

УДК 666.9-16

О. В. Саввова,

доктор технічних наук, доцент, старший науковий співробітник кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»,

О. В. Бабіч,

кандидат технічних наук, науковий співробітник кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»,

В. Л. Топчий,

начальник науково-дослідної лабораторії бойового застосування підрозділів технічного забезпечення та радіаційного, хімічного, біологічного захисту факультету військової підготовки Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», підполковник,

С. О. Рябінін,

аспірант кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Інноваційні напрями розробки високоміцних прозорих склокристалічних матеріалів захисної дії

Установлена перспективність використання прозорих високоміцних алюмосилікатних склокристалічних матеріалів як основи при одержанні елементів бронезахисту спеціальної техніки. Синтезовано модельні скла та досліджено їхню структуру в умовах термічної обробки у взаємозв'язку з фізико-хімічними властивостями матеріалів на їх основі. Установлено, що розроблені склокристалічні матеріали на основі дисилікату літію характеризуються високими експлуатаційними властивостями і можуть бути використані при створенні сучасної прозорої броні.

Ключові слова: високоміцні склокристалічні матеріали, термічна обробка, ситалізована структура, дисилікат літію, прозора броня.

© О. В. Саввова, О. В. Бабіч, В. Л. Топчий, С. О. Рябінін, 2017

Вступ. Локальні воєнні конфлікти, що супроводжуються масовими кульовими, вогневими та уламковими пораненнями, а також стрімкий розвиток у галузі вибухових речовин, боєприпасів, стрілецької зброї сприяють наростанню балістичної загрози внаслідок недостатнього ступеня захисту військового контингенту й цивільного населення. Тому виникає нагальна потреба у створенні нових видів високоміцних вогнестійких матеріалів, які забезпечать високий рівень бронестійкості елементів засобів індивідуального захисту, наземної та авіаційної техніки.

Тривалий час для виготовлення елементів бронезахисту використовують металеві сплави, керамічні матеріали, полімерні композити [1], які, поряд з їх функціональною ефективністю, характеризуються значними недоліками, зокрема високою вартістю, значною вагою конструкції та складністю технологічного процесу виробництва.

На сьогодні в Україні технологічні розробки щодо елементів бронезахисту за наявності наукових розробок з матеріалознавства, сировинної бази та існуючих підприємств проводяться в недостатньому обсязі. Водночас широкого використання набувають захисні склокристалічні матеріали (ситали). Численні дослідження, проведені з 1953 р. (уперше синтезовані ситали американським дослідником S. D. Stookey (компанія Corning Glass Works) [2]) у різних країнах, дали змогу досягти суттєвих теоретичних і практичних успіхів у технології ситалів і сформулювати нові напрями матеріалознавства [2].

Нині попит на ситали зростає, на що вказує широкий спектр різних матеріалів на їх основі. Як комерційні продукти ситали випускається підприємствами таких марок, як: Robax®, Ceran®, Zerodur® (фірма Schott, Німеччина); Vitronit® (фірма Vitron, Німеччина); Neoceram®, Firelite®, (компанія Nippon Electric Glass, Японія); Piroswiss®, Contraflam®, Keralite® (фірма St. Gobain, Франція); Transarm® (фірма Alstom, Франція), Kerablack® (фірма Eurokera, Франція); Macor®, Dicor®, Pyrocera® (компанія Corning, США); ОТМ-350 (ОППП «Технологія», РФ) та ін. [3].

Високі термічні, механічні, оптичні властивості й низька щільність зазначених матеріалів дають змогу використовувати їх як елементи бронезахисту завдяки особливостям їхньої структури – високовпорядкованій самоорганізації [4–5]. Саме одержання високоміцних склокристалічних наноматеріалів з підвищеним рівнем ударо- та бронестійкості є пріоритетним напрямом досліджень для оборонного комплексу України й актуальним науково-технічним завданням, на вирішення якого спрямована дана стаття.

Аналіз сучасних тенденцій розвитку прозорих склокристалічних матеріалів захисної дії. Прикладом одночасного поєднання підвищеної механічної міцності (міцність на згин ($\sigma_{згин}$), ударна в'язкість (КС)), термічної стійкості, світлопроникності, радіопрозорості, стійкості

до дії хімічних та біологічних реагентів є склокристалічні наноматеріали на основі літійалюмосилікатних $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (LAS) [6–15] та магнійалюмосилікатних $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (MAS) [11] систем (табл. 1), які вміщують катализатори кристалізації (КТ). Саме вказані характерні особливості склокристалічних матеріалів визначають перспективність їх використання як заміників оптично прозорого кварцового скла.

Високі термічні характеристики та оптичне пропускання у видимій області спектра не менше 70% (при товщині 5 мм) мають такі матеріали відомих виробників, як Vision® (Corning Inc., США), Zerodur® і Ceran® (Schott AG, Німеччина), Neoceram™ N-0 (Nippon Electric Glass, Японія), Clearceram®-Z (OHARA Inc., Японія), CO-33 та CO 115м (ВАТ «Державний інститут скла ім. С. І. Вавилова» і ВАТ «Литкаринський завод оптичного скла», РФ) [16], що дає змогу використовувати їх як оптичні деталі та деталі вимірювальної техніки і приладів, які працюють у космосі.

На сьогодні зростає попит на склокристалічні матеріали, здатні витримувати високошвидкісну механічну дію, а саме захист від куль, і є конкурентоспроможними порівняно з вартіснішими відомими керамічними аналогами. Для вирішення цих завдань найчастіше використовують ситали на основі кристалічних (кр.) фаз α -кордієриту (кор.) ($\text{M}_2\text{A}_2\text{S}_5$), шпінелі (ш.) (МА), анортиту (ан.) (CAS_2 ,

де С – CaO), форстериту (фор.) (M_2S), кварцу (кв.) (SiO_2), кристобаліту (кр.) (SiO_2), рутилу (р.) (TiO_2), але вони не відповідають вимогам щодо механічної міцності, твердості й технологічності захисних елементів.

Ці обставини стали підставою для розробки і синтезу нових складів прозорих полегшених бронеситалів на основі систем LAS, MAS із високими оптичними, термічними та механічними властивостями на основі високоміцних сполук з високою світлопроникністю (T) – β -сподумену (сп.) ($\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$), петаліту (пет.) $\text{Li}[\text{AlSi}_4\text{O}_{10}]$, дисилікату літію (дсл.) (LS_2) та шпінелі. Установлення можливості одержання високоміцних склокристалічних матеріалів захисної дії за енергозберігаючою технологією з високими фізико-хімічними показниками для створення сучасної прозорої броні є актуальною науково-практичною задачею.

Постановка мети та методика дослідження. Метою роботи є встановлення перспективності розробки прозорих високоміцних алюмосилікатних склокристалічних матеріалів для елементів захисту спеціальної техніки.

Для досягнення означеної мети були поставлені такі завдання:

- аналіз накопиченого досвіду за напрямом створення захисних прозорих матеріалів;
- вибір критеріїв синтезу, обґрунтування вибору оксидних систем для одержання склокристалічних матеріалів захисної дії та синтез модельних стекло-

Таблиця 1

Відомі закордонні прозори високоміцні склокристалічні матеріали

	Система; КТ	Кр. фаза	Властивості	Країна, автор	Джерело
1	LAS; ZnO, TiO ₂	сп., р.	$\rho = 2,5 \div 2,6 \text{ г/см}^3$; $E = 95 \text{ ГПа}$; $\alpha = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$; $\sigma_{згин} = 100 \div 145 \text{ МПа}$; $KC = 5 \div 9 \text{ КДж/м}^2$	РФ, А. Г. Ромашин	[6]
2	LAS; ZrO ₂ , TiO ₂ , P ₂ O ₅	дсл.	$\rho = 2,53 \div 2,56 \text{ г/см}^3$; $E = 88 \div 101 \text{ ГПа}$; $HV = 680 \div 870$; $\sigma_{згин} = 167 \div 172 \text{ МПа}$; $K_{1C} = 2,1 \div 2,3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$	Велика Британія, М. І. Budd	[7]
3	LAS; ZrO ₂ , TiO ₂	кеатит.	$T (400 \div 700 \text{ нм}) - 0,74 \text{ та } 0,87$	США, F. Siebers	[8]
4	LAS; ZrO ₂ , TiO ₂ , SnO ₂ , V ₂ O ₅ , CeO ₂	дсл, ш., кр.	$\rho = 2,45 \div 2,5 \text{ г/см}^3$; $\alpha = 125 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	США, Б. Л. Рудой	[9]
5	LAS; ZrO ₂ , TiO ₂ , As ₂ O ₃	кв.	$\rho = 2,55 \text{ г/см}^3$; $HK = 600$; $E = 90 \text{ ГПа}$; $K_{1C} = 0,91 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$	США, L. R. Pinckney	[10]
6	LAS; ZnO, P ₂ O ₅ , Fe ₂ O ₃ ; CeO ₂	сп.	$\rho = 2,4 \div 2,45 \text{ г/см}^3$; $HK = 535 \div 580$; $E = 88 \div 104 \text{ ГПа}$; $\sigma_{згин} = 220 \div 250 \text{ МПа}$	США, R. W. Jones	[11]
7	LAS; ZrO ₂ , TiO ₂ , SnO ₂ , ZnO	кв.	прозоре 380–1100 нм; $HK = 550 \div 580$; $\alpha_{30-700} = (-0,5 \div -1) \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; STANAG 4569 – рівні 2–3	США, Thilo Zachau	[12]
8	LS; CaF ₂ ; ZnO; LiF	дсл.	$\rho = 2,36 \div 2,46 \text{ г/см}^3$; $\sigma_{згин} = 343 \div 441 \text{ МПа}$; $\alpha = (100 \div 120) \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	РФ, Ю. Ю. Меркулов	[13]
9	LAS; TiO ₂ , CeO ₂ ; фториди	дсл.	$\rho = 2,46 \div 2,47 \text{ г/см}^3$; $\sigma_{згин} = 250 \div 370 \text{ МПа}$; $HV = 8100 \div 8400 \text{ МПа}$	РФ, Н. В. Суздаль	[14]
10	LAS; P ₂ O ₅ ; ZrO ₂	пет., дсл.	$T (400 \div 700 \text{ нм}) - 0,9$; $\sigma_{см} = 100 \div 500 \text{ МПа}$; $HV = 7500 \text{ МПа}$; $K_{1C} = 1,13 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$	США, G. H. Beall	[15]
11	MAS; ZrO ₂ TiO ₂ , Cr ₂ O ₃	кор. ан.	$\rho = 2,7 \div 3,1 \text{ г/см}^3$; $E = 105 \div 150 \text{ ГПа}$; $\sigma_{згин} = 175 \div 229 \text{ МПа}$; $HK = 608 \div 1100$	США, R. W. Jones	[11]

- дослідження структури склокристалічних матеріалів у взаємозв'язку з їхніми функціональними властивостями.

При дослідженні структури скломатеріалів використовувалися взаємодоповнюючі методи фізико-хімічного аналізу: рентгенофазовий (дифрактометр ДРОН-3М), растровий електронний мікроскоп-мікроаналізатор РЕММА-101А), петрографічний (оптичний мікроскоп NU-2Е). Показники механічних властивостей (твердість за Віккерсом, модуль пружності, коефіцієнт інтенсивності напруг – в'язкість руйнування) отримано за допомогою твердоміру ТМВ-1000 та приладу для вимірювання модуля пружності за статичним методом. Температурний коефіцієнт лінійного розширення (α) встановлювали з використанням кварцового дилатометра ДКВ-5А. Щільність матеріалів вимірювали за методом гідростатичного зважування в толуолі. Для визначення світлопроникності (T) використовувався фотометр ФМ-94м.

Придатність матеріалів до використання як бронезахисного елемента оцінювали за емпіричним критерієм ударостійкості M , за Ж. Ж. Стиглицем [17], який визначається за формулою (1):

$$M = E \cdot HK / \rho, \quad (1)$$

де E – модуль пружності, ГПа; HK – твердість за Кнупом (визначали відповідно до графіка залежності HV/HK); ρ – щільність, кг/м³.

Більш різку залежність ударостійкості від в'язкості руйнування K_{1C} демонструє показник крихкості B , який, за даними авторів [18], для матеріалів може бути розрахований за формулою (2):

$$B = HV / K_{1C}, \quad (2)$$

де HV – твердість за Віккерсом, МПа; K_{1C} – в'язкість руйнування, МПа·м^{1/2}.

Експериментальна частина. Забезпечення високої механічної міцності та світлопроникності полегшених склокристалічних матеріалів при одержанні прозорих бронееlementів може бути реалізоване шляхом проектування потрібного складу вихідних стекол та формування в них у процесі низькотемпературної термічної обробки дисипативної наноструктури на основі високоміцних прозорих кристалічних сполук [4, 5].

Наноструктурування в ситалах відбувається за рахунок кристалізації аморфних структур шляхом флуктуаційного зародження нуклеаторів нанокластерів з подальшим їх зростанням. Існування неоднорідностей сприяє подальшому розшаруванню скла в передкристалізаційному періоді й формуванню в процесі термічної обробки структури оптичних ситалів, яка характеризується:

- розміром кристалів $\leq 0,4$ мкм, тобто менше довжини хвилі у видимій області спектра (400÷700 нм);
- відповідністю показників заломлення кристалів і склофази;
- кількістю високоміцної прозорої кристалічної фази, яка повинна становити $\approx 40\div 60$ об. %.

Для встановлення області існування стекол як основи для синтезу прозорих бронеситалів були обрані системи LS, LAS, MAS. У дослідних системах було обмежено область і синтезовано склади модельних стекол серій СЛ на основі дисилікату літію, СП – сподумену та КСК – шпінелі, муліту і кордіериту. Співвідношення фазоутворюючих оксидів Li_2O , MgO , Al_2O_3 та SiO_2 в модельних стеклах є близьким до стехіометричного для дисилікату літію, сподумену та кордіериту. Введення до складу стекол модифікуючих компонентів дасть можливість сформувати високоміцну прозору структуру ситалів в умовах низькотемпературної термічної обробки. Роль каталізаторів кристалізації ZrO_2 та P_2O_5 у структурі матеріалів полягає в прискоренні появи першої кристалічної фази, яка осаджується на їх зародках, з подальшим формуванням тонкокристалічної структури за механізмом метастабільного фазового розділення. Як зазначається у [16], «зростання кількості зародків кристалізації, сформованих на першій стадії термообробки, дає змогу знизити температуру і тривалість витримки на другій стадії зі збереженням фазового складу і ступеня кристалічності ситалу». У результаті того, що ZrO_2 , головним чином, залишається в аморфній фазі, підвищується його коефіцієнт заломлення. При цьому введення P_2O_5 позначиться на підвищенні розчинності ZrO_2 . Введення SeO_2 та ZnO сприятиме забезпеченню протікання нуклеації та утворення кристалічних фаз в області більш низьких температур. Уведенням оксиду сурми досягається зниження в'язкості розплаву, поліпшення умов освітлення скломаси, а також збільшення стабільності коефіцієнта розширення ситалів у широкій області температур [16].

Стекла були зварені в однакових умовах в корундових тиглях при температурах варки ($T_{вар}$) у межах 1250÷1600°C. Склокристалічні матеріали були отримані за скляною технологією.

Результати та їх обговорення. Проведені раніше дослідження взаємозв'язку структури та фізико-хімічних властивостей розроблених матеріалів серії СЛ [19], СП [20] та КСК [21] дали змогу встановити, що ситали на основі стекол СЛ-12, СП-6 та КСК-1 (табл. 2) можуть бути використані як основа при одержанні прозорих ситалів. Основним фактором, який визначає міцність розроблених ситалів, є взаємно проникна структура і здатність основних кристалічних фаз до утворення зв'язків між сусідніми кристалами. Вибір режиму термічної обробки для ситалів базувався на необхідності забезпечення високоміцної структури в умовах низькотемпературної короткотривалої термічної обробки (табл. 3).

Дослідження структури стекол після термічної обробки дало можливість установити, що для стекол СЛ-12 та СП-6 характерним є протікання процесу об'ємної тонкодисперсної кристалізації скла з утворенням метасилікату літію та його перекристалізації в стабільні кристали дисилікату літію та β -сподумену в кількості 50 об. % в умовах низькотемпературної короткотривалої двостадійної

Таблиця 2

Хімічний склад модельних стекел

Маркування	Фазоутворюючі компоненти, мас. %				Каталізатори кристалізації
	Li ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
СЛ-12	15,0	–	–	60,0	P ₂ O ₅ , ZnO, ZrO ₂ , CeO ₂ , Sb ₂ O ₃
СП-6	10,0	11,0	–	60,0	P ₂ O ₅ , ZnO, TiO ₂
КСК-1	–	9,0	29,0	51,0	P ₂ O ₅ , ZnO, ZrO ₂

термічної обробки при температурах на першій стадії (I ст.) 530÷630°C та на другій стадії (II ст.) – 850°C (табл. 3).

Для забезпечення збереження цілісності структури матеріалу СЛ-12, який характеризується підвищеним температурним коефіцієнтом лінійного розширення, проводили попередній відпал матеріалу при температурі $T_g = 450^\circ\text{C}$. Для скла КСК-1 формування ситалізованої структури на основі твердих розчинів шпінелі, α -кордіериту та муліту в загальній кількості 55 об. % спостерігається в умовах двостадійної термічної обробки за рахунок визначеного вмісту та співвідношення фазоутворюючих і модифікуючих компонентів.

Дослідження структури розроблених матеріалів дало змогу встановити такі відмінності формування їхнього фазового складу в умовах термічної обробки. Визначено, що для матеріалу СЛ-12 спостерігається формування пластинчастих або призматичних кристалів дисилікату літію розміром $\approx 0,4$ мкм у вигляді голок, які сполучені в дендритні гілки (рис. 1а, I) на тлі сітчастої замкнутої нанорозмірної структури (рис. 1б) Така форма є ідеальною з точки зору міцності матеріалу, оскільки присутність у структурі дрібних голчастих кристалів приводить до відхилення напрямку, розгалуження або припинення росту мікротріщин. Таким чином, кристали дисилікату літію блокують розвиток мікротріщин у структурі ситалу, а дендритні сполучення армують сітку скла, що приводить до суттєвого підвищення міцності матеріалу при вигині та стиску.

Для матеріалу СП-6 наявність щільної упаковки подовжених призматичних кристалів β -сподумену розміром до 1,0 мкм із чіткою спайністю, пов'язаних кінцями один з одним (рис. 1в, I), забезпечує високі значення механічних і термічних властивостей (табл. 3).

Для скла КСК-1 поява зародків метастабільних твердих розчинів зі структурою β -кварцу в низькотемпературній області (800°C) приводить до кристалізації алюмомагnezіальної шпінелі та формування твердих розчинів на основі α -кордіериту за рахунок хімічної взаємодії α -кристобаліту і шпінелі за реакцією: $2MA + 5S = M_2A_2S_5$. Термічна обробка КСК-1 при температурі 1050°C приводить до оплавлення склофази матеріалу та формування тонкокристалічної структури з розміром кристалів

Таблиця 3

Температурно-часові характеристики варки й термічної обробки дослідних стекел, характеристика основних кристалічних фаз у ситалах після термічної обробки

Маркування	$T_{вар}$, °C	Температури відпалу (T_g), °C, стадій термічної обробки та їх тривалість (τ), хв.			Характеристика кристалічних фаз у ситалах після термічної обробки	
		T_g/τ	I ст./ τ	II ст./ τ	Вид	Кількість, об. %
СЛ-12	1270	450/30	630/30	850/5	LS2/ L2A2S4	45/5
СП-6	1450	–	530/240	850/240	L2A2S4	50
КСК-1	1600	–	780/300	1050/300	тверді розчини MA2/ M2A2S5/ A3S2	25/20/10

0,4÷1,0 мкм. У структурі матеріалу чітко спостерігаються кристали α -кордіериту у вигляді ізометричних призм, які в розрізі шліфа мають вигляд шестикутника (рис. 1г, I) та октаедричні кристали шпінелі по площині з індексом (111) двійникового типу (рис. 1г, II). При цьому шпінелеві двійники зі зрощенням по площині з індексом (111) (рис. 1г, III) набувають характерного трикутно-пластинчастого вигляду з роздвоєними кутами.

Формування ситалізованої структури з наявністю тонкодисперсних кристалів дисилікату літію, β -сподумену, шпінелі та α -кордіериту, які рівномірно розподілені в об'ємі дослідних склокристалічних матеріалів у кількості 50÷55 об. % позначається на значеннях мікротвердості $H = 7800\div 9400$ МПа та в'язкості руйнування

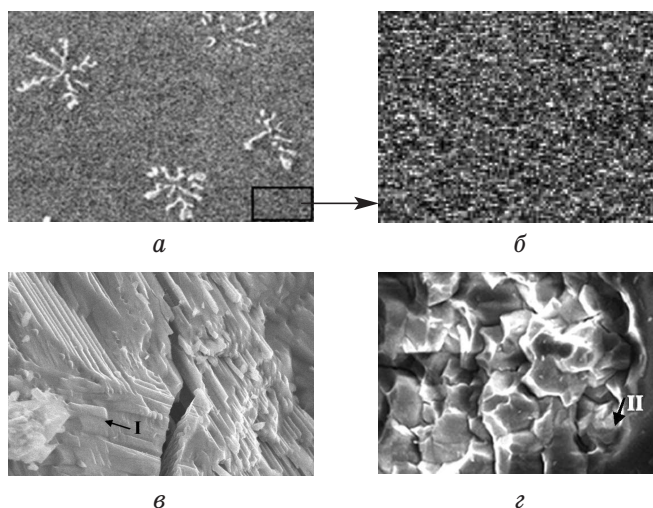


Рис. 1. Структура розроблених матеріалів

Таблиця 4

Експлуатаційні властивості дослідних матеріалів

Дослідні матеріали	HV , ГПа	K_{1C} , МПа·м ^{1/2}	E , ГПа	$\alpha \cdot 10^{-7}$, град ⁻¹	ρ , кг/м ³	T , %	B , МПа/МПа·м ^{1/2}	M , ГПа ² ·м ³ ·кг ⁻¹
СЛ-12	8,74	3,10	307	62,5	2380	72	2,82	1,186
СП-6	7,90	2,4	280	39,9	2420	64	3,29	0,940
КСК-1	9,40	3,5	325	59,0	2630	56	2,68	1,087

$K_{1C} = 2,4 \div 3,5$ МПа·м^{1/2}, що є важливим фактором при поглинанні енергії удару кулі без утворення тріщин і руйнування (табл. 4).

Для розроблених склокристалічних матеріалів був розрахований емпіричний критерій M (табл. 4), числові значення якого перебувають у межах $0,940 \div 1,186$ ГПа²·м³·кг⁻¹ та є наближеними до відповідних значень для спеченого оксиду алюмінію ($1,8 \div 1,9$ ГПа²·м³·кг⁻¹), який, за даними авторів [17], за співвідношенням «ціна – якість» є оптимальним для використання в бронезахисних композиціях.

Для прозорих керамічних матеріалів сапфіру, ALON, шпінелі розрахункові значення критерію M з використанням даних E , ρ та HK [22] складають відповідно 1,847; 1,629; 1,157.

При порівнянні значень параметрів E , ρ та M для розроблених матеріалів та відомих прозорих керамічних матеріалів очевидно, що розроблені матеріали дещо програють за показником ударостійкості, але переважають за здатністю релаксувати напруги, розсіювати енергію удару та низькою щільністю. Зважаючи на високу вартість керамічних матеріалів [17], важливим аспектом при впровадженні розроблених склокристалічних матеріалів є забезпечення співвідношенням «ціна – якість» за рахунок їх вищої технологічності.

Розрахункові значення показника крихкості B для розроблених склокристалічних матеріалів свідчать, що найменшу крихкість демонструє матеріал КСК-1 з найвищими значеннями твердості та в'язкості руйнування.

Серед розроблених матеріалів забезпечення видимості при експлуатації стрілецької зброї можливе лише при використанні захисних елементів на основі склокристалічного матеріалу СЛ-12 зі значенням коефіцієнту світлопропускання (T) у діапазоні 420–650 нм – 72%.

Для склокристалічних матеріалів СП-6 та КСК-1 показник T є дещо нижчим унаслідок наявності кристалів розміром більше 0,4 мкм. Ця проблема може бути розв'язана шляхом зниження тривалості стадій термічної обробки ситалів. Однак, зважаючи на високу в'язкість склорозплавів, для матеріалів СП-6 та КСК-1 температурно-часові режими варки й термічної обробки є достатньо високими. Тому матеріал СЛ-6 обґрунтовано з точки зору енергозбереження використовувати при розробці матеріалів, які експлуатуються в умовах високих термічних навантажень (оглядові вікна печей), а матеріал

КСК-1, за умови його модифікації Co^{2+} , – як матеріалу для пасивних модуляторів добротності.

Висновки

Проведено аналіз накопиченого досвіду за напрямом розробок висококоміцних алюмосилікатних склокристалічних матеріалів, зокрема при створенні прозорої броні. Обрано критерії синтезу висококоміцних прозорих бронеситалів. Обґрунтовано вибір оксидних систем для одержання захисних склокристалічних матеріалів, синтезовано модельні стекла та визначено технологічні параметри одержання прозорих ситалів, які охоплюють варку, формування, відпал і термічну обробку. Установлено механізм фазоутворення в модельних стеклах, який полягає у формуванні висококоміцної ситалізованої структури з об'ємною тонкодисперсною кристалізацією дисилікату літію або β -сподумену, або шпінелі та α -кордієриту шляхом керованого регулювання їхньої нано- та мікроструктури при термічній обробці. Розробка в умовах низькотемпературної термічної обробки склокристалічного матеріалу на основі дисилікату літію дає змогу одержати на його основі бронеелемент з одночасно високими значеннями в'язкості руйнування та світлопропускності при низьких значеннях щільності та модуля пружності. Упровадження розробленого склокристалічного матеріалу дасть можливість підвищити конкурентоспроможність вітчизняних прозорих бронематеріалів та забезпечити показники їхніх властивостей на рівні світових аналогів.

Перелік літератури

1. Легкие баллистические материалы / под ред. А. Бхатгара. – М. : Техносфера, 2011. – 392 с.
2. Corning U. S., Zanotto E. D. A Bright future for glass-ceramics / U. S. Corning, E. D. Zanotto // American ceramic society bulletin. – 2010. – V. 89. – № 8. – P. 19–27.
3. Чайникова А. С. Технологические аспекты создания радиопрозрачных стеклокристаллических материалов на основе высокотемпературных алюмосиликатных систем / А. С. Чайникова, М. Л. Ваганова, Н. Е. Щеголева, Ю. Е. Лебедева // Труды ВИАМ : Электронный научный журнал. – 2015. – № 11 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=884.
4. Брагіна Л. Л. Структура та властивості склокристалічних матеріалів : монографія / Л. Л. Брагіна, О. В. Саввова, О. В. Бабіч, Ю. О. Соболев. – Харків : Компанія СМІТ, 2016. – 253 с.

5. Саркисов П. Д. Направленная кристаллизация стекла – основа получения многофункциональных стеклокристаллических материалов / П. Д. Саркисов. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 1997. – 218 с.
6. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов. Проектирование, конструкционные материалы, технология производства, испытания : учеб. пособие / [А. Г. Ромашин, В. Е. Гайдачук, Я. С. Карпов, М. Ю. Русин]. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. – 239 с.
7. Pat. GB 2284655, F 41 H 5/02, B 64C 1/14, F 41H 5/08 5/26. Glass-ceramic armour / M. I. Budd, J. G. Darrant. – № 9418539.4; filed 14.09.1994; date of patent 14.06.1995. – 10 p.
8. Pat. 2010263525, USA, IPC^C C03C10/10; C03C10/12; F41H5/02. Glass ceramic armor material / Siebers Friedrich, Lemke Hans-Juergen, Schaupt Kurt, Zachau Thilo. – № 12/451794; appl. 04.12.2008; publ. 21.10.2010.
9. Pat. 4473653, USA, IPC^C C03C3/22. Ballistic-resistant glass-ceramic and method of preparation / Boris L. Rudoi; Boris L. Rudoi. – № 408114; appl. 16.08.1982; publ. 25.09.1984.
10. Pat. 7875565, USA, IPC^C C 03 C 10/08. Transparent glass-ceramic armor / Linda Ruth Pinckney, Jian-Zhi Jay Zhang, Carl Franklin Cline; Corning Inc. – № 11/710145; appl. 23.02.2007; publ. 25.01.2011.
11. Pat. 5060553, USA, IPC^C F41 H5/04. Armor materials / Ronald W. Jones; Ceramic Developments (Midlands), Ltd. – № 474080; appl. 10.11.1987; publ. 29.10.1991.
12. Pat. 2010154622, USA, IPC B32B17/06; B32B17/08; B32B17/10; B32B18/00; B32B27/06; C03C14/00; F41 H5/02. Highly transparent impact-resistant glass ceramic / Thilo Zachau, Friedrich Siebers, Ulrich Schiffner, Kurt Schaupt. – № 12/616982; appl. 12.11.2009; publ. 24.06.2010.
13. Пат. 2176624, РФ, МПК^C C03C10/04; C03C10/16; F41H1/02. Стеклокерамика, способ ее получения и защитная конструкция на ее основе / Ю. Ю. Меркулов; Ю. Ю. Меркулов. – № 2001108284/03; заявл. 29.03.2001; опубл. 10.12.2001.
14. Суздаль Н. В. Стеклокристаллические материалы на основе дисиликата лития и метабората цинка: Дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11 / Суздаль Наталья Владимировна. – СПб. : СПбГТИ, 2004. – 133 с.
15. Pat. 2016102010, USA, IPC C03C10/00; C03 C21/00. High strength glass-ceramics having petalite and lithium silicate structures / G.H. Beall, Qiang Fu, Ch.M. Smith; Corning Inc. – № 14/878133; appl. 08.10.2015; publ. 14.04.2016.
16. Пат. 2569703, РФ, МПК^C C03C10/12. Способ получения оптического ситалла / В. Н. Сигаев, В. И. Савинков, Е. Е. Строганова, А. Н. Игнатов. – № 2014124965А; заявл 19.06.2014; опубл. 27.11.2015.
17. Зайцев Г. П. Корундовая бронекерамика: опыт производства и применения / Г. П. Зайцев // Экспертный союз. – 2012. – № 3 (24) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://viam-works.ru/ru/last-number.>; <http://www.unionexpert.ru/index.php/2011-07-25-15-56-33/item/287-alumina-bronekeramika-experience-of-production-and-use>.
18. Mechanical properties and impact resistance of a new transparent glass-ceramic / T. Berthier da Cunha, J. P. Wu, O. Peitl [et al.] // Advanced engineering materials. – 2007. – Vol. 9. – № 3. – P. 191–196.
19. Високомісні літійвмісні матеріали спеціального призначення / [О. В. Саввова, Л. Л. Брагіна, О. В. Бабіч] та ін. // Збірник наукових праць ВАТ «УкрНДІВогнетривів імені А. С. Бережного». – Харків : Каравела, 2016. – № 116. – С. 116–124.
20. Дослідження кристалізаційної здатності літійалюмосилікатних стекол в умовах термічної обробки / О. В. Саввова, О. В. Бабіч, А. О. Гривцова // Вопросы химии и химической технологии. – Днепропетровск : Новая идеология, 2016. – № 3 (107). – С. 82–88.
21. Перспективні напрямки розробок склокристалічних матеріалів на основі системи MgO – Al₂O₃ – SiO₂ / О. В. Саввова, Г. К. Воронов, Л. С. Кураш, А. Р. Здорик // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2016. – № 22 (1194). – С. 166–170.
22. The Science of Armour Materials / ed. by Ian G. Crouch. – Duxford : Woodhead Publishing, 2016. – 754 p.