

УДК 621.431.74.0004.2+629.5.03+843.8.004.2

А.З. Багерман, к.т.н., ведущий научный сотрудник 4-го отделения, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», e-mail: Bagerman.A.Z@mail.ru;

А.В. Конопатова, инженер 4-го отделения, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», e-mail: konopatovalex@gmail.com;

И.П. Леонова, старший научный сотрудник, ФГУП «Крыловский государственный научный центр», e-mail: leonirpal@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИИ НА МАТЕРИАЛЫ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК МОРСКИХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В статье рассмотрены условия возникновения высокотемпературной солевой коррозии материалов турбин газотурбинных двигателей (ГТД), влияние высокотемпературного окисления элементов жаропрочных сплавов на их физические свойства. Предложено устройство контроля деградации материала турбин ГТД в эксплуатации.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, условия эксплуатации, высокотемпературное окисление, солевая коррозия, жаропрочные никелевые сплавы, диагностирование проточной части, контроль деградации материала.

При эксплуатации газотурбинного двигателя в море или в близких к морю районах возникает опасность коррозии лопаток компрессоров и турбин и других элементов проточной части.

Температурный диапазон солевой коррозии в турбинах практически начинается с температуры 600 °С. Так, наблюдения за состоянием лопаток газотурбинного двигателя показали, что за время эксплуатации на корабле в течение 10 тыс. часов коррозия возникла на турбинных лопатках из трех различных жаропрочных сплавов ЭИ607А, ЭИ826, ЭИ868 с различными типами защитных покрытий. Средняя начальная температура газа в этот период составляла 550–650 °С [2].

Анализ солевых отложений на турбинных лопатках показал наличие в них практически всех солей, содержащихся в морской воде. Особенностью явилось то, что в пробах солевых отложений хлориды либо отсутствовали, либо присутствовали в очень малых количествах. Это при том, что хлориды составляют до 80% солей, присутствующих в морской воде. Причиной этого является вы-

сокая скорость возгонки NaCl, в 20 и более раз превышающая, например, скорость возгонки сульфатов натрия. Коррозия, естественно, возникает при наличии солей на поверхности лопаток, температурных условий и других факторов.

Появление коррозионных повреждений на лопатках приводит к увеличению их шероховатости и, по мере развития, изменению геометрии лопаток, изменению степеней понижения давления газа в поврежденной ступени и к перераспределению степеней понижения давления между ступенями по всему турбинному тракту. Следствием этого становится понижение эффективности работы ГТД, снижение мощности и повышение начальной температуры газа по сравнению с исходной. В результате скорость расходования ресурса лопаточного материала увеличивается, возрастает скорость коррозии, что еще более ускоряет снижение ресурса.

Контроль состояния поверхностей турбинных лопаток ведется периодически визуально через бароскопы. Однако визуальная оценка при этом зачастую у разных наблюдателей по-

лучается различной. Поэтому в первую очередь необходимо контролировать изменения параметров газа в проточной части, идентифицировать причины изменения и устранять эти причины.

Для минимизации коррозии проточной части ГТД необходимо снижение количества солей, поступающих в проточную часть. Соли поступают в турбинный тракт двумя путями: с воздухом и с топливом.

Как показали исследования, соли из топлива ввиду своего агрегатного состояния обладают большей адгезией к материалам лопаток и способны в большем (почти в два раза) количестве задерживаться на лопатках в одинаковых условиях [3]. На рисунке 1 показаны зависимости коэффициента сепарации солей из газового потока на лопатки турбин: рабочие и сопловые. Эти зависимости получены на газодинамическом стенде с подачей солей в газовый поток с воздухом или с топливом. Результаты испытаний показали связь коэффициента сепарации солей с температурой газа и источником поступления в газовый поток. Коэффициент сепарации оценивался

как отношение количества солей, смытых с лопаток после 20-минутной экспозиции в газовом потоке, к количеству солей, содержащихся в газовом потоке, проходящем через сечение, равное проекции лопатки на плоскость, перпендикулярную потоку.

Как показали эксперименты, при «солевых» испытаниях ГТД и при эксплуатации двигателей в морских условиях на кораблях, в конечном счете включая частичную трансформацию хлоридов в сульфаты при наличии серы в топливе, соотношение сульфатов и хлоридов в газе составило примерно 1:1 [4].

Для безопасной эксплуатации турбин надо стремиться, чтобы в результате очистки воздуха и топлива количество солей, поступающих в проточную часть турбин, было близко к количеству солей, испаряющихся с поверхности лопаток при рабочих температурах газа в турбине [5]. Для безопасной эксплуатации с точки зрения коррозии необходимо обеспечивать в воздухе на входе в двигатель содержание около 0,02 мг/кг воздуха во всем диапазоне рабочих режимов двигателя, а количество натрия в топливе – менее 0,01 мг/кг топлива.

Основным препятствием коррозионного разрушения турбинных лопаток будет коррозионная стойкость основного материала лопаток и защитных покрытий. Наряду с хорошими «личными» качествами жаропрочных сплавов и используемых защитных покрытий они должны хорошо сочетаться друг с другом не только по линии диффузии, но и по некоторым другим характеристикам. К таким характеристикам относится коэффициент линейного расширения. Если у известных жаропрочных сплавов [6] при температуре 800 °С коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^6$ около $14,0 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, то у типовых защитных покрытий он отличается на $0,5 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и более. В результате возникают напряжения, которые не будут способствовать прочности соединения покрытия на основном металле [7].

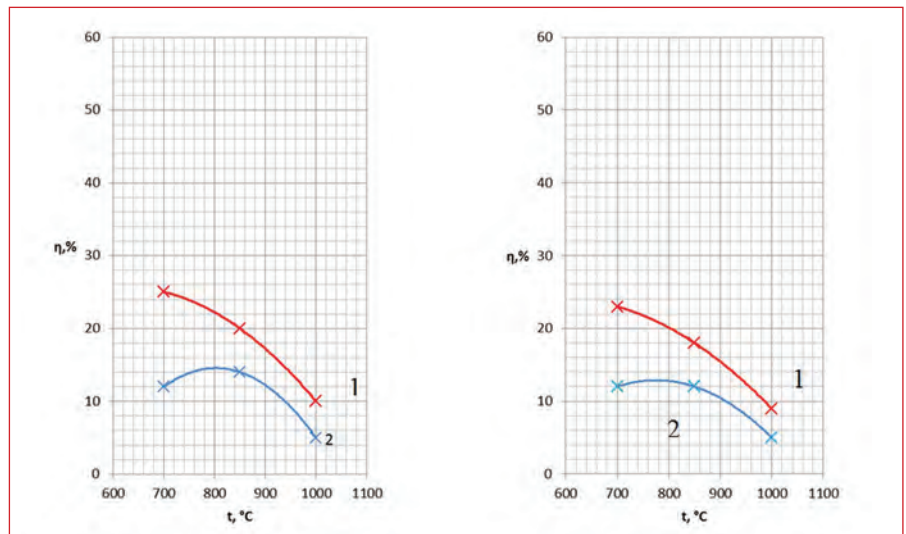


Рис. 1. Зависимость коэффициента сепарации солей от температуры газового потока при исходном наличии их в топливе (1) и в воздухе (2): а) сопловая лопатка; б) рабочая лопатка

В процессе эксплуатации происходит окисление и коррозия защитного покрытия на лопатках. Характеристики материалов изменяются. Отдельные сведения по влиянию окисления приведены в [8]. Эти данные показали, что в результате окисления коэффициент линейного расширения сплавов будет снижаться. Анализ взаимосвязи коэффициентов линейного расширения и теплопроводности жаропрочных сплавов показал следующую картину, приведенную на рисунке 2.

Оба коэффициента сравнивались при одинаковых температурах [6, 9]. На рисунке приведены данные в диапазоне 300–900 °С. Из рисунка следует, что если коэффициент линейного расширения сплава уменьшается, то будет уменьшаться и коэффициент теплопроводности. В результате изменяются:

- тепловые потоки, связанные с охлаждением лопаток;
- температура материала лопаток, которая в эксплуатации не контролируется;

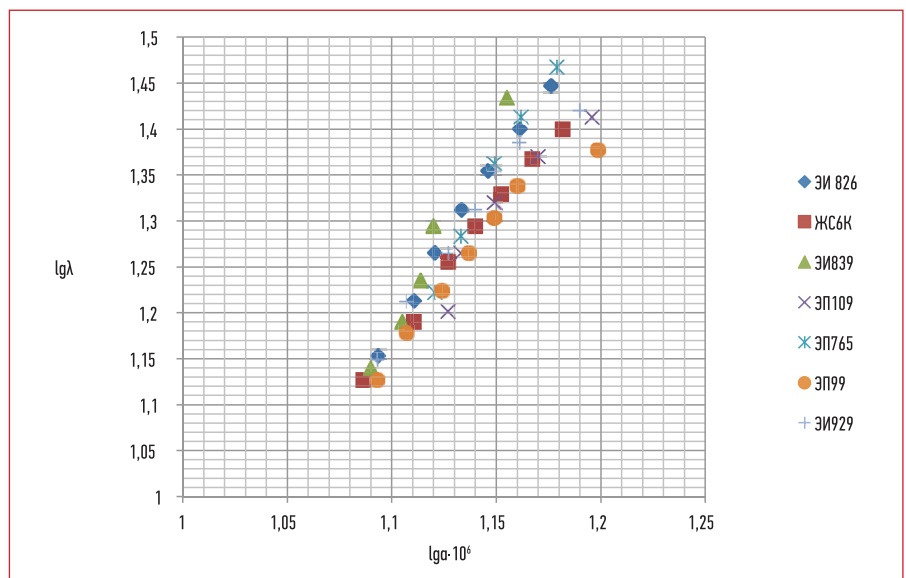


Рис. 2. Связь коэффициента теплопроводности и коэффициента линейного расширения жаропрочных сплавов при температурах 300–900 °С

- расходование ресурса;
- процессы коррозии.

Влияние коррозии на σ и λ в литературе авторами не найдено.

Влияние окисления можно проиллюстрировать на изменении λ [8] отдельных элементов. Например, при температуре 600 °С Ni (NiO) до окисления $\lambda = 62$ Вт/м⁰С, после окисления 5,7 Вт/м⁰С, Co (Co₂O₃) – 56 Вт/м⁰С до и < 1 Вт/м⁰С после, Al (Al₂O₃) – 216 Вт/м⁰С до и 6,3 Вт/м⁰С после, Ti (TiO₂) – 20 Вт/м⁰С до и 3,6 Вт/м⁰С после.

Для проектирования лопаточного аппарата, «обязанного» исправно отработать десятки тысяч часов, необходимо знание характеристик исходных материалов, в т.ч. защитных покрытий и их изменений на протяжении всего этого периода. Поэтому необходима постановка исследований, обеспечивающих получение таких знаний.

Для оценки влияния атмосферы в проточной части турбин на характеристики материала турбинных лопаток можно использовать специальное устройство, обеспечивающее постоянный контроль деградации материалов турбинных лопаток и их защитных покрытий в атмосфере проточной части газотурбинного двигателя.

Это устройство получило название «Устройство для контроля деградации материала турбинных лопаток и их защитных покрытий газотурбинных двигателей в эксплуатации» («Свидетель», рис. 3).

«Свидетель» обеспечивает пребывание испытуемых материалов в проточной части газотурбинного двигателя в процессе его эксплуата-

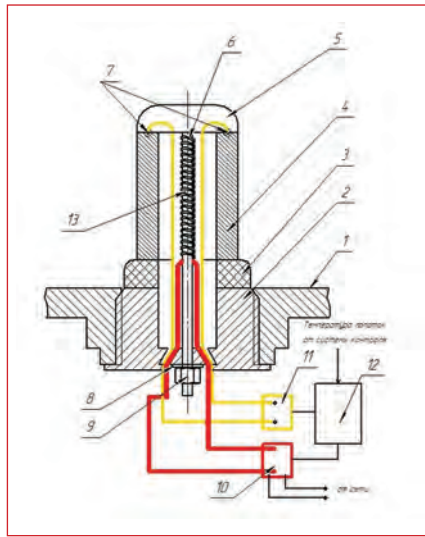


Рис. 3. Устройство для контроля в эксплуатации деградации материала и защитных покрытий турбинных лопаток газотурбинных двигателей («Свидетель»): 1 – корпус газотурбинного двигателя; 2 – корпус устройства; 3 – тепловой изолятор; 4 – образец; 5 – крышка; 6 – электронагреватель; 7 – термопары; 8 – шайба; 9 – гайка; 10 – регулятор силы тока; 11 – устройство усиления сигналов термопар; 12 – устройство контроля и управления; 13 – стержень

ции. При этом температура металла поддерживается равной температуре лопаток контролируемой турбины либо другой заданной температуры. Специальные испытания, результаты которых приведены в [4], показали, что независимо от температуры потока коррозионные разрушения материалов происходят в соответствии с температурой собственно материала, находящегося в газовом потоке.

Устройство устанавливается в обтекание на корпусе за последней турбиной газотурбинного двигателя.

При эксплуатации «Свидетеля» с помощью термопар на стационарном режиме работы двигателя определяется температура образца, которая передается в устройство контроля и управления, где она сравнивается с температурой материала контролируемых лопаток. Температура материала этих лопаток формируется на основании измеряемой температуры газа и результатов термометрирования или расчета взаимосвязи температуры газа и материала лопаток. На основании сравнения температур образца и лопаток устанавливается режим работы электронагревателя, который должен обеспечить равенство температуры образца и материала контролируемых турбинных лопаток.

Для контроля состояния материала образца устройство-свидетель периодически вынимается из проточной части двигателя, извлекается образец исследуемого материала, который далее подвергается анализу в металлографической лаборатории на программно-аппаратном комплексе анализа микроструктуры поверхности твердых тел.

Таким образом, использование двигателя как газодинамического стенда позволит получать данные по деградации материала турбинных лопаток в условиях, максимально приближенных к натурным.

В результате появляется возможность постоянного контроля деградации материала турбинных лопаток и их защитных покрытий в реальных условиях их эксплуатации без нарушения целостности двигателя через любую промежуток времени.

Литература:

1. Орышич И.В. Разработка методики испытаний жаропрочных сплавов в расплавах солей // Защита металлов. 1981. Т. V111. № 1. С. 74–79.
2. Ронкин Л.М., Гартвиг В.В. Опыт эксплуатационной проверки сопловых лопаток газотурбинного двигателя в морских условиях // Вопросы судостроения. 1985. Вып. 26. С. 9–11. (Судовые энергетические установки.)
3. Багерман А.З. Обеспечение надежной эксплуатации газотурбинных двигателей в морских условиях. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. 132 с.
4. Багерман А.З. Коррозионные испытания жаропрочных сплавов для газовых турбин. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014. 133 с.
5. Багерман А.З., Конопатова А.В., Хорошев В.Г. Нормирование содержания влаги, поступающего в газотурбинный двигатель // Газотурбинные технологии. 2014. № 2. С. 32–33.
6. Масленков С.Б., Масленкова Е.А. Стали и сплавы для высоких температур: Справочник. В 2-х т. Т. 2. М.: Металлургия, 1991. 649 с.
7. Третьяченко Г.Н., Кравчук Л.В., Курият Р.И., Волощенко А.П. Несущая способность лопаток газовых турбин при нестационарном тепловом и силовом воздействии. Киев: Наукова думка, 1975. 295 с.
8. Физико-химические свойства окислов: Справочник / Под ред. Г.В. Самсонова. М.: Металлургия, 1978. 472 с.
9. Справочник по авиационным материалам. Т. 3. Коррозионностойкие и жаростойкие стали и сплавы. М.: Машиностроение, 1965. 632 с.