

# РАЗРАБОТКА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ТЕРМОБАРЬЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК ТУРБИН ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ИХ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И РЕСУРСА

Кожина Т. Д., Сасарин А. М.

ФГБОУ ВПО Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А.Соловьева, г. Рыбинск, Ярославская область, Россия

Объектом исследований в настоящей конкурсной работе являются термобарьерные покрытия лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей, рассматриваются этапы создания различных покрытий лопаток турбин. Приведены результаты изучения характера и последовательности изменения свойств и начала разрушения термобарьерных покрытий в условиях эксплуатации газотурбинного двигателя. На основании анализа требований, предъявляемым к лопаткам турбин современных двигателей новых поколений, сформулированы требования к термобарьерным покрытиям лопаток. Предложены методы увеличения ресурса и защитных свойств термобарьерных покрытий лопаток турбин ГТД применением наноструктурированных термобарьерных покрытий. Рассмотрены методы и оборудование для исследования наноструктурированных термобарьерных покрытий лопаток турбин авиационных газотурбинных двигателей. Предложен оптимальный вариант контроля наноструктур термобарьерных покрытий лопаток турбин ГТД.

Целью исследований является разработка и совершенствование технологий термобарьерных покрытий лопаток турбин в обеспечение повышения технических характеристик и ресурса газотурбинных двигателей.

Современный газотурбинный двигатель является высокотехнологичным оборудованием, в котором применяются различные материалы, повышающие надежность, ресурс, снижающие эксплуатационные расходы. Особенно важной задачей представляется разработка термобарьерных покрытий лопаток турбин для защиты от разрушения и продления их ресурса, а следовательно и самих ГТД, применяющихся в различных отраслях, от авиации до энергетики (газотурбинные установки на компрессорных станциях магистральных газопроводов и др.).

Создание тонких пленок и покрытий на поверхности материала позволяет значительно изменить его свойства, не затрагивая объема, или объединить свойства двух и более материалов. Наноструктурированные покрытия и тонкие пленки наносят с такими целями как:

- повышение термо- и коррозионной устойчивости материалов лопаток;
- создание поглотителей, сепараторов газовых смесей..

В рамках данного направления выполняются работы по разработке наноструктурированных покрытий, созданию эффективной наноструктурной подложки под теплозащитные покрытия, использование микролегирующих элементов, а также формирование покрытия под воздействием высокоэнергетических ионов.

Рабочие лопатки турбины являются наиболее тяжелонагруженными и ответственными деталями ГТД. Последствия разрушения лопаток являются очень тяжелыми для двигателя, вызывая выход ГТД из строя. Лопатки турбины ГТД, работают в критических условиях: высокая температура, окисляющий поток горячих газов, высокие нагрузки. Основным способом защиты лопаток является нанесение теплозащитного покрытия на лопатку, при этом нужно решить главную задачу – правильно подобрать материал, способ нанесения и толщину покрытия.

Повышение рабочих температур газовых турбин делает остро актуальной задачу внедрения новых высокоэффективных термобарьерных покрытий.

Согласно многочисленным исследованиям, слабым звеном термобарьерного покрытия является граница между керамическим слоем и жаростойким подслоем [5]. В

процессе высокотемпературных испытаний или эксплуатации лопаток кислород из окислительной среды (воздух, продукты сгорания топлива) проникает к границе «керамика – подслоя». Его проникновение к поверхности подслоя происходит двумя путями – путем газового переноса через открытую пористость керамического слоя и путем диффузионного перемещения кислородных ионов в решетке диоксида циркония.

Проникновение кислорода через керамический слой приводит к окислению металлического жаростойкого подслоя. На его поверхности образуются оксиды, состав и структура которых зависит от количества поступающего к поверхности кислорода и состава подслоя. Образование и рост оксидов на границе «керамика – подслоя» создает дополнительные напряжения, уменьшает адгезию керамического слоя и в конечном итоге приводит к его скалыванию. После определенного времени эксплуатации при высокой температуре скалывание керамического слоя происходит даже при полном отсутствии напряжений от внешних сил.

Скалывание керамического слоя вызывается напряжениями отрыва, возникающими в нем на выпуклых поверхностях лопаток. Их появление связано с тем, что коэффициент термического расширения керамики значительно меньше коэффициента термического расширения жаропрочного сплава. Максимальных значений напряжения отрыва керамического слоя достигают при охлаждении лопаток.

Из проведенного анализа воздействия на термобарьерное покрытие сформулированы основные разрушающие факторы: рост оксидной пленки (основа оксид алюминия –  $Al_2O_3$ ) на поверхности жаростойкого подслоя; значительное различие коэффициентов термического расширения материалов лопатки и покрытия.

Методы, противодействующие разрушению термобарьерных покрытий турбинных лопаток, следовательно, нужно направить на создание более совершенного жаростойкого подслоя, способного длительное время сохранять свои защитные свойства. Для проведенного выше исследования и описания работы термобарьерного покрытия в реальных условиях работы двигателя, в качестве жаростойкого покрытия (подслоя), был использован состав кобальт-хром алюминидного покрытия ( $CoCrAlY$ ) толщиной 30–50 мкм, а в качестве керамического слоя, наиболее зарекомендовавший себя на протяжении 20-ти лет использования в авиационной промышленности – диоксид циркония ( $ZrO_2$ ), стабилизированный 8% оксида иттрия ( $Y_2O_3$ ), толщиной 60–80 мкм.

Проведенными практическими испытаниями были подтверждены теоретические предположения об основных причинах разрушения термобарьерных покрытий, а также подтверждены основные направления работы по оптимизации технологического процесса их нанесения – создание эффективной наноструктурированной подложки, блокирующей рост оксидного слоя под керамическим теплозащитным покрытием, использование микролегирующих элементов.

Авторами предложен вариант термобарьерного покрытия, которое возможно получить следующим образом: на лопатку турбины, предварительно прошедшую газоциркуляционное алитирование, термовакуумную обработку и пескоструйную обработку, нанести наноструктурированный жаростойкий подслоя системы  $Me-Cr-Al-Y$  ионно-плазменным методом с внедрением легирующих элементов (например -  $Si$ ,  $Cr$ ,  $Hf$ ).

Разработка и применение новых термобарьерных покрытий в настоящее время невозможна без применения новейших методов их исследования и контроля. Высокотехнологичные и высокоточные методы исследований позволяют изучать существующие и вновь разрабатываемые материалы и технологии с новых позиций качества, масштабов измерений, открывать новые пути решения вопросов надежности и качества продукции.

В результате проведенного анализа основных факторов, влияющих на формирование наноструктурированного покрытия, сформулированы требуемые контролируемые параметры и определены основные участки исследуемой лопатки:

Контролю и исследованию подлежат следующие параметры покрытия лопатки турбины ГТД.

1. микроструктура поверхностей слоев покрытия;
2. микроструктура границ слоев;
3. фазовый состав границ слоев покрытия;
4. определение примесей и дефектов в термобарьерном покрытии;
5. поэлементное распределение химического состава по глубине слоев покрытия.

Решением основных задач в области разработки материалов и технологий покрытий является создание принципиально новых покрытий, которые не имели бы недостатков применяемых способов, а по характеристикам превосходили существующие. Основными направлениями в решении данных задач являются: исключение использования хлоридов в качестве переносчиков элементов покрытия при газоциркуляционном алитировании; уменьшение отходов от процесса в десятки-сотни раз; уменьшение потребления электроэнергии; возможность осуществления, как в условиях производства, так и ремонта ГТД; упрощение технологических процессов: возможность их осуществления, как в атмосфере вакуума, аргона, так и воздуха.

Эффективные защитные покрытия должны соответствовать основным требованиям:

1. Высокая жаростойкость в конкретных условиях воздействия газовой среды. Это требование удовлетворяется способностью материала покрытия к образованию тонкой защитной оксидной пленки с хорошей адгезией к металлу и минимальной диффузионной проницаемостью.

2. Высокая фазовая и структурная стабильность защитного покрытия. Покрытие должно обладать низкой скоростью диффузионного взаимодействия с защищенным материалом, быть достаточно инертным, стабильным по толщине в течение всего срока его эксплуатации.

3. Достаточные прочность, вязкость и пластичность слоя покрытия, предотвращающие возможность преждевременного разрушения под действием термомеханических циклических нагрузок.

4. Высокая технологичность, возможность защиты деталей сложной конфигурации, таких как лопатки турбин ГТД.

5. Однородность химического состава и структуры, равномерность по толщине, отсутствие технологических дефектов. Покрытия не должны образовывать хрупких соединений со сплавами в процессе эксплуатации, которые отрицательно сказываются на механических свойствах деталей. Физико-механические характеристики покрытий не должны оказывать неблагоприятного влияния на механические свойства сплавов.

Для традиционных покрытий, имеющих микрокристаллическую структуру указанные комплексы свойств практически не реализуются.

На сегодняшний день указанная выше многофункциональность может быть обеспечена за счет нанокompозитных (НК) покрытий. Особая структура покрытий, позволяет обеспечивать сочетания высоких механических и химических свойств, которые не возможны для покрытий с традиционной поликристаллической или аморфной структурой.

Таким образом, проанализировав существующие и используемые в производстве турбинных лопаток ГТД технологические процессы термобарьерных покрытий, сформулированы основные направления их оптимизации для повышения эксплуатационных характеристик покрытий:

- оптимизация состава покрытия для выбора достаточных прочности, вязкости, пластичности;
- дифференциация покрытий по толщине в разных сечениях лопатки;
- сочетание различных методов получения покрытий;
- возможность введения в покрытие элементов, повышающих адгезию;
- отработка различных режимов покрытия;
- модернизация оборудования;

- совершенствование методов очистки и подготовки поверхности под покрытие;
- выбор оптимальных (неразрушающих) методов контроля конечной продукции, позволяющих подтверждать полученные характеристики покрытия.