

III КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

УДК 666.29

Ненароков В. К.¹, канд. техн. наук Грешта В. Л.¹, канд. техн. наук Леховицер З. В.²,
д-р техн. наук Ольшанецкий В. Е.¹

¹ Запорожский национальный технический университет, ² АО «Мотор Сич»; г. Запорожье

ТУГОПЛАВКИЕ ЭМАЛИ ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ (ОБЗОР)

Цель работы. Разработка или усовершенствование эмалевых ресурсных покрытий для жаропрочных сплавов, которые обеспечат надежную защиту от высокотемпературной коррозии деталей газотурбинных двигателей при температурах эксплуатации выше 1000 °С.

Методы исследования. Исследование структуры промежуточных слоев покрытия / металл, диффузных и окислительных процессов.

Полученные результаты. Появление жаропрочных сплавов, предназначенных для эксплуатации при температурах до 1200–1250 °С, требует разработки новых жаростойких эмалевых покрытий. Разработка новых ресурсных покрытий происходит за счет модифицирования серийных тугоплавких эмалевых покрытий.

Научная новизна. Разработка научных принципов легирования тугоплавкими компонентами, эмалевый шликер для улучшения эксплуатационной устойчивости высокотемпературных эмалевых покрытий.

Практическая ценность. Повышение уровня эксплуатационных характеристик жаростойкого покрытия путем оптимизации химического состава и технологии получения покрытия с высокой прочностью сцепления и термо-жаростойкостью.

Ключевые слова: жаростойкость, покрытия, стали, стойкость к коррозии, тугоплавкие эмали, адгезия.

Введение

Прогресс в авиастроении обусловлен свойствами материалов, используемых в конструкции газотурбинных двигателей (ГТД). После того как были разработаны жаропрочные сплавы, предназначенные для эксплуатации при температурах до 1200...1250 °С, развитие современного авиационного материаловедения связано с решением проблем защиты теплонагруженных деталей, применяемых в конструкции двигателя ГТД [1–5].

Применение тугоплавких эмалей обеспечивает возможность существенного повышения надежности, температурных и силовых механических параметров работы, долговечности деталей горячей части газотурбинных двигателей [1–5]. Эмалевое покрытие получило широкое применение в авиастроении – для защиты от высокотемпературной газовой коррозии поверхностных слоев деталей жаростойких и жаропрочных сталей, жаропрочных никелевых сплавов, высокохромистых, титановых и других сложнoleгированных сплавов [6–8].

История тугоплавких эмалей теснейшим образом связана с развитием авиационного двигателестроения. Актуальность работ по тугоплавким эмалям как одно из направлений авиационного материаловедения выявилось еще в 50-е годы. Тогда же тугоплавкие эмали

начали находить применение в качестве защитных покрытий деталей двигателей ГТД. Примером таких покрытий могут быть отечественные тугоплавкие эмали типа ЭВ-300, ЭВ-55, ЭВ-55А, а также разработанные в США и широко применяемые в ряде зарубежных стран керамические покрытия А-417, А-437 и другие [1].

Дальнейшее развитие работ по тугоплавким эмалям определяется повышением уровня рабочих параметров жаропрочных сталей и никелевых сплавов, применявшихся для изготовления деталей газотурбинных двигателей.

И в настоящее время стеклоэмалевые ресурсные покрытия являются перспективными объектами для изучения. Исследования ученых посвящены проблемам увеличения температур эксплуатации покрытий до 1200 °С [9–11].

Однако одновременно с повышением уровня рабочих температур может возникнуть не менее актуальная проблема ресурса газотурбинных двигателей. Эта проблема тесно связана с продолжительностью и возможностью надежной эксплуатации деталей. Одним из основных видов повреждения деталей из жаропрочных сплавов является высокотемпературная газовая коррозия, которая сопровождается процессом образования на поверхности металлов окалина, состоящей из фаз переменного состава, а также рыхлых подокалинных

слоев и зон внутреннего окисления, что вызывает существенное изменение химического состава и снижение прочностных характеристик металла. Потеря прочности происходит под действием как поверхностной, так и межкристаллитной коррозии. Жаропрочные сплавы при высоких температурах имеют тенденцию к активному окислению: так, привес сплавов за 100 ч при температуре 1000 °С составляет 0,19–0,25 г/м², при температуре 1100 °С – 0,8–1,6 г/м². Для повышения сопротивляемости сплавов и сталей высокотемпературной газовой коррозии эффективны защитные эмалевые покрытия на основе стеклофритт, регламентирующие процесс окисления металла при высоких температурах [8–14].

Жаростойкие высокоресурсные эмалевые покрытия

Принципиальные особенности, присущие тугоплавким эмалям.

К числу таких особенностей можно отнести:

1. возможность создания покрытий с заранее заданными физико-химическими, механическими, теплофизическими, оптическими и другими свойствами;
2. возможность направленного изменения и управления важнейшими эксплуатационными характеристиками и свойствами эмалевого покрытия за счет корректировки его состава, структуры. Технологии приготовления, нанесения, обжига;
3. высокая прочность сцепления (адгезия) эмали с металлической подложкой, обусловленная образованием химических связей между покрытием и субстратом в процессе обжига эмали;
4. возможность получения как рентгеноаморфных (стеклообразных), так и кристаллических покрытий, а также покрытий с заданными соотношениями количеств стеклофазы и кристаллической фазы;
5. возможность получения покрытий для работы при температурах от 300 до 1200 °С;
6. наиболее высокая термостойкость и термическая усталость тугоплавких эмалей, обусловленные, прежде всего, прочным сцеплением с подложкой и возможностью точного согласования коэффициентов теплового расширения эмали и защищаемого сплава;
7. сплошность, относительно низкая пористость, высокие сопротивление диффузии компонентов из газовой среды к сплаву, а из сплава в покрытие;
8. возможность защиты широкой номенклатуры конструкционных металлов и сплавов, применяемых в промышленности;
9. безгрунтовое эмалирование, т. е. возможность нанесения тугоплавких эмалей непосредственно на защищаемый сплав без каких-либо грунтовок, протекторов, подслоев и т. п.;
10. ремонтоспособность;
11. возможность неразрушающего контроля качества тугоплавких эмалей в составе изделий, на деталях и эталонных образцах [1–5].

В основном тугоплавкие эмали разделяют на два типа:

1. стеклоэмалевые;
2. стеклокерамические;

Стеклоэмалевые покрытия получают обжигом на металлической подложке покрытия из фритты. Они характеризуются отсутствием либо незначительным содержанием (до 5–10 % по массе) кристаллических фаз. По результатам рентгеноструктурного анализа эти покрытия характеризуются как рентгеноаморфные.

Стеклокерамические эмали кроме тугоплавкой фритты содержат огнеупорные окислы, шпинели и соединения, например окись хрома, окись алюминия, циркон, дисилицид молибдена, диборид титана и т.п. Содержание этих добавок может достигать до 70–80 % (по массе) [1–5].

Жаростойкие стеклоэмалевые покрытия на основе сложных смесей окислов работают в широком интервале температур от 600 до 1200 °С и обладают:

1. высокой жаростойкостью и термостойкостью;
2. термодинамической устойчивостью в различных средах и работоспособностью при высоких температурах;
3. коррозионной стойкостью;
4. прочным сцеплением с металлической подложкой;
5. прочной химической связью;
6. выдерживают действие низких температур и циклических нагрузок;
7. устойчивы к продуктам сгорания топлива [3–14].

Во всех случаях и типах тугоплавкие эмали получают по следующей технологической схеме, которая изображена на рис. 1.

В настоящее время для защиты деталей газотурбинных двигателей (камеры сгорания, форсажные камеры, жаровые трубы, завихрители и др.) из жаропрочных никелевых, высокохромистых сплавов типа ВХ4Л, ЭП-648, ЭИ437 от высокотемпературной газовой коррозии при температурах до 1000 °С серийно применяются стеклоэмалевые покрытия типа ЭВК-103 и ЭВК-103 М на основе тугоплавких стеклофритт, полученные с участием процессов катализированной кристаллизации [15]. Они отличаются прочной ковалентной химической связью, субмикронной кристаллической структурой, газоплотностью, технологичностью вследствие достаточного содержания стеклофазы. Эти факторы обеспечивают высокую устойчивость покрытий в агрессивных высокоскоростных газовых потоках при температурах до 1000 °С длительно. Применение покрытий снижает окисляемость сплавов в 6–8 раз и способствует повышению надежности и ресурса изделий в 1,5–2 раза [15–17].

Свойства серийных стеклоэмалевых покрытий

Основные свойства серийных стеклоэмалевых покрытий показаны в табл. 1.

Эффективность защитного действия покрытий представлена кривыми окисляемости сплавов без покрытия и с покрытием типа ЭВК-103 при различных температурах рис. 2 [2].



Рис. 1. Технологическая схема получения тугоплавкой эмали

Заключение

Проанализировав научную литературу в области создания и исследования стеклоэмалевых покрытий для защиты жаропрочных никелевых сталей при высоких температурах эксплуатации, определен ряд важных параметров, связанных с созданием жаростойких эмалевых покрытий:

- 1) подготовка поверхности изделия перед эмалированием;
- 2) введение тугоплавких оксидов, оксидов сцепления;
- 3) введение боридов;
- 4) прочное сцепление (адгезия) эмали с материалом;
- 5) обеспечение надежной защиты металла при повышенных температурах;
- 6) модифицирование составов стеклофритт и эмалевых шликеров;
- 7) исследование структуры промежуточных слоев покрытие/металл, диффузионных и окислительных процессов.

Список литературы

1. Солнцев С. С. Защитные технологические покрытия и тугоплавкие эмали / Солнцев С. С. – М. : Машиностроение, 1984. – 255 с.
2. Эмали и керамика / Гращенков Д. В., Солнцев С. С., Исаева Н. В. и др. // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2012. №5. – С. 35–42.
3. Денисова В. С. Стеклоэмалевые покрытия для защиты коррозионностойких сталей от высокотемпературной газовой коррозии : свойства и области применения / В. С. Денисова, С. Ст. Солнцев, Г. А. Соловьева // Труды ВИАМ. – 2015. – № 5. – 5 с.
4. Солнцев С. С. Высокотемпературные стеклокерамические материалы и покрытия – перспективное направление авиационного материаловедения / Солнцев С. С. // Энциклопедический справочник. – 2009. – №1. – С. 26–37.

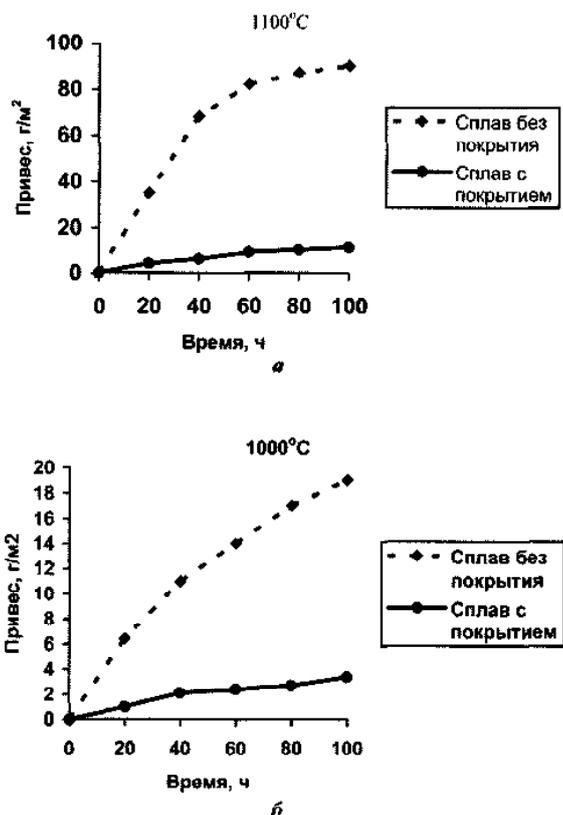


Рис. 2. Кривые окисляемости сплавов без покрытия и с покрытием ЭВК-103 при температурах: а – 1100 °С; б – 1000 °С [2]

Серийные эмалевые покрытия типа ЭВК при температурах выше 1000 °С переходят в вязко-текучее состояние и не могут обеспечивать надежную защиту сплавов в условиях высокотемпературного газового потока [8–14].

5. Солнцев С. С. Защитные покрытия металлов при нагреве : Справочное пособие / Солнцев С. С. – 2009. – 248 с.
6. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Каблов Е. Н. // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – №1. – С. 3–33.
7. Современные полифункциональные высокотемпературные покрытия для никелевых сплавов, уплотнительных металлических материалов и бериллиевых сплавов / [Каблов Е. Н., Солнцев С. С., Розененкова В. А., Миронова Н. А.] // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2013. – № 1. – 5 с.
8. Высокотемпературные конструкционные композиционные материалы на основе стекла и керамики для перспективных изделий авиационной техники / [Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В. и др.] // Стекло и керамика. – 2012. – №4. – С. 7–11.
9. Солнцев С. С. Жаростойкие эмали для защиты никелевых сплавов и сталей / Солнцев С. С., Денисова В. С., Розененкова В. А. // Энциклопедический справочник. – 2016. – №1. – С. 22–28.
10. Денисова В. С. Стеклоэмалевые покрытия для защиты коррозионностойких сталей от высокотемпературной газовой коррозии свойства и область применения (обзор) / Денисова В. С., Солнцев С. С., Соловьева Г. А. // Труды ВИАМ. 2015. – № 5. – 5 с.
11. Современное состояние исследований в области жаростойких ресурсных покрытий для никелевых и титановых сплавов (обзор) / [Денисова В. С., Солнцев С. С., Соловьева Г. А., Малинина Г. А.] // Труды ВИАМ. – 2015. – № 4. – Ст. 02.
12. Влияние состава шихты из отработанных катализаторов на смачиваемость эмали / Шардаков Н. Т, Кудяков В. Я., Дерябин В. А. // Стекло и керамика, 1996. – № 7. – С. 29–30.
13. Денисова В. С. Жаростойкое стеклокерамическое покрытие для защиты деталей камер сгорания газотурбинных двигателей / Денисова В. С., Соловьева Г. А. // Авиационные материалы и технологии. – 2016. – № 4. – С. 18–22.
14. Высокотемпературное стеклокерамическое покрытие для защиты жаропрочных никелевых сплавов / [Денисова В. С., Солнцев С. С., Соловьева Г. А., Агарков А. Б.] // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2018. – № 1–2. – С. 33–39.
15. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии / [Ломберг Б. С., Овсепян С. В., Бахрадзе М. М., Мазалов И. С.]. – 2012. – № 6. – С. 52–57.
16. Костиков В. И. Сверхвысокотемпературные композиционные материалы / Костиков В. И., Варенков А. Н. – 2003. – 560 с.
17. Петцольд А. Эмаль и эмалирование. Справ. изд. / Петцольд А., Пешманн Г. М. : Металлургия, 1990. – 576 с.

Одержано 28.01.2019

Ненароков В.К., Грешта В.Л., Леховіцер З.В., Ольшанецкий В.Ю. Тугоплавкі емалі для авіаційної техніки (огляд)

Мета роботи. Розробка або удосконалення емалевих ресурсних покриттів для жароміцних сплавів, які забезпечать надійний захист від високотемпературної корозії деталей газотурбінних двигунів при температурах експлуатації вище 1000 °С.

Методи дослідження. Дослідження структури проміжних шарів покриття / метал, дифузійних і окислювальних процесів.

Отримані результати. Поява жароміцних сплавів, призначених для експлуатації при температурах до 1200–1250 °С, потребує розробки нових жаростійких емалевих покриттів. Розробка нових ресурсних покриттів ведеться за рахунок модифікування серійних тугоплавких емалевих покриттів.

Наукова новизна. Розробка наукових принципів легування тугоплавкими компонентами емалевий шлікер для покращення експлуатаційної стійкості високотемпературних емалевих покриттів.

Практична цінність. Підвищення рівня експлуатаційних характеристик жаростійкого покриття шляхом оптимізації хімічного складу і технології отримання покриття з високою міцністю зчеплення та терможаростійкістю.

Ключові слова: жаростійкість, покриття, сталі, стійкість до корозії, тугоплавкі емалі, адгезія.

Nenarokov V., Greshtha V., Lekhovitser Z., Ol'shanetskii V. Flammable enamels for aviation technology (review)

Purpose. Development or improvement of enamel resource coatings for heat-resistant alloys, which will provide reliable protection against high-temperature corrosion of gas-turbine engine parts at operating temperatures above 1000 °C.

Research methods. The study of the structure of intermediate layers of the coating / metal, diffuse and oxidative processes.

Results. The appearance of heat-resistant alloys intended for operation at temperatures up to 1200–1250 °C requires the development of new heat-resistant enamel coatings. The development of new resource coatings occurs due to the modification of serial refractory enamel coatings.

Scientific novelty. The development of scientific principles of alloying with refractory components enamel slip to improve the operational stability of high-temperature enamel coatings.

Practical value. Increasing the level of performance characteristics of a heat-resistant coating by optimizing the chemical composition and technology of producing a coating with high adhesion strength and heat and heat resistance.

Key words: heat resistance, coatings, steels, corrosion resistance, refractory enamels, adhesion.