

УДК 621.438

Коррозия лопаток турбин ГТУ и обзор методов защиты

*Александрова Н.Д., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»*

*Научные руководители: Голубев А.М., д.х.н., профессор,
Березина С.Л., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
amgol@bmstu.ru*

Введение

Газотурбостроение – непрерывно совершенствующаяся и развивающаяся отрасль машиностроения, находящая применение в авиации, судостроении, теплоэнергетике. Газовая турбина представляет собой тепловой двигатель, в лопаточном аппарате которого энергия сжатого и нагретого газа преобразуется в механическую работу на валу. Данный принцип работы обладает рядом преимуществ, таких как возможность реализации высоких мощностей при сравнительно небольших габаритах, возможность работы на низкосортном топливе, хорошие экологические параметры. Однако реализация этой конструкции на практике требует решения ряда серьезных технических и научных проблем.

В процессе совершенствования газотурбинных установок, повышения ресурса и КПД происходит постоянный рост температуры и давления рабочего тела. Элементы турбины подвергаются высоким нагрузкам и непрерывному воздействию со стороны агрессивной среды. Эти воздействия особенно существенны для рабочих лопаток первых ступеней турбины, находящихся в области наиболее высоких температур. Одно из самых серьезных видов повреждений в данном случае - коррозионное воздействие на рабочую лопатку со стороны газовых продуктов сгорания, поступающих в проточную часть турбины.

В данной работе рассматриваются причины возникновения коррозии на поверхности лопаток газовых турбин и используемые и перспективные методы защиты от неё.

1. Причины возникновения коррозии в газовых турбинах

Газовая коррозия происходит при контакте металла с химически активным газом и характеризуется образованием на поверхности этого металла пленки продуктов коррозии. При повышенных температурах газовая коррозия протекает особенно интенсивно, а пленка на поверхности металла непрерывно утолщается, препятствуя непосредственному контакту корродируемого металла с газом. Как результат газовой коррозии возможно появление значительных повреждений поверхности пера лопатки газовой турбины: образование наростов и язв в результате локального повреждения возникшей оксидной пленки, а также изменение профиля лопаток, «разъедание» их краев.

Горячая коррозия – это особый вид деградации металлических материалов, разновидность газовой коррозии, характеризующаяся присутствием на поверхности сплава слоя осадка: соли или шлака. Наличие этого слоя приводит к изменению характера взаимодействия данного сплава с окружающей средой. Интенсивность и уровень коррозионного разрушения в значительной мере зависит от чистоты используемого топлива. Горячая коррозия наиболее часто встречается в промышленных и морских газовых турбинах и может играть определяющую роль в деградации материалов турбины.

Скорость и механизм разрушения материалов в значительной степени зависят от состава сплава, газовой среды, температуры и других факторов, что усложняет исследование данного процесса. В каждом отдельном случае необходимы натурные испытания материала в рабочих условиях. Один и тот же сплав может вести себя по-разному при изменении условий протекания горячей коррозии. Существует множество разновидностей испытаний на горячую коррозию и различные схемы моделирования, на которых мы не будем останавливаться подробно.

Различают два вида горячей коррозии по температурному диапазону: высокотемпературная и низкотемпературная. Высокотемпературная горячая коррозия является очень быстрой формой окисления, происходящей при температурах свыше 800°C в присутствии сульфата натрия (Na_2SO_4), который образуется в процессе сгорания топлива. Низкотемпературная горячая коррозия происходит в примерном диапазоне температур $600..800^{\circ}\text{C}$ и протекает интенсивно при наличии SO_3 в газовой фазе.

2. Сплавы, применяемые при изготовлении лопаток газовых турбин

До сих пор не разработаны сплавы, абсолютно не восприимчивые к горячей коррозии, но проводится постоянная работа по разработке композиций с повышенными антикоррозионными свойствами.

В последние десятилетия температура рабочего газа в газотурбинных установках значительно выросла, достигая 1500°С. Для работы в экстремальных температурно-силовых режимах при воздействии агрессивной среды применяются жаропрочные легированные суперсплавы на основе Ni, Co и Fe. Именно они используются при изготовлении современных лопаток газовых турбин. Наиболее широкое применение получили сплавы на никелевой основе, такие как ЖС-6К и ЖС-6УВИ, успешно применяемые в России для литья рабочих лопаток с 1960-х годов и работающие при температурах до 1050..1100°С, а также ЖС32 и ЖС32-ВИ – монокристаллические сплавы, разработанные ВИАМ. Фирмами GE Aircraft Engines и Pratt&Whitney были разработаны и применяются такие сплавы как ReneN6 и PWA1487. [2]

Получены также и другие классы суперсплавов, которые могут прийти на смену сплавам на основе никеля: сплавы на основе кобальта и иридия с добавками алюминия, вольфрама и тантала (в частности, Co-8,8Al-9,8W-2Ta и Ir-10Al-10W), обладающие большей твердостью и жаропрочностью, чем стандартные никелевые сплавы. [3]

Необходимо поддерживать в составе сплава высокую концентрацию тугоплавких металлов. Важный элемент, обеспечивающий стойкость сплавов к высокотемпературной горячей коррозии – хром; он подавляет коррозионное разрушение независимо от механизма горячей коррозии в большей или меньшей степени.

Для получения сплавов с требуемым комплексом механических свойств предпочтение неизменно отдается сплавам, не обладающим высоким сопротивлением горячей коррозии. Вследствие этого возникает необходимость в разработке и применении защитных покрытий для рабочих лопаток турбин для уменьшения интенсивности коррозии и сохранения работоспособности. Лопатки газовых турбин современных двигателей не могут эксплуатироваться в течение заданного ресурса без надежных высокотемпературных покрытий, обеспечивающих одновременно высокий уровень прочности и удовлетворительный уровень сопротивления коррозии и окислению.

3. Защитные покрытия лопаток газовых турбин

3.1. Требования, предъявляемые к покрытиям

Процесс разработки новых высокотемпературных покрытий включает в себя оптимизацию химического состава существующих композиций, а также разработку и освоение новых технологических процессов.

Высокотемпературное покрытие можно определить как металлический, керамический или комбинированный слой, способный предотвратить или замедлить прямое взаимодействие поверхности изделия с потенциально агрессивной окружающей

средой. Это не просто защитные барьеры, их свойства обеспечиваются больше за счет взаимодействия материала покрытия с кислородом из окружающей среды и образования плотных оксидных пленок, которые имеют хорошее сцепление с защищаемой поверхностью, что замедляет диффузию агрессивных веществ в подложку. Поэтому покрытия обычно имеют высокое содержание металлов, способных образовывать защитные оксидные пленки, таких как Al, Cr, Si.

Покрытия, применяемые для лопаток турбин можно разделить на две основных категории: металлические покрытия и теплозащитные керамические покрытия.

Теплозащитные керамические покрытия применяются для обеспечения уменьшения теплового потока в детали за счет уменьшенной теплопроводности защитного слоя. Применение таких покрытий существенно увеличивает долговечность лопаток, однако является в случае рабочих лопаток турбин весьма дорогостоящим.

Металлические покрытия защищают основной металл лопатки от окисления и коррозии и используются как главный способ обеспечения работоспособности лопаток в агрессивной рабочей среде. Особенно такая защита актуальна в случае турбин наземного применения, в двигателях для морских судов. Известен опыт компании GE, которая провела испытания двигателя LM2500 в морском применении. Было выявлено беспрецедентное ухудшение характеристик из-за солевой коррозии лопаток турбины, что потребовало разработки нового специализированного покрытия. На рис. 1 показаны результаты исследований [4] влияния наличия покрытия на ресурс лопатки, работающей в агрессивных условиях с высоким содержанием хлорида натрия.

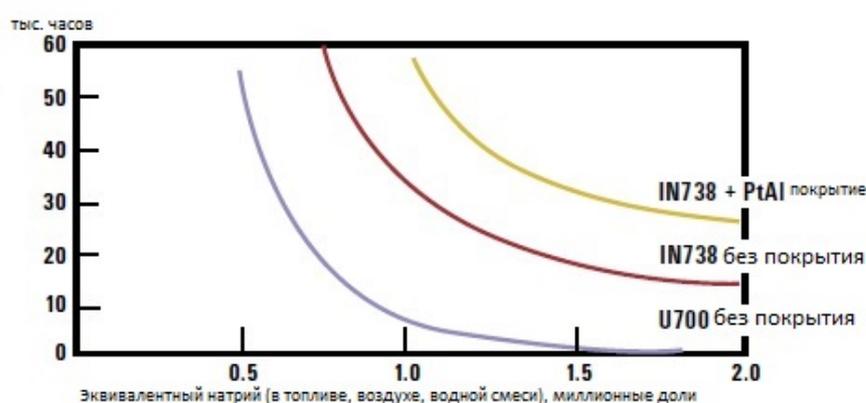


Рис. 1. Влияние содержания хлорида натрия на ресурс лопатки турбины при температуре 870°C

Главное требование, предъявляемое к защитному покрытию, заключается в обеспечении высокой коррозионной стойкости, намного превосходящей стойкость

материала лопатки. На рис. 2 [5] схематично показано, как происходит удлинение рабочего ресурса лопатки с покрытием по сравнению с ее ресурсом без покрытия. Покрытие тем эффективнее, чем большее увеличение ресурса лопатки оно обеспечивает. Наиболее стойкие покрытия должны защищать лопатку от коррозии в течение нескольких десятков тысяч часов.

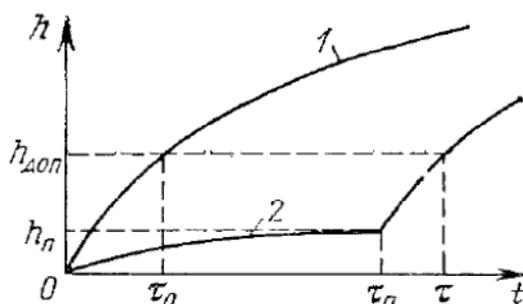


Рис. 2. Зависимость глубины коррозии лопатки газовой турбины от времени эксплуатации без покрытия (1) и с покрытием (2)

В дополнение к коррозионной стойкости покрытие также должно обладать рядом других свойств: высокие прочностные и пластические свойства при статических, циклических и термических нагрузках в условиях агрессивной среды, эрозионная стойкость, хорошее сцепление с поверхностью лопатки, термическая стабильность химического состава и структуры, отсутствие дефектов, экономичность процесса нанесения покрытия. В зависимости от конкретных условий эксплуатации и защищаемого сплава покрытие выбирается на основе компромисса между указанными факторами.

Оценка долговечности покрытия производится на основе результатов лабораторных испытаний и испытаний на газодинамических стендах. Ресурс покрытия определяется его способностью защищать подложку от коррозии, формировать, сохранять и обновлять оксидную пленку на своей поверхности. В качестве характерного параметра строят зависимости удельной потери массы сплава от времени.

3.2. Основные виды и методы нанесения покрытий.

Существует два основных метода, которыми осуществляется повышение сопротивляемости коррозионному разрушению поверхностных слоев деталей: диффузионный и конденсационный.

Диффузионный метод осуществляется за счет процесса изменения поверхностных слоев сплава при их взаимодействии с некоторыми химическими веществами. Широкое распространение получило диффузионное насыщение поверхностных слоев подложки алюминием методом твердофазного насыщения из засыпок. Обрабатываемая деталь помещается в контейнер со смесью реагентов, производящих необходимые пары. Смесь содержит алюминий, галоидные соединения (химический активатор) и наполнитель, например, оксид алюминия. При нагреве металлический порошок вступает в реакцию с активатором и образует пары, которые, взаимодействуя с поверхностью детали, обогащают ее алюминием. В сплавах на основе никеля необходимо образование фаз Ni_3Al , $NiAl$ или Ni_2Al_3 , в кобальтовых и железных сплавах образуются $CoAl$, $FeAl_2$. Процесс управляется качественным и количественным составом засыпок и температурой, а также временем выдержки и последующей термообработкой детали.

Одна из разновидностей диффузионных покрытий - покрытия на основе соединения платины и алюминия ($PtAl$). Это тонкое покрытие наносится гальваническим методом на поверхность пера лопатки. Затем, в результате диффузии, образуется никелево-алюминиевое покрытие с платиной в виде твердого раствора или в форме $PtAl_2$ у поверхности. Присутствие платины в покрытии повышает активность алюминия, позволяя сформироваться защитному соединению Al_2O_3 на поверхности лопатки. Такое покрытие гораздо лучше противостоит горячей коррозии, чем просто алюминидное покрытие. Примером подобного покрытия может служить покрытие MDC-152L ("Howmet Research Corporation", США). [6]

В области диффузионных методов также существует метод химического осаждения из паровой фазы, который является более современным. Этот способ отличается высокой технологичностью, простотой исполнения, возможностью получать многокомпонентные покрытия на наружной и внутренней поверхностях лопатки одновременно, экологической безопасностью процесса. Описанные методы могут применяться и для осаждения других элементов, таких как хром и кремний.

Конденсационный метод заключается в нанесении на поверхность подложки слоя материала с заранее заданным составом, обеспечивающим образование защитной оксидной пленки, имеющей хорошее сцепление с поверхностью. В данном случае взаимная диффузия нужна лишь для обеспечения наложения покрытия на металл лопатки. Конденсационный метод обладает высокой экономической эффективностью, и позволяет увеличивать толщину слоя, что улучшает защитные свойства. Адгезия покрытий в этом

методе обеспечивается гораздо более слабой взаимной диффузией элементов. Конденсационный метод наиболее часто реализуется при помощи плазменного напыления или электронно-лучевого осаждения из паровой фазы. [1]

Однако конденсационный метод обладает рядом существенных недостатков: он не позволяет покрывать внутренние полости деталей, не позволяет выдержать равномерную толщину покрытия (особенно в случае сложной геометрической формы детали).

Примером конденсационного, или как его еще называют, оверлейного покрытия могут служить покрытия на основе сплавов системы (Ni,Co)-Al-Cr-Y. Они формируются за счет осаждения на поверхность лопаток специальных сплавов, обладающих высоким сопротивлением горячей коррозии. К достоинствам данного покрытия относится возможность применения более сложных коррозионностойких составов, так как состав покрытия не ограничен составом материала лопатки, а также его толщина не ограничена технологией процесса нанесения. Примером таких покрытий являются покрытия серии PLASMAGUARD™, разработанные “General Electric Corporation” (США) [4] применяемыми для лопаток первой ступени газовой турбины. К этой серии относятся, например, покрытия GT-29 IN-PLUS™ и GT-33 IN-PLUS™, разработанные для охлаждаемых лопаток.

Еще одна разновидность оверлейных покрытий – покрытия на основе кремния типа NiCrSi. Кремний также используется в качестве верхнего слоя в многослойных покрытиях, обеспечивая лучшую стойкость по отношению к горячей коррозии.

Сравнивая диффузионные и конденсационные покрытия можно заметить, что в то время как диффузионные алюминидные покрытия оказываются не всегда достаточно стойкими к окислению, конденсационные покрытия более чувствительны к термоусталостному растрескиванию в условиях циклических нагрузок.

В современном газотурбостроении все чаще используются многослойные покрытия, в которых разные слои могут выполнять разные функции: защита от газовой коррозии, теплозащита, жаростойкость. [7] В ВИАМ были разработаны многослойные конденсационно-диффузионные покрытия системы Ni-Al-Cr, модифицированные Ta, W, Hf, Si, Y, обеспечивающие защиту жаропрочных сплавов при особенно повышенных температурах 1150-1200°C. [8] В них используется внутренний пластичный конденсированный слой с низким содержанием алюминия и хрома и внешний диффузионный алюминидный слой. Специальное легирование внешнего алюминидного слоя позволяет повысить коррозионную стойкость таких покрытий в средах Na₂SO₄ и Na₂SO₄+NaCl более чем в 2-3 раза по сравнению с известными коррозионностойкими конденсационными покрытиями систем Ni-Co-Cr-Al-Y и Co(Ni)-Cr-Al-Y. Примером

такого комбинированного покрытия может служить покрытие типа СДП-1-ВСДП-22, имеющее значительные преимущества по коррозионной стойкости. Испытания показали, что стойкость легированных покрытий системы Ni-Co-Cr-Al-Y+Ni-Al-Si в среде, насыщенной Na₂SO₄ превышает 1600 ч., в то время как долговечность однослойного покрытия СДП-1 (Ni-Co-Cr-Al-Y покрытие) в тех же условиях составила лишь 50-80 часов. Испытания проводились для жаропрочного сплава ЖС6У. Двухслойные покрытия имеют высокую жаростойкость и могут использоваться для защиты лопаток турбин взамен конденсационных покрытий из сплавов систем Ni-Co-Cr-Al-Y (СДП-1), Co-Cr-Al-Y (СДП-3), Co-Ni-Cr-Al-Y (СДП-6). Оригинальный ионно-плазменный процесс нанесения многокомпонентных покрытий на лопатки турбин был разработан в ВИАМ. [9]

Еще один вариант покрытий – теплозащитные, состоящие из металлического и керамического слоев. Металлический слой является связующим между металлом лопатки и керамическим покрытием. Теплозащитные покрытия значительно уменьшают тепловой поток от газа к металлу лопатки, благодаря низкому коэффициенту теплопроводности. Керамический слой также выполняет функцию защиты от эрозии и коррозии.

Ведущим направлением в области разработок мер по защите от коррозии лопаток ГТУ является применение новейших интерметаллидных сплавов. В ВИАМ был создан новый класс литейных конструкционных материалов на основе интерметаллида никеля Ni₃Al серии ВКНА. [10] Интерметаллидные сплавы обладают высокой жаростойкостью, низкой плотностью, высоким сопротивлением газовой коррозии при высоких температурах, что делает их применение при изготовлении деталей горячего тракта газовой турбины очень перспективным.

Заключение

Из рассмотренных методов защиты лопаток турбин следует, что решение проблемы защиты от коррозии не имеет однозначного ответа. Необходим комплексный подход и индивидуальное изучение коррозионного поведения деталей в условиях их эксплуатации. Наиболее перспективным является применение многослойных покрытий, проявляющих хорошие антикоррозионные свойства в агрессивных условиях среды.

Список литературы

1. Честер Т.Симс, Норман С.Столов, Виллиам С.Хагел. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. В 2-х кн. Кн. 2: пер. с англ. / под ред. Р.Е. Шалина М.: Металлургия. 1995, 384 с. [Chester T.Sims, Norman S.Stoloff, William C.Hagel. Superalloys II. John Wiley&sons, 1987, 384p.]

2. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. В 3 т. Т. 2. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства. М.: Машиностроение, 2008. 365 с.
3. Sato J., Omori T., Oikawa K., Ohnuma I., Kainuma R., Ishida K. Cobalt-Base High-Temperature Alloys // Science. 2006. Vol. 312. No. 5770. P. 90-91. DOI: 10.1126/science.1121738.
4. Schilke P.W. Advanced gas turbine materials and coatings. Режим доступа: http://site.geenergy.com/prod_serv/products/tech_docs/en/downloads/ger3569g.pdf (дата обращения 05.11.2014).
5. Никитин В.И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин. М.: Машиностроение. 1987. 272 с.
6. Сычев В. Достижения металлургии на службе ресурса ГТУ. Режим доступа: http://www.avid.ru/pr/other/ntex/ib10/ib10_20-21/ (дата обращения 05.11.2014).
7. Будиновский С.А., Мубояджан С.А., Косьмин А.А. Ионно-плазменные покрытия для защиты лопаток промышленных турбин от сульфидно-оксидной коррозии. Режим доступа: <http://viam.ru/public/files/2009/2009-205436.pdf> (дата обращения 05.11.2014).
8. Будиновский С.А., Мубояджан С.А. Конденсированные и конденсационно-диффузионные покрытия для лопаток турбин из жаропрочных сплавов с направленной кристаллической структурой. Режим доступа: <http://viam.ru/public/files/1995/1995-201963.pdf> (дата обращения 05.11.2014).
9. Каблов Е.Н., Мубояджан С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей. Режим доступа: <http://viam.ru/public/files/2007/2007-204852.pdf> (дата обращения 05.11.2014).
10. Аргинбаева Э.Г., Базылева О.А., Туренко Е.И.. Интерметаллидные сплавы на основе Ni₃Al. Режим доступа: <http://viam.ru/public/files/2011/2011-205925.pdf> (дата обращения 05.11.2014).