

УДК 666.973.2

МІЦНІСТЬ ФІБРОКЕРАМЗИТОБЕТОНУ НА БАГАТОКОМПОНЕНТНОМУ В'ЯЖУЧОМУ**STRENGTH OF FIBER-REINFORCED EXPANDED CLAY CONCRETE WITH MULTI-COMPONENT BINDER**

Кравченко С.А., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-7235-0312, Постернак О.О., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-7016-6941, Уразманова Н.Ф., асистент, ORCID: 0000-0002-3415-4150 (Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

Kravchenko S.A., PhD Associate Professor, ORCID: 0000-0002-7235-0312, Posternak O.O., PhD Associate Professor, ORCID: 0000-0002-7016-6941, Urazmanova N.F., assistant, ORCID: 0000-0002-3415-4150 (Odesa state academy of civil engineering and architecture)

Наведено результати експериментальних досліджень міцності керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому з додаванням базальтової фібри, а також визначення впливу базальтової фібри на міцнісні властивості бетону. На основі отриманих дослідних даних з використанням теорії ймовірностей та математичної статистики була розроблена математична модель міцності на стиск та згин керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому в залежності від доли базальтової фібри та періоду випробування. Визначена оптимальна доля застосування – 1.5% базальтової фібри у конструкційному керамзитобетоні на багатокомпонентному в'язучому для отримання найкращих міцнісних показників.

The paper presents the results of experimental studies on the strength of expanded clay concrete with a multi-component binder incorporating basalt fiber, as well as an assessment of the effect of basalt fiber on the mechanical properties of concrete.

During the experimental program, four concrete mixtures were produced and tested at the ages of 7, 28, and 90 days. The composition of structural expanded clay concrete with a multi-component binder corresponding to a design strength of 20 MPa was adopted for the study.

Based on the obtained experimental data and using probability theory and mathematical statistics, a mathematical model of compressive and flexural

strength of expanded clay concrete with a multi-component binder was developed as a function of basalt fiber content and testing age.

The analysis of the experimental results showed that the incorporation of 1.0% basalt fiber increases compressive strength by 20%, while 1.5% basalt fiber results in an increase of 47%. At the same time, flexural strength increases by more than 25% with 1.0% basalt fiber and by more than 65% with 1.5% basalt fiber. These results indicate that a higher content of basalt fiber in expanded clay concrete with a multi-component binder leads to improved strength characteristics.

The optimal content is 1.5% basalt fiber, which is recommended for use in both flexural and compressed structural elements.

Ключові слова: Керамзитобетон, базальтова фібра, багатокомпонентне в'язуче, стиск, згин, міцність

Expanded clay concrete, basalt fiber, multi-component binder, compression, bending, strength

Вступ. В останні роки у зв'язку з розвитком будівництва багатопверхових будівель, набирають популярність високоміцні бетони з використанням різних модифікуючих добавок та наповнювачів. Наслідком такої тенденції є збільшення вимог, до використовуваних бетонів, з яких зводиться будівля чи споруда. Завдяки доданню різних компонентів, дослідники намагаються збільшення важливих показників бетону: міцності, деформативності, тріщиностійкості, теплоізоляції, довговічності, зменшення ваги, терміну служби тощо.

Однак застосування високоміцних бетонів спричиняє ряд труднощів, пов'язаних з їх недостатньою міцністю при згинанні, значними усадковими деформаціями та низькою тріщиностійкістю, що збільшує небезпеку крихкого руйнування конструкцій.

Усунути ці недоліки високоміцних бетонів можна за допомогою фібри. Частіше всього в цементних бетонах застосовується сталева фібра довжиною від 2 до 4 см, діаметром 0,7-1 мм при рекомендованих коефіцієнтах армування 2,5-4% маси бетону [1]. Однак її потенціал повністю не реалізується, через малу питому поверхню сталеві фібри, невисокої адгезії до неї цементного каменю та недостатньої міцності самого бетону, що призводить до «просмикування» фібр при його руйнуванні.

У зв'язку з цим привертає увагу базальтове волокно [2], що майже не застосовується в легких бетонах. По міцності воно перевершує сталь і за рахунок малого діаметра волокон (9-12 мкм) має набагато більшу питому поверхню зчеплення з цементним каменем, ніж сталевий, маючи з ним хімічну схожість. При цьому відносно подовження при розриві базальтової фібри вдвічі нижче, ніж сталевий, що дозволяє їй більше ефективно перешкоджати утворенню мікротріщин у бетоні при навантаженні.

Аналіз попередніх досліджень. Останнім часом накопичилося багато досліджень фіброармованих бетонів, конструкціями на їх основі, теорією розрахунку та проектування займалися: Бабаєв С.М., Баженов Ю.М., Беадоїн Д.Д., Василовська Н.Г., Гофштейн Ф.А., Енджієвська І.Г., Зайцев Ю.В., Калугін І.Г., Крилов Б.А., Лобанов І.А., Лі С.Л., Лофгрєн І., Маїлян Л.Р., Мірошніченко К.К., Малініна Л.А., Нааман А.Е., Невський А.В., Окамура Х., Пухарєнко Ю.В., Ратинов В.Б., Ушакова А.С. та ін. та багато інших.

На сучасному рівні значний внесок у дослідженні із використанням базальтової фібри зробили Барабаш І. В., Дворкін Л.Й., Карпюк В.М., Коваль П. М., Кривяков С.О., Кропивницька Т.П., Кияшко В.Т., Новіцький А. Г., Рабінович Ф. Н. Ayub, T., Satheskumar K. та ін.

Основна мета статті – дослідження та аналіз впливу фібри на міцнісні характеристики керамзитобетону на багатоконпонентному в'язучому.

Методика дослідження. Експериментальні зразки куби 100x100x100 мм та призми 100x100x400 мм.

Результати досліджень. Матеріали, використані у дослідженнях для виготовлення дослідних зразків, мали наступні характеристики:

- керамзитовий гравій 5...10 мм, нефракціонований, марки по насипній щільності М 600, умовною міцністю в циліндрі, що дорівнює 2,8...3,0 МПа;
- пісок кварцовий Кременчуцького кар'єру;
- цемент М 400 Криворізького заводу – ДСТУ Б В.2.7-112-2002;
- зола-винос Ладижинської ТЕС – ГОСТ 25818-91;
- вапно негашене Куліндорівського заводу, вміст активного окису кальцію СаО-75%;
- гіпс будівельний – ДСТУ Б В.2.7-104-2000;
- суперпластифікатор Sika Plast-2508 HE.
- базальтова фібра (БФ) 24 мм – ТУ У В.2.7-26.8-34323267-002:2009.

На підставі проведених раніше нами досліджень керамзитобетону на багатоконпонентному в'язучому [3] був прийнятий для досліджень склад, наведений у табл.1.

Процентний вмісту базальтової фібри, який дозволив отримати максимальну міцність у порівнянні з іншими розглянутими відсотковими співвідношеннями був прийнятий: 0,5% БФ, 1,0% БФ та 1,5% БФ. Для отримання цих процентних співвідношень використовували рівняння:

$$\frac{\%БФ}{100} \times \gamma_6 \quad (1)$$

Таблиця 1

Склад бетону

Проектна міцність, МПа	Цемент, кг/м ³	Зола, кг/м ³	Вапно, кг/м ³	Великий заповнювач, кг/м ³	Пісок, кг/м ³	Вода, л	$f_{ck(m)}$, МПа	$f_{ck(28)}$, МПа	α , кг/м ³	Примітка
20	180	150	125	440	360	270	18,6	21,9	1400	Sika Plast-2508 HE – 0,3%, гіпс – 25кг/м ³

Керамзитобетонну суміш укладали у форми та ущільнювали на вібростолі. З керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому виготовляли 36 кубів та 36 призм.

У ході експерименту було виготовлено 4 бетонні суміші, які розподілені на 7, 28 та 90 діб. Випробувань. Ці суміші відрізняються тільки по кількості добавленої фібри, крім першої суміші де фібра відсутня.

Результати досліджень кубикової міцності по відповідним БФ % та часу випробувань наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати випробувань на стиск зразків кубів

Вік зразків, діб	Міцність на стиск, МПа			
	-	0,5%БФ	1,0%БФ	1,5%БФ
7	14,9	16,7	19,1	22,1
28	20,5	22,7	25,3	27,7
90	23,2	25,9	28,1	30,3

Експериментальне дослідження зразків кубів (табл.2 та рис.1) показало, що додавання БФ до керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому призводить до підвищення міцності на стиск. Результати також показали, що міцність на стиск за 7 діб витримування може досягати близько 60% від міцності на стиск за 90 діб, незалежно від того, чи містить керамзитобетон БФ. На рис 1 показаний графік зміни міцності на стиск керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому в часі.

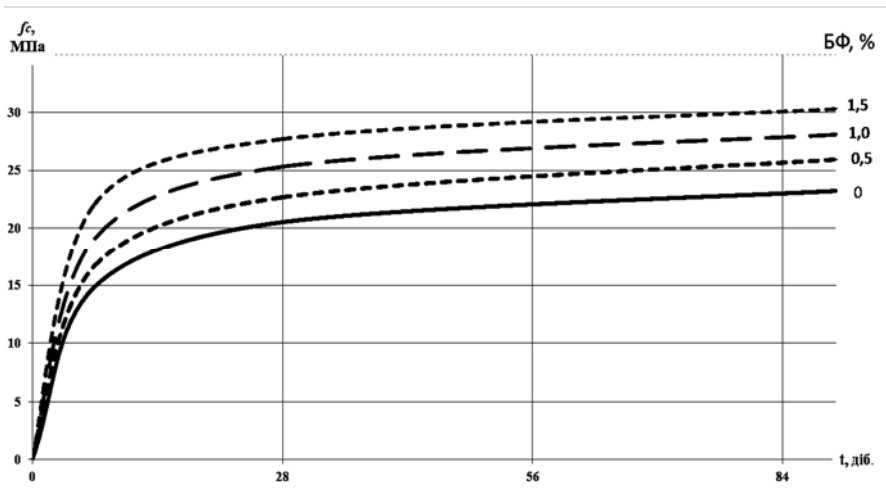


Рис.1. Міцність керамзитобетону на багатокомпонентному вяжучому на стиск залежно від часу випробування

Залежність міцності керамзитобетону на стиск від кількості доданої БФ та часу випробування показано на рис.2.

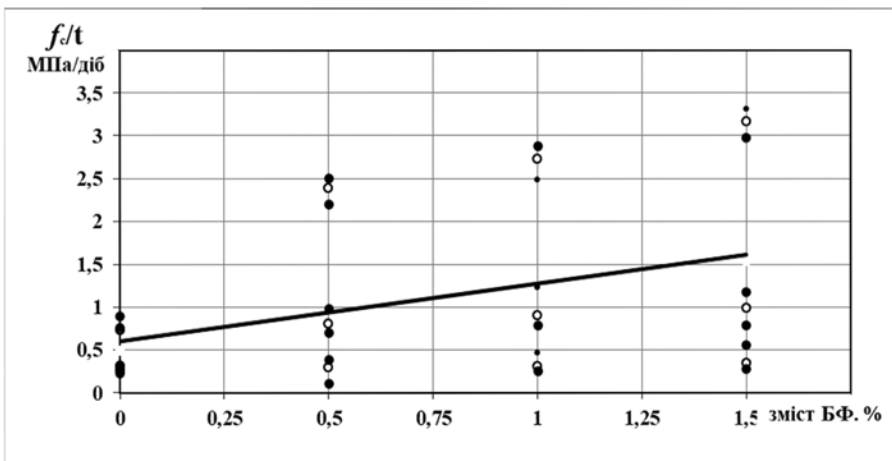


Рис.2. Залежність міцності на стиск від процентного змісту БФ та від часу випробування

На основі аналізу отриманих даних з експерименту (рис. 2) з використанням математичної статистики була розроблена математична модель міцності на стиск керамзитобетону на багатокомпонентному

в'язучому в залежності від процентного змісту базальтової фібри та періоду витримування у часі:

$$f_c = f_c^t + \frac{1,22 \times t \times e^{43\omega}}{e^{43\omega} + \frac{t}{t_\omega}} \quad (2)$$

де: f_c^t - міцність на стиск керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому відповідного класу на період випробування, МПа; e - експоненційна функція, $e \approx 2,71828$; t - період витримки зразків після виготовлення, діб ($t \leq 90$ діб); t_ω - вплив базальтової фібри в керамзитобетоні на багатокомпонентному в'язучому; ω - частина фібри в керамзитобетоні; 1,22 - коефіцієнт зміни міцності на стиск керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому з фіброю в часі МПа/діб.

Отриману аналітичну модель необхідно застосовувати для оцінки міцності на стиск керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому; з точністю $\pm 5\%$ та коефіцієнтом детермінації 0,93, це дозволяє визначити допустиме навантаження на стиснуті конструкції, наприклад стінові панелі.

Для визначення міцності на згин використовували зразки розміром 100x100x400 мм. Результати лабораторних випробувань зразків призм розміром 100x100x400 мм міцність на згин наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Результати випробувань на згин зразків призм

Вік зразків, діб	Міцність на згин, МПа			
	-	0,5%БФ	1,0%БФ	1,5%БФ
7	2,52	3,14	3,38	4,02
28	3,43	3,96	4,53	5,57
90	3,72	4,31	4,97	6,11

На рис. 3 показано графік зміни міцності на згин керамзитобетонної призми з розмірами 100x100x400 мм в залежності від періоду випробування.

Проведений нами аналіз діаграм на рис. 2 та рис. 4 показує, що характер зміни міцності на стиск та міцності на згин керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому в залежності від долі БФ та періоду випробування близький та зростає геометрично.

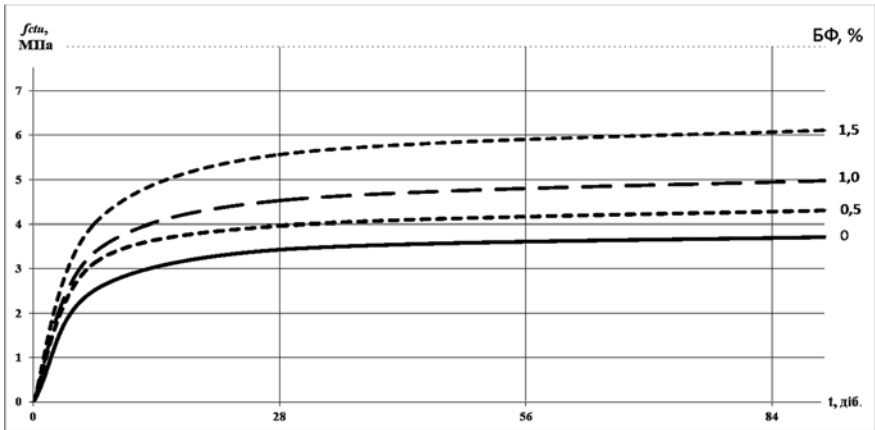


Рис.3. Міцність керамзитобетону на багатокомпонентному вяжучому на згин залежно від часу випробування

На рис.4 показано залежність міцності на згин від долі БФ та часу випробування зразків – призм розміром 100x100x400 мм.

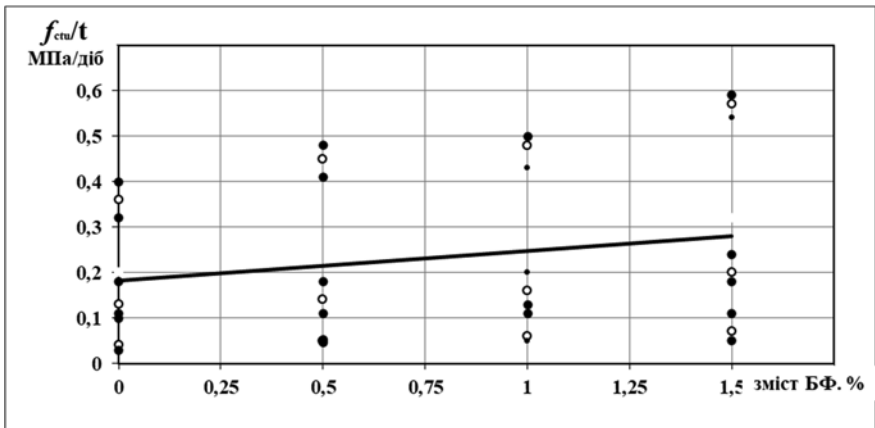


Рис.4. Залежність міцності на згин від процентного змісту БФ та від часу випробування

На основі отриманих даних (рис.4) з використанням теорії ймовірностей та математичної статистики була розроблена математична модель міцності на згин керамзитобетону на багатокомпонентному вяжучому в залежності від долі БФ та періоду випробування:

$$f_{ct} = f_{ct}^t + \frac{1,18 \times t \times e^{50\omega}}{e^{50\omega} + \frac{e^{50\omega}}{t_\omega}} \quad (3)$$

де: f_{ct}^t - міцність на згин керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому відповідного класу на період випробування, МПа; e - експоненційна функція, $e \approx 2,71828$; t - період витримки зразків після виготовлення, діб ($t \leq 360$ діб); t_ω - вплив базальтової фібри в керамзитобетоні на багатокомпонентному в'язучому; ω - частина фібри в керамзитобетоні; 1,18 - коефіцієнт зміни міцності на згин керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому з фіброю в часі МПа/діб.

Отриману аналітичну модель необхідно застосовувати для оцінки міцності на згин керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому; з точністю $\pm 5\%$ та коефіцієнтом детермінації 0,924, це дозволяє визначити допустиме навантаження на згинальні конструкції, наприклад плити перекриття.

Висновки:

1. Вперше були проведені дослідження впливу змісту базальтової фібри у керамзитобетоні на багатокомпонентному в'язучому на міцнісні властивості.
2. Визначена оптимальна доля застосування – 1.5% базальтової фібри у конструкційному керамзитобетоні на багатокомпонентному в'язучому для отримання найкращих міцнісних показників.
3. Проведений аналіз діаграм на рис. 2 і 4, а також табл. 2 і 3, можна зробити висновок, що керамзитобетон з 1,0 % БФ збільшує міцність на стиск на 20%, у той час як 1,5% БФ - на 47%, а міцність на згин 1,0 м% БФ збільшує більш ніж на 25%, тоді як 1,5 мас.% БФ – більш ніж на 65% тобто високий відсоток БФ в керамзитобетоні на багатокомпонентному в'язучому дозволяє отримати вищу міцність.
4. Отримані математичні моделі міцності на стиск та згин керамзитобетону на багатокомпонентному в'язучому в залежності від долі БФ та періоду випробування.

1. Бабич Є.М., Дробишинець С.Я. Робота і розрахунок згинальних сталевібробетонних елементів: монографія. Луцьк: ЛНТУ, 2012. 194 с.

Babych Ye.M., Drobyshynets S.Ia. Robota i rozrakhunok zghynalnykh stalefibrobetonnykh elementiv: monohrafiia. Lutsk: LNTU, 2012. 194 s.

2. Дворкін Л.Й. Високоміцні бетони: навчальний посібник / Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, Р.М. Макаренко // Київ, 2022. - 216с.

Dvorkin L.I. Vysokomitsni betony: navchalnyi posibnyk / L.I. Dvorkin, V.V. Zhytkovskiy, R.M. Makarenko // Kyiv, 2022. - 216с.

3. Кравченко С.А. Конструкційні та конструкційно-теплоізоляційні легкі бетони на пористих заповнювачах. / С.А. Кравченко, О.О. Постернак, І.А. Столевич // Ресурсоекономні матеріали, конструкції,будівлі та споруди: зб. наук. праць, вип. № 31. Рівне, УДУВГП, 2015. С.213 – 221.

Kravchenko S.A. Konstruktsiini ta konstruktsiino-teploizoliatsiini lehki betony na porystykh zapovniuvachakh. / S.A. Kravchenko, O.O. Posternak, I.A. Stolevych // Resursoekonomni materialy, konstruktsii,budivli ta sporudy: zb. nauk. prats, vyp. № 31. Rivne, UDUVHP, 2015. S.213 – 221.

4. Дворкін Л.І. Випробування бетонів та розчинів. Проектування їх складу. - М: ІнфраІнженерія, 2017, 432 С.

Dvorkin L.I. Vyprobuvannia betoniv ta rozchyniv. Proektuvannia yikh skladu. - M: InfraInzheneriia, 2017, 432 S.

5. Солодкий С.Й., Марків Т.С., Холод Т.П. Способи регулювання тріщиностійкості високоміцних бетонів. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди, зб. наук. пр. Рівне [б. в.], 2015. Вип. 31. С. 357–362.

Solodkyi S.I., Markiv T.I.e., Kholod T.P. Sposoby rehuliuвання trishchynostiikosti vysokomitsnykh betoniv. Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy, zb. nauk. pr. Rivne [b. v.], 2015. Vyp. 31. S. 357–362.

6. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [Чинний від 2010-09-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 43 с.

DSTU B V.2.7-214:2009. Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennia mitsnosti za kontrolnymy zrazkamy. [Chynnyi vid 2010-09-01]. Vyd. ofits. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2010. 43 s.

Відомості про статтю:		Article information	
Отримано	20.03.2026	Received	20.03.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді	25.03.2026	Received in revised form	25.03.2026
Прийнято	15.04.2026	Accepted	15.04.2026
Опубліковано	31.05.2026	Published	31.05.2026

Політика відкритого доступу

Політика відкритого доступу збірника передбачає безкоштовний та безперешкодний доступ до наукових матеріалів. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Open access policy

The open access policy of the collection provides free and unhindered access to scientific materials. All data is available in digital or graphical form in the main text of the article.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який

інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Conflicts of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the current study, including financial, personal, authorial or any other that could be included in the study, as well as the results presented in this document.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що при створенні поточної роботи вони не використовували технології штучного інтелекту.

Use of Artificial Intelligence

The authors confirm that they did not use artificial intelligence technologies in the creation of the current work.