

На основании проведенной сравнительной оценки серийных и вновь разработанных модифицированных оргстекло разработаны рекомендации по замене выработавших ресурс в эксплуатации теплостойких оргстекло типа Э-2 на новые и по внедрению модифицированных оргстекло марок ВОС-1 и ВОС-2 для деталей остекления новых и перспективных летательных аппаратов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гудимов М.М., Перов Б.В. Органическое стекло. М.: Химия. 1981. 215 с.
2. Акрилатное стекло: блочное, шитое, двухосно-ориентированное: пат. WL 5.1416 (Германия) опубл. DIN. 1992. Р. 1–7.
3. Тригуб Т.С., Мекалина И.В., Горелов Ю.П., Шалагинова И.А. Органическое стекло для высокоскоростной авиации //Авиационная промышленность. 2007. №1. С. 39.
4. Аржаков М.С., Луковкин Г.М., Аржаков С.А. О природе термостимулируемой низкотемпературной релаксации деформации полимерных стекол //ДАН. 1999. Т. 369. №5. С. 629–631.

*С.С. Солнцев, В.В. Швагирева, Н.В. Исаева, Г.А. Соловьева*

#### **АРМИРОВАННЫЕ ЖАРСТОЙКИЕ СТЕКЛОЭМАЛИ ДЛЯ КАМЕР СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Исследовано влияние процесса армирования стеклоэмалевых покрытий неорганическими волокнами на их свойства.*

*Приводятся результаты исследования – показана принципиальная возможность получения армированных покрытий с однородной термически стабильной структурой и высокими термомеханическими свойствами.*

**Ключевые слова:** *стеклоэмалевое покрытие, кварцевое волокно, армирование, структура, фазовый состав, термомеханические характеристики.*

Практически на всех отечественных авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) применяются жаростойкие стеклоэмали для защиты поверхностей деталей из жаростойких никелевых сплавов и сталей от высокотемпературной газовой коррозии. Высокая эффективность защитного действия стеклоэмалей подтверждается многолетней практикой эксплуатации деталей камер сгорания, форсажных камер авиационных двигателей. Работоспособность и надежность камер сгорания ГТД в значительной мере обеспечиваются высокотемпературными стеклоэмалевыми покрытиями.

Однако остается актуальной задача тепловой защиты деталей и защиты от образования поверхностных трещин, которые могут возникать в результате термической усталости металла. Решение этой задачи связано с созданием стеклоэмалевых покрытий, обеспечивающих значительный температурный градиент – между температурами газового потока и металлической поверхности детали. Указанный градиент можно получить в результате увеличения толщины покрытия и уменьшения теплопроводности защитного слоя.

Весьма важной является также задача повышения эрозионной стойкости стеклоэмалевых покрытий, так как при длительной эксплуатации имеет место некоторый унос массы, уплотнение покрытия и соответствующее уменьшение его толщины. Получение «толстых» (толщиной более 150–200 мкм) стеклоэмалевых покрытий – поми-

мо технологических трудностей – сопровождается снижением термостойкости покрытий, появлением различных дефектов в виде сколов по кромкам деталей, раковин, несплошностей и т. п.

Цель данной работы состояла в исследовании возможности создания теплозащитных градиентных эрозионностойких стеклоэмалевых покрытий с повышенной термостойкостью и уменьшенной теплопроводностью путем армирования тугоплавких стекломатриц супертонкими кварцевыми волокнами.

Стеклоэмалевые покрытия отличаются прочным сцеплением с металлической подложкой, газоплотностью и стойкостью к газовой коррозии при высоких температурах.

Прочность сцепления покрытия с подложкой и его толщина находятся в прямой зависимости от физических свойств материала подложки и покрытия: градиент температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) подложки и покрытия приводит к появлению в покрытии внутренних напряжений и дефектов, что ограничивает возможность нанесения покрытий с толщиной слоя, позволяющей реализовать их теплозащитные свойства.

Кроме того, повышение рабочих параметров ГТД, забросы температур выше 1000°C требуют создания покрытий с наиболее высокими термомеханическими свойствами [1].

Существует принципиальная возможность получения покрытий с наиболее однородной, завершённой и термически стабильной структурой путем армирования покрытий неорганическими волокнами [2].

В хрупких матричных материалах – стеклоэмалевых покрытиях, содержащих пластичные частицы, – матрица остается основным несущим элементом, армирующие волокна ограничивают возможность возникновения трещин и дефектов в покрытии, способствуют повышению сопротивляемости тепловым и механическим нагрузкам.

Важнейшим условием достижения положительного эффекта при создании армированных покрытий является:

- применение упрочняющих фаз, не растворяющихся в матрице и не взаимодействующих с ней при рабочих температурах, а также при формировании покрытия;
- получение структур с определенным соотношением размера волокон и расстояния между ними;
- прочная связь на границе раздела «волокно–матрица», необходимая для обеспечения передачи нагрузки волокну, может быть достигнута только в случае частичного смачивания матрицей границ волокна и некоторого взаимодействия волокна с матрицей.

В связи с этим целесообразно исследовать возможность армирования неорганическими волокнами стеклоэмалевых покрытий.

В качестве объекта исследований выбрано стеклоэмалевое покрытие, синтезированное в системе  $\text{SiO}_2\text{--BaO--Al}_2\text{O}_3$ , с достаточным содержанием стеклофазы, высокой технологичностью и жаростойкостью, и кварцевое волокно  $\text{SiO}_2$ , отличающееся высокой химической стабильностью и низкой склонностью к взаимодействию со стекломатрицей.

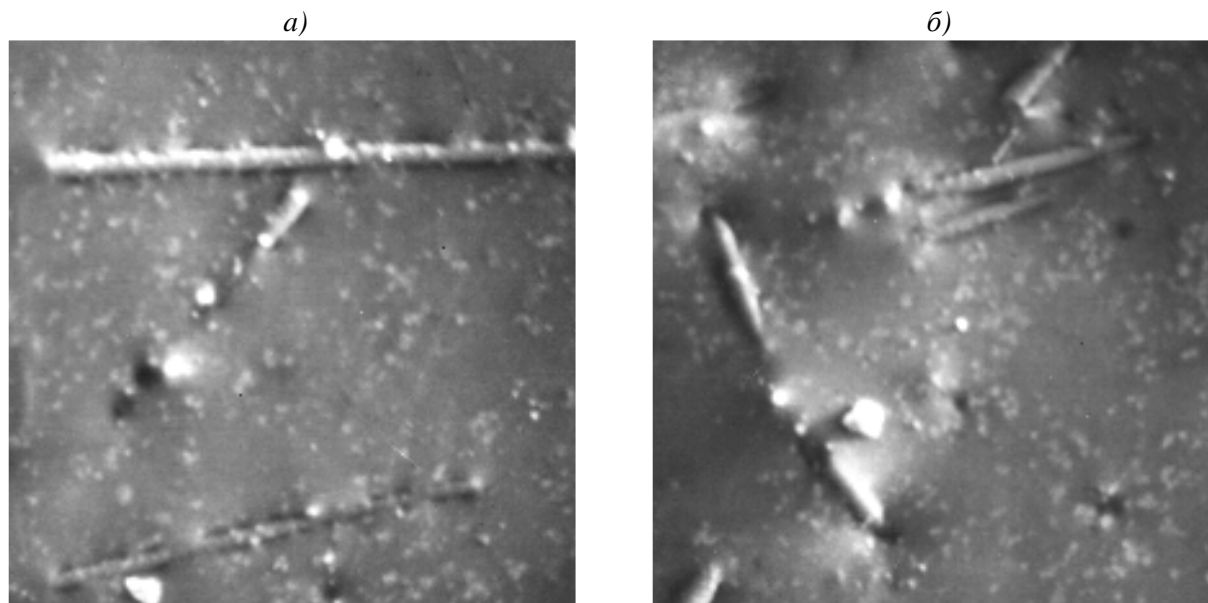
При этом принималось во внимание следующее: совместимость волокна и стеклоэмали, растворимость волокна в покрытии и взаимодействие волокна с матрицей покрытия на границе раздела, а также структурные особенности армирующего волокна – толщина и длина (соотношение длины и толщины  $l/d$ , где  $d=2$  мм,  $l=200$  мм; температура начала деформации 1050°C).

Исследование проводилось в направлении изучения влияния армирования на структуру, фазовую стабильность, технологические и эксплуатационные свойства стеклоэмалевого покрытия.

Введение в состав стеклоэмалевого покрытия армирующего волокна  $\text{SiO}_2$  в количестве 2; 5 и 10% (по массе) не приводит к повышению температуры формирования

покрытия. Повышение содержания волокна до 15% (по массе) ухудшает прочность сцепления покрытия с подложкой и повышает температуру формирования покрытия из-за недостатка стекловидной составляющей.

Исследование структуры армированного покрытия проводилось с помощью оптического (на торцевых шлифах) и растрового электронного микроскопа (с поверхности). Морфология поверхности армированного покрытия (см. рисунок, *а*) после формирования при 1200°C представляет стекломатрицу с равномерно распределенным волокном SiO<sub>2</sub>. Граница раздела «волокно–стекломатрица» не имеет ярко выраженных дефектов, стекломатрица хорошо смачивает границы волокна. После термообработки (при 1200°C в течение 5 ч) характер распределения волокон отличается большей хаотичностью по сравнению с морфологией поверхности покрытия после формирования – волокна распределяются внутри стекломатрицы (см. рисунок, *б*).



Морфология поверхности ( $\times 1000$ ) армированного покрытия после формирования при 1200°C в течение 5 мин (*а*) и после термообработки при 1200°C в течение 5 ч (*б*)

Стабильность фазового состава армированного покрытия сохраняется при температурах термообработки от 1000 до 1200°C:

Режим термообработки	Фазовый состав
1200°C, 3 мин	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (небольшое количество)
1000°C, 100 ч	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , NiCr <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , CaAl <sub>2</sub> SiO <sub>2</sub>
1100°C, 60 ч	То же
1200°C, 10 ч	«-»

Оценка эксплуатационных свойств армированного покрытия (<5% (по массе) SiO<sub>2</sub>) показала, что армированное покрытие

- снижает окисление жаропрочного сплава в 5–10 раз при температурах от 1000 до 1200°C;
- повышает прочность покрытия при ударе в 1,5–2 раза;
- позволяет получать покрытие (двух- и четырехслойное) большей толщины (до 200 мкм) в 4 слоя, с одним обжигом;
- повышает термостойкость покрытия в 3–5 раз;
- повышает эрозионную стойкость – величина уноса массы покрытия в газовом потоке (установка ЖРДМ) без армирования составляет 0,0053 г, с армированием: 0,003 г.

Таким образом, исследование влияния армирования на свойства стеклоэмалевых покрытий позволило предложить следующий предполагаемый механизм повышения эксплуатационных характеристик покрытий:

– введение  $\text{SiO}_2$  в количестве от 2 до 5% (по массе) в покрытие приводит к снижению значений ТКЛР на 10–15%;

– на границе раздела за счет частичного растворения волокна в стекломатрице при высоких температурах образуется 3 зоны: волокно  $\text{SiO}_2$ ; обогащенная  $\text{SiO}_2$  стекломатрица; исходная стекломатрица.

При термоударах наличие зон с различным ТКЛР способствует релаксации термоупругих напряжений и приводит к повышению термостойкости в 2–3 раза, прочности при ударе – в 1,5–2 раза, эрозионной стойкости – в 10 раз.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Солнцев С.С. Защитные технологические покрытия и тугоплавкие эмали. М.: Машиностроение. 1984. С. 197–220.
2. Способ изготовления стеклянного покрытия, содержащего неорганические волокна: пат. 6025380 Япония. СОЗс 14/00. 1982.

*Л.В. Семенова, Э.К. Кондрашов*

## **МОДИФИЦИРОВАННЫЙ БРОМЭПОКСИДНЫЙ ЛАК ВЛ-18 ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Функциональные лакокрасочные покрытия используют для защиты изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) от воздействия атмосферных факторов, влаги, химических реагентов, горючих и смазочных материалов, биологических факторов. Применение модифицированных бромэпоксидных олигомеров в лакокрасочных композициях позволяет существенно снизить водопоглощение, паропроницаемость покрытий. Разработанный эпоксидный лак ВЛ-18 обладает пониженными в 4–5 раз водопоглощением и паропроницаемостью по сравнению с лаком ЭП-730, при этом обеспечивает высокие адгезионные, физико-механические и защитные свойства ЛКП.*

**Ключевые слова:** водопоглощение, лакокрасочные покрытия, адгезия.

Для защиты изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) от воздействия атмосферных факторов, влаги, химических реагентов, горючих и смазочных материалов, биологических факторов используют функциональные лакокрасочные покрытия.

Покрытия используют также для стабилизации исходных свойств полимерных материалов или для получения изделий с требуемыми декоративными свойствами. Декоративные покрытия предназначены для выравнивания поверхности и заделки на ней изъянов, пор, текстуры наполнителя и повреждений, придания поверхности блеска и цвета, создания однотонного покрытия у изделий, собранных из различных деталей, избирательной окраски в определенные цвета отдельных участков поверхности, имитации поверхности изделия [1].

Лакокрасочные материалы для окраски изделий из ПКМ весьма разнообразны. Многие из них специально разрабатывают для этой цели, при этом они должны обеспе-