

Shkol'nikova Tetyana Vasylivna – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, associate professor at the Department of the General and Inorganic Chemistry; tel.: +38(057)7076878; e-mail: itg@ukr.net.
УДК 666.266.6

О.В. САВВОВА, Г.К. ВОРОНОВ, Л.С. КУРАШ, А.Р. ЗДОРИК, Д.П. НОВІКОВ

ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМКИ РОЗРОБОК СКЛОКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ МАГНІЙАЛЮМОСИЛІКАТНИХ СТЕКОЛ

Проаналізовано сучасний стан розробок та застосування кордієритових склокристалічних матеріалів та встановлено перспективність їх застосування як елементів композиційної броні. Обрано систему критеріїв одержання комбінованої броні та обґрунтовано вибір вихідної системи $K_2O - RO - RO_2 - P_2O_5 - R_2O_3 - SiO_2$ для синтезу маґнійалюмосилікатних стекел. Встановлено, що спроектовані маґнійалюмосилікатні стекла можуть бути використані як основа при розробці кордієритових ситалів для композиційних навісних елементів неброньованої техніки.

Ключові слова: склокристалічні матеріали, маґнійалюмосилікатні стекла, кордієрит, навісні елементи неброньованої техніки

Проанализированы современные разработки и применения кордиеритовых стеклокристаллических материалов и установлена перспективность их применения в качестве элементов композиционной брони. Выбрана система критериев получения комбинированной брони и обоснован выбор исходной системы $K_2O - RO - RO_2 - P_2O_5 - R_2O_3 - SiO_2$ для синтеза маґнійалюмосиликатных стекел. Установлено, что спроектированные маґнійалюмосиликатные стекла могут быть использованы в качестве основы при разработке кордиеритовых ситалов для композиционных навесных элементов небронированной техники.

Ключевые слова: стеклокристаллические материалы, маґнійалюмосиликатные стекла, кордиерит, навесные элементы небронированной техники.

Contemporary developments and applications of cordierite glass-ceramic materials and perspectiveness of their application as elements of modern composite armor were analyzed. System of criteria for obtaining combined armor was selected, and the choice of the initial $K_2O - RO - RO_2 - P_2O_5 - R_2O_3 - SiO_2$ system for synthesis of aluminosilicate glasses was substantiated. Using calculated criteria of crystallization ability and structural strength of glasses, the compositional region for the synthesis of model glasses in this system has been determined. It has been established that magnesium aluminosilicate glasses may be used as the base in developing cordierite glass-ceramics for attached composite elements of unarmored vehicles.

Key words: glass ceramic materials, magnesium aluminosilicate glasses, attached elements of unarmored vehicles.

Вступ. Тривалий час особлива увага при вивченні технічних ситалів приділяється склокристалічним матеріалам, які отримують на основі системи $MgO - Al_2O_3 - SiO_2$ (MAS). Завдяки кристалізації в стеклах наведеної системи кристалічних фаз α -кордієриту, шпінелі, сапфірину, муліту та ін. склокристалічні матеріали на основі стекел системи MAS характеризуються оптимальним поєднанням хімічних, діелектричних та термомеханічних властивостей [1].

Поряд з високими експлуатаційними характеристиками вказані склокристалічні матеріали мають високі технологічні властивості, що дозволяє використовувати їх при виробництві крупногабаритних виробів, виробів складної геометричної форми і високоточних розмірів, виробів з різним рівнем пористості від нульової до 50÷70 об. %. Саме високі експлуатаційні характеристики в поєднанні з технологічністю і економічною ефективністю дозволяють віднести склокристалічні матеріали на основі стекел системи MAS до ряду особливо перспективних силікатних матеріалів.

Починаючи з 50-х років минулого сторіччя, термостійкі високоміцні кордієритові ситали пірокерам 9606 (США) [2] та АС-370 (Україна) [3] (табл.1) з високими значеннями механічних показників, опором корозії до окиснення при підвищених температурах, які поєднуються з їх зниженою вагою, активно використовуються при розробці авіаційних і аерокосмічних матеріалів.

Значний внесок у розробку та впровадження у виробництво склокристалічних матеріалів, зокрема, на

основі стекел системи MAS зробили науковці корпорації Corning N.Y. (США) (див. табл.1). Так, ними була розроблена кордієритова склокераміка для виготовлення елементів світлодіодних ламп [4].

У електронній техніці склокристалічні матеріали системи MAS на основі шпінелі ($MgO \cdot Al_2O_3$) та енстатиту ($MgO \cdot SiO_2$) застосовувалися переважно як ізолятори, наприклад, як підкладки мікросхем основної складової твердих маґнітних дисків для зберігання інформації [1]. При цьому використовуються такі властивості цих матеріалів, як низькі значення електропровідності і діелектричних втрат, стабільна діелектрична проникність, достатня електрична міцність у поєднанні з механічною міцністю і стійкістю до агресивних середовищ та радіації.

Компанією Minolta Co., Ltd. (США) розроблені склади склокераміки для підкладок маґнітних носіїв інформації з основною кристалічною фазою енстатит і/або його твердого розчину. Склокераміка має високий модуль Юнга, міцність, теплостійкість і забезпечує можливість отримання гладкої, однорідної поверхні і відносно дешевий спосіб виробництва [5].

Зносостійкі склокристалічні матеріали з вмістом як основної кристалічної фази кордієриту ($2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$) використовуються для деталей насосів, елементів поршневих двигунів, підшипників, деталей текстильного обладнання та як ріжучий інструмент [6].

Пористі ситали кордієритового складу використовують як субстрати каталізатора, фільтри

[7] і як носії в біотехнології. Так, авторами [8] спіканням і кристалізацією скляних порошків кордієритового складу отримані матеріали з відкритою поруватістю до 45 %. Для застосування в фотоніці використовують прозорі лугостійкі склокристалічні матеріали на основі стекел системи $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{K}_2\text{O}$, легованої Cr^{4+} . Дана склокераміка містить до 30 % форстериту ($\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$) і склокерамічного волокна [9].

Особливістю ситалів в системі MAS є їх висока здатність без деформації витримувати нагрівання до певної температури. Для підвищення вогнетривкості ситалу необхідно забезпечити наявність в ньому найбільш тугоплавкої кристалічної фази і гранично зменшити кількість склофази (< 10 об. %) [1]. Кордієритові ситали мають температуру деформації в межах $1275\div 1370^\circ\text{C}$, причому ця температура зростає зі збільшенням кількості Al_2O_3 у їх складі. Саме тому вказані ситали знайшли широке застосування як вогнетривкі матеріали в силікатній промисловості [10 – 12].

Останні досягнення при розробці нових склокристалічних матеріалів на основі магнійалюмосилікатних стекел стосуються, зокрема, створення високоміцних ситалів для захисту від високоенергетичних засобів ураження. Розробка високоефективної прозорої броні на основі шпінелі з високою механічною міцністю, яка застосовується для осклювання оглядових вікон транспортних засобів проводиться провідними науковцями компанії Surmet Corp. (Burlington, Mass.) [13]. Кордієритові склокристалічні матеріали, розроблені вченими компанії Ceramic Developments, Ltd., як елементи композиції є ефективним захистом від високоенергетичних засобів ураження з високою проникаючою здатністю [14].

В Україні більшість робіт, присвячених проблемам синтезу високоміцних матеріалів для засобів локального та індивідуального бронезахисту, стосується кераміки. Серед них вагомими є праці Лободи П.І. (НТУУ «КПІ»), Прокопів М.М. («Керамтех ЛТД»), Тимофєєва Л.А. (Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАНУ), Семченко Г.Д. (НТУ «ХПІ») [15].

Значний внесок при проектуванні, створенні технології і налагодженні виробництва броньованих кераміко-полімерних конструкцій належить ІПМ НАН України, де вперше в Україні створено виробничу дільницю з випуску кераміко-полімерних броньованих плит мозаїчної структури з використанням методу реакційного спікання керамік з карбіду кремнію [15]. Однак керамічні матеріали поряд з функціональною ефективністю або характеризуються відносно невисокою вартістю при високій щільності (корундова кераміка, Al_2O_3), або високою вартістю при низькій щільності (кераміка на основі B_4C) та складністю технологічного процесу виробництва.

Поряд з цим, більшість вітчизняних розробок бронеелементів відносяться до матеріалів для індивідуального бронезахисту. У разі використання згаданих матеріалів для бронелистів силового корпусу

їх ресурс від дії динамічних навантажень буде незначним. З врахуванням неможливості заміни при пошкодженні засобом ураження або відновлення при локальному руйнуванні матеріали для індивідуального бронезахисту не можуть бути використані як конструкційні [16].

На сьогоднішній день для вирішення задач підвищення захищеності при модернізації машин необхідною умовою безпечного функціонування неброньованої техніки є застосування полегшених навісних бронеелементів. Найбільш перспективними є варіанти установки додаткових пластин з композитної броні з підвищеною ударною в'язкістю. Це дасть змогу повністю вирішити проблему захищеності від кінетичних способів ураження, зокрема, заброневої поразки вторинними осколками [17].

Таблиця 1 – Відомі вітчизняні та закордонні кордієритові склокристалічні матеріали та їх області застосування

№ п/п	Назва	Властивості	Автор, власник розробки, рік	Область застосування
1	АС-370 (СТМ-1)	$\rho = 2,5 \div 2,84 \text{ г/см}^3$ $\alpha = 48 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ $\sigma_{\text{випли}} = 179 \text{ МПа}$ $E = 132 \div 157 \text{ ГПа}$ $HV = 9807 \div 11768$	В.О. «Автоскло», [2]	Антенні обтічники
2	Пірокерам 9606	$\rho = 2,6 - 2,61 \text{ г/см}^3$ $\alpha = 57 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ $\sigma_{\text{випли}} = 182 \text{ МПа}$ $E = 121 \text{ ГПа}$ $\epsilon = (5,58 \div 5,62) \cdot 10^6 \text{ Гц}$ $\lg \rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $\text{tg} \delta = (15 \div 24) \cdot 10^{-4} \text{ Гц}$	С.Д. Стуки Corning N.Y., 1956, [3]	Кожухи антен радіолокаторів, антенні обтічники
3	Склокераміка	$\alpha = 5 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	George H. Beall, Corning N.Y., 2014 [4]	Елементи світлодіодних ламп
4	Міцна кордієритова склокераміка	$\rho = 2,63 \div 2,76 \text{ г/см}^3$, $\alpha = (27,1 \div 30,1) \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ $HK = 852 \div 855$ $K_{IC} = 2,5 \div 3,8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$	George H. Beall, Corning N.Y., 2008 [6]	Елементи поршневих двигунів та ріжучий інструмент
5	Кордієритова склокераміка з низьким ТКЛ	$\alpha = (4,0 \div 19,2) \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Gregory A. Merkel Corning N.Y., 1999, [7]	Фільтри, субстрат каталізатора
6	Кордієритова склокераміка	$\alpha = (13 \div 18) \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	David M. Mille Corning N.Y., 1980, [10]	Вогнетривкі матеріали
7	Марганцева кордієритова склокераміка	$\alpha = (14,5 \div 41,0) \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ $\text{Log } \rho = 8,33 \div 13,44$	William H. Armistead, Corning N.Y., 1980 [11]	Непроникна високощільна на вогнетривка матеріал
8	Кордієритова склокераміка	$\sigma_{\text{ст}} = 50 \div 200 \text{ МПа}$; $\alpha = (28,4 \div 57,7) \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ $\rho = 2,5 - 2,6 \text{ г/см}^3$	Omar A. Alharbi, Riyadh, 2012 [12]	Вогнетривкі матеріали
9	Бронематеріал	$\rho = 2,7 \div 3,1 \text{ г/см}^3$; $HK = 608 \div 1100$; $E = 105 \div 150 \text{ ГПа}$; $\sigma_{\text{згин}} = 175 \div 229 \text{ МПа}$	R.W. Jones Ceramic Developments, Ltd., 1991 [14]	Бронеелементи для локального та індивідуального захисту

Серед відомих матеріалів вказаного призначення ефективного використання набула легка броня від куль малокаліберної стрілкової зброї MEXAS-L (IBD Deisenroth Engineering, Німеччина), яка встановлюється на неброньованих машинах, наприклад військових вантажівок. Призначення керамічного шару з оксиду алюмінію полягає в руйнуванні кулі або снаряду і розподілі кінетичної енергії по більшій площі підставки, залишкова енергія поглинається огранотекстолітовим шаром. Разом з тим значна область руйнувань керамічного шару, поряд зі значними деформаціями підкладки у місці удару, зокрема, у вигляді розшарувань на значній площі, обумовлюють низьку життєздатність керамічної броні при обстрілі.

Вирішенням цієї проблеми є використання склокристалічних матеріалів, які можуть одночасно виконувати роль енергоруйнуючого та енергопоглинаючого шару та можуть бути застосовані як елементи сучасної композиційної навісної броні. Тому на сьогодні в Україні питання з технологічних розробок відносно полегшених навісних композиційних елементів бронезахисту для неброньованої техніки на основі високоміцних низьковартісних склокристалічних матеріалів є актуальним та потребує подальших досліджень.

Мета роботи. Дослідження перспективних напрямків розробок склокристалічних матеріалів на основі системи MAS та проектування складів ситалів з високими захисними властивостями.

Методика проведення експерименту. В роботі було використано розрахункові методи: оцінки здатності стекол до кристалізації за коефіцієнтом кристалічності ($K_{кр}$) та структурної міцності матеріалів за показниками f_{Si} , Ψ_B та Ψ_{Al} .

Результати експерименту та їх обговорення. Особливістю кордієритових склокристалічних матеріалів є поєднання високої механічної міцності для забезпечення стійкості до дії енергоруйнуючих факторів та здатності поглинати та розсіювати ударні навантаження, вогнестійкості, хімічної стійкості, відносно низької щільності та невисокої вартості. Наявність у структурі матеріалу еластичної скломатриці, яка забезпечує релаксацію напруг та розсіювання енергії удару, дозволяє використовувати цей матеріал не тільки як руйнуючий, але і як демпферний шар.

На противокульну та осколкову стійкість комбінованої броні позитивно впливають такі характеристики кордієритового ситалу:

- щільність ($\rho = 2,5 \div 2,6 \text{ г / см}^3$) – визначає масові характеристики бронезахисту;
- твердість ($HV = 9000 \div 12000 \text{ МПа}$) – визначає ефективність руйнування бронебійного сердечника при взаємодії зі склокерамікою;
- міцність на стиснення ($\sigma_{ст} = 650 \div 850 \text{ МПа}$) – впливає на живучість броні при обстрілі;
- ударна в'язкість ($K_{CU} = 5 \div 6 \text{ кДж/м}^2$), в'язкість руйнування ($K_{IC} = 2,5 \div 4,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) – визначає живучість броні при обстрілі та експлуатаційну живучість;

-модуль пружності ($E = 100 \div 120 \text{ ГПа}$) – визначає хвильову картину, швидкість поширення хвиль напружень в перешкоді;

-інтеркристалічний характер руйнування склокераміки – визначає можливість енергопоглинання.

- термічна стійкість ($\alpha_{(20-320 \text{ } ^\circ\text{C})} \cdot 10^7 = 11 \div 57 \text{ град}^{-1}$) – вогнестійкість ($700 \div 750 \text{ } ^\circ\text{C}$, 15 хв.) – визначає здатність до дії відкритого полум'я;

- дієтрична постійна ($\epsilon = 5,6 \div 8,3$, $f=10^{10} \text{ Гц}$), тангенс кута діелектричних втрат ($\text{tg}\delta = 0,02$, $f=10^{10} \text{ Гц}$) – визначає можливість використання склокераміки як матриці при одержанні радіопоглинаючих матеріалів для маскування засобів озброєння та військової техніки від спостереження радіолокаційними засобами.

Експериментальне втілення вказаних критеріїв дозволить забезпечити необхідний ступінь бронезахисту (STANAG 4569 рівень I – III) за рахунок використання ситалу, як частини навісного композиційного бронеелементу. При цьому вага та вартість таких бронеелементів повинна бути суттєво нижчою за вартість повністю керамічних бронеелементів.

Для одержання захисних склокристалічних матеріалів скломатриця повинна відповідати комплексу наступних вимог: здатністю до тонкодисперсної об'ємної кристалізації з утворенням високоміцних кристалічних фаз (α -кордієриту, шпінелі, муліту) в умовах двостадійної термічної обробки; щільністю не вище за $2,6 \text{ г/см}^3$; високою термо- та вогнестійкістю.

Для встановлення області існування вихідних стекол було обрано систему $\text{K}_2\text{O} - \text{RO} - \text{RO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{R}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. В ній було обмежено область в наступних концентраційних межах мас. %: K_2O $2,0 \div 7,0$; $\text{RO} - \text{MgO}$ $9,0 \div 14,0$; CaO $2,0 \div 5,5$; ZnO $2,0 \div 2,5$; SrO $2,0 \div 4,0$; $\text{RO}_2 - \text{TiO}_2$ $2,0 \div 8,0$; ZrO_2 $2,0 \div 2,5$; CeO_2 $0,0 \div 0,5$; Al_2O_3 $20,0 \div 30,0$; B_2O_3 $0,0 \div 5,0$; P_2O_5 $0,0 \div 3,0$; SiO_2 $45,0 \div 53,0$.

В даній системі синтезовано склади модельних стекол серії КСК як основи для одержання склокристалічних матеріалів. Стекла серії КСК були зварені в однакових умовах при $1550 \div 1600 \text{ } ^\circ\text{C}$ в корундових тиглях з наступним охолодженням на металевому листі. Співвідношення фазоутворюючих оксидів MgO , Al_2O_3 та SiO_2 в модельних стеклах є близьким до стехіометричного кордієриту. Для одержання об'ємно закристалізованої структури стекол було обрано каталізatori кристалізації TiO_2 та $\text{ZrO}_2 \cdot \text{ZnO}$.

Введення CeO_2 дозволить забезпечити протікання нуклеації та утворення кристалічних фаз в області більш низьких температур. Наявність P_2O_5 у структурі стекол дозволяє зменшити деформацію зразку та напруги, які виникають при поглинанні енергії удару. Для підвищення ударної в'язкості до складу стекол вводили CaO , SrO , B_2O_3 . Введення B_2O_3 та K_2O знижує щільність та структурну в'язкість стекол, що є важливою умовою одержання технологічних полегшених ситалів. Розрахункові

значення структурних коефіцієнтів $\Psi_B > 1$ та $\Psi_{Al} > 1$ усіх модельних стеклов свідчить про переважну наявність тетрадрів $[BO_4]$ та $[AlO_4]$ у їх структурі, що разом зі значеннями f_{Si} в межах 0,4 є передумовою високої міцності їх структури. Крім цього, значення їх кристалізаційної здатності $K_{кр} = 2.14 \div 3.49$ вказує на можливість одержання на їх основі склокристалічні матеріали з високим ступенем механічної міцності.

Висновки. Проаналізовано області застосування магнійсилікатних стеклов та встановлено перспективність їх використання як компонентів засобів підвищення надійності захисту спеціальної техніки.

Обрано систему критеріїв одержання комбінованої броні та обґрунтовано вибір вихідної системи $K_2O - RO - RO_2 - P_2O_5 - R_2O_3 - SiO_2$ для синтезу склокристалічних матеріалів. З використанням розрахункових критеріїв кристалізаційної здатності та структурної міцності стеклов було встановлено область складів в даній системі для синтезу модельних стеклов.

Встановлено, що спроектовані стекла можуть бути використані як основа при розробці кордієритових ситалів для композиційних навісних елементів неброньованої техніки.

Список литературы

- Брагіна Л. Л. Структура та властивості склокристалічних матеріалів : монографія / Л. Л. Брагіна, О. В. Саввова, О. В. Бабіч, Ю. О. Соболев. – Х. : ООО "Компанія СМІТ", 2016. – 253 с.
- Бекренев Н. В. Керамика и ситаллы в приборостроении. Свойства. Технологические процессы обработки. Инструменты : учеб. пособие / Н. В. Бекренев, Р. С. Великанов, О. А. Дударева; под ред. проф. В. Н. Лясникова. – Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. – 128 с.
- Хамицаев А. С. Теплофизические характеристики и зависимость свойств конструкционной керамики от температуры / А. С. Хамицаев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 5 (13). – С. 42–53.
- Beall G. H. Pat. 2014/0001485 A1, USA. Glass-ceramic substrates for semiconductor processing / G. H. Beall, J. G. Couillard; Corning Inc. – 2014.
- Nagana Hideki Pat. 6649549, USA. Glass composition for crystallized glass / Nagana Hideki, Yuki Hiroshi, Mori Toshihara, Kawai Hideki; Minolta Co., Ltd. – 2003.
- Beall G. H. Pat. 7465687 B2, USA. Tough cordierite glass-ceramics / G. H. Beall; Corning Inc. – 2008.
- Merkel G. A. Pat. 6300263 B1, USA. Low-expansion cordierite glass ceramics / G. A. Merkel; Corning Inc. – 2001.
- Gemeinert Marion. Open-pore sintered glass-ceramics as carrier material for biotechnological use / Marion Gemeinert, Ralf Muller, Fred Gustav Wihsman // Glass Science and Technology. – 1997. – Vol. 70, № 9. – P. 278–282.
- Beall George H. Transparent Cr^{4+} doped forsterite glass-ceramic for photonic applications / Beall George H. // 19th International Congress on Glass, Edinburgh, July 1–6, 2001 : ICG 19 proceedings. – Sheffield: Society of Glass Technology, 2001. – Vol. 2. – P. D2/5–D2/6.
- Miller D. M. Pat. 3926648, USA. Sintered cordierite glass-ceramic / D. M. Miller, N. Y. Elmira; Corning Inc. – 1975.
- Armistead William H. Pat. 4191583, USA. Manganese cordierite glass-ceramic / William H. Armistead, Irwin M. Lachman; Corning N.Y. – 1980.
- Alharbi Omar A. Pat. 2012/0149542 A1, USA. Sintered cordierite glass-ceramic / Omar A. Alharbi, Esmat M. Hamzawy; King Abdulaziz City for Science and Technology, Riyadh (SA). – 2012.
- Ramisetty Mohan. Transparent polycrystalline cubic spinels protect and defend / Mohan Ramisetty, Suri Sastri, Uday Kashalikar, Lee M. Goldman [et.al] // American Ceramic Society Bulletin. – 2013. – Vol. 92, № 2. – P. 20–25.
- Jones Ronald W. Pat. 5060553, USA. Armor materials / Ronald W. Jones; Ceramic Developments (Midlands), Ltd. – 1991.
- Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід (Київ, 22–23 вересня 2015) / відп. ред. В. С. Шовкалюк. – К.: ТОВ «Міжнародний виставковий центр», 2015. – 248 с.
- Гриценко Г. Д. Захист легкоброньованої техніки: проблеми та перспективи підвищення бронезахисту / Г. Д. Гриценко, С. С. Степанов, О. І. Слюсаренко [та ін.] // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2007. – Вип. 4. – С. 44–54.
- Бусяк Ю. М. Общие подходы к оценке и обеспечению защищенности бронекорпусов легких по массе машин / Бусяк Ю. М., Ткачук Н. А., Васильев А. Ю. [и др.] // Интегрированные технологии та энергосбережения. – Харків: НТУ "ХПІ", 2014. – Вип. 3. – С. 154–163.
- Bragina L. L., Savvova O. V., Babich O. V., Sobol Yu. O. *Struktura ta vlastyivosti sklokrystalichnykh materialiv* [Structure and properties of glass-ceramic materials]. Kharkiv, "Kompaniya SMIT" Ltd. Publ., 2016. 253 p.
- Bekrennev N. V., Velykanov R. S., Dudareva O. A.; pod red. prof. Lyasnykova V. N. *Keramika i sitaly v priborostroenii. Svoystva. Tehnologicheskie processy obrabotki. Instrumenty* [Ceramics and glass-ceramics in instrument. Properties. Technological treatment processes. Instruments]. Saratov, Saratov state technical university Publ., 2006. 128 p.
- Khamitsaev A. S. *Teplofizicheskie kharakteristiki i zavisimost' svoystv konstrukcionnoy keramiki ot temperatury* [Thermal characteristics and dependence of the properties of structural ceramics on temperature]. Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. 2004, no. 5 (13), pp. 42–53.
- Beall G. H., Couillard J. G. *Glass-ceramic substrates for semiconductor processing*. Patent USA, no. 2014/0001485 A1, 2014.
- Nagana Hideki, Yuki Hiroshi, Mori Toshihara, Kawai Hideki. *Glass composition for crystallized glass*. Patent USA, no. 6649549, 2003.
- Beall G. H. *Tough cordierite glass-ceramics*. Patent USA, no. 7465687 B2, 2008.
- Merkel G. A. *Low-expansion cordierite glass ceramics*. Patent USA, no. 6300263 B1, 2001.
- Gemeinert Marion, Muller Ralf, Wihsman Fred Gustav. *Open-pore sintered glass-ceramics as carrier material for biotechnological use*. *Glass Science and Technology*. 1997, vol. 70, no. 9, pp. 278–282.
- Beall George H. *Transparent Cr^{4+} doped forsterite glass-ceramic for photonic applications*. *Proceedings of the 19th International Congress on Glass*. Vol. 2. Edinburgh, Sheffield, Society of Glass Technology Publ., 2001, pp. D2/5–D2/6.
- Miller D. M., Elmira N. Y. *Sintered cordierite glass-ceramic*. Patent USA, no. 3926648, 1975.
- Armistead William H., Lachman Irwin M. *Manganese cordierite glass-ceramic*. Patent USA, no. 4191583, 1980.
- Alharbi Omar A., Hamzawy Esmat M. *Sintered cordierite glass-ceramic*. Patent USA, no. 2012/0149542 A1, 2012.
- Ramisetty Mohan, Sastri Suri, Kashalikar Uday, Goldman Lee M. *Transparent polycrystalline cubic spinels protect and defend*. *American Ceramic Society Bulletin*. 2013, vol. 92, no. 2, pp. 20–25.
- Jones Ronald W. *Armor materials*. Patent USA, no. 5060553, 1991.
- Shovkalyuk V. S., exec. ed. *Perspektyvy naukovo-tekhnologichnoho zabezpechennya oboronno-promyslovoho kompleksu Ukrainy: Informatsiyno-komunikativnyy zakhid* (Kyiv, 22–23 veresnya 2015) [Prospects of scientific and technological support the military-industrial complex of Ukraine: information and communication event (Kyiv, September 22–23, 2015)]. Kyiv, «Mizhnarodnyy vystavkovyy tsentr» Ltd. Publ., 2015, 248 p.
- Hrytsenko H. D., Stepanov S. S., Slysarenko O. I. *Zakhyst lehkobron'ovanyoi tekhniki: problemy ta perspektyvy pidvyshchennya bronezakhystu* [Protection of light-armored vehicles: problems and prospects of improving body armor]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2007, no. 4, pp. 44–54.
- Busyak Yu. M., Tkachuk N. A., Vasylyev A. Yu. *Obshhie podhody k otsenke i obespecheniyu zashchishennosti bronekorpusov legkikh po*

References (transliterated)

masse mashin [Common approaches to the assessment and ensure the integrity of hulls light weight machines]. *Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya* [Integrated technologies and

energy efficiency]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2014, no. 3, pp. 154–163.

Надійшла (received) 01.07.16

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Перспективні напрямки розробок склокристалічних матеріалів на основі магнійалюмосилікатних стекол / О.В. Саввова, Г. К. Воронов, Л. С. Кураш, А. Р. Здорик // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 22 (1194). – С. 166-170. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-0821.

Перспективные направления разработок стеклокристаллические материалов на основе магнийалюмосиликатных стекол / О.В. Саввова, Г. К. Воронов, Л. С. Кураш, А. Г. Здорик // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 22 (1194). – С. 166-170. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2079-0821.

Perspective direction of development of glass-ceramic materials on the base of magnesium aluminosilicate glasses / O. Savvova, H. Voronov, L. Kurash, A. Zdorik // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Chemistry, chemical technology and environment. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. - № 22. - P.166-170. – Bibliogr.: 17. – ISSN 2079-0821.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Саввова Оксана Віктрівна – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; тел.: +38(057)7076878; e-mail: savvova_oksana@ukr.net

Саввова Оксана Віктровна – доктор технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший научный сотрудник кафедры технологии керамики, огнеупоров, стекла и эмалей; тел.: +38(057)7076878; e-mail: savvova_oksana@ukr.net

Savvova Oksana Viktorivna – Doctor of Technical Sciences, Associate professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior research assistant at the Department of the Ceramics, Refractories, Glass and Enamel Technology; tel.: +38(057)7076878; e-mail: savvova_oksana@ukr.net

Воронов Геннадій Костянтинович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей; тел.: +38(057)7076878; e-mail: voronov1976@ukr.net

Воронов Геннадий Константинович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший научный сотрудник кафедры технологии керамики, огнеупоров, стекла и эмалей; тел.: +38(057)7076878; e-mail: voronov1976@ukr.net

Voronov Hennadiy Kostyantynovich – Candidate of Engineering Sciences (Ph. D), Docent, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Docent at the Department of the Ceramics, Refractories, Glass and Enamel Technology; tel.: +38(057)7076878; e-mail: voronov1976@ukr.net

Кураш Леонід Степанович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії бронетанкового озброєння та військової техніки факультету військової підготовки; тел.: +38(057)7076878; e-mail: ndl_btovt@ukr.net

Kurash Leonid Stepanovich – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Senior Research Associate of the Armored Weaponry and Military Vehicles Research Laboratory of Guards Faculty of Military Training; tel.: (097) 60-51-815; e-mail: ndl_btovt@ukr.net

Кураш Леонид Степанович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории бронетанкового вооружения и военной техники факультета военной подготовки; тел.: +38(057)7076878; e-mail: ndl_btovt@ukr.net

Здорик Анастасія Романівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; тел.: +38(057)7076878; e-mail: a.z.nastiya2010@mail.ru

Здорик Анастасия Романовна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; тел.: (099) 68-83-149; e-mail: a.z.nastiya2010@mail.ru

Zdoryk Anastasiia Romanivna – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", student; tel.: +38(057)7076878; e-mail: a.z.nastiya2010@mail.ru

Новіков Дмитро Петрович – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", student; tel.: +38(057)7076878; e-mail: savvova_oksana@ukr.net

Новіков Дмитрий Петрович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; тел.: +38(057)7076878; e-mail: savvova_oksana@ukr.net

Novikov Dmytro Petrovich – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", student; tel.: +38(057)7076878; e-mail: savvova_oksana@ukr.net