

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ Ni-Cr-Al-Y

О.А. Быценко¹⁾, В.А. Панов¹⁾, Е.В. Филонова²⁾, А.Б. Марков³⁾, А.Н. Раевских²⁾

¹⁾Московское машиностроительное предприятие имени В.В. Чернышева,
ул. Вишневая 7, 125362 Москва, Россия, oksivear@yandex.ru

²⁾Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов,
ул. Радио 17, 105005 Москва, Россия, evfilonova@mail.ru

³⁾Институт сильноточной электроники СО РАН,
Академический пр. 2/3, 634055 Томск, Россия, almar@lve.hcei.tsc.ru

Проведены исследования физико-химического и структурно-фазового состояний методами оптической и аналитической электронной микроскопии поверхностного слоя до и после испытаний на сопротивление сульфидно-оксидной коррозии образцов с ионно-плазменным покрытием после модифицирования, а также в исходном состоянии. Аналогичный спектр металлофизических методов исследования был задействован для образцов после термоэкспонирования на воздухе при 1000°C. Установлено, что модифицирование поверхностного ионно-плазменного покрытия СДП2+ВСДП16 при помощи сильноточных импульсных электронных пучков позволило повысить эксплуатационные характеристики такие, как жаростойкость в 2.7 раза, а сопротивление сульфидно-оксидной коррозии в 2.5 раза.

Введение

Надежность работы авиационных ГТД в значительной степени зависит от надежности работы лопаток турбины, которые являются наиболее нагруженными деталями, так как подвергаются действию статических, динамических, циклических нагрузок, а также испытывают циклические термические напряжения. Они работают в условиях агрессивной газовой среды при высокой температуре и подвергаются газовой коррозии, включая и сульфидно-оксидную коррозию (СОК) [1].

Одно из решений проблемы повышения сопротивления сульфидно-оксидной коррозии заключается в нанесении защитных ионно-плазменных покрытий Ni-Cr-Al-Y. Однако наличие технологических дефектов, образовавшихся при нанесении покрытия (наличие микрокапельной фракции, низкой местной адгезии, и неоднородность распределения фазовых составляющих по поверхности и глубине, а также высокая шероховатость покрытия) в процессе эксплуатации могут привести к снижению жаростойкости покрытия, а также его сопротивлению сульфидно-оксидной коррозии и требуют мероприятий для их нивелирования [2, 3].

На основании проведенных ранее исследований [4] и исходя из обоснованного практического интереса были проведены исследования жаростойкости покрытия в условиях термоэкспозиции на воздухе при температуре 1000°C и влияния СОК при 800°C на поверхностные слои покрытия СДП2+ВСДП16 до и после облучения с помощью сильноточных импульсных электронных пучков (СИЭП). Условия экспериментов были выбраны исходя из рабочих температур и условий эксплуатации рабочих лопаток современных ГТД пятого поколения. Целью данной работы было проведение исследования влияния на сопротивление СОК до и после модифицирования на поверхностный и приповерхностные слои конденсированных ионно-плазменных покрытий Ni-Cr-Al-Y.

Материалы и методики исследования

В качестве объектов исследования были использованы образцы из жаропрочного никелевого сплава ЖС32-моно с нанесенным по серийной технологии конденсированным ионно-плазменным многокомпонентным покрытием СДП-2+ВСДП-16 без модифицирования и с последующим модифицированием СИЭП [3].

Облучение СИЭП проводили на комплексной автоматизированной электронно-пучковой установке «РИТМ-СП» по режиму: энергия электронов $E=20$ кэВ, число импульсов $N=10$ с последующей термообработкой при температуре 1000°C в течение 2 ч в вакууме.

Испытания на сопротивление СОК были проведены в соответствии с ПИ 1.2А-503-98. Режим испытаний – циклический: нанесение на горячую поверхность образцов солевой корки напылением раствора солей $\text{Na}_2\text{SO}_4+\text{NaCl}$; выдержка при заданной температуре 800°C в течение 1 ч; охлаждение на воздухе. Общая продолжительность испытаний – 10 циклов. Оценка стойкости покрытия до и после облучения к СОК проводилась гравиметрическим методом на аналитических весах с точностью $\pm 0,0002$ г. Для определения кинетики процесса СОК взвешивание образцов проводили через 1, 5 и 10 циклов испытаний.

Термоэкспонирование образцов с покрытием до и после облучения при температуре 1000 °C проводилось на воздухе в муфельной печи Nabertherm №7/H. Состояние поверхностного слоя оценивали после 6.5, 13.5, 18.5, 28.5, 50, 70 и 150 ч.

Состояние поверхности исследовали с применением лазерного конфокального микроскопа LEXT OLS 3100 с последующей обработкой полученных изображений с помощью программного обеспечения.

Исследование микроструктуры покрытия проводили с применением оптического микроскопа Leica DM IRM и растрового электронного микроскопа VERIOS 460 с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором Oxford X-Max^N 80T.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Испытание на сопротивление СОК было проведено на образцах с покрытием, нанесенным по серийной технологии до и после облучения, а также на образцах, имеющих на поверхности после облучения различные виды кратеров (многокольцевые, смежные и забоинообразные кратеры), а также трещины.

Немодифицированное покрытие после 1 цикла испытаний практически не отличается от исходного: покрытие однородное с единичными частицами капельной фазы. После 5 циклов на поверхности образцов наблюдаются отдельные места с коррозией - на поверхности наблюдаются пятна зеленого цвета. Далее, после 10 циклов испытаний, размер пятен и их количество заметно прогрессирует (рис. 1а).

После 5 циклов испытаний покрытие на образце с модифицированием без дефектов после проведения облучения с помощью СИЭП становится матовым, очагов коррозионного поражения на поверхности образца не наблюдается. Даже после 10 циклов на данном образце на покрытии нет язв от коррозии, а поверхность образца равномерно изменила цвет (нет первоначального блеска) (рис. 1б).

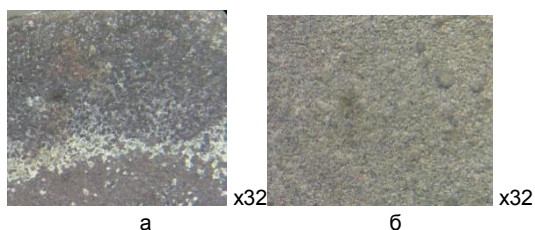


Рис. 1. Вид поверхности образцов после 10 циклов испытаний: а - в исходном состоянии; б - с модифицированием

При исследовании поверхности после испытания на сопротивление СОК с помощью методов растровой электронной микроскопии и рентгено-спектрального микроанализа было установлено, что забоинообразные кратеры в условиях сульфидно-оксидной коррозии всегда являются очагами зарождения коррозии. Однако другие виды кратеров, а именно, круглые кратеры с вогнутостью в центре и смежные (как результат затвердевания волнистого микрорельефа поверхности) кратеры круглой формы с выпуклостью в центре (выброс расплавленной капли в материала в вакуум на начальной стадии действия импульса с последующим ее возвращением на расплавленную поверхность) могут являться очагами коррозионных повреждений при СОК в случае отсутствия или недостаточного количества в микрообъеме кратера таких элементов как Cr, Al и Ni.

В процессе исследования микроструктуры образцов, имеющих дефекты, также было обнаружено, что образцы, имеющие отдельные трещины на поверхности после модифицирования, не получили своего развития в процессе проведения испытания на СОК.

Анализируя данные исследований, проведенных методами оптической и растровой электронной микроскопии, можно сделать следующие выводы, что модифицирование СИЭП поверхностного слоя покрытия СДП 2+ВСДП 16 по выбранному режиму позволило значительно повысить сопротивление сульфидно-оксидной коррозии: коррозионное поражение слоя без облучения увеличилось с 6.0 мкм до 25.0 мкм (при 5-ти циклах), а коррозионное поражение модифицированного слоя при этих же 5 циклах - 1.0 мкм и 10 мкм при 10 циклах, т.е. практически в 2.5 раза (рис. 2).

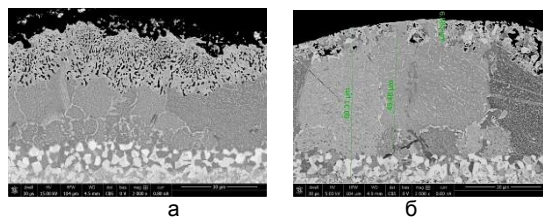


Рис. 2. Микроструктура покрытия после проведения испытаний на СОК после 10 циклов: а - без модифицирования; б - модифицированное покрытие

После термоэкспонирования при 1000°C на воздухе образцы с исходным покрытием после 6.5 ч имеют зеленый цвет, что косвенно свидетельствует об интенсивно происходящих процессах, а именно повышение активности соединений хрома с выходом на поверхность образцов и, как следствие, обеднение приповерхностных слоев хромом. В свою очередь, поверхность образцов, имеющих модифицированный слой после малых выдержек (6.5, 13.5, 18.5, 28.5), имеет серый цвет с желтым оттенком, а при более длительном экспонировании (50 и 70 ч) поверхность образцов имеет светло-коричневый оттенок, что соответствует цветам побежалости поверхности лопаток после эксплуатации при температурах, не вызывающих необратимых процессов в поверхностном слое (рис. 3).

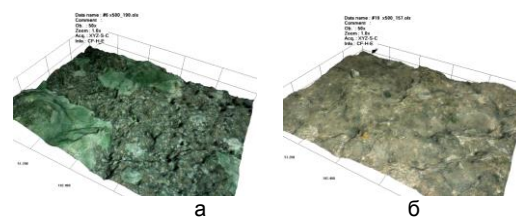


Рис. 3. Поверхность после термоэкспонирования при температуре 1000°C, 50 ч на воздухе при исследовании методом конфокальной лазерной микроскопии: а - без модифицирования; б - с модифицированием

При последующем термоэкспонировании (вплоть до 150 ч) при температуре 1000 °C на воздухе было уставлено при визуальном контроле, что поверхность образцов без модифицирования имеет темно-зеленый цвет, а модифицированные образцы имеют коричневый оттенок. Исследования поперечных образцов с помощью РЭМ показали, что наличие модифицированного

слоя на поверхности образца позволило сохранить покрытие, толщина которого составляла до испытаний 55 мкм, а после испытаний 52 мкм. Толщина покрытия образца без модифицирования до испытания составляла 53 мкм, а после - 19 мкм, т.е. защитное покрытие в условиях термоэкспонирования на воздухе при температуре 1000°C уменьшилось на 65 %, в покрытие с модифицированием лишь на 5%. Более того, следует заметить, что значительные изменения произошли и в распределение элементного состава покрытия по глубине: в образцах с модифицированным покрытием наблюдается равномерное распределение таких элементов как Cr, Ni и Al в поверхностном модифицированном слое глубиной 4.49 мкм как до, так и после исследования на жаростойкость. В образцах без модифицирования после проведения исследования жаростойкости при термоэкспонировании наблюдается значительное снижение алюминия в поверхностном слое, а также наличие большего числа окислов хрома в поверхностном слое оставшегося покрытия. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что модифицирование поверхности позволило сохранить ионно-плазменное покрытие при окислении на воздухе при температуре 1000°C, сохранив равномерный элементный состав в модифицированном слое, а также условно увеличив жаростойкость покрытия почти в 2.7 раза.

Заключение

Подводя итоги проделанной работы можно сделать следующие выводы:

Модифицирование СИЭП поверхностного слоя покрытия СДП 2+ВСДП 16 по выбранному режиму позволило значительно повысить сопротивление сульфидно-окисидной коррозии (в 2.5 раза).

Модифицирование поверхности также позволило сохранить ионно-плазменное покрытие при окислении на воздухе при температуре 1000°C, сохранив равномерный элементный состав в модифицированном слое, а также условно увеличив жаростойкость покрытия почти в 2.7 раза.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Проект №14-08-97046 - р_поволжье_а, Министерства образования и науки РФ)

Список литературы

- 1.Новиков А.С., Пайкин А.Г., Львов А.Ф., Шулов В.А. Перспективные технологии поверхностной обработки при изготовлении и ремонте лопаток ГТД // Двигатель, 2004.Т. 32. №2. С. 18-19.
- 2.Пайкин А.Г., Крайников А.В. и др. Технологические основы модифицирования поверхности деталей из жаропрочных никелевых сплавов с жаростойким NiCrAlY покрытием с применением сверхточных импульсных электронных пучков // Физика и химия обработки материалов. 2008. №3. С. 56-60.
- 3.Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быценко О.А., Теряев Д.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. Разработка электронно-лучевого технологического процесса восстановления свойств лопаток турбины ГТД из сплава ЖС26НК с жаростойким покрытием NiCrAlY // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. №3. С. 34-38.
- 4.Быценко О.А., Филонова Е.В., Марков А.Б., Белова Н.А. Влияние облучения сверхточными электронными пучками на поверхностные слои современных жаропрочных никелевых сплавов с ионно-плазменными покрытиями различного состава //Труды ВИАМ. Электрон. журнал 2016. № 6 (42). Ст. 10. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.04.2017). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-6-10-10.
- 5.Исходжанова И.В., Орлов М.Р., Григоренко В.Б., Лаптева М.А. Применение метода конфокальной лазерной сканирующей микроскопии для исследования коррозионных повреждений //Труды ВИАМ. Электрон. Журнал. 2015. №4. Ст.11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 17.02.2017).

INFLUENCE OF IRRADIATION HIGH CURRENT ELECTRONIC BEAMS ON OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF ION-PLASMA COATING NI-CR-AL-Y

O.A. Bytsenko¹), V.A. Panov¹), E.V. Filonova²), A.B. Markov³), A.N. Raevskikh²)

¹)Chernyshev Machine Building Enterprise,

7 Vishnevaya Street, 123362 Moscow, Russia, oksiwear@yandex.ru

²)All-Russian Research Institute of Aviation Materials

17 Radio str., 105005 Moscow, Russia, evfilonova@mail.ru

³)Institute of High Current Electronics SB RAS,

2/3 Academic ave., 634055 Tomsk, Russia, almar@lve.hcei.tsc.ru

Studies on physico-chemical and structural-phase states of surface optical methods and analytical electron microscopy of surface layer before and after tests on resistance to sulfide oxide corrosion samples with ion-plasma coating after inoculation, as well as in its original state. A similar range of metalphysical methods of research on has been tapped for samples after thermoelectroexhibiting on air at 1000°C. Found that modifying the surface of ion-plasma coating SDP2 + VSDP16 using high-current pulsed electron beams improved performance characteristics such as heat resistance in 2,7 times, and resistance to sulfide-oxide corrosion in 2, 5 times.