

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 666.972.16

БАЗАЛЬТОВЕ ВОЛОКНО ЯК КОМПОНЕНТ ЦЕМЕНТОБЕТОНУ

Канд. техн. наук О. Ю. Дорошенко

BASALT FIBER AS A COMPONENT OF CEMENT CONCRETE

PhD (Tech.) A. Doroshenko

Анотація. У статті розглянуто експериментально-теоретичне обґрунтування використання базальтового волокна, як перспективного матеріалу, за допомогою якого можливо отримати новий клас будівельних матеріалів. Наведено аналіз основних волокон, використовуваних тепер при отриманні будівельних матеріалів як мікроармуючого компонента. Виконано порівняльний аналіз волокон за сукупністю показників: геометрії, хімічного складу, фізико-механічних характеристик.

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

Abstract. In the article we consider. The analysis of the main fibers currently used in the production of building materials as a microreinforcing component is presented. A comparative analysis of fibers on a set of indicators: geometry, chemical composition, physical and mechanical characteristics.

Recently, there has been a steady trend towards finding ways to reduce the cost of road construction caused by higher prices for materials and energy. That is why modern road construction conditions dictate the widespread use of industrial waste - slag, burnt shale dumps of coal mines, fly ash, as well as virtually inexhaustible resources - chalk deposits and igneous rocks (basalts).

Properties of basalt fibers open wide prospects for their use for reinforcement of concrete structures in the construction of bridges, tunnels, dams, floor structures, runways and other structures, where exposure to moisture, salt solutions and alkaline concrete media leads to corrosion of metal reinforcement.

Based on the properties, basalt fibers have an extremely broad prospect of application in various industries and construction: as structural building elements: bridges, tunnels, railway sleepers and subways; as facing materials: facing mixes and reinforcing grids; as reinforcing materials: in the production of cement and asphalt pavements, building blocks and foam concrete materials; as a reinforcing material for the construction of dams, materials for land irrigation and other hydraulic structures.

Thus, basalt fiber is a promising material with which it is possible to obtain a new class of building materials

Analysis of the main fibers currently used in the production of building materials as a microreinforcing component, according to a number of variable criteria, allowed to identify basalt fiber as the most rational in terms of its use in obtaining fine-grained microreinforced cement, including for road construction. The comparative analysis of fibers of 4 manufacturers on set of

indicators: geometry, chemical composition, physical and mechanical characteristics, allowed to allocate fibers of LLC Armbud which most corresponds to the shown requirements.

It is established that the basalt fiber in the process of keeping in an aggressive and alkaline environment with a pH corresponding to the hydration of cement stone, is subject to significant dissolution. After 28 days of exposure in an alkali solution, the weight loss is about 30%. Prolonged storage of fiber (72 days) in solution leads to weight loss of up to 59%. It becomes obvious the need to develop a method of increasing the alkali resistance of basalt fiber to increase its durability.

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

Вступ. Нині загальна протяжність цементобетонних доріг у світі становить понад 40 %, тоді як в Україні більш ніж 95 % доріг з асфальтобетонним покриттям. Необхідно враховувати, що, на думку експертів, світові запаси нафти будуть виснажені через 30 років. При цьому обсяги виробництва цементу щорічно зростають. Причиною, що стримує упровадження цементобетону для покриття доріг, є його невисока міцність при вигині. Одним з рішень зазначеної проблеми є використання армуючих компонентів, зокрема неметалевої фібри, наприклад базальтового волокна. Однак базальтове волокно характеризується низькою лугостійкістю, зокрема й щодо цементного каменю. Підвищення ефективності базальтової фібри можливе завдяки її модифікації. Використання модифікованої фібри при виробництві дорожнього дрібнозернистого цементобетону дасть змогу отримувати матеріали з необхідними техніко-експлуатаційними характеристиками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні десятиліття проблема передчасного руйнування на нежорстких покриттях автомобільних доріг виходить на перший план серед усіх інших проблем дорожньо-будівельної галузі. Внаслідок різних деформацій, викликаних демпфіруючими навантаженнями, відбувається передчасне руйнування конструкцій, що призводить до необхідності більш частої заміни покриття на автомобільних дорогах, а також до збільшення вартості автомобільних перевезень через низький рівень споживчих характеристик. Таким

чином, знижується рівень безпеки руху на автомобільних дорогах, а також завдається значної шкоди економіці країни.

Дослідження в галузі дорожнього бетону, які спрямовані на вивчення міцнісних показників цементобетону залежно від міцності портландцементу різних заводів, було розпочато в 1930 р. [1] в Ленінградському інституті шляхів сполучення.

У рамках розвитку технологічної теорії дорожнього бетону вчені встановили, що макроструктура бетону характеризується коефіцієнтом розсунення. Крупний заповнювач (щебінь), істотно впливає на повітреутримуючу здатність і седиментаційну стійкість бетонних сумішей із залученим повітрям на основі комплексних хімічних домішок, на порову структуру, міцність і морозостійкість бетону. Було виявлено особливості глибинного віброуцільнення бетонних сумішей із залученим повітрям і встановлено загальні залежності, що зв'язують параметри глибинного вібрування з характером порової структури бетону і його властивостями.

Широке впровадження будівництва цементобетонних покриттів слід віднести до 1951 р., коли почався серійний випуск спеціалізованих машин, що дали змогу здійснити комплексну механізацію улаштування цементобетонних покриттів [2–4].

Останнім часом характерна стійка тенденція до пошуків шляхів зменшення вартості дорожнього будівництва, спричинена подорожчанням матеріалів та енергії. Саме тому сучасні умови дорожнього будівництва диктують широке

використання відходів промисловості (шлаки, горілі сланці відвалів кам'яновугільних шахт, золи уносу), а також практично невичерпних ресурсів (крейдянні поклади і магматичні породи (базальти)).

Виникнення колії на дорогах з нежорсткими покриттями призводить до зниження ефективності використання фінансових ресурсів, спрямованих у дорожню галузь, оскільки з'являється необхідність проводити ремонт покриття автомобільної дороги набагато частіше, ніж це передбачено нормативними документами.

На автомобільних дорогах з жорстким дорожнім одягом прояв такого дефекту покриття, як колійність, неможлива у зв'язку з великим модулем пружності, але цементобетонні покриття мають ряд недоліків – лушення, наявність дрібної сітки тріщин, що призводить до виникнення як поздовжніх, так і поперечних тріщин.

Перші дослідження можливостей виробництва базальтових волокон було розпочато на початку 60-х рр. [5], коли було виготовлено перші зразки базальтового волокна. Потім було проведено тривалі дослідження характеристик базальтових волокон та матеріалів, розроблених на їх основі.

Властивості базальтових волокон відкривають широкі перспективи їх застосування для армування бетонних конструкцій при будівництві мостів, тунелів, гребель, конструкцій перекриттів, злітно-посадкових смуг та інших конструкцій, де вплив вологи, розчинів солей та лужних бетонних середовищ призводить до корозії металевої арматури [4–7].

Зважаючи на властивості, базальтові волокна мають надзвичайно широку перспективу застосування в різних галузях промисловості і будівництва [8–10]:

- як конструктивні будівельні елементи: мости, тунелі, шпали залізниць і метро;
- як облицювальні матеріали: облицювальні суміші та армуючі сітки;
- як армуючі матеріали: при виробництві цементобетонних і асфальто-

бетонних покриттів доріг, будівельних блоків та пінобетонних матеріалів;

- як армуючий матеріал для будівництва гребель, матеріали для іригації земель та інших гідротехнічних споруд.

Таким чином, базальтове волокно є перспективним матеріалом, за допомогою якого можливо отримати новий клас будівельних матеріалів.

Визначення мети та завдання дослідження. Розроблення ефективного дрібнозернистого цементобетону з використанням базальтового волокна як мікроармуючого компонента для дорожнього будівництва.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- аналіз основних волокон, використуваних тепер при отриманні будівельних матеріалів як мікроармуючого компонента;
- порівняльний аналіз волокон за сукупністю показників: геометрії, хімічного складу, фізико-механічних характеристик

Основна частина дослідження. Отримання ефективних будівельних матеріалів і виробів, до яких сьогодні ставляться все більш високі вимоги, може бути досягнуто застосуванням технологій, які використовують композиційні матеріали. Одним з перспективних конструкційних матеріалів є мікроармовані бетони. У таких матеріалах сполучаються матриця, що має високу міцність на стиск, і волокно, що характеризується значним опором розриву і високим модулем пружності.

Вивчення вихідних характеристик різних видів волокон дасть змогу підібрати найбільш ефективні компоненти для мікроармування дрібнозернистих цементобетонів з точки зору співвідношення міцнісних характеристик і низької вартості запроєктованого конструкційного матеріалу.

З метою вибору компонента для мікроармування цементобетону було проаналізовано техніко-експлуатаційні показники основних видів волокон, які

використовуються тепер у будівельній галузі (табл. 1). Це дало змогу ранжувати існуючі армуючі волокна за ефективністю їх

використання для отримання мікроармованих дрібнозернистих бетонів із заданими характеристиками.

Таблиця 1

Властивості різних видів волокон

Вид волокон	Щільність, кг/см ³	Міцність на розтяг, МПа	Модуль пружності, МПа	Подовження при розриві, %
Поліпропіленові	900	400...800	3500...8000	8...25
Поліетиленові	950	700	1400...3200	10
Нейлонові	1 100	770...900	4000	14...19
Акрилові	1200	210...420	2100	25...45
Поліефірні	1400	730...780	8400	11...13
Целюлозні	1200	300...500	10000	0,5...4
Азбестові	2600	1200...3100	160000	0,5...1
Скляні	2600	1050...3850	7000...8000	1,5...3,5
Сталеві	7800	600...3150	200000	2...4
Вуглецеві	2000	2000	245000	1
Карбонові	1630	7800	380000	2,1
Поліамідні	900	720	1900	24
Віскозні	1200	660	5600	14
Базальтові	2700	1 600...3600	7000...11000	1,4...3,6

Як видно з табл. 1, базальтове волокно за багатьма характеристиками перевершує інші фібри. Зокрема, базальтове волокно за міцністю перевершує сталь. При цьому відносно подовження при розриві базальтової фібри нижче, ніж сталевій. Крім того, базальтове волокно характеризується хімічною спорідненістю з цементним каменем. Усе це в сукупності дає змогу цій фібри більш ефективно перешкоджати утворенню мікротріщин у бетоні при його навантаженні.

Аналіз характеристик волокон, наведених у табл. 1, дає змогу зробити висновок про перспективність використання базальтового волокна як армуючого компонента під час проектування будівельних композитів.

Для відбору базальтового волокна, найбільш придатного для армування цементної матриці, з огляду на широту

географії застосування волокна в будівельній галузі та постійно зростаючі обсяги будівництва доріг на території України, проаналізовано волокна найбільших виробників базальтової фібри.

Зважаючи на безліч вихідних властивостей, для більш точного вибору базальтового волокна було проаналізовано сировинний склад, співвідношення геометричних характеристик (довжини і діаметра) фібри, а також способи його виробництва (табл. 2).

Одним з важливих вихідних показників волокна є його склад. Для підвищення адгезії до цементного каменю необхідно, щоб волокно характеризувалося силікатним складом, оскільки бетон має лужне середовище.

Елементний склад базальтового волокна (табл. 3) різних виробників характеризується незначними варіаціями елементів.

Таблиця 2

Властивості базальтових волокон різних виробників

Компанія	Технологія	Сировина	Діаметр, мкм
Технобазальт – Івест ТОВ	Відцентрове диспергування	Базальт (SiO ₂ – 53 %)	13...20
Завод будівельних матеріалів та базальтових виробів, ТОВ	Роздув розплаву вертикальним струменем повітря	Підшихтовий базальт (SiO ₂ – 49 %)	3...5
BASALT FIBER & COMPOSITE MATERIALS, ТОВ	Дуплекс процес	Базальт (SiO ₂ – 53 %)	1...3
Армбуд, ТОВ	Відцентрове диспергування	Базальт (SiO ₂ – 52 %)	1...3

Таблиця 3

Склад базальтового волокна

Компонент	Технобазальт – Івест ТОВ	Завод будівельних матеріалів та базальтових виробів, ТОВ	BASALT FIBER & COMPOSITE MATERIALS, ТОВ	Армбуд, ТОВ
	Волокно № 1	Волокно № 2	Волокно № 3	Волокно № 4
1	2	3	4	5
Na	1,87	3,6	2,3	1,62
Mg	3,07	1,8	1,8	2,52
Al	5,331	6,4	6,9	5,41
Si	19,43	18,4	19,2	18,03
P	0	0,2	0,2	0,23
K	0,33	0,6	0,5	0,59
l	2	3	4	5
Ca	3, i	3,2	2,9	3,23
Ti	0,69	0,5	0,5	0,44
Mn	0	0,1	0	0
Fe	3,64	4,2	3,5	7,05
O	62,19	61	62,2	60,75
S	0,46	0	0	0,03

Про стійкість базальтових волокон в агресивних середовищах можна судити за хімічним складом сировини, з якого воно витягнуто. Наприклад, лугостійкість підвищується при введенні до їх складу ущільнюючих структуру оксидів – цирконію, алюмінію, заліза, олова та ін. На стійкість волокон істотно впливає також технологія і спосіб виробництва.

Усе це в сукупності може визначати можливі субмікронні неоднорідності, пов'язані з різним вмістом Fe⁺² / Fe⁺³ у волокні, що, на думку ряду дослідників [11, 12], визначає можливі субмікронні неоднорідності, пов'язані з наявністю заліза поза кремній-кисневою сіткою, що у свою чергу робить волокна нестійкими до окислення, а

також може призвести до кристалізації при підвищених температурах.

Як було зазначено раніше, при проектуванні мікроармованих матеріалів мають значення також геометричні характеристики волокна. За літературними даними відомо, що для досягнення оптимального пластично-агрегатного стану мікроармуючого компонента в суміші слід відбирати вихідні компоненти з оптимальним співвідношенням довжини до діаметра більше 10 [13–15]. Фібра виробництва ТОВ

Армбуд характеризується необхідним співвідношенням геометричних характеристик.

Як агресивне середовище використовувалося цементне молочко, що характеризується достатньо лужним середовищем ($pH = 12,9$). У зазначений розчин вводили розпушене волокно (рис. 1). Концентрацію базальтового волокна в розчині вибирали з урахуванням граничного вмісту фібри в цементних композитах (3...12 % від маси в'язучого), встановленого на підставі літературних даних. Концентрація становила 7 %.

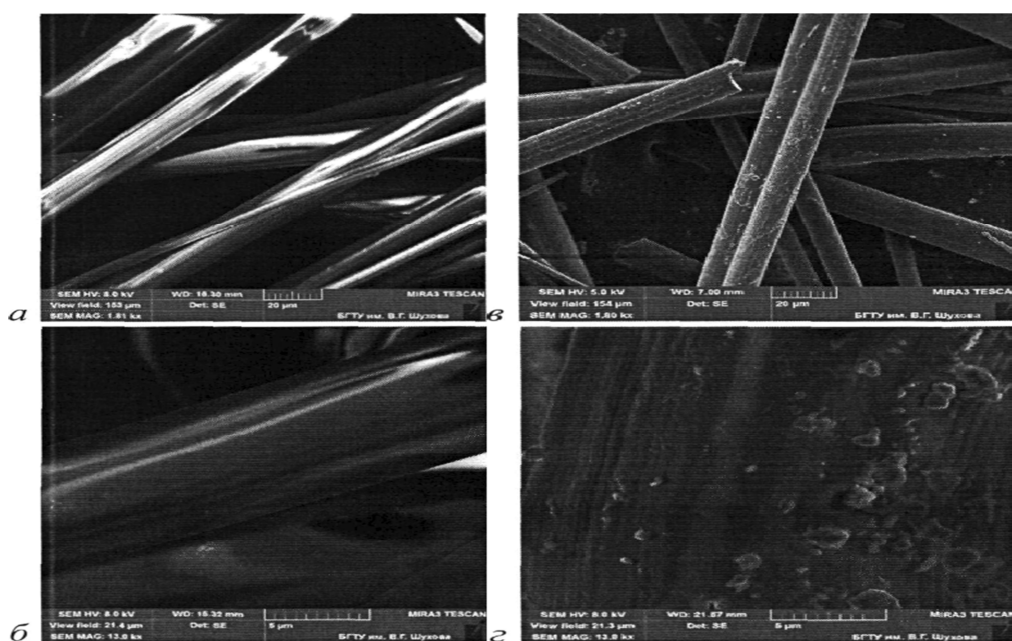


Рис. 1. Мікроструктура базальтового волокна:

а, б – в початковому стані; в, г – витримане в лужному середовищі протягом 28 діб

Зразки піддали витримці при кімнатній температурі протягом 7, 14, 28, 72 діб. Після закінчення терміну витримки для видалення залишків цементної складової волокна промивали слабким розчином соляної кислоти (0,1 %) через фільтрувальний папір. Для видалення сторонніх домішок надалі зразок промивали 1 л дистильованої води. Далі базальтове волокно просушували при кімнатній температурі. Розчинність волокна визначали за різницею мас до

експерименту та після, як сухий залишок у результаті витримки в лужному середовищі. Втрату маси виражали у відсотках (табл. 4). Можливі втрати волокна при промиванні (технологічні втрати), прийняті порівнянними для кожного експерименту.

У процесі спостереження на сьому добу на поверхні волокон виявилось незначне випадання білого осаду, ймовірно, пов'язане з кристалізацією CaO на ороговілій поверхні базальту.

У період з 14-ї до 28-ї доби в результаті стоншення більш дрібних ворсинок волокна загальна маса базальтового волокна поступово розсипалася з повільним осадженням дрібних частинок волокна (до 20 %). На 28-му добу кількість білого осаду

зросла і покривала собою все більше волокон. При огляді зразка на 72-гу добу виявлено зміну кольору поверхні волокна від слабо освітленого для малих ворсинок та до сірого для більших волокон.

Таблиця 4

Результати дослідження лужної стійкості базальтового волокна

№ з/п	Час випробування, доб	Маса волокна до експерименту, г	pH вихідне	Маса після витримки, г	Втрати маси, %	pH після експерименту	Колір
1	7	4,9	11,9	4,2	14,3	11,9	Нормальний
2	14	5,2	11,9	3,6	30,7	11,5	Нормальний
3	28	5,0	11,9	3,4	32,0	11,4	Слабо освітлений
4	72	5,1	11,9	2,1	58,8	11,3	Освітлений

Установлено, що зміна pH цементного розчину істотно залежить від часу перебування в ньому зразків волокна. Так, на 7-му добу приріст pH не було зафіксовано, на 14-ту – відзначено зменшення на 2 % і в період з 28-ї до 72-ї доби досяг зменшення на 4,3 % щодо вихідного.

Після 28 діб витримки в розчині втрата маси становить близько 32 %. Тривале зберігання фібри (72 доби) в розчині призводить до втрати маси до 59 %.

Викладені факти узгоджуються з результатами мікроструктурних досліджень базальтових волокон (рис. 1). Спостерігається значне вилугування вихідних алюмосилікатних матеріалів після витримання протягом 28 діб у лужному середовищі цементного молочка. Це сприяє появі на поверхні характерних слідів корозії (рис. 1, в, г), що негативно позначається на армуючій функції анізотропного компонента цементної матриці.

При експлуатації базальтової фібри в реальних умовах у бетоні ступінь розчинення волокна не буде настільки значною, оскільки процеси розчинення будуть затухати в міру тужавлення і твердіння цементного каменю. Проте не можна недооцінювати хімічні процеси, що

протікають у бетоні в період його експлуатації, у яких бере участь волокно. У зв'язку з цим необхідне розроблення способу модифікації волокна для підвищення його стійкості в агресивному лужному середовищі.

Висновки

1. Аналіз основних волокон, використовуваних тепер при отриманні будівельних матеріалів як мікроармуючого компонента, за рядом варіативних критеріїв дав змогу виділити базальтове волокно як найбільш раціональне з точки зору його використання при отриманні дрібнозернистих мікроармованих цементобетонів, зокрема для дорожнього будівництва. Порівняльний аналіз волокон чотирьох виробників за сукупністю показників: геометрії, хімічного складу, фізико-механічних характеристик, дав змогу виділити волокна ТОВ Армбуд, яке найбільше відповідає вимогам, що висуваються.

2. Установлено, що базальтове волокно в процесі витримання в агресивному і лужному середовищі з pH, відповідним гідратації цементного каменю, піддається істотному розчиненню. Водночас через 28 діб витримки в розчині луку втрата маси становить близько 30 %.

Тривале зберігання фібри (72 доби) в розчині призводить до втрати маси до 59 %. Стає очевидним необхідність розроблення

способу підвищення лугостійкості базальтового волокна для збільшення його довговічності.

Список використаних джерел

1. Ключев С. В. Высокопрочный фибробетон для промышленного и гражданского строительства. *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 8. С.61–68.
2. Ray B. C. A review on mechanical behavior of FRP composites at different loading speeds. *Critical reviews in solid state and materials sciences*. 2015. Vol. 40. P. 119–135.
3. Hornbostel K., Larsen C. K., Geiker M. R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate a literature review. *Cement and Concrete Composites*. 2013. Vol. 39. P. 60–72.
4. Дорошенко О. Ю., Дорошенко Ю. М. Дисперсно-армований бетон – надійний та ефективний матеріал для транспортного будівництва (продовження). *Транспортное строительство Украины*. 2011. № 5. С. 16–20.
5. Bentz D. P., Snyder K. A., Ahmed A. Anticipating the setting time of high-volume fly ash concretes using electrical measurements: feasibility studies using pastes. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 27. 2015.
6. Ren W. Dynamic compressive behavior of basalt fiber reinforced concrete after exposure to elevated temperatures. *Fire and materials*. 2015.
7. Lim Y.-C., Noguchi T., Cho C.-G. A quantitative analysis of the geometric effects of reinforcement in concrete resistivity measurement above reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 83. P. 189–193.
8. Свойства базальтового волокна и его применение в строительстве. *Строительные конструкции и материалы*. Москва, 2012. Вып. № 1. С. 14–17.
9. Химические процессы при термообработке базальтового волокна / А. В. Кнотько, А. В. Гаршев, И. Е. Давыдова и др. *Коррозия: материалы, защита*. 2017. N 3. С. 37–42.
10. Sonoda Y. Elastic Plastic Impact Response of Beam Element Subjected to Low Velocity Impact Load using SPH Method. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*. 2012. Vol. 68. P. 373–381.
11. Третьяков Ю. Д. Разработка химических методов повышения гидролитической и термической коррозионной стойкости базальтовых стекол. Отчет отделения химии и наук о материалах РАН. Москва, 2011.
12. Vishal Pandurang Kumbhar Basalt Rock Fibers–New Construction Material. *Acta Engineering International*. 2014. №2 (1). P. 11–18.
13. Gupta R., Biparva A. Innovative test technique to evaluate ‘self-sealing’ of concrete. *Journal of Testing and Evaluation*. 2015. Vol. 43. P. 1091–1098.
14. Brühwiler E. «Structural UHPFRC» to enhance bridges. *2-nd International Conference on UHPC Materials and Structures (UHPC 2018 – China)*. Fuzhou, China, 2018. P. 140–158.
15. Cihan M. T. Response surfaces for compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*. 2013. № 40. P. 763–774.

Дорошенко Олександра Юріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри залізничної колії та колійного господарства Державного університету 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 29.09.2021 р.