

*О.В. САВВОВА, С.О. РЯБІНІН, Г.К. ВОРОНОВ, О.І. ФЕСЕНКО, Ю.О. СМІРНОВА*

### **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НА БРОНЕСТІЙКІСТЬ СПОДУМЕНОВИХ СКЛОКРИСТАЛІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Визначено перспективні методи отримання висококомірних склокерамічних матеріалів на основі літійалюмосилікатних стеклокерамічних технологій. Проведено аналіз розробок зі зміцнення склокристалічних матеріалів з вмістом сподумену. Розроблено композиційні матеріали на основі сподуменових склокристалічних матеріалів, які модифіковано діоксидом цирконію стабілізованого оксидом ітрію. Встановлено, що для алюмосилікатних стеклокерамічних матеріалів характерним є протікання процесу об'ємної тонкодисперсної кристалізації скла з формуванням кристалів  $\beta$ -сподумену у кількості 80 об. % відповідно в умовах низькотемпературної короткотривалої двостадійної термічної обробки. Встановлено, що забезпечення щільно упакованої структури матеріалу забезпечується за рахунок наявності фракцій не більше 125 мкм  $\approx$  70 об. %, не більше 63 мкм - 15 об. %, не більше 25 мкм - 15 об. %. Досліджено вплив структури склокристалічних матеріалів на їх механічні властивості та встановлено основні критерії забезпечення високих показників тріщиностійкості, ударостійкості та бронестійкості. Наявність для розробленого ситалу фаз з різними пружними властивостями дозволяє забезпечити більш ефективне руйнування ударника та мінімізацію позаперешкодної дії. Порівняльна оцінка розробленого ударостійкого склокристалічного матеріалу та відомого елемента бронезахисту дозволила встановити перспективність використання ситалу як бронееlementу з експлуатаційними властивостями на рівні світових аналогів. Важливими аспектами ефективного впровадження розробленого матеріалу є його зменшена вартість та вага в порівнянні з керамічними бронееlementами. Також вагоме зниження щільності та підвищення тріщиностійкості розробленого матеріалу при частковій заміні надтвердого керамічного бронееlementу на склокерамічні матеріали в якості енергоруйнуючого та дроблячого шару, дозволить зменшити вагу та підвищити в системі кераміка - ситал - кевлар живучість броні при обстрілі. Це дозволить підвищити конкурентоспроможність вітчизняних захисних бронееlementів на світовому ринку.

**Ключові слова:** склокристалічні матеріали, сподумен, механічні властивості, структура, ударостійкість, бронестійкість.

*О.В. САВВОВА, С.А. РЯБІНІН, К. ВОРОНОВ, А.И. ФЕСЕНКО, Ю. СМІРНОВА*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА БРОНЕСТИЙКОСТЬ СПОДУМЕНОВИХ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Определены перспективные методы получения высокопрочных стеклокерамических материалов на основе литийалюмосилікатных стеклокерамических технологий. Проведен анализ разработок по укреплению стеклокерамических материалов с содержанием сподумена. Разработаны композиционные материалы на основе сподуменовых стеклокерамических материалов, модифицированные диоксидом циркония стабилизированного оксидом иттрия. Установлено, что для алюмосилікатных стеклокерамических материалов характерно протекание процесса объемной тонкодисперсной кристаллизации стекла с формированием кристаллов  $\beta$ -сподумена в количестве 80 об. % соответственно в условиях низкотемпературной кратковременной двухстадийной термической обработки. Установлено, что обеспечение плотно упакованной структуры материала обеспечивается за счет наличия фракций не более 125 мкм  $\approx$  70 об. %, не более 63 мкм - 15 об. %, не более 25 мкм - 15 об. %. Исследовано влияние структуры стеклокерамических материалов на их механические свойства и установлены основные критерии обеспечения высоких показателей трещиностойкости, ударпрочности и бронестойкости. Наличие для разработанного ситалла фаз с различными упругими свойствами позволяет обеспечить более эффективное разрушение ударника и минимизацию запреградного действия. Сравнительная оценка разработанного ударопрочного стеклокерамического материала и известного элемента бронезащиты позволила установить перспективность использования ситалла как бронееlementа с эксплуатационными свойствами на уровне мировых аналогов. Важными аспектами эффективного внедрения разработанного материала является его уменьшенная стоимость и вес по сравнению с керамическими бронееlementами. Также существенное снижение плотности и повышение трещиностойкости разработанного материала при частичной замене сверхтвердого керамического бронееlementа на стеклокерамические материалы в качестве энергоразрушающего и дробящего слоя, позволит уменьшить вес и повысить в системе керамика - ситалл - кевлар живучесть брони при обстреле. Это позволит повысить конкурентоспособность отечественных защитных бронееlementов на мировом рынке.

**Ключевые слова:** стеклокерамические материалы, сподумен, механические свойства, структура, ударопрочность, бронестойкость.

*O. V SAVVOVA, S. O. RYABININ, G. K. VORONOV, OI FESENKO, YU. O. SMIRNOVA*

### **INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF MECHANICAL PROPERTIES ON THE ARMOR RESISTANCE OF SUBDOMAIN GLASS CRYSTALLINE MATERIALS**

Promising methods for producing high-strength glass-ceramic materials based on lithium aluminum silicate glasses using ceramic technology are determined. The analysis of developments to strengthen glass-crystal materials with spodumene content is carried out. Composite materials based on spodumene glass-crystalline materials modified with zirconia stabilized with yttrium oxide have been developed. It was established that aluminosilicate glasses are characterized by a process of volumetric fine crystallization of glass with the formation of  $\beta$ -spodumene crystals in an amount of 80 vol. %, respectively, in the conditions of low-temperature short-term two-stage heat treatment. It has been established that the provision of a tightly packed material structure is ensured by the presence of fractions of no more than 125  $\mu\text{m} \approx$  70 vol. %, not more than 63  $\mu\text{m}$  - 15 vol. %, not more than 25  $\mu\text{m}$  - 15 vol. %. The influence of the structure of glass-crystalline materials on their mechanical properties is investigated and the main criteria for ensuring high crack resistance, impact resistance and armor resistance are established. A comparative assessment of the developed impact-resistant glass-crystalline material and the well-known armor protection element made it possible to establish the prospects of using glass as an armor element with operational properties at the level of world analogues. Important aspects of the effective implementation of the developed material is its reduced cost and weight compared to ceramic armored elements. Also, a significant decrease in density and an increase in crack resistance of the developed material with a partial replacement of the superhard ceramic armored element with glass-ceramic materials as an energy-destroying and crushing layer will make it possible to reduce weight and increase the armor survivability of the ceramics-ceramic-Kevlar system during shelling. This will increase the competitiveness of domestic protective armor elements on the world market.

**Keywords:** glass-crystalline materials, spodumene, mechanical properties, structure, impact resistance, armor resistance.

© О.В. Саввова, С.О. Рябинін, Г.К. Воронов, О.І. Фесенко, Ю.О. Смирнова, 2020

**Вступ.**

Розробка ефективних ударостійких засобів бронезахисту для наземної й авіаційної техніки є складним завданням зважаючи на велику кількість протиріч у тактико-технічних вимогах і факторів, що впливають на бойову ефективність, а також неможливості точного передбачення характеру майбутніх бойових дій. При цьому на захисні можливості виробів безпосередньо впливає науково-технічний прогрес в матеріалознавстві та галузях кінцевої балістики, присвячених синтезу та оптимізації захисних структур. Останнім часом відзначається досить динамічний розвиток науки і техніки в цих галузях [1].

Все більш широке застосування знаходять склокристалічні матеріали (СКМ), які характеризуються високими фізико-хімічними властивостями (щільністю  $\rho = 2350 \div 2800$  кг/м<sup>3</sup> температурний коефіцієнтом лінійного розширення  $\alpha = (20,5 \div 90,0) \cdot 10^{-7}$  град<sup>-1</sup>; твердістю за Віккерсом  $HV = 8,0 \div 11,0$  ГПа; коефіцієнтом тріщиностійкості  $K_{IC} = 3,0 \div 12,0$  МПа·м<sup>1/2</sup>, межею міцності на стиснення  $\sigma_{ст} = 650$  МПа; межею міцності на вигин  $\sigma_{виг} = 400$  МПа; модуль пружності  $E = 250 \div 350$  ГПа; поздовжня швидкість звуку  $v = 10 \div 12$  км/с; ударною в'язкістю  $KCU = 4,5 \div 6,0$  кДж/м<sup>2</sup>) та балістичною стійкістю (рівень 2 STANAG 4569) [2, 3]. При цьому вартість бронематеріалів на основі СКМ є порівняно нижчою перед керамічними матеріалами (корунд, карбід кремнію та інші), які характеризуються високими властивостями, однак, їх технологія відрізняється складністю, а щільність здебільшого є значно вищою за даний показник для СКМ [4-8]. Більшість бронеелементів на основі кераміки (за виключенням вартісного В<sub>4</sub>С) характеризуються значною вагою, що є причиною зниження маневреності спеціальної техніки.

Таблиця 1. – Фізико-хімічні властивості керамічних матеріалів для елементів бронезахисту

Матеріал	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$E$ , ГПа	$HV$ , МПа	$v$ , км/с	$K_{IC}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	$\sigma_{згин}$ , МПа
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,90	407	18	10,4	3,5±0,3	220±20
V <sub>4</sub> C	2,40÷2,52	475	28	12,4	4,0±0,3	350±20
SiC	3,0	350±20	20	10,5	3,2±0,3	440±20
TiB <sub>2</sub>	4,48÷4,51	550÷565	25	11,0÷11,3	6,2	270÷400
AlN	3,25	380÷400	13	11,0	3,6	310÷428

Необхідність забезпечення ефективності експлуатації та конкурентоспроможності вітчизняних бронеелементів обумовлює актуальність створення захисних склокристалічних матеріалів з високими міцносними показниками і низькою щільністю.

Серед високоміцних склокристалічних матеріалів на основі алюмосилікатних стекол особливе місце займають сподуменові склокристалічні матеріали, які

характеризуються виключними термо-механічними показниками та низькою щільністю, що забезпечується властивостями  $\beta$ -сподумену ( $\alpha 10^{-7} = 9$  град<sup>-1</sup>,  $\rho = 3100 \div 3200$  кг/м<sup>3</sup>, твердість за Моосом  $6,6 \div 7,0$ ; температура плавлення  $1432$  °С, діелектрична проникність  $8,5 \div 9,0$ ; тангенс кута діелектричних втрат  $0,015 \div 0,02$ ). Важливою характеристикою сподумену є достатнього високі значення швидкості поздовжніх ( $11,96$  км/с), та поперечних  $6,98$  км/с хвиль [9, 10].

Таблиця 2. – Властивості ударостійких склокристалічних матеріалів

Вид СКМ	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\alpha 10^{-7}$ град <sup>-1</sup>	$E$ , ГПа	$HV$ , МПа	$K_{IC}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	$\sigma_{згин}$ , МПа
сподуменові	2,42÷2,55	6÷20	90	5,7÷9,3	3,0	115÷180
кордієритові	2,6	11÷57	100÷120	6÷11	3,5	240÷350
анортитові	3,0					420÷460
піроксенові	2,9÷3,0	76÷85		28,5÷9,2		130÷150

Однак, значення модуля пружності склокристалічних матеріалів, яке визначає швидкість поширення хвиль напружень в перешкоді та є визначальним показником ударостійкості поряд з твердістю захисних матеріалів є недостатнім для забезпечення їх балістичних властивостей. Також важливою умовою забезпечення живучість броні при обстрілі та експлуатаційної живучості є забезпечення високих показників в'язкості руйнування та ударної в'язкості. Саме тому актуальною є розробка ударостійких склокристалічних матеріалів, які характеризуються зниженою вагою та вартістю, є дозволять підвищити конкурентоспроможність вітчизняних бронеелементів на світовому ринку.

**Мета роботи.**

Метою даної роботи є дослідження впливу пружних властивостей на бронестійкість сподуменових склокристалічних матеріалів.

Для досягнення означеної мети були поставлені наступні завдання: розробити композиційні матеріали на основі літійалюмосилікатних стекол; дослідити вплив структури склокристалічних матеріалів на їх механічні властивості; проведення порівняльної оцінки розроблених склокристалічних матеріалів та відомих елементів бронезахисту.

**Методика проведення експерименту.**

Структуру матеріалів досліджували за допомогою взаємодоповнюючих методів фізико-хімічного аналізу: рентгенофазового (ДРОН-3), рентгеноспектрального (скануючий електронний мікроскоп РЕМ Tesla 3 LMU з роздільною здатністю 1 нм). Твердість за Віккерсом ( $HV$ , ГПа) та показник тріщиностійкості (в'язкість руйнування) ( $K_{IC}$ , МПа·м<sup>1/2</sup>) визначали за допомогою твердоміру ТМВ-1000 та розраховано за формулами наведеними в роботі [6]. Міцність на стиск ( $\sigma_{стиск}$ , МПа) і на вигин ( $\sigma_{вигин}$ , МПа) визначали

згідно ГОСТу 8462-85. Ударну в'язкість (КСУ, кДж/м<sup>2</sup>) визначали згідно ГОСТ (GOST)11067-2013 (EN1288-1:2000). Щільність матеріалів ( $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>) вимірювали за методом гідростатичного зважування в толуолі. Модуль пружності ( $E$ , ГПа) матеріалів було досліджено з використанням приладу «Звук – 107» за методом визначення резонансної частоти коливань з відносною похибкою  $\pm 0,2$  %. Балістичні випробування були проведені за вимогами STANAG 4569.

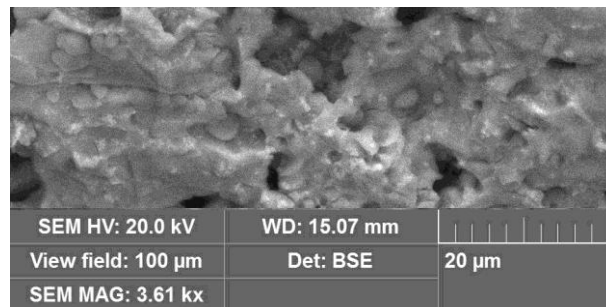
#### Результати експерименту та їх обговорення.

Як основа при розробці композиційних матеріалів СП були обрані дослідні стекла, які було синтезовано в системах  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  (L-A-S) в області високоміцної кристалічної фази – сподумену

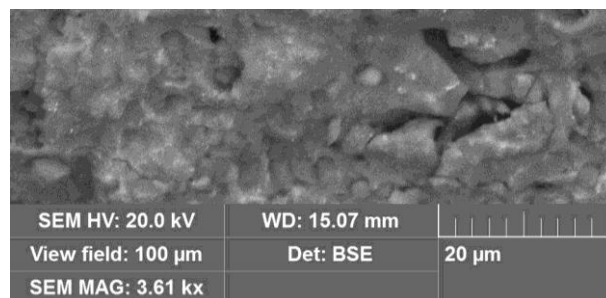
Дослідження структури стекел після термічної обробки дозволило встановити, що для алюмосилікатних стекел СП-10 характерним є протікання процесу об'ємної тонкодисперсної кристалізації скла з формуванням кристалів  $\beta$ -сподумену у кількості 80 об. % відповідно в умовах низькотемпературної короткотривалої двостадійної термічної обробки при температурах на першій стадії (I ст.) 530 °C відповідно впродовж 2 годин та на другій стадії (II ст.) – 850 °C відповідно впродовж 2,0 год. Композиційні матеріали були отримані за керамічною технологією на основі СКМ СП-10 та  $\text{ZrO}_2$  стабілізованого  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Забезпеченням щільно упакованої структури матеріалу за рахунок наявності фракцій не більше 125 мкм  $\approx 70$  об. %, не більше 63 мкм – 15 об. %, не більше 25 мкм – 15 об. %.

Дослідження структури склокристалічного матеріалу СП-10 (рис. 1, а) та композиційного матеріалу СП-10 ДЦ-5 (рис. 1, б) дозволило встановити наявність дрібних стовбчастих (I) або призматичних (II) кристалів  $\beta$ -сподумену з вертикальною штриховкою, які довільно орієнтовані та зміцнюють структуру. Для композиційного матеріалу СП-10 ДЦ-5 (рис. 1, б) спостерігається ущільнення структури за рахунок введення діоксиду цирконію стабілізованого ітрієм, є який посилює кристалізацію  $\beta$ -сподумену до 85 об. % у структурі скла при термічній обробці.

Так, значне підвищення тріщиностійкості при введенні  $\text{ZrO}_2$  до складу склокристалічного матеріалу СП-10 пояснюється трансформаційним зміцненням скломатриці за рахунок контрольованого переходу  $\text{ZrO}_2$  із тетрагональної фази в моноклінну, яке супроводжується збільшенням об'єму на 3 об. %. У результаті мікророзтріскування скломатриці відбувається підвищення її міцності завдяки відхиленню та розгалуженню (біфуркації) тріщин, які розвиваються [11]. Контроль цього мікророзтріскування здійснюється завдяки стабілізації частини діоксиду цирконію. При термічній обробці матеріалу  $\text{Y}_2\text{O}_3-\text{ZrO}_2$  (1 мол. %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) в області температур 720÷1740 К спостерігаються тверді розчини на основі діоксиду цирконію тетрагональної фази від 74 до 11 % та моноклінної фази від 26 до 89 %. Саме завдяки здатності перетворення тетрагональної фази  $\text{ZrO}_2$  в моноклінну (t-m перехід) оксид цирконію характеризується рекордно високими для оксидних матеріалів міцністю на вигин і ударною в'язкістю.



а



б

Рисунок 1. – Структура СКМ СП-10 (а) та СП-10 ДЦ-5 (б)

Забезпечення високих значень  $E = 283$  ГПа, при  $f = 7,05$  кГц/2-га гарм.,  $l = 0.0375$  м та низької щільності  $\rho = 1880$  кг/м<sup>3</sup> дозволяють забезпечити ударостійкість СП-10 ДЦ 5 (за Ж. Ж. Стиглицем) [5]  $M = 1,32$  ГПа<sup>2</sup>·м<sup>3</sup>·кг<sup>-1</sup> та швидкість розповсюдження звукової хвилі  $v = 12,5$  км/с.

Наявність для розробленого СКМ (ситалу) фаз з різними пружними властивостями дозволяє забезпечити більш ефективне руйнування ударника та мінімізацію позаперешкодної дії. Це підвищить ефективність застосування бронеконструкції при використанні розробленого матеріалу з  $\sigma_{ст} = 750$  МПа та ударною в'язкістю 5,6 кДж/м<sup>2</sup> в якості одночасно демпферного шару та шару, який руйнує ударник.

Порівняльна оцінка розробленого ситалу та відомого представнику керамічних бронематеріалів – реакційно спеченого карбіду кремнію (Saint-Gobain Ceramic Materials), дозволили встановити, що за значеннями міцносних властивостей та розроблений ситал СП-10 ДЦ-5 поступається карбіду кремнію лише твердістю (табл. 3).

Таблиця 3. – Властивості розробленого ситалу та відомих керамічних матеріалів для броньового захисту

Властивість	СП-10 ДЦ-5	SiC [12-14]
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1880	3,05-3,15
$\alpha$ $10^{-7}$ град <sup>-1</sup>	23,6	43
$E$ , ГПа	283	375-420
$\sigma_{згин}$ , МПа	250	300-340
$K_{IC}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	8,1	3-4
$HV$ , ГПа	8,94	22-23
Температура синтезу, °C	1350	1700-2100
Вартість в ум. од	50	100-150

Важливим аспектом ефективного впровадження розробленого елемента є його зменшена вартість за

рахунок зниження його температури синтезу та спрощення технології.

Однак вагоме зниження щільності та підвищення тріщиностійкості розробленого матеріалу СП-10 ДЦ 5 при порівнянні з аналогічною пластиною на основі SiC дозволить суттєво знизити вагу композиційних бронееlementів при частковій заміні надтверого керамічного бронееlementу в системі кераміка – ситал – кевлар та підвищити живучість броні при обстрілі.

Проведені балістичні випробування показали, що розроблений СКМ СП-10 ДЦ-5 витримав обстріл за вимогами STANAG 4569 (2 рівень). Це дозволяє зробити висновок про перспективність його використання у складі композиційного бронееlementу, як енергоруйнуючу та енергопоглинаючу складову.

### Висновки.

Розроблено композиційні матеріали на основі літійалюмосилікатних стекел та діоксиду цирконію стабілізованого оксидом ітрію. Досліджено вплив структури склокристалічних матеріалів на їх механічні властивості та встановлено основні критерії забезпечення показників тріщиностійкості  $K_{IC} = 8,1 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ , ударостійкості  $M = 1,32 \text{ ГПа}^2\cdot\text{м}^3\cdot\text{кг}^{-1}$  та швидкості розповсюдження звукової хвилі  $v = 12,5 \text{ км/с}$ . Порівняльна оцінка розробленого склокристалічного матеріалу та відомого елемента броні захисту дозволила встановити, що впровадження розробленого ударостійкого СКМ дозволить підвищити конкурентоспроможність вітчизняних бронематеріалів та забезпечити показники їх властивостей на рівні світових аналогів.

### Список літератури

1. Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід (Київ, 22-23 вересня 2015) / відп. ред. В. С. Шовкалюк. – Київ: ТОВ «Міжнародний виставковий центр». 2015. 247 с.
2. Savvova O., Bragina L., Voronov G. Development of glass-ceramic high-strength material for personal armor protection elements // *Chemistry and Chemical Technology*. 2017. vol. 11, is. 2. pp. 214–219
3. Savvova O.V., Voronov G.K., Babich O.V. Protective impact resistant composite materials based on aluminium-silicate glass-ceramics // *Functional Materials*. 2019. vol. 26, is. 1. pp. 182–188.
4. Вишняков Л.Р., Мазна О.В., Нешпор О.В., Коханій В.О., Олексюк О.Н. Вплив конструктивно-технологічних факторів на ефективність бронееlementів на основі кераміки // *Проблеми прочності*. 2004. № 6. С. 128–135.
5. Кобылкин И. Ф., Селиванов В. В. *Материалы и структуры легкой бронезащиты : учебник*. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 191 с.
6. *The Science of Armour Materials* / Edited by Ian G. Crouch. – Duxford: Woodhead Publishing. 2016. 754 p.
7. Thomas, E.L., McGrath, M.F., Buchanan, R.C., Chelluri, B., Haber, R.A., Hutchinson, J.W., Johnson, G.R., Kumar, S., McMeeking, R.M., Orlovskaya, N.A., Ortiz, M., Radovitzky, R., Ramesh, K.T., Shockey, D.A., Skaggs, S.R., Wax, S.G. Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army // *Washington: National Academies Press*. 2011. 176 p.
8. P. G. Karandikar, G. Evans, S. Wong, M. K. Aghajanian, and M. Sennett A review of ceramics for armor applications // *Advances in Ceramic Armor IV : Ceramic Engineering and Science Proceed-*

*ings*. 2008. vol. 29, № 6. pp. 163–175.

9. Сафаров И.Б. Анизотропия скоростей продольных и поперечных волн у кристалла сподумена при высоких термодинамических условиях / *ДАН АР. T.LIV*. 1998. № 5-6. С. 135–141.
10. Сафаров И.Б., Агаев Х.Б. Упругие модули кристалла сподумена при давлениях до 2,0 ГПа / *Геодинамика*. 2012. №1 (12). С. 163–167.
11. Харланов А.Н., Туракулова А.О., Лунина Е.В., Муравьева Г.П., Лулин В.В. Термические превращения в ZrO<sub>2</sub>, легированного оксидами иттрия и лантана // *Вестник Московского Университета: серия 2. химия*. 1998. Т. 39, № 3. С. 162–165.
12. Гаршин А.П., Кулик В.И., Нилов А.С. Ударопрочные материалы на основе технической керамики: достижения и перспективы повышения их баллистической эффективности // *Новые огнеупоры*. 2016. № 4. С. 53–67.
13. Майстренко А.Л., Кулич В.Г., Ткач В.Н. Формирование высокоплотной структуры самосвязанного карбида кремния // *Сверхтвердые материалы*. 2009. № 1. С. 18–35
14. Material properties Norfrax / Saint-Gobain Ceramic Material URL: <https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/sites/imdf.hpr.com/files/norfrax-rbsic-en-1062-tds.pdf>.

### References (transliterated)

1. Perspektivi naukovo-tehnologichnogo zabezpechennya oboronno-promislovogo kompleksu Ukraini: Informacijno-komunikativnij zahid (Kiyiv, 22-23 veresnya 2015), vidp. red. V. S. Shovkalyuk. – K.: TOV «Mizhnarodnij vistavkovij centr», 2015.–247p.
2. Savvova O., Bragina L., Voronov G. Development of glass-ceramic high-strength material for personal armor protection elements // *Chemistry and Chemical Technology*. 2017. vol. 11, is. 2. pp. 214–219
3. Savvova O.V., Voronov G.K., Babich O.V. Protective impact resistant composite materials based on aluminium-silicate glass-ceramics // *Functional Materials*. 2019. vol. 26, is. 1. pp. 182–188.
4. Vy`shnyakov L.R., Mazna O.V., Neshpor O.V., Koxany`j V.O., Oleksyuk O.N. Vply`v konstrukty`vno-technologichny`x faktoriv na efektyvni`st` broneelementiv na osnovi keramiki` [The influence of structural and technological factors on the effectiveness of armored elements based on ceramics] // *Problemy prochnosti`*. 2004. No 6. pp. 128–135.
5. Kobylkin, V. V. Selivanov I. F. *Materialy i struktury legkoj bronzashhity : uchebnik* [Materials and structures of light armor protection: a textbook]. Moskva : Izdatel'stvo MGTU im. N. Je. Baumana, 2014. 191 p.
6. *The Science of Armour Materials* / Edited by Ian G. Crouch. – Duxford: Woodhead Publishing. 2016. 754 p.
7. Thomas, E.L., McGrath, M.F., Buchanan, R.C., Chelluri, B., Haber, R.A., Hutchinson, J.W., Johnson, G.R., Kumar, S., McMeeking, R.M., Orlovskaya, N.A., Ortiz, M., Radovitzky, R., Ramesh, K.T., Shockey, D.A., Skaggs, S.R., Wax, S.G. *Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army* // Washington: National Academies Press. 2011. 176 p.
8. P. G. Karandikar, G. Evans, S. Wong, M. K. Aghajanian, and M. Sennett A review of ceramics for armor applications // *Advances in Ceramic Armor IV : Ceramic Engineering and Science Proceedings*. 2008. vol. 29, No. 6. pp. 163–175.
9. Safarov I.B. Anizotropija skorostej prodol'nyh i poperechnykh voln u kristalla spodumeny pri vysokih termodinamicheskikh uslovijah [Anisotropy of the velocities of longitudinal and transverse waves in a spodumene crystal under high thermodynamic conditions] / *DAN AR*. 1998. T.LIV. No. 5 pp. 135–141.
10. Safarov I.B., Agaev H.B. Uprugie moduli kristalla spodumena pri davlenijah do 2,0 GPa [Elastic moduli of the spodumene crystal at pressures up to 2.0 GPa] / *Geodinamika*. 2012. No. 1 (12). pp. 163–167.
11. Harlanov A.N., Turakulova A.O., Lunina E.V., Murav'eva G.P., Lunin V.V. Termicheskie prevrashheniya v ZrO<sub>2</sub>, legirovannogo oksidami ittriya i lantana [Thermal transformations in ZrO<sub>2</sub> doped with yttrium and lanthanum oxides] // *Vestnik Moskovskogo Universiteta: serija 2. himija*. 1998. Vol. 39, No. 3. pp. 162–165.
12. Garshin A.P., Kulik V.I., Nilov A.S. Udaroprochnye materialy na osnove tehnicheskoy keramiki: dostizheniya i perspektivy povysheniya ih ballisticheskoy jeffektivnosti [Impact-resistant materials based on technical ceramics: achievements and prospects

- for increasing their ballistic efficiency] // *Novye ognepory*. 2016. No 4. pp. 53–67.
13. Majstrenko A.L., Kulich V.G., Tkach V.N. Formirovanie vysokoplotnoj struktury samosvjazannogo karbida kremnija [The formation of a high-density structure of self-bonded silicon carbide] // *Sverhtverdye materialy*. 2009. No. 1. pp. 18-35
14. Material properties Norfrax / Saint-Gobain Ceramic Material URL:

<https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/sites/imdf.hpr.com/files/norfrax-rbsic-en-1062-tds.pdf>.

Надійшла (received) 10.03.2020

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

**Саввова Оксана Вікторівна (Саввова Оксана Викторовна, Savvova Oksana)** – доктор технічних наук, доцент, Харківський Національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, професор кафедри хімії та інтегрованих технологій; тел.: (057) 707-31-74; e-mail: savvova\_oksana@ukr.net.

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

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

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

**Смирнова Юлія Олегівна (Смирнова Юлия Олеговна, Smirnova Julia)** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський Національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова, старший викладач кафедри хімії та інтегрованих технологій; тел.: (057) 707-31-74; e-mail: ulya-sobol@ukr.net.