

УДК 621.438-226.739.6

ПРИМЕНЕНИЕ ПОКРЫТИЙ ИЗ ВОДНОЙ СУСПЕНЗИИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ДЕТАЛЕЙ ГТД ОТ КОРРОЗИИ

Е.Г. ИВАНОВ, В.М. САМОЙЛЕНКО, Р.Г. РАВИЛОВ, М.А. ПЕТРОВА

В статье рассматривается физическая сущность получения диффузионных покрытий из водных суспензий на различных сплавах и для различных условий их дальнейшей эксплуатации. Приводится структура покрытий, преимущества и особенности получения покрытий из водных суспензий. На основании анализа термодинамических реакций в системах элементов разработаны составы водных суспензий и даны практические рекомендации для их применения на деталях ГТД.

Ключевые слова: покрытие, лопатка, водная суспензия, алюмотермическая реакция.

В последние 20...30 лет в нашей стране и за рубежом успешно развивается метод нанесения покрытий из водных суспензий. Он отличается от других методов технической простотой, мобильностью, экономичностью и высокими экологическими свойствами. В работе [1] этот метод называется методом «конденсации дисперсий», а в работе [2] – методом «растворной керамики». Физическая сущность данного метода состоит в том, что создается водный раствор солей, т.е. краска, при нанесении которой на поверхность вода испаряется, а соли в виде оксидов выделяются в виде молекулярной дисперсности. При нагреве этого осадка оксиды взаимодействуют с образованием керамики или стеклокерамики. Если в водную суспензию вводятся порошки металлов, то получаемое покрытие, в зависимости от температуры термической обработки, называют металлокерамическим или диффузионным. Нанося на поверхность неорганическую композицию, которая не горит и практически не пахнет, т.к. не содержит органических связующих и растворителей, и удаляя воду при термической обработке, можно получить покрытие на любом материале (алюминиевом, никелевом, титановом сплавах или железе).

Таковыми покрытиями являются АСФ, АФХА (4 патента РФ) для защиты от коррозии валов и дисков (изготовленных из жаропрочных сталей) компрессора ГТД и покрытия ЭТЗ, АЦ и СВС (2 патента РФ) для защиты лопаток (изготовленных из жаропрочных никелевых сплавов) турбины ГТД.

Покрытие АФХА – это доработанное покрытие АСФ, получаемое из водной суспензии алюминиевого порошка на связке алюмохроматного фосфата. Зарубежными аналогами этому покрытию являются покрытия Sermoloy, Sermetel W американской фирмы Sermetel F и покрытие Metallokeramik фирмы Boyle R (ФРГ). Покрытие АФХА в активном состоянии является протектором и содержит ингибирующие компоненты, с помощью которых даже при нарушении целостности покрытия осуществляет защиту стали. По коррозионной стойкости покрытие АФХА превосходит цинковые, кадмиевые, никель-кадмиевые и керамические покрытия, особенно при повышенных температурах. Покрытие АФХА может длительно эксплуатироваться до температуры 650° С. Толщина покрытия, в зависимости от назначения детали и способа нанесения водной суспензии (распыление, окунание, слив, кисть), может составлять от 20 до 200 мкм. Контроль толщины покрытия на стальных деталях проводится электромагнитными приборами типа МТ40У, МТ2003 и др. Весь технологический процесс нанесения покрытия включает: приготовление водной суспензии, подготовку поверхности детали, нанесение на поверхность детали суспензии АФХА методом красок, сушку детали при 60...90° С в течение 15 мин, обжиг детали при 200° С 20...30 мин.

Покрытие АФХА имеет следующие преимущества:

- повышенная живучесть водной суспензии, т.е. сохранение реологических свойств в течение длительного времени (до 1 года);

- низкая температура окончательной термической обработки - 200° С и даже 150° С, что позволяет применять покрытие для защиты от коррозии алюминиевых сплавов типа ВД-17;
- сохранение эффекта упрочнения от ППД стальной детали;
- более лучшие экологические свойства при нанесении суспензии за счет восстановления Cr^{+6} до Cr^{+3} при изготовлении суспензии.

Типичная микроструктура покрытия АФХА представлена на рис. 1а, б. Как видно из рисунка, микроструктура покрытия имеет поликонденсационный характер и не влияет на прочность, пластичность и характер остаточных напряжений образцов стали 13Х11Н2ВМФА-Ш, но определяет коррозионную защиту детали.

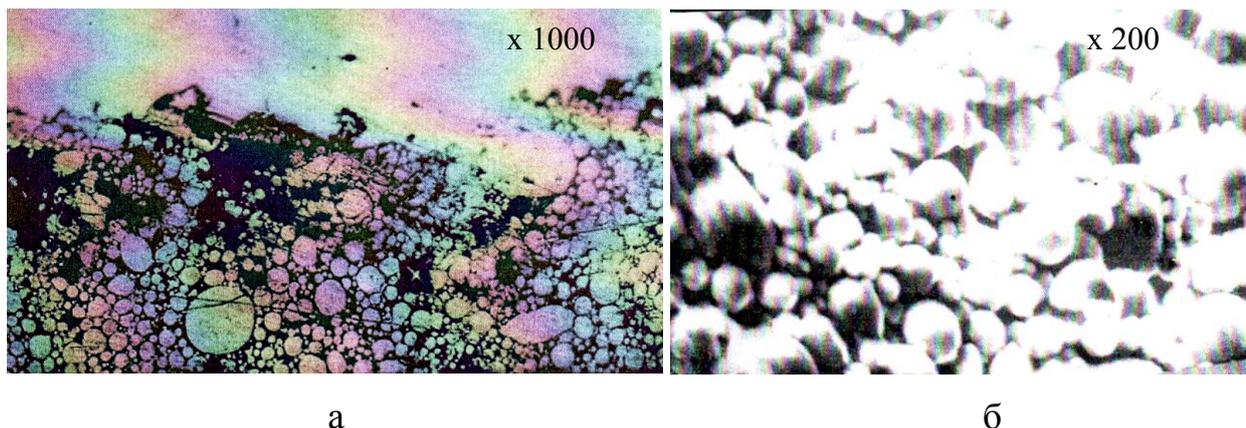


Рис. 1. Электронная микроструктура покрытия АФХА: а – со шлыва; б – с поверхности покрытия (видны частички алюминиевого порошка, покрытые керамической связкой)

Сравнительные циклические испытания образцов стали 13Х11Н2ВМФА-Ш по режиму: выдержка 21 ч в солевом тумане 5% NaCl с последующим окислением 3 ч при температуре 400° С, подтвердили высокие протекторные, ингибирующие и экранирующие свойства покрытия АФХА.

Нанесение серебра на ступицу диска вала компрессора для улучшения его сопряжения с валом, ухудшает коррозионную стойкость всего диска – полотна и ступицы вследствие возникновения разности электродных потенциалов. При нанесении на полотно диска поликонденсационного покрытия АФХА с полировкой, а на ступицу – фосфатной пленки происходит выравнивание электродного потенциала, что позволяет надежно защитить всю поверхность от коррозии (рис. 2, 3).

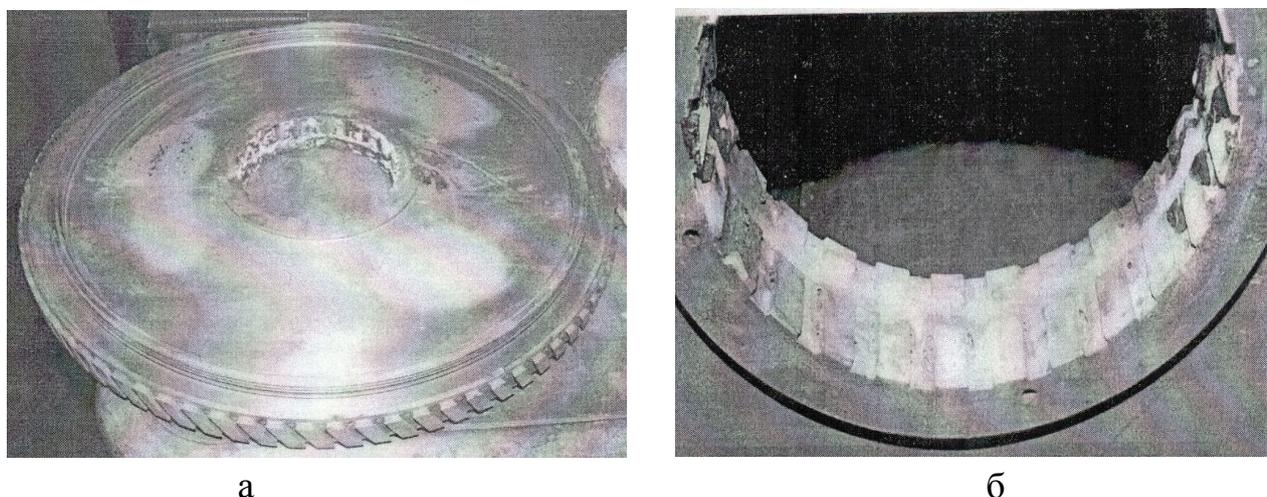
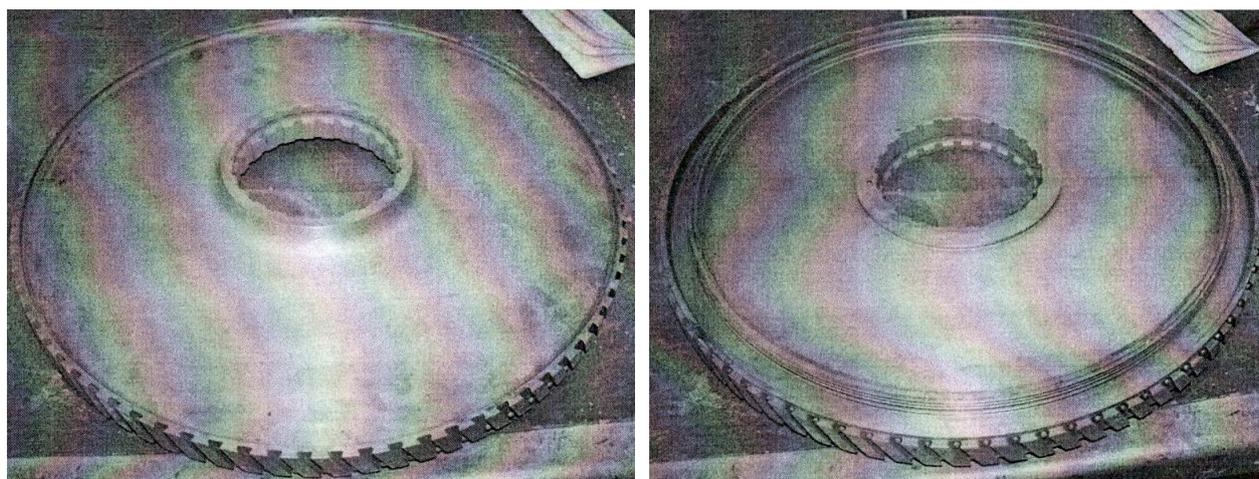


Рис. 2. Внешний вид диска 11 ступени КВД: а – без покрытия; б – ступицы с серебряным покрытием после коррозионных испытаний в 5% растворе NaCl в течение 168 ч



а

б

Рис. 3. Внешний вид диска 11 ступени КВД с покрытием АХФА без полировки после коррозионных испытаний в 5% растворе NaCl в течение 168 ч. Покрытия удалены – коррозионных повреждений нет

Покрытие АСФ применяется для защиты дисков и валов компрессора ГТД, изготовленных из стали 13X11H2BMФА-Ш, двигателей семейства НК (г. Самара), а покрытие АФХА для защиты конструкции энергетических машин, изготовленных из углеродистых сталей и чугуна (завод «Салют», г. Москва), а также рекомендовано применять при ремонте дисков ротора КВД 9, 10 и 11 ступеней (завод ВАРЗ-400).

Покрытия ЭТЗ, АЦ и СВС применяются для защиты деталей ГТД, работающих при высоких температурах и предназначены для:

- защиты от окисления внутренней полости охлаждаемых лопаток турбины современных двигателей;
- защиты от окисления внешней поверхности лопатки турбины, изготовленной из никелевых сплавов;
- нанесения металлического подслоя теплозащитного покрытия из $ZrO_2+8\% Y_2O_3$.

Эти покрытия также получают из водной суспензии, а главным их свойством является высокая жаростойкость. Для приготовления водной суспензии необходимы высокодисперсные порошки металлов, оксидов и других ингредиентов, входящих в состав водной суспензии. При этом целесообразно использовать алюмотермический метод восстановления оксидов алюминием (алюмотермия). Исходя из значений изобарных потенциалов теплот алюмотермических реакций, представленных на 1 г атома алюминия и парциальных давлений восстановленного элемента, следует ожидать совместного нанесения покрытий систем: Al-Cr, Al-Fe, Al-Ni (табл. 1). Анализ реакций изобарного потенциала ΔG , теплоты алюмотермической реакции ΔH_1 и теплоты образования алюминидов ΔH_2 показывает, что:

1) самое большое количество тепла выделяется при реакции в системах: V_2O_3+2Al , Fe_2O_3+2Al , $3NiO+2Al$, что сказывается на особенностях строения диффузионного слоя;

2) алюминиды никеля имеют высокую теплоту образования (табл. 1). Очевидно, что при образовании алюминидов никеля парциальное давление резко понижается. По этой причине на поверхности никелевого сплава насыщения не происходит, а на керамической поверхности (например, $ZrO_2+8\% Y_2O_3$) может быть насыщение никеля и алюминия;

3) взаимодействие оксида молибдена с алюминием протекает легко, но парциальное давление молибдена при температуре $1000^\circ C$ низкое ($\lg P_{Mo} \sim -22$ атм.), а давление оксида молибдена (MoO_3) высокое, таким образом, происходит перенос активных частиц оксида к восстановлению. Протекает «горячая» реакция, которая может изменить состав и строение диффузионного покрытия. По-

этому в суспензиях целесообразно и выгодно иметь энергетические ингредиенты, способные не только повысить жаростойкость путем легирования, но и способствующие образованию структур с высокой термодинамической стабильностью.

В отделении ИХФ АН СССР (с 1967 г.) проводятся исследования самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). В настоящее время получены тонкие СВС-продукты карбидов, нитридов, боридов и силицидов для алмазно-абразивного инструмента, твердых сплавов, твердые смазки и др. Однако в литературе не известны жаростойкие покрытия, получаемые с помощью СВС.

Таблица 1

Изобарный потенциал (ΔG), теплота алюмотермической реакции (ΔH_1), теплота образования алюминидов ΔH_2 и давление ($\lg P$) восстановления элемента при 1000°C

| № п/п | Возможные реакции в твердом осадке суспензии | - Δ ккал/г•атом | | | $\lg P$, атм |
|-------|---|------------------------|-------|-------|---------------|
| | | G | H_1 | H_2 | |
| 1 | $3\text{TiO}_2 + 2\text{Al} = 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{Ti}$ $\text{Al} + \text{Ti} = \text{AlTi}$ | 23 | 30,27 | 19,2 | 12,15 |
| 2 | $\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} = \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Cr}$ $4\text{Al} + \text{Cr} = \text{CrAl}_4$ | 48,1 | 61,5 | 5,1 | 8,67 |
| 3 | $\text{V}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} = 2\text{V} + \text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{V} + 3\text{Al} = \text{VAl}_3$ | 72,2 | 86,0 | 8,7 | 14,5 |
| 4 | $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{Al} = 2\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{Fe} + \text{Al} = \text{FeAl}$ | 85,8 | 94,1 | 12,2 | 8,83 |
| 5 | $3\text{NiO} + 2\text{Al} = 3\text{Ni} + \text{Al}_2\text{O}_3$ $\text{Ni} + \text{Al} = \text{NiAl}$ | 96,934 | 104,5 | 34,0 | 9,62 |

Предложенные покрытия ЭТЗ, АЦ и СВС подобраны не только по компонентам, способным повысить жаростойкость, но и по подбору компонентов, способных к значительному экзотермическому взаимодействию в тонком слое осадка (табл. 2).

Таблица 2

Марка суспензии и ее основные ингредиенты

| № п/п | Название суспензии | Цель разработки | Экзотермические ингредиенты | Относительный экзотермический эффект |
|-------|--------------------|----------------------------|---|--------------------------------------|
| 1 | АЦ | Подслой под керамику | $\text{Al} + \text{Cr}_2\text{O}_3 = \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Cr}$ $4\text{Al} + \text{Cr} = \text{CrAl}_4$ | Малый |
| 2 | ЭТЗ | Внутренняя полость лопатки | $\text{Al} + \text{Zr}_2\text{O}_3 + 8\text{Y}_2\text{O}_3 = \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrY}$ $\text{Al} + \text{Zr} = \text{ZrAl}$ | Средний |
| 3 | СВС | Основное покрытие | $\text{Al} + \text{MoO}_3 = \text{Al}_2\text{O}_3$ | Большой |

Из табл. 2 можно заключить:

1) повышение жаростойкости суспензии за счет фактора легирования максимальное у ЭТЗ, которая обеспечивает жаростойкость за счет легирования алюминием и хромом;

2) у покрытия СВС самый большой экзотермический эффект, который изменяет структуру покрытия и обеспечивает самую высокую жаростойкость покрытию на никелевых сплавах.

Выводы:

1. Покрытия, полученные из водных суспензий способны надежно защищать детали всего тракта ГТД от коррозии:

- покрытия типа АХФА обеспечивают защиту деталей, изготовленных из алюминиевых, титановых сплавов и сталей, от электрохимической и солевой коррозии;

- диффузионные покрытия типа СВС защищают детали горячего тракта: камеры сгорания, рабочие и сопловые лопатки турбины, изготовленные из никелевых сплавов, от газовой коррозии.

2. Покрытия, получаемые из водной суспензии технологически универсальны и не требуют затрат на создание специальных установок, экономичны и экологически чище.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев М.М. *Неорганические клеи*. Л.: Химия, 1986. 152 с.
2. Борисенко А.И., Николаев Л.В. *Тонкослойные стеклоэмалевые и стеклокерамические покрытия*. Л.: Наука, 1980. 88 с.

APPLICATION OF THE AQUEOUS COATING SUSPENSION FOR THE PROTECTION OF GAS TURBINE ENGINE PARTS FROM CORROSION

Ivanov E.G., Samoylenko V.M., Ravylov R.G., Petrova M.A.

The article considers the physical nature of receiving diffusion coatings from aqueous suspensions of various alloys for various conditions and their further exploitation. Structure of coatings, advantages and features of the production of coatings from aqueous suspensions are shown. Based on the analysis of thermodynamic reactions in the systems of elements formulations of aqueous suspensions were developed and practical recommendations for their application to the parts of gas turbine engine were given.

Keywords: coating, blade, aqueous suspension, aluminothermic reaction.

REFERENCES

1. Syichev M.M. *Neorganicheskie klei*. L.: Himiya. 1986. 152 p. (In Russian).
2. Borisenko A.I., Nikolaev L.V. *Tonkosloynnye stekloemaleyvie i steklokeramicheskie pokryitiya*. L.: Nauka. 1980. 88 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Иванов Евгений Григорьевич, 1936 г.р., окончил МИСИС (1961), профессор, доктор технических наук, автор более 250 научных работ, область научных интересов – технология производства и ремонт авиационной техники.

Самойленко Василий Михайлович, 1961 г.р., окончил ВВИА им. Н.Е. Жуковского (1990), профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, автор более 75 научных работ, область научных интересов – технология производства и ремонт авиационной техники.

Равилов Ринат Галимчанович, 1970 г.р., окончил МАТИ (1992), кандидат технических наук, главный металлург Лыткаринского машиностроительного завода, автор более 18 научных работ, область научных интересов – технология производства и ремонт авиационной техники.

Петрова Мария Александровна, окончила МГТУ ГА (2011), аспирантка МГТУ ГА, автор 5 научных работ, область научных интересов – технология производства и ремонт авиационной техники.