

УДК 666.972

**ВПЛИВ ПОЛІПРОПІЛЕНОВОЇ ФІБРИ X-Mesh НА ВЛАСТИВОСТІ
ДОРОЖНЬОГО БЕТОНУ**

Д-р техн. наук С. М. Толмачов, канд. техн. наук О. А. Беліченко, Р. В. Дядюшко

**INFLUENCE OF X-Mesh POLYPROPYLENE FIBER ON THE PROPERTIES OF ROAD
CONCRETE**

D. Sc. (Tech.) S. Tolmachov, PhD (Tech.) O. Belichenko, R. Diadiushko

***Анотація.** У статті розглянуто переваги та недоліки застосування різних видів фібри у технології важких цементних бетонів. У роботі застосовували полімерну фібру X-Mesh довжиною 23 і 39 мм, діаметром волокон 100...150 мкм. Експериментальні дослідження показали, що фібра X-Mesh може утворювати всередині бетону структурний каркас. Тому при введенні цієї фібри у склад бетону його міцність за стиском не знижується, на відміну від бетонів з іншими типами фібри. Крім того, фібра X-Mesh дисперсно армує структуру бетону, що приводить до збільшення міцності за згином на 22 %. Дослідження міцності фіброармованого бетону показали, що оптимальна кількість фібри X-Mesh складає 1,5 кг/м³. Встановлено, що фібра X-Mesh здатна залучати додаткову кількість повітря, що призводить до зниження середньої густини бетону на 3 %, але підвищує його морозостійкість.*

***Ключові слова:** полімерна фібра, дорожній бетон, міцність за згином, міцність за стиском, діаметр волокна, дисперсне армування, структура бетону.*

Abstract. Road and airfield pavements are subject to constantly increasing vehicle loads, as well as aggressive liquid media and temperatures. Under these conditions, the search for and improvement of new types of cement concretes that are able to withstand these influences for several decades is urgent. First of all, such concretes include fiber-reinforced concrete (FRC). The article discusses the advantages and disadvantages of using various types of fiber in the technology of heavy cement concretes. Basalt or polymer fibers are most often used in road concrete. Steel fibers are not commonly used due to possible corrosion of metal fibers. The use of basalt fiber gives an effect if there is a large amount of it (more than 6 kg/m^3). But this leads to difficulties in their uniform distribution in the volume of concrete mixture and increases the cost of concrete. Therefore, the use of polymer fiber is promising. It is shown that there is no consensus regarding the effectiveness of using fibers longer than 20 mm. Therefore, in the experiments, we used X-Mesh polymer fiber with lengths of 23 and 39 mm, with a fiber diameter of 100...150 μm . Experimental studies have shown that X-Mesh fibers can form a structural framework within concrete. Therefore, when this fiber is introduced into the composition of concrete, its compressive strength does not decrease, in contrast of concretes with other types of fiber. In addition, X-Mesh fiber disperse reinforces the concrete structure, which leads to an increase in flexural strength by 22 %. FRC strength studies have shown that the optimal amount of X-Mesh fiber is 1.5 kg/m^3 . It has also been shown that polypropylene fibers with lengths of 23 and 39 mm have the same positive effect on the properties of road concrete. It was found that X-Mesh fiber is capable of entraining an additional amount of air, which leads to a decrease the average density of concrete by 3 %, but increases its frost resistance. Despite the additional air entrainment, the water absorption of concrete does not exceed 2.5 %.

Keywords: polymer fiber, road concrete, flexural strength, compressive strength, a fiber diameter, dispersed reinforces, concrete structure.

Вступ. На дорожні та аеродромні цементобетонні покриття діють статичні та динамічні навантаження як стаціонарні, так і циклічні. Їхня інтенсивність і величина за останні два десятиліття зросли більш ніж у 10 разів. У цих умовах покриття починають руйнуватися значно раніше, ніж передбачено. Це призводить до необхідності пошуку нових матеріалів, насамперед цементобетонів, які могли б витримувати зростаючі зовнішні навантаження та експлуатуватися протягом кількох десятиліть.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування фібробетону (фіброармований бетон – ФАБ (FRC)) для реконструкції покриттів в аеропортах і на автомагістралях добре відоме [1].

Зазвичай ФАБ використовують, коли припускають, що покриття піддаватиметься сильному зносу та стиранню. Додавання фіброволокон до бетонної суміші, за умови їх рівномірного розподілу, дає істотні переваги. До них належать: висока ударна

міцність і втомна міцність (impact and fatigue resistance), підвищена міцність на розтяг за згином [2], висока межа міцності на розрив, а також підвищена стійкість до тріщиноутворення при усадці [3].

Найчастіше у дорожніх покриттях застосовують базальтові чи полімерні волокна. Не так часто використовують сталеве волокно через можливу корозію. Особливо широко дослідження із застосування базальтового волокна проводять протягом останнього десятиліття [4]. Це пов'язано з його високою міцністю, високим модулем пружності, термічною та хімічною стійкістю [5]. Крім того, у [6] також згадується, що базальтові волокна легко диспергуються в бетонній суміші без сегрегації, на відміну інших видів волокон, які можуть утворювати грудки при перемішуванні. Витрата базальтової фібри, у якій досягається ефект її застосування, становить $6...24 \text{ kg/m}^3$. Використання базальтових волокон є хорошим замінником сталевих волокон.

Проте застосування базальтових волокон у технології дорожніх ФАБ, незважаючи на їх ефективність, утруднене через необхідність вводити в бетонну суміш велику кількість фібри. Це призводить до труднощів їхнього рівномірного розподілу в обсязі бетонної суміші. Великі кількості фібри підвищують собівартість бетону.

Слід зазначити, що ефективність застосування ФАБ зазвичай оцінюється за їх впливом на механічні властивості, тоді як морозостійкість таких матеріалів є маловивченою проблемою [7]. При цьому слабо вивченим є вплив геометричних розмірів фібри як на міцність бетонів, так і на їхню морозостійкість. Є думка, що фібра довжиною 54...60 мм не надає помітного впливу на морозостійкість бетонів та їхню стійкість до дії солей [8]. Особливо це стосується поверхневого лущення бетонів при дії знакозмінних температур. Однак дослідження [9] показали, що хороші результати отримано при використанні коротких волокон довжиною 3 мм. Руйнування бетону, особливо його поверхні, під час введення таких волокон значно зменшилося. Ряд дослідників довели, що підвищення морозостійкості ФАБ з короткими волокнами може бути пов'язане з «повітряними властивостями» мікрочастинок [9, 10]. У літературі є суперечливі відомості щодо цього. У статтях [11, 12] зазначено позитивний вплив на морозостійкість волокон довжиною 20...35 мм. При цьому зауважено, що додаткового залучення повітря в таких ФАБ не спостерігали.

Сприятливий вплив коротких поліпропіленових волокон (6,5 і 8 мм) на підвищення стійкості до лущення поверхні при циклічному заморожуванні та відтаванні було вказано Річардсоном [13]. Оскільки сольові лущення є поверхневими, вони не впливають на механічну цілісність бетонного тіла. Однак це пошкодження робить матеріал сприйнятливим до проникнення вологи та агресивних речовин, що загрожують міцності конструкції [14].

Тому методики випробування дорожніх бетонів на морозостійкість за наявності солей основним критерієм морозостійкості вважають втрати маси зразків від лущення.

У [7] подано результати досліджень поліпропіленової фібри різної довжини та конфігурації на морозостійкість бетону. Показано, що застосування поліпропіленових волокон спричинило збільшення міцності бетону на згин. Вища міцність на згин була у ФАБ з волокнами, поверхня яких була нерівною. Це забезпечило кращий зв'язок між волокном та цементною матрицею. Це позначилося на підвищенні морозостійкості бетонів з волокнами, які мають нерівну поверхню. Застосування волокон, які мають гладку поверхню, призвело до збільшення лущення при випробуванні на морозостійкість. Сумарна маса лущення для бетонів з гладкими волокнами була набагато більша, ніж для бетонів з нерівними волокнами. У цьому випадку збільшення вмісту гладкої фібри не привело до будь-якого поліпшення стійкості до лущення на поверхні, на відміну від нерівної фібри.

Мета та завдання дослідження.

Метою дослідження є аналіз впливу поліпропіленової фібри X-Mesh на властивості дорожнього бетону. Для досягнення сформульованої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- визначити вплив витрат фібри X-Mesh різної довжини на середню густину та міцність дорожнього бетону;
- дослідити вплив рухомості бетонних сумішей на показники якості фібробетонів;
- визначити вплив фібри X-Mesh на водопоглинання і морозостійкість дорожнього бетону.

Основна частина дослідження.

Матеріали, що використовували у роботі. У дослідженнях використовували цемент ПЦ І-500 Р-Н виробництва «ЮГЦемент» Філії ПРАТ «Дікергофф Цемент Україна».

Для виготовлення цементобетонів дорожніх застосовували заповнювачі: гранітний щебінь фр. 5–10 мм і 10–20 мм та

кварцовий пісок з модулем крупності $M_{кр} = 1,8$.

У дослідженнях застосовували добавку-суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Fk 59 фірми MC-Bauchemie (Німеччина).

Склади бетону відповідали класу за міцністю на стиск не менше В30 (марка за міцністю на стиск не нижче М400). Марка за консистенцією бетонної суміші S1 (згідно з табл. 7 ДСТУ 8858 [15]).

Експериментальні дослідження. У наших дослідженнях вивчали вплив фібри різної довжини та конфігурації на характеристики ФАБ. В експериментах використовували поліпропіленову фібру X-Mesh довжиною 23 і 39 мм, діаметром 100...150 мкм (рис. 1). Виробник фібри – фірма ТОВ «ДПФ» м. Дніпро.



Рис. 1. Фібра X-Mesh

Фібра X-Mesh – новий вид фібри, яка здатна створювати структурний каркас для підвищення міцності бетонів на стиск, а також дисперсно армувати структуру бетону. Довжина цієї фібри 23, 39 і 54 мм. Виходячи з максимальної крупності зерен заповнювача 20 мм була обрана фібра довжиною 23 і 39 мм.

Склад цементобетонної суміші: Ц – 360 кг/м³, П – 620 кг/м³, Щ_{фр.5-10 мм} – 430 кг/м³, Щ_{фр.10-20 мм} – 840 кг/м³, СП Fk 59 – 0,5 % від маси цементу.

Фібру вводили у суміш сухих заповнювачів і перемішували. А потім додавали воду із суперпластифікатором і остаточно перемішували суміш. Було визначено оптимальний час перемішування вологої фібробетонної суміші – 3 хвилини.

Виготовляли зразки-балки розміром 7х7х28 см, які випробовували на міцність за згином, а потім половинки балок випробовували на міцність за стиском.

Дослідження показали, що введення до складу бетонної суміші фібри довжиною 23 і 39 мм приводить до зростання міцності бетонів за згином (табл. 1). Для бетонів з фіброю довжиною 23 мм міцність за згином зростає на 10...22 % у віці 3 і 7 діб. До 28 діб приріст міцності за згином становить 12 % порівняно з бетоном без фібри. Найкращі результати отримано при витраті фібри 1...1,5 кг/м³. Для бетонів з фіброю довжиною 39 мм приріст міцності за згином у віці 3 та 7 діб досягає 21 %, а до 28 діб знижується до 13 %. У цьому випадку найкращі результати отримані для бетонів із витратою фібри 1,5 кг/м³.

Міцність за стиском бетонів з фіброю довжиною 23 мм не нижче, ніж у бетонів без фібри. Бетони з фіброю довжиною 39 мм мають на 3...7 % більшу міцність, ніж бетони без фібри. Отримані результати підтверджують здатність фібри X-Mesh сприяти утворенню структурного каркасу, а також мікроармувати бетони.

Наші дослідження показали, що час перемішування фібробетонної суміші не робить значного впливу на міцність фібробетонів, тому у виробничих умовах при виготовленні фібробетонних сумішей досить його збільшення на 10...15 секунд, щоб перемішати фібру і щебінь або інертні заповнювачі. Можливо, що більшою мірою на міцність бетону впливає повітровтягувальна здатність фібри, яка може призводити до зниження міцності, в найбільшому ступені за стиском. З іншого боку, це може бути позитивним фактором, який дозволить зменшити витрату повітровтягувальної добавки для досягнення необхідного рівня додатково залученого повітря (4...6 %).

Таблиця 1

Показники якості фібробетонів

№ з/п	Вид фібри	Кількість фібри, кг/м ³	Середня густина бетону, кг/м ³	Міцність за згином R _{зг} , МПа, у віці, діб			Міцність за стиском R _{ст} , МПа, у віці, діб		
				3	7	28	3	7	28
1	Без фібри	-	2461	5,0	5,9	6,9	38,5	43,4	46,7
2	23 мм	1,0	2432	5,5	6,7	7,7	37,8	43,4	47,0
3		1,5	2424	6,1	7,1	7,7	37,1	42,9	46,6
4		2,0	2413	5,5	6,6	7,5	35,1	42,0	43,5
5	39 мм	1,0	2431	5,9	6,0	7,5	42,5	45,6	48,0
6		1,5	2421	6,1	7,1	7,8	41,2	46,6	48,4
7		2,0	2409	5,5	6,7	7,7	41,8	44,7	47,4

Також оцінювали вплив рухомості бетонних сумішей на властивості бетонів. Рухомість змінювали, тому що в дорожніх бетонах застосовують два типи сумішей – марки Р1 і марки Р2...Р3. У проведених дослідженнях марка за рухомістю Р1 відповідала осадці конуса бетонної суміші ОК = 2...4 см, марка за рухомістю Р2...Р3 відповідала осадці конуса бетонної суміші ОК = 8...9 см. За рухомістю Р1 суміші виготовляють для укладання і ущільнення комплектом машин типу Wirtgen або Gomaco. За рухомістю Р2...Р3 суміші призначені для ущільнення віброрейкою або глибинними вібраторами. Обидві технології постійно застосовують для дорожніх цементобетонів.

У випробуваннях використовували фібру в кількості 1,5 кг/м³, яка є оптимальною за результатами проведених раніше експериментів. Дослідження показали, що при рухомості суміші Р1 міцність фібробетону за стиском не нижче міцності бетону без фібри (табл. 2). Проте міцність фібробетонів за згином вище міцності бетонів без фібри на 21...25 %.

Бетони з фіброю довжиною 39 мм мають міцність за згином вище, ніж бетони без фібри на 20 %, що приблизно стільки ж, як у фібробетонів з фіброю довжиною 23 мм (табл. 3). Міцність фібробетонів за стиском не нижче, ніж у бетонів без фібри.

Таблиця 2

Показники якості фібробетонів з фіброю довжиною 23 мм із сумішей рухомістю Р1

№ з/п	Вид фібри	Кількість фібри, кг/м ³	Середня густина бетону, кг/м ³	Міцність за згином R _{зг} , МПа, у віці, діб		Міцність за стиском R _{ст} , МПа, у віці, діб	
				7	28	7	28
1	Без фібри	-	2420	4,0	5,6	40,4	48,5
2	23 мм	1,5	2390	5,0	6,8	40,9	49,9

Таблиця 3

Показники якості фібробетонів з фіброю довжиною 39 мм із сумішей рухомістю Р1

№ з/п	Вид фібри	Кількість фібри, кг/м ³	Середня густина бетону, кг/м ³	Міцність за згином R _{зг} , МПа, у віці, діб		Міцність за стиском R _{ст} , МПа, у віці, діб	
				7	28	7	28
1	Без фібри	-	2385	4,7	5,8	38,9	48,5
2	39 мм	1,5	2360	5,6	7,0	38,2	48,1

Слід зазначити, що за результатами проведених досліджень очевидне зниження середньої густини бетонів при введенні в них фібри, причому ця закономірність зростає зі збільшенням кількості фібри у складі бетону.

Збільшення рухомості бетонної суміші з марки P1 до P2 не змінює загальної закономірності зміни міцності, встановленої для бетонів з фіброю довжиною 23 мм (табл. 4).

Слід зазначити, що зміни міцності при переході від меншої рухомості бетонних сумішей до більшої не відбулося (табл. 4, 5), що можна пояснити дією високоєфективного полікарбоксилатного суперпластифікатора Fk59.

Важливими експлуатаційними показниками дорожніх бетонів є водопоглинання, яке опосередковано визначає морозостійкість і сам показник морозостійкості.

Таблиця 4

Показники якості фібробетонів з фіброю довжиною 23 мм із сумішею рухомістю P2

№ з/п	Вид фібри	Кількість фібри, кг/м ³	Середня густина бетону, кг/м ³	Міцність за згином R _{зг} , МПа, у віці, діб		Міцність за стиском R _{ст} , МПа, у віці, діб	
				7	28	7	28
1	Без фібри	-	2440	5,0	5,8	35,7	43,3
2	23 мм	1,5	2420	5,8	6,7	36,5	43,6

Таблиця 5

Показники якості фібробетонів з фіброю довжиною 39 мм із сумішею рухомістю P2

№ з/п	Вид фібри	Кількість фібри, кг/м ³	Середня густина бетону, кг/м ³	Міцність за згином R _{зг} , МПа, у віці, діб		Міцність за стиском R _{ст} , МПа, у віці, діб	
				7	28	7	28
1	Без фібри	-	2410	4,4	5,8	38,3	45,6
2	39 мм	1,5	2400	4,9	6,2	39,3	45,3

Дослідження показали, що при витраті фібри X-Mesh в оптимальній кількості 1,5 кг/м³ фібробетони мають низьке водопоглинання, на рівні 2,4...2,5 % за масою, що нижче допустимого значення 4 % (табл. 6). Слід зазначити, що показники водопоглинання і середньої густини у фібробетонів, що мають у своєму складі фібру різної довжини, однакові.

Дослідження морозостійкості показали, що фібробетони з фіброю X-Mesh різної довжини мають однакову марку за морозостійкістю F200, що відповідає мінімально допустимій марці для всієї території України (табл. 7). Мінімально допустимим коефіцієнтом морозостійкості є K_{мрз} = 0,95.

Таблиця 6

Експлуатаційні показники фібробетонів з фіброю X-Mesh

Довжина фібри, мм	Кількість фібри, кг/м ³	Водопоглинання за масою W, %	Середня густина бетону, кг/м ³
23	1,5	2,41	2406...2446
39	1,5	2,47	2404...2432

Морозостійкість фібробетонів з фіброю X-Mesh

Довжина фібри, мм	Кількість фібри, кг/м ³	Міцність за стиском R _{ст} , МПа, перед початком випробувань	Міцність за стиском R _{ст} , МПа, після кількості циклів випробувань		Коефіцієнт морозостійкості після кількості циклів випробувань	
			10	20	10	20
23	1,5	48,1	45,7	45,6	0,95	0,95
39	1,5	46,4	46,7	44,4	1,01	0,96

Ці результати важливі ще й тому, що марка за морозостійкістю забезпечена в бетонах, у складі яких відсутня повітровтягувальна добавка, тобто така морозостійкість забезпечена завдяки фібрі X-Mesh.

Висновки

1. Показано, що в практиці дорожнього будівництва найбільш економічно застосовувати поліпропіленову фібру, здатну добре чинити опір внутрішнім і зовнішнім агресивним факторам.

2. Встановлено, що застосування поліпропіленової фібри нового типу X-Mesh довжиною 23 і 39 мм, що має здатність створювати структурний каркас усередині

бетону і при цьому дисперсно його армувати, дає змогу підвищити міцність фібробетонів за згином на 22 %. При цьому міцність бетонів з фіброю X-Mesh за стиском не знижується і може зростати на 7 % на відміну від бетонів з іншими видами фібри.

3. Визначено, що середня густина фібробетонів нижче, ніж бетонів без фібри на 1...3 %, що пояснюється повітровтягувальною здатністю фібри. Ця властивість фібри дозволяє забезпечити бетонам з фіброю X-Mesh необхідну марку за морозостійкістю без застосування повітровтягувальних добавок.

Список використаних джерел

1. Tehmina Ayub, Nasir Shafiq, M. Fadhil Nuruddin. Mechanical Properties of High-Performance Concrete Reinforced with Basalt Fibers. *Procedia Engineering*. 2014. № 77. P. 131–139.
2. Applications of Fiber Reinforced Concrete in Pavements. URL :<http://theconstructor.org/concrete/fibre-reinforced-concrete-in-pavements/4781/> (дата звернення: 08.12.2021).
3. Brown R., Shukla A., Natarajan K.R. 2002. Fibre reinforcement of concrete structures. Technical Report (URITC Project No. 536101) for University of Rhode Island Transportation Centre. URL: <https://cupdf.com/document/536101.html> (дата звернення: 01.12.2021).
4. Shen L. J., Xu J. Y., Li W. M., Fan F. L., Yang J. Y. Experimental investigation on the static and dynamic behaviour of Basalt fibres reinforced concrete. *Concrete*. 2008. № 4. P. 026-034.
5. Artemenko S. E. Polymer composite materials made from carbon, Basalt, and glass fibres. Structure and properties. *Fibre Chemistry*. 2003. № 35(3). P. 226–229.
6. Brik V., Ramakrishnan V., Tolmare N. Performance evaluation of 3-D Basalt fibre reinforced concrete & Basalt rod reinforced concrete. *Final Report for Highway IDEA Project 45*. 1998. 97 p.
7. Piotr Berkowskia, Marta Kosior-Kazberuk. Effect of fiber on the concrete resistance to surface scaling due to cyclic freezing and thawing. *Procedia Engineering*. 2015. № 111. P. 121–127.
8. Pigeon M., Pleau R., Azzabi M., Banthia N. Durability of microfiber-reinforced mortars. *Cem Concr Res*. 1996. № 26. P. 601-609.

9. Pigeon M., Talbot C., Marchand J., Hornain H. Surface microstructure and scaling resistance of concrete. *Cem Concr Res.* 1996. № 26. P. 1555-1566.
10. Толмачев С. Н., Беличенко Е. А., Захаров Д. С. Повышение свойств дорожных бетонов введением полипропиленовой фибры. *Строительные материалы и изделия.* 2016. № 1. С. 76–79.
11. Mu R., Miao C., Luo X., Sun W. Interaction between loading, freeze-thaw cycles, and chloride salt attack of concrete with and without steel fiber reinforcement. *Cem Concr Res.* 2002. № 32. P. 1061-1066.
12. Niu D., Jiang L., Bai M., Miao Y. Study of the performance of steel fiber reinforced concrete to water and salt freezing condition. *Mat Des.* 2013. № 44. P. 267-273.
13. Richardson A. E. Freeze/thaw durability in concrete with fibre additions. *Structural Survey.* 2003. № 21. P. 225–233.
14. Valenza II, Scherer G.W. A review of salt scaling: I. Phenomenology. *Cem Concr Res.* 2007. № 37. P. 1007–1021.
15. ДСТУ 8858:2019. Суміші цементобетонні дорожні та цементобетон дорожній. Технічні умови. [Чинний від 2020-07-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 20 с.

Толмачов Сергій Миколайович, доктор технічних наук, професор кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. ORCID: 0000-0003-1011-3861. Тел.: +38 (050) 303-68-48. E-mail: Tolmachov.serg@gmail.com.

Беліченко Олена Анатоліївна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. ORCID: 0000-0002-7444-8188. Тел.: +38 (066)802-66-50. E-mail: Olena.belichenko@gmail.com.

Дядюшко Роман Вікторович, заступник директора ТОВ НВП «Стандарт». Тел.: +38 (067) 567-45-77. E-mail: info@standart-ua.com.

Tolmachov Serhii, Doct. of Science (Tech.), professor, Department of the Technology of Road Building Material, Kharkov national automobile und highway university. ORCID: 0000-0003-1011-3861. Tel.: +38(050) 303-68-48. E-mail: Tolmachov.serg@gmail.com.

Belichenko Olena, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher, Department of the Technology of Road Building Material, Kharkov national automobile und highway university. ORCID: 0000-0002-7444-8188. Tel.: +38 (066) 802-66-50. E-mail: Olena.belichenko@gmail.com.

Diadiushko Roman, Deputy Director, Research and Production Enterprise Standart LLC. Tel. + 38 (067) 567-45-77. E-mail: info@standart-ua.com.

Статтю прийнято 13.12.2021 р.