влияние некоторых легирующих элементов на коррозионную стойкость никелевых сплавов при высоких температурах // Энергетическое машиностроение. – 1980. – № 11. – С. 27–28.
6. Лоуэл С.Е., Сидик С.М., Дедмор Д.Л. Влияние Cr, Al, Ti, и Mo на высокотемпературную коррозию сплавов // Энергетические машины и установки. – 1974. – № 2. – С. 27–43.
7. Коломыцев П.Т. Газовая коррозия и прочность никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1984. – 216 с.
8. Гугелев Б.М., Бавельский Д.Н., Вишневецкий Г.В. Влияние эксплуатационных повреждений на конструктивную усталостную прочность лопаток стационарных ГТУ // Энергетическое машиностроение. – 1979. – № 3. – С. 11–15.
9. Рябченков А.И., Анисимова М.А., Максимов А.И. Влияние процесса высокотемпературной газовой коррозии на усталостную прочность сплавов // Коррозионная усталость металлов. – 1982. – № 8. – С. 174–180.

Стаття надійшла до редакції 11.03.04.