

На правах рукописи



**ФАНДА АННА ЮРЬЕВНА**

**СТЕКЛОВИДНЫЕ И СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ЭМАЛЕВЫЕ  
ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ ОБЛИЦОВОЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ**

2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Белгород – 2024 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Научный руководитель: **Рябова Анна Владимировна**  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Южно-Российский  
государственный политехнический  
университет (НПИ) имени М.И. Платова»,  
доцент кафедры «Общая химия и  
технология силикатов»

Официальные оппоненты: **Солнцев Станислав Сергеевич**  
доктор технических наук, профессор  
ФГУП «Всероссийский научно-исследователь-  
ский институт авиационных материалов»  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»,  
советник генерального директора  
НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ

**Онищук Виктор Иванович**  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный  
технологический университет  
им. В.Г. Шухова», профессор кафедры  
«Технология стекла и керамики»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Российский химико-технологиче-  
ский университет имени Д.И. Менделеева»

Защита состоится «11» апреля 2024 г. в 10:00 часов на заседании диссер-  
тационного совета 24.2.276.01 при ФГБОУ ВО «Белгородский государствен-  
ный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Бел-  
город, ул. Костюкова, 46, ауд. ГК 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БГТУ им В.Г. Шухова  
и на сайте: [https://gos\\_att.bstu.ru/dis/Fanda](https://gos_att.bstu.ru/dis/Fanda).

Автореферат разослан «8» февраля 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



В.А. Полуэктова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Строительный рынок наполнен множеством различных облицовочных материалов, однако ни один из них, используемый одновременно для внутреннего и наружного применения (это и классическая штукатурка, и кирпич или камень, и специальная фасадная плитка) для отделки различных зданий и сооружений сегодня не может сравниться по качеству с эмалированной поверхностью стали, которая обладает долговечностью цвета, длительным сроком эксплуатации и разнообразием текстуры и цвета. Стеклоэмалевые и стеклокристаллические покрытия используются для защиты стальных изделий различного назначения и одним из эффективным направлением их применения является защита стальных облицовочных панелей, которые устойчивы к неблагоприятным климатическим условиям, стойки к вандальному воздействию, к открытому огню, экологически безопасны и долговечны.

Такие панели представляют собой стальные листы, покрытые стекло-видной эмалью толщиной 200–500 мкм, выдерживающие перепады температур от –60 градусов до +500 и характеризующиеся сроком службы более 50 лет, что делает возможным их применение в облицовке как жилых, так и производственных зданий, так как они сочетают прочность стали и высокие коррозионные свойства стеклоэмалевого покрытия. Применение такой облицовки возможно, как для новых зданий и сооружений (станций метрополитенов, подземных переходов и автодорожных туннелей), так и для реконструкции старых построек для выравнивания фасада, что позволяет придать им современный привлекательный вид, повысить атмосферостойкость и шумоизоляцию.

Актуальной проблемой, препятствующей широкому распространению производства стальных облицовочных эмалированных панелей, является отсутствие разработанных составов конкретного функционального назначения, широкой цветовой гаммы и способных бездефектно формироваться при минимальной толщине (менее 0,3 мм). Однако вопрос о закономерностях синтеза и механизма бездефектного формирования атмосферостойких покровных стекловидных и стеклокристаллических эмалевых покрытий для стали в процессе высокотемпературного обжига, влияющие на физико-химические свойства и срок эксплуатации облицовочных панелей, остается актуальной научной задачей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90223 «Разработка технологии энергосберегающих стальных антивандальных архитектурно-строительных панелей с внешним стеклоэмалевым покрытием и внутренним теплоизоляционным наполнителем», а также при финансовой поддержке в рамках реализации проекта по соглашению о предоставлении из федерального бюджета грантов в форме субсидий в соответствии с пунктом 4 статьи 78.1 Бюджетного кодекса Российской Федерации № 075-15-2022-1111 выполнены аналитические исследования сырьевых материалов в п. 3.1 диссертации.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследования в области технологии эмалирования металлов проводятся научными коллективами: Национального Томского политехнического университета (О.В. Казьмина) – химически стойкие покрытия на основе эмали; Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова (Е.А. Яценко, А.В. Рябова) – основы ресурсосберегающих технологий однослойных стеклокомпозиционных функциональных покрытий для металлов, а также другие группы исследователей. Исследований в области эмалирования стальных облицовочных панелей ранее не проводились.

**Целью работы** является разработка физико-химических принципов синтеза составов атмосферостойких стекловидных и стеклокристаллических эмалевых покрытий для защиты стальных облицовочных панелей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изучение областей стеклообразования, разработка новых составов и установление технологических параметров синтеза покровных стекловидных и стеклокристаллических эмалевых покрытий для защиты стальных облицовочных панелей;

2. Установление зависимости влияния количества и соотношения основных оксидов в составе эмалевых покрытий для стальных облицовочных панелей с широким температурным диапазоном эксплуатации (влажность до 99 %, перепады температур от  $-30$  до  $+450$  °С, солевой туман) на их атмосферную стойкость;

3. Установление оптимального вида и количества комплексной модифицирующей добавки, способствующей повышению атмосферной стойкости эмалевых покрытий;

4. Исследование физико-химических процессов, протекающих при синтезе эмалевых покрытий оптимальных составов на поверхности сталей различных марок;

5. Разработка методики оценки антивандальных свойств эмалевых покрытий для стальных облицовочных панелей.

#### **Научная новизна работы:**

1. Установлены области и закономерности стеклообразования в системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{R}_x\text{O}_y$ , в которой могут быть синтезированы эмалевые покрытия, характеризующиеся значениями структурных показателей  $\psi_{\text{B}}$ ,  $f_{\text{Si,B,Al}}$ , обеспечивающими формирование единого алюмоборокремнекислородного каркаса с высокой степенью связанности и их заданные технологические и технико-эксплуатационные свойства и разработаны новые составы эмалевых покрытий с высокой атмосферной стойкостью, что позволяет эксплуатировать эмалированные облицовочные панели в широком температурном диапазоне (перепады температур от  $-30$  до  $+450$  °С, влажность до 99 %, солевой туман).

2. Установлена зависимость влияния количества и соотношения основных оксидов в составе эмалевых покрытий для стальных облицовочных панелей на их склонность к дефектообразованию и выявлено, что оптимальное соотношение стеклообразователей  $\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3$  для белых покровных эмалей – 3,2–3,6, для прозрачных покровных – 3,0–4,4, а соотношение модификаторов

$\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  для белых покровных эмалей 1,6–1,9, для прозрачных покровных – 11,5–15,0, что способствует формированию более прочных связей аморфной стеклообразной структуры, обеспечивающей оптимальные вязкостные характеристики расплава.

3. Установлены закономерности влияния комплексной модифицирующей добавки ( $\text{K}_2\text{O}=0,6(0,4)\cdot\text{R}_2\text{O}$  и  $\text{MoO}_3=0,1\%$ ), снижающей поверхностное натяжение расплавов эмалевых покрытий в процессе их формирования на загрунтованной стальной основе при обжиге, что способствует образованию высокополяризованных катионов  $\text{K}^+$  и комплексов анионов  $[\text{MoO}_4]^{2-}$ , действие которых в поверхностном слое расплава стекла направлено на уменьшение площади его поверхности, что обеспечивает бездефектное формирование покровных эмалей.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

1. Установлены физико-химические закономерности стеклообразования в системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{R}_x\text{O}_y$  для получения эмалевых покрытий путем варьирования значений показателей связанности алюмоборокремнекислородного каркаса и установлено, что их значения должны лежать в диапазоне  $\psi_{\text{B}} = 1,18-1,40$ ,  $f_{\text{Si,B,Al}} = 0,38-0,40$  для белых и  $\psi_{\text{B}} = 1,06-1,56$ ,  $f_{\text{Si,B,Al}} = 0,46-0,48$  – для прозрачных эмалей.

2. Выявлены закономерности модификации составов с целью предотвращения дефектообразования посредством изменения поверхностной активности силикатных расплавов частичной заменой  $\text{R}_2\text{O}$  оксидом калия в количестве 30 % в грунтовом покрытии Г1.4, 60 и 40 % в покровных Б4 и П2 соответственно, а также введением поверхностно-активного иона молибдена в количестве 0,1 %, что позволяет получать качественные эмалевые покрытия для стальных облицовочных панелей с высокой атмосферостойкостью.

3. Установлены особенности физико-химических процессов, происходящих при формировании грунтовых и покровных эмалей на стали и микро- и макроструктура системы сталь–эмаль, обеспечивающие прочное сцепление субстрата и покрытия, а также зависимость влияния температурно-временного режима обжига эмалевых покрытий на их структуру и свойства.

4. Разработаны составы грунтовых стеклоэмалевых покрытий в стеклообразной системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{R}_x\text{O}_y$  с разной степенью тугоплавкости и высокой прочностью сцепления в системе сталь–эмаль. Выявлен состав комбинированного грунтового покрытия состава КГЭ-40-30-30, мас. %:  $\text{SiO}_2$  43,1;  $\text{B}_2\text{O}_3$  20,4;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  5,9;  $\text{Na}_2\text{O}$  19,8;  $\text{TiO}_2$  0,6;  $\text{CaF}_2$  7,4;  $\text{MnO}_2$  0,3;  $\text{Co}_2\text{O}_3$  0,7;  $\text{NiO}$  1,8 с интервалом обжига 810–860 °С, ТКЛР  $109,92\cdot 10^{-7}\text{ K}^{-1}$ , толщиной 0,10–0,15 мм, прочностью сцепления 4–5 баллов и растекаемостью 61 мм.

5. Разработаны две серии покровных эмалей в стеклообразной системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{R}_x\text{O}_y$  для защиты стальных облицовочных панелей и выявлены оптимальные Б4 (белая) и П2 (прозрачная), характеризующиеся следующими свойствами: ТКЛР – 96,28;  $102,73\cdot 10^{-7}\text{ K}^{-1}$ ; растекаемость – 47; 48 мм; 4 %-ой уксусной кислоте – класс А; ударная прочность – 0,39 (0,04) Дж (кгс·м); водостойкость – 0,50; 0,49 г/м<sup>2</sup>сут; стойкость к водяному пару – 1,30; 1,28 г/м<sup>2</sup>сут; термическая стойкость – нет дефектов после

двух циклов испытания.

6. Разработаны 9 составов эмалевых покрытий для стальных облицовочных панелей различных цветов и оттенков с показателями цвета RGB: пастельно-бирюзовый (127; 181; 181), темный хаки (189; 183; 107), зеленый папоротник (79; 121; 76), миндаль Крайола (234; 221; 796), папоротник Крайола (135; 190; 114), нарциссово-желтый (220; 157; 0), миртовый (33; 66; 30), дынно-желтый (244; 165; 0), шафраново-желтый (248; 205; 68) для разнообразия внешнего облика зданий и сооружений в зависимости от их сферы использования.

7. Предложена методика оценки антивандальных свойств облицовочных панелей с различными покрытиями, заключающаяся в определении таких параметров как: устойчивость к механическому воздействию, к нанесению и последующему удалению «граффити», огнестойкость, светостойкость.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой диссертационной работы является комплексный анализ системы «сталь–эмаль». Идея базируется на результатах анализа фундаментальных и прикладных исследований отечественных и зарубежных ученых в области теории стеклообразования алюмоборосиликатных стекол для синтеза эмалевых покрытий.

Исследование свойств эмалевых покрытий для стальных облицовочных панелей производили с применением рентгенофлуоресцентного метода (спектрометр ARLQUANT'X), сканирующей электронной микроскопией (оптический микроскоп ПОЛАР 1), рентгенофазового анализа (дифрактометр ДРОН-3), цветовые характеристики (спектрофотометр DTP22 X-Rite Color Digital Swatchbook). ТКЛР, растекаемость, водостойкость, кислотостойкость, щелочестойкость, прочность сцепления, атмосферостойкость и др. определяли с использованием действующих ГОСТов.

**Положения, выносимые на защиту:**

- структурные особенности стеклообразования алюмоборосиликатных стекол и синтез составов атмосферостойких эмалевых покрытий для стали;
- технологические параметры синтеза и зависимость влияния количества и соотношения основных оксидов в составе стекловидных и стеклокристаллических эмалевых покрытий с широким температурным диапазоном эксплуатации;
- характер влияния комплексной модифицирующей добавки на бездефектное формирование эмалевых покрытий на стали;
- механизм температурно-временной трансформации покрытия на стали до и после его модификации;
- физико-химические особенности формирования фазового состава композиции сталь–эмаль;
- методология оценки антивандальных свойств облицовочных эмалированных стальных панелей.

**Достоверность результатов работы** подтверждается достаточным объемом лабораторных экспериментальных исследований; осуществлением комплексных исследований с использованием современных физико-химических методов анализа; воспроизводимостью экспериментальных данных и соответствием результатов современному уровню знаний в исследуемой области науки представленным в публикациях других ученых.

**Апробация работы.** Результаты диссертационных исследований докладывались на 5 научных конференциях, в том числе на VII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные науки сегодня» (США, 2015 г.); Международной научно-практической конференции «Интеллектуальный и научный потенциал XXI века» (г. Казань, 2016 г.); 8-ая Международной конференции «Стеклопрогресс – XXI», (г. Саратов, 2016 г.); материалы V Национальной конференции профессорско-преподавательского состава и научных работников «Результаты исследований – 2020» (г. Новочеркасск, 2020 г.); International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2021) (г. Севастополь, 2021 г.).

**Внедрение результатов исследования.** Опытно-промышленная апробация разработанных составов эмалевых покрытий различных цветов и оттенков для антивандалных стальных облицовочных панелей осуществлялась в производственных условиях ООО «ТД Сила Дон» (г. Ростов-на-Дону).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы изложены в 18 научных работах, в том числе: 6 – в изданиях, входящих в перечни рецензируемых научных изданий и международных реферативных баз данных, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России; 2 – в иных зарубежных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science; 2 – патента РФ на изобретение.

**Личный вклад.** Автором теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность модифицирования составов эмалевых покрытий для стальных панелей. Разработаны и запатентованы составы стеклоэмалевых покрытий для стали. Принято участие в апробации и внедрении результатов работы.

**Объем и структура диссертационной работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического описания литературных источников и приложений. Работа изложена на 178 страницах машинописного текста, включающего 43 таблицы, 48 рисунков, список литературы из 152 наименования и 1 приложения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, отмечены научная новизна, практическая значимость и внедрение результатов работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** (Современное состояние и перспективы развития тех-

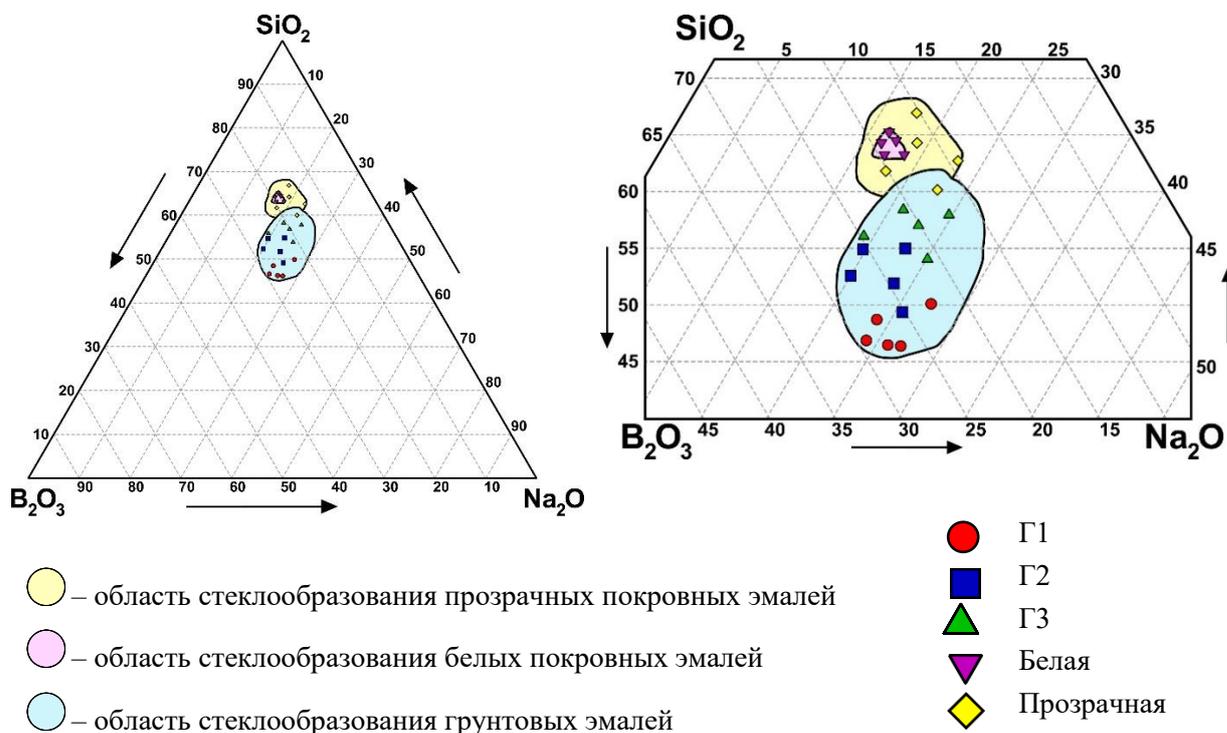
нологии эмалирования стальных облицовочных панелей) проведены сравнительные характеристики стальных облицовочных панелей, выполнены аналитические исследования в области использования строительных облицовочных стальных панелей с внешним эмалевым покрытием; обзор научных информационных источников, относящихся к области исследований характеристик эксплуатации облицовочных панелей и требований к защитным эмалевым покрытиям.

Проанализированы химические составы стали и выбрана оптимальная марка металла, позволяющая получать из него эффективные эмалированные облицовочные панели, а также произведено описание технологии их эмалирования. Проведен анализ технологии получения белых и интенсивно окрашенных эмалевых покрытий, возможных способов их глушения и выбран наиболее оптимальный с точки зрения интенсивности и степени заглушенности. По результатам литературного обзора сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** (Методика исследований и выбор оптимальных видов сырьевых материалов) описаны основные характеристики используемых сырьевых материалов и методика исследований. Исследования выполнены при помощи комплекса методов, включающего рентгенофазовый (РФА), микроскопический и спектрофотометрический анализ. Термический коэффициент линейного расширения (ТКЛР), плавкостные характеристики расплавов эмалей, прочность сцепления с металлом, а также белизну и блеск покрытий исследовали методами в соответствии с методиками, приведенными в нормативных документах для данной продукции.

**В третьей главе** (Разработка составов новых стекловидных и стеклокристаллических эмалевых покрытий с различными эксплуатационными и декоративными свойствами для защиты стальных облицовочных панелей) представлены исследования по влиянию соотношения грунтовых фритт различной плавкости и соотношения основных и вспомогательных оксидов для синтеза покровных эмалей на физико-химические и эстетико-потребительские свойства.

Для определения основных областей стеклообразования была построена диаграмма составов области стекол в системе  $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--Na}_2\text{O--R}_x\text{O}_y$ , которые являются основой для получения грунтовых и покровных эмалей (рисунок 1).



**Рисунок 1** – Диаграмма областей составов (мас.%)

В установленных областях составов были синтезированы три серии разной легкоплавкости стекломатриц для получения грунтовых и две серии стекломатриц для получения покровных белых (Б) и прозрачных (П) эмалевых покрытий (таблица 1, 2), для которых определены прочность сцепления со сталью и ТКЛР и рассчитаны показатели степени связанности структуры.

**Таблица 1** – Химические составы для получения грунтовых эмалей

Маркировка фритты	Номер состава	Содержание, мас. %									Прочность сцепления	ТКЛР $\alpha \cdot 10^7$ , $K^{-1}$
		SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	MnO <sub>2</sub>	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO		
Г1	Г1.1	42,00	19,00	23,00	5,6	1,2	6,6	0,8	0,6	1,2	5	121,08
	Г1.2	38,89	22,49	22,62	5,6	1,2	6,6	0,8	0,6	1,2	5	118,86
	Г1.3	40,86	22,93	20,21	5,6	1,2	6,6	0,8	0,6	1,2	4	109,90
	Г1.4	39,00	23,30	21,70	5,6	1,2	6,6	0,8	0,6	1,2	5	115,29
	Г1.5	39,30	24,44	20,25	5,6	1,2	6,6	0,8	0,6	1,2	4	109,68
Г2	Г2.1	45,84	18,43	19,23	5,2	–	7,9	–	0,8	2,6	4	108,90
	Г2.2	43,25	20,45	19,80	5,2	–	7,9	–	0,8	2,6	5	110,48
	Г2.3	43,92	22,88	16,70	5,2	–	7,9	–	0,8	2,6	4	98,51
	Г2.4	41,24	20,93	21,33	5,2	–	7,9	–	0,8	2,6	5	115,96
	Г2.5	45,86	21,13	16,51	5,2	–	7,9	–	0,8	2,6	4	98,29
Г3	Г3.1	48,98	17,02	17,60	6,6	0,5	7,6	–	0,7	1,6	5	102,21
	Г3.2	47,86	16,75	18,99	6,6	0,5	7,6	–	0,7	1,6	4	107,31
	Г3.3	47,02	20,53	16,05	6,6	0,5	7,6	–	0,7	1,6	4	95,65
	Г3.4	45,31	17,41	20,88	6,6	0,5	7,6	–	0,7	1,6	5	114,01
	Г3.5	48,57	14,42	20,61	6,6	0,5	7,6	–	0,7	1,6	5	113,75

Таблица 2 – Химические составы покровных эмалей

Серия	Эмалевое покрытие	Содержание оксидов, мас. %											Степень связанности $f_{Si, B}$	Показатель $\psi_B$	ТКЛР $\alpha \cdot 10^7$ , $K^{-1}$
		SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	CoO	CaO	F <sup>-</sup> сверх 100%			
Б	Б1	42,01	12,00	12,49	4,00	3,57	1,20	6,68	18,00	0,05	–	3,50	0,38	1,40	100,41
	Б2	42,69	12,83	10,97	4,00	3,57	1,20	6,68	18,00	0,05	–	3,50	0,38	1,18	94,38
	Б3	42,89	12,01	11,60	4,00	3,57	1,20	6,68	18,00	0,05	–	3,50	0,39	1,32	97,01
	Б4	42,03	12,99	11,48	4,00	3,57	1,20	6,68	18,00	0,05	–	3,50	0,39	1,21	96,28
	Б5	43,36	12,09	11,05	4,00	3,57	1,20	6,68	18,00	0,05	–	3,50	0,40	1,26	94,89
П	П1	47,00	13,26	17,74	11,30	–	–	1,20	5,00	–	4,50	5,00	0,46	1,28	101,36
	П2	48,97	11,08	17,96	11,30	–	–	1,20	5,00	–	4,50	5,00	0,46	1,56	102,73
	П3	52,24	11,86	13,90	11,30	–	–	1,20	5,00	–	4,50	5,00	0,47	1,07	87,70
	П4	50,17	12,95	14,88	11,30	–	–	1,20	5,00	–	4,50	5,00	0,47	1,06	90,98
	П5	48,20	15,68	14,12	11,30	–	–	1,20	5,00	–	4,50	5,00	0,48	0,82	87,43

Анализ полученных данных позволил установить, что по значению показателя координационных чисел бора и алюминия  $\psi_B = 1,18–1,40$  для белых эмалей и  $1,06–1,56$  – прозрачных структурное состояние Al и B в составах Б1–Б5 и П1–П4 находится в четверной координации  $AlO_4$  и  $BO_4$ , что обеспечивает образование единого алюмоборокремнекислородного каркаса с высокой степенью связанности  $0,38–0,40$  для белых эмалей и  $0,46–0,47$  – прозрачных. Это обеспечивает формирование непрерывного в двух измерениях алюмоборокремнекислородного каркаса, в которой основными структурными единицами являются структурные группировки  $[BO_4]^{5-}$ ,  $[AlO_4]^{5-}$  имеющие тетраэдрическую координацию и  $[SiO_4]^{4-}$  в которых два атома кислорода являются мостиковыми, а два – немостиковыми. При этом отрицательный заряд анионной группировки частично компенсируется ионами  $Na^+$  и  $K^+$  локализованные в этих тетраэдрах. В результате образуются стабильные группы атомов  $[(SiO_4)Na^+]^{3-}$ ,  $[(BO_4)Na^+]^{4-}$ ,  $[(AlO_4)Na^+]^{4-}$ . Формирование такой структуры предопределяет теплофизические свойства эмалевых покрытий, а именно ТКЛР в диапазоне  $(95–100) \cdot 10^{-7}$ ,  $K^{-1}$  для белых и  $(87–102) \cdot 10^{-7}$ ,  $K^{-1}$  для прозрачных эмалевых покрытий. Это обеспечивает образование минимальных напряжений в системе эмаль–металл в процессе охлаждения композиции и создание в слое покрытия напряжений сжатия, способствующих повышению ее прочности.

Исходными материалами для приготовления грунтовых и покровных сырьевых шихт по заданному составу эмалевых покрытий для стали являлись: кварцевый песок Миллеровского месторождения марки ОВС-020-В, полевой шпат Вишневогорского месторождения марки ПШС-0,50-21, сода кальцинированная, бура, селитра калиевая, селитра натриевая, борная кислота, жженая магнезия марки «ч.д.а.», оксид титана марки «ос.ч», кремнефтористый натрий, триполифосфат натрия, оксид кобальта, оксид никеля марки «х.ч.».

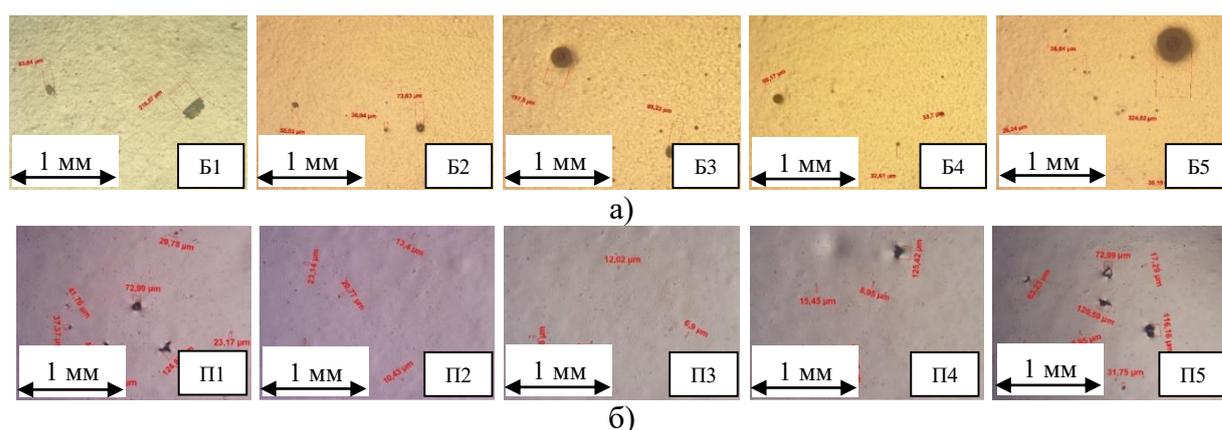
Для приготовления шихт сырьевые компоненты отвешивали на технических весах «Ohaus» PR 224 и смешивали в фарфоровых барабанах на валковой мельнице марки МШЛ 1-с. Варку эмалевых фритт производили в алунодо-

вых тиглях, предварительно помещенных в холодную камерную электрическую печь марки ТК.4.1600.Э.ДМ.1Ф (ООО «Термокерамика») с дальнейшим увеличением ее температуры до 1200–1250 °С с выдержкой 30 минут, охлаждение расплава производилось путем гранулирования в холодную воду. Далее фритты измельчались до прохождения через сито № 0065 и на их основе получали шликерные суспензии, состоящих на 100 % фритты, 40 % воды, 4 % огнеупорной глины Владимирского месторождения, 0,1 % электролитов  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KCl}$ .

Для определения оптимального состава комбинированного грунта были приготовлены 18 шликерных суспензий с разным соотношением грунтовых фритт Г1.4, Г2.2 и Г3.1 разной плавкости и нанесены на низкоуглеродистую сталь марки 08ЮР. Обжиг грунтовых эмалевых покрытий проводился в предварительно разогретой камерной электрической печи при температурах 800, 850, 900 °С с выдержкой 3 минуты. Установлено, что грунтовая эмаль оптимального комбинированного состава КГЭ-40-30-30 имеет следующее соотношение синтезированных грунтовых фритт: Г1.4 – 40 мас.%, Г2.2 – 30 мас.% и Г3.1 – 30 мас.% и характеризуется ТКЛР  $115,29 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$  и максимальной прочностью сцепления 5 баллов.

Шликер синтезированных покровных эмалей наносился на предварительно подготовленные и загрунтованные стальные образцы методом пульверизации, далее образцы сушились 15 мин при температуре 80–90 °С в сушильном шкафу марки ШС-80-01 СПУ. Обжиг образцов проводился в муфельной электрической печи при температуре 850 °С с выдержкой 3 минуты.

После обжига синтезированных покровных эмалевых покрытий для выявления их оптимальных составов производился предварительный визуальный анализ с помощью оптического микроскопа проходящего и отраженного света «ПОЛАР 1» (рисунок 2) и определение их физико-химических и эстетико-потребительских свойств.



**Рисунок 2** – Поверхность покровных эмалей ( $\times 500$ ) серии Б (а) и серии П (б)

Анализ результатов микроскопических исследований стальных эмалированных образцов показал, что на всех образцах серии Б было выявлено два вида дефектов, нарушающие сплошность покрытия:

1 – булавочный укол, представляющий собой кратер от лопнувшего га-

зового пузырька в процессе обжига покровного эмалевого покрытия на грунтовой эмали без оголения металла диаметром 12,01–33,07 мкм для серии Б и 6,90–29,78 мкм для серии П, наличие которого в процессе эксплуатации является местом проникновения коррозионного реагента к поверхности стали и образования гидроксидов железа;

2 – прогар, представляющий собой явление, связанное с местным переизбытком расплава эмали гематитом  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , который выделяется в виде черных кристаллов в местах образовавшихся кратеров лопнувших пузырей размером 9,84–324,52 мкм для серии Б и 37,37–125,42 мкм для серии П.

Установлено, что наименьшим количеством дефектов и наибольшими показателями блеска и сплошностью характеризуются эмалевые покрытия составов Б4 и П2. Однако, так как разрабатываемые облицовочные панели с эмалевым покрытием будут эксплуатироваться в условиях агрессивной внешней атмосферы, то наличие даже микроскопических дефектов могут привести к коррозии и разрушению покрытия. Поэтому, для устранения данных видов дефектов необходима модификация составов эмали посредством изменения поверхностной активности силикатных расплавов с помощью добавок поверхностно активных веществ.

Модификация эмалевых покрытий проводилась двумя способами:

1. Частичная замена ионов щелочных металлов с натрия на калий в составе эмалевых фритт, так как парциальный коэффициент поверхностного натяжения  $\text{Na}_2\text{O}$  в расплаве составляет 0,295 Н/м, а у  $\text{K}_2\text{O}$  значительно ниже – 0,001 Н/м.

2. Введение поверхностно-активных комплексных анионов  $[\text{WO}_4]^{2-}$ ,  $[\text{MoO}_4]^{2-}$ ,  $[\text{VO}_3]^-$ ,  $[\text{AsO}_3]^{3-}$  сверх 100 % в количестве 0,05–0,20 % на помол в шликерные суспензии водорастворимыми соединениями: гексахлорид вольфрама, аммоний молибденовокислый, метаванадат аммония, сульфат мышьяка.

Анализ дефектности структуры полученных

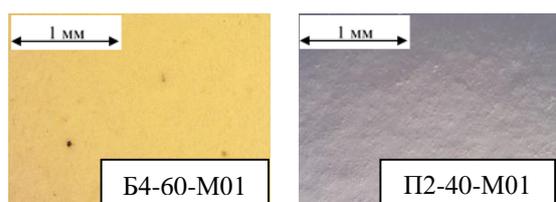


Рисунок 3 – Модифицированные стеклоэмалевые покрытия ( $\times 500$ )

эмалевых покрытий показал, что наибольшей поверхностной активностью обладает комплекс анионов  $[\text{MoO}_4]^{2-}$ , так как количество оксида молибдена 0,1 % обеспечивает полное заглавление всех образовавшихся кратеров после лопнувших пузырей и соответственно отсутствие дефектов сплошности (рисунок 3).

Остальные поверхностно-активные анионы в виде оксидов  $\text{WO}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{As}_2\text{O}_3$  обладают более низкими значениями поверхностной энергии и в таких количествах практически не влияют на поверхностное натяжение силикатных расплавов.

Таким образом, установлена оптимальная комплексная модифицирующая добавка обеспечивающая бездефектное формирование эмалевых покрытий на стали: 30 %  $\text{K}_2\text{O}$  от  $\text{R}_2\text{O}$  в грунтовом покрытии Г1.4, в покровных Б4 и П2 – 60 и 40 % соответственно, и введение поверхностно-активного комплексного аниона  $[\text{MoO}_4]^{2-}$  в форме аммония молибденовокислого в количестве 0,1 % позволяет получать качественные эмалевые покрытия.

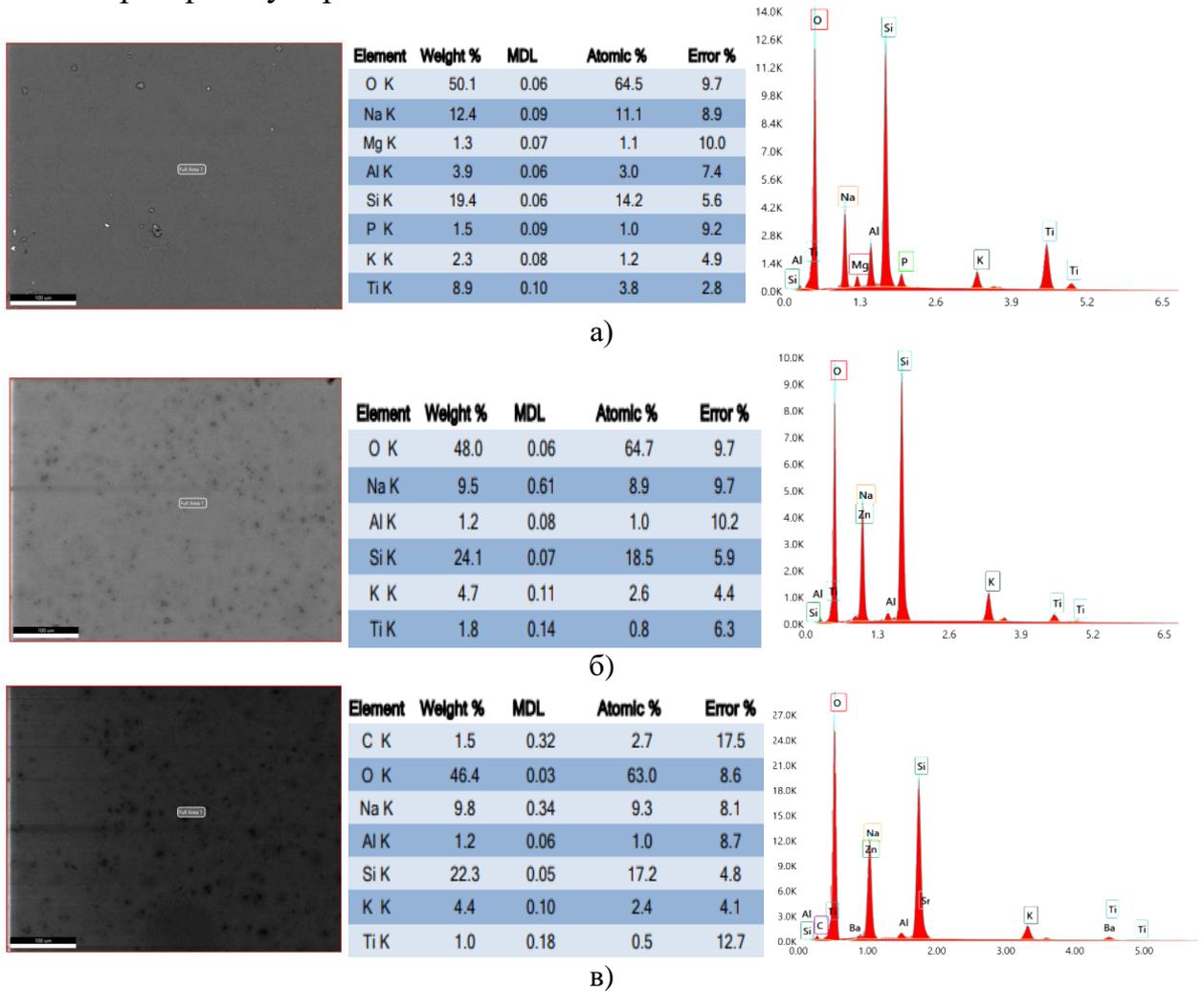
Сравнительные показатели физико-химических и эстетико-потребительских свойств данных синтезированных оптимальных модифицированных эмалевых покрытий приведены в таблице 3.

**Таблица 3** – Физико-химические и эстетико-потребительские эмалевых покрытий

Наименование свойства	Значения в соответствии с требованиями ГОСТ	Эмалевое белое покрытие 2С/2F (ЭСП-117)	Эмалевое прозрачное покрытие 2С/2F (ЭСП-210)	Показатели свойств	
				Б4-60-М01	П2-40-М01
ТКЛР, ГОСТ Р 52569–2018	$(90–115) \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$	90–115	90–105	93,96	100,71
Растекаемость, ГОСТ Р 52569–2018	30–60 мм	41	35–45	48	50
Химическая стойкость к 4 %-ой уксусной кислоте, ГОСТ Р 52569–2018	Не ниже класса А	А	А	А	А
Стойкость к холодной кислоте, ГОСТ 29021-91	Не ниже класса А	А	А	А	А
Стойкость к горячей кислоте, ГОСТ 29020-91	Не выше 10 г/м <sup>2</sup>	2	2	1,8	1,9
Цветовой оттенок, ГОСТ Р 52569–2018	В соответствии с образцом, согласованным в установленном порядке	кремовый	–	белый	–
Коэффициент диффузного отражения по МС-20 (белизна), ГОСТ Р 52569–2006	Не менее 75 %	83,05	–	90,81	–
Толщина покрытия, ГОСТ 24788–2018	Не менее 0,2 мм	0,20–0,25	0,20–0,25	0,20–0,25	0,20–0,25
Ударная прочность, ГОСТ 24788–2018	Не менее 0,39 (0,04) Дж (кгс·м)	0,39	0,39	0,39	0,39
Твердость покрытия, ГОСТ Р 52569–2018	Не менее 5 ед.	6	6	6	6
Термическая стойкость после двух циклов испытания (20 °С–100 °С–20 °С–232 °С–20 °С), ГОСТ 24788–2018	Не должно иметь трещин и отколов	Не имеет	Не имеет	Не имеет	Не имеет
Водостойкость после кипячения в воде в течение 48 ч	Не более 0,50 г/м <sup>2</sup> сут	0,50	0,50	0,48	0,47
Водостойкость после воздействия водяного пара в течение 48 ч, ГОСТ 24788–2018	Не более 1,30 г/м <sup>2</sup> сут	1,28	1,27	1,21	1,20
Атмосферная стойкость, ГОСТ 9.401-2018	Стойкое	Не стойкое	Не стойкое	Стойкое	Стойкое

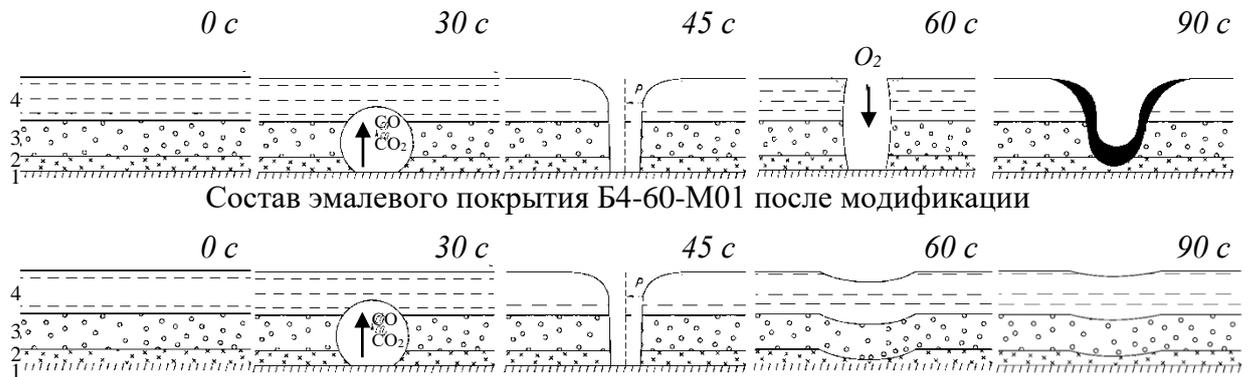
Для изучения особенностей структуры были проведены микроструктурные исследования и определение элементного состава различных участков с целью оценки однородности покрытия после обжига составов Б4-60-М01, П2-40-М01 (рисунке 4), по результатам которого установлено, что на микрофотографиях фиксируется визуальная неоднородность поверхности покрытия, однако анализ элементного состава различных участков показал, что они одинаковы по химическому составу и образовались в ходе формирования

покрытия при интенсивном выделении газообразной фазы и быстром заплывании кратеров пузырей.



**Рисунок 4** – Микроструктура и определение элементного состава различных участков эмаливого состава Б4-60-M01 (а) и П2-40-M01 (б, в)

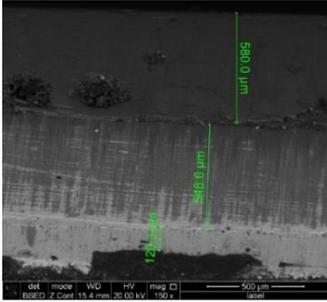
Состав эмаливого покрытия Б4 до модификации



**Рисунок 5** – Схема температурно-временной трансформации покрытия на стали: 1– сталь; 2 – переходной слой; 3 – грунтовая эмаль; 4 – покровная эмаль

В результате сравнительного анализа температурно-временной трансформации (рисунок 5) покровной эмали состава Б4 до и после модификации установлено, что при введении комплексной модифицирующей добавки ионов

$K^+$  и комплексов анионов  $[MoO_4]^{2-}$ , действие межмолекулярных сил которых в поверхностном слое расплава направлено на уменьшение силы поверхностного натяжения расплава, способствует быстрому бесследному заплыванию кратеров лопнувших газовых пузырей.



**Рисунок 6 –**  
Микроструктура системы  
«сталь – эмаль»

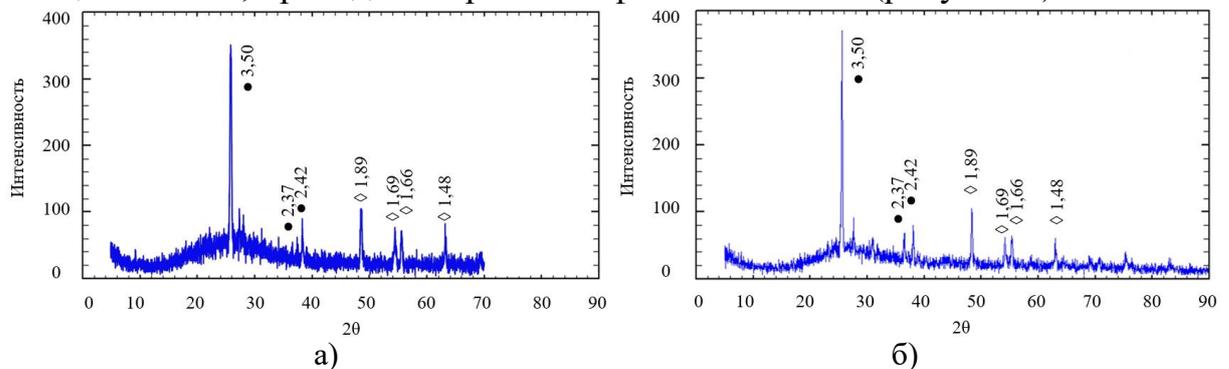
Установлено, что механизм прочного сцепления эмали со стальной основой (рисунок 6) возникает благодаря явлению адгезии, в основе которой лежат два фактора: химическая связь как качественный и гальваническая коррозия как количественный факторы.

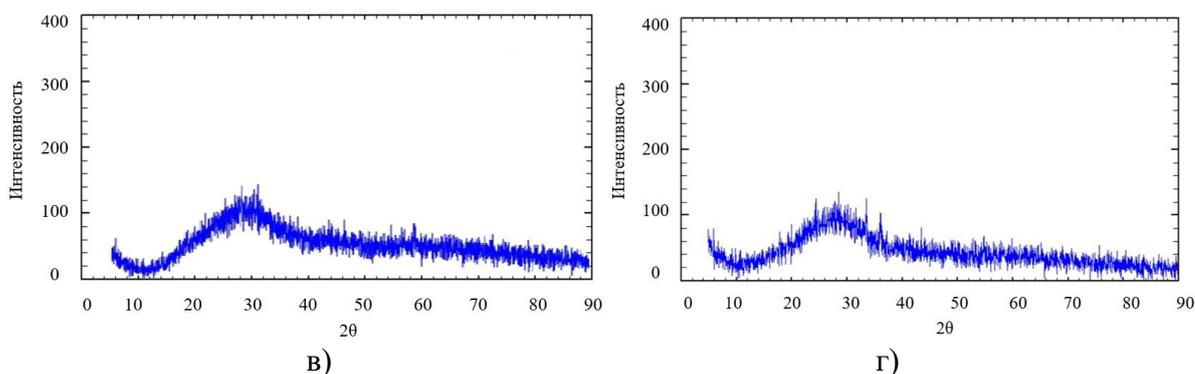
**В четвертой главе** (Разработка стекловидных и стеклокристаллических эмалевых покрытий с высокими декоративными свойствами для защиты стальных облицовочных панелей) для разнообразия внешнего облика зданий и сооружений в зависимости от их сферы использования проведена разработка составов эмалевых покрытий для стальных облицовочных панелей различных цветов. Цветовое глушение эмалевых покрытий проводили красителями, для чего в состав шликерных суспензий были введены (сверх 100 %) оксиды *d*- и *f*-элементов (таблица 4).

**Таблица 4 – Вид и количество вводимого красителя**

№ цвета	Состав для введения красителя	Наименование красителя	Количество красителя сверх 100%, %	Цвет эмали
1	Б4-60-М01	$Cu_2O$	1,5	Голубой
2	Б4-60-М01	$Pr_2O_3$	1,0	Бежевый
3	Б4-60-М01	$Cr_2O_3$	1,0	Светло-зеленый
4	Б4-60-М01	$Nd_2O_3$	1,0	Кремовый
5	Б4-60-М01	$K_2Cr_2O_7$	0,5	Салатовый
6	П2-40-М01	$NiO$	2,0	Темно-желтый
7	П2-40-М01	$Cr_2O_3 + Cu_2O$	1,0 + 1,0	Темно-зеленый
8	П2-40-М01	$V_2O_5$	2,5	Янтарный
9	П2-40-М01	$V_2O_5$	1,0	Светло-янтарный

Для определения фазового состава элементов, присутствующих в эмалевых покрытиях, а также для сравнения влияния пигментов на процесс кристаллизации эмалей, проведен их рентгенофазовый анализ (рисунок 7).





**Рисунок 7** – Порошковая рентгеновская дифрактограмма покровных эмалей Б4-60-М01 (а), Б4-60-М01 +  $\text{Cu}_2\text{O}$  (б); П2-40-М01 (в), П2-40-М01 +  $\text{NiO}$  (г): ● – анатаз, ◆ – рутил

В результате анализа рентгенограмм установлено, что фазовый состав белой эмали состава Б4-60-М01 представлен аморфной стеклофазой и кристаллами глушителя в форме анатаза и рутила, а прозрачная эмаль состава П2-40-М01 полностью находится в стекловидной фазе, а вводимые пигменты в количестве 0,5 и 2,5 %, при термообработке переходят в аморфный расплав,

Разработана методология оценки антивандальных свойств облицовочных панелей с различными покрытиями в которую входят следующие параметры: устойчивости к механическому воздействию, к нанесению и последующему удалению «граффити», огнестойкости и светостойкости. В качестве образцов для испытаний были использованы синтезированные составы окрашенных покровных белой (Б4-60-М01) и прозрачной (П2-40-М01) эмалей, а также для сравнения использовали образец стали с полиэстровым покрытием Velur завода «Grand Line». Установлено, что стеклоэмалевые покрытия характеризуются наилучшими показателями антивандальных свойств: твердость по Моосу – 6; удаление затвердевшей алкидной краски – 5 баллов (полное удаление без изменения свойств); огнестойкость – не поддерживает горение (оплавляется за 2,43 минуты при 1270 °С), светостойкость –  $\Delta E \leq 0,5$ .

**В пятой главе** (Опытно-промышленная апробация составов для антивандальных стальных облицовочных панелей с внешним стекловидным и стеклокристаллическим эмалевым покрытием) Опытно-промышленные испытания грунтовой и покровной эмалей проводились в производственных условиях ООО «ТД Сила Дон» (г. Ростов-на-Дону, Ростовская обл., Россия).

На основании результатов проведенных испытаний составы синтезированных грунтовых и атмосферостойких покровных эмалей могут использоваться для производства стальных антивандальных облицовочных панелей с внешним эмалевым покрытием, которые по своим свойствам полностью удовлетворяют требованиям нормативной документации и могут использоваться для защиты и улучшения эстетико-потребительских качеств архитектурно-строительных сооружений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Итоги выполненного исследования:

1. Установлены области и закономерности стеклообразования в системе

$\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{R}_x\text{O}_y$ , в которой могут быть синтезированы эмалевые покрытия, характеризующиеся значениями структурных показателей  $\psi_{\text{B}}$ ,  $f_{\text{Si,B,Al}}$ , обеспечивающими формирование единого алюмоборокремнекислородного каркаса с высокой степенью связанности и их заданные технологические и технико-эксплуатационные свойства и разработаны новые составы эмалевых покрытий с высокой атмосферной стойкостью, что позволяет эксплуатировать эмалированные облицовочные панели в широком температурном диапазоне (перепады температур от  $-30$  до  $+450$  °С, влажность до 99 %, солевой туман).

2. Установлены физико-химические закономерности стеклообразования в системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{R}_x\text{O}_y$  для получения эмалевых покрытий путем варьирования значений показателей связанности алюмоборокремнекислородного каркаса и установлено, что их значения должны лежать в диапазоне  $\psi_{\text{B}} = 1,18-1,40$ ,  $f_{\text{Si,B,Al}} = 0,38-0,40$  для белых и  $\psi_{\text{B}} = 1,06-1,56$ ,  $f_{\text{Si,B,Al}} = 0,46-0,48$  – для прозрачных эмалей.

3. На основании систематического исследования в стеклообразной системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{R}_x\text{O}_y$  разработаны 18 составов грунтовых стеклоэмалевых покрытий для обеспечения прочного сцепления в системе сталь–эмаль с варьированием соотношения тугоплавких и легкоплавких фритт. Разработан оптимальный состав комбинированного грунтового покрытия состава КГЭ-40-30-30, мас. %:  $\text{SiO}_2$  43,1;  $\text{B}_2\text{O}_3$  20,4;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  5,9;  $\text{Na}_2\text{O}$  19,8;  $\text{TiO}_2$  0,6;  $\text{CaF}_2$  7,4;  $\text{MnO}_2$  0,3;  $\text{Co}_2\text{O}_3$  0,7;  $\text{NiO}$  1,8 с интервалом обжига  $810-860$  °С, ТКЛР  $109,92 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ , толщиной  $0,10-0,15$  мм, прочностью сцепления 4–5 баллов и растекаемостью 61 мм.

4. В стеклообразной системе  $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{R}_x\text{O}_y$  разработаны две серии составов покровных эмалей для защиты стальных облицовочных панелей, из которых оптимальные Б4 (белая) и П2 (прозрачная), характеризующиеся следующими свойствами: ТКЛР –  $96,28; 102,73 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ; растекаемость – 47; 48 мм; 4 %-ой уксусной кислоте – класс А; ударная прочность – 0,39 (0,04) Дж (кгс·м); водостойкость – 0,50; 0,49 г/м<sup>2</sup>сут; стойкость к водяному пару – 1,30; 1,28 г/м<sup>2</sup>сут; термическая стойкость – нет дефектов после двух циклов испытания.

5. Установлена зависимость влияния количества и соотношения основных оксидов в составе эмалевых покрытий для стальных облицовочных панелей на их склонность к дефектообразованию и их атмосферную стойкость. Выявлено, что оптимальное соотношение стеклообразователей  $\text{SiO}_2/\text{B}_2\text{O}_3$  для белых покровных эмалей – 3,2–3,6, для прозрачных покровных – 3,0–4,4, а соотношение модификаторов  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  для белых покровных эмалей 1,6–1,9, для прозрачных покровных – 11,5–15,0, что способствует формированию более прочных связей аморфной стеклообразной структуры, обеспечивающей оптимальные вязкостные характеристики расплава.

6. Произведена модификация составов с целью предотвращения дефектов посредством изменения поверхностной активности силикатных расплавов частичной заменой  $\text{R}_2\text{O}$  оксидом калия в количестве 30 % в грунтовом покрытии Г1.4, позволяющая получать качественное комплексное грунтовое эмале-

вое покрытие состава КГЭ-40-30-30 облицовочных панелей в агрессивных атмосферных средах.

7. Установлены закономерности влияния комплексной модифицирующей добавки ( $K_2O=0,6(0,4) \cdot R_2O$  и  $MoO_3=0,1 \%$ ), снижающей поверхностное натяжение расплавов эмалевых покрытий в процессе их формирования на загрунтованной стальной основе при обжиге, что способствует образованию высокополяризованных катионов  $K^+$  и комплексов анионов  $[MoO_4]^{2-}$ , действие которых в поверхностном слое расплава стекла направлено на уменьшение площади его поверхности, что обеспечивает бездефектное формирование покровных эмалей.

8. Получены новые данные о физико-химических процессах, протекающих при формировании оптимальных грунтовых и покровных эмалей на стали и микро- и макроструктуры в системе сталь–эмаль, обеспечивающей прочное сцепление субстрата и покрытия, а также установлении влияния температурно-временного режима обжига эмалевых покрытий на их структуру и свойства. В результате исследований разработана технология получения эмалевых покрытий на стальных изделиях облицовочного назначения, отличающимися высокими эстетико-потребительскими и технико-эксплуатационными свойствами.

9. Для разнообразия внешнего облика зданий и сооружений в зависимости от их сферы использования была проведена разработка 9 составов эмалевых покрытий различных цветов и оттенков с показателями цвета RGB: пастельно-бирюзовый (127; 181; 181), темный хаки (189; 183; 107), зеленый папоротник (79; 121; 76), миндаль Крайола (234; 221; 796), папоротник Крайола (135; 190; 114), нарциссово-желтый (220; 157; 0), миртовый (33; 66; 30), дынно-желтый (244; 165; 0), шафраново-желтый (248; 205; 68) для стальных облицовочных панелей.

10. Предложена методология проверки антивандалных качеств облицовочных панелей с различными покрытиями для оценки их устойчивости к механическому воздействию, к нанесению и последующему удалению «граффити», огнестойкости. В результате установлено, что испытуемые синтезированные покрытия Б4-60-М01 и П2-40-М01 по сравнению с образцом стали с полиэфирным покрытием Velur завода «Grand Line» характеризуются наилучшими показателями антивандалных свойств: твердость по Моосу – 6 ед.; удаление затвердевшей алкидной краски – 5 баллов (полное удаление без изменения свойств); огнестойкость – не поддерживает горение (оплавляется за 2,43 минуты при 1270 °С); светостойкость –  $\Delta E \leq 0,5$ .

Теоретические и практические результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения на предприятиях по производству стальных облицовочных панелей в различных регионах РФ.

**Перспективы дальнейших исследований** связаны с разработкой технологии и изучением особенностей формирования микроструктуры и фазового состава эмалевых покрытий для стальных облицовочных панелей, модифицированных комплексной добавкой, способствующей повышению атмосферной стойкости эмалевых покрытий.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ  
ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

***В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий,  
рекомендованных ВАК при Минобрнауки России***

1. Яценко, Е.А. Влияние структуры и фазового состава стеклоэмалевых покрытий для защиты стальных изделий от коррозии на их свойства / Е.А. Яценко, Л.В. Климова, **А.Ю. Величко** [и др.] // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. техн. науки. – 2017. – № 1. – С. 93–99.

2. Рябова, А.В. Исследование влияния корректирующих добавок в шликерную суспензию на технико-эксплуатационные свойства стеклоэмалевых покрытий / А.В. Рябова, Е.А. Яценко, Л.В. Климова, **А.Ю. Фанда** // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. техн. науки. – 2019. – № 4. – С. 43–49.

3. Рябова, А.В. Изучение формирования структуры стеклоэмалевых покрытий для стальных архитектурно-строительных панелей / А.В. Рябова, **А.Ю. Фанда**, В.М. Курдашов [и др.] // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. техн. науки. – 2022. – № 2. – С. 79–87.

4. Рябова, А.В. Цветные стеклоэмалевые покрытия для стальных архитектурно-строительных панелей / А.В. Рябова, В.Д. Ткаченко, **А.Ю. Фанда** // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. техн. науки. – 2023. – № 1. – С. 80–90.

***В изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России***

5. Yatsenko, E.A. Synthesis and Investigation of White Glass-Ceramic Enamel Coatings for Steel Products / E.A. Yatsenko, L.V. Klimova, E.V. Filatova, **A.Y. Velichko** // Glass Physics and Chemistry. – 2017. – Vol. 43. – No. 1. – P. 34–42. DOI: 10.1134/S1087659617010138 (Web of Science, Scopus)

6. Ryabova, A.V. Glass Enamel Monolayer Coating for the Protection of Steel Articles Against Corrosion / A.V. Ryabova, E.A. Yatsenko, **A.Y. Fanda** // Glass Physics and Chemistry. – 2019. – Vol. 45. – No. 1. – P. 82–84. DOI: 10.1134/S1087659619010085 (Web of Science, Scopus)

***В изданиях, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science***

7. Klimova, L.V. Crystallization Peculiarities of White Glass-Enamel Coatings for Steel Products / L.V. Klimova, A.V. Ryabova, **A.Y. Fanda** // Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 2019. – Vol. 945. – P. 665-669. DOI:10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/MSF.945.665 (Scopus)

8. Ryabova, A.V. Development of Compositions of New Enamel Coatings with Various Operational and Decorative Properties to Protect Steel Architectural and Construction Panels / A.V. Ryabova, **A.Y. Fanda**, E.A. Yatsenko, Ming-Gin Lee // Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 2021. – Vol. 1037. – P. 684-692. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.684 (Scopus)

***В других рецензируемых изданиях***

9. Яценко, Е.А. Исследование спектрофотометрических характеристик белых стеклокристаллических эмалевых покрытий / Е.А. Яценко, А.В. Рябова, **А.Ю. Величко** [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3878>.

### *В сборниках трудов конференций*

10. *Рябова, А.В.* Ресурсосберегающие технологии эмалирования стальных изделий [Электронный ресурс] / А.В. Рябова, **А.Ю. Величко**, М.В. Давитян, В.В. Хорошавина // *Фундаментальные и прикладные науки сегодня: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. (21–22 декабря 2015 г.)*. – Северный Чарльстон, США, 2015. – Т. 2. – С. 73–79. – Режим доступа: <http://today.science-publish.ru/maket2.pdf>.

11. **Величко, А.Ю.** Система CIE Lab для оценки оттенков белых стеклокристаллических эмалевых покрытий / А.Ю. Величко, К.А. Фанда, А.В. Рябова // *Интеллектуальный и научный потенциал XXI века: сб. ст. Междунар. науч.-практ.-конф. (г. Казань, 20 дек. 2016 г.)*. – г. Казань, 2016. – Ч. 4. – С. 42–44.

12. **Величко, А.Ю.** Рентгенофазный анализ (РФА) белого стеклокристаллического эмалевого покрытия / А.Ю. Величко, К.А. Фанда, А.В. Рябова // *Интеллектуальный и научный потенциал XXI века: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Казань, 20 дек. 2016 г.)*. – г. Казань, 2016. – Ч. 4. – С. 44–46.

13. *Яценко, Е.А.* Стекла для получения белых покровных стеклокристаллических покрытий для стальных изделий / Е.А. Яценко, А.В. Рябова, **А.Ю. Величко** [и др.] // *Стеклопрогресс – XXI: сб. докл. 8-й Междунар. конф. (17–20 мая 2016 г. Саратов)*. – г. Саратов, 2016. – С. 202–206.

14. **Фанда, А.Ю.** Определение и исследование цветовых характеристик эмалевых покрытий / А.Ю. Фанда // *Лучшая научная статья 2017: сб. ст. XIV Междунар. науч.-практ. конкурса, (г. Пенза, 25 дек. 2017 г.)*. – г. Пенза, 2017. – С. 18–20.

15. *Рябова, А.В.* Синтез стеклокристаллических покрытий для стальных облицовочных панелей / А.В. Рябова, **А.Ю. Фанда** // *Результаты исследований – 2020: материалы V Национальной конф. профессорско-преподавательского состава и научных работников (г. Новочеркасск, 15 мая 2020 г.)*. – г. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2020. – С. 153–156.

16. *Ryabova, A.V.* Functional Protective Coatings for Steel Architectural Construction Panels / A.V. Ryabova, **A.Y. Fanda**, S.V. Trofimov // *MATEC Web of Conferences. – 2021: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2021). Sevastopol. – 2021. – Vol. 346. – P. 1–8. DOI.org/10.1051/matecconf/202134602041.*

### *Патенты РФ на изобретение*

17. Пат. 2630518 Российская Федерация МПК С03С 8/08 Белое стеклоэмалевое покрытие для стали / Рябова А.В., Климова Л.В., Филатова Е.В., **Величко А.Ю.**; заявитель и патентообладатель Рябова А.В., Климова Л.В., Филатова Е.В., Величко А.Ю. – № 2015151758; заявл. 02.12.2015; опубл. 11.09.2017, Бюл. № 26 – 6 с.

18. Пат. 2668595 Российская Федерация МПК С03С 8/06 Стеклоэмалевое покрытие для стальных изделий / Рябова А.В., Хорошавина В.В., Климова Л.В., **Величко А.Ю.**; заявитель и патентообладатель Рябова А.В., Хорошавина В.В. – № 2016149705; заявл. 16.12.2016; опубл. 18.06.2018, Бюл. №17 – 6 с.

**ФАНДА АННА ЮРЬЕВНА**

**СТЕКЛОВИДНЫЕ И СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ЭМАЛЕВЫЕ  
ПОКРЫТИЯ ДЛЯ СТАЛЬНЫХ ОБЛИЦОВОЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ**

2.6.14. Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

---

---

Подписано в печать 01.02.2024.  
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 460045

Отпечатано в Южно-Российском государственном  
политехническом университете (НПИ) имени М.И. Платова  
346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132