

УДК 666.972.16

**ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ ЦЕМЕНТОБЕТОНІВ  
ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАСТИФІКАТОРІВ І БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА**

Канд. техн. наук О. Ю. Дорошенко

**STUDYING THE PROPERTIES OF FINE-GRAINED CEMENT CONCRETE USING  
PLASTICIZERS AND BASALT FIBER**

PhD (Tech.) A. Doroshenko



DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296773>

*Анотація.* У статті розглянуто експериментально-теоретичне обґрунтування використання базальтового волокна як перспективного матеріалу, за допомогою якого можна отримати новий клас будівельних матеріалів. Виявлено характер залежності властивостей цементобетону від способу введення термообробленого волокна та виду пластифікатора. Розроблено склади дрібнозернистого бетону з використанням термообробленого базальтового волокна, що дають змогу одержувати матеріали класом В25...В60 за міцністю під час стиснення; В12,8...В16,0 за міцністю під час вигину; морозостійкістю не менше F300. Аналіз мікроструктурних особливостей фібробетону з

армувальним базальтовим мікрОВОЛОКНОМ свідчить про те, що модифіковане волокно в цементній матриці виконує покладену на нього функцію завдяки зміні властивостей його поверхні. Волокно виступає як підкладка для активної кристалізації продуктів гідратації клінкерних мінералів, що сприяє підвищенню адгезії продуктів гідратації в'язучого до фібри. Це відбувається за рахунок підвищеної лугостійкості порівняно з необробленим волокном, а отже, його стабільності та міцності в умовах агресивного середовища цементного тіста, а також за рахунок відносно більшої активності. Зазначені обставини, вочевидь, і є основними причинами підвищення міцності на вигин композитних матеріалів (бетонів) із використанням досліджуваних цементних систем.

**Ключові слова:** базальтове волокно, мікроармувальні компоненти, суперпластифікатори, хімічний склад, фізико-механічні характеристики, бетон, транспортне будівництво.

**Abstract.** The article deals with the experimental and theoretical substantiation of the use of basalt fiber as a promising material that can be used to produce a new class of building materials. The nature of the dependence of cement concrete properties on the method of introducing heat-treated fiber and the type of plasticizer is revealed. The most effective is the preliminary loosening of the fiber in the mixing water in the presence of a naphthalene-formaldehyde superplasticizer, followed by the introduction of the suspension into the molding mixture. Adsorption of the plasticizer on the surface of the fiber leads to hydrophilization of its surface, which contributes to the uniform distribution of the fiber throughout the mixture and, as a result, increases the strength of the concrete. The use of the naphthalene-formaldehyde additive SP-1 makes it possible to increase the compressive strength by 10% and the flexural strength by 21% compared to formulations based on the polycarboxylate plasticizer Sika Visco Crete.

The compositions of fine-grained concrete using heat-treated basalt fiber have been developed, which make it possible to obtain materials with class B25...B60 in terms of compressive strength; Btb2.8...Btb6.0 in terms of bending strength; frost resistance not less than F300.

The analysis of the microstructural features of fiber concrete with reinforcing basalt microfiber shows that the modified (heat-treated at 500 °C) fiber in the cement matrix performs its function due to changes in its surface properties. The fiber acts as a substrate for the active crystallization of clinker minerals, which helps to increase the adhesion of binder hydration products to the fiber. This is due to the increased alkali resistance compared to untreated fiber, and, consequently, its stability and strength in the aggressive environment of cement batter, as well as due to its relatively higher activity. These circumstances are obviously the main reasons for the increase in the flexural strength of composite materials (concretes) using the studied cement systems.

**Keywords:** basalt fiber, microreinforcing components, superplasticizers, chemical composition, physical and mechanical characteristics, concrete, transport construction.

**Вступ.** Нині до перспективних способів підвищення характеристик міцності матеріалів належить дисперсне армування. Для цього використовують широкий спектр армувальних компонентів. При цьому ефективність дисперсного армування бетону і будівельних розчинів безпосередньо залежить від правильного вибору виду волокон відповідно до

функціонального призначення армованого матеріалу [1-3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У 1960-х роках були проведені перші дослідження базальтового волокна. Ці дослідження показали, що базальтове волокно має ряд унікальних властивостей, таких як висока міцність, хімічна стійкість і стійкість до корозії. Ці властивості роблять

базальтове волокно перспективним матеріалом для армування бетонних конструкцій.

Базальтове волокно може використовуватися для армування бетонних конструкцій у різних галузях, таких як будівництво мостів, тунелів, гребель і злітно-посадкових смуг. Цей матеріал може замінити металеву арматуру, схильну до корозії в агресивних середовищах.

Крім того, базальтове волокно може використовуватися для виробництва інших будівельних матеріалів, таких як облицювальні суміші та армувальні сітки. Цей матеріал має широкий спектр застосування та може використовуватися для створення нових класів будівельних матеріалів [4, 5].

Однією з причин, що стримують активне впровадження мікроармувальних матеріалів різного призначення, є відсутність нормативів для проектування. Було проаналізовано нормативні документи, що регламентують використання фібри в будівельних матеріалах [6, 7].

У результаті встановлено, що чинні нормативи не містять чітких рекомендацій щодо використання різних видів армувальних волокон для бетонів різного функціонального призначення.

Європейські норми [8, 9] чітко поділяють армувальні волокна на класи за основним типом дії, серед яких фібри для поліпшення пластичних властивостей, експлуатаційних характеристик, міцності на вигин. Однак ці документи стосуються тільки сталеві та полімерної фібри.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Розроблення та дослідження властивостей ефективного дрібнозернистого цементобетону з використанням базальтового волокна як мікроармувального компонента і суперпластифікатора для транспортного будівництва.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- виявити характер залежності властивостей цементобетону від способу

введення термообробленого волокна та виду пластифікатора;

- розробити склади дрібнозернистого бетону з використанням термообробленого базальтового волокна та суперпластифікатора;

- проаналізувати мікроструктурні особливості фібробетону з армувальним базальтовим мікроволокном і суперпластифікатором.

**Основна частина дослідження.** Для відбору базальтового волокна, найбільш придатного для армування цементної матриці, враховуючи широту географії застосування волокна в будівельній галузі та обсяги будівництва доріг на території України, що постійно зростають, проаналізовано волокна найбільших виробників базальтової фібри.

При проектуванні мікроармованих матеріалів мають значення також геометричні характеристики волокна. Для досягнення оптимального пластично-агрегатного стану мікроармувального компонента в суміші слід відбирати вихідні компоненти з оптимальним співвідношенням довжини і діаметра більше 10. Фібра виробництва ТОВ «Армбуд» характеризується необхідним співвідношенням геометричних характеристик [10, 11].

Були використані такі матеріали: портландцемент марки 400, пісок з модулем крупності 1,5, термооброблене базальтове волокно і вода. Розрахунок складу бетону проводили виходячи з його класу за міцністю при стисненні – В42,5.

Склад бетонної матриці було прийнято в таких співвідношеннях: Ц:П = 1:1,76; В/Ц = 0,37; як суперпластифікатор використовували добавку СП-1.

Наступним етапом роботи було розроблення складів дрібнозернистого бетону з урахуванням досягнення ефекту максимального розподілу мікроармувального компонента. За літературними даними, існує два способи розподілу волокна в системі: сухий і гідророзпушення [4, 5].

Для визначення оптимального способу введення волокна в цементну суміш у роботі було проаналізовано обидва методи. При приготуванні розчину першим способом усі сухі компоненти, включно з базальтовим волокном, засипали в змішувач і перемішували. Згодом у змішувач додавали необхідну воду замішування. При використанні сухого методу спостерігалось механічне пошкодження волокон, що значно знижує його техніко-експлуатаційні характеристики.

Кращого розподілу волокон вдалося досягти з використанням методу гідророзпушення. При цьому способі волокно перемішується у воді замішування, що сприяє більш рівномірному його розподілу. Далі суспензію додають у суміш цементу і піску. Однак у цьому разі при подальшому перемішуванні всіх компонентів спостерігається формування так званих «їжаків», тобто злипання окремих волокон у пучки.

У зв'язку з цим було запропоновано комплексний метод введення волокна і розглянуто три способи отримання цементобетону.

**Перший спосіб** – усі компоненти одночасно завантажуються в змішувач.

**Другий спосіб** – попередній розподіл волокна у воді замішування за наявності добавки з подальшим введенням суспензії до формувальної суміші.

**Третій спосіб** – розпушення волокон у воді з подальшим змішуванням усіх компонентів бетонної суміші, включно з пластифікатором.

Для створення заданої рухливості в роботі використовувалися суперпластифікатори СП-1 і Sika Visco Crete. Аналіз отриманих результатів (рис. 1) дає змогу зробити висновок про істотний вплив способу введення волокна і виду пластифікатора на фізико-механічні властивості дрібнозернистого бетону.

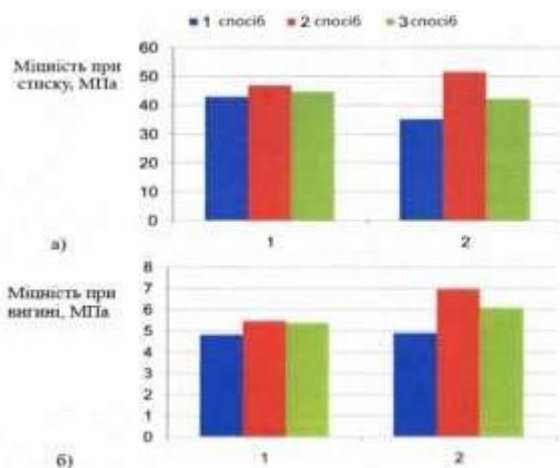


Рис. 1. Межа міцності при стисненні (а) і вигині (б) залежно від способу введення волокна і виду пластифікатора: 1 – Sika Visco Crete; 2 – СП-1

Попереднє розпушення волокна у воді замішування за наявності СП-1 (другий спосіб) призводить до підвищення міцності під час стиснення на 24 % і під час вигину на 30 % порівняно зі складами, отриманими

одночасним змішуванням усіх компонентів (перший спосіб). Це зумовлено адсорбцією пластифікатора на поверхні базальтового волокна та її гідрофілізацією, що призводить до формування оболонки на

поверхні волокон і рівномірного розподілу волокна спочатку у воді, а згодом у розчинній суміші.

При використанні пластифікатора Sika Visco Crete спостерігається незначна зміна характеристик міцності бетону незалежно від способу введення волокон. Використання добавки СП-1 дає змогу збільшити міцність при стисненні на 10 % і вигині на 21 % порівняно зі складами на основі пластифікатора Sika Visco Crete.

Цей ефект пов'язаний з хімічною природою; ефект пластифікації полікарбоксилатних добавок спостерігається тільки в суспензіях з лужним середовищем (наприклад середовище цементного розчину). За нейтрального середовища суспензії (у разі води замішування з перемішаним у ній волокном) ці пластифікатори не мають істотного впливу, тоді як нафталін-формальдегідні добавки характеризуються своєю універсальністю і проявляють

пластифікуючі дії незалежно від водневого показника розчину, що і позначається на міцнісних властивостях складів.

У зв'язку з цим у подальших експериментах був прийнятий другий спосіб отримання матеріалу. Як пластифікатор використовували СП-1.

У процесі експерименту встановлено істотний вплив концентрації волокна в системі на характеристики міцності бетонів. Зокрема збільшення вмісту волокон з 5 до 7 % сприяє зростанню міцності при стисненні (рис. 2) з 50 до 57 МПа (на 12 %). Подальше збільшення волокон в системі недоцільне, оскільки призводить до зниження міцності. При цьому приріст міцності при стисненні для складів із вмістом волокон, що дорівнює 7 %, порівняно з контрольними складами становить 25 %, а порівняно зі зразками з використанням вихідного волокна без термообробки – 11 %.

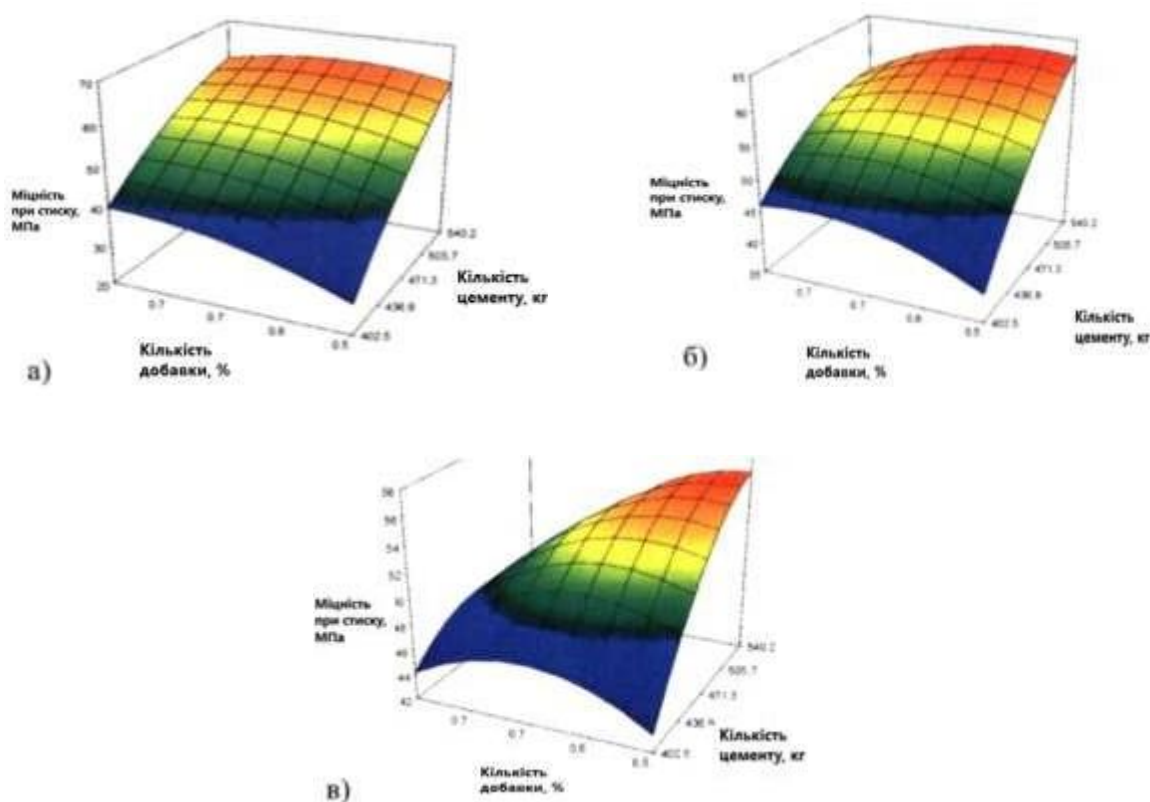


Рис. 2. Зміна межі міцності при стисненні мікроармованого дрібнозернистого цементобетону залежно від кількості волокна: а – 5 %; б – 7 %; в – 9 %

Зазначено особливості залежності міцності при вигині від кількості цементу, добавки і базальтового волокна (рис. 3). Так, максимальна міцність спостерігається на складах з використанням 7 % волокна і 0,8 % пластифікатора. Помітно зростає міцність порівняно з контрольними складами в 1,5 раза, а приріст міцності при порівнянні зі зразками з використанням

вихідного волокна без термообробки становить 9 %. При цьому так само слід урахувувати встановлену високу лугостійкість термообробленого базальтового волокна під час розрахунку довговічних конструкцій дрібнозернистого цементобетону, тоді як вихідне волокно матиме значний ступінь розчинення в процесі експлуатації.

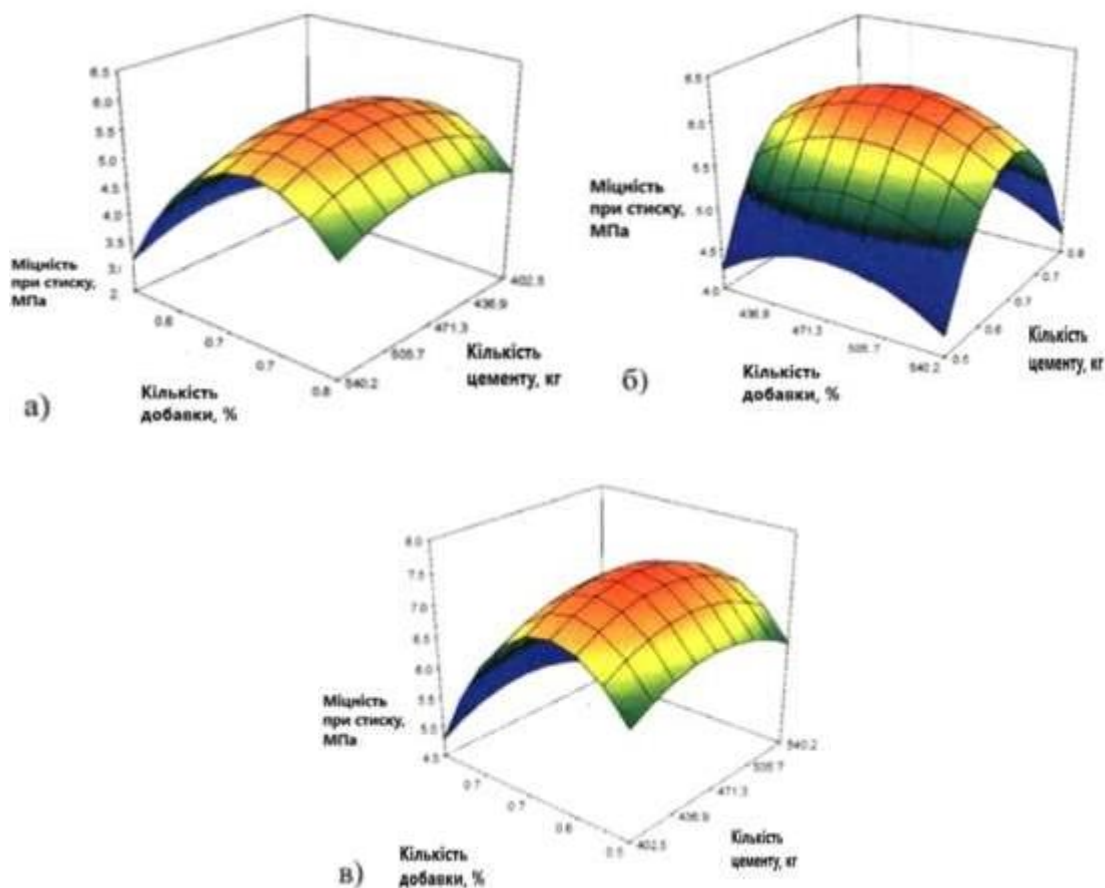


Рис. 3. Зміна межі міцності при вигині мікроармованого дрібнозернистого цементобетону залежно від кількості волокна: а – 5 %; б – 7 %; в – 9 %

Для всіх складів рекомендується використовувати вміст цементу  $480 \text{ кг/м}^3$ . У цьому разі матеріали, що розробляються, характеризуються необхідною міцністю під час стиснення і вигину без перевитрат сполучного компонента.

Аналіз результатів досліджень дав змогу запропонувати склади дрібнозернистого цементобетону з використанням

базальтового волокна як мікроармувальної добавки для транспортного будівництва (таблиця). Матеріали, отримані на основі цих складів формувальних сумішей, характеризуються високою якістю і техніко-експлуатаційними характеристиками, які багато в чому перевершують матеріали без волокна.

Склад і властивості дрібнозернистого цементобетону

Номер складу	Витрати матеріалів, кг/м <sup>3</sup>		Кількість добавки, %	В/Ц	Кількість мікроармувального компонента, %	Межа міцності при стисненні, МПа	Межа міцності при вигині, МПа	Клас бетону за міцністю на стиснення	Клас бетону за міцністю на вигин	Клас морозостійкості бетону
	цемент	пісок								
1	402	847	0,8	0,42	7	47,5	5,10	B35	Btb4,0	F300
2	480	847	0,8	0,4	7	56,3	6,4	B40	Btb4,4	F300
3	402	847	-	0,49	-	42,2	3,8	B30	Btb 3,2	F300
4	480	847	-	0,47	-	45,8	4,4	B35	Btb 3,6	F300

Корозійна стійкість і велика активність модифікованого базальтового волокна роблять його найважливішим структуроутворювальним компонентом одержуваного мікроармованого цементобетону. Більша кількість кислотних брестедівських активних центрів на поверхні термообробленого волокна порівняно з необробленим сприяє кращій адгезії продуктів гідратації цементу до введеної анізотропної добавки (рис. 4, в, г). Водночас на поверхні вихідної фібри виразно проявляється хвиляста структура, яка є наслідком протікання корозійних процесів (рис. 4, б). Висока адгезія продуктів гідратації цементу до модифікованого волокна у великій кількості точок контакту цементного каменю та армувального компонента пояснює значне підвищення міцності на вигин (на 12 %) і стиснення (на 50 %) порівняно з необробленою фіброю.

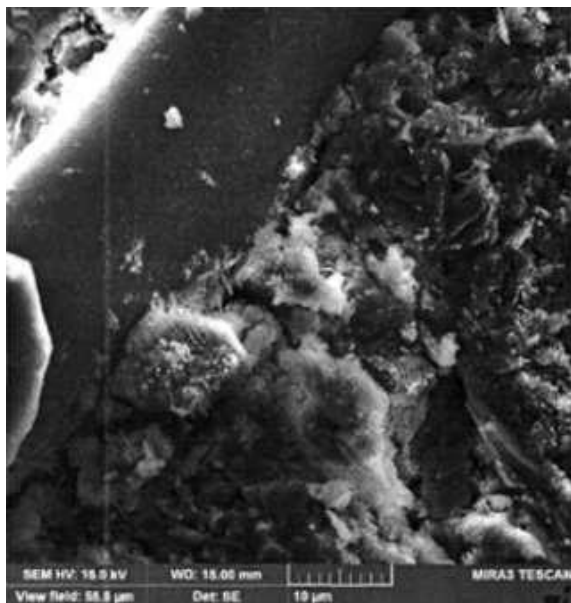
У матриці затверділого цементного каменю основну масу становлять рентгеноаморфні гідросилікати кальцію різного розміру від 100 нм до 1 мкм (рис. 5). Більшість із них зрослися в

агрегати, що дає змогу формувати доволі однорідну, монолітну і міцну структуру цементного каменю завдяки кристалізаційним контактам між окремими нанокристалітами гідросилікатів кальцію та іншими кристалогідратами системи. Зазначена обставина має позитивний вплив на характеристики міцності цементного композита.

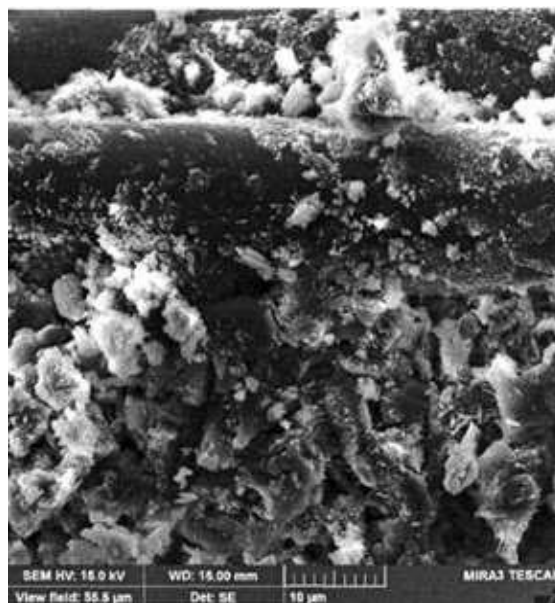
Отже, на підставі аналізу мікро-структурних особливостей фібробетону з армувальним базальтовим мікрОВОЛОКНОМ можна говорити про те, що модифіковане (термічно оброблене за температури 500 °С) волокно в цементній матриці виконує покладену на нього функцію завдяки зміні властивостей його поверхні. Волокно виступає як підкладка для активної кристалізації продуктів гідратації клінкерних мінералів, що сприяє підвищенню адгезії продуктів гідратації в'язучого до фібри. Це відбувається за рахунок підвищеної лугостійкості порівняно з необробленими волокнами, а отже, його стабільності та міцності в умовах агресивного середовища цементного тіста, а також за рахунок

відносно більшої активності. Зазначені обставини, вочевидь, і є основними причинами підвищення міцності на вигин

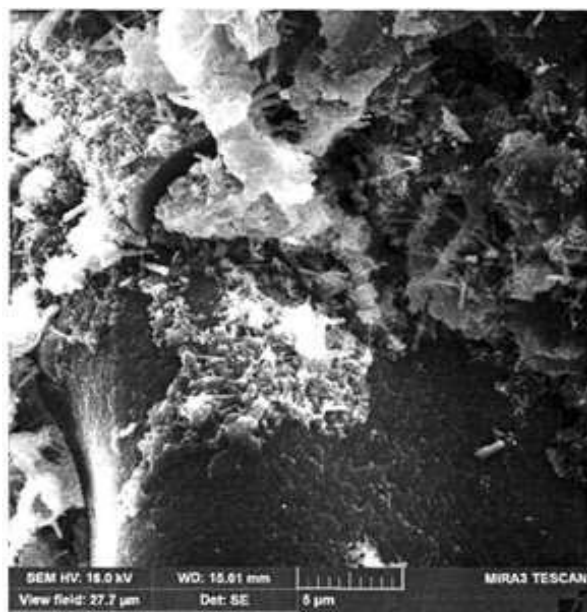
композитних матеріалів (бетонів) з використанням цементних систем.



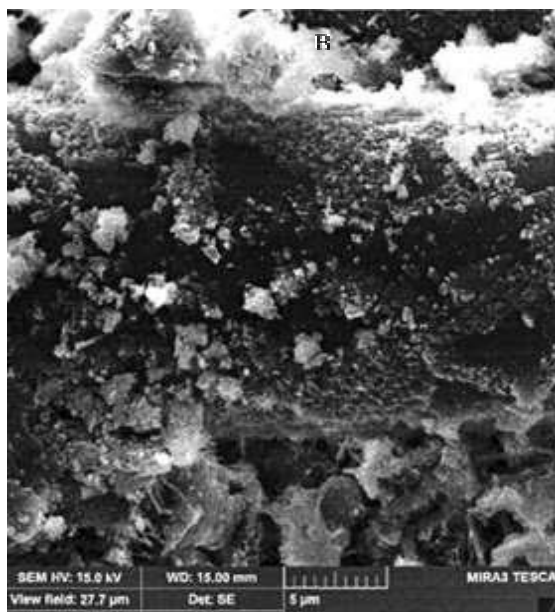
*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 4. Контактна зона між новоутвореннями і базальтовою мікрофіброю в структурі фібробетону у віці 28 діб:  
а, б – вихідне волокно; в, г – модифіковане волокно



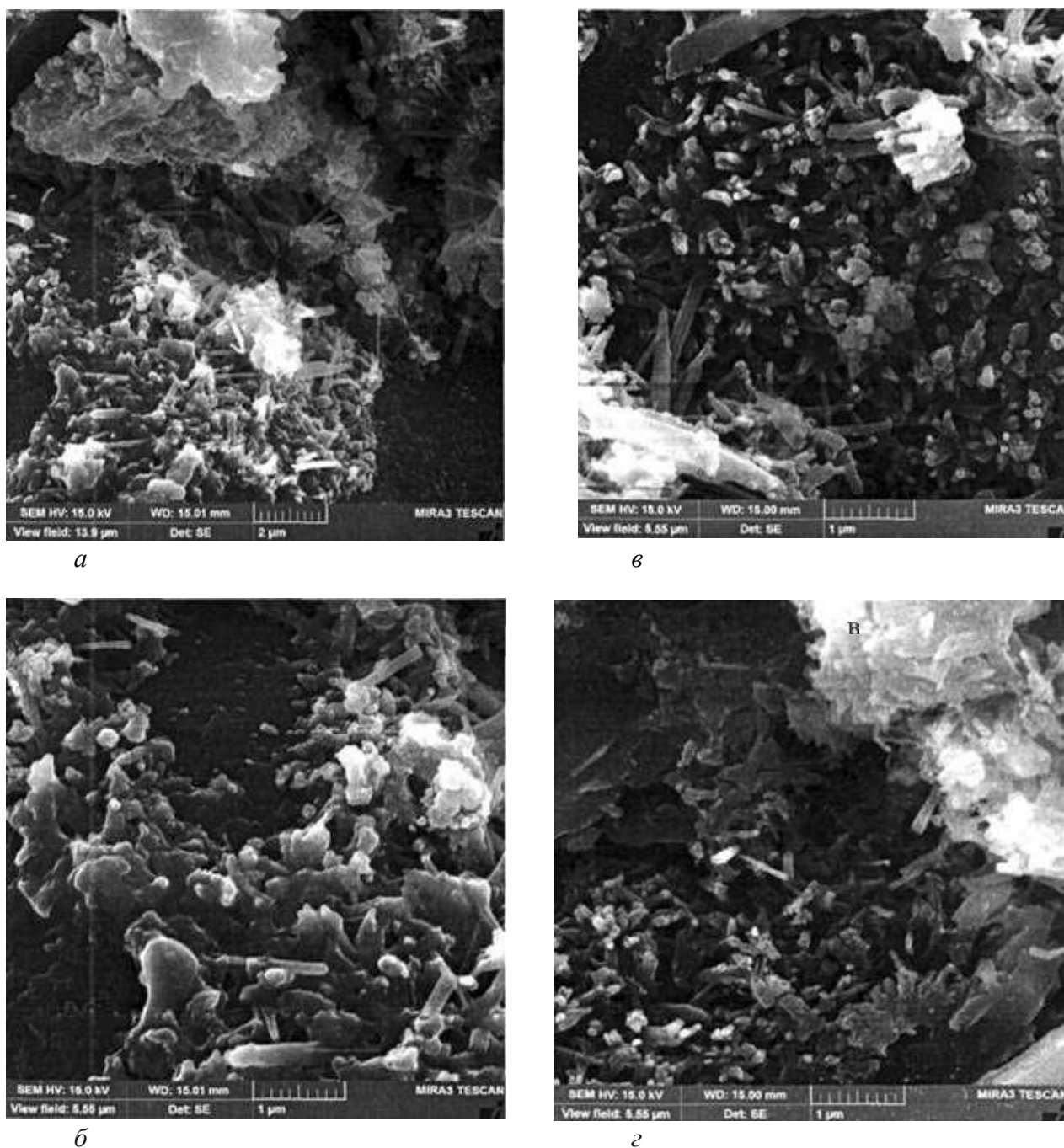


Рис. 5. Морфологія новоутворень у структурі фібробетону на основі волокна:  
*а, б* – необробленого; *в, г* – обробленого за температури 500 °С

### Висновки

1. Виявлено характер залежності властивостей цементобетону від способу введення термообробленого волокна та виду пластифікатора. Найефективнішим є попереднє розпушення волокна у воді

замішування в присутності нафталін-формальдегідного суперпластифікатора з подальшим введенням суспензії до формувальної суміші. Адсорбція пластифікатора на поверхні фібри призводить до гідрофілізації її поверхні, що

сприяє рівномірному розподілу волокна за об'ємом суміші і, як наслідок, підвищенню міцності бетону. Використання нафталін-формальдегідної добавки СП-1 дає змогу збільшити міцність під час стиснення на 10 % і вигину на 21 % порівняно зі складами на основі полікарбосилатного пластифікатора Sika Visco Créte.

2. Розроблено склади дрібнозернистого бетону з використанням термообробленого базальтового волокна, що дають змогу одержувати матеріали з класом В25...В60 за міцністю під час стиснення; В<sub>тб</sub>2,8...В<sub>тб</sub>6,0 за міцністю під час вигину; морозостійкістю не менше F300.

3. Аналіз мікроструктурних особливостей фібробетону з армувальним базальтовим мікрволокном свідчить про те, що модифіковане (термічно оброблене

за температури 500 °С) волокно в цементній матриці виконує покладену на нього функцію завдяки зміні властивостей його поверхні. Волокно є підкладкою для активної кристалізації продуктів гідратації клінкерних мінералів, що сприяє підвищенню адгезії продуктів гідратації в'язучого до фібри. Це відбувається за рахунок підвищеної лугостійкості порівняно з необробленим волокном, а отже, його стабільності та міцності в умовах агресивного середовища цементного тіста, а також за рахунок відносно більшої активності. Зазначені обставини, вочевидь, і є основними причинами підвищення міцності на вигин композитних матеріалів (бетонів) з використанням досліджуваних цементних систем.

#### Список використаних джерел

1. Ary Subagia D. G., Kim Y., Tijing L. D., Kim C. S., Shon H. K. Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers, *Composites Part B: Engineering* 58. 2014. P. 251-258.
2. Dorigato A., Pegoretti A. Flexural and impact behaviour of carbon/basalt fibers hybrid laminates. *Journal of Composite Materials* 48. 2014. № 9. P. 1121-1130.
3. Lim J. H., Rhee K. Y., Kim H. J. and Jung D. H. Effect of stacking sequence on the flexural and fracture properties of carbon/basalt/epoxy hybrid composites. *Carbon Letters* 15. 2014. № 2. P. 125-128.
4. Khamees S. S., Kadhun M. M., Nameer A. A. Effects of Steel Fibers Geometry on the Mechanical Properties of SIFCON Concrete. *Civ. Eng. J.* 2020. 6. P. 21-33.
5. Ganesh A. C., Sowmiya K., Muthukannan M. Investigation on the effect of steel fibers in geopolymer concrete. *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.* 2020. 872. 012156.
6. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016. Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 35 с.
7. СОУ 42.1-37641918-091:2013. Будівельні матеріали. Бетони дорожні, армовані базальтовою фіброю. Загальні технічні вимоги. Київ, 2013. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=53110](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=53110).
8. prEN 14889-1:2006. Fibres for concrete. Steel fibres. Definitions, specifications and conformity. PB 29.09.2006. 30 p.
9. prEN 14889-2:2006. Fibres for concrete. Polymer fibres. Definitions, specifications and conformity. PB 27.12.2006. 30 p.
10. Дорошенко О. Ю. Обґрунтування можливості використання базальтового волокна як компонента цементобетону для транспортного будівництва. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2021. Вип. 198. С. 22-29.

11. Дорошенко О. Ю. Розробка принципів модифікації базальтового волокна з метою підвищення його ефективності. *Транспортні системи і технології*. 2022. № 40. С. 14-22.

---

---

Дорошенко Олександра Юріївна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра залізничної колії та колійного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій. ORCID iD: 0000-0002-6724-0709. Тел.: (067)758-57-33. E-mail: sane4kador@gmail.com.

Doroshenko Aleksandra, PhD (Tech). Associate Professor, department of railway track and track economy State University of Infrastructure and Technology. ORCID iD: 0000-0002-6724-0709. Tel.: (067)758-57-33. E-mail: sane4kador@gmail.com.

Статтю прийнято 25.11.2023 р.