

*О. В. САВВОВА, О. В. БАБИЧ, С. С. ФІРСОВ, М. М. ГОЖА, Т. Д. ПАНАЙОТОВА*

## ВИСОКОМІЦНІ СКЛОВОЛОКНА СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

В статті проаналізовано сучасний стан розробок скловолокна спеціального призначення та області застосування. Актуальність використання скловолокна для будівництва, автомобілебудування, аерокосмічної та автомобільної промисловості, вітрової енергетики, медицини пов'язана з комплексом унікальних експлуатаційних властивостей, легкості та екологічності. Визначено, що на сьогоднішній день для композитів спеціального призначення на основі скловолокна існує проблема залежності від постачання вартісного скловолокна зарубіжних виробників. На основі аналізу сучасних тенденцій на світовому ринку встановлено актуальність та необхідність одержання та використання вітчизняних високоміцних, легких, зі зниженою вартістю скловолокна та композитів на їх основі для аерокосмічної, ракетної, автомобільної промисловості, вітрової енергетики та медицини. Проаналізовано різні види перспективних високоміцних скловолокна та порівняно їх технічні характеристики. Визначені основні критерії для створення нових високоміцних наноструктурованих вітчизняних скловолокна для склопластиків при облицюванні корпусів ракетних двигунів та обґрунтовано вибір складу скла для одержання високоміцного скловолокна. Восстановлено, що проектування складів з урахуванням структурних показників (структурна міцність скломатеріалів ( $f_{Si}$ ), координаційний стан алюмінію ( $\Psi_{Al}$ ) та бору ( $\Psi_B$ ), коефіцієнт прозорості ( $K_{np}$ ), коефіцієнт кристалічності ( $K_{кр}$ ), силікатний модуль ( $M_c$ ), модуль кислотності ( $M_k$ ), модуль в'язкості ( $M_v$ )) дозволить теоретично обґрунтувати вибір складів скловолокна схильних до наноструктурування в області температури розм'якшення, що сприятиме посиленню їх механічних та термічних властивостей шляхом формування самоорганізованої структури з наявністю нанокластерів, що є гомогенними зародками кристалічних фаз, які зміцнюють структуру скловолокна. Впровадження вітчизняних скловолокна з високими експлуатаційними характеристиками дозволить знизити імпортозалежність в даній галузі та сприяти підвищенню конкурентоздатності на світовому ринку.

**Ключові слова:** скловолокно; аноструктурування; структурні показники; проектування; авіаційна та ракетна промисловості

*O. V. SAVVOVA, O. V. BABICH, S. S. FIRSOV, M. M. HOZHA, T. D. PANAYOTOVA*

## HIGH-STRENGTH SPECIAL-PURPOSE FIBERGLASS

The article analyzes the current state of development of special-purpose fiberglass and its application areas. The relevance of using fiberglass for construction, automotive, aerospace and automotive industries, wind energy, and medicine is associated with a complex of unique operational properties, lightness, and environmental friendliness. It is determined that today, for special-purpose composites based on fiberglass, there is a problem of dependence on the supply of high-value fiberglass from foreign manufacturers. Based on the analysis of current trends in the world market, the relevance and necessity of obtaining and using domestic high-strength, lightweight, low-cost fiberglass and composites based on them for the aerospace, rocket, and automotive industries, wind energy, and medicine are established. Various types of promising high-strength fiberglass are analyzed and their technical characteristics are compared. The main criteria for creating new high-strength nanostructured domestic glass fibers for fiberglass when facing rocket engine housings are determined and the choice of glass composition for obtaining high-strength glass fiber is justified. It is established that the design of compositions taking into account structural indicators (structural strength of glass materials ( $f_{Si}$ ), coordination state of aluminum ( $\Psi_{Al}$ ) and boron ( $\Psi_B$ ), transparency coefficient ( $K_{tr}$ ), crystallinity coefficient ( $K_{cr}$ ), silicate Module ( $M_s$ ), acidity modulus ( $M_a$ ), viscosity modulus ( $M_v$ )) will allow theoretically justifying the choice of compositions of glass fibers prone to nanostructuring in the softening temperature region, which will contribute to the enhancement of their mechanical and thermal properties by forming a self-organized structure with the presence of nanoclusters, which are homogeneous nuclei of crystalline phases that strengthen the structure of glass fiber. The introduction of domestic fiberglass with high performance characteristics will reduce import dependence in this industry and help increase competitiveness in the global market.

**Keywords:** fiberglass; anostrecturing; structural parameters; design; aviation and rocket industry

**Вступ.** Зростаючий попит на скловолокно для будівництва, автомобілебудування, аерокосмічної та автомобільної промисловості, вітрової енергетики, медицини пов'язаний з комплексом унікальних експлуатаційних властивостей, легкості та екологічності. Дедалі більше уваги приділяється будівництву та розвитку інфраструктури в усьому світі: інтенсивне будівництво автомагістралей, доріг і розвиток промислового та житлового будівництва, що безперечно підвищує попит на використання скловолокна. А також необхідність у відновлюваних джерелах енергії, таких як енергія вітру, розширює можливості встановлення вітрових турбін використовуючи поліфункціональність скловолокна [1]. Ефективність застосування скловолокна в авіаційній техніці, автомобільній промисловості пов'язана з можливістю підвищення мобільності транспортного засобу при його застосуванні. В аерокосмічній промисловості, композити на основі скловолокна знаходять застосування в ракетах-носіях, сонячних батареях, ракетах-носіях, пасажирських літаках, бойових літаках тощо. Армвані скловолокном композити

мають багато переваг, а саме легкість, високу хімічну та вологостійкість, поглинання вібрації, простоту виготовлення, та низьку вартість виробництва [2].

Висока біологічна сумісність та нетоксичність дозволяє використовувати скловолокно при виробництві різних стоматологічних виробів, таких як зубні протези, ендодонтичні штифтові системи та ортодонтичні фіксатори [3]. Застосування скловолокна для створення мікроволоконних пов'язок для лікування хронічних ран в умовах бойових дій дозволить зберегти життя, скоротити період реабілітації та пришвидшити одужання військового та цивільного населення [4].

Значна частка виробництва композитів на основі високоміцних волокон спрямована на створення матеріалів для локального та індивідуального бронювання техніки обладнання та захисту особового складу [5, 6].

Зважаючи на значну затребуваність матеріалів зі скловолокна зростають інвестиції в науково-дослідну діяльність та виробництво в даному напрямку, що прискорює зростання ринку скловолокна. Так,

розмір світового ринку скловолокна склав 30,90 мільярдів доларів США в 2025 році та, за прогнозами, сягне близько 54,27 мільярдів доларів США у 2034 році, що становить CAGR 6,46 % з 2025 по 2034 роки [7].

За видом скловолокна у 2024 році сегмент Е-скла (електротехнічне скловолокно), склав понад 66 % частки доходу. Зростання сегменту ринку Е-скла пояснюється його економічною ефективністю та широким використанням для загального застосування завдяки високому електроопору, економічності, високій міцності на розрив, жорсткості, хімічній стійкості. Очікується, що такі сегменти, як ECR- скло, H-скло та S-скло, прискорять ріст ринку протягом прогнозованого періоду [7]. Збільшення сегменту ринку таких скловолокна пояснюється поєднанням властивостей, таких як, стійкість до корозії, термо- та вологостійкість, високі ізоляційні характеристики, а також широким впровадженням у різних галузях промисловості, таких як аерокосмічна, автомобільна та приладобудівна галузі (рис.1) [8].

Сучасні тенденції на ринку аерокосмічного скловолокна включають:

1. розробку високотехнологічних складів скловолокна з високими міцносними властивостями зі зниженою вартістю та удосконалення композитів зі скловолокна з одночасно високою міцністю та низькою щільністю та високим рівнем екологічності;
2. впровадження автоматизації для виготовлення складних компонентів зі скловолокна для літаків з високим ступенем точності;
3. забезпечення багатофункціональності та інтегрованості структури скловолокна.



Рисунок 1 – Перспективні області застосування скловолокна

Характеристиками скловолокнистих тканин є високі механічні властивості при згинанні, міцність, питома щільність полімерних і сталевих полотен, ударостійкість, висока корозійна стійкість до хімічних та біологічних об'єктів [9].

Понад 90 % скловолокна виготовляється на основі Е-скла. Волокна спеціального призначення, які сьогодні мають комерційне значення на ринку, включають скловолокна з високою корозійною стійкістю (ECR-скло), високою міцністю (S-, R- та T-E-скло), з низькою діелектричною проникністю (D-скло), високоміцні волокна та чисті кремнеземні або кварцові волокна, які можна використовувати при дуже високих температурах [10–12].

Пріоритетні напрямки розвитку полімерних та скловолокна на сьогодні включають розробку та створення на їх основі шаруватих композитів для бронезахисту (рис. 2) [5, 13].

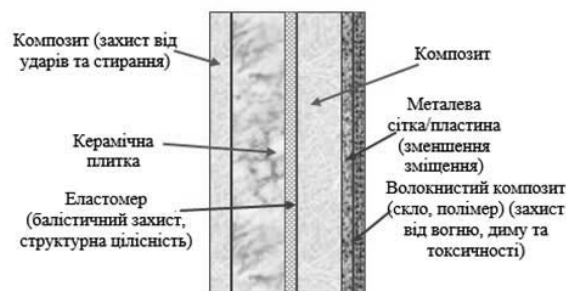


Рисунок 2 – Система бронезахисту на основі шаруватих композитів

Сьогодні відомі боросилікатні скловолокна виробництва компанії SCHOTT (Німеччина) та полімерні волокна на основі поліетилену надвисокої щільності (UHMWPE) (торгові назви Dyneema та Spectra), полібензобісоксалу (PBO), полібензобістіазолу (PBT), полібензенімідазолу (PBI), які спеціально призначені для балістичного захисту. Компанія DuPont розпочала комерціалізацію параарамідного волокна Kevlar®, як першого високоміцного ароматичного поліамідного волокна вже у 1971 році. Іншим волокном зі схожою хімічною структурою є Twaron®, яке виробляється компанією Akzo Nobel з кінця 1970-х років.

Значні відмінності між питомою міцністю та жорсткістю різних типів волокон пов'язані з їх значною різницею у значеннях щільності ( $\text{г/см}^3$ ): Е-скло – 2,54-2,60; S-скло – 2,40-2,50; Кевлар 1,44-1,47; Dyneema і Spectra – 0,97; Вуглець 1,80-2,10 (рис. 3), що визначає очевидність використання UHMWPE Dyneema та Spectra для створення високоміцних та легких бронеелементів. Ефективність застосування скляних і арамідних волокон пов'язана зі значним поглинанням енергії, стійкістю до корозії, водостійкістю, термостійкістю та вогнестійкістю. Також важливим чинником є продуктивність, яка визначається витратами волокна, які класифікуються наступним чином: Е-скло (низькі); S-скло та арамідне волокно (середні); UHMWPE (термопластичний полімер) та вуглецеве волокно (високий). Також важливе значення має склад та технологія композитів на основі волокон, що також має важливе значення при оцінці вартості матеріалів [14, 15]. Інший розвиток скловолокна пов'язаний з сучасними засобами телекомунікацій, починаючи з 1970 р., коли компанія Corning inc. створила оптичні волокна з коефіцієнтом загасання  $< 20$  дБ/км, на довжині хвилі 633 нм. Розвиток технології волоконної електроніки змінюється та вдосконалюється, включаючи модулятори, лазери, фізичні перетворювачі, приймачі. Волоконно-оптичні мережі зв'язку забезпечують нам надійний високопродуктивний зв'язок із зображеннями та онлайн-фільмами, телевізійними та комп'ютерними

мережами тощо. Волоконно-оптичні мережі є екологічними, оскільки сигнал, що поширюється всередині волокон не впливає на зміну клімату [16].

Екологічно чисті високопродуктивні скляні оптичні волокна SCHOTT встановлюють нові стандарти для освітлювальних волоконних оптоволокон з високоякісними скляними оптичними волокнами PURAVIS® [17].

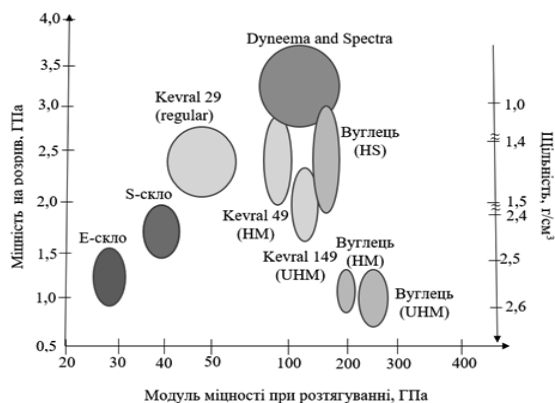


Рисунок 3 – Властивості різних видів скловолокон

Впровадження нанонауки та нанотехнології також є інструментами, які можуть вплинути на характеристики композитів на основі скловолокон. Додавання наноглини, вуглецевих нанотрубок або графену нанорозміру збільшує механічну міцність епоксидного композиту, армованого скловолоконном. Крім того, додавання наноглини також підвищує корозійну стійкість епоксидного композиту.

Економія ваги в транспортній та автомобільній промисловості є ще одним рішенням для зменшення споживання енергії, і тому композити, армовані скловолоконном, є найбільш перспективним рішенням. Композити, армовані скловолоконном, використовуються або для виготовлення лопаток вітрових турбін, або труб для водопровідних каналів, а також в автомобільній промисловості та транспорті.

Останнім часом ціна на композити з вуглецевого волокна (CF) знизилася, що робить їх більш привабливими для використання в багатьох сферах. CF є ідеальним вибором для аерокосмічної та оборонної галузей, оскільки вони забезпечують високу міцність, довговічність та стійкість. Традиційні металеві конструкції замінюються композитами з вуглецевого волокна в літаках завдяки їхній легкій та міцній конструкції. В оборонній промисловості CF також використовується в протиракетній обороні, наземній обороні та військовій морській обороні [18].

На сьогоднішній день для композитів спеціального призначення існує проблема залежності від постачання вартісного скловолоконна зарубіжних виробників. Саме розробка та застосування конкурентоздатних вітчизняних високоміцних, легких, зі зниженою вартістю скловолокон та композитів на їх основі дозволить знизити імпортозалежність в таких матеріалах для

аерокосмічної та автомобільної промисловості, віetroвої енергетики та медицини і вийти на світовий ринок.

**Мета роботи.** Метою роботи є аналіз перспективних високоміцних скловолокон та вибір основних критеріїв для створення нових високоміцних наноструктурованих вітчизняних скловолокон спеціального призначення

Для досягнення означеної мети були поставлені наступні завдання:

- вибір основних критеріїв при створенні нових високоміцних скловолокон для склопластиків при облицюванні корпусів ракетних двигунів;
- обґрунтування вибору складу скла для одержання високоміцного скловолоконна

**Результати роботи та їх обговорення.** За експлуатаційними властивостями високоміцні скловолоконна повинні мати низьку густину для зменшення ваги, високі міцнісні властивості, які включають здатність протистояти значним динамічним навантаженням за високого тиску, мати високу тріщиностійкість. Модуль пружності матеріалу має бути низьким для забезпечення гнучкості матеріалу, високу термічну стійкість при забезпеченні низького температурного коефіцієнту лінійного розширення, стійкість до хімічного та біологічного руйнування, значний електричний опір та здатність до радіопоглинання для маскування військової техніки. Високоміцне високотемпературне скловолоконно (HSHT) від MarkForged – це матеріал, спеціально розроблений для виготовлення міцних деталей для використання за високих температур (105 °C) (табл. 1) [8].

Таблиця 1 – Технічні характеристики високоміцних скловолокон

| Властивості                                | Стандарт             | HSHT |     |
|--------------------------------------------|----------------------|------|-----|
| Міцність на розрив (МПа)                   | Волокно: ASTM D3039  | 600  | 590 |
| Міцності на розтягування (ГПа)             | Волокно: ASTM D30309 | 21   | 21  |
| Деформація розтягування за розриву (%)     | Волокно: ASTM D3039  | 3,9  | 3,8 |
| Міцність на вигин (МПа)                    | ASTM D790*           | 420  | 200 |
| Модуль пружності за вигину (ГПа)           | ASTM D790*           | 21   | 22  |
| Деформація вигину за розриву (%)           | ASTM D790*           | 2.2  | 1.1 |
| Міцність на стискання (МПа)                | ASTM D6641           | 192  | 140 |
| Модуль стискання (ГПа)                     | ASTM D6641           | 21   | 21  |
| Деформація стискання за розриву (%)        | ASTM D6641           | H/3  | H/3 |
| Температура прогину під навантаженням (°C) | ASTM D648 Метод B    | 150  | 105 |
| Густина (г/см³)                            | H/3                  | 1,5  | 1,5 |

За літературними даними скловолоконна різного призначення синтезують на основі псевдопотрійної системи наведеній на рисунку 4.

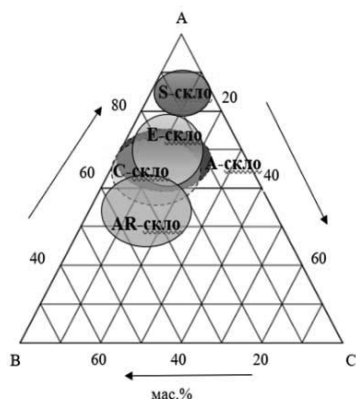
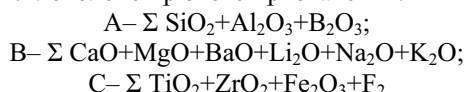


Рисунок 4 – Псевдопотрійна система складів скловолокна різного призначення:



Склад високоміцного скловолокна заснований на системі  $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ , яка модифікована натрію та калію оксидами для зниження в'язкості скла і бором, фосфором і ванадієм з метою наноструктурування та зниження поверхневого натягу скла. Утворення наноструктури в області температури розм'якшення при формуванні скловолокна дозволить підвищити його міцності властивості за рахунок формування нанокристалів високоміцних фаз без суттєвого впливу на технологічні властивості (в'язкість, поверхневий натяг). Забезпечення ступеня зв'язаності кремнекисневого каркасу та структурне положення алюмінію та бору в чотирикоординатному стані за киснем у структурі скла дозволить забезпечити його високу міцність.

Забезпечення відповідних значень коефіцієнтів кристалічності та прозорості ( $K_{\text{пр.}} \geq 2,1$  та  $K_{\text{кр.}} > 3,5$ ) дозволить сформувати наноструктуру скла в області низьких температур [19]. Однак дані показники повинні бути уточненими з урахуванням особливостей технології скловолокна. Важливими характеристиками структури мінеральних волокон є силікатний модуль ( $M_c$ ) та модуль кислотності ( $M_K$ ). Силікатний модуль визначає здатність шихти до склоутворення при цьому оптимальне значення знаходиться в межах 3,5–4,5. При збільшенні модуля кислотності від 12 до 16 і вище підвищується хімічна стійкість, механічна міцність скловолокна, а отже і його довговічність. Однак, зростання значення  $M_K$  через збільшення в шихті вмісту оксидів кремнію та алюмінію ускладнює її плавлення, підвищує в'язкість розплаву й у результаті призводить до зниження продуктивності плавильного агрегату або збільшення енергозатрат, тому крім модуля кислотності при виборі компонентів для виробництва волокон враховують модуль в'язкості щоб знизити енерговитрати на плавлення.

Проектування складів з урахуванням структурних показників (табл. 2) дозволить теоретично обґрунтувати вибір складів скловолокна схильних до наноструктурування в області температури розм'якшення, що сприятиме посиленню їх механічних та термічних властивостей шляхом формування самоорганізованої структури з наявністю нанокластерів, що є гомогенними зародками кристалічних фаз, які зміцнюють структуру скловолокна. Розробка вітчизняних складів високоміцних скловолокна дозволить забезпечити авіаційну та ракетну промисловості надійними високотехнологічними матеріалами та підвищити конкурентоздатність композиційних матеріалів на світовому ринку.

Таблиця 2 – Розрахункові формули для характеристики структури скла

| Структурний показник                                                              | Розрахункова формула                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Структурна міцність скломатеріалів ( $f_{\text{Si}}$ )                            | $f_{\text{Si}} = \frac{\gamma \cdot \text{SiO}_2}{(\gamma \cdot \text{Me}_2\text{O} + \gamma \cdot \text{MeO} + 3\gamma \cdot \text{Me}_2\text{O}_3 + 2\gamma \cdot \text{MeO}_2 + 5\gamma \cdot \text{Me}_2\text{O}_5 + 2\gamma \cdot \text{SiO}_2)}$                  |
| Координаційний стан алюмінію ( $\Psi_{\text{Al}}$ ) та бору ( $\Psi_{\text{B}}$ ) | $\Psi_{\text{Al}} = \frac{(\gamma \cdot \text{Me}_2\text{O} + \gamma \cdot \text{MeO})}{\gamma \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}; \quad \Psi_{\text{B}} = \frac{(\gamma \cdot \text{Me}_2\text{O} - \gamma \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)}{\gamma \cdot \text{B}_2\text{O}_3}$ |
| Коефіцієнт прозорості ( $K_{\text{пр.}}$ )                                        | $K_{\text{пр.}} = \frac{\sum \text{O}}{\sum \text{C}}, \text{ де } \sum \text{O} - \text{сума оксигену; } \sum \text{C} - \text{сума оксидів-склоутворювачів}$                                                                                                          |
| Коефіцієнт кристалічності ( $K_{\text{кр.}}$ )                                    | $K_{\text{кр.}} = \frac{\sum (r \cdot a)}{\sum (r \cdot b)},$<br>де $r$ – значення напруги поля катіонів у кисневому зв'язку (за Дітцелем);<br>$a$ – число молей компоненту, який сприяє кристалізації;<br>$b$ – число молей компоненту, який сприяє склоутворенню      |
| Силікатний модуль ( $M_c$ )                                                       | $M_c = \frac{\gamma \cdot \text{SiO}_2}{\gamma \cdot \text{Al}_2\text{O}_3}$                                                                                                                                                                                            |
| Модуль кислотності ( $M_K$ )                                                      | $M_K = \frac{(\gamma \cdot \text{SiO}_2 + \gamma \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)}{(\gamma \cdot \text{CaO} + \gamma \cdot \text{MgO})}$                                                                                                                                    |

|                            |                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Модуль в'язкості ( $M_B$ ) | $M_B = \frac{(\gamma \cdot \text{SiO}_2 + 2\gamma \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)}{(2\gamma \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 + \gamma \cdot \text{FeO} + \gamma \cdot \text{CaO} + \gamma \cdot \text{MgO} + 2\gamma \cdot \text{Na}_2\text{O} + 2\gamma \cdot \text{K}_2\text{O})}$ |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

$\gamma$  – вміст оксидів у складі скла, мол. %.

**Висновки.** З урахуванням тенденцій на ринку аерокосмічної та ракетної галузей встановлено перспективність використання високоміцних полегшених скловолокон за рахунок поєднанням властивостей, таких як, стійкість до корозії, термо- та вологостійкість, високі ізоляційні характеристики. Встановлено, що проектування складів скловолокон з урахуванням структурних показників для прогнозування схильності до наноструктурування сприятиме зміцненню структури скловолокна, що поряд з низькою щільністю для зменшення ваги дозволить одержати вітчизняні полегшені зміцнені скловолокна для склопластиків при облицюванні корпусів ракетних двигунів. Робота виконується у рамках Державного Замовлення № 0125U001021

### Список літератури

1. Patri M., Baran Samui A. Glass fibre composites for aerospace and other applications. In *Woodhead Publishing in Materials. Technical Organic and Inorganic Fibres from Natural Resources*. 2025. P. 795–834. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15459-1.00021-8>
2. Săftoiu G.-V., Constantin C., Nicoară A.-I., Pelin G., Ficaï D., Ficaï A. Glass Fibre-Reinforced Composite Materials Used in the Aeronautical Transport Sector: A Critical Circular Economy Point of View. *Sustainability*. 2024. Vol.16. 4632. <https://doi.org/10.3390/su16114632>
3. Safwat E., Khater A., Gamal Abd-Elsatar A., Khater G.A. Glass fiber-reinforced composites in dentistry. *Bulletin of the National Research Centre*. 2021. Vol. 45. 190. <https://doi.org/10.1186/s42269-021-00650-7>
4. Савцова О. В., Бабіч О. В., Фесенко О. І., Тимошук М. І., Фірсов С.С. Перспективні напрямки розробки біоактивних скловолокон медичного застосування. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. 2024. № 2 (12). С. 81–87. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2024.02.14>
5. Ali A., Adawiyah R., Rassiah K., Kuan Ng W., Arifin F., Othman F., Shauqi Hazin M., Faidzi M.K., Abdullah M.F., Megat Ahmad M.M.H. Ballistic impact properties of woven bamboo- woven E-glass- unsaturated polyester. *Defence Technology*. 2019. Vol. 15(3). P. 282–294. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.09.001>
6. Singh A., Wanhil R., Prasad N. Lightweight Ballistic Armours for Aero-Vehicle Protection. *Aerospace Materials and Material Technologies*. 2017. P. 541–557. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2143-5\\_25](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2143-5_25)
7. *Fiberglass Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034*. URL: <https://www.precedenceresearch.com/fiberglass-market>
8. Rajak D.K., Wagh P.H., Linul E. Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review. *Polymers*. 2021. Vol. 13 (21). 3721. <https://doi.org/10.3390/polym13213721>
9. Cameron N.M., Rapp C.F. Fiberglass. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. 2001. P. 3142–3146. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00558-1>

10. Cevahir A. Glass fibers. *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*. 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101871-2.00005-9>

11. E, R and D glass properties. Official company website «Vetrotex». URL: [https://glassproperties.com/glasses/E\\_R\\_and\\_D\\_glass\\_properties.pdf](https://glassproperties.com/glasses/E_R_and_D_glass_properties.pdf)

12. Prakash Srivastava J., Kumar, P. Introduction to Glass Fiber-Based Composites and Structures. Natural and Synthetic Fiber Reinforced Composites: Synthesis, Properties, and Applications. 2022 WILEY-VCH GmbH. 2022. P. 16. [https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527349308\\_c01.pdf](https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527349308_c01.pdf)

13. Ojoc G. G., Pirvu C., Sandu S., Deleanu L. Glass fibers for impact protection systems. A review. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 485. 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/485/1/012019>

14. Gowayed Y. Types of fiber and fiber arrangement in fiber-reinforced polymer (FRP) composites. *Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Civil - Engineering*. 2013. P. 3–17. <https://doi.org/10.1533/9780857098955.1.3>

15. Yavuz İ., Şimşir E., Şenol B. Investigation of mechanical behavior of glass fiber reinforced extruded polystyrene core material composites. *RSC Advances*. 2024. Vol. 14 (19). P. 13311–13320. <https://doi.org/10.1039/d4ra01740d>

16. Volotinen T. T., Bertil C. Development of Glass Optical Fibers 1970-2020, Providing Us the Digitalized Communication World Arvidsson. *Journal of Materials Science and Engineering*. 2023. A 13. P. 1–3. <https://doi.org/10.1039/d4ra01740d>

17. PURAVIS glass optical fibers. Official company website «PURAVIS». URL: <https://www.schott.com/en-gb/products/puravis-p1000353>

18. High-Strength, High-Temperature Fiberglass. Official company website «MarkForged». URL: <https://support.markforged.com/portal/s/article/High-Strength-High-Temperature-Fiberglass>

19. Savvova O.V., Tur O.H., Fesenko O.I., Babich O.V., Smyrnova Yu.O., Hordiichuk V.M. Study of the phase formation of transparent magnesium aluminosilicate glass-ceramic materials. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2024. No. 3. P. 155–164. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-154-3-155-164>

### References (transliterated)

1. Patri M., Baran Samui A. Glass fibre composites for aerospace and other applications. In *Woodhead Publishing in Materials. Technical Organic and Inorganic Fibres from Natural Resources*. 2025, pp. 795–834. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15459-1.00021-8>
2. Săftoiu G.-V., Constantin C., Nicoară A.-I., Pelin G., Ficaï D., Ficaï A. Glass Fibre-Reinforced Composite Materials Used in the Aeronautical Transport Sector: A Critical Circular Economy Point of View. *Sustainability*. 2024, Vol.16, 4632. <https://doi.org/10.3390/su16114632>
3. Safwat E., Khater A., Gamal Abd-Elsatar A., Khater G.A. Glass fiber-reinforced composites in dentistry. *Bulletin of the National Research Centre*. 2021, Vol. 45, 190. <https://doi.org/10.1186/s42269-021-00650-7>

4. Savvova O. V., Babich O. V., Fesenko O. I., Tymoshchuk M. I., Firsov S.S. Perspektyvni napriamky rozrobky bioaktyvnykh sklovolokon medychnoho zastosuvannya. [Promising directions of development of bioactive glass fibers for medical applications], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriya: Khimii, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia. [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Chemistry, chemical technology and ecology]. 2024, № 2 (12). pp. 81–87. <https://doi.org/10.20998/2079-0821.2024.02.14>
5. Ali A., Adawiyah R., Rassiah K., Kuan Ng W., Arifin F., Othman F., Shauqi Hazin M., Faidzi M.K., Abdullah M.F., Megat Ahmad M.M.H. Ballistic impact properties of woven bamboo- woven E-glass- unsaturated polyester. *Defence Technology*. 2019, Vol. 15(3), pp. 282–294. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.09.001>
6. Singh A., Wanhill R., Prasad N. Lightweight Ballistic Armours for Aero-Vehicle Protection. *Aerospace Materials and Material Technologies*. 2017, pp. 541–557. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2143-5\\_25](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2143-5_25)
7. *Fiberglass Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034*. Available at: <https://www.precedenceresearch.com/fiberglass-market> (accessed 22.08.2025).
8. Rajak D.K., Wagh P.H., Linul E. Manufacturing Technologies of Carbon/Glass Fiber-Reinforced Polymer Composites and Their Properties: A Review. *Polymers*. 2021, Vol. 13 (21), pp. 3721. <https://doi.org/10.3390/polym13213721MarkForged>
9. Cameron N.M., Rapp C.F.. Fiberglass. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. 2001, pp. 3142–3146. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00558-1>
10. Cevahir A. Glass fibers. *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites*. 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101871-2.00005-9>
11. E, R and D glass properties. Official company website «Vetrotex». Available at: [https://glassproperties.com/glasses/E\\_R\\_and\\_D\\_glass\\_properties.pdf](https://glassproperties.com/glasses/E_R_and_D_glass_properties.pdf) (accessed 22.08.2025).
12. Prakash Srivastava J., Kumar, P. Introduction to Glass Fiber-Based Composites and Structures. Natural and Synthetic Fiber Reinforced Composites: Synthesis, Properties, and Applications. 2022 WILEY-VCH GmbH. 2022, pp. 16. [https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527349308\\_c01.pdf](https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527349308_c01.pdf)
13. Ojoc G. G., Pirvu C., Sandu S., Deleanu L. Glass fibers for impact protection systems. A review. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019, Vol. 485, 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/485/1/012019>
14. Gowayed Y. Types of fiber and fiber arrangement in fiber-reinforced polymer (FRP) composites. *Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Civil - Engineering*. 2013, pp. 3–17. <https://doi.org/10.1533/9780857098955.1.3>
15. Yavuz İ., Şimşir E., Şenol B. Investigation of mechanical behavior of glass fiber reinforced extruded polystyrene core material composites. *RSC Advances*. 2024, Vol. 14 (19), pp. 13311–13320. <https://doi.org/10.1039/d4ra01740d>
16. Volotinen T. T., Bertil C. Development of Glass Optical Fibers 1970-2020, *Providing Us the Digitalized Communication World Arvidsson*. *Journal of Materials Science and Engineering*. 2023, A 13, pp. 1–3. <https://doi.org/10.1039/d4ra01740d>
17. PURAVIS glass optical fibers. Official company website «PURAVIS». Available at: <https://www.schott.com/en-gb/products/puravis-p1000353> (accessed 22.08.2025).
18. High-Strength, High-Temperature Fiberglass. Official company website «MarkForged». Available at: <https://support.markforged.com/portal/s/article/High-Strength-High-Temperature-Fiberglass> (accessed 22.08.2025).
19. Savvova O.V., Tur O.H., Fesenko O.I., Babich O.V., Smyrnova Yu.O., Hordiichuk V.M. Study of the phase formation of transparent magnesium aluminosilicate glass-ceramic materials. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2024, No. 3, pp. 155–164. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-154-3-155-164>

### Відомості про авторів / About the Authors

**Саввова Оксана Вікторівна (Savvova Oksana)** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6664-2274>, e-mail: [savvova\\_oksana@ukr.net](mailto:savvova_oksana@ukr.net)

**Бабіч Олена Вікторівна (Babich Olena)** – кандидат технічних наук, старший дослідник, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0821-1585>, e-mail: [lenysjababich@gmail.com](mailto:lenysjababich@gmail.com)

**Фірсов Сергій Сергійович (Firsov Serhii)** – аспірант кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6643-7789>, e-mail: [serhii.firsov2@kname.edu.ua](mailto:serhii.firsov2@kname.edu.ua)

**Гозжа Максим Миколайович (Hozha Maksym)** – аспірант кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3751-5902>, e-mail: [Maksym.Hozha@kname.edu.ua](mailto:Maksym.Hozha@kname.edu.ua)

**Панайотова Тетяна Дмитрівна (Panayotova Tetyana)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3051-9474>, e-mail: [Tetyana.Panayotova@kname.edu.ua](mailto:Tetyana.Panayotova@kname.edu.ua)