

*С.О. РЯБІНІН, А.В. ЗАХАРОВ, МАЙЗЕЛІС А.О., ПРИТИЧЕНКО Г.В.*

### **ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМКІВ ВДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО БРОНЕЗАХИСТУ**

Проведено аналіз світового досвіду у напрямку сучасних розробок високоміцних алюмосилікатних склокристалічних матеріалів, зокрема, при створенні полегшеної броні. Визначені тенденції та сучасний стан ринку склокераміки з 2019 до 2023 роки та встановлено збільшення попиту на склокристалічні матеріали технічного призначення. Визначено, що спрямованість світового ринку склокераміки до фрагментації дозволить вітчизняним виробникам зменшити імпортозалежність та підвищити конкурентоспроможність вітчизняних склокерамічних матеріалів на світовому ринку. Встановлено перспективність використання високоміцних алюмосилікатних склокристалічних матеріалів як основи при одержанні елементів бронезахисту. Обрано критерії синтезу високоміцних бронеситалів. Обґрунтовано вибір оксидних систем для одержання захисних склокристалічних матеріалів, синтезовано модельні стекла та визначено технологічні параметри одержання ударостійких ситалів, які включають варку, формування, відпал та термічну обробку. Синтезовано модельні стекла та досліджено їх структуру в умовах термічної обробки у взаємозв'язку з фізико-хімічними властивостями матеріалів на їх основі. Встановлено, що розроблені склокристалічні матеріали на основі дисилікату літію характеризуються високими експлуатаційними властивостями і можуть бути використані при створенні сучасної броні. Встановлено, що розроблені високоміцні сподуменові склокристалічні матеріали в умовах низькотемпературної двостадійної термічної обробки характеризуються високими експлуатаційними властивостями та можуть бути використані як основа при розробці композиційного елемента індивідуального бронезахисту. Порівняльна оцінка експлуатаційних властивостей та техніко-економічних показників відомих керамічних та склокерамічних матеріалів для бронезахисту дозволила встановити конкурентоспроможність розроблених вітчизняних сподуменвісних матеріалів як елементів індивідуального захисту.

**Ключові слова:** алюмосилікатні склокристалічні матеріали, бронееlement, ударостійкість, швидкість розповсюдження хвилі, фізико-хімічні властивості.

*S.O. RIABININ, A.V. ZAKHAROV, A.O. MAIZELIS, H.V. PRITYCHENKO.*

### **DETERMINATION OF PROSPECTIVE DIRECTIONS FOR THE IMPROVEMENT OF MATERIALS FOR INDIVIDUAL ARMOR PROTECTION**

An analysis of world experience in the direction of modern developments of high-strength aluminosilicate glass-crystalline materials, in particular, in the creation of lightweight armor, was carried out. The trends and current state of the glass-ceramics market from 2019 to 2023 have been determined, and an increase in demand for glass-crystalline materials for technical purposes has been established. It was determined that the orientation of the global glass-ceramic market towards fragmentation will allow domestic manufacturers to reduce import dependence and increase the competitiveness of domestic glass-ceramic materials on the world market. The prospect of using high-strength aluminosilicate glass-crystalline materials as a basis for the production of armor protection elements has been established. The criteria for the synthesis of high-strength armored steels have been selected. The choice of oxide systems for the production of protective glass-crystalline materials is substantiated, model glasses are synthesized and the technological parameters of production of impact-resistant sitals, which include cooking, forming, annealing and heat treatment, are determined. Model glasses were synthesized and their structure under thermal treatment conditions was investigated in relation to the physical and chemical properties of the materials based on them. It was established that the developed glass-crystalline materials based on lithium disilicate are characterized by high operational properties and can be used in the creation of modern armor. It was established that the developed high-strength spodumene glass-crystalline materials under the conditions of low-temperature two-stage heat treatment are characterized by high operational properties and can be used as a basis for the development of a composite element of individual armor protection. A comparative assessment of the operational properties and technical and economic indicators of known ceramic and glass-ceramic materials for armor protection made it possible to establish the competitiveness of the developed domestic spodumene-containing materials as elements of individual protection.

**Keywords:** aluminosilicate glass-crystalline materials, armor element, impact resistance, speed of wave propagation, physical and chemical properties.

*S.A. РЯБІНІН, А.В. ЗАХАРОВ, МАЙЗЕЛІС А.А., ПРИТИЧЕНКО А.В.*

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИНДИВІДУАЛЬНОЙ БРОНЕЗАЩИТЫ**

Проведен анализ мирового опыта в направлении современных разработок высокопрочных алюмосиликатных стеклокристаллических материалов, в частности при создании облегченной брони. Определены тенденции и современное состояние рынка стеклокерамики с 2019 по 2023 годы и установлено увеличение спроса на стеклокристаллические материалы технического назначения. Определено, что направленность мирового рынка стеклокерамики к фрагментации позволит отечественным производителям

уменьшить импортозависимость и повысить конкурентоспособность отечественных стеклокерамических материалов на мировом рынке. Установлена перспективность использования высокопрочных алюмосиликатных стеклокристаллических материалов в качестве основы при получении элементов бронезащиты. Избраны критерии синтеза высокопрочных бронеситалов. Обоснован выбор оксидных систем для получения защитных стеклокристаллических материалов, синтезированы модельные стекла и определены технологические параметры получения ударопрочных ситалов, включающих варку, формовку, отжиг и термическую обработку. Синтезированы модельные стекла и исследована их структура в условиях термической обработки во взаимосвязи с физико-химическими свойствами материалов на их основе. Установлено, что разработанные стеклокристаллические материалы на основе дисиликата лития характеризуются высокими эксплуатационными свойствами и могут использоваться при создании современной брони. Установлено, что разработанные высокопрочные сдвоенные стеклокристаллические материалы в условиях низкотемпературной двухстадийной термической обработки характеризуются высокими эксплуатационными свойствами и могут быть использованы в качестве основы при разработке композиционного элемента индивидуальной бронезащиты.

**Ключевые слова:** алюмосиликатные стеклокристаллические материалы, бронезащита, ударопрочность, скорость распространения волн, физико-химические свойства.

**Вступ.** Зі збільшенням військових конфліктів, що супроводжуються масовими кульовими, вогневими та осколковими пораненнями, а також враховуючи стрімкий розвиток у галузі вибухових речовин, боєприпасів, стрілецької зброї збільшується балістична загроза внаслідок недостатнього ступеня захисту військового контингенту та цивільного населення, через занадто вартісні матеріали для існуючих бронезишетів. Тому виникає нагальна потреба у створенні більш дешевих новітніх видів високоміцних вогнетривких матеріалів, які забезпечать високий рівень бронестійкості елементів для засобів індивідуального захисту та захисту наземної і авіаційної техніки.

В теперішній час для виготовлення елементів бронезахисту використовуються металеві сплави, керамічні матеріали, полімерні композити, які, поряд з їх функціональною ефективністю, характеризуються значними недоліками, зокрема, високою вартістю, значною вагою конструкції та складністю технологічного процесу виробництва.

Поряд з цим більшість відомих матеріалів для бронезахисту належить закордонним виробникам з США, Німеччини, Ізраїлю та ін. На сьогодні в Україні технологічні розробки щодо елементів бронезахисту при наявності вагомих наукових розробок з матеріалознавства та у військовій галузі, сировинної бази та існуючих підприємств проводяться в недостатньому об'ємі та не впроваджуються в практику при проведенні бойових операцій.

Широкого використання набувають високоміцні склокристалічні матеріали, які використовуються у авіа- та ракетобудуванні (обтікачі антенних апаратів), в машинобудуванні (термостійкі деталі), для виготовлення теплообмінників, обігрівачів, панелей нагрівальних пристроїв, конструкційних елементів високотемпературних агрегатів, лабораторного та кухонного посуду. Високі термічні, механічні властивості та низька щільність таких матеріалів дозволяють використовувати їх як елементи індивідуального бронезахисту. Саме одержання високоміцних склокристалічних матеріалів з підвищеним рівнем термічних, механічних

властивостей та бронестійкості є пріоритетним напрямком для оборонного комплексу України.

#### Літературний огляд.

Для індивідуального та локального бронезахисту від впливу куль стрілецької зброї і високошвидкісних уламків використовується широке коло захисних протикульових і протиосколкових броньових структур з поверхневою щільністю, що не перевищує 50–80 кг/м<sup>2</sup>. Дуже часто такий броньовий захист називають легкою бронєю. Легка броня застосовується в засобах індивідуального бронезахисту – бронезишетах, бронещитах і бронешоломах, для локального бронювання автомобілів, літаків й вертольотів. Вимога мінімальності маси захисту призводить до використання в якості броні незвичних матеріалів[1].

Засоби індивідуального бронезахисту (ЗІБ) в різних країнах класифікують залежно від захисних властивостей броні. Клас захисту бронезишета – є показником стійкості захисної структури бронезишета до дії конкретного засобу ураження, в різних країнах перебиваються, тому можна провести їх зіставлення з деякою мірою наближення (табл. 1.1). Балістичну загрозу несуть кулі та уламки снарядів. Кулі можуть мати найрізноманітнішу конструкцію, форму і матеріал [6].

Таблиця 1.1– Класи бронезишетів за Українськими та європейськими стандартами.

ДСТУ 8782:2018 (Україна)[2]	NIJ Standard– 0101.04 (США)[3]	DIN (Німеччина) [4]	CEN (Європа)[5]
1	I	L	BR1
2	II – IIIA	I	BR2, BR3
2a	–	II	SG1, SG2
3	–	II	BR4
4	III	III	BR5
5	–	–	BR6
6	IV	IV	BR7

Бронежилети згідно з конструктивним виконанням діляться на три типи:

ТИП А – м'які (гнучкі) бронежилети із захисною структурою на основі спеціальних тканин.

ТИП Б – напівтверді бронежилети диференціального класу захисту з базовою захисною структурою на основі спеціальних тканин і додатковими жорсткими захисними елементами.

ТИП В – жорсткі (або напівтверді) бронежилети із захисною структурою на основі жорстких захисних та амортизуючих елементів[2].

Конструктивно сам бронеелемент основного захисту, згідно з [7], може складатися з наступних частин (рис. 1.1).

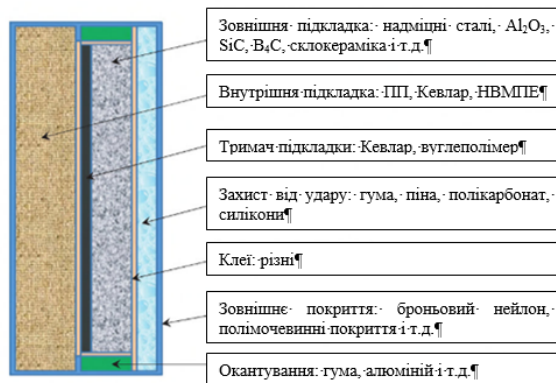


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення поперечного перерізу броньової плити

На рис. 1.1 проілюстрована багатошаровість броні, кожен шар якої несе певне функціональне навантаження [8]. В цій конструкції балістичний захист досягається в основному за рахунок керамічної плитки та композитної основи.

На захисні властивості (протикольова стійкість) комбінованої броні позитивний вплив надають такі характеристики керамічного матеріалу:

- низькі значення масової густини кераміки – визначає масові характеристики бронезахисту;
- твердість – визначає ефективність руйнування броньового сердечника при взаємодії з керамікою. В цілому бажано, щоб твердість керамічного матеріалу була вищою за твердість броньового сердечника, а імпеданс (або акустичний опір) був максимальним;
- міцність на стиск – впливає на живучість броні при обстрілі;
- модуль пружності – визначає хвильову картину, швидкість поширення хвиль напружень в перешкоді;
- в'язкість руйнування - визначає живучість броні при обстрілі і її експлуатаційну живучість;
- характер руйнування кераміки (інтеркристалітний або транскристалітний) – визначає можливість енергопоглинання.

З точки зору захисних властивостей і маси на одиницю площі композитна броня, тобто зовнішній керамічний матеріал на міцній, але гнучкій підкладці, перевершує сталь і інші метали.

Підвищення якості керамічної броні вкрай важливо для використання в захисних засобах особового складу, авіаційної і ракетної техніки, транспортних засобів. Захист особового складу або персоналу служб безпеки, а також їх транспортних засобів та устаткування від ушкодження кулями, шрапнеллю або іншими видами снарядів - складне технічне завдання. Крім балістичних властивостей, тобто здатності зупиняти кулі і шрапнель, броня повинна бути максимально легкою, мати певну гнучкість. Крім того, важлива якомога нижча собівартість.

#### Мета та завдання роботи.

Метою роботи є визначення перспективних матеріалів для елементів бронезахисту шляхом порівняння та визначенні необхідних параметрів існуючих розробок. Для досягнення цієї мети було вирішені такі завдання:

1. Аналіз світового досвіду застосування броньової кераміки.
2. Порівняння вітчизняних розробок зі світовими аналогами.
3. Визначення можливості використання та перспективності використання сучасних розробок склокристалічних матеріалів (ситалів) в якості бронеелементів із зменшеною вагою та збільшеною міцністю.

#### Аналіз світового досвіду застосування броньової кераміки.

*Основні виробники.* Загально відомо, що озброєння і матеріали для бронезахисту знаходяться в постійному протиборстві. На початок конфлікту в Іраку військовий персонал США використовував броньові керамічні пластини для захисту від стрілецької зброї (англ.: small arms protective inserts, SAPI) в складі броні *Interceptor*. У травні 2005 року, через високі втрати 2004 року, командування ВС США зажадало заміни броні SAPI на більш ефективну. Посилені плитки (англ.: Enhanced SAPI, ESAPI) мають підвищену товщину і масу (табл. 1.5). Середня маса однієї плитки становить близько 2,5 кг. Плитки ESAPI захищають від шрапнелі, куль калібром 9 мм та іншого великокаліберного озброєння, в т.ч. броньобійних (англ.: armor-piercing, AP) сердечників. Серед інших елементів захисту можна назвати захист для горла, комірцевої області і паху, дельтовидних м'язів і допоміжні елементи. У табл. 1.2 наведені розміри і маса керамічних пластин ESAPI[9].

Таблиця 1.2 – Розміри і маса пластин ESAPI [9]

Типорозмір	Габарити, см (товщина 8 мм)	Маса, кг
Екстрадрібний (Extra small)	18,4 × 29,2	1,70
Дрібний (Small)	22,2 × 29,8	2,08
Середній (Medium)	24,1 × 31,8	2,50
Великий (Large)	26,0 × 33,7	2,85
Екстракрупний (Extra large)	28,0 × 35,6	3,25
Бічні плитки (Side plate)	15,0 × 20,0	1,00

В 2007 р. рівень стандартів бронезилетів був знову підвищено до рівня X-SAPI (підвищений рівень захисту від куль з твердосплавним сердечником). Маса плит X-SAPI на 10 % вище, ніж у ESAPI, а рівень балістичного захисту та інших властивостей вище, при збереженні колишньої собівартості. Типова товщина керамічної плитки для захисту від різних видів озброєнь становить: 4 мм для пістолет-кулеметів і пістолетів; 5,5 мм для дрібнокаліберних гвинтівок; 6 - 7 мм для АК 47 та інших автоматів, і 8 - 10 мм для різних бронейних снарядів (NATO 7,62 мм і ін.) [9].

У ряді оптимальних сучасних керамічних бронесистем плитка з SiC або B<sub>4</sub>C товщиною 6,5 мм на підкладці з кевларового композиту тієї ж товщини здатна зупинити бронейний снаряд калібру 7,6 мм при пострілі з близької відстані з початковою швидкістю 800 м/с. Якщо використовувати замість кераміки сталь, то було б потрібно шар товщиною 10 мм, маса якого втричі більше. Плитка з Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> товщиною 6,0 мм на відповідній підкладці може витримати кулю калібру НАТО 5,56 мм при пострілі з близької відстані з початковою швидкістю понад 1000 м/с. В цьому випадку при використанні сталі потрібна була б плитка товщиною 10 мм. Оптимальним матеріалом для плиток X-SAPI є гарячепресований карбід кремнію.

Випробування броні X-SAPI були призначені на 2008 р. з запуском у виробництво на початку 2009 р., проте, в процесі виробництва відзначалися значні затримки. ВС США замовили броню ESAPI і X-SAPI (без обмежень за термінами та обсягами) на загальну суму 6 млрд. доларів. Ця сума розподілилася на трьох постачальників: BAE Systems (2,8 млрд. дол.), Ceradyne (2,4 млрд. дол.) і Protective Group (1,2 млрд. дол.). Початкові замовлення постачальникам становили по 500 комплектів плиток X-SAPI і ESAPI. Передбачається, що ВС США можуть придбати 1 млн. плиток X-SAPI протягом 5 років. Компанія Ceradyne планувала поставити для ЗС США X-SAPI до кінця 2009 р в кількості 120 000 наборів. На даний момент у ЗС США є в запасі 2 млн. плиток ESAPI, вироблених 12 різними компаніями. При цьому ресурс таких плиток до потреби в заміні становить близько 4 років. Крім Ceradyne і BAE, існує безліч інших потенційних виробників: Superior Graphite, Morgan, CeramTec ETEC, MCubed Technologies, Schunk, Saint-Gobain, CoorsTek, і ін. можна тільки здогадуватися, які компанії будуть здійснювати поставки кераміки групам The Protective Group, Schunk, 66 MCubed Technologies і Saint-Gobain, які виробляють броню з реакційноспеченого карбиду кремнію і бору.

Компанія Armour Works висловлювала побоювання, що більші й повільні снаряди зможуть пробивати сучасну керамічну броню. Якщо оцінювати за масою (з урахуванням броні для транспорту), то на ринку керамічної броні і раніше переважає оксид алюмінію, а за вартістю панування належить карбід кремнію. Попит в США на броню з спеченого і гарячепресованого SiC в 2008 р. оцінювався приблизно в 150-200 млн. дол., (в т.ч. броня для особового складу і для транспорту), а основними постачальниками є Ceradyne, BAE Systems, Saint-Gobain, CoorsTek і Morgan. У

масовому вираженні це відповідає близько 1200 т / рік. Приблизно дві третини припадає на броню для транспорту, третина - на бронезилети. Зростання зазначеної суми важко прогнозувати - він залежить від політичних чинників. Зазначене особливо вірно для плиток X-SAPI для бронезилетів.

Броня збирається з пластин правильної форми: шестигранників або квадратів. Дрібні елементи дозволяють уникнути поширення ушкоджень на велику площу; при цьому важливо, що зруйновані фрагменти залишаються зафіксованими на підкладці. У штурмових шоломах ВС США сучасній конструкції часто використовуються захисні елементи з карбиду бору. Керамічна броня також іноді застосовується для захисту від ножових поранень - для цього достатньо плиток товщиною 2 мм.

Броню з карбиду бору можна виготовляти шляхом гарячого пресування або спікання; спікання набагато дешевше: ціна становить 60-70% від вартості гарячепресованих виробів, але максимальний розмір таких виробів обмежений: лише до 100 × 100 мм. Гарячепресовані плитки можуть мати розмір 300 × 300 мм і більше. Крім того, ряд компаній і наукових центрів отримували карбід бору методом вільного спікання, однак, для цього необхідні дуже вартісні, тонко подрібнені, порошки. При їх ущільненні і спіканні відбувається сильна усадка, що обмежує розміри і ускладнює контроль форми виробів. Вчені з Технічного університету шт. Джорджія (США) розробили метод вільного спікання карбиду бору. Для експлуатації нової технології створена компанія Verco Materials. Основна перевага методу - можливість отримання виробів складної форми шляхом компресійного спікання (sinter / HIP), що дозволяє досить дешево отримувати броню для захисту рук і ніг. На ці розробки в області нанопорошків карбиду бору адміністрація DARPA виділила грант в 885 тис. дол. США строком на 4 роки. При виготовленні бронезилетів керамічні плитки кріпляться на підкладку з просоченого смолою волокнистого композиту. Вміст смоли невеликий, щоб підвищити схильність матеріалу до розшарування, і тим самим, поліпшити розсіювання енергії при попаданні снаряда. Спектр використовуваних смол і волокон досить широкий: скловолокно, Kevlar, Dyneema, Twaron або поліетиленові волокна; основний критерій - міцність на одиницю маси. Іноді кераміку кріплять на сталеву або алюмінієву пластину, але при цьому найчастіше використовують гнучкий проміжний шар композиту, пом'якшуючий удари. Металева підкладка істотно покращує захист при багаторазових влучаннях, але при цьому, вона важить набагато більше. Там, де потрібна мінімальна маса, наприклад, в сфері броні для вертольотів, частіше використовуються карбід бору і карбід кремнію.

Карбід кремнію коштує дешевше, ніж гарячепресований карбід бору, але у SiC вище щільність, і іноді - слабкіші захисні властивості. В бронюванні літаків з постійною геометрією крила необхідно захищати великі площі, тому там часто використовується SiC через його відносну дешевизну в порівнянні з B<sub>4</sub>C. Нещодавно виявлені проблеми у броні з B<sub>4</sub>C при попаданні снарядів з високою енергією. Зниження очікуваної захисної дії

пояснюється утворенням шарів аморфного матеріалу в точці потрапляння (близько 2 нм), що полегшує розвиток великих тріщин. Подальші дослідження показали, що проблему можна вирішити, змінивши склад або розмір зерна бронематеріалу. Фінансована армією США робота показала, що насичені бором гарячепресовані карбідні композиції (в порівнянні з  $V_4C_3$ ), наприклад, при мольному співвідношенні B:C = 7:1, мають істотно більш високу тріщиностійкість і твердість.

Компанія *MCubed Technologies* запатентувала легкі бронематеріали на основі реакційноспеченого SiC (RBSC). Він коштує дешевше і має щільність нижче, ніж у гарячепресованих SiC. Та ж компанія виробляє і реакційноспечений карбід бору (RBBC) з щільністю  $2,57 \text{ г / см}^3$ , що на 15 % нижче, ніж у спеченого SiC. Компанія *MCubed Technologies* заявляє, що RBBC не поступається за захисними властивостями гарячепресованих карбідів бору. *MCubed Technologies* також характеризується технологічною ліцензією від компанії *Lanxide* на різні метало-керамічні композиції з просоченням, а також розробила різні способи синтезу на базі НВЧ-нагрівання [10]. Інші оригінальні поєднання твердих фаз пропонує компанія *BAE Systems Advanced Ceramics*, яка описує свій матеріал як поєднання карбиду кремнію і бору [11].

Надшвидке зростання попиту на керамічну броню для військ США, практично в шість разів за 2004–2007 рр, не зміг зберегтися на тому ж рівні і зменшився в 2008-2009 рр. Висока собівартість і велика маса існуючих на сьогоднішній день матеріалів - серйозний недолік. Повний бронекорпус важить понад 12 кг. Згідно з прогнозами, застосування спечених матеріалів, таких як Si-SiC, в найближчі кілька років буде зростати швидше, ніж гарячепресованих. Плитки для бронезишетів нового покоління, X-SAPI, проектується для захисту від куль високої швидкості з вольфрамовим сердечником. При цьому плита із спеченого карбиду кремнію збереже практично ту ж товщину (8 мм), що і у E-SAPI і považає але лише на 10%.

#### Порівняння вітчизняних розробок.

Серед робіт, що присвячені проблемам синтезу високоміцних керамічних матеріалів для засобів індивідуального захисту, поряд з іноземними, вагомими в Україні є праці науковців Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» (НТУУ «КПІ») [12], Інституту проблем матеріалознавства НАН України [13], «Керамтех ЛТД», Українського державного університету залізничного транспорту, Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАНУ [14], Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ») [15, 16, 28, 29].

Викликає зацікавленість розроблена спільно з ІЕЗ ім. С. О. Патона в НТУУ «КПІ» технологія виробництва металокерамічних матеріалів з матрицею із титану, армованою керамічними волокнами з бориду титану, що мають міцність 890 МПа під час розтягування та пластичність більше 15 %, та встановлена можливість одержання нового покоління надміцної надтвердої армованої кераміки різноманітного застосування не нижче 6 класу

захисту, яка є високотехнологічною і високоліквідною продукцією в нинішніх умовах [12]. Значний внесок при проектуванні, створенні технології і налагодженні виробництва броньованих кераміко-полімерних конструкцій належить НАН України. Так, в ІПМ НАН України вперше в Україні створено виробничу дільницю з випуску кераміко-полімерних броньованих плит мозаїчної структури з використанням методу реакційного спікання керамік з карбиду кремнію [13].

Науковцями ТОВ «Керамтех ЛТД» (Україна) на основі багаторічного досвіду вже розпочато виготовлення дослідних зразків бронеплит із використанням ефективного високощільного композиційного матеріалу, що має високі характеристики міцності на основі порошків тугоплавких оксидів та карбідів у процесі електроконсолідації [14].

Проведені роботи в НТУ «ХПІ» дозволили значно підвищити тактико-технічні характеристики та надійність бронетанкових і авіаційних виробів за рахунок використання в якості матеріалів для елементів військової техніки вентильних металів після МДО-обробки, які також можуть слугувати ефективним засобом індивідуального захисту [16].

Аналіз представлених на даний час матеріалів, що використовуються в якості захисних елементів у бронезишетах, за експлуатаційними та вартісними показниками дозволив виявити переваги та недоліки кожного з них.

Використання броньованих сталей обмежується їх значною вагою, а титанові сплави внаслідок їх низької теплопровідності при інтенсивному динамічному навантаженні мають схильність до локалізації зсувних пластичних деформацій.

Що стосується керамічних матеріалів, то поряд з їх функціональною ефективністю, вони або характеризуються відносно невисокою вартістю при високій щільності (корундова кераміка  $Al_2O_3$ ), або високою вартістю при низькій щільності (кераміка на основі  $V_4C_3$ ) та складністю технологічного процесу виробництва.

Поряд з цим, більшість вітчизняних розробок бронеелементів відносяться до матеріалів для індивідуального бронезахисту. У разі використання згаданих матеріалів для бронелістів 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 [17].

Тому на сьогодні в Україні питання з технологічних розробок відносно полегшених елементів бронезахисту на основі високоміцних низьковартісних матеріалів є відкритим.

#### Склокристалічні бронематеріали.

На сьогоднішній день для вирішення задач підвищення захищеності людського ресурсу зброєних сил 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 [18].

Вирішенням цієї проблеми є використання склокристалічних матеріалів, які можуть одночасно виконувати роль енергоруїнуючого 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 індивідуального бронезахисту на основі високоміцних низьковартісних склокристалічних матеріалів є актуальним та потребує подальших досліджень. Останні досягнення при розробці нових склокристалічних матеріалів на основі магнійаломосилікатних 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 оскльовання оглядових вікон транспортних засобів проводиться провідними науковцями компанії *Surmet Corp. (Burlington, Mass.)* [19]. Кордієритові склокристалічні матеріали, розроблені вченими компанії *Ceramic Developments, Ltd.*, як елементи композиції є ефективним захистом від високоенергетичних засобів ураження з високою проникаючою здатністю [20, 21].

Відомий метод захисту від кінетичних факторів засобів ураження з використанням аноритової склокераміки складу (мас. %):  $\text{SiO}_2$  15,0 – 46,0;  $\text{CaO}$  7,0 – 22,0;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  13,0 – 40,0;  $\text{TiO}_2$  0,3 – 10,0. Забезпечення таких властивостей як модуль пружності  $E = 100$  ГПа, твердість по Віккерсу 9,3 – 10,0 ГПа дозволяє їх використовувати як захисні композиційні елементи, які поглинають кінетичну енергію балістичного снаряду, що діє на броню [2]. Однак висока щільність розробленого склокристалічного матеріалу  $\rho = 2,7$  кг / м<sup>3</sup> не дозволяє його використовувати як захисний бронеелемент при одержанні засобів індивідуального захисту.

Найбільш близьким за технічною сутністю є склад високоміцної склокераміки поліфункціонального призначення, яка вміщує 30 – 65 мас. % дисилікату літію та 20 – 60 мас. %  $\beta$ -сподумену. Хімічний склад склокераміки представлений в мас. %:  $\text{SiO}_2$  68,0 – 82,0;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  5,0 – 12,5;  $\text{Li}_2\text{O}$  8,0 – 15,0;  $\text{K}_2\text{O}$  0,0 – 5,0;  $\text{Na}_2\text{O}$  0,0 – 5,0;  $\Sigma\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  0,0 – 5,0;  $\text{P}_2\text{O}_5$  0,0 – 4,0;  $\text{ZrO}_2$  0,0 – 10,0;  $\text{TiO}_2$  0,0 – 4,0;  $\text{B}_2\text{O}_3$  2,5 – 7,5;  $\text{ZnO}$  0,0 – 2,2. Для надання забарвлення матеріалу до складу вихідних стекел додатково вводили  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CuO}$ . Розроблена склокераміка завдяки особливостям структури характеризується низькими показниками щільності та в'язкості руйнування. Однак значення показників твердості за Кнупом = 680 та ТКЛР  $\alpha \cdot 10^{-7} = 65,0$  – 80,0 град<sup>-1</sup> не дозволяє використовувати вказані матеріали як високоміцні та вогнестійкі для елементів бронезахисту.

Відомий склокерамічний матеріал, що характеризується високими характеристиками міцності [21]. Ситал містить наступні інгредієнти, мас. %:  $\text{SiO}_2$  57,0÷70,0,  $\text{Li}_2\text{O}$  12,7÷19,0;

$\text{NaPO}_3$  2,0÷4,0;  $\text{K}_2\text{O}$  1,7÷2,5;  $\text{CaF}_2$  0,9÷1,2;  $\text{LiF}$  4,0÷8,0;  $\text{CeO}_2$  0,1÷1,0;  $\text{TiO}_2$  0,1÷9,0;  $\text{CaO}$  0,1÷4,0;  $\text{MnO}/\text{MnO}_2$  0,1÷4,0;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,1÷ 4,0. Високміцний ситал варять з літєво-силікатного скла при 1300 ÷ 1350 ° С, формування зразків проводять в холодну форму від температури 1300 ÷ 1350 ° С, відпал при температурі 400 ÷ 420 ° С, а термообробку після відпалу здійснюють за двоступінчастим режимом: підйом температури до 480 ÷ 520 ° С, витримка в 2-3 годин, підйом температури до 680 ÷ 720 ° С зі швидкістю 1 ÷ 4 градуси за хвилину, витримка при вказаній температурі 1 ÷ 2 години і далі природне охолодження до кімнатної температури. Отриманий легкоплавкий ситал характеризується високими характеристиками міцності – межа міцності на вигин 372 ÷ 392 МПа у поєднанні з низькою щільністю 2,39 ÷ 2,45 г / см<sup>3</sup> забезпечує його застосування в умовах екстремальних навантажень. Гідралітична стійкість відповідає I класу. Балістичні випробування показали, що межа тильної міцності зразків на основі розробленого ситалу на 5÷7 % вище, ніж зразків з карбиду бору. Однак термічний коефіцієнт лінійного розширення ситалу в межах  $\alpha = (106 \div 114) \cdot 10^{-7}$  град<sup>-1</sup> не дозволяє забезпечити термостабільність основних властивостей і лінійних розмірів матеріалу при зміні температури.

Відомий склад прозорої склокерамічної броні з високою механічною міцністю для оглядових вікон, транспортних засобів, вітрового оскльовання гелікоптерів [22]. Для отримання високої щільності центрів кристалізації  $> 10^{20}$  на метр кубічний термообробку вихідного скла на стадії зародкоутворення переважно проводять в інтервалі 520–580 ° С впродовж 10–170 год. Потім проводять кристалізацію при 710–770 ° С впродовж від 15 хв. до 2 годин. До температури кристалізації матеріал нагрівають зі швидкістю 3 °С/хв. Склокераміка містить (мас. %):  $\text{SiO}_2$  – 67,0–75,0;  $\text{Li}_2\text{O}$  – 9,0–14,0;  $\text{ZrO}_2$  – 6,0–12,0;  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 1,0–3,0 та ін. оксиди. Наведемо конкретний склад (%):  $\text{SiO}_2$  – 71,8;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 4,5;  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 2,0;  $\text{Li}_2\text{O}$  – 11,0;  $\text{ZnO}$  – 0,5;  $\text{ZrO}_2$  – 8,0;  $\text{K}_2\text{O}$  – 2,2 [23]. Однак розроблений матеріал характеризується достатньо тривалими строками стадій термічної обробки на етапі зародкоутворення кристалів, що позначається на їх технологічності та вартості.

Співробітниками НТУ «ХПІ» були проведені дослідження, та запропоновані деякі системи ситалів, які відрізняються підвищеною міцністю та ударостійкістю. Що відбувається зарахунок формування ситалізованої структури з наявністю тонкодисперсних кристалів дисилікату літію,  $\beta$ -сподумену, шпінелі та  $\alpha$ -кордієрту, які рівномірно розподілені у об'ємі дослідних склокристалічних матеріалів у кількості 50÷55 об. % позначається на значеннях мікротвердості  $H=7800\div9400$  МПа та показнику тріщиностійкості  $K_{IC} = 2,4\div3,5$  МПа·м<sup>0,5</sup>, що є важливим фактором при поглинанні енергії удару кулі без утворення тріщин і руйнування [24,25].

#### Висновки.

1. Провідні виробники матеріалів для бронезахисту в усьому світі змагаються у вдосконаленні існуючих матеріалів та у пошуку більш міцних, ударостійких та легких композитів. Найбільш перспективними матеріалами для

бронезахисту високих класів на даний час є кераміка з  $Al_2O_3$ ,  $B_4C$ , Si-SiC. Але дана кераміка є досить дороговартісною та складною в виробництві, за рахунок високоенергетичних виробництв.

2. Вітчизняні дослідження здебільшого направлені на здешевшення, та підвищення стійкості існуючих матеріалів, що в свою чергу дозволить підняти конкурентоспроможність Українського виробництва на світовому ринку. На сьогодні в Україні питання з технологічних розробок відносно полегшених елементів бронезахисту на основі високоміцних низьковартісних матеріалів є відкритим.

3. Найбільш перспективними є варіанти встановлення додаткових пластин з склокристалічних матеріалів в плити броні з підвищеною ударною в'язкістю.

4. Проведено аналіз накопиченого світового досвіду у напрямку сучасних розробок високоміцних алюмосилікатних склокристалічних матеріалів, зокрема, при створенні полегшеної броні. Обрано критерії синтезу високоміцних бронеситалів. Обґрунтовано вибір оксидних систем для одержання захисних склокристалічних матеріалів, синтезовано модельні стекла та визначено технологічні параметри одержання ударостійких ситалів, які включають варку, формування, відпал та термічну обробку. Встановлено механізм фазоутворення в модельних стеклах, який полягає у формуванні високоміцної ситалізованої структури з об'ємною тонкодисперсною кристалізацією дисилікату літію або  $\beta$ -сподумену шляхом керованого регулювання їх нано- та мікроструктури при термічній обробці. Розробка в умовах низькотемпературної термічної обробки склокристалічного матеріалу на основі дисилікату літію дозволяє одержати на його основі бронеелемент з одночасно високими значеннями в'язкості руйнування при низьких значеннях щільності та модуля пружності. Впровадження розробленого склокристалічного матеріалу дозволить підвищити конкурентоспроможність вітчизняних бронематеріалів та забезпечити показники їх властивостей на рівні світових аналогів.

#### Список літератури

- Григорян В. А. Матеріали та захисні структури для локального та індивідуального бронювання / В. А. Григорян, И. Ф. Кобылкин, В. М. Маринин, Е. Н. Чистяков; под ред. В. А. Григоряна. – М.: Изд. РадиоСофт, 2008. – 406 с.
- ДСТУ 8782:2018 Засоби індивідуального захисту. Бронезилети. Класифікація. Загальні технічні умови / Технічний комітет стандартизації «Продукція спеціального призначення» 2018.
- Ballistic Resistance of Personal Body Armor: NIJ Standard–2001.01.04 -Revision A – June 2001.
- Стандарт Німеччини «Бронезилети», (Technische Richtlinie «Ballistische Schutzklassen», Revisionen: Oktober 2008).
- Стандарт Великобританії на засоби індивідуального захисту для поліції, («PSDB Body Armour Standards For UK Police», редакція 7/03, 2003 р.)
- Легкие баллистические материалы / Под ред. А. Бхатнагара; пер. с. англ. под общ. ред. С. Л. Баженова. – М.: Техносфера, 2011. – 392 с.
- The Science of Armour Materials / Edited by Ian G. Crouch. – Duxford: Woodhead Publishing, 2016. – 754 p.
- Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications / [E. L. Thomas, M. F. McGrath, R. C. Buchanan et al.]. – Washington: National Academies Press, 2011. – 176 p.
- An Overview of Ceramic Armor Applications / William A. Gooch Jr. 6<sup>th</sup> technical conference idee 2004 Trenčín, Slovakia 6-7 may 2004.  
[https://www.researchgate.net/publication/292398604\\_An\\_Overview\\_of\\_Ceramic\\_Armor\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/292398604_An_Overview_of_Ceramic_Armor_Applications)
- David N. V. Ballistic resistant body armor: contemporary and prospective materials and related protection mechanisms / N. V. David, X.-L. Gao, J. Q. Zheng // Applied Mechanics Reviews. – 2009. – Vol. 62, № 5. – 20 p.
- Vargas-Gonzalez L., F. Speyer R., Campbell J. Flexural Strength, Fracture Toughness, and Hardness of Silicon Carbide and Boron Carbide Armor Ceramics // Applied Ceramic Technology. – 2010. –Vol. 7, № 5. – P. 643-651.
- Loboda P. I. Structure and properties of superhard materials based on boride pseudobinary systems produced by the zone melting method / P. I. Loboda, Yu. I. Bogomol, M. O. Sysyov, G. P. Kysla // Journal of Superhard Materials. – 2006.
- Вплив конструктивно-технологічних факторів на ефективність бронеелементів на основі кераміки / Л. Р. Вишняков, О. В. Мазна, О. В. Нешпор та ін. // Проблеми прочності. – 2004. – № 6. – С. 128–135.
- Анализ материалов и их свойств, применяемых для средств индивидуальной бронезащиты / В. В. Мильников, А. А. Абросимов, И. Д. Романов, А. Д. Романов // Успехи современного естествознания. – Технические науки. – 2014. – № 9. – С. 143–147.
- David N. V. Ballistic resistant body armor: contemporary and prospective materials and related protection mechanisms / N. V. David, X.-L. Gao, J. Q. Zheng // Applied Mechanics Reviews. – 2009. – Vol. 62, № 5. – 20 p.
- Частные вопросы конечной баллистики / Под ред. С. А. Григоряна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2006. – 592 с.
- Грищенко Г. Д. Захист легкоброньованої техніки: проблеми та перспективи підвищення бронезахисту / Г. Д. Грищенко, С. С. Степанов, О. І. Слюсаренко [та ін.] // Вісник НТУ "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ", 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. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2014. – Вип. 3. – С.154–163.
- 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.
- 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.
- Pat. US 2005/0119104 A1, IPC7 B32B 9/00. Protection from kinetic threats using glass-ceramic material / R. Alexander, A. Nachumi, S. Raichel. – № 10/928,723; filed 30.08.2004; date of patent 02.06.2005. – 15 p.
- Pat. US 2015/0274581 A1, C03C 10/0027, C03C 2204/00. High strength glass-ceramics having lithium disilicate and beta-spodumene structures / G. H. Beall, Qiang Fu, L.A. Moore, L. R. Pinckney, Ch. M. Smith – № 14/474,78; filed 02.09.2014; date of patent 01.10.2015. – 10 p.
- Savvova O.V., Fesenko O.I., Voronov H.K., Riabinin S.O. Features of the formation of nanostructure in lithium-aluminium-silicate glass-ceramic materials at the initial stages of nucleation // Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotechnologii. – 2020. – Vol. 18, № 4. – P. 889–902.
- Savvova O., Voronov H., Fesenko O., Riabinin S., Tymofiev V. High-strength glass-ceramic material with low temperature formation // Chemistry and Chemical Technology. – 2022. – Vol. 16, № 2. – P. 337–344

## References (transliterated)

1. Grigorjan V. A., Kobylkin I. F., Marinin V. M., Chistjakov E. N. Materialy i zashhitnye struktury dlja lokal'nogo i individual'nogo bronirovaniya [Materials and protective structures for local and individual armor] / pod red. V. A. Grigorjana. – M.: Izd. RadioSoft, 2008. – 406 P.
2. DSTU 8782:2018 Zasoby individualnoho zakhystu. Bronezhylety. Klyasifikatsiia. Zahalni tekhnichni umovy./ Tekhnichniy komitet standartyzatsii «Produktsiia spetsialnoho pryznachennia» 2018.
3. Ballistic Resistance of Personal Body Armor: NIJ Standard–2001.01.04 -Revision A – June 2001.
4. Technische Richtlinie «Ballistische Schutzklassen», Revisionen: Oktober 2008
5. «PSDB Body Armour Standards For UK Police», редакція 7/03, 2003 p.)
6. Legkie ballisticheskie materialy [lightweight ballistic materials] / Pod red. A. Bhatnagara; per. s. angl. pod obshh. red. S. L. Bazhenova. – M.: Tehnosfera, 2011. – 392 p.
7. The Science of Armour Materials / Edited by Ian G. Crouch. – Duxford: Woodhead Publishing, 2016. – 754 p.
8. Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications / [E. L. Thomas, M. F. McGrath, R. C. Buchanan et al.]. – Washington: National Academies Press, 2011. – 176 p.
9. An Overview of Ceramic Armor Applications / William A. Gooch Jr. 6<sup>th</sup> technical conference idee 2004 Trenčín, Slovakia 6-7 may 2004. [https://www.researchgate.net/publication/292398604\\_An\\_Overview\\_of\\_Ceramic\\_Armor\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/292398604_An_Overview_of_Ceramic_Armor_Applications)
10. David N. V. Ballistic resistant body armor: contemporary and prospective materials and related protection mechanisms / N. V. David, X.-L. Gao, J. Q. Zheng // Applied Mechanics Reviews. – 2009. – Vol. 62, № 5. – 20 p.
11. Vargas-Gonzalez L., F. Speyer R., Campbell J. Flexural Strength, Fracture Toughness, and Hardness of Silicon Carbide and Boron Carbide Armor Ceramics // Applied Ceramic Technology. – 2010. –Vol. 7, № 5. – P. 643-651.
12. Loboda P. I. Structure and properties of superhard materials based on boride pseudobinary systems produced by the zone melting method / P. I. Loboda, Yu. I. Bogomol, M. O. Sysoev, G. P. Kysla // Journal of Superhard Materials. – 2006.
13. Vyshniakov L. R., Mazna O. V., Neshpor O. V. et al. Vplyv konstruktivno-tehnologichnykh faktoriv na efektyvnist broneelementiv na osnovi keramiky [Influence of design and technological factors on the effectiveness of ceramic-based armor elements] // Problem prochnosti. – 2004. – № 6. – S. 128–135.
14. Myl'nikov V. V., Abrosimov A. A., Romanov I. D., Romanov A. D. Analiz materialov i ih svoystv, primenjaemyh dlja sredstv individual'noj bronezashchity [Analysis of materials and their properties used for personal armor protection] // Uspelhi sovremennogo estestvoznaniya. – Tehnicheskie nauki. – 2014. – № 9. – S. 143–147.
15. David N. V. Ballistic resistant body armor: contemporary and prospective materials and related protection mechanisms / N. V. David, X.-L. Gao, J. Q. Zheng // Applied Mechanics Reviews. – 2009. – Vol. 62, № 5. – 20 p.
16. Chastnye voprosy konechnoj ballistiki [Particular issues of finite ballistics] / Pod red. S. A. Grigorjana. – M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2006. – 592 p.
17. Hrytsenko H. D., Stepanov S. S., Sliusarenko O. I. [et al.]. Zakhyst lehkobronovanoi tekhniki: problemy ta perspektyvy pidvyshchennia bronezakhystu [Protection of lightly armored vehicles: problems and prospects for increasing armor protection] // Visnyk NTU "KhPI". – Kharkov: NTU "KhPY", 2007. – Vyp. 4. – P.44–54.
18. Busjak Ju. M., Tkachuk N. A., Vasil'ev A. Ju. [et al.]. Obshhie podhody k ocenke i obespecheniju zashhishhennosti bronekorpusov legkikh po masse mashin [General approaches to assessing and ensuring the protection of light armored hulls based on the mass of vehicles] // Integrovani tehnologii ta energoberezhennja. – Harkiv: NTU "HPI", 2014. – Vip. 3. – S.154–163.
19. 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.
20. Pat. 5060553, USA. Armor materials / Ronald W. Jones; Ceramic Developments (Midlands), Ltd. – 1991.
21. Perspektyvy naukovo-tehnologichnoho zabezpechennia oboronno-promyslovoho kompleksu Ukrainy: Informatsiino-komunikativnyi zakhid (Kyiv, 22-23 veresnia 2015) [Prospects of scientific and technological support of the defense-industrial complex of Ukraine: Information and communication event (Kyiv, September 22-23, 2015)] / vidp. red. V. S. Shovkaliuk. – K.: TOV «Mizhnarodnyi vystavkovyi tsentr», 2015. – 248 p.
22. Pat. US 2005/0119104 A1, IPC7 B32B 9/00. Protection from kinetic threats using glass-ceramic material / R. Alexander, A. Nachumi, S. Raichel. – № 10/928,723; filed 30.08.2004; date of patent 02.06.2005. – 15 p.
23. Pat. US 2015/0274581 A1, C03C 10/0027, C03C 2204/00. High strength glass-ceramics having lithium disilicate and beta-spodumene structures / G. H. Beall, Qiang Fu, L.A. Moore, L. R. Pinckney, Ch. M. Smith – № 14/474,78; filed 02.09.2014; date of patent 01.10.2015. – 10 p.
24. Savvova O.V., Fesenko O.I., Voronov H.K., Riabinin S.O. Features of the formation of nanostructure in lithium-aluminium-silicate glass-ceramic materials at the initial stages of nucleation // Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii. – 2020. – Vol. 18, № 4. – P. 889–902.
25. Savvova O., Voronov H., Fesenko O., Riabinin S., Tymofiev V. High-strength glass-ceramic material with low temperature formation // Chemistry and Chemical Technology. – 2022, Vol. 16, № 2. – P. 337–344.

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Рябінін Святослав Олександрович (Riabinin Sviatoslav)** – доктор філософії, науковий співробітник кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2972-8540>; e-mail: [riabinin\\_svytoslav@hotmail.com](mailto:riabinin_svytoslav@hotmail.com)

**Захаров Артем Вячеславович (Zakharov Artem)** – кандидат технічних наук – заступник завідувача науково-дослідної частини НТУ «ХПІ» – м. Харків – Україна – Телефон: (099) 944-55-89 – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0120-8263> – e-mail: [artem.zakharov@khpі.edu.ua](mailto:artem.zakharov@khpі.edu.ua)

**Маїзеліс Антоніна Олександрівна (Maizelis Antonina)** – доктор технічних наук – старший дослідник – Доцент кафедри технічної електрохімії НТУ «ХПІ» – м. Харків – Україна – Телефон: (066) 939-89-01 – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5296-9636> – e-mail: [antonina.maizelis@khpі.edu.ua](mailto:antonina.maizelis@khpі.edu.ua)

**Прийтиченко Ганна Вікторівна (Prutychenko Hanna)** – методист освітнього центру "Німецький технічний факультет" НТУ «ХПІ» – м. Харків – Україна – Телефон: (066) 967-77-15 – ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2214-8009> – e-mail: [hanna.prutychenko@khpі.edu.ua](mailto:hanna.prutychenko@khpі.edu.ua)

Надійшла (received) 08.10.2023