

О.В. САВВОВА, Г.К. ВОРОНОВ, С.О. РЯБІНІН, О.І. ФЕСЕНКО, Д.В. СВИЩОВ

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ СПОДУМЕНВІСНИХ СКЛОКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ПІСЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Визначено перспективні напрямки застосування сподуменвісних склокристалічних матеріалів в різних галузях науки та техніки, зокрема, для підвищення обороноздатності держави. Визначено актуальність розробки полегшених високоміцних ситалів на їх основі з урахуванням аспектів енергозбереження для одержання бронееlementів. Встановлено перспективність застосування ІЧ–спектроскопії для дослідження наноструктури склокристалічних матеріалів. Розроблено склади літійалюмосилікатних стекол та режими їх термічної обробки. Досліджено особливості структуроутворення сподуменвісних склокристалічних матеріалів, які отримано в умовах двостадійної низькотемпературної термічної обробки. З урахуванням аналізу характеру ІЧ–спектрів ланцюгових силікатів досліджено структуру склокристалічних матеріалів за даними ІЧ–спектрів та встановлено характер структуроутворення в залежності від вихідного складу скла. Встановлено, що формуванню структурної сітки скла за участю тетраедрів $[AlO_4]$, $[BO_4]$ та $[SiO_4]$ та наявність сиботаксичних груп $[Si_2O_6]$ дозволяє в умовах двостадійної низькотемпературної обробки забезпечити об'ємну кристалізацію сподуменвісних склокристалічних матеріалів. Встановлено, що формування ситалізованої структури склокристалічних матеріалів дозволяє забезпечити їх високі значення показників твердості за Віккерсом, мікротвердості та показнику тріщиностійкості та поряд наявністю склофази, яка виконує роль демпфера, забезпечити їх високу бронестійкість. Це підвищить ефективність та дозволить використовувати їх в якості енергоруйнуючого та енергопоглинаючого шару у композиції бронееlementу «металевий сплав – кераміка – ситал». Впровадження сподуменвісних склокристалічних матеріалів дозволить підвищити конкурентоздатність конкурентоспроможних вітчизняних бронееlementів для індивідуального захисту.

Ключові слова: сподуменвісні склокристалічні матеріали, структуроутворення, інфрачервона спектроскопія, сподумен.

О.В. САВВОВА, Г.К. ВОРОНОВ, С.О. РЯБІНІН, О.І. ФЕСЕНКО, Д.В. СВИЩОВ

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ СПОДУМЕНСОДЕРЖАЩИХ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Определены перспективные направления применения сподуменсодержащих стеклокристаллических материалов в различных отраслях науки и техники, в частности, для повышения обороноспособности государства. Определена актуальность разработки облегченных высокопрочных ситаллов на их основе с учетом аспектов энергосбережения для получения бронееlementов. Установлено перспективность применения ИК–спектроскопии для исследования наноструктуры стеклокристаллических материалов. Разработаны составы литийалюмосиликатных стекол и режимы их термической обработки. Исследованы особенности структурообразования сподуменсодержащих стеклокристаллических материалов, полученных в условиях двухстадийной низкотемпературной термической обработки. С учетом анализа характера ИК–спектров цепных силикатов исследована структура стеклокристаллических материалов по данным ИК–спектров и установлен характер структурообразования в зависимости от исходного состава стекла. Установлено, что формированию структурной сетки стекла с участием тетраэдров $[AlO_4]$, $[BO_4]$ и $[SiO_4]$ и наличие сиботаксических групп $[Si_2O_6]$ позволяет в условиях двухстадийной низкотемпературной обработки обеспечить объемную кристаллизацию сподуменсодержащих стеклокристаллических материалов. Установлено, что формирование ситализированной структуры стеклокристаллических материалов позволяет обеспечить их высокие значения показателей твердости по Виккерсу, микротвердости и показателю трещиностойкости и рядом наличием стеклофазы, которая выполняет роль демпфера, обеспечить их высокую бронестойкость. Это повысит эффективность и позволит использовать их в качестве энергоразрушающего и энергопоглощающего слоя в композиции бронееlementа «металлический сплав – кераміка – ситалл». Внедрение сподуменсодержащих стеклокристаллических материалов позволит повысить конкурентоспособность конкурентоспособных отечественных бронееlementов для индивидуальной защиты.

Ключевые слова: сподуменсодержащие стеклокристаллические материалы, структурообразование, инфракрасная спектроскопия, сподумен.

O. SAVVOVA, G. VORONOV, S. RIABININ, A. FESENKO, D. SVISHOV

FEATURES OF THE STRUCTURE FORMATION OF SPODUMENS-CONTAINING GLASS-CRYSTAL MATERIALS AFTER HEAT TREATMENT

The promising areas of application of spodumene-containing glass-crystalline materials in various branches of science and technology, in particular, to increase the defense capability of the state, have been determined. The relevance of the development of lightweight high-strength sitalls based on them, taking into account the aspects of energy saving for obtaining armored elements, has been determined. It has been established that the use of IR spectroscopy is promising for studying the nanostructure of glass-crystalline materials. The compositions of lithium aluminum silicate glasses and the modes of their heat treatment have been developed. The features of the structure formation of spodumene-containing glass-crystalline materials obtained under the conditions of two-stage low-temperature heat treatment have been investigated. Taking into account the analysis of the nature of

© О.В. Саввова, Г.К.Воронов, С.О.Рябинін, О.І. Фесенко, Д.В.Свищов, 2021

the IR spectra of chain silicates, the structure of glass–crystalline materials was investigated according to the IR spectra and the nature of structure formation was established depending on the initial composition of the glass. It has been established that the formation of a structural glass network with the participation of tetrahedra $[AlO_4]$, $[BO_4]$ and $[SiO_4]$ and the presence of cybotaxic groups $[Si_2O_6]$ allows, under conditions of two–stage low–temperature treatment, to provide bulk crystallization of spodumene–containing glass–crystalline materials. It has been established that the formation of the vitrified structure of glass–crystalline materials allows to ensure their high values of Vickers hardness, microhardness and crack resistance and by the presence of a glass phase, which plays the role of a damper, to ensure their high armor resistance. This will increase the efficiency and make it possible to use them as an energy–destructive and energy–absorbing layer in the composition of the armor element «metal alloy – ceramics – sital». The introduction of spodumene–containing glass–crystalline materials will increase the competitiveness of competitive domestic armored elements for personal protection.

Keywords: spodumene–containing glass–crystalline materials, structure formation, infrared spectroscopy, spodumene.

Вступ. Дослідження структури склокристалічних матеріалів (СКМ) на стадіях фазоутворення в процесі термічної обробки є виключно важливим етапом ефективного проектування ситалів, особливо на початкових етапах зародкоутворення. Саме з урахуванням доцільності вибору складів СКМ формування зародків є наступною визначальною стадією утворення ситалізованої структури з визначеним характером та вмістом кристалічних фаз, які у подальшому визначають властивості матеріалів [1, 2].

Застосування ІЧ–спектроскопії є найбільш ефективним методом дослідження наноструктури СКМ, яка формується вже в процесі охолодження розплаву скла та самоорганізується при термічній обробці. Ідентифікація у розплаві після охолодження сиботаксичних груп, які відповідають морфології заданої твердої фази, дозволить визначити характер кристалізації за смугами поглинання спектрів коливання наноструктур [3–8].

Дослідження структури склокристалічних матеріалів у системі $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$ є основною задачею при синтезі ситалів із високими механічними термічними та електричними властивостями. На сьогодні сподуменвмісні ситали знайшли широке застосування в ракетобудуванні при створенні антенних обтічників, у побуті – компоненти кухонних мікрохвильових печей, камінів, у технології – екрани, вікна в піролізних та каталітичних печах, у радіотехніці – пласкі екрани дисплеїв, підкладки лампових рефлекторів, магнітні диски, в оптиці – у приладах атенуаторів, кольорові фільтри, сенсори зображення [2].

Актуальним напрямком в умовах сталого розвитку України для реалізації пріоритетних напрямків оборонної галузі є розробка та впровадження нових типів вітчизняних конкурентоспроможних бронеелементів для індивідуального захисту [9, 10]. Вирішенням даної задачі є розробка полегшених високоміцних ситалів на основі сподуменвмісних СКМ з урахуванням аспектів енергозбереження.

Мета роботи. Метою даної роботи є дослідження особливостей стуктурутворення сподумен-

вмісних СКМ у взаємозв'язку з їхніми властивостями.

Для досягнення означеної мети були поставлені наступні завдання:

- проаналізувати характер ІЧ–спектрів ланцюгових силікатів;
- дослідити структуру сподуменвмісних СКМ за даними ІЧ–спектрів;
- дослідити механічні властивості сподуменвмісних СКМ взаємозв'язку з особливостями їх структури;
- визначити конкурентоздатність сподуменвмісних СКМ як основи для розробки бронеелементів для індивідуального захисту.

Методика проведення експерименту.

Структуру стекел досліджували з використанням електронного мікроскопа «ЕМВ 100 АК» та спектрофотометру *Specord–M80*.

Мікротвердість H та твердість за Віккерсом HV визначали шляхом вдавлювання алмазної піраміди Віккерса при навантаженні на неї відповідно 200 г за 10 вимірами та 5000 г за 5 вимірами з використанням приладів ПМТ–3 і ТП–2 та розраховували за формулою:

$$H, HV = \frac{1854 P}{a^2}, \quad (1)$$

де a – напівдіагональ відбитку, мкм; P – навантаження на індентор, г.

Показник тріщиностійкості K_{1c} визначали шляхом вдавлювання піраміди Віккерса при навантаженні на неї 5000 г за 5 вимірами та розраховували за напівемпіричною залежністю Нііхари [11]:

$$K_{1c} = \frac{0,094 P}{c^{3/2}}, \quad (2)$$

де c – довжина радіальної тріщини від середини відбитку, мкм.

Модуль пружності визначали на приладі, заснованому на принципі визначення стріли прогину зразків стекел, які отримані шляхом витягування ниток зі склорозплаву. Розрахунок модуля пружності проводили за формулою:

$$E = \frac{4Pl^3}{3\pi Fd^4}, \quad (3)$$

де E – модуль пружності, ГПа; P – навантаження, г; l – відстань між опорами, мм; F – стріла прогину нитки, мм; d – діаметр стрижня нитки, мм.

Результати експерименту та їх обговорення.

Дослідні склокристалічні матеріали були синтезовані на основі літійалюмосилікатних стекел з хімічним складом (табл. 1).

Таблиця 1. – Відзнаки хімічного складу СКМ СП

Оксиди	Маркування СКМ		
	СП-2	СП-6	СП-9
	Вміст оксидів, мас. %		
SiO ₂	64,0	60,0	60,0
Li ₂ O	6,0	10,0	8,0
Al ₂ O ₃	10,0	11,0	20,0
B ₂ O ₃	–	5,0	1,5
Na ₂ O+K ₂ O	–	3,5	–
CaO+MgO+ZnO	15 CaF ₂	7,5	5,0
MnO	–	–	2,5
TiO ₂ +ZrO ₂	5,0	2,0	–
CeO ₂	–	–	0,5
P ₂ O ₅	–	2,0	3,0
Температура варки, °C	1400	1450	1400
Режим термічної обробки, °C	I стадія – 530 °C II стадія – 900 °C	I стадія – 530 °C II стадія – 850 °C	

Стекла з маркуванням СП виготовляли за традиційною технологією, до якої входить шихтування сировинних матеріалів. Варка модельних стекел у корундових тиглях при температурах 1400–1450 °C впродовж 6 годин та витримка за цих температур упродовж 0,5 год.

Склокристалічні матеріали було отримано за керамічною технологією в умовах двостадійної низькотемпературної (850–900 °C) термічної обробки (табл. 1).

Структура низькотемпературної модифікації α -сподумену аналогічна структурі діопсиду. Піроксеновий ланцюг характеризується періодом повторюваності, що складається з двох кремнекисневих тетраедрів [Si₂O₆] (рис. 1).

Для структур, що вміщують подібні кремнекисневі мотиви, атомне співвідношення Si:O = 1:3; кожен з атомів кремнію утворює два зв'язки Si–O–Si, які використовуються для побудови ланцюгу, і два бічні зв'язки Si–O. У цілому для піроксенів в області 1100–800 см⁻¹ спостерігаються чотири смуги. В інтервалі 680–640 см⁻¹ спостерігаються дві смуги

валентних симетричних коливань середньої інтенсивності vs S–O–Si.

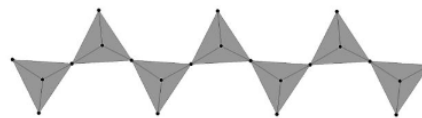


Рисунок 1. – Піроксеновий ланцюг

Проведемо детальний аналіз структури дослідних СКМ після двостадійної термічної обробки За даними ІЧ (інфрачервоної) – спектроскопії дослідні СКМ відносяться до висококремнеземистої області зі вмістом SiO₂ > 50 мас. % і характеризуються широкою смугою поглинання (ν) валентних коливань (ν) в області 1200–900 см⁻¹ зі значним максимумом при 1050 см⁻¹ та деформаційними коливаннями (δ) при 470 см⁻¹ (рис. 2).

Присутність у СКМ Al₂O₃ сприяє утворенню тривимірної сітки за участю груп [AlO₄] та тетраедрів [SiO₄]. Про наявність зв'язку Si–O–Al у скломатеріалах свідчить смуга поглинання в області 780–720 см⁻¹. Відсутність у складах стекел коливань в області 680–580 см⁻¹ характерних для октаедрів [AlO₆] також свідчить про те, що алюміній знаходиться в чотирьохкоординатному стані зі смугою поглинання в області 780–710 см⁻¹, ізоморфно заміщуючи силіцій з утворенням змішаної алюмокремнекисневої сітки.

У СКМ СП-6 та СП-9 валентні коливання [BO₃]³⁻, які характеризуються смугою поглинання 1400–1350 см⁻¹, мають нечітко виражений характер. Це свідчить про більш притаманну для даних СКМ тетраедричну координацію бору.

Наявність бору в четвертій координації та присутність лужних металів у склі, які разом з тетраедрами [BO₄]⁵⁻ утворюють групи [(BO₄)⁵⁻Me⁺]⁴⁻, збільшують ступінь зв'язаності аніонної сітки скла. Отже, введення оксидів алюмінію та бору до складу модельних стекел суттєво позначиться на підвищенні їхньої структурної міцності.

Для СКМ СП-6 та СП-9 абсорбційні максимуми симетричних коливань ν_s містків P–O–P поліедру [PO₃]_nⁿ⁻ в області 815–630 см⁻¹ спостерігаються в модельних стеклах, з найвищою інтенсивністю для скломатеріалу СП-9 зі вмістом оксиду фосфору 3,0 мас. %.

Для зразків СП-2 та СП-6 реалізується тетраедрична координація титану зі смугою поглинання груп [TiO₄] в області коливань 960–700 см⁻¹. При додаванні MnO₂ до складу СП-9 у кількості

2,0 мас. % на ІЧ-спектрах спостерігається смуга поглинання $\sim 370 \text{ cm}^{-1}$, яка відповідає зв'язку Mn–O [Mn (III)]. Смуга поглинання в області $1194\text{--}925 \text{ cm}^{-1}$ активована недостатньо. У склі виявлено відсутність смуги поглинання при $\sim 840, 850 \text{ cm}^{-1}$, яка характеризує формування тетрагональної групи Mn (MnO_4).

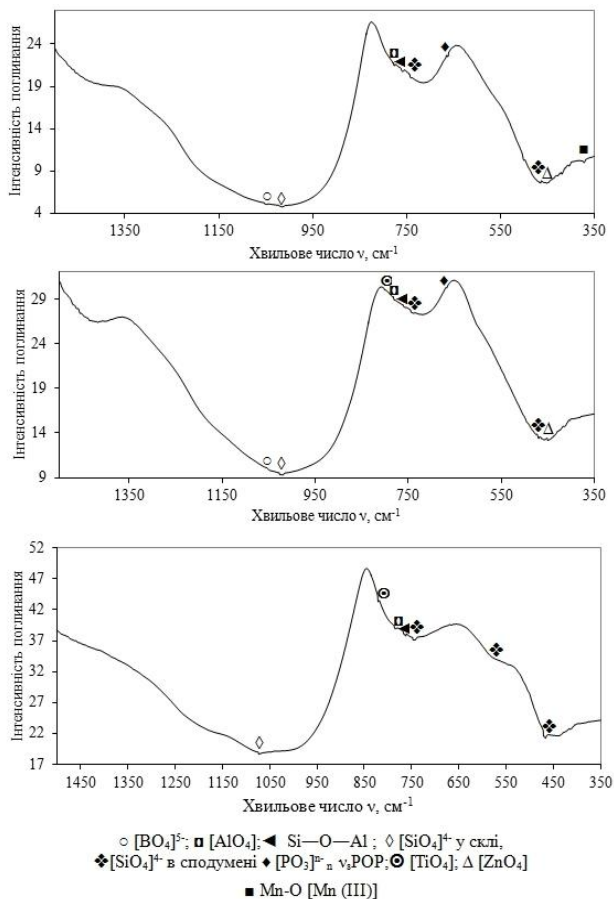


Рисунок 2. – ІЧ-спектри поглинання СКМ серії СП:
 а – СП-2; б – СП-6; в – СП-9

Для матеріалів серії СП спостерігаються чіткі смуги поглинання груп $[\text{Si}_2\text{O}_6]$, що при 740 cm^{-1} є характерними для β -сподумену. Присутність цієї смуги свідчить про те, що кремнекисневі тетраедри зв'язані один з одним за усіма чотирма вершинами (рис. 2). Для скломатеріалів спостерігається значно звужена смуга $1150\text{--}1000 \text{ cm}^{-1}$ для β -сподумену (типова широка смуга для ланцюгових силікатів спостерігається $1200\text{--}800 \text{ cm}^{-1}$). При цьому поглинання найбільш інтенсивно спостерігається на смугі 1026 cm^{-1} для СКМ СП-9.

Серед групи дослідних склокристалічних матеріалів після двостадійної термічної обробки найвищими показниками механічних властивостей (табл. 3) характеризується безлужний ситал СП-9, зі співвідношенням $\text{SiO}_2 / \text{Li}_2\text{O} = 7,5$ та заміною

$\text{STiO}_2 + \text{ZrO}_2$ на CeO_2 , який має найвищу структурну міцністю та значним вмістом кристалічної фази β -сподумену. Цьому сприяє наявність у структурі стекло поліедрів $[\text{PO}_3]_n^{n-}$ як каталізаторів кристалізації, які створюють умови для фазового розділення як більш енергетично вигідного при формуванні зародків кристалів і забезпеченні об'ємною тонкодисперсною кристалізацією [12]. Важливою складовою забезпечення міцності скломатриці є формування структурної сітки скла за участю тетраедрів $[\text{AlO}_4]$, $[\text{BO}_4]$ та $[\text{SiO}_4]$. Саме поєднання високих міцносних властивостей кристалічної та склофази дозволить сформувати дисипативну самоорганізовану структуру матеріалу, який здатний витримувати значні навантаження.

Високе значення модуля Юнга для СКМ СП-9 пояснюється визначеною орієнтованою текстурою зразку на мікроскопічному рівні (рис.3). Переважна кристалографічна орієнтація кристалів β -сподумену, який представлений кристалами стовбчастого плоского призматичного габітусу зі штрихуванням та чіткою спайністю, позначається на зниженні розкиду даних за пружними властивостями та підвищенні їх значень, інтеркристалітний характер руйнування розробленого ситалу визначає можливість енергопоглинання.

Забезпечення відповідних значень твердості за Віккерсом, мікротвердості та показнику тріщиностійкості для розроблених СКМ за двостадійною термічною обробкою (табл. 3) дозволить використовувати їх як енергорушуючий шар у композиції бронееlementу «металевий сплав – кераміка – ситал».

Таблиця 2 – Властивості СКМ

СКМ	Показники			
	H , МПа	HV , МПа	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}	E , ГПа
СП-2	8330	8280	3,0	80,0
СП-6	8590	7900	2,4	85,0
СП-9	9084	8667	3,4	100,0



Рисунок 3. Структура СКМ СП-9

Висновки.

Досліджено особливості ступенювання сподуменвісних склокристалічних матеріалів. Встановлено, що формуванню структурної сітки скла за участю тетраедрів $[AlO_4]$, $[BO_4]$ та $[SiO_4]$ та наявність сиботаксичних груп $[Si_2O_6]$ дозволяє в умовах двостадійної низькотемпературної обробки забезпечити ситалізацію сподуменвісних склокрис–талічних матеріалів. Забезпечення високих механічних властивостей СКМ ($HV = 8740$ МПа, $K_{1C} = 3,1$ МПа $m^{1/2}$) та здатності склофази виконувати роль демпфера ($E = 100$ ГПа) дозволить використовувати їх при розробці вітчизняних бронееlementів для індивідуального захисту.

Список літератури

1. Торопов Н.А. Структурные превращения в стеклах при повышенных температурах / Н.А. Торопов, Е.А. Порай-Кошиц. – Москва: Наука, 1965. – 259 с.
2. Брагіна Л.Л. Структура та властивості склокристалічних матеріалів: монографія / Л.Л. Брагіна, О.В. Саввова, О.В. Бабіч, Ю.О. Соболев. – Х.: ООО «Компанія СІТ», 2016. – 253.
3. Efimov A.M. IR absorption spectra of vitreous silica and silicate glasses: The nature of bands in the 1300 to 5000 cm^{-1} region / Andrei M. Efimov, Vera G. Pogareva // *Chemical Geology*, 2006. – Vol. 229, Is. 1–3. – P.198–217
4. Chukin G. D. Infrared spectra of silica / G. D. Chukin, V. I. Malevich // *Journal of Applied Spectroscopy*, 1977. – Vol. 26. – P. 223–229.
5. Hernández M.F. Dense alumina–mullite composite ceramics from alumina and spodumene–albite feldspar binary mixtures: Processing and properties / Hernández, M.F., López, P.V., Violini, A. et al. // *Science of Sinterin*, 2019. — Vol. 51, Is. 4. – P.445–458
6. Rebouças L.B. Characterization of $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$ glass–ceramics produced from a Brazilian spodumene concentrate / Rebouças, L.B., Souza, M.T., Raupp–Pereira, F., Novaes De Oliveira, A.P. // *Ceramica*, 2019. – Volume 65, Issue 375. – P. 366–377.
7. Xia L. Crystal structure and wave–transparent properties of lithium aluminum silicate glass–ceramics / Xia, L., Yang, Y., Zhang, X. et al. // *Ceramics International*, 2018. – Vol. 44, Is. 12, 15. – P.14896–14900
8. Mishra R. Study on thermophysical properties and phase evolution in Nd doped $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$ glass nucleated by multiple nucleating agents / Mishra, R., Goswami, M. Dixit, A., Krishnan, M // *Journal of Non–Crystalline Solids*, 2016. – Vol.447, 1. – P. 66–73.
9. Savvova O.V. High–Strength Spodumene Glass–Ceramic Materials / Savvova, O.V., Babich, O.V., Voronov, G.K., Ryabinin, S.O. // *Strength of Materials*, 2017. – 49 (3). – P. 479–486.
10. Savvova O.V. Development of glass–ceramic high–strength material for personal armor protection elements / Savvova O., Bragina L., Voronov G., Shalygina O., Kuriakin M. // *Chemistry and Chemical Technology*, 2017. – №11(2). — P. 214–219/
11. Райхель А.М. Трещиностойкость технических стекол и ситаллов / А.М. Райхель, О.А. Непомнящий, Л.Г. Ивченко, Н.Л. Трушина / *Стекло и керамика*. – 1991. – № 10. – С. 18–19.
12. Infrared Optical Properties of β –Spodumene Solid Solution Glass–Ceramic for Fiber–Optic Devices / Akihiko Sakamoto, Shigeru Yamamoto // *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006. – Vol. 45, № 9R. – P. 6969.

References (transliterated)

1. Toropov N.A. Strukturnye prevrashheniya v steklah pri povyshennykh temperaturah / N.A. Toropov, E.A. Poraj–Koshic. – Moskva: Nauka, 1965. – 259 p.
2. Bragina L.L., Savvova O.V., Babich O.V., Sobol Yu.O. Struktura ta vlasty'vosti sklokry'talichny'x materialiv: monografiya. Kharkiv: ООО «Компанія СІТ», 2016, 253 p.
3. Efimov A.M. IR absorption spectra of vitreous silica and silicate glasses: The nature of bands in the 1300 to 5000 cm^{-1} region / Andrei M. Efimov, Vera G. Pogareva // *Chemical Geology*, 2006. – Vol. 229, Is. 1–3. – P.198–217
4. Chukin G. D. Infrared spectra of silica / G. D. Chukin, V. I. Malevich // *Journal of Applied Spectroscopy*, 1977. – Vol. 26. – P. 223–229.
5. Hernández M.F. Dense alumina–mullite composite ceramics from alumina and spodumene–albite feldspar binary mixtures: Processing and properties / Hernández, M.F., López, P.V., Violini, A. et al. // *Science of Sinterin*, 2019. — Vol. 51, Is. 4. – P.445–458
6. Rebouças L.B. Characterization of $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$ glass–ceramics produced from a Brazilian spodumene concentrate / Rebouças, L.B., Souza, M.T., Raupp–Pereira, F., Novaes De Oliveira, A.P. // *Ceramica*, 2019. – Volume 65, Issue 375. – P. 366–377.
7. Xia L. Crystal structure and wave–transparent properties of lithium aluminum silicate glass–ceramics / Xia, L., Yang, Y., Zhang, X. et al. // *Ceramics International*, 2018. – Vol. 44, Is. 12, 15. – P.14896–14900
8. Mishra R. Study on thermophysical properties and phase evolution in Nd doped $Li_2O-Al_2O_3-SiO_2$ glass nucleated by multiple nucleating agents / Mishra, R., Goswami, M. Dixit, A., Krishnan, M // *Journal of Non–Crystalline Solids*, 2016. – Vol.447, 1. – P. 66–73.
9. Savvova O.V. High–Strength Spodumene Glass–Ceramic Materials / Savvova, O.V., Babich, O.V., Voronov, G.K., Ryabinin, S.O. // *Strength of Materials*, 2017. – 49 (3). – P. 479–486.
10. Savvova O.V. Development of glass–ceramic high–strength material for personal armor protection elements / Savvova O., Bragina L., Voronov G., Shalygina O., Kuriakin M. // *Chemistry and Chemical Technology*, 2017. – №11(2). — P. 214–219/
11. Rajhel' A.M. Treshhinostojkost' tehniceskikh stekol i sitallov / A.M. Rajhel', O.A. Nepomnjashhij, L.G. Ivchenko, N.L. Trushina / *Стекло и керамика*. – 1991. – № 10. – P. 18–19.
12. Infrared Optical Properties of β –Spodumene Solid Solution Glass–Ceramic for Fiber–Optic Devices / Akihiko Sakamoto, Shigeru Yamamoto // *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006. – Vol. 45, № 9R. – P. 6969.

Надійшла (received) 25.02.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Саввова Оксана Вікторівна (Саввова Оксана Викторовна, Savvova Oksana) – доктор технічних наук,

Вісник Національного технічного університету «ХПІ»

Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія, № 1(5) 2021

професор Харківський Національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, професор кафедри хімії та інтегрованих технологій; тел.: (057) 707-31-74; e-mail: savvova_oksana@ukr.net.

Воронов Геннадій Костянтинович (Воронов Геннадий Константинович, Voronov Gennady) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський Національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій; тел.: (057) 707-31-74; e-mail: voronov1976@ukr.net

Рябінін Святослав Олександрович (Рябинин Святослав Александрович, Riabinin Sviatoslav) – аспірант, Національний Технічний університет «Харківський політехнічний інститут» ; тел.: (057) 707-68-78; e-mail: riabinin_svyatoslav@hotmail.com

Фесенко Олексій Ігорович (Фесенко Алексей Игоревич, Fesenko Alexey) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський Національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, асистент кафедри хімії та інтегрованих технологій; тел.: (057) 707-31-74; e-mail: fesenco_alex@ukr.net

Свищов Дмитро Вікторович (Свищов Дмитрий Викторович, Svishov Dmitry) – Харківський Національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, магістрант кафедри хімії та інтегрованих технологій; тел.: (057) 707-31-74; e-mail: norvvin@gmail.com