

# III КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

УДК 666.29

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

<sup>1</sup> Запорожский национальный технический университет, <sup>2</sup> 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/м<sup>2</sup>, при температуре 1100 °С – 0,8–1,6 г/м<sup>2</sup>. 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.

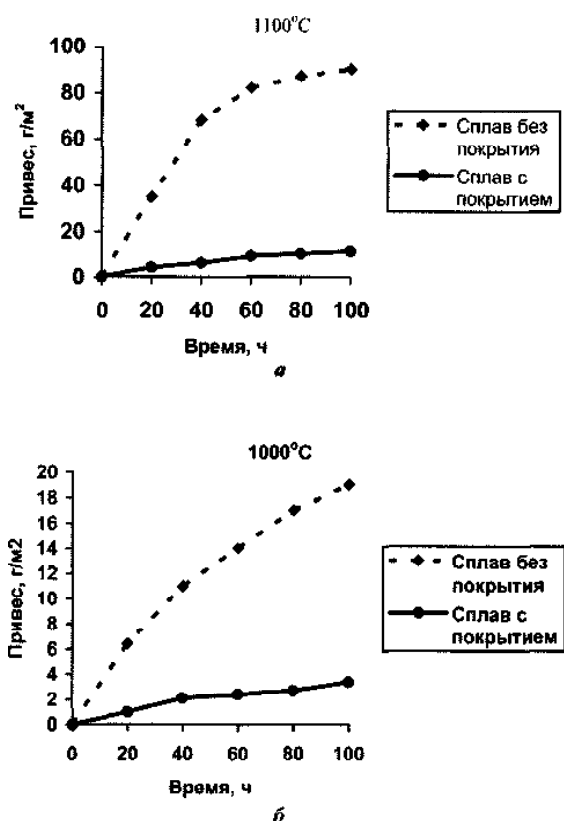


Рис. 2. Кривые окисляемости сплавов без покрытия и с покрытием ЭВК-103 при температурах: а – 1100 °С; б – 1000 °С [2]

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.