

разцах (рис.2). Однако начальный участок смоделированной эпюры имеет незначительные отличия – в ней отсутствует характерный подслоный максимум. Подводя итоги, можно отметить следующее.

В работе показаны два метода моделирования остаточных напряжений в поверхностном слое с помощью КЭ комплекса ANSYS. Первый – метод непосредственного задания величины начальных напряжений (с помощью начальных напряжений In.Stress). Второй - метод моделирования с помощью связанного нестационарного термоструктурного анализа (моделирование “теплового удара”).

Сравнивая оба метода с точки зрения их практического использования на конкретной задаче, можно отметить, что для КЭ моделей, состоящих из большого числа объемных элементов наиболее приемлемым является метод с использованием начальных напряжений, как наиболее быстрый, а часто и единственно возможный. Дело в том, что при проведении структурного анализа модели, состоящей более, чем из 200...250 тыс. КЭ. Результаты моделирования съема поверхностного слоя с остаточными напряжениями показали, что деформационные кривые хорошо согласуются с экспериментальными данными.

УСКОРЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОВОЙ КОРРОЗИИ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГТД

Гишваров А.С., Давыдов М.Н.

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

В условиях постоянного роста надежности и ресурса газотурбинных двигателей особую актуальность приобретают вопросы ускоренной оценки ресурсных возможностей основных элементов двигателя, что позволяет, в конечном итоге, более оперативно управлять их надежностью и ресурсом, сокращая временные и материальные затраты. Известно, что надежность и ресурс ГТД определяются в основном элементами «горячей» части двигателя (рабочими и сопловыми лопатками, дисками и т.д.), подверженными действию статического, циклического, повторно-статического и усталостного нагружений, а для лопаток также действию процессов газовой коррозии.

В данной работе рассматривается метод ускоренного моделирования высокотемпературной сульфидно-оксидной газовой коррозии лопаток ГТД, выполненных из жаропрочного сплава ЖС6К.

Моделирование проводилось на сопловых лопатках 1 ступени турбины вспомогательного газотурбинного двигателя ТА-6А, изготовленных из сплава ЖС6К. Основная цель исследования сводилась к получению ре-

зультатов коррозионного повреждения модельных образцов лопаток, идентичного результатам эксплуатационного повреждения лопаток двигателей.

Ускоренное моделирование коррозии образцов проводилось в следующей последовательности: травление, электрохимическая обработка, нагрев в печи в атмосфере газов, имитирующих продукты сгорания топлива в двигателе.

Ввиду отсутствия признаков нагарообразования лопаток в эксплуатации его моделирование в процессе исследования не проводилось.

Образцы для проведения экспериментов вырезались из новых рабочих лопаток и имели прямоугольную форму (рис.1). Таким же образом готовились образцы из лопаток, прошедших отработку в эксплуатации Место вырезки образцов соответствовало максимальной повреждаемости лопаток на двигателе.

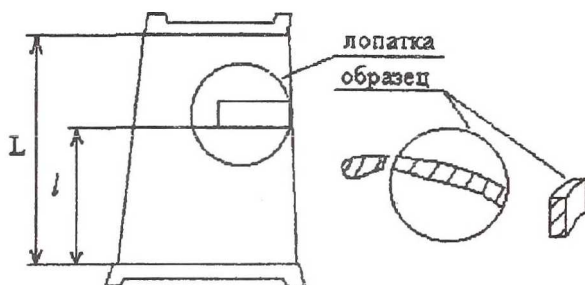


Рис. 1. Схема подготовки образца из лопатки турбины ($l = 2/3 L$)

1. Травление. Для травления было отобрано 60 образцов, которые выдерживали в течение 5 мин. в 0,8% водном растворе лимонной кислоты с добавкой 0,9% сульфата аммония. Далее, с целью оценки степени соответствия содержания в поверхностном слое основ легиру-

ющих элементов в модельном образце и натуральных лопатках, 5 образцов отбирались для микрорентгеноспектрального анализа на установке «Супер-проб-733» с приставкой «Линк», остальные 55 образцов подвергались электрохимической обработке.

2. Электрохимическая обработка. Электрохимическая обработка (ЭХО) проводилась в гальваностатическом режиме. Поляризация сплава проводилась при комнатной температуре в 15% водных растворах солей NaCl , NaNO_3 , NH_4NO_3 , NH_4Cl и Na_2SO_4 , а также в двух- и трехкомпонентных электролитах солей с добавками этиленгликоля, глицерина и сульфида натрия. За базовый электролит был выбран 15% раствор нитрата натрия NaNO_3 , позволяющий в отличие от других электролитов создавать нейтральную среду, получать более прочную оксидную пленку за более короткое время и обладающий меньшей рассеивающей способностью.

Предварительными исследованиями было выявлено, что формирование поверхностного слоя требуемой толщины происходит после электро-

химической поляризации образцов в трехкомпонентном электролите, содержащем NaNO_3 , глицерин и Na_2SO_4 .

Добавление сульфида натрия позволяет дополнительно уменьшать предельный ток поляризации и осаждать серу на поверхностный слой сплава. При этом толщина поверхностного слоя и его внешний вид идентичны толщине поверхностного слоя образца лопатки, отработавшей в эксплуатации.

В качестве добавки в раствор нитрата натрия был выбран глицерин, позволяющий получать меньшее значение предельного тока поляризации по сравнению с добавкой этиленгликоля. В этом случае на образце образуется оксидная пленка, защищающая сплав от растворения в электролите.

После электрохимической обработки образцы шлифовались, подвергались травлению составом: 2,5 г NaF , 35 г HCl , 10 г HNO_3 , 55 мл H_2O и далее исследовались на микроскопе "Неофот-2".

В качестве оптимального был выбран следующий режим ЭХО образцов: травление, затем ЭХО при токе поляризации $J = 100 \text{ mA}$ в течение 1 часа при комнатной температуре в трехкомпонентном растворе, содержащем 15% NaNO_3 , 5% Na_2SO_4 и 5% глицерина.

3. Высокотемпературная обработка образцов проводилась в печи (рис. 2) в среде агрессивных газов.

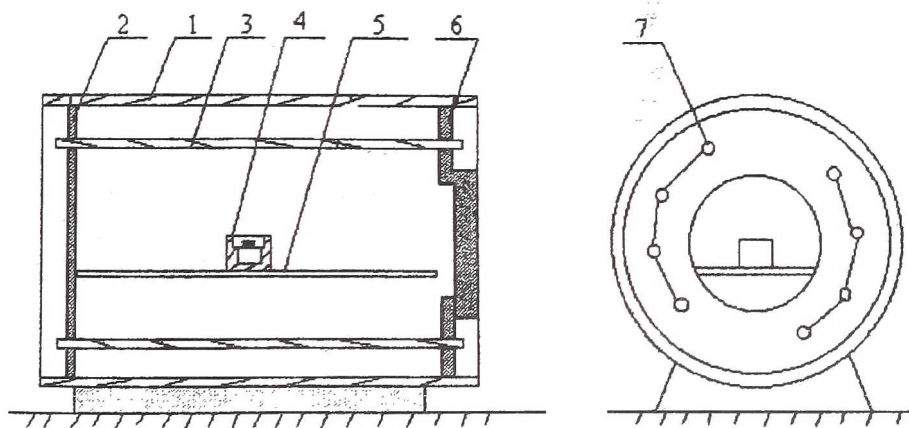


Рис. 2. Схема печи для высокотемпературной обработки образцов: 1 - корпус; 2 - стенка; 3 - нагреватель; 4 - тигель; 5 - полка; 6 - крышка; 7 - медный жгут

Предварительно были проведены испытания с целью оценки влияния на процесс коррозии состава солей, температуры и длительности нагрева. Для экспериментов были отобраны соли MgCO_3 , Na_2SO_3 , Na_2SO_4 , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_6$

и их смеси, позволяющие получать при разложении газы SO_2 , SO_3 , CO , CO_2 . Анализировались следующие варианты:

- соль Na_2SO_4 , нагрев от 20°C до 850°C в течение 1 часа, выдержка образца при температуре 850°C в течение 5 и 10 часов, охлаждение до 20°C в течение 2,5 часов;
- соль Na_2SO_3 , нагрев от 20°C до 920°C за 1 час, выдержка образца при температуре 920°C в течение 5 и 10 часов, охлаждение до 20°C в течение 2,5 часов;
- соль MgCO_3 и смеси солей [$\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{MgCO}_3$] (соотношение в смеси 1:1) при тех же сочетаниях температур и длительности.

Значения температур 850°C и 920°C , были выбраны из следующих соображений:

- в интервале температур $750... 850^\circ\text{C}$ и $900...950^\circ\text{C}$ механизм коррозии различный [1];

- существуют три температурные зоны сульфидно-оксидной коррозии: I - $T > 884^\circ\text{C}$, II - $T_{\text{кр}} < T < 884^\circ\text{C}$, III - $T < T_{\text{кр}}$, где $T_{\text{кр}}$ - критическая температура, ниже которой применение сплава возможно без защитных покрытий [3] (для сплава ЖС6К $T_{\text{кр}} = 725^\circ\text{C}$). Сульфидная коррозия также наблюдается в области относительно низкой температуры, однако ее скорость незначительно превышает скорость окисления на воздухе. Ввиду относительно небольшого увеличения степени и скорости сульфидно-оксидной коррозии никелевых сплавов испытания при температуре $T < T_{\text{кр}}$ не проводились;

- при температуре 850°C рассматриваемый двигатель работает в эксплуатации наиболее длительное время;

- при запуске двигателя температура поверхности лопатки достигает 940°C ;

- скорость испарения солей максимальна при температуре $850...950^\circ\text{C}$ [2].

Выбор длительности выдержки образца в печи был проведен из условия минимальной длительности испытаний и получения значимых изменений в поверхностном слое образца, характерных для высокотемпературной коррозии.

Навески солей Na_2SO_3 и MgCO_3 определялись из условия получения одинакового количества газов SO_2 и CO_2 , что было необходимо для проведения сравнительной оценки влияния этих газов на коррозию.

Образцы помещались в тигле на специальную сетку, изготавливаемую из сплава ЭЙ 437Б, что исключало возможные реакции образца с расплавом солей. Поэтому образцы подвергались воздействию только агрессивных газов.

В эксперименте также исследовалось влияние солей NaCl и NH_4VO_3 , являющихся катализаторами газовой коррозии [3].

Отбраковка образцов на стадии предварительных экспериментов проводилась путем сравнения с данными образцов лопаток, отработавших в эксплуатации.

В качестве оптимальных были выбраны соли MgCO_3 и Na_2SO_3 , как создающие необходимое количество агрессивных газов. Катализаторы коррозии при дальнейшем исследовании были исключены из рассмотрения, поскольку изменяли механизм коррозии.

После завершения испытаний образцы, прошедшие испытания и образцы, отработавшие в эксплуатации, а также образцы, полученные из новых лопаток, исследовались в ВИАМЕ. Исследование проводилось с применением метода электронной оже-спектроскопии на спектрометре ЛАС-200 фирмы РИБЕР (Франция), метода растровой электронной микроскопии (РЭМ) и микрорентгеновского анализа (МСРА) на установке «Супер-проб-733» с приставкой «Линк».

Анализировался элементный и химический состав непосредственно поверхностного слоя (глубина $\approx 20\text{\AA}$). Для изучения изменения состава образца по глубине применялось травление ионами аргона с энергией 6 КэВ непосредственно в камере спектрометра, что позволяло анализировать "профиль концентрации" электронов по глубине. Скорость травления составляла около 100 А/мин.

Исследование показало следующее:

1) после травления слоя, содержащего поверхностные загрязнения (углерод, кислород, кальций), образование которых связано с пребыванием образца в атмосферном воздухе и контактом с водными средами, в спектре наблюдались пики только основных легирующих элементов - никеля, хрома и др.;

2) поверхность лопаток, отработавших в эксплуатации, загрязнена кремнием, азотом, углеродом и кислородом. После ионного травления на глубину 0,2...0,3 мкм в спектре наблюдаются только пики Al в химической модификации Al^{3+} и кислорода, т.е. Al_2O_3 ;

3) на лопатке, отработавшей в эксплуатации, отмечены аналогичные спектры, а также загрязнение поверхности серой (вероятной причиной присутствия этих элементов на поверхности лопатки является контакт с воздухом и продуктами сгорания топлива);

4) оже-анализ в сочетании с ионным профилированием показал в приповерхностном слое образцов наличие азота, серы, углерода и кислорода, (т.е. ЭХО в растворах, содержащих ионы азота и серы с последующей термообработкой в атмосфере CO_2 , приводит к переносу этих элементов в поверхностный слой металла);

5) на поверхности лопатки сера отсутствовала; наблюдались загрязнения углеродом (до глубины 0,1...0,15мкм) и кислородом (на большую глубину). При отжиге в контейнере с солью $MgCO_3$ магний на поверхности отсутствовал;

б) присутствие в приповерхностном слое, кроме легирующих элементов, также углерода, азота и кислорода, связано скорее всего с ЭХО. Наличие хлора на глубине 0,1...0,15мкм осталось невыясненным.

По составу приповерхностного слоя наиболее близкие к эксплуатационным результаты были получены на образце №4 при обработке в соли Na_2SO_4 при нагреве 20...920°C в течение 1 часа, выдержки в течение 10 часов при температуре 920°C и последующем охлаждении 920...20°C за 2,5 часа.

Исследование более глубоких слоев сплава проводилось методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и микрорентгеноспектрального анализа (МРСА), что позволило оценить изменение структуры и состава поверхностного слоя под воздействием ЭХО.

Методом РЭМ в режиме отраженных электронов "СОМРО" были получены изображения структуры лопаток с различными видами ЭХО, отработавших в эксплуатации, а также новой лопатки. Режим "СОМРО" позволил, кроме информации о структуре исследуемого материала, получать данные о химическом составе фаз, слоев и др. В этом режиме фазы с высоким средним атомным номером светлее, чем фазы с более низким номером, что определяется большей отражательной способностью элементов с высоким атомным номером по отношению к электронам первичного пучка.

Сравнение микроструктуры исходной лопатки и лопаток, подвергнутых различным видам ЭХО, показало наличие изменений в структуре и составе поверхностного слоя лопаток.

На поверхности образца №4 наблюдалась зона шириной около 5 мкм, обедненная легкими элементами (по цвету светлее основного металла). Это подтверждается результатами МРСА, свидетельствующими об обеднении поверхностного слоя Al-ем и Ti-ом по сравнению с их содержанием в сердцевине лопатки (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав материала образцов

Место определения состава	Химический состав, %						
	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	W
Матрица сплава ЖС6К	5,0	2,5	10,0	4,2	66,0	4,0	8,0
Поверхность образцов №4 и №5	1,0	1,0	9,0	4,5	71,0	4,0	8,0

Структура поверхностного слоя образца №5 подобна структуре образца №4, но зона, обедненная титаном и алюминием, уже (1...2мкм).

По литературным данным высокотемпературное окисление никелевых жаропрочных сплавов с высоким содержанием хрома и алюминия связано с потерей алюминия и образованием обедненной приповерхностной зоны [2]. Аналогичный результат наблюдается на образцах №4 и №5, различающихся глубиной обедненной зоны.

Таким образом, рассмотренный метод ускоренного моделирования коррозии лопаток ГТД позволяет получать результаты, качественно и количественно близкие к результатам эксплуатационной наработки лопаток двигателя.

При этом достигаемое сокращение длительности испытаний для рассматриваемого двигателя составляет более 100 раз.

Областью применения данного метода является сравнительная экспресс-оценка прочностной надежности в условиях высокотемпературной коррозии. При этом возможны различные варианты комбинирования рассмотренного метода моделирования с другими известными и используемыми на практике методами сокращения длительности ресурсных испытаний [5].

Список литературы

1. Никитин В.И. Коррозия и защита лопаток турбин.- М: Машиностроение, 1987, 287с.
2. Орышич И.В. Разработка методики испытания жаропрочных сплавов. - Защита металлов. 1981. -№ 1, с. 117-120.
3. Гецов Л.Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. -М.: Недра, 1996.-591 с. ил.
4. Особенности газовой коррозии сплавов на никелевой основе / В.И. Никитин, И.П. Комиссарова, Г.Д. Пигрова и др. II Металлы. -1982.-№5, с. 117-120.
5. Гишваров А.С. Теория ускоренных ресурсных испытаний технических систем.-Уфа, Гилям, 2000, 338с.