

ЦЕМЕНТНІ РОЗЧИНИ МОДИФІКОВАНІ ДИСКРЕТНИМИ ВОЛОКНАМИ

CEMENT MORTARS MODIFIED WITH DISCRETE FIBERS

Гришко Г. М., к. т. н., доцент, ORCID ID: 0009-0002-3872-6555, Смолін Д.О., аспірант, ORCID ID: 0009-0007-0586-1861, Савін Ю.Л., к. т. н., доц., ORCID ID: 0000-0002-3259-4451, Димківська А.Д., студ., ORCID ID: 0009-0005-6611-8743, Журба І.А., студент, ORCID ID: 0009-0003-4752-6384, Дрозд А.А., к. т. н., ORCID ID: 0000-0001-7588-5569, (Український державний університет науки і технологій, Навчально-науковий інститут «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», м. Дніпро)

Hryshko Hanna, Ph.D., Associate Professor, ORCID: 0009-0002-3872-6555, Smolin Denis, Postgrad. Stud., ORCID ID: 0009-0007-0586-1861, Savin Yurii, Ph.D., Associate Professor, ORCID: 0000-0002-3259-4451, Dymkivska Anna, Stud. ORCID ID: 0009-0005-6611-8743, Zhurba Ivan, Stud. ORCID ID: 0009-0003-4752-6384, Drozd A.A., Ph.D., ORCID ID: 0000-0001-7588-5569, (Ukrainian State University of Science and Technologies, Educational and scientific institute “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Dnipro).

Одним із сучасних напрямів підвищення експлуатаційних характеристик цементних в'язучих є їх модифікація дискретними волокнами, що забезпечує комплексне удосконалення структури матеріалу. Основна ідея полягає у введенні до складу розчину синтетичних або мінеральних волокон, які виконують функцію мікроармування та дозволяють суттєво підвищити фізико-механічні властивості готового каменю. Такі волокна сприяють зменшенню усадкових деформацій, запобігають утворенню мікротріщин на ранніх стадіях твердіння та забезпечують рівномірний розподіл напружень у тілі цементного каменю. Це дає змогу підвищити міцність на згин, тріщиностійкість і довговічність матеріалу, що особливо актуально при виконанні ремонтних та відновлювальних робіт.

Метою даного дослідження є визначення закономірностей формування структури цементного каменю, модифікованого дискретними волокнами різної природи та геометричних параметрів, а також удосконалення його фізико-механічних властивостей шляхом оптимізації складу розчину. У роботі досліджено вплив довжини, діаметра та концентрації волокон на процеси гідратації цементу, швидкість формування кристалічної структури та кінцеві показники міцності. Показано, що волокна, введені у визначеній кількості, виконують роль мікроармувальних елементів і

можуть змінювати морфологію кристалів гідратів, формуючи більш щільну та тріщиностійку структуру.

Наукова новизна полягає у встановленні кореляцій між параметрами дискретних волокон і мікроструктурними характеристиками кінцевого матеріалу, а також у створенні моделі, що описує механізм впливу волокон на структуру цементного каменю. Практична значимість полягає в можливості цілеспрямованого регулювання складу цементних розчинів для досягнення оптимального поєднання міцності, тріщиностійкості та деформаційних характеристик. Отримані результати відкривають перспективи для розробки нового покоління ремонтних і конструкційних матеріалів з підвищеною експлуатаційною надійністю, що є особливо важливим для сучасного будівництва та реконструкції об'єктів.

One of the modern approaches to improving the performance characteristics of cementitious binders is their modification with discrete fibers, which provides comprehensive improvement of the material structure. The main concept involves the introduction of synthetic or mineral fibers into the mortar, which act as micro-reinforcement and allow for a significant improvement in the physical and mechanical properties of the finished stone. Such fibers reduce shrinkage deformations, prevent the formation of microcracks at early stages of curing and ensure an even distribution of stresses within the cement stone. It gives the key to increase the material flexural toughness, crack resistance and durability, which is particularly important for repair and restoration work.

The purpose of this study is to identify the patterns of structure formation in cement stone modified with discrete fibers of various origins and geometric parameters, as well as to improve its physical and mechanical properties by optimizing the mortar composition. The study examines the influence of fiber length, diameter and concentration on the cement hydration process, the rate of crystalline structure formation and the final strength characteristics. The findings indicate that fibers introduced in specific amounts act as concrete reinforcement fibers and can change the morphology of hydrate crystals, thereby forming a denser and more anti-cracking structure.

The scientific novelty of the study lies in establishing correlations between the parameters of discrete fibers and the microstructural characteristics of the final material, as well as in developing a model that describes the mechanism by which fibers influence the structure of the cement stone. The practical relevance of the study lies in the possibility of purposefully adjusting the composition of cement mortars to achieve the optimal balance of strength, crack resistance and deformation characteristics. The results open up prospects for the development of a new generation of repair and construction materials with enhanced operational reliability, which is especially important for modern construction and the reconstruction of facilities.

Ключові слова: цементні розчини, дискретні волокна, мікроармування, гідратація цементу, тріщиностійкість, модифікація, бетон, ремонтний розчин. Cement mortars, discrete fibers, micro-reinforcement, cement hydration, crack resistance, modification, concrete, concrete repair mortar.

Вступ. Довговічність залізобетонних конструкцій у сучасних будівлях і спорудах є одним із ключових аспектів, що потребує особливої уваги. У процесі зведення та подальшої експлуатації об'єктів нерідко виникає необхідність у ремонті й відновленні залізобетонних елементів. Найчастіше йдеться про відновлення захисного шару бетону, забезпечення антикорозійного, хімічного, біологічного чи вогнезахисту, а також про підсилення несучих конструкцій. Виконання таких робіт є складним завданням, яке вимагає не лише високої кваліфікації виконавців, а й ретельного вибору технологій і матеріалів.

Необхідно орієнтуватися на застосування сучасних матеріалів і технологій, які за умови правильного підбору здатні подовжити термін служби конструкцій з 15–20 до 30–40 років. Окрім цього, важливо переглянути підходи до вибору матеріалів для ремонтно-відновлювальних робіт, на перший план висуваючи їхні якісні характеристики та довговічність.

Актуальність проведених досліджень зумовлена потребою у створенні нових сухих будівельних сумішей, модифікованих дискретними волокнами, призначених для відновлення захисного шару залізобетону та підвищення експлуатаційної надійності конструкцій.

Аналіз досліджень та публікацій. Аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що в Україні виробництво сухих будівельних сумішей, армованих дискретними волокнами, розвинене недостатньо. Це змушує використовувати імпортні аналоги, вартість яких є досить високою, що негативно впливає на конкурентоспроможність вітчизняної продукції [1–2]. Отже, дослідження та розробка нових сухих сумішей, модифікованих дискретними волокнами на основі місцевої сировини, набувають особливої актуальності.

Головними цілями армування сухих будівельних сумішей волокнами є:

- збільшення міцності при розтягуванні та згинанні;
- збільшення ударної в'язкості;
- зниження усадки при твердінні;
- підвищення морозостійкості, зносостійкості, адгезії.

Армування матеріалів дозволяє підвищити їхню стійкість до впливу температурних коливань, підвищеної вологості та корозійних процесів, а також покращити механічні характеристики. Сутність роботи армованого (композиційного) матеріалу полягає в тому, що навантаження, що виникає під дією зовнішніх і внутрішніх факторів, передається від матриці до волокон з високою міцністю, що забезпечує ефективне розподілення навантаження та зменшує робочі зусилля на саму матрицю.

Волокна сприяють підвищенню міцності композитного матеріалу та запобігають виникненню і поширенню тріщин. Залежно від їхньої довжини, просторової орієнтації в об'ємі матеріалу та концентрації, можна не лише покращити існуючі властивості матеріалу, а й отримати нові композити з підвищеними експлуатаційними характеристиками [3-7].

Постановка мети дослідження. Розробити нові сухі будівельні суміші, модифіковані дискретними волокнами.

Основний матеріал. За результатами аналізу літературних джерел як армувальний компонент у складі ремонтних сумішей було обрано базальтоне волокно. Використання цього матеріалу забезпечує просторове (тривимірне) зміцнення розчину на відміну від традиційної арматури, яка створює лише двовимірний ефект армування. Це додатково підтверджує доцільність застосування дисперсно-армованих ремонтних розчинів.

Для обґрунтування доцільності використання цього типу волокон у складі ремонтних сумішей на початковому етапі досліджень було вивчено вплив параметрів армувального компонента на властивості цементно-піщаного розчину [8–15]. Діапазон варіювання складових наведено в таблиці 1. Оскільки основним завданням є використання матеріалів вітчизняного виробництва, межі зміни довжини волокон визначалися можливостями їх постачання заводом-виробником.

Таблиця 1

Інтервал варіювання компонентів				
Фактор впливу	Од. вим.	Позн.	Нижній рівень	Верхній рівень
1	2	3	4	5
Цемент	%	X_1	24,8	25,1
Пісок	%	X_2	74,8	75,1
Волокно	%	X_3	0,1	0,4
Довжина волокна	мм	X_4	2	12

Згідно з інтервалом варіювання компонентів (табл. 1), складено матрицю планування експерименту (табл. 2).

Таблиця 2

Матриця планування експерименту

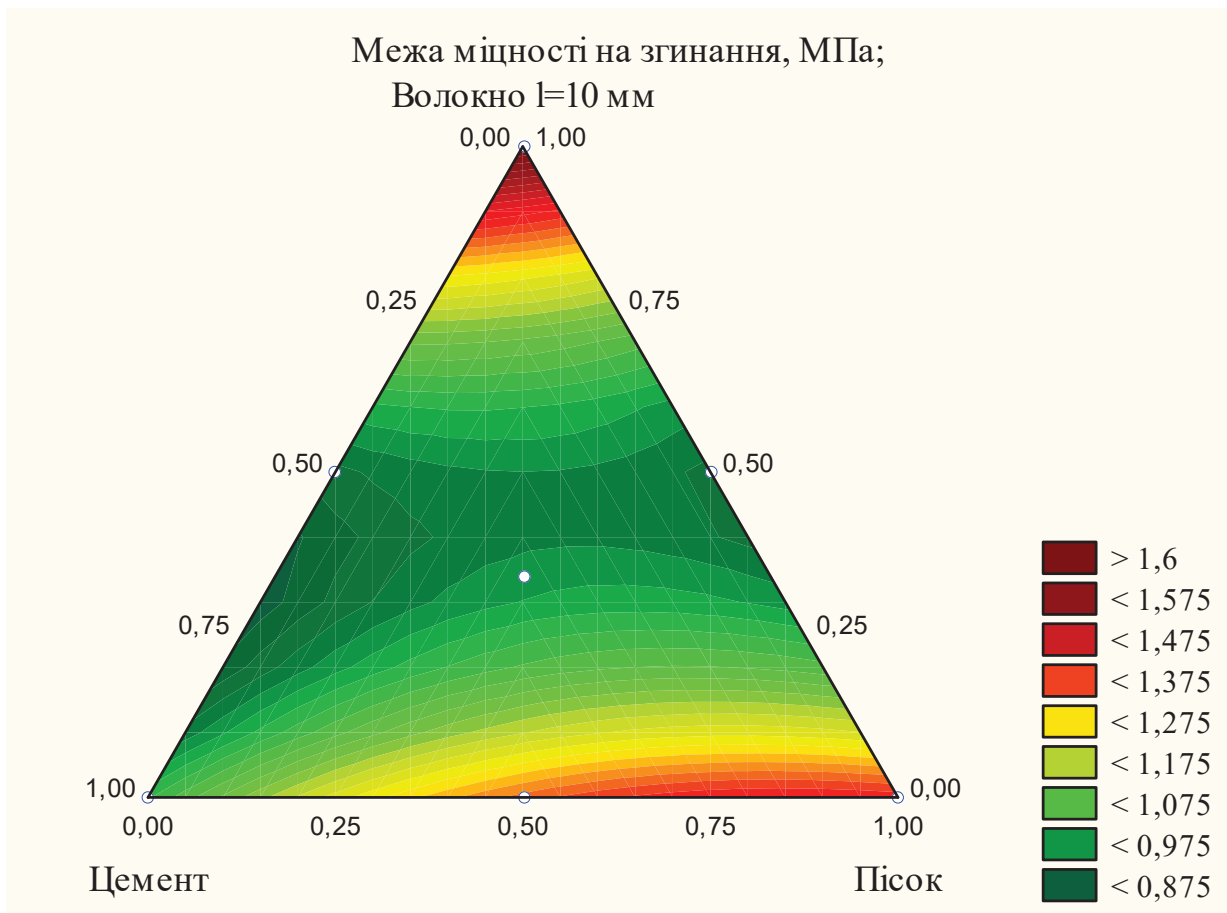
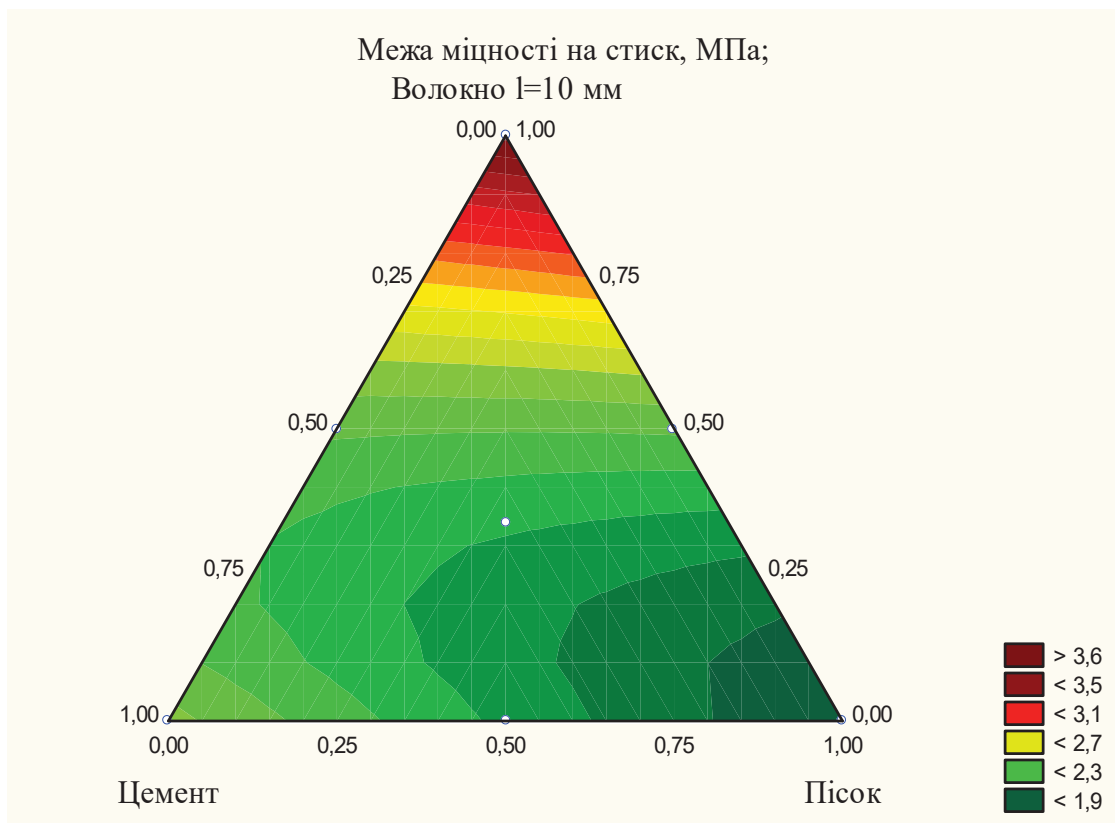
№ п/п	Діаметр волокна	Фактори					
		X ₁	X ₂	X ₃	Цемент	Пісок	Волокно
1	2 – 12 мм	1	0	0	25,1	74,8	0,1
2		0	1	0	24,8	75,1	0,1
3		0,5	0,5	0	24,95	74,95	0,1
4		0	0	1	24,8	74,8	0,4
5		0,5	0	0,5	24,95	74,8	0,25
6		0	0,5	0,5	24,8	74,95	0,25
7		0,33	0,33	0,34	24,9	74,9	0,2

Враховуючи високу рухливість цих розчинних сумішей, вібрування форм із сумішшю не проводилося. Розпалубка зразків здійснювалася наступної доби після формування. Зразки зберігалися у ванні з гідравлічним затвором протягом 28 діб. Отримані результати випробувань складів наведено в таблиці 3, рис. 1-2.

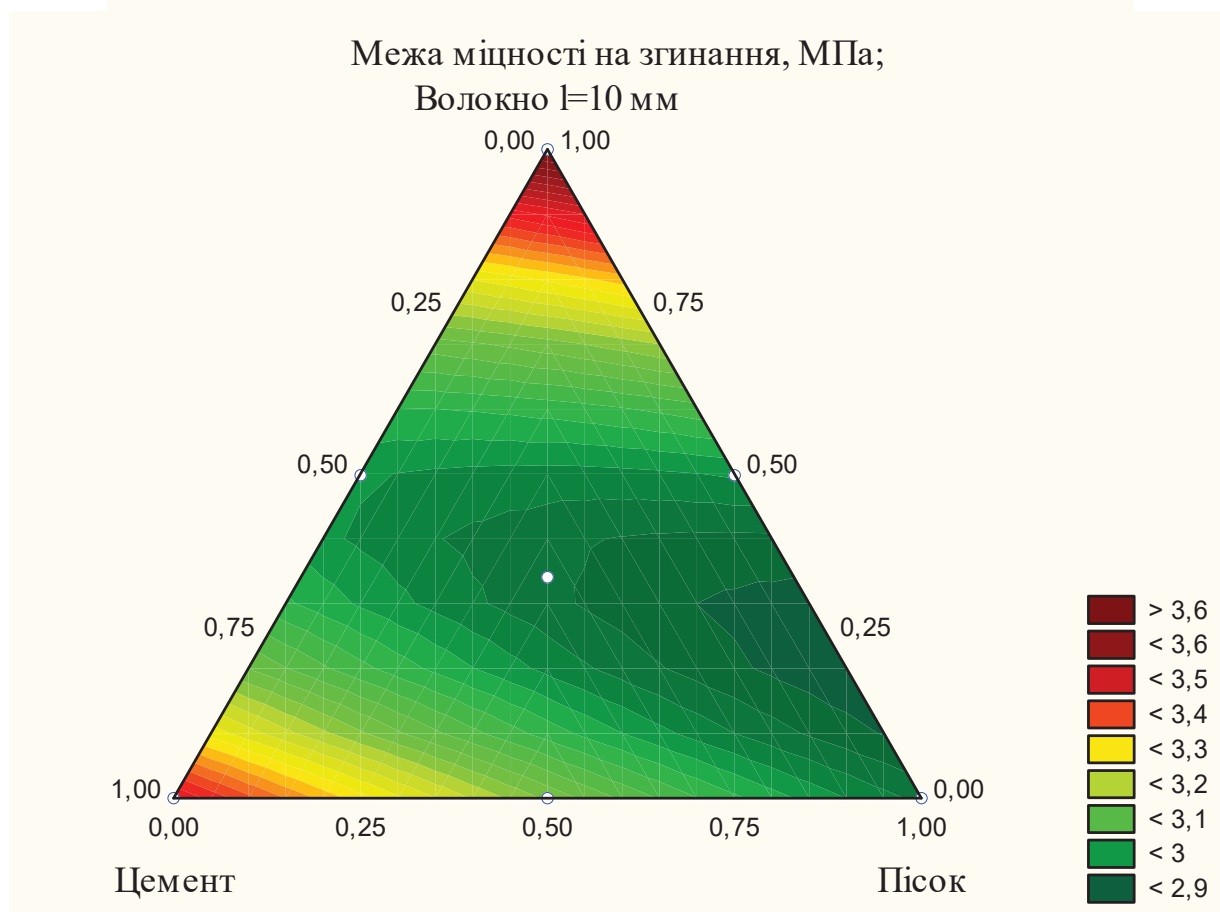
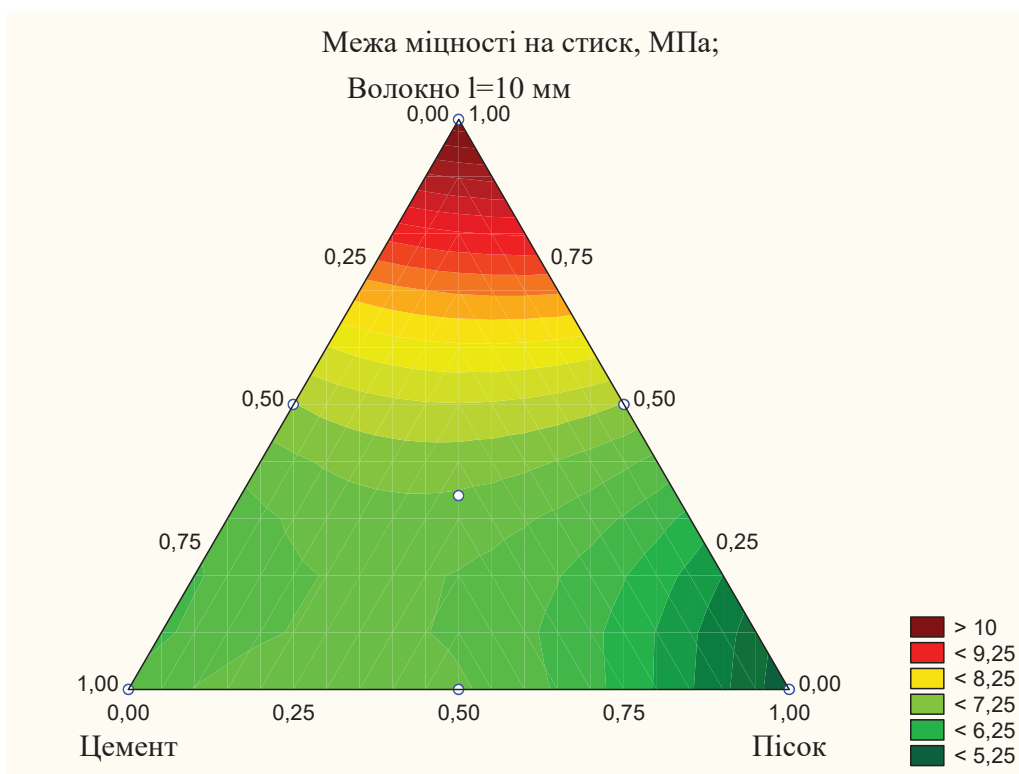
Таблиця 3

Результати випробування складів «розчин + базальтове волокно»

№ п/п	Довжина й концентрація базальтових волокон	R _{ст} , МПа		R _{згин.} , Мпа	
		3 суток	28 суток	3 суток	28 суток
1	Чистий розчин	3,34	11,01	1,33	3,75
2	l=2мм,μ=0,1%	3,65	10,71	1,58	3,43
3	l=2мм,μ=0,2%	2,80	8,70	1,15	3,6
4	l=2мм,μ=0,25%	3,24	10,14	1,00	3,44
5	l=2мм,μ=0,4%	3,78	10,86	1,72	3,50
6	l=5мм,μ=0,1%	2,73	6,12	1,03	3,19
7	l=5мм,μ=0,2%	3,59	11,18	1,21	3,70
8	l=5мм,μ=0,25%	2,3	7,19	1,02	3,22
9	l=5мм,μ=0,4%	3,42	7,08	1,25	3,22
10	l=10мм,μ=0,1%	1,84	5,94	1,24	3,15
11	l=10мм,μ=0,2%	2,96	9,57	1,04	3,26
13	l=10мм,μ=0,25%	1,94	6,07	0,88	2,83
14	l=10мм,μ=0,4%	3,72	11,22	1,64	3,70
15	l=12мм,μ=0,1%	4,65	10,62	1,48	4,80
16	l=12мм,μ=0,2%	3,20	10,7	0,90	2,80
17	l=12мм,μ=0,25%	2,27	7,12	1,01	3,95
	l=12мм,μ=0,4%	3,74	8,4	1,30	3,31

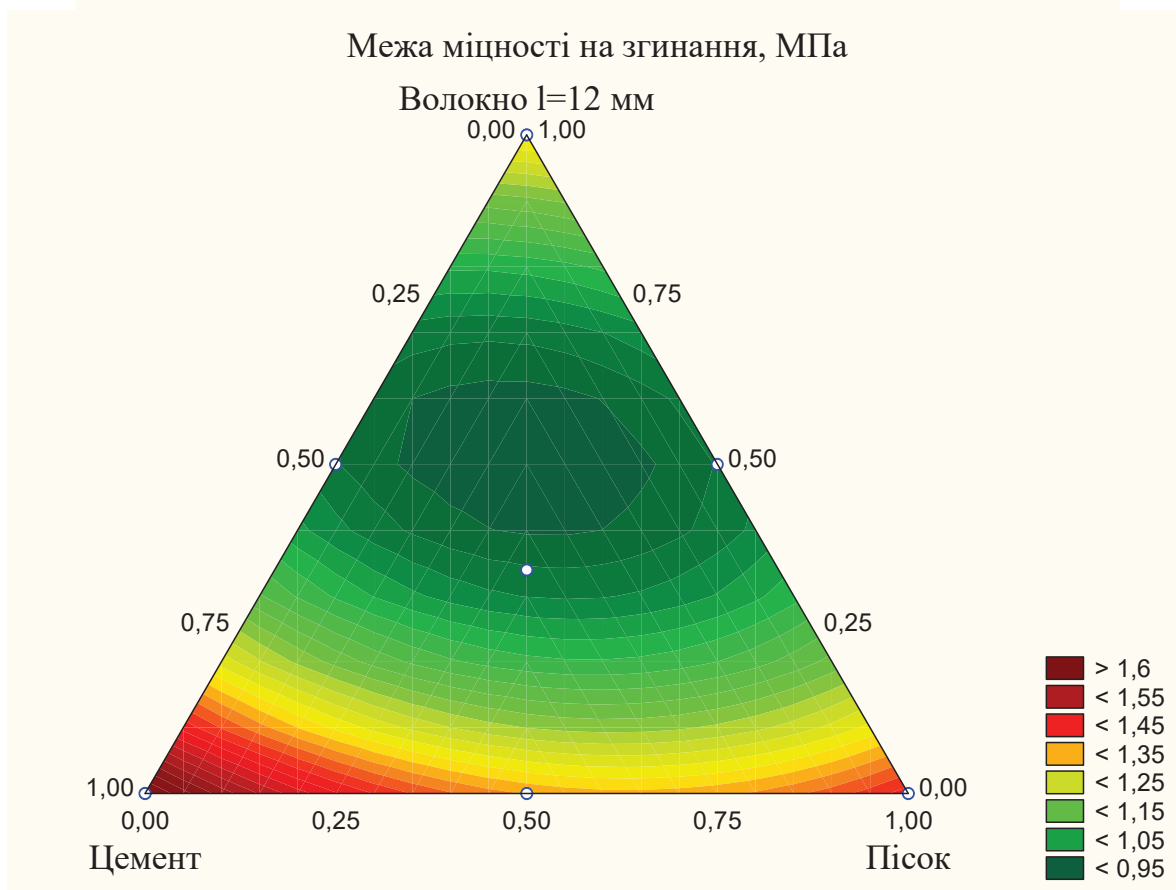
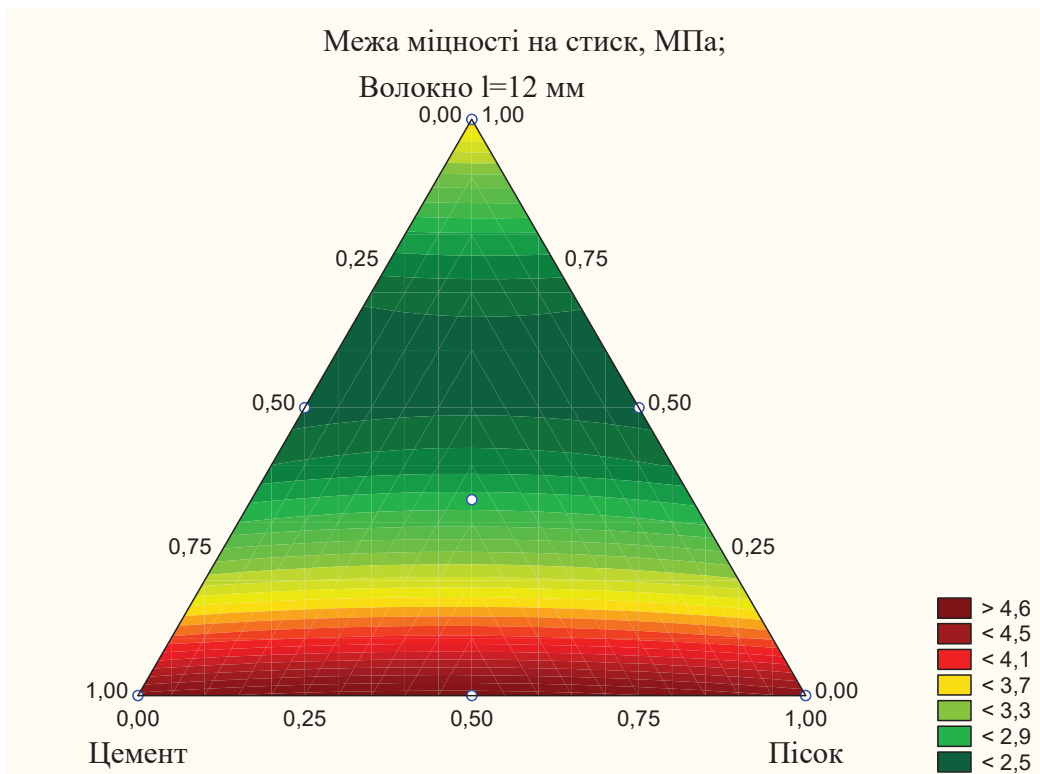


a)



б)

Рис. 1. Залежність міцності на стиск та вигин розчинної суміші від вмісту цементу та базальтового волокна довжиною 10 мм у віці а) 3 діб, б) 28 діб.



a)

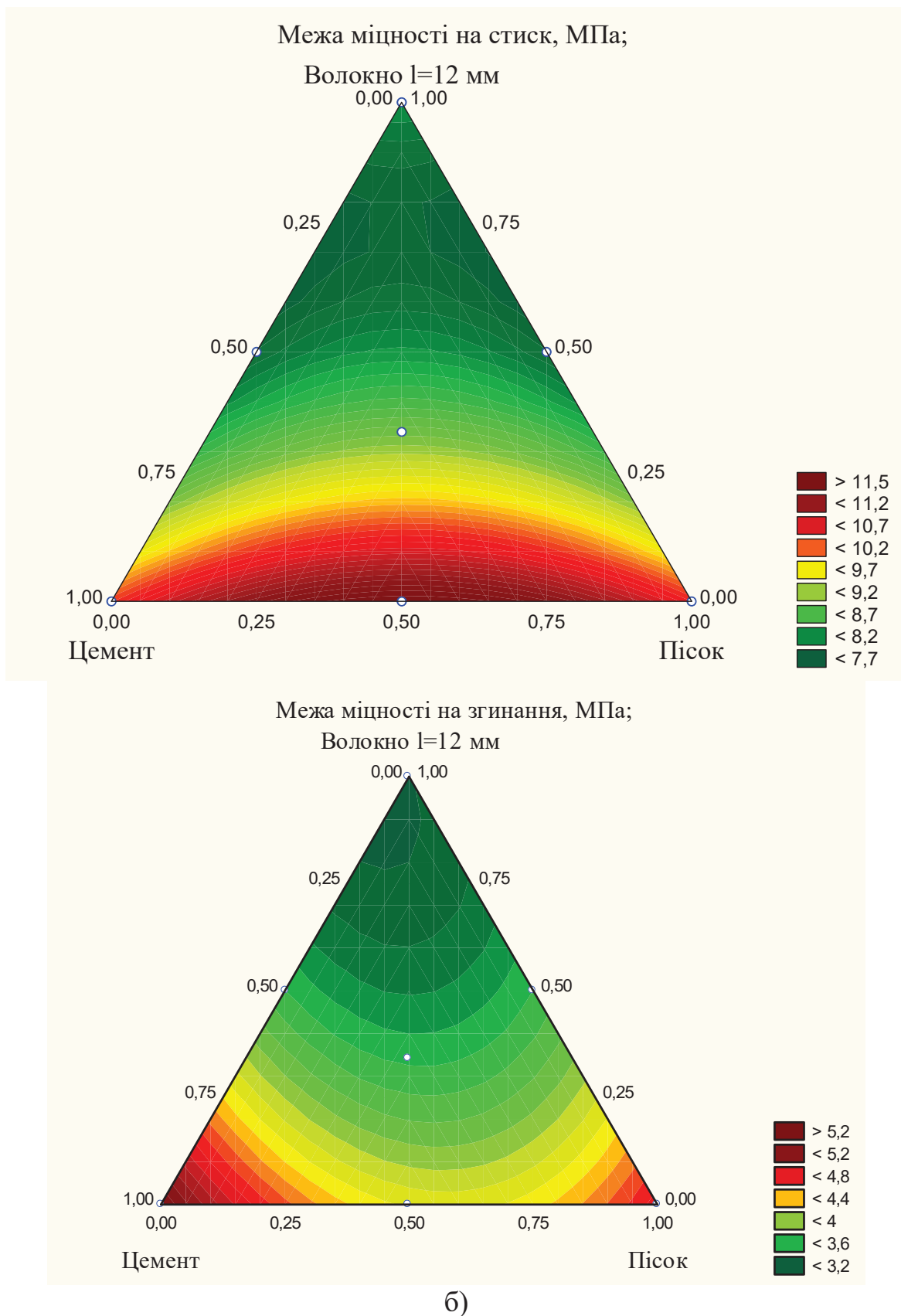


Рис. 2. Залежність міцності на стиск та вигин розчинної суміші від вмісту цементу та базальтового волокна довжиною 12 мм у віці а) 3 доби, б) 28 діб.

Проводячи паралель між двома симплекс-решітчастими експериментами можна виділити такі особливості:

Базальтові волокна довжиною 10 мм сприяють підвищенню міцнісних і експлуатаційних властивостей розчинів як на ранніх, так і на пізніх етапах затвердіння при концентрації волокна 0,4 % від маси цементу. Приріст міцності на стиск у віці 3 діб склав 9,9 %, у віці 7 діб змін не спостерігалось, а на 28-й день міцність на стиск збільшилася на 1,9 %. Міцність на згин на пізніх термінах (28 діб) залишалася на рівні контрольних зразків без волокон, тоді як у віці 3 діб відзначено її підвищення на 23,3 % (рис. 1).

Висновки. Дослідження використання базальтових волокон як дисперсного армувального компонента ремонтних сумішей виявили низку характерних закономірностей, які слід враховувати при введенні цього наповнювача до складу сухих будівельних сумішей. Встановлено, що застосування базальтового волокна довжиною 12 мм забезпечує найбільш ефективне підвищення фізико-механічних властивостей на ранніх етапах твердіння. Оптимальна кількість волокна має становити 0,1 % від маси цементу. За цих параметрів приріст міцності на стиск у віці 3 діб склав 39,22 %, а на вигин – 11,28 % порівняно з контрольними зразками без волокон. Крім того, міцність при згинанні у віці 28 діб підвищилася на 28 % (рис. 2).

1. Runova, R. F., Dvorkin L. J., Dvorkin O. L., Nosovskij YU. L. (2012). Binders. K.: Osnova. 448p.

2. Cao, W., Zhu, H. (2024). A Study on the Application Performance of High-Aspect-Ratio Nano-Ettringite in Photocurable Resin Composites. *Materials*, 17 (14), 3492. <https://doi.org/10.3390/ma17143492>

3. Derevianko V. The influence of nanoparticles on the processes of gypsum hydration/ Derevianko V., Tchymak A., Vaganov V.// *Building materials*. – M.: 2014, 7. C.22-24.

4. Victor Derevianko, Natalia Kondratieva and Hanna Hryshko (2018). Study of impact factors and the mechanism of gypsum binder hydration process in the presence of nanomodifiers. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*. 6, No. 1: 92. <https://doi.org/10.17721/fujcV6I1P92-100>.

5. Tolmachov, S., Belichenko, O. (2017). Prospects of nanoparticles in concrete transport appointment. *Budivelni materialy ta vyroby*, 1-2, 38–41. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smii_2017_1-2_16

6. Tuinukuafe, A., Noor, L., Ideker, J. H., Isgor, O. B. (2022). Factors Influencing the Electrical Properties of Ettringite Binders as Repair Materials. *MATEC Web of Conferences*, 364, 02005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236402005>

7. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Fischer H., Kondratieva N. Performance of low carbon modified composite gypsum binders with increased water resistance. *Chemistry & Chemical Technology*. 2019. Vol. 13, № 4. P. 495–502.

8. Derevianko V. M., Kondratieva N. V., Hryshko H. M. (2023) *Teoretychni ta praktychni pytannia ahrarnoi nauky: Kolektyvna monohrafiia. Pid zahalnoi red. A.S. Kobets* [Theoretical and Practical Issues of Agricultural Science: Collective Monograph. Under the

general editorship of. A.S. Kobets], Chapter 14: Nanomodified binders for ion shielding solutions, 276-292. - ISBN 978-966-981-748-8.

9. Plugin A.A. Increase of gypsum water resistance by mineral additives / A.A. Plugin, O.A. Plugin, H.-B. Fischer, G.N. Shabanova // 1 Weimarer Gipstagung, 30–31 März 2011, Weimar, Bundesrepublik Deutschland: Tagungsbericht. – Weimar: F.A. Finger–Institut für Baustoffkunde, Bauhaus–Universität Weimar, 2011. – N P21. – P.435–443

10. Kryvenko P.V., Pushkariova K.K., Baranovskyi V.B., Kochevyh M.O., Hasan Ye.G., Konstantynivskyi B.Ya. and Raksha V.O. (2015). Materials Science in Construction : textbook. Ed. by P.V. Kryvenko. Kyiv : Lira-K Publ., 2015, 624 p.

11. Derevianko, V., Hryshko, H., Zaiats, Y., Drozd, A. (2025). Identifying the influence of nanomodifiers on the structure formation process regularities in the gypsum-alumina cement system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (6 (133)), 42–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.323295> (Scopus).

12. Derevianko, V. M., Hryshko, H.M., Zaiats, Ye. I., Dubov, T. M. (2025). Theoretical and experimental justification of the principles of modifying compositions of CaO-Al₂O₃-SO₃-H₂O systems. Chemistry, Physics and Technology of Surface [Himia, Fizika ta Tehnologia Poverhni], Vol. 16, No 1, 51–62. <https://doi.org/10.15407/hftp16.01.051>.

13. Kondratieva N., Sanytsky M.; Soltysik R. Microstructure and properties of modified gypsum systems 3. Weimarer gipstagung, Weimar Bundesrepublik Deutschland tagungsbericht, 2017. p. 162-165. ISBN: 9783000554476; 3000554475.

14. Hryshko, H. (2025). Design of protective solutions based on a nanomodified gypsum alumina cement system and investigation of their properties. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (6 (134)). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.324424>.

15. Roman Fediuk, Natalia Makarova, Diyar N. Qader, Andrey Kozin, Mugahed Amran, Victoria Petropavlovskaya, Tatiana Novichenkova, Mikhail Sulman, Kirill Petropavlovskii, Combined effect on properties and durability performance of nanomodified basalt fiber blended with bottom ash-based cement concrete: ANOVA evaluation, Journal of Materials Research and Technology, Volume 23, 2023, Pages 2642-2657, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.179>.