

STUDY OF THE INFLUENCE OF B₂O₃ OXIDE ON THE PHYSICAL AND TECHNICAL PROPERTIES OF GROUND ENAMEL OBTAINED BASED ON LOCAL RAW MATERIAL COMPONENTS

Shoxrux B. NAIMOV

Tashkent Institute of Chemical Technology, Tashkent, Uzbekistan, shoxruxnaimov820@gmail.com

Mastura Kh. ARIPOVA

Tashkent Institute of Chemical Technology, Tashkent, Uzbekistan, aripova1957@yandex.com

Follow this and additional works at: <https://cce.researchcommons.org/journal>

 Part of the [Materials Science and Engineering Commons](#)

Recommended Citation

NAIMOV, Shoxrux B. and ARIPOVA, Mastura Kh. () "STUDY OF THE INFLUENCE OF B₂O₃ OXIDE ON THE PHYSICAL AND TECHNICAL PROPERTIES OF GROUND ENAMEL OBTAINED BASED ON LOCAL RAW MATERIAL COMPONENTS," *CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING*: Vol. 2024: No. 1, Article 4.
DOI: 10.34920/cce202414

Available at: <https://cce.researchcommons.org/journal/vol2024/iss1/4>

This Article is brought to you for free and open access by Chemistry and Chemical Engineering. It has been accepted for inclusion in CHEMISTRY AND CHEMICAL ENGINEERING by an authorized editor of Chemistry and Chemical Engineering. For more information, please contact zuchra_kadirova@yahoo.com.

STUDY OF THE INFLUENCE OF B_2O_3 OXIDE ON THE PHYSICAL AND TECHNICAL PROPERTIES OF GROUND ENAMEL OBTAINED BASED ON LOCAL RAW MATERIALS

Shokhrukh B. NAIMOV (shoxruxnaimov820@gmail.com)
Mastura Kh. ARIPOVA (aripova1957@yandex.com)
Tashkent Institute of Chemical Technology, Tashkent, Uzbekistan

The purpose of the study was to obtain ground enamel based on local raw materials and to study the effect of boron oxide. The selection of local raw materials for producing ground enamel showed that the resulting glass compositions are in the $SiO_2-Al_2O_3-Na_2O-K_2O-CaO-B_2O_3$ system. To adjust the properties, additives of nickel oxide and cobalt oxide were used. The properties of the developed compositions of primer enamels meet the requirements of GOST 24405-80. It has been determined that the addition of boron and an increase in its amount in the glass composition increases spreadability and reduces surface tension. The study of the structural features of the synthesized glasses using IR spectroscopy made it possible to establish the presence of 4-fold coordinated boron and the appearance of 6-fold coordinated boron compounds with increasing its content.

Keywords: ground enamel, glass, spreadability, surface tension, IR spectra

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОКСИДА B_2O_3 НА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВАННОЙ ЭМАЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ НА ОСНОВЕ МЕСТНЫХ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Шохрух Б. НАИМОВ (shoxruxnaimov820@gmail.com)
Мастура Х. АРИПОВА (aripova1957@yandex.com)
Ташкентский химико-технологический институт, Ташкент, Узбекистан

Целью исследования являлось получение грунтовой эмали на основе местных сырьевых компонентов и исследование влияния оксида бора. Выбор местных сырьевых компонентов для получения грунтовой эмали показал, что получаемые составы стекол находятся в системе $SiO_2-Al_2O_3-Na_2O-K_2O-CaO-B_2O_3$. Для корректировки свойств использовали добавки оксида никеля и оксида кобальта. Свойства разработанных составов грунтовых эмалей соответствуют требованиям ГОСТ 24405-80. Определено, что добавка бора и увеличение ее количества в составе стекла увеличивает растекаемость и снижает поверхностное натяжение. Исследование структурных особенностей синтезированных стекол методом ИК спектроскопии позволило установить присутствие 4-кратно координированного бора и появление 6-кратно координированных соединений бора при увеличении его содержания.

Ключевые слова: грунтовая эмаль, стекло, растекаемость, поверхностное натяжение, ИК спектры

MAXALLIY XOMASHYOLAR ASOSIDA OLINGAN, GRUNTLI EMALNING FIZIKSIY-TEKNIK XUSUSIYATLARIGA B_2O_3 OKSIDNING TA'SIRINI O'RGANISH

Shohruh B. NAIMOV (shoxruxnaimov820@gmail.com)
Mastura X. ARIPOVA (aripova1957@yandex.com)
Toshkent kimyo-texnologiya instituti, Toshkent, O'zbekiston

Tadqiqotdan maqsad mahalliy xomashyolar asosida gruntli emal olish va unga bor oksidi ta'sirini o'rganish. Gruntli emal ishlab chiqarish uchun mahalliy xom ashyolarni tanlash natijasida olingan shisha kompozitsiyalar $SiO_2-Al_2O_3-Na_2O-K_2O-CaO-B_2O_3$ tizimida ekanligi aniqlandi. Kerakli xususiyatlarni ta'minlash uchun nikel oksidi va kobalt oksidi qo'shimchalari ishlatildi. Gruntli emallar uchun ishlab chiqilgan kompozitsiyalarning xususiyatlari GOST 24405-80 talablariga muvofiq kelishi aniqlandi. Shisha tarkibiga bor qo'shilishi va uning miqdorini oshirish emalning yoyilish qobiliyatining ortishi va sirt tarangligining kamayishiga ta'sir etishi aniqlandi. Sintezlangan shishalar strukturaviy xususiyatlarini IQ spektroskopiyasi yordamida o'rganish 4 karra koordinatsiyalangan bor mavjudligini va uning tarkibini ko'paytirish bilan 6 karra koordinatsiyalangan bor birikmalarining paydo bo'lishini aniqlashga imkon berdi.

Kalit so'zlar: gruntli emal, shisha, yoyiluvchanlik, sirt tarangligi, IQ spektrlari

DOI: 10.34920/cee202414

Введение

Эмалевые покрытия отличаются твердостью, износостойкостью, абразивостойкостью, коррозионной стойкостью, термо- и жаростойкостью и высокими декоративными качествами. Они гигиеничны, нетоксичны, повышают срок службы изделий, экономичны. Так как позволяют применять взамен нержавеющей стали и драгоценных металлов более дешевые материалы. Технические эмали наносятся на изделия из чугуна, стали, алюминия и сплавов легких металлов и предназначаются для защи-

ты изделий от кислот, щелочей и для снижения коэффициента абсорбции нейтронов. Хозяйственные эмали наносят на посуду, стиральные машины, санитарно-техническое оборудование, электроосветительную аппаратуру и др. [1].

В зависимости от фазового состава и технологии формования различают покрытия: стекломалевые, состоящие практически полностью из стеклофазы: стеклокристаллические, содержащие до 50% высокодисперсной (5-7 мкм) кристаллической фазы; композиционные - стеклокерамические, стеклометаллические [2].

Эмали делят на грунтовые и покровные. Грунтовые эмали наносят на изделия первым слоем (грунтом), который хорошо сцепляется с металлом. Грунтовые эмали содержат, мас. %: 50—60 SiO₂; 2—8 Al₂O₃; 4—10 CaO; 12—30 Na₂O; 0—30 B₂O₃ и незначительные количества других оксидов, а также 7-9 % фтора. Покровные эмали, которыми покрывают грунтовый слой, подразделяются на глухие (белые и окрашенные) и прозрачные (бесцветные или окрашенные). Покровные эмали различают декоративные, защитно-декоративные, химически стойкие, самоочищающиеся, погодостойкие, электролюминесцентные, жаростойкие, электроизолирующие [3].

Для приготовления эмалей используют те же виды сырья, что и при производстве стекла служат: для введения кислотных оксидов – кремнезем, фосфорный ангидрид, борная кислота: для введения основных оксидов - сода, поташ, карбонат кальция, соединения магния, свинцовый сурик; для одновременного введения кислотных и щелочных оксидов - бура, полевой шпат, каолин. Как вспомогательное сырье используются окислители - селитра, нитраты бария и натрия, сцепляющие оксиды (обеспечивающие сцепление эмали с металлом) - оксиды кобальта, никеля, марганца в др. глушители - фосфаты, фторсодержащие соединения, оксиды олова, титана, соединения сурьмы и мышьяка. Для получения цветных эмалей используют красители (оксиды кобальта, марганца, меди, хрома, железа) и пигменты, изготовленные из смесей оксидов железа, хрома, кобальта, алюминия, цинка и др. [4].

Одним из основных свойств грунтовой эмали является то, что она плавится под воздействием температуры и покрывает поверхность металла. Оксид бора входит в состав большинства грунтовых эмалей [5, 6] и является основным фактором распределения грунта по поверхности металла. Чем больше оксида бора добавлено в состав, тем ниже температура плавления, тем легче растекается грунтовка по поверхности металла и образуется равномерная однородная система [7-11].

Добавка оксида бора снижает температуру плавления, подавляет растрескивание. Контроль за содержанием оксида бора в технологическом процессе позволяет достигать одинаковых коэффициентов теплового расширения

глазури и покрываемого ею материала, что обеспечивает механическую прочность, износоустойчивость, водонепроницаемость, стойкость к агрессивным средам конечного изделия [12]. Оксид бора влияет на свойства конечного продукта, выполняя одновременно роль флюса и связующего. При введении оксида бора посредством буры, она также служит источником натрия [13].

Для синтеза покровных стекломалевок покрытий выбрана алюмоборосиликатная система R₂O-RO-B₂O₃-Al₂O₃-SiO₂-TiO₂-P₂O₅-F, как наиболее приемлемая в технологии двухслойного эмалирования, которое должно обеспечивать не только высокую стойкость эмали, но и бездефектное формирование покрытия, что возможно при определенных значениях физико-химических свойств. С целью увеличения ТКЛР, улучшения блеска и снижения тугоплавкости эмалевого покрытия в состав шихт вводили фтор сверх 100 %, который в присутствии B₂O₃ и Al₂O₃ заметно повышает химическую стойкость покрытия, что объясняется способностью фтора связывать в соединения малостойкие оксиды щелочных и щелочноземельных металлов [14].

Обзор известных составов промышленных эмалевых покрытий показал, что основой для их получения по технологии суспензионного обжига являются боросиликатные стекла, в которых суммарное содержание базовых оксидов, таких как SiO₂, B₂O₃ и Na₂O, находится в пределах 70-90 мол.%. Поэтому эти компоненты оказывают большое влияние на значения вязкости, поверхностного натяжения, температурного коэффициента линейного расширения и водостойкости стеклянной фритты; Эти свойства учитываются при разработке новых составов эмалей [15-19].

Отмечая важность структурного фактора в эмалях, авторы [20-24] считают, что в боросиликатных стеклах особого внимания заслуживает не только вопрос о доле четырех- и трехкоординированного бора, но также связь тетраэдрических и тригональных боратных групп друг с другом и с силикатом.

Технологию нанесения эмалевого покрытия и влияние различных параметров является задачей многих исследователей [25-28].

Одним из решающих факторов, влияющих на свойства эмали, являются использован-

ные сырьевые компоненты, наличие в них примесных элементов. Отсюда необходимость разработки состава эмали в каждом конкретном случае.

Целью исследования являлось получение грунтовой эмали на основе местных сырьевых компонентов и исследование влияния оксида бора. Выбор местных сырьевых компонентов для получения грунтовой эмали показал, что получаемые составы стекол находятся в системе $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Na}_2\text{O--K}_2\text{O--CaO--B}_2\text{O}_3$. Для корректировки свойств использовали добавки оксида никеля и оксида кобальта.

Методы исследования

Для обжига стеклянной шихты использовалась лабораторная печь с подогревом на основе природного газа. Плавку стекольной шихты осуществляли в шамотных тиглях емкостью 200-250 мл при температуре 1320-1350 °С с выдержкой в течение 20 – 30 минут. Расплав сливали в воду и получали гранулы фритты.

Состав грунтового покрытия получали из тонкоизмельченной фритты, добавляя компоненты в соответствии с требованиями [29].

Процесс получения грунтового покрытия на поверхности металла (холоднокатанный листовой прокат для эмалирования марки DC04ЕК) [27-30] осуществлялся в электропечи СНОЛ. Точность определения температуры составляла $\pm 5^\circ\text{C}$.

Химический анализ сырьевых компонентов и синтезированных стекол определен на энергодисперсионном рентгенфлуоресцентном

спектрометре Rigaku CG EDXRF (США).

Поверхностное натяжение рассчитано по методу Аппена [30].

Инфракрасный спектр образцов анализировали на спектрофотометре IRAffinity-1 (SHIMADZU, Япония).

Растекаемость фритты полученных образцов при нанесении на поверхность металла определяли в соответствии с требованиями [29].

Результаты и обсуждение

В лабораторных условиях в системе $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Na}_2\text{O--K}_2\text{O--CaO--B}_2\text{O}_3\text{--NiO--Co}_2\text{O}_3$ синтезированы стекла. Для синтеза стекол послужили следующие сырьевые компоненты: кварцевый песок, глинистый сланец, борная кислота, известняк, кальцинированная сода, оксид никеля и оксид кобальта. Химический состав сырьевых компонентов представлен в таблице 1, а синтезированных стекол – в таблице 2.

В результате резкого закала стекол получены фритты соответствующих составов. Для приготовления покрытия осуществляли тонкий совместный помол кварцевого песка, глинистого сланца и фритты до остатка на сите 0063 0,02%.

Результаты некоторых физико-технических свойств опытных грунтовых покрытий приведены в таблице 3. Добавка бора и увеличение ее количества в состав стекла отразилась на свойствах грунтового покрытия – увеличилась растекаемость и снизилось поверхностное натяжение.

Таблица 1

Химический состав сырьевых материалов

Сырье	Массовое содержание оксидов, %										
	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	NiO	Co ₂ O ₃	п.п.п
Кварцевый песок	92,50	–	1,03	0,27	3,51	–	0,04	0,08	–	–	–
Глинистый сланец	49,60	–	5,03	0,17	37,20	–	–	0,39	–	–	7,62
Борная кислота	–	–	–	–	–	55,0	–	–	–	–	45,0
Известняк	0,31	–	0,03	53,40	0,23	–	5,03	0,06	–	–	40,94
Сода кальцинированная	–	57,20	–	–	–	–	–	–	–	–	42,80
Оксид кобальта	–	–	–	–	–	–	–	–	–	100	–
Оксид никеля	–	–	–	–	–	–	–	–	100	–	–

Таблица 2

Химический состав синтезированного стекла

№ состава	Массовое содержание оксидов, %											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MgO	NiO	Co ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	B ₂ O ₃
1	59,50	4,10	25,20	1,28	6,09	0,12	–	–	0,74	–	0,11	–
2	48,40	5,05	30,50	1,23	9,89	0,14	–	0,17	0,64	–	0,14	–
3	54,0	4,89	23,90	0,79	7,84	0,14	0,67	0,12	0,70	0,21	0,13	6,80
4	53,80	4,75	26,50	0,83	5,55	0,13	0,61	–	0,65	0,19	0,13	7,05
5	47,90	4,14	23,30	0,85	7,82	0,14	1,31	0,13	0,71	0,17	0,11	13,58
6	42,30	5,53	25,70	0,62	5,64	0,06	0,68	–	0,66	0,20	0,11	18,50

Таблица 3
Физико-технические свойства грунто-
товых эмалей

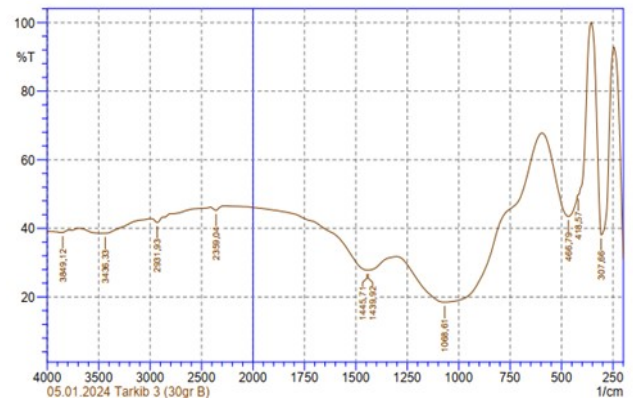
Номер состава	Растекаемость, мм	Поверхностное натяжение, Н/м
1	22,0	0,315
2	14,5	0,308
3	37,1	0,289
4	37,5	0,275
5	45,0	0,257
6	57,0	0,264

Значения величин по растекаемости соответствуют маркам фритт от тугоплавкой до относительно легкоплавкой по стандарту [29].

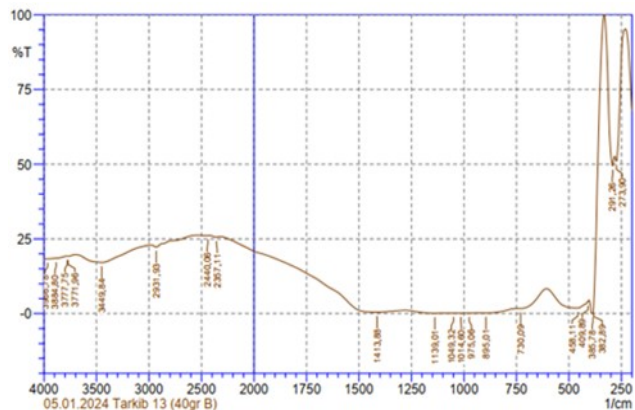
Структурные компоненты в полученных стеклах исследованы ИК спектроскопией. Результаты представлены на рисунке.

Во всех спектрах грунтово присутствуют четыре основные группы полос поглощения, расположенные в области 250-500, 700-1250, 1250-1600 см⁻¹ и 2000-4000 см⁻¹. Различия в спектрах являются следствием различия в составах материалов. Наиболее существенное влияние оказывает изменение количества бора.

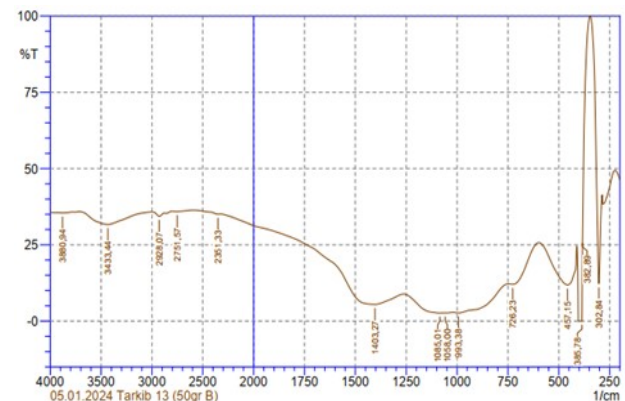
Широкая полоса 800-1250 см⁻¹ свидетельствует о присутствии структурных группировок кремния, таких как Si-O-Si и островных групп SiO₄. В эту же область попадают колебания четырехкоординированного бора. Полоса в области 1400-1500 см⁻¹ отнесена к наличию кальциевого силиката. Колебания BO₃ накладываются в этой области, что отражается в расширении этой полосы с увеличением количества бора в составе стекол. Полосы в области



а



б



в

ИК спектры стекол составов № 3 (а), № 5 (б), № 6 (в).

500-400 cm^{-1} свидетельствуют о наличии связанных группировок кремния и фосфора. Интенсивность полосы резко возрастает с увеличением содержания фосфора для состава 5. В области 400-280 cm^{-1} обнаруживаются полосы XO_6 ($\text{X} = \text{Mg}, \text{Ca}, \text{Ni}, \text{Co}$) [31, 32].

При малом содержании бора (состав 3) присутствуют только 4-кратно координированные соединения бора, которым отнесена полоса 307 cm^{-1} . С увеличением содержания бора (составы 5, 6) появляется интенсивная полоса поглощения 385 cm^{-1} , отнесенная 6-кратно координированным соединениям бора [33-35].

Полоса в области 725 cm^{-1} отнесена к деформационным колебаниям тригональных боратных образований, интенсивность которой резко возрастает с увеличением количества фосфора в грунте состава 5, и является отражением образования немостикового кислорода на тригональных боратных узлах [36, 37].

Область 2300-3600 cm^{-1} , ответственная за присутствие ОН групп реагирует изменени-

ем интенсивности с увеличением содержания бора в грунте, что можно предположить связано с взаимодействием глинистого сланца с элементами стекол.

Закключение

Синтезированы стекла в системе $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-K}_2\text{O-CaO-B}_2\text{O}_3\text{-NiO-Co}_2\text{O}_3$ на основе местных сырьевых материалов с добавлением оксида никеля и оксида кобальта. С использованием фритты из стекла получены грунтовые эмали. Свойства разработанных составов грунтовых эмалей соответствуют требованиям ГОСТ 24405-80. Определено, что добавка бора и увеличение ее количества в составе стекла увеличивает растекаемость и снижает поверхностное натяжение. Исследование структурных особенностей синтезированных стекол методом ИК спектроскопии позволило установить присутствие 4-кратно координированного бора и появление 6-кратно координированных соединений бора при увеличении его содержания.

REFERENCES

1. Pavlenko Z.V., Bondarenko N.I. Izucheniye vozmozhnosti ispol'zovaniya kolemanita dlya polucheniya emaley po stali [Studying the possibility of using colemanite to produce enamels for steel]. *Vestnik BGTU*, 2020, 10. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-10-57-62
2. Belyi Ya.I., Goleus V.I., Pavlova Ye.V., Kislichnaya R.I. Vliyaniye oksidov shchelochnozemel'nykh metallov na svoystva besfloristykh bezbornykh emaley [Influence of alkaline earth metal oxides on the properties of fluoride-free boron-free enamels]. *Tekhnologicheskii audit i rezervy proizvodstva*, 2013, 4/2(12), 28-31.
3. Dorofeyeva A.V., Semin M.A. Zashchitnye steklovidnyye pokrytiya dlya stali [Protective glass coatings for steel]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2014, XXVIII/8, 43-46
4. Pashchenko A.A. *Obshchaya tekhnologiya silikatov* [General silicate technology]. Kiyev, Visha shkola Publ., 1983. 407.
5. Bachar A., Mabrouk A., Meneses D.D.S., Veron E., Sadallah Y., Echegut P., Bentiss F. Effect of thermal treatment on the property of enamel coating on steel substrate. *JMES*, 2017, 8/11, 3884-3891.
6. Gode G.K. *Boraty narodnomu khozyaystvu* [Borates for the national economy]. Riga, LGU Publ., 1982. 135.
7. Du L.S., Stebbins, J.F. Solid-state NMR study of metastable immiscibility in alkali borosilicate glasses. *J. Non-Cryst. Solids*, 2003, 315/3, 239-255. DOI: 10.1016/S0022-3093(02)01604-6
8. Du L.S., Stebbins, J.F. Nature of silicon-boron mixing in sodium borosilicate glasses: a high-resolution ^{11}B and ^{17}O NMR study. *J. Phys. Chem. B*, 2003, 107/37, 10063-76. DOI: 10.1021/jp0340481
9. Abe T. Borosilicate glasses. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1952, 35/11, 284-299. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1952.tb13051.x
10. Wright A.C. Borate structures: crystalline and vitreous. *Eur. J. Glass Sci. Technol. B*, 2010, 51/1, 1-39.
11. Dell W.J., Bray P.J. ^{11}B NMR studies and structural modeling of $\text{Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glasses of high soda content. *J. Non-Cryst. Solids*, 1983, 58, 1-16. DOI:10.1111/j.1151-2916.1952.tb13051.x
12. Hannon A.C., Grimley D.L., Hulme R.A., Wright A.C., Sinclair R.N. Boroxol groups in vitreous boron oxide: new evidence from neutron diffraction and inelastic neutron scattering studies. *J. Non-Cryst. Solids*, 1994, 177, 299-316. DOI: 10.1016/0022-3093(94)90544-4
13. Averjanov V.J., Mazurin, O.W., Porai-Koshits, J.A., Reiß, H., Roskova, G.P., Vogel W., Ehrh D. Influence of temperature on the conodes in phase separated glass melts of the system $\text{BaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. *Fiz. Chim. Stekla*, 1979, 5/6, 637-50.
14. Ryabova A.V., Tkachenko V.D., Fanda A.Yu. Svetnie stekloemalievie pokrytiya dlya stalnix arhitekturno-stroitel'nykh paneley [Light glass enamel coatings for steel architectural and construction panels]. *Izvestiya vuzov. Severo-kavkazskiy region. texnicheskkiye nauki*, 2023, 1, 80-90. DOI: 10.17213/1560-3644-2023-1-80-90.
15. Goleus V.I. Svoystva borosilikatnykh steklofritt kak osnovy dlya polucheniya stekloemalievnykh pokrytii [Properties of borosilicate glass frit as a basis for obtaining glass-enamel coatings]. *Issues of Chemistry and Chemical Technology*, 2017, 3, 47-52.
16. Brungs M.P., Cartney E.R. Structure of sodium borosilicate glasses. *Phys. Chem. Glasses*, 1975, 16, 48-52.
17. Möncke D., Tricot G., Winterstein-Beckmann A., Wondraczek L., Kamitsos E.I. On the connectivity of borate tetrahedra in borate and borosilicate glasses. *Phys. Chem. Glasses*, 2015, 56/5, 203-211.
18. Petrovskaya T.S. Properties of lead borosilicate glasses: The effect of the structure. *Glass Ceram.*, 1997, 54/11-12, 347-350.
19. Wu J.M., Huang H.L. Microwave properties of zinc, barium and lead borosilicate glasses. *J. Non-Cryst. Solids*, 1999, 260, 116-124.
20. Doris M., Gregory T., Lothar W. On the connectivity of borate tetrahedra in borate and borosilicate glasses. *Physics and Chemistry of Glasses European Journal of Glass Science and Technology Part B*, 2015, 56, 203-211. DOI:10.13036/17533562.56.5.203.
21. Wright A.C. Borate structures: crystalline and vitreous. *Phys. Chem. Glasses: Eur. J. Glass Sci. Technol. B*. 2010. V. 51. № 1. P. 1-39.
22. Morin E., Wu J., Stebbins J. Modifier cation (Ba, Ca, La, Y) field strength effects on aluminum and boron coordination in aluminoborosilicate glasses: the roles of fictive temperature and boron content. *Appl. Phys. A*, 2014, 116/2, 479-490. DOI:10.1007/s00339-014-8369-4
23. Winterstein-Beckmann A., Möncke D., Palles D., Kamitsos E.I., Wondraczek L. Structure and properties of orthoborate glasses in the $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-(Sr,Eu)O-B}_2\text{O}_3$ quaternary. *J. Phys. Chem. B*, 2015, 119/7, 3259-3272. DOI:10.1021/jp5120465
24. Reibstein S., Wondraczek L., de Ligny D., Krolikowski S., Sirotkin S., Simon J. P., Martinez V., Champagnon, B. Structural heterogeneity

- and pressure-relaxation in compressed borosilicate glasses by in situ small angle x-ray scattering. *J. Chem. Phys.*, 2011, 134/20. DOI:10.1063/1.3593399
25. Soshina T.O., Mukhamadyarova V.R. Vliyaniye temperatury i vremeni termicheskoy obrabotki na strukturu emalevogo pokrytiya [The influence of temperature and time of heat treatment on the structure of the enamel coating]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta*, 2019, 21/2, 82–87. DOI: 10.15593/2224-9877/2019.2.10
 26. Yatsenko E.A. Izucheniye vliyaniya predvaritel'noy podgotovki raznorodnykh metallov na kachestvo emalevogo pokrytiya [Study of the influence of preliminary preparation of dissimilar metals on the quality of the enamel coating]. *Praktika protivokorroziionnoy zashchity*, 2010, 1, 5–12.
 27. Yatsenko E.A., Dzyuba E.B., Veropakha N.V. Izucheniye vliyaniya sposoba obrabotki poverkhnosti stali, kak faktora obrazovaniya kontaktного sloya, na prochnost' stsepleniya sistemy metall pokrytie [Study of the influence of the steel surface treatment method, as a factor in the formation of a contact layer, on the adhesion strength of the metal coating system]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, 16, 119–128.
 28. Ryabova A.V., Yatsenko E.A., Kerimova V.V., Klimova L.V., Fanda A.Yu., Smolii V.A. Glass Enamel Monolayer Coating for the Protection of Steel Articles Against Corrosion. *Glass Physics and Chemistry*, 2019, 45/1, 82–84.
 29. GOST 52569-2018. Fritty. Tekhnicheskiye usloviya. Moscow Standartionform Publ., 2018. 31. (In Russ.)
 30. Appen A.A. *Khimiya stekla* [Chemistry of glass]. Leningrad, Khimiya Publ., 1974. 352.
 31. Plyusnina I.I. *Infrakrasnyye spektry mineralov* [Infrared spectra of minerals]. Moskva, Mosk un-t Publ., 1977. 175.
 32. Morin E., Wu J., Stebbins J. Modifier cation (Ba, Ca, La, Y) field strength effects on aluminum and boron coordination in aluminoborosilicate glasses: the roles of fictive temperature and boron content. *Appl. Phys. A*, 2014, 116/2, 479–490. DOI:10.1007/s00339-014-8369-4
 33. Ehrhart D. Zinc and Manganese Borate Glasses - Phase Separation, Crystallisation, Photoluminescence, and Structure. *European Journal of Glass Science and Technology Part B*, 2013, 54/2, 65-75.
 34. Topper B., Möncke D., Youngman R.E., Valvi Ch., Kamitsos E.I., Christos P.E. Varsamis Ch.E.I. Zinc borate glasses: properties, structure and modelling of the composition-dependence of borate speciation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2023, 2/4, 1-51. DOI: 10.1039/D2CP05517A
 35. Kamitsos E.I., Karakassides M.A., Chryssikos G.D. A vibrational study of lithium-sulfate based fast ionic conducting borate glasses. *J. Phys. Chem.*, 1986, 90/19, 4528–4533. doi:10.1021/j100410a010
 36. Kamitsos E.I., Chryssikos G.D. Borate glass structure by Raman and infrared spectroscopies. *J. Mol. Struct.*, 1991, 247, 1–16. doi:10.1016/0022-2860(91)87058-p
 37. Kamitsos E.I., Patsis A.P., Karakassides M.A., Chryssikos G.D., Infrared Reflectance Spectra of Lithium Borate Glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1990. 126/1-2, 52-67.