

ВЫСОКОРЕСУРСНЫЕ ЭМАЛЕВЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Высокоресурсные эмалевые покрытия для защиты деталей горячего тракта газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых, высокохромистых и железоникелевых сплавов занимают особое место в обеспечении работоспособности, ресурса и надежности изделий авиационной техники.

Детали ГТД эксплуатируются в условиях высоких температур (до 1100°C) и подвергаются жестким местным нагревам. Металл узлов ГТД должен иметь умеренную жаропрочность, высокое сопротивление окислению (жаростойкость) и коррозии в продуктах сгорания топлива. Жаропрочные материалы для деталей ГТД разработаны на Ni основе с введением в твердый раствор значительного количества легирующих добавок, которые увеличивают прочность, сопротивление ползучести и жаропрочность. При работе газотурбинных двигателей основным повреждением поверхности деталей (камер сгорания, форсажных камер, жаровых труб и др.) является высокотемпературная газовая коррозия, которая сопровождается процессом образования на поверхности металлов окарины, состоящей из фаз переменного состава, а также рыхлых подокалинных слоев и зон внутреннего окисления, что вызывает существенное изменение химического состава и снижение прочностных характеристик сплавов. Потеря прочности сплавов происходит под действием как поверхностной, так и межкристаллитной коррозии. Жаропрочные сплавы при высоких температурах имеют тенденцию к активному окислению: привес сплавов за 100 ч при температуре 1000°C составляет 0,19 – 0,25 г/м², при температуре 1100°C: 0,8 – 1,6 г/м². Для повышения сопротивляемости сплавов высокотемпературной газовой коррозии эффективны защитные эмалевые покрытия, регламентирующие процесс окисления металла при высоких температурах.

В настоящее время для защиты деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов типа ВЖ98, ЭП648 от высокотемпературной газовой коррозии при температурах до 1000°C серийно применяются высококорресурсные эмалевые (стеклокристаллические, реакционноотверждаемые) покрытия типа ЭВК на основе тугоплавких стеклофритт.

Необходимыми условиями эффективной защиты сплавов являются:

- формирование сплошного защитного слоя покрытия при сравнительно низкой температуре для предотвращения интенсивного окисления сплава на начальных стадиях нагрева;
- растворение оксидных пленок, образующихся на металле при нагреве, без потери защитных свойств покрытия;
- достаточно высокая вязкость и плотность защитного слоя для уменьшения диффузии газов из атмосферы печи;
- прочное сцепление покрытий со сплавом благодаря переходным диффузионным слоям, что обуславливает высокую надежность эксплуатации в условиях резких температурных перепадов;
- общая тугоплавкость всей системы покрытия, что обеспечивает длительную эксплуатацию покрытий при высоких температурах [1].

Высокие эксплуатационные характеристики покрытий достигаются оптимизацией химического состава и соотношением кристаллической и стекловидной составляющей в процессе формирования и эксплуатации.

Возможность получения эмалевых покрытий на основе стеклообразующих фритт заложена в физико-химической природе аморфного стеклообразного состояния, в соответствии с которой процессы плавления и затвердевания происходят постепенно в некотором температурном интервале. Именно наличие температурного интервала стеклования, в котором происходит возрастание подвижности структурных элементов стекла путем переключения (трансляции) ковалентных связей типа Si—O, B—O и т. д., обуславливает возможность создания защитных покрытий на основе стеклообразных композиций с широким рабочим интервалом температур. Использование тугоплавких фритт с высоким содержанием Al_2O_3 открывает возможности регулирования процесса вязкого течения в системе покрытия путем изменения в нем структурного состояния иона Al^{+3} за счет введения компонентов, способствующих созданию единого алюмосиликатного каркаса [2].

Стеклокристаллические покрытия типа ЭВК на основе сложных смесей оксидов и тугоплавких соединений получают с использованием процессов катализированной кристаллизации. Такие покрытия отличаются прочной ковалентной химической связью, субмикрометровой кристаллической структурой, газоплотностью, технологичностью вследствие достаточного содержания стеклофазы [3]. Эти факторы обеспечивают высокую устойчивость покрытий в агрессивных высокоскоростных газовых потоках, прочность сцепления с поверхностью сплавов, жаростойкость и термочувствительность при температурах до $1000^\circ C$ (длительно). Применение покрытий снижает окисляемость сплавов в 6–8 раз. При нагреве сплавов без покрытия наблюдается обедненный легирующими элементами дефектный слой глубиной до 150 мкм, в то время как на образцах с покрытием отсутствует межкристаллитная коррозия, распределение элементов в сплаве равномерное. Стеклокристаллические покрытия устойчивы к воздействию низких температур, выдерживают тепловой удар в течение 200 и более теплосмен при переменном нагреве и охлаждении, стойки к авиационным топливам, отличаются высокой коррозионной стойкостью во всеклиматических условиях.

Дальнейшее развитие работ по высокоресурсным эмалевым покрытиям определяется повышением уровня рабочих параметров жаропрочных сплавов и обеспечением работоспособности двигателей в условиях работы под нагрузкой при температурах до $1200^\circ C$. Для современных и перспективных авиационных ГТД разработаны новые жаропрочные материалы, позволяющие повысить рабочие температуры на камерах сгорания на $150 - 200^\circ C$, – в частности структурностабильный сплав на Ni–Cr–Co основе типа ВЖ145, который может быть использован длительно до $1100^\circ C$, а также сплав типа ВЖ155 с рабочей температурой до $1200^\circ C$. Специальный химический состав на Ni–Cr основе способствует повышению жаропрочности сплава, а в комплексе с особым режимом химико-термической обработки обеспечивает его повышенную термическую стабильность в процессе эксплуатации. Серийные эмалевые покрытия типа ЭВК при этих температурах переходят в вязкотекучее состояние и не могут обеспечить защиту сплава в условиях высокотемпературного газового потока. Сложность разработки стеклокристаллических покрытий на рабочие температуры выше $1000^\circ C$ связана с дальнейшим повышением температуры варки стеклофритт и формирования покрытий. Проблема понижения температуры формирования была решена путем введения в состав покрытий компонентов, обеспечивающих так называемый эффект реакционного отверждения [4]. Механизм реакционного отверждения заключается в образовании, за

счет химических реакций на поверхности частиц тугоплавкого стекла, тонких относительно легкоплавких пленок, приводящих к отверждению покрытия при пониженных температурах. В качестве компонентов, способных активно взаимодействовать с тугоплавкими стеклами с образованием жидкой боросиликатной фазы, эффективны, прежде всего, бориды, которые склонны к окислению с образованием на поверхности частиц тугоплавкого стекла пленок B_2O_3 при температурах 700–900°C. Введение боридов кремния в покрытие снижает температуру его размягчения на 80–120°C. Эффект снижения температуры формирования покрытий был получен также при использовании в их составе стеклофритт различной тугоплавкости. Использование смесей фритт с различными свойствами позволило разработать ряд покрытий с регламентированными вязкостью и температурным коэффициентом линейного расширения. Покрытия обладают повышенной термостойкостью при температурах до 1100°C вследствие того, что прослойки легкоплавкой фазы способны релаксировать термоупругие напряжения в покрытии. Таким образом, реакционноотверждаемые покрытия имеют сравнительно низкую температуру формирования (1050–1120°C) с сохранением основных защитных свойств, что позволило использовать их при защите тонкостенных деталей и деталей сложной конфигурации.

Для защиты новых жаропрочных сплавов, работающих в теплонагруженных условиях (выше 1000°C), эффективно применение комплексных покрытий, где в качестве подслоя, ограничивающего диффузию хрома из сплава в покрытие, использованы различные модификации покрытий типа ЭВК, а в качестве основного слоя – реакционно-спекаемые покрытия. Это поликомпонентные композиции на основе тугоплавких соединений кремния и бора с добавками легкоплавких боросиликатных фритт, что дает возможность формирования защитных слоев при температурах более низких, чем температура их эксплуатации. Высокое содержание тугоплавких кристаллических фаз в составе реакционноспекаемых покрытий обеспечивает их высокие рабочие характеристики. Применение покрытий снижает окисляемость сплавов на 60–80% и обеспечивает эффективную защиту сплавов при температурах до 1100°C.

Разработана технология приготовления и нанесения высокоресурсных эмалевых покрытий, позволяющая обеспечить получение качественного защитного слоя с оптимальной толщиной, минимальной разнотолщинностью при эмалировании деталей на предприятиях отрасли. Покрытия получают по традиционной шликерно-обжиговой технологии из недефицитных экологически чистых компонентов.

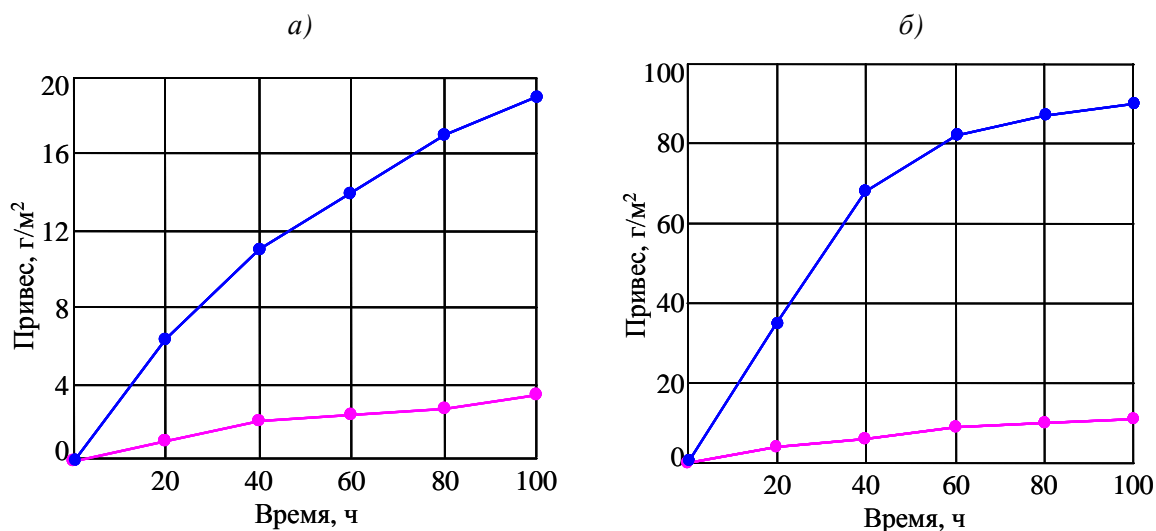
Для оперативного восстановления работоспособности деталей с поврежденным в процессе рихтовки, сборки, транспортировки эмалевым слоем разработаны ремонтные покрытия типа ЭВР. Покрытия не требуют высокотемпературного обжига, выдерживают до 50 циклов теплосмен и снижают окисляемость сплавов при наличии дефектов в ~2 раза.

Разработанные высокоресурсные эмалевые покрытия отличаются сочетанием высоких физико-химических, коррозионных и технологических свойств, обеспечивают защиту деталей от воздействия агрессивных сред при высоких температурах (до 1100°C), по своим характеристикам превосходят покрытия, полученные физическими методами. В таблице приведены основные свойства серийных эмалевых покрытий типа ЭВК.

Свойства серийных высокоресурсных эмалевых покрытий типа ЭВК

Свойства	Значения свойств
Рабочая температура, °С	До 1000 (длительно)
Температура формирования, °С	1120–1200
Толщина, мкм	60–120
Прочность сцепления, %	98
Термостойкость: количество циклов при испытании по режиму 1000↔20°С	Более 250
Коррозионная стойкость	Коррозионных повреждений нет. Снижение удельной потери массы образцов сплавов в 5–10 раз; работоспособность во всеклиматических условиях
Жаростойкость: привес, г/м ² ·ч	До 0,034

Эффективность защитного действия покрытий представлена кривыми окисляемости сплавов без покрытия и с покрытием при различных температурах (см. рисунок).



Окисляемость сплавов без покрытия (●) и с эмалевым покрытием типа ЭВК (●) при температурах 1000 (а) и 1100°С (б)

Высокоресурсные эмалевые покрытия внедрены в промышленность практически для всех отечественных авиадвигателей для защиты большой номенклатуры деталей горячего тракта из жаропрочных никелевых, высокохромистых и железоникелевых сплавов, повышают надежность и ресурс изделий в 1,5–2 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солнцев С.С. Защитные технологические покрытия и тугоплавкие эмали. – М.: Машиностроение, 1984, 255 с.
2. Химическая технология стекла и ситаллов. Под редакцией Павлушкина Н.М. – М.: Стройиздат, 1983, 432 с.
3. Аппен А.А. Температуроустойчивые неорганические покрытия. – М.–Л.: Химия, 1976.
4. Солнцев С.С., Исаева Н.В., Швагирева В.В., Максимов В.И. Высокотемпературные покрытия для защиты сплавов и углеродкерамических композиционных материалов от окисления //Конверсия в машиностроении, 2004, №4, 77 с.