



УДК 629.7.023

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-8-8

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ЭМАЛЕВЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

С.Ст. Солнцев

Г.А. Соловьева

В.С. Денисова

Сентябрь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

С.Ст. Солнцев¹, Г.А. Соловьева¹, В.С. Денисова¹

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ЭМАЛЕВЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Показана возможность создания электроизоляционных эмалевых покрытий для подложек на основе стекла и керамики. Выбраны оптимальные составы электроизоляционных эмалевых покрытий в фосфатной и цинкоборосиликатной стеклообразующей системах. Проведенные испытания на химическую стойкость показали высокую устойчивость синтезированных стекол. Синтезированные эмали обладают высокими электроизоляционными свойствами. Максимальное поверхностное сопротивление образцов составляет $7,29 \cdot 10^{14}$ Ом·см.

Ключевые слова: *стеклоэмалевое покрытие, электроизоляционное покрытие, фосфатные стекла, цинкоборатные стекла, химическая стойкость.*

S.St. Solntsev, G.A. Solovyeva, V.S. Denisova

INSULATING ENAMEL COATINGS FOR MODERN ELECTRONICS

Possibility of development of insulating enamel coatings for substrates based on glass and ceramics is shown. The optimum compositions of insulating enamel coatings in phosphate and zinc borosilicate glass forming systems are chosen. Tests of chemical resistance have showed a high stability of the synthesized glasses. Enamels have high insulating properties. Maximum surface resistance of samples is $7.29 \cdot 10^{14}$ Ohm·cm.

Keywords: *glass enamel coating, insulating coating, phosphate glass, zinc borosilicate glass, chemical resistance.*

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Авиационная промышленность и специальная электронная техника для современного авиа- и ракетостроения получили колоссальное развитие в начале XXI века [1–3]. Для придания материалам определенных функциональных свойств перспективным является использование эмалей на основе стекол различных составов, а также стеклокерамических покрытий [4–11]. Наибольший интерес представляют эмали, наносимые на по-

верхность подложки из стекла и керамики, а также ситаллов. Стекло также может быть использовано и в качестве наполнителя для композиционных материалов [12]. Так, ввиду диэлектрической природы стекла [13], возможно его использование в сфере микроэлектроники для создания толсто пленочных конденсаторов и резисторов с улучшенными электрическими свойствами [14–16].

Цель данного исследования – разработка составов и технологии синтеза легкоплавких стабильных стекол для нанесения электроизоляционных эмалевых покрытий на подложки из стекла, керамики и ситаллов, применяющихся в современной микроэлектронике. В данной работе в качестве подложек применяются листовое стекло и корундовая керамика марки 22ХС.

Материалы и методы

Основным критерием при выборе компонентов при синтезе эмалей для подложек из стекла и стеклокерамики является возможность получения эмалевых покрытий, совместимых с материалом подложки. Материалы подложек обладают следующими характеристиками [17, 18]:

листовое стекло

- температура начала деформации, °С 600
- температурный коэффициент линейного расширения, K^{-1} $8,9 \cdot 10^{-7}$
- удельное электросопротивление при 100°С, Ом·см 10^{13}

корундовая керамика марки 22ХС

- температурный коэффициент линейного расширения, K^{-1} $6,5 \cdot 10^{-6}$
- удельное электросопротивление при 100°С, Ом·см 10^{13} .

На основании анализа свойств материалов подложек выявлено, что для синтеза электроизоляционных эмалей необходимо получить стекла с температурой формирования в интервале 450–600°С и значениями температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) $\alpha=(6,0-9,0) \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

Для синтеза электроизоляционных эмалевых покрытий для подложек из стекла наиболее пригодными являются эмали на фосфатной и боратной основах, не содержащие токсичных компонентов.

Известны высокие электроизоляционные свойства боратных стекол и превосходство боратных стеклообразных систем по электрическим свойствам относительно силикатных систем [19].

Как фосфатные, так и боратные стекла отличаются легкоплавкостью, а также обладают рядом специфических свойств [20]. Фосфатное стекло устойчиво к воздействию кислот – это свойство не характерно для эмалей с низкой температурой формирования. Фосфатные стекла также обладают высоким показателем преломления и способностью

накопления электрического заряда. Недостаток фосфатных стекол – неустойчивость к воздействию щелочей [21]. В этой работе изучена химическая стойкость к щелочам эмалевых покрытий различных составов. Специфическим свойством боратных стекол является их способность поглощать медленные нейтроны. Боратные стекла также обладают высокой рентгенопрозрачностью. Борный ангидрид устойчив к воздействию паров щелочных металлов.

При синтезе электроизоляционных эмалевых покрытий на основе фосфатных стекол на электросопротивление положительно влияет введение в состав небольшого количества Al_2O_3 , встраивающегося в структурную сетку и увеличивающего электроизоляционные свойства, в отличие от силикатного стекла, где встраивание в кремнекислородный тетраэдр приводит к обратному результату [21].

Известно, что фосфатные стекла обладают меньшей химической стойкостью к щелочам и воде. Благоприятно влияет на химическую стойкость введение оксида цинка ZnO , при увеличении его содержания наблюдается уменьшение электропроводности стекол. Это явление объясняется участием ионов Zn^{2+} в построении структурного каркаса стекла при воздействии щелочей путем образования $[\text{ZnO}_4]$ -тетраэдров. В составе стекла обязательно присутствие по крайней мере двух оксидов щелочных металлов, так как содержание лишь Li_2O приводит к расстекловыванию, содержание только Na_2O уменьшает химическую стойкость, содержание только K_2O повышает температуру начала деформации ($T_{н.д}$) до нежелательного уровня.

Выбраны следующие направления исследования возможности создания электроизоляционных эмалей:

для подложек из стекла (с $T_{н.д}$ =450–600°C и ТКЛР: $\alpha=(6-9)\cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)

- синтез покрытий системы $\text{P}_2\text{O}_5\text{--ZnO--Al}_2\text{O}_3$;
- синтез покрытий системы $\text{ZnO--B}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$,

а также изучение свойств полученных стекол и выбор оптимального состава, отработка технологических параметров получения эмалевых покрытий на подложках из листового стекла и керамического материала марки 22ХС.

Результаты

Плавка стекол системы $\text{P}_2\text{O}_5\text{--ZnO--Al}_2\text{O}_3$

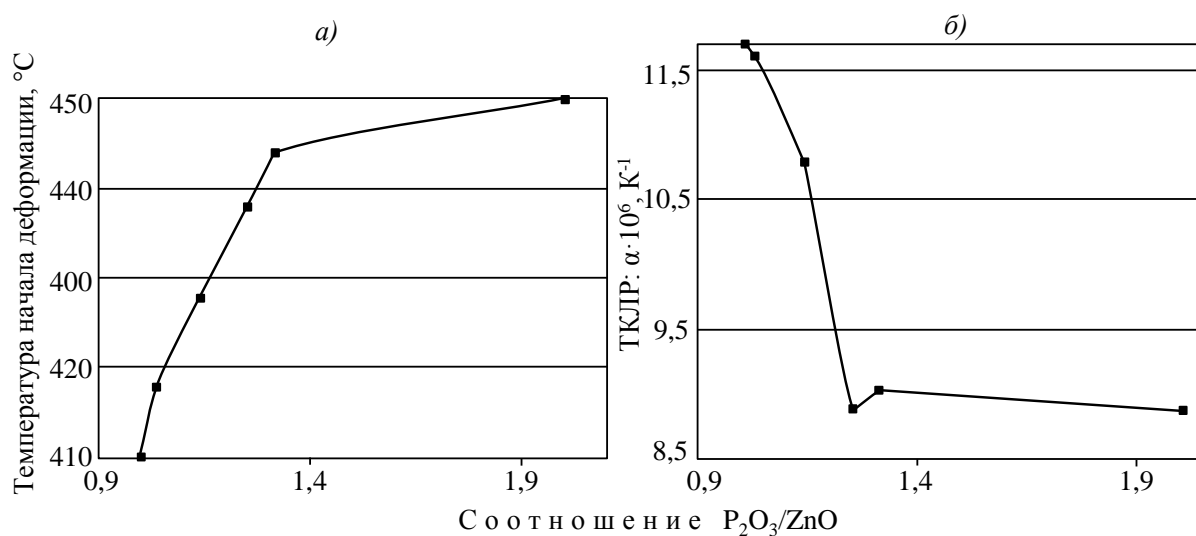
Плавку проводили в электропечи в алундовых тиглях при температуре 1100°C в течение 2 ч с последующим охлаждением расплава в воде с целью получения фритты – гранулята (табл. 1).

Таблица 1

Состав и свойства стекол фосфатной системы

Условный номер фритты	Содержание компонентов, % (мол.)				Температура начала деформации, °С	ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹	Скорость растворения $K \cdot 10^7$, г/(см ² ·мин)	
	$\Sigma(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$	Al ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	P ₂ O ₅ /ZnO			в воде	в щелочной среде
1	21	4	5	1,0	410	11,68	12,2	2,1
2	20	4	5	1,03	418	11,62	11,9	1,8
3	16	4	5	1,14	428	10,79	11,5	1,73
4	10	4	5	1,25	438	8,88	3,5	1,55
5	10	4	5	1,31	444	9,03	3,3	1,56
6	7	4	5	2,0	450	8,86	8,6	2,0

Варьирование состава исследуемых стекол производили, изменяя соотношение P₂O₅/ZnO в пределах от 1 до 2. Свойства фосфатных стекол меняются экстремально: при увеличении числа ионов Zn²⁺ на кривых (рис. 1) появляются изломы, характерные при изменении координационного числа Zn²⁺ и соответствующего изменения роли цинка в структуре стекла. Очевидно, что характерные изломы образуются при соотношении P₂O₅/ZnO, равном 1,25–1,31.

Рисунок 1. Зависимость свойств стекол системы P₂O₅–ZnO–Al₂O₃ от соотношения P₂O₅/ZnO

Определена также химическая стойкость синтезированных стекол к слабощелочным средам и воде. Измерения проводили после кипячения в дистиллированной воде в течение 5 ч при 100°С. Образцы, представляющие собой штабики с огнеполированной поверхностью, взвешивали до и после испытания.

Для оценки химической стойкости определяли скорость растворения образца в реагенте (вода или щелочная среда) по следующей формуле:

$$K = \frac{\Delta W}{S \cdot \tau}$$

где K – скорость растворения; ΔW – потери массы образца, г; S – площадь образца, см^2 ; τ – продолжительность испытания, мин.

Химическая стойкость также находится в зависимости от соотношения $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ZnO}$. Максимальной устойчивостью обладают стекла с соотношением $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ZnO}$: 1,25–1,31. Потери массы в воде – $K=(3,3-3,5) \cdot 10^{-7}$ г/($\text{см}^2 \cdot \text{мин}$). Разница в потере массы образцов, испытанных в растворе щелочи, незначительна и может быть сопоставима с погрешностью эксперимента.

С целью выявления возможности снижения температуры $T_{\text{н.д}}$ исследовано влияние введения оксидов $3d$ -элементов на свойства синтезированных фосфатных стекол – введение в состав $3d$ -элементов позволяет снизить $T_{\text{н.д}}$ и ТКЛР стекол (табл. 2).

Таблица 2

Составы и свойства стекол с содержанием $3d$ -элементов

$3d$ -элемент (R_xO_y)	Содержание компонентов, % (мол.)			Количество R_xO_y свыше 100%	Температура начала деформации, °С	ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$
	$\Sigma(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$	Al_2O_3	$\text{P}_2\text{O}_5/\text{ZnO}$			
Mn_2O_3	10	4	1,25	15	441	8,80
Co_2O_3				20	410	8,07
CuO				20	415	8,00
Fe_2O_3				20	440	8,64

На основе фосфатных систем с содержанием щелочноземельных оксидов могут быть получены стекла с высокими электроизоляционными свойствами (табл. 3).

Таблица 3

Составы и свойства стекол, содержащих оксиды щелочноземельных металлов

Содержание компонентов, % (мол.)				Температура начала деформации, °С	ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$
$\Sigma(\text{CaO}+\text{MgO})$	Al_2O_3	Sb_2O_3	$\text{P}_2\text{O}_5/\text{ZnO}$		
10	6	3	1,25	490	7,4
6		1	1,42	519	7,54

Видно, что замена оксидов щелочных металлов на щелочноземельные приводит к предсказуемому повышению температуры $T_{\text{н.д}}$ и снижению ТКЛР. Покрытия на основе таких составов могут быть применены для подложки с $T_{\text{н.д}} > 600^\circ\text{C}$ и ТКЛР: $\alpha \geq 8,0 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$.

В качестве оптимальных для синтеза выбраны составы с $3d$ -элементами (см. табл. 2): Mn_2O_3 , Co_2O_3 и CuO .

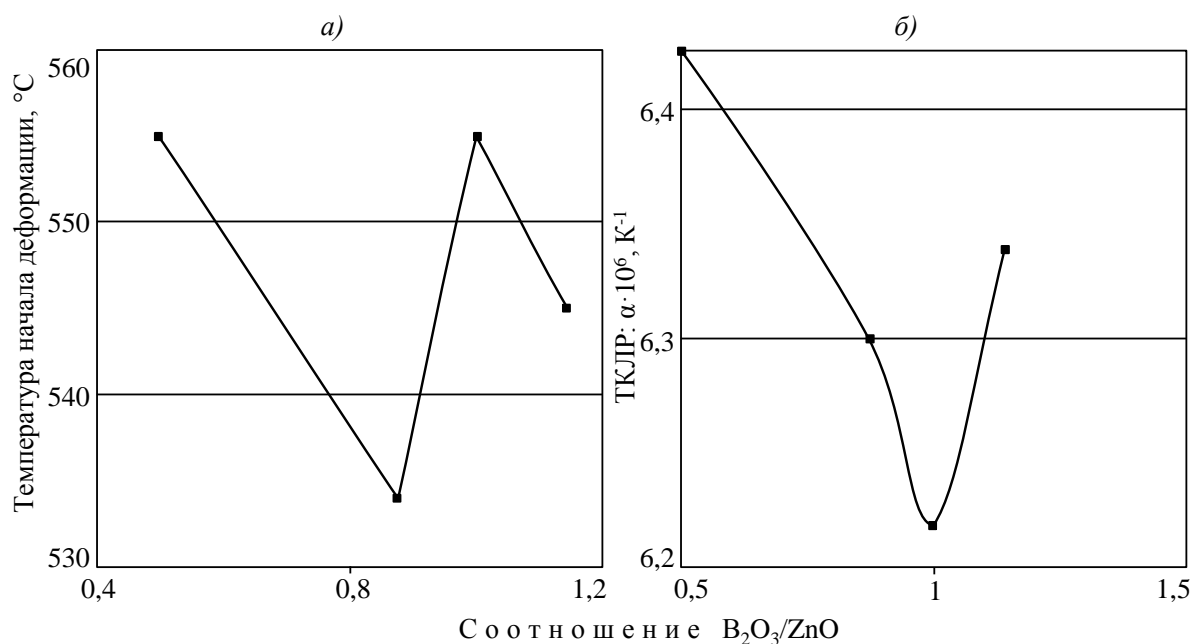
Плавка стекол системы $\text{ZnO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

Стекла боратной системы $\text{ZnO}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ подходят для синтеза покрытий с электроизоляционными свойствами, обладают низкими значениями ТКЛР: $\alpha=(6-7) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, а также высокой химической стойкостью (табл. 4).

Составы и свойства стекол системы ZnO–B₂O₃–SiO₂

Содержание компонентов, % (мол.)			Температура начала деформации, °С	ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	Скорость растворения в воде $K \cdot 10^7, г/(см^2 \cdot мин)$
$\Sigma(Al_2O_3+Sb_2O_3+SrO)$	SiO ₂	B ₂ O ₃ /ZnO			
17,5	15,0	0,5	555	6,43	1,57
	7,5	0,875	534	6,3	1,68
	12,5	1,0	555	6,22	1,12
	7,5	1,143	545	6,34	1,18

Из эксперимента очевидно влияние B₂O₃ на термические свойства низкокремнеземных стекол системы ZnO–B₂O₃–SiO₂, которое заключается в снижении значений ТКЛР стекол при одновременном снижении их температуры начала деформации ($T_{н.д}$) с ростом концентрации B₂O₃ вплоть до соотношения B₂O₃/ZnO: 0,875 (рис. 2). Такое изменение термических свойств может быть обусловлено одновременным увеличением концентрации групп [BO₃] и [BO₄] при росте соотношения B₂O₃/ZnO с одновременным переходом ZnO в положение стеклообразователя.

Рисунок 2. Зависимость свойств стекол системы ZnO–B₂O₃–SiO₂ от соотношения B₂O₃/ZnO

Термическая и химическая стойкость полученных стекол достаточно высоки, что может быть обусловлено легкой поляризуемостью катиона цинка между цинкоокислородными группировками, с одной стороны, и кремне- и борокислородными, с другой, вследствие чего возникает направленная ковалентная связь, сохраняющая непрерывность структурного каркаса стекла. Разница величин химической стойкости в воде для всех образцов является незначительной (см. табл. 4). При испытании стекол на устойчивость в щелочной среде (рН ≈ 10, при 20°С в течение 24 ч) потери массы образцов отсутствуют.

На химическую и термическую стойкость стекол положительное влияние оказывает оксид стронция [22]. На увеличение электросопротивления и одновременное снижение температуры $T_{н.д}$ оказывает влияние оксид сурьмы [19]. Так, исследовано влияние указанных оксидов в составе системы $ZnO-B_2O_3-SiO_2$ на свойства стекол (табл. 5).

Таблица 5

Составы и свойства стекол, содержащих Sb_2O_3 и SrO				Температура начала деформации, °С	ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6, K^{-1}$	Скорость растворения в воде $K \cdot 10^7, г/(см^2 \cdot мин)$
Содержание компонентов, % (мол.)						
$\Sigma(SiO_2+Al_2O_3)$	Sb_2O_3	SrO	B_2O_3/ZnO			
10	15	–	0,875	485	6,3	1,09
	10	5		506	6,3	1,43
	5	10		534	6,3	1,72
	–	15		545	6,8	8,36

На рис. 3 отражена зависимость свойств цинкоборатных стекол от содержания оксида стронция. Видно, что повышение содержания SrO приводит к росту температуры $T_{н.д}$ при неизменности значений ТКЛР. Химическая стойкость в воде остается приблизительно на одном уровне. Введение в состав стекла малого количества SrO приводит к резкому росту значений ТКЛР и снижению химической стойкости в воде – с $1,09 \cdot 10^{-7}$ до $8,36 \cdot 10^{-7}$. Такое изменение свойств стекла можно объяснить повышением содержания ионов-модификаторов Sr^{2+} , разрыхляющих и ослабляющих структуру стекла.

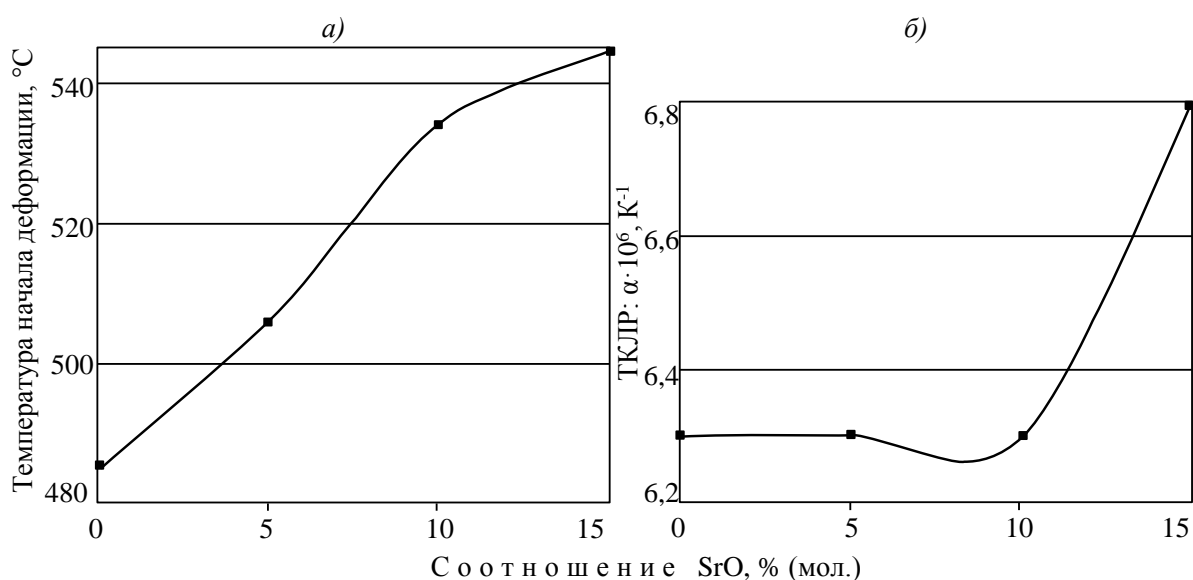


Рисунок 3. Зависимость свойств стекол системы $ZnO-B_2O_3-SiO_2$ от содержания SrO

В результате исследования влияния оксидов сурьмы и стронция установлено, что для получения стекол с ТКЛР: $\alpha \leq 6,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ и $T_{н.д} \leq 600^\circ C$ стоит вводить в указанные

составы исследуемой системы ZnO–B₂O₃–SiO₂ оксиды Sb₂O₃ и SrO. Такие составы выбраны в качестве оптимальных для синтеза эмалей в цинкоборосиликатной системе.

Шликер эмали на основе выбранных оптимальных составов приготавливали путем мокрого помола фритты в шаровой мельнице в среде изопропилового спирта. Далее шликер наносили на подложки методом напыления с последующей сушкой и термообработкой в электропечи. Термообработку осуществляли следующим образом: загрузка в холодную печь, нагрев до температуры на 110–150°C выше $T_{н.д.}$, выдержка в течение 10–20 мин, инерционное охлаждение образцов с печью.

Проведены испытания образцов с эмалевыми покрытиями на электроизоляционные свойства (табл. 6).

Таблица 6

Поверхностное электросопротивление эмалевых покрытий

Марка эмали	Состав покрытия*, %	Подложка	Режим формирования	Поверхностное электросопротивление, Ом·см
С-1	100 (4)	Листовое стекло	550°C, 20 мин	$9,72 \cdot 10^{12}$
С-1/1	95 (4)+Cu _{мет} ** (5)			$4,05 \cdot 10^{14}$
С-2	100 (Co ₂ O ₃)		520°C, 10 мин	$7,29 \cdot 10^{14}$
С-3	100 (Fe ₂ O ₃)			$2,27 \cdot 10^{14}$
К-1	100 (Sb ₂ O ₃)	Листовое стекло	580°C, 10 мин	$5,63 \cdot 10^{14}$
		Керамика 22ХС	615°C, 15 мин	$2,75 \cdot 10^{13}$
		Керамическая плитка		$3,43 \cdot 10^{13}$
К-2	100 (Sb ₂ O ₃ +SrO)	Керамика 22ХС	615°C, 15 мин	$2,1 \cdot 10^{13}$
		Керамическая плитка		$4,56 \cdot 10^{13}$

* Условный номер фритты – см. табл. 1, табл. 2, табл. 5.

** Добавка при помолу.

Обсуждение и заключения

Показана возможность создания электроизоляционных эмалевых покрытий для подложек на основе стекла и керамики. Для синтеза электроизоляционных эмалей пригодны фосфатная и цинкоборосиликатная стеклообразующие системы.

Определен ряд физико-химических свойств полученных стекол. Изучены закономерности влияния состава на структуру стекол, а именно соотношения основных компонентов изученных систем P₂O₅/ZnO и B₂O₃/ZnO на их свойства (ТКЛР, $T_{н.д.}$).

Для синтеза эмалей в исследованных системах наиболее пригодны составы с соотношением P₂O₅/ZnO: 1,25–1,31 в фосфатной системе и B₂O₃/ZnO: 0,875–1 в цинкоборосиликатной системе. Показано, что устойчивость стекол в воде достаточно высока: потери массы при 100°C составили $(1–3) \cdot 10^{-7}$ г/(см²·мин) в зависимости от состава. Устойчи-

вость фосфатных стекол в слабощелочной среде достаточно высокая и сравнима с устойчивостью их в водной среде. Потери массы в этом случае составили $\sim 3 \cdot 10^{-7}$ г/(см²·мин).

Установлено, что введение в состав фосфатных стекол оксидов 3d-элементов позволяет снизить температуру $T_{н.д}$ стекол и одновременно понизить ТКЛР.

Показано, что замена оксидов щелочных металлов на щелочноземельные в составе стекол фосфатной системы приводит к повышению значений $T_{н.д}$ стекол и снижению ТКЛР, что определяет применение таких стекол в качестве покрытий для подложек с $T_{н.д} > 600^\circ\text{C}$ и ТКЛР: $\alpha \geq 8,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. В ходе эксперимента установлено, что для получения стекол с ТКЛР: $\alpha \leq 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $T_{н.д} < 600^\circ\text{C}$ в цинкоборосиликатную систему целесообразно вводить оксиды Sb_2O_3 и SrO .

Выбранные оптимальные составы эмалей нанесены на различные подложки (стекло, керамика), определены режимы их формирования.

Синтезированные эмали обладают высокими электроизоляционными свойствами, сопоставимыми с показателями подложки. Максимальное поверхностное сопротивление образцов составляет $7,29 \cdot 10^{14}$ Ом·см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
3. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники //Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
4. Солнцев Ст.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Соловьева Г.А. Высокотемпературные покрытия для волокнистых субстратов //Труды ВИАМ. 2013. №10. Ст. 03 (viam-works.ru).
5. Солнцев С.С. Высокотемпературные композиционные материалы и покрытия на основе стекла и керамики /В сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 90–99.
6. Солнцев Ст.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Высокотемпературные стекло-керамические покрытия и композиционные материалы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 359–368.

7. Солнцев С.С., Швагирева В.В., Исаева Н.В., Соловьева Г.А. Армированные жаростойкие стеклоэмали для камер сгорания газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2010. №1. С. 26–29.
8. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Высокотемпературные тонкопленочные покрытия для уплотнительных материалов из металлических волокон //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 30–36.
9. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Керамические покрытия для защиты высокопрочной стали при термической обработке //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 3–8.
10. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Каськов В.С. Комплексная система защиты бериллия от окисления //Авиационные материалы и технологии. 2010. №1. С. 12–16.
11. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С., Севастьянов В.Г. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы //Российский химический журнал. 2010. Т.LIV. №1. С. 20–24.
12. Соколов И.И., Раскутин А.Е. Углепластики и стеклопластики нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4. (viam-works.ru).
13. Шелби Дж. Структура, свойства и технология стекла: Пер. с англ. М.: Мир. 2006. 288 с.
14. Anand T. Krishnan, Sanghoon Bae, Stephen J. Fonash. Low temperature microcrystalline silicon thin film resistors on glass substrates //Solid-State Electronics. 2000. V. 44. №7. P. 1163–1168.
15. Ruqiang Bao, Carl M. Busta, Xiaofeng Su, Minoru Tomozawa, Douglas B. Chrisey. Microstructures, phases, and properties of low melting BaO–B₂O₃–ZnO glass films prepared by pulsed laser deposition //Journal of Non-Crystalline Solids. 2013. V. 371–372. P. 28–32.
16. Hrovat M., Kielbasinski K., Makarovič K., Belavič D., Jakubowska M. The characterisation of lead-free thick-film resistors on different low temperature Co-fired ceramics substrates //Materials Research Bulletin. 2012. V. 47. №12. P. 4131–4136.
17. Амелина О., Нестеров С. Вакуум-плотная корундовая керамика на основе ультрадисперсных порошков //Наноиндустрия. 2010. №5. С. 40–41.
18. Шутов Д.А., Ситанов Д.В. Процессы микро- и нанотехнологий: Лабораторный практикум. Ч. 2. Иваново: ГОУВПО Иван. гос. хим.-технол. ун-т. 2006. 135 с.
19. Аппен А.А. Химия стекла. Л.: Химия. 1974. 352 с.

20. Mohajerani A., Martin V., Boyd D., Zwanziger J.W. On the mechanical properties of lead borate glass //Journal of Non-Crystalline Solids. 2013. V. 381. P. 29–34.
21. Немилов С.В. Оптическое материаловедение. Оптические стекла: Учеб. пособ. СПб.: СПбГУ ИТМО. 2011. 175 с.
22. Winterstein-Beckmann A., Möncke D., Palles D., Kamitsos E.I., Wondraczek L. Structure–property correlations in highly modified Sr, Mn-borate glasses //Journal of Non-Crystalline Solids. 2013. V. 376. P. 165–174.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
2. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2008. №3. S. 2–14.
3. Kablov E.N. Materialy i himicheskie tehnologii dlja aviacionnoj tehniki [Materials and chemical technologies for aircraft equipment] //Vestnik Rossijskoj akademii nauk. 2012. T. 82. №6. S. 520–530.
4. Solncev St.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Solov'eva G.A. Vysokotemperaturnye pokrytija dlja voloknistyh substratov [High temperature coatings for fibrous substrates] //Trudy VIAM. 2013. №10. St. 03 (viam-works.ru).
5. Solncev S.S. Vysokotemperaturnye kompozicionnye materialy i pokrytija na osnove stekla i keramiki [High-temperature composite materials and coatings based on glass and ceramics] /V sb. 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnič. sb. M.: VIAM. 2007. S. 90–99.
6. Solncev St.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A. Vysokotemperaturnye steklokeramicheskie pokrytija i kompozicionnye materialy [High-temperature glass-ceramic coatings and composite materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 359–368.
7. Solncev S.S., Shvagireva V.V., Isaeva N.V., Solov'eva G.A. Armirovannye zharostojkie steklojemali dlja kamer sgoranija gazoturbinnih dvigatelej [Reinforced heat-resistant glass enamel to the combustion chambers of gas turbine engines] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №1. S. 26–29.
8. Solncev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Gavrilov S.V. Vysokotemperaturnye tonkoplnochnye pokrytija dlja uplotnitel'nyh materialov iz metallicheskih volokon

- [High-temperature thin-film coatings for sealing materials of metal fibers] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 30–36.
9. Solncev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Gavrilov S.V. Keramicheskie pokrytija dlja zashhity vysokoprochnoj stali pri termicheskoj obrabotke [The ceramic coating to protect the high-strength steel during heat treatment] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №4. S. 3–8.
 10. Solncev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Kas'kov V.S. Kompleksnaja sistema zashhity berillija ot okislenija [A comprehensive system of protection against oxidation of beryllium] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2010. №1. S. 12–16.
 11. Kablov E.N., Grashhenkov D.V., Isaeva N.V., Solncev S.S., Sevast'janov V.G. Perspektivnye vysokotemperaturnye keramicheskie kompozicionnye materialy [Promising high-temperature ceramic composites] //Rossijskij himicheskij zhurnal. 2010. T.LIV. №1. S. 20–24.
 12. Sokolov I.I., Raskutin A.E. Ugleplastiki i stekloplastiki novogo pokolenija [Carbon and fiberglass new generation] //Trudy VIAM. 2013. №4. (viam-works.ru).
 13. Shelbi Dzh. Struktura, svojstva i tehnologija stekla [The structure and properties of glass technology]: Per. s angl. M.: Mir. 2006. 288 s.
 14. Anand T. Krishnan, Sanghoon Bae, Stephen J. Fonash. Low temperature microcrystalline silicon thin film resistors on glass substrates //Solid-State Electronics. 2000. V. 44. №7. P. 1163–1168.
 15. Ruqiang Bao, Carl M. Busta, Xiaofeng Su, Minoru Tomozawa, Douglas B. Chrisey. Microstructures, phases, and properties of low melting BaO–B₂O₃–ZnO glass films prepared by pulsed laser deposition //Journal of Non-Crystalline Solids. 2013. V. 371–372. P. 28–32.
 16. Hrovat M., Kielbasinski K., Makarovič K., Belavič D., Jakubowska M. The characterisation of lead-free thick-film resistors on different low temperature Co-fired ceramics substrates //Materials Research Bulletin. 2012. V. 47. №12. P. 4131–4136.
 17. Amelina O., Nesterov S. Vakuum-plotnaja korundovaja keramika na osnove ul'tradispersnyh poroshkov [The vacuum-tight alumina ceramic-based ultrafine powders] //Nanoindustrija. 2010. №5. S. 40–41.
 18. Shutov D.A., Sitanov D.V. Processy mikro- i nanotehnologij [Processes of micro-and nanotechnology]: Laboratornyj praktikum. Ch. 2. Ivanovo: GOUVPO Ivan. gos. him.-tehnol. un-t. 2006. 135 s.
 19. Appen A.A. Himija stekla [Chemistry glass]. L.: Himija. 1974. 352 s.

20. Mohajerani A., Martin V., Boyd D., Zwanziger J.W. On the mechanical properties of lead borate glass //Journal of Non-Crystalline Solids. 2013. V. 381. P. 29–34.
21. Nemilov S.V. Opticheskoe materialovedenie. Opticheskie stekla [Optical materials. Optical glass]: Ucheb. posob. SPb.: CPbGU ITMO. 2011. 175 s.
22. Winterstein-Beckmann A., Möncke D., Palles D., Kamitsos E.I., Wondraczek L. Structure–property correlations in highly modified Sr, Mn-borate glasses //Journal of Non-Crystalline Solids. 2013. V. 376. P. 165–174.