

УДК 621.793

С. Р. ШЕХТМАН, Н. А. СУХОВА, О. В. ГОЛУБЕВ

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ НА ОСНОВЕ РАЗРЯДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА ПОЛОГО КАТОДА

Рассматривается создание многофункциональных вакуумных ионно-плазменных покрытий для специальных поверхностей. Приведены экспериментальные зависимости для покрытий системы Al-Si-Y. Ионно-плазменные покрытия; полый катод; технология.

Использование новых ионно-плазменных технологий в первую очередь целесообразно для создания специальных поверхностей на лопатках компрессора и лопатках турбин. Одним из перспективных способов обеспечения эксплуатационных свойств является создание на поверхностях лопаток многослойных многофункциональных покрытий.

В общем случае поверхность лопаток турбины может включать в себя следующие слои:

- теплоизоляционный керамический слой толщиной 100–150 мкм;
- металлический слой толщиной 5–10 мкм;
- диффузионный жаростойкий слой толщиной 50–100 мкм;
- барьерный слой, препятствующий диффузионному обмену между основой и покрытием.

Существующие в настоящее время ионно-плазменные методы и промышленные установки лишь частично позволяют обеспечивать те или иные свойства.

Для создания новых технологий ионно-плазменной обработки лопаток турбины и лопаток компрессора ГТД необходимо учитывать следующее [1]:

- ионное распыление поверхности позволяет удалить дефектный поверхностный слой толщиной 5–20 мкм, появляющийся в результате предшествующих операций;
- за счет низкоэнергетических процессов необходимо формировать переходную зону, повышающую адгезию покрытия;
- необходим предварительный нагрев в вакууме обрабатываемых поверхностей до температур 400–500°С.

Способ обработки поверхности с использованием разряда на основе эффекта полого катода позволяет объединить все перечисленные выше требования.

Сущность метода заключается в том, что с помощью специального экрана, в виде сетки, между обрабатываемой поверхностью и экраном формируется плазма с повышенной концентрацией заряженных частиц. Поверхность детали непосредственно становится поверхностью полого катода, что приводит к образованию вблизи обрабатываемой

поверхности структуры из плазмы и слоя пространственного заряда между обрабатываемой поверхностью и границей плазмы. В катодной полости, образованной поверхностью детали и экраном, увеличивается генерация заряженных частиц осциллирующими электронами, возрастает число ионов, бомбардирующих поверхность, и скорость распыления обрабатываемой поверхности. При размере ячейки сетки $a < a_{кр}$ прикатодные области перекрывают расстояние между ячейками и отражают быстрые осциллирующие электроны, что увеличивает концентрацию заряженных частиц [2–5].

Бомбардировка ускоренными ионами подложки и поверхности, наблюдаемая при обработке поверхности на основе эффекта полого катода растущей пленки, сопровождается развитием целого ряда физических явлений (распыление, образование точечных и линейных несовершенств кристаллической решетки, ускорение диффузии, локальный нагрев), которые вызывают изменение в структуре и свойствах пленок по сравнению с пленками, формирующимися без использования эффекта.

Бомбардировка поверхности подложки с использованием эффекта полого катода удаляет поверхностный слой, осуществляет эффективную очистку поверхности и поддерживает ее чистой до момента осаждения покрытий. Ионная бомбардировка активизирует подложку, способствуя зародышеобразованию на первом этапе формирования покрытия. Обработка ионами поверхности растущего покрытия нарушает направленность столбчатых кристаллов. Это проявляется в образовании равновесной мелкозернистой структуры.

Принцип действия установки для нанесения защитных покрытий (рис.) основан на конденсации покрытия в вакууме из плазменного потока. Материал покрытия переводится в плазменное состояние за счет горения вакуумной дуги между катодом, изготовленным из материала наносимого покрытия, и анодом установки.

Для подтверждения преимуществ предлагаемого метода обработки с использованием разряда на основе эффекта полого катода были проведены испытания на долговечность и жаростойкость, которые являются основными эксплуата-

ционными характеристиками для лопаток турбин ГТД. Результаты испытаний образцов из материала ЖС6У с покрытием Al-Si-Y, осажденным с использованием разряда на основе эффекта полого катода, показали, что наблюдается увеличение на 21% долговечности при температуре 975°C при постоянной нагрузке 260 МПа по сравнению с базовой технологией осаждения покрытий. Толщина покрытий на образцах к испытаниям на долговечность составляла в обоих случаях 40–50 мкм.

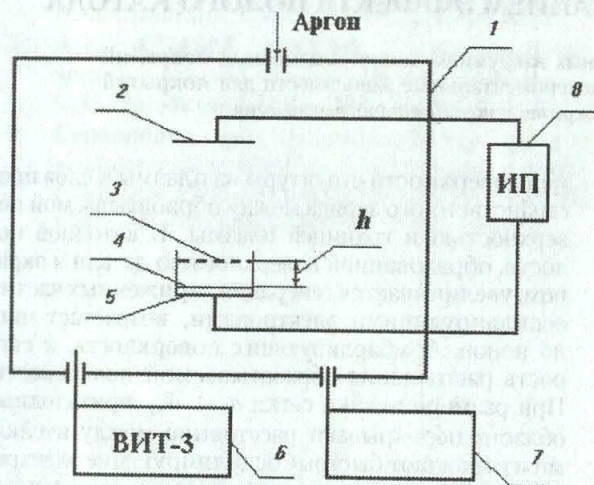


Схема установки МАП-1, модернизированной для нанесения многокомпонентных покрытий: 1 — вакуумная камера; 2 — анод; 3 — экран; 4 — обрабатываемая деталь; 5 — катод; 6 — вакуумметр; 7 — источник питания; 8 — источник питания тлеющего разряда

Основной вклад в повышение прочности материала покрытия вносит фаза NiAl и γ' -Ni₃Al. Данные фазового анализа показывают, что образцы из материала ЖС6У с покрытием Al-Si-Y, осажденным с использованием разряда на основе эффекта полого катода в поверхностном слое по отношению к покрытию, напыленному по базовой технологии (технология, предложенная ВИАМом), имеют меньшее содержание алюминия. В покрытии Al-Si-Y наблюдается соединение фаз NiAl и Ni₃Al в диффузионном слое, и по этой причине покрытие обладает более высокой прочностью и пластичностью, значительно ее сопротивляемость образованию трещин.

Температура, при которой покрытие переходит из хрупкого (область хрупкого разрушения, в которой трещины возникают после упругой деформации) в пластичное состояние, зависит от объемной доли NiAl в нем, следовательно, от максимального содержания алюминия в покрытии и от концентрации легирующих элементов в нем. В покрытии на основе эффекта полого катода содержание алюминия и объемной доли NiAl меньше, чем в покрытии, напыленном по технологии ВПТВЭ.

Мелкооблочная структура покрытия приводит к повышению долговечности. Можно предположить, что причиной этого является увеличение

длины и искривленности, по которой распространяется трещина в материал с мелкозернистой структурой.

Повышение долговечности предполагается также вследствие образования более пластичного поверхностного слоя, препятствующего растрескиванию поверхностного слоя.

Также были проведены испытания на пластичность. Образцы были изготовлены в виде тонких пластин размером 50×10×1 мм. На них осаждалось конденсированное покрытие Ni-Cr-Al-Y и диффузионное покрытие Al-Si-Y по типовой технологии и по предлагаемой в данной работе технологии. Затем образцы подвергались изгибам под углом 90° на оправе радиусом 4...5 мм.

Покрытие на образцах, напыленных без экрана, после первого же изгиба отслоилось, а образцы, обработанные с использованием эффекта полого катода, сохраняли целостность покрытий вплоть до разрушения основного материала. Нанесение покрытия с использованием эффекта полого катода позволило значительно повысить пластичность.

Результаты испытаний образцов из материала ЖС6У с покрытием Al-Si-Y, осажденным с использованием разряда на основе эффекта полого катода, показали, что наблюдается увеличение жаростойкости на 30% по сравнению с базовой технологией осаждения покрытий. Толщина покрытий на образцах к испытаниям на жаростойкость составляла в обоих случаях 40–50 мкм.

Повышение жаростойкости предполагается за счет формирования стабильной β -NiAl-фазы в покрытии Al-Si-Y, осажденном с использованием разряда на основе эффекта полого катода. Фаза β -NiAl обладает сравнительно высокими защитными свойствами.

Введение частиц оксида алюминия (Al₂O₃) в покрытие (что подтверждается исследованиями на электронном микроскопе с приставкой для микроанализа «LINK») обеспечивает повышение жаростойкости за счет снижения скорости проникновения ионов кислорода и торможения диффузии атомов металла покрытия при окислении. Барьерные слои частиц оксида алюминия увеличивают жаростойкость. Хорошее сопротивление материала высокотемпературной коррозии обеспечивается стабильными оксидными пленками Cr₂O₃, Al₂O₃, SiO₂, которые, растворяясь в γ -фазе, повышают жаростойкость покрытия.

Элементный анализ показал, что при базовом ТП во всех зонах покрытия, как в диффузионной, так и в верхних частях покрытия, обнаруживается большое содержание тугоплавких элементов, таких, как Cr, W. Во внутренней зоне покрытия, осажденного по предлагаемой технологии (с использованием разряда на основе эффекта полого катода), отмечается несколько более высокое содержание Ni (на 8–10%) по сравнению с базовым при приблизительно одинаковом содержании алюминия, что свидетельствует об образовании во внутренней зоне (диффузионном слое) покрытия большего количества упрочняющей фазы (Ni₃Al), которая образует как бы «сшивание» материала

сплава с материалом покрытия, кроме того, создает упрочненный «барьерный» слой, препятствуя распространению трещин.

Повышенное содержание Мо затрудняет процесс диффузии более крупных выделений карбидных фаз, повышает технологическую пластичность. Повышенное содержание W, наблюдаемое при напылении покрытий с использованием разряда на основе ЭПК, благоприятно сказывается на стабильности покрытия. В покрытии, осажденном с использованием разряда на основе ЭПК, наблюдается снижение содержания Ti как в поверхностном, так и в диффузионном слое. Наличие в покрытии оксидов Ti отрицательно влияет на равномерность оксидной пленки и на ее прочность. Содержание Со несколько повышает жаропрочность сплава и технологическую пластичность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е. Н., Мубояджян С. А., Сулима А. М. и др. Перспективы применения ионной обработки в авиадвигателестроении // Авиационная промышленность. 1992. № 9. С. 9–12.
2. Братухин А. Г., Язов Г. К., Карасев Б. Е. Современные технологии в производстве газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1997. 416 с.
3. Пат. 2096493 А (РФ). МКП 6, С23С 14/02. Способ обработки поверхности / В. В. Будилов, С. Р. Шехтман, Р. М. Киреев. Оpubл. 20.11.1997. Бюл. №32.
4. Пат. 2075538 А (РФ). МКП 6, С23С 14/34. Устройство для нанесения вакуумно-плазменных покрытий / В. В. Будилов, С. Р. Шехтман, Р. М. Киреев. Оpubл. 20.03.1997. Бюл. № 8.
5. Пат. 2101383 А (РФ). МКП 6, С23С 14/34. Способ катодного распыления / В. В. Будилов, С. Р. Шехтман, Р. М. Киреев. Оpubл. 10.01.1998. Бюл. № 1.

ОБ АВТОРАХ



Шехтман Семен Романович, нач. отд. организации учебного процесса УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УГАТУ, 1993). Канд. техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1999). Исследования в области вакуумных ионно-плазменных технологий.



Сухова Надежда Александровна, асп. каф. технологии машиностроения. Дипл. инж.-механик (УГАТУ, 1995). Исследования в области вакуумных ионно-плазменных методов модифицирования поверхности.



Голубев Олег Вячеславович, зам. декана фак-та АТС УГАТУ. Дипл. инж.-металлург (МИСИС, 1982). Канд. техн. наук по обработке давлением (защ. в ИПСМ, 1999). Исследования в области обработки металлов.

Разнов

СЛОВО О НАУКЕ И ОБРАЗОВАНИИ

Мои дела родились из простого и чистого опыта, который есть истинный учитель.

Леонардо да Винчи.

Всего четыре предмета составили мне имя: периодический закон, исследования упругости газов, понимание растворов как ассоциаций, «Основы химии». Тут все мое богатство. Оно не отнято у кого-нибудь, а произведено мною, это мои дети, и ими, увы, дорожу сильно, столько же, как и детьми. *Д. И. Менделеев.*

Мне не нужно ни лошадей, ни яхт, на все это у меня нет времени. Мне нужна мастерская! *Эдисон.*

Кто хоть раз самостоятельно докопался до истины, тот будет копать и копать. *В. М. Борисов.*

Ученые обычно отличаются излишней чувствительностью и так же легко возбуждаются, как художники и поэты. *Винер.*

Гений есть лишь непрерывное внимание. *Гельвеций.*

Когда ученый говорит вам: «Это конец, ничего больше добавить нельзя», — то это уже не ученый. *Гулд.*

[Слово о науке: Афоризмы. Изречения. Литературные цитаты. Кн. 2. М.: Знание, 1981.]