

УДК 666.266.6

*О.В. Саввова<sup>а</sup>, А.Ф. Ляховський<sup>б</sup>, Н.К. Блинова<sup>б</sup>, Г.К. Воронов<sup>а</sup>, С.О. Рябінін<sup>а</sup>,  
В.Л. Топчий<sup>а</sup>*

## РОЗРОБКА УДАРОСТІЙКИХ СКЛОКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ РАДІОПРОЗОРИХ БРОНЕЕЛЕМЕНТІВ

<sup>а</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<sup>б</sup> Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

Визначено перспективні напрямки розробки склокристалічних матеріалів, що використовуються у військовій галузі для виготовлення бронееlementів, які експлуатуються в умовах високошвидкісних механічних навантажень та дії електромагнітних хвиль. Проаналізовано основні види та сфери застосування захисних склокристалічних матеріалів з високою радіопрозорістю та бронестійкістю. Метою даної роботи є розробка складів ударостійких склокристалічних матеріалів та одержання на їх основі конкурентоспроможних радіопрозорих полегшених бронеситалів. В роботі обрано склади склокристалічних матеріалів на основі дисилікату літію,  $\beta$ -сподумену або муліту у кількості 80 об.%, які отримано умовах низькотемпературного термічного оброблення, та характеризуються високими механічними властивостями. Встановлено вплив фазового складу склокристалічних матеріалів і частоти струму на їх електричні властивості. Розроблені склокристалічні матеріали відрізняються високими механічними властивостями та радіопрозорістю в широкому діапазоні частот, що дозволяє їх використовувати як захисні конструкції для радіотехнічних засобів.

**Ключові слова:** ударостійкі склокристалічні матеріали, електричні властивості, радіопрозорість, бронееlementи.

**DOI:** 10.32434/0321-4095-2019-124-3-151-157

### *Вступ*

На сьогодні пріоритетним напрямом розвитку промислового комплексу є створення надійних високоефективних матеріалів, що здатні задовольнити зростаючі потреби у військовій, електротехнічній, хімічній, машинобудівній та авіакосмічній галузях. Так, нагальною проблемою є створення прогресивних матеріалів з підвищеною в умовах агресивних середовищ бронестійкістю та жаростійкістю; розроблення матеріалів для створення нових засобів ураження, а саме, створення складових частин ракетносіїв, зниження помітності матеріалів радіотехнічними засобами, впровадження високотехнологічних матеріалів для забезпечення надійності енергопостачання.

Для вирішення вказаних задач перспективним є використання склокристалічних матеріалів (ситалів), які відрізняються поєднанням високих фізико-хімічних властивостей, техно-

логічності, низьковартісну сировинних матеріалів, відносно низькою енергоємністю технологічних процесів, відсутністю екологічних проблем [1]. Розробка та впровадження склокристалічних матеріалів у військовій галузі є одним з перспективних напрямків підвищення рівня ефективності використання бронееlementів в умовах високошвидкісних механічних навантажень та дії електромагнітних хвиль.

Незважаючи на значні досягнення зі створення та застосування склокристалічних матеріалів широкого спектра складів, перспективи удосконалення та розробки принципово нових матеріалів і покриттів вказаного типу і технологій їх одержання є необмеженими та актуальними. Тривалий час ситали на основі алюмосилікатних стекел використовували для виготовлення побутових виробів і термостійкого обладнання [2]. Разом з тим, кордієритові та сподуменові ситали, що характеризуються низькими

діелектричними втратами і високою механічною міцністю, є надійними радіопрозорими конструкційними елементами в авіаційній промисловості. Відомі склокристалічні матеріали на основі магній- та літійалюмосилікатних стекло успішно використовувалися при створенні антенних обтічників марок ситалів АС-023, АС-370, АС-418 (Україна, Росія), ОТМ-357-У (Росія) та матеріали на його основі ОТМ-357-5, ОТМ-357-10, ОТМ-357-15, ОТМ-357-360, ОТМ-357-У, ОТМ-357-О [3], а також пірокерами 9603, 9608 та «рейкерам» (США) завдяки стабільності діелектричних властивостей, нульового водопоглинання та стійкості до дії хімічних реагентів.

За останні роки особлива увага приділяється застосуванню склокристалічних матеріалів як бронеелементів для індивідуального та локального захисту [4,5]. Розробка високоефективної прозорої броні на основі шпінелі з високою механічною міцністю, що застосовується для осклування оглядових вікон транспортних засобів проводиться провідними науковцями компанії Surmet Corporation (Burlington, USA) [6]. Однак, магнійалюмосилікатні склокристалічні матеріали мають високі температури варки (1500–1600°C) та термічної обробки (1250–1300°C) [1], що суттєво підвищує їх вартість.

Відомі високоміцні склокристалічні матеріали на основі дисилікату літію з високою механічною міцністю для захисту оглядових вікон транспортних засобів, вітрового осклування гвинтокрилів [7]. Розроблені матеріали характеризуються наступними значеннями властивостей:  $\rho=2,53$  г/см<sup>3</sup>,  $\sigma_{згин}=167$  МПа, твердість за Віккерсом  $HV=8700$  МПа,  $E=101$  ГПа, коефіцієнт інтенсивності напруг  $K_{IC}=2,1$  МПа·м<sup>1/2</sup>. Однак розроблені матеріали або відрізняються достатньо тривалими строками стадій термічного оброблення на етапі зародкоутворення кристалів, що позначається на їх технологічності та вартості; або мають недостатні значення твердості та в'язкості руйнування для їх використання в умовах високошвидкісних динамічних навантажень [7].

Важливим аспектом забезпечення захисту сучасних систем озброєння та спеціальної техніки від пошкоджень, викликаних високошвидкісними засобами ураження є забезпечення радіопрозорості бронезахисних конструкцій. Ця характеристика дозволяє: в діапазоні низьких частот забезпечити високу якість захисту радіолокаційних приладів; в НВЧ діапазоні – ефективність функціонування бортових безпровідних систем зв'язку та навігації.

Аналіз рівня техніки авторами [8] дозволив встановити, що відомі радіопрозорі захисні матеріали характеризуються значною товщиною. Вирішенням цієї проблеми є розробка композитної радіопрозорої броні, яка складається з бронезахисного екрану, що містить керамічні елементи, на основі корунду або карбиду бору [9]. Однак, використання корундової кераміки обмежується її високою щільністю і значною вагою, а карбідборної кераміки з низькою щільністю – її високою вартістю та складністю технологічного процесу виробництва.

Виконаний аналіз радіопрозорих матеріалів, на основі кордієритової склокераміки (Пірокерам 9606, Corning Inc.) плавненого кварцу (Ceradyne Thermo Materials) та нітриду кремнію (IRBAS, Lockheed Martin; Ceralloy147-31N, Ceralloy147-01 EXP, Ceradyne Inc.) дозволив зробити висновок про перспективність створення радіопрозорих матеріалів нового покоління на основі композитів із застосуванням в якості матриці високотемпературної безлужної алюмосилікатної склокераміки або нітридної кераміки [10]. Однак, нітридні матеріали мають схильність до окислення при високих температурах, а безлужна алюмосилікатна склокераміка – високі температури синтезу, що вагомо позначається на вартості матеріалів.

Тому актуальною на сьогоднішній день задачею є розробка складів ударостійких склокристалічних матеріалів та одержання на їх основі конкурентоспроможних радіопрозорих полегшених бронеситалів, що і склало мету даної роботи.

#### **Методика експерименту**

Петрографічні дослідження матеріалів було здійснено з використанням оптичного поляризаційного мікроскопа NU-2E.

Вимірювання діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат на частотах  $10^2$ – $10^5$  Гц виконували за допомогою триелектродної системи з використанням приладу RLC-метр DE-5000, об'ємного ( $\rho_v$ ) та поверхневого опору ( $\rho_s$ ) на постійному струмі з використанням тераметра Е6-13А при температурі +29°C.

Відносну діелектричну проникність ( $\epsilon$ ) та тангенс кута діелектричних втрат ( $\text{tg}\delta$ ) на частотах ультракоротких хвиль визначали за допомогою комп'ютерного порівняльного аналізу експериментальної та розрахункової частотної залежності коефіцієнта стоячої хвилі (КСХН) дослідного зразка. Відносна діелектрична проникність ( $\epsilon_r$ ) визначалась за відповідністю екс-

периментальної резонансної частоти з розрахунковою. Тангенс кута діелектричних втрат визначався за відповідністю значень експериментального КСХН з розрахунковим [11].

Експериментально досліджували КСХН для системи, яка виконана на прямокутному хвилеводі з поперечним перерізом  $a \times b = 23 \times 10$  мм (рис. 1). Поперечна щілина довжиною  $L = 12$  мм і шириною  $d = 1,5$  мм прорізана у діафрагмі товщиною  $t = 2$  мм. З одного боку щілина частково заповнювалась дослідним матеріалом довжиною  $l_2$ . Те, що шар матеріалу не щільно прилягав до краю щілини, при розрахунках моделювалось наявністю шару  $l_1 = 0,02$  мм з  $\epsilon_1 = 1$ . Вимірювання КСХН виконувалися на панорамному вимірювачі КСХН типу Р2-61 в режимі ручного регулювання частоти (похибка вимірювання частоти не перевищувала 0,2%, КСХН кінцевого навантаження хвилевода було не вище 1,06).

Для вирішення поставленої мети необхідним є забезпечення основних функціональних вимог до радіопрозорих бронеелементів, які включають наступні показники [12,13]:

- забезпечення довговічності бронеелементів при обстрілі (екстремальні умови) та експлуатаційної життєздатності в умовах низькошвидкісного удару (наприклад, піщана буря, удар каміння): висока твердість (твердість за Віккерсом  $HV = 8-12$  ГПа), ударна в'язкість ( $KCU = 5-6$  кДж/м<sup>2</sup>), в'язкість руйнування ( $K_{1c} = 3-10$  МПа·м<sup>1/2</sup>);

- зниження ваги бронеелементів і забезпечення мобільності та стабільності: низька питома щільність ( $\rho = 2,35-2,6$  г/см<sup>3</sup>);

- забезпечення функціонування бортових безпровідних систем зв'язку (відсутності взаємодії в інфрачервоному, ультрафіолетовому та видимому спектрах): радіопрозорість (відносна діелектрична проникність  $\epsilon = 3,5-5,0$ ; та тангенс кута діелектричних втрат  $\text{tg}\delta = 0,0005-0,002$ , при

частоті  $f = 10^{10}$  Гц);

- здатність до дії відкритого полум'я: висока термостійкість ( $\alpha_{100-700} < 80 \cdot 10^{-7}$  град<sup>-1</sup>);

- висока балістична стійкість (стійкість до дії вибуху – ER2÷ER4 клас; кулестійкість – Бр3÷Бр6 клас; рівень захисту композиційного бронеелементу – III клас);

- співвідношення високих експлуатаційних характеристик та допустимої вартості (нижче 150 у.о./кг) для забезпечення конкурентної здатності матеріалу.

Досягнення високих експлуатаційних властивостей бронеелементів може бути досягнуто шляхом використання як основи розроблених ударостійких склокристалічних матеріалів СЛ-9, СП-10, КСК-10 на основі алюмосилікатних стекел в умовах двостадійної низькотемпературної термічної обробки та сформованих методом шлікерного лиття.

Склокристалічний матеріал СЛ-9 було синтезовано на основі скла в системі  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  при наявності каталізаторів кристалізації  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZrO}_2$  та модифікуючих компонентів  $\text{MgO}$  та  $\text{K}_2\text{O}$  за наступним режимом термічної обробки: температура варіння – 1250°C; термічне оброблення (відпал – 450°C впродовж 0,5 год; перша стадія (I ст.) – 600°C впродовж 2 год, друга стадія (II ст.) – 900°C впродовж 0,5 год).

Склокристалічний матеріал СП-10 було синтезовано на основі скла в системі  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  при наявності каталізаторів кристалізації  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{SnO}_2$  та модифікуючих компонентів  $\text{MgO}$  та  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  за наступним режимом термічного оброблення: температура варіння 1450°C; термічне оброблення (I ст. – 530°C; II ст. – 850°C, впродовж 2 год на кожній стадії).

Склокристалічний матеріал КСК-10 було синтезовано на основі скла в системі  $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  при наявності каталізаторів

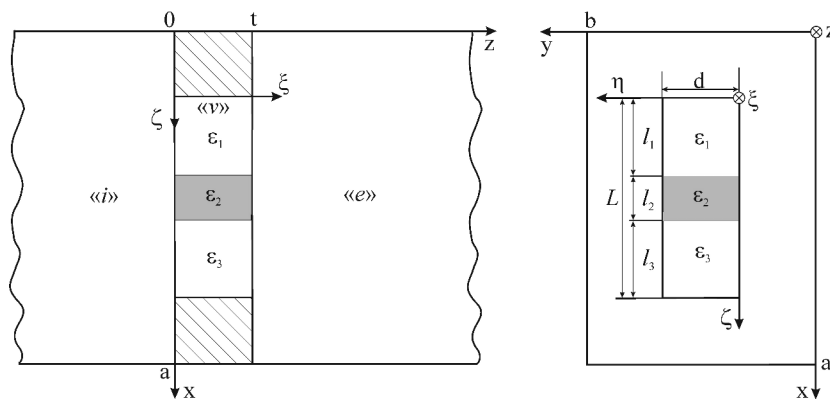


Рис. 1. Схематичне зображення встановленого у щіліні хвилевода

кристалізації  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  та модифікуючих компонентів  $\text{SrO}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  за наступним режимом: температура варіння  $1600^\circ\text{C}$ ; термічне оброблення (I ст. –  $850^\circ\text{C}$ ; II ст. –  $1150^\circ\text{C}$ , впродовж 5 год на кожній стадії).

### Результати та обговорення

Дослідження структури стекел після термічного оброблення дозволили встановити, що для алюмосилікатних стекел СЛ-9 та СП-10 характерним є протікання процесу об'ємної тонкодисперсної кристалізації скла з формуванням кристалів як основних кристалічних фаз літій дисилікату та  $\beta$ -сподумену у кількості 80 об.%. Для скла КСК-10 спостерігається формування ситалізованої структури на основі твердих розчинів муліту у загальній кількості 80 об.%.  
Аналіз зміни електричних властивостей дослідних матеріалів при різних частотах дозволило встановити наступні особливості. Дослідні склокристалічні матеріали характеризуються високими показниками електроопору ( $\lg \rho_s = 13-15$ ;  $\lg \rho_v = 8,5-11,5$ ) (рис. 2) завдяки значному вмісту у їх структурі кристалічних фаз з низькими значеннями електропровідності. Ефективне зниження електропровідності склофаз дослідних матеріалів досягнуто при введенні до їх складу одночасно декількох склоутворювачів  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  та катіону  $\text{Ti}^{4+}$  [1].

Електричні втрати для дослідних склокристалічних матеріалів обумовлені наявністю комплексу діелектричних втрат, як склоподібної фази, так і кристалічних фаз. Вміст склоподібної фази визначає основну частину втрат для матеріалів, оскільки вільні іони лужних металів є основними носіями заряду. Значний поверхневий опір у порівнянні з об'ємним обумовлюється наявністю більш інтенсивної поверхневої кристалізації кристалічних фаз, які мають більш високий об'ємний опір ніж склофаза. Для

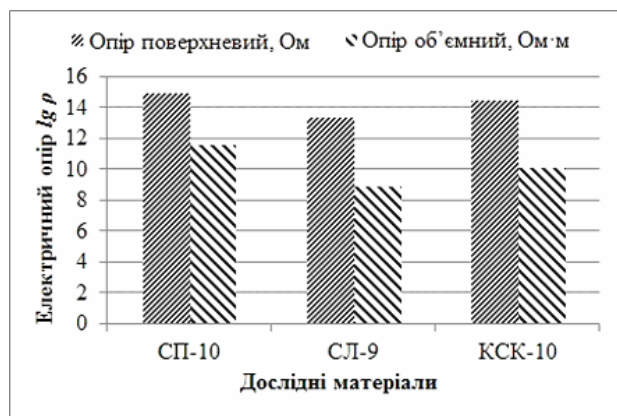


Рис. 2. Величина електричного опору для дослідних матеріалів

дослідних матеріалів СП-10 та СЛ-9 низькі показники діелектричних втрат пов'язані з тим, що значна частина іонів  $\text{Li}^+$  залучена до структури кристалічної фази  $\beta$ -сподумену або літій дисилікату, а для матеріалу КСК-10 – практичною відсутністю у його складі лужних катіонів ( $\text{K}_2\text{O}$  2 мас.%). Зважаючи на це, при підвищенні температури збільшення втрат за рахунок рухливості носіїв струму для дослідних матеріалів не спостерігатиметься.

При частотах 100 Гц найбільші показники  $\text{tg}\delta=0,7$  спостерігаються для матеріалу на основі літій дисилікату з залученням рухливого іону  $\text{Li}^+$  до склофаз (рис. 3,а). Зниження  $\text{tg}\delta$  до 0,55 та 0,22 на вказаній частоті для матеріалів на основі  $\beta$ -сподумену та  $\alpha$ -кордієриту відповідно пов'язано зі зменшенням вмісту рухливих іонів у склофазі. При частотах вище, внесок зміщується у бік дипольно-релаксаційних втрат з максимумом прояву від  $10^3$  Гц та показником  $\text{tg}\delta=0,018-0,03$ .

Найнижчими значеннями  $\text{tg}\delta=0,008$  при частоті  $10^4$  Гц характеризується склокристалі-

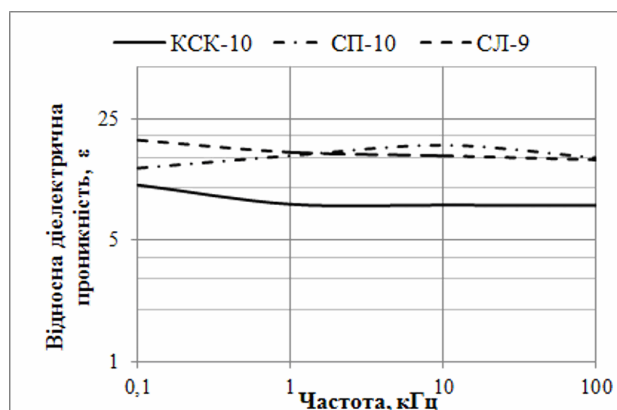
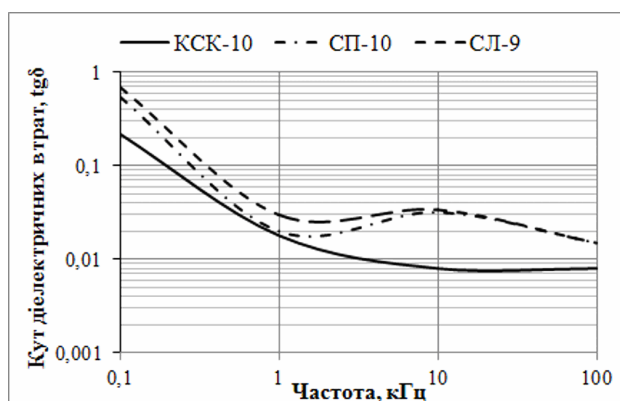


Рис. 3. Залежність діелектричних параметрів від частоти

чний матеріал з вмістом  $\alpha$ -кордіериту завдяки особливостям його структури – формуванню твердих розчинів муліт-кордіерит. Для літійалюмосилікатних матеріалів підвищення  $\text{tg}\delta=0,032-0,034$  при вказаній частоті свідчить про появу максимуму релаксаційних процесів, прояв яких знижується при підвищенні частоти до  $10^5$  Гц  $\text{tg}\delta$  до 0,015 (рис. 3,а). Для склокристалічного матеріалу на основі  $\alpha$ -кордіериту показник  $\text{tg}\delta$  при частоті  $10^5$  Гц не змінюється внаслідок відсутності протікання вказаних процесів. При підвищенні частоти до  $10^6$  Гц показники  $\text{tg}\delta$  для дослідних матеріалів стають менш суттєвими, і основний внесок починають вносити резонансні втрати, обумовлені коливаннями іонів сітки скла, які виявляють свою активність аж до інфрачервоного спектра.

Залежність зміни діелектричної проникності від частоти для дослідних матеріалів є практично незмінною на ділянці низьких частот і є найнижчою для магній алюмосилікатного склокристалічного матеріалу  $\epsilon=7,95$  при  $10^5$  Гц (рис. 3,б).

За результатами вимірювання для дослідних матеріалів мінімальне значення  $\text{КСХН}_{\min}$  отримано на резонансній частоті  $f_{\text{res}}$ , ГГц (табл. 1). Цим значенням відповідає залежність, що розрахована при визначенні  $\epsilon_2$  і  $\text{tg}\delta$ , (табл. 2) для якої мінімум  $\text{КСХН}_{\min}$  досягається на резонансній частоті  $f_{\text{res}}$  ГГц (рис. 4,а,б,в).

Таблиця 1  
Експериментальні та розрахункові значення частотної залежності коефіцієнта стоячої хвилі та резонансної частоти

Дослідні матеріали	Дослідні значення		Розрахункові значення	
	$\text{КСХН}_{\min}$	$f_{\text{res}}$ , ГГц	$\text{КСХН}_{\min}$	$f_{\text{res}}$ , ГГц
СЛ-9	1,093	9,77	1,088	9,78
СП-10	1,121	9,42	1,108	9,42
КСК-10	1,076	9,88	1,076	9,89

При частотах  $10^{10}$  Гц для дослідних матеріалів зниження показника  $\text{tg}\delta=0,005-0,006$  свідчить про зменшення релаксаційних процесів, оскільки діелектричні втрати з яскраво вираженою релаксаційною поляризацією різко знижується при переході від  $10^7$  до  $10^{10}$  Гц. Різке зниження  $\text{tg}\delta$  при частотах струму  $10^{10}$  Гц може бути пов'язано з ситалізацією структури дослідних матеріалів, яка полягає у формуванні значної кількості тонкодисперсних кристалів та їх взаємному проникненню, що супроводжується вирівнювання градієнту властивостей на фазових межах, зниженні площі контакту і меж по-

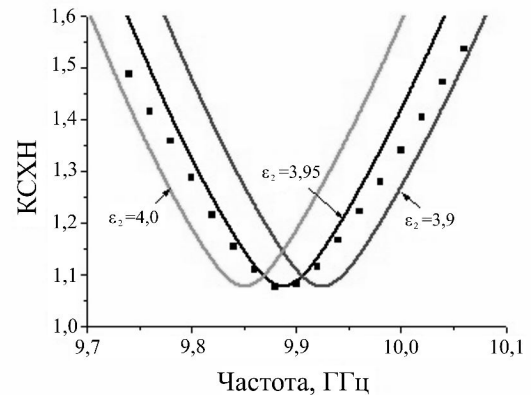
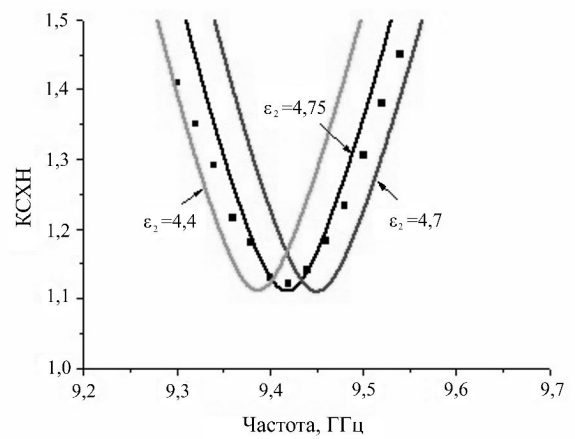
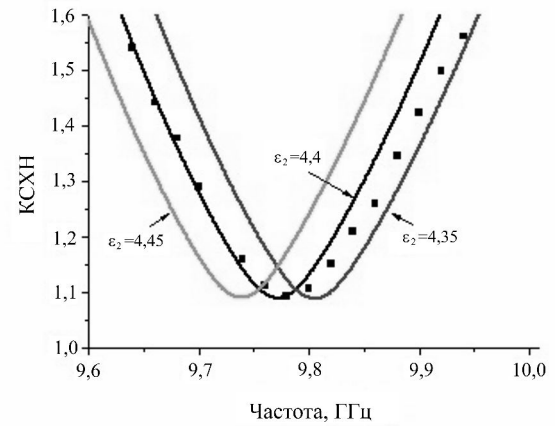


Рис. 4. Частотна залежність КСХН щілини з шаром діелектрика на її краю: а – матеріал СЛ-9; б – матеріал СП-10; в – матеріал КСК-10 Маркери – експеримент; суцільні криві – розрахунок

верхневої поляризації. В НВЧ діапазоні показник  $\epsilon$  для літій алюмосилікатних матеріалів знижується практично в три рази, для магнійалюмосилікатних матеріалів – в два рази. Знижен-

Таблиця 2

## Характеристика властивостей розроблених та відомих радіопрозорих склокристалічних матеріалів

Розроблені та відомі матеріали	Основна кристалічна фаза	Щільність $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Термічні властивості	Механічні властивості			Електричні властивості $f=10^{10}$ Гц; $t=20^{\circ}\text{C}$	
			$\alpha \cdot 10^7$ , град <sup>-1</sup>	КСУ <sub>2</sub> , кДж/м <sup>2</sup>	Е, ГПа	К <sub>1С</sub> , МПа·м <sup>1/2</sup>	tg $\delta \cdot 10^4$	$\epsilon$
СЛ-9	дисилікат літію	2,40	90,0	4,9	300	3,15	50	4,40
СП-10	сподумен	2,45	21,5	5,0	320	3,40	60	4,75
КСК-10	муліт	2,80	54,0	5,5	350	3,50	50	3,95
Пірокерам 9606	кордіерит	2,60	15–57	–	123	–	2	6,9–7,3
ОТМ-357	сподумен	2,5	5,0–13,0	2,2–2,5	52	–	100–600	5,7

ня діелектричної проникності дозволить збільшити товщину стінки бронееlementу для підвищення балістичної стійкості при збереженні радіопрозорості.

Порівняльне оцінювання властивостей розроблених та відомих радіопрозорих склокристалічних матеріалів дозволила встановити, що розроблені склокристалічні матеріали відрізняються високою ударною в'язкістю та модулем пружності, що дозволяє забезпечити їх високу ударостійкість та поряд з низькими показниками щільності визначає їх перспективність при створенні полегшених бронееlementів. Забезпечення електричних властивостей на рівні властивостей для відомих радіопрозорих склокристалічних матеріалів вказує на їх можливість використання як захисних елементів в тому числі забезпечення функціонування безпроводних систем зв'язку.

**Висновки**

Відзначено актуальність створення ударостійких радіо прозорих склокристалічних матеріалів для забезпечення ефективного функціонування радіолокційних приладів та бортових безпроводних систем зв'язку та навігації в умовах високошвидкісних механічних навантажень. Встановлено перспективність використання алюмосилікатних склокристалічних матеріалів для одержання радіопрозорих бронееlementів.

Розроблені склади високоміцних склокристалічних матеріалів на основі літій дисилікату або  $\beta$ -сподумену або муліту у кількості 80 об. % в умовах низькотемпературної термічної обробки. Встановлено вплив хімічного складу, структури склокристалічних матеріалів та частоти струму на зміну їх діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат. Розроблені склокристалічні матеріали відрізняються високими механічними властивостями, електроопором та радіопрозорістю в широкому діапазоні частот, що дозволяє їх використовувати як за-

хисні конструкції для радіотехнічних засобів.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. *Структура та властивості склокристалічних матеріалів: монографія* / Л.Л. Брагіна, О.В. Саввова, О.В. Бабіч, Ю.О. Соболев. – Харків: ООО «Компанія СМІТ», 2016. – 253 с.
2. *Патент 2902421*, Франція, МКІ 8 С 03 С 10/00. Vitroceramiques de  $\beta$ -quartz et / ou de  $\beta$ -spodumene, verres precursors, articles en lesdites vitroceramiques, elaboration desdits vitroceramiques et articles / Comte M. (Франція); Eurokera Societe en nom collectif. (Франція) – № 0512588; Заявл. 13.12.2005; Опубл. 21.12.2007.
3. *Харитонов Д.В.* Радиопрозрачный стеклокристаллический материал с улучшенным распределением физико-технических свойств // *Авиационные материалы и технологии*. – 2012. – № 3. – С.19-24.
4. *Development of glass-ceramic high-strength material for personal armor protection elements* / O. Savvova, L. Bragina, G. Voronov, et al. // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2017. – Vol.11. – No. 2. – P.214-219.
5. *Патент US8338318B2 США*, МКІ 5 С 03 С 10/14 Glass ceramic armor material / F. Siebers, H.-J. Lemke, K. Schaupt, T. Zachau (Німеччина); Schott AG (Німеччина). – № 12/451794; Заявл. 24.05.2008; Опубл. 24.01.2010.
6. *Transparent polycrystalline cubic spinels protect and defend* / M. Ramisetty, S. Sastri, U. Kashalikar, L.M. Goldman, et al. // *American Ceramic Society Bulletin*. – 2013. – Vol.92. – No. 2. – P.20-25.
7. *Glass-ceramic materials on the lithium disilicate basis: Achievements and development prospects* / O. Savvova, G. Voronov, V. Topchy, Yu. Smirnova // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2018. – Vol.12. – No. 3. – P.391-399.
8. *Суздальцев Е.И.* Радиопрозрачные, высокотемпературные материалы XXI века // *Огнеупоры и техническая керамика*. – 2002. – № 3. – С.42-50.
9. *Asenov St., Lakov L., Toncheva Kr.* Promising ceramic materials for ballistic protection // *Chemical Technology and Metallurgy*. – 2013. – Vol.48. – No. 2. – P.190-195.

10. *Радиопрозрачные стеклокерамические материалы* / Н.Е. Уварова, Ю.Е. Ананьева, Е.Г. Болокина и др. // Успехи в химии и химической технологии. – 2007. – Т.21. – № 7(75). – С.96-99.

11. *Coupling of two rectangular waveguides through a diaphragm with a dielectric slab in the slot* / L.P. Yatsuk, A.F. Lyakhovsky, V.A. Katrich, A.A. Lyakhovsky // *Progress in Electromagnetics Research M*. – 2016. – Vol.49. – P.9-19.

12. *Grujicic M., Bell W.C., Pandurangan B.* Design and material selection guidelines and strategies for transparent armor systems // *Materials and Design*. – 2012. – Vol.34. – P.808-819.

13. *The science of armour materials* / S. Cimpoeu, M. Saleh, S. Ryan, H. Billon, G. Franks Edited by I.G. Crouch. – Duxford: Woodhead Publishing. – 2016. – 754 p.

Надійшла до редакції 14.12.2018

#### DEVELOPMENT OF IMPACT-RESISTANT GLASS-CERAMIC MATERIALS FOR RADIO-TRANSPARENT ARMOR ELEMENTS

*O.V. Savvova*<sup>a,\*</sup>, *A.F. Lyahovskiy*<sup>b</sup>, *N.K. Blinova*<sup>b</sup>, *G.K. Voronov*<sup>a</sup>, *S.A. Ryabinin*<sup>a</sup>, *V.L. Topchy*<sup>a</sup>

<sup>a</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

<sup>b</sup> V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

\* e-mail: savvova\_oksana@ukr.net

*The paper reports promising directions of development of glass-ceramic materials using in the military sector of industry for the production of protective armor plates which are exploited under the conditions of high-speed mechanical stressing and action of electromagnetic waves. The main types and areas of application of protective glass-ceramic materials with high radio-transparency and armor protection capacity are analyzed. The purpose of this work was to develop the components of impact-resistant glass-ceramic materials and obtain competitive radio-transparent light armor structures. The compositions of glass-ceramic materials based on lithium disilicate,  $\beta$ -spodumene or mullite (80 vol.%) were chosen, these materials being prepared under the conditions of low temperature thermal treatment and characterized by high mechanical properties. The influence of chemical composition, structure of glass-ceramic materials and current frequency on the change of their electrical properties has been established. The developed glass-ceramic materials show improved mechanical properties and radio-transparency in a wide range of frequencies which allows using them as protective structures for radio equipment.*

**Keywords:** impact-resistant glass-ceramic materials; electrical properties; radio-transparency; armor plates.

#### REFERENCES

1. Brahina L.L., Savvova O.V., Babich O.V., Sobol Yu.O., *Struktura ta vlastyivosti sklokrystalichnykh materialiv* [Structure and properties of glass ceramics]. Kompaniya SMIT Publishers, Kharkiv, 2016. 253 p. (in Ukrainian).

2. Comte M., *Vitroceraimiques de  $\beta$ -quartz et/ou de  $\beta$ -spodumene, verres precurseurs, articles en lesdites vitroceraimiques, elaboration desdits vitroceraimiques et articles* [ $\beta$  quartz glass-ceramics and / or  $\beta$  spodumene, glass precursors, articles in said glass-ceramics and articles elaboration said vitroceraimic]. Patent FR, no. 2902421, 2007. (in French).

3. Kharitonov D.V. Radioprozrachnyi steklokristallicheskii material s uluchshennym raspredeleniem fiziko-tekhnicheskikh svoystv [Radio-transparent glass-crystalline material with an improved distribution of physical and technical properties]. *Aviatsionnye Materialy i Tekhnologii*, 2012, no. 3, pp. 19-24. (in Russian).

4. Savvova O., Bragina L., Voronov G., Sobol Yu., Babich O., Shalygina O., Kuriakin M. Development of glass-ceramic high-strength material for personal armor protection elements. *Chemistry & Chemical Technology*, 2017, vol. 11, pp. 214-219.

5. Siebers F., Lemke H.-J., Schaupt K., Zachau T., *Glass ceramic armor material*. Patent US, no. US8338318B2, 2010.

6. Ramisetty M., Sastri S., Kashalikar U., Goldman L.M., Nag N. Transparent polycrystalline cubic spinels protect and defend. *American Ceramic Society Bulletin*, 2013, vol. 92, no. 2, pp. 20-25.

7. Savvova O., Voronov G., Topchy V., Smyrnova Yu. Glass-ceramic materials on the lithium disilicate basis: achievements and development prospects. *Chemistry & Chemical Technology*, 2018, vol. 12, pp. 391-399.

8. Suzdal'tsev E.I. Radioprozrachnye, vysokotermostoikiye materialy XXI veka [Radio-transparent, highly heat-resistant materials of the XXI century]. *Ogneupory i Tekhnicheskaya Keramika*, 2002, no. 3, pp. 42-50. (in Russian).

9. Asenov St., Lakov L., Toncheva Kr. Promising ceramic materials for ballistic protection. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2013, vol. 48, pp. 190-195.

10. Uvarova N.E., Anan'eva Ju.E., Bolokina E.G., Orlova L.A., Popovich N.V. Radioprozrachnye steklokeraimicheskie materialy [Radio-transparent glass-ceramic materials] *Uspekhi v Khimii i Khimicheskoi Tehnologii*, 2007, vol. 21, no. 7 (75), pp. 96-99. (in Russian).

11. Yatsuk L.P., Lyakhovsky A.F., Katrich V.A., Lyakhovsky A.A. Coupling of two rectangular waveguides through a diaphragm with a dielectric slab in the slot. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2016, vol. 49, pp. 9-19.

12. Grujicic M., Bell W.C., Pandurangan B. Design and material selection guidelines and strategies for transparent armor systems. *Materials and Design*, 2012, vol. 34, pp. 808-819.

13. Crouch I., *The science of armour materials*. Woodhead Publishing, 2017, 754 p.