

УДК 625.7/8

О. О. Арінушкіна*

асистент, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6870-3764>

Кафедра будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Біруля
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

Д. Ю. Костін

к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4278-2990>

Кафедра будівництва та експлуатації автомобільних доріг ім. О.К. Біруля
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25,
Харків, Україна, 61002

*автор-кореспондент, e-mail: lenaarinushkina@gmail.com

**Дослідження оптимальної концентрації поліпропіленових
фіброволокон у крупнозернистих щебенево-піщаних сумішах,
укріплених цементом**

Цитувати як:

Арінушкіна, О. О., Костін, Д. Ю. (2025). Дослідження оптимальної концентрації поліпропіленових фіброволокон у крупнозернистих щебенево-піщаних сумішах, укріплених цементом. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 23, 19-30. [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-02)

© 2025, Арінушкіна, О. О., Костін, Д. Ю.

Анотація. Останнім часом щебенево-піщані суміші є одним із найбільш широко застосовуваних дорожньо-будівельних матеріалів для влаштування шарів основ дорожніх одягів в Україні. Все частіше під час будівництва, ремонтів та реконструкції автомобільних доріг для їх укріплення застосовуються як мінеральні, так і комбіновані в'язучі. Одним із шляхів покращення властивостей будівельних матеріалів є їх армування різними фіброволокнами. Аналіз літературних джерел показав, що введення фіброволокон до складу ґрунтів, зміцнених цементом, а також цементбетонів суттєво покращує фізико-механічні властивості та довговічність цих дорожньо-будівельних матеріалів.

У статті представлено результати виконаного експериментального дослідження стосовно встановлення оптимального вмісту поліпропіленових фіброволокон на фізико-механічні властивості крупнозернистих щебенево-піщаних сумішей, укріплених мінеральним в'язучим (цементом). Дослідження виконані на крупнозернистій щебенево-піщаній суміші зміцненій цементом у кількості 2 %.

Результатами дослідження встановлено, що для даних сумішей за досліджуваними показниками, а саме міцність на стиск та міцність на непрямий розтяг, оптимальний вміст поліпропіленової фібри довжиною 18 мм становить 0,03 % від маси мінеральної частини суміші. За цих концентрацій показник границі міцності на стиск збільшується на 3,4 %, а міцність на непрямий розтяг збільшується на 35 %. Встановлено, що подальше збільшення концентрації

поліпропіленових фіброволокон від оптимального, призводить до негативного впливу на показники, що досліджувалися, та нівелює їх роботу в матеріалі, так як відбувається перенасичення суміші волоконм і велика їх кількість збивається в пучки, які нерівномірно розподіляються в суміші та в кінцевому результаті погіршують фізико-механічні показники.

Ключові слова: автомобільна дорога, дорожній одяг, шари основи, ремонтно-будівельні роботи, фіброволокна, міцність на стиск, міцність на непрямий розтяг.

Вступ

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Зараз в Україні спостерігається стійка тенденція до збільшення використання в якості шарів основ дорожніх одягів щебеневно-піщаних матеріалів, укріплених різними в'язучими. Можливе їх укріплення як неорганічними, органічними та комбінованими в'язучими. Частіше за все використовуються мінеральні в'язучі (як правило цемент). Такі шари є достатньо міцними, при цьому їх вартість є відносно невеликою завдяки тому, що вміст в'язучого в їх складі мінімальний. Але головним їх недоліком є низька морозо- та тріщиностійкість, а це може впливати на довговічність всієї конструкції дорожнього одягу. В умовах клімату України, де кількість переходів середньодобової температури через 0 °C в осінньо-зимово-весняний період майже по всій її території є надзвичайно великою і матеріали в шарах дорожнього одягу піддаються багатьом циклам заморожування-відтавання, ця проблема постає особливо актуальною. Тому проблема удосконалення технології приготування щебеневно-піщаних сумішей, укріплених цементом є дуже гострою і актуальним питанням є пошук недорогих, але ефективних способів покращення їх властивостей. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є додавання фіброволокон (поліпропіленових, базальтових, целюлозних, сталевих, скловолкна та ін.) у склад цих сумішей. Відомо, що фіброволокна у складі будівельних матеріалів дозволяють створити міцний та стійкий до утворення мікротріщин та усадки матеріал. Але на даний момент чітко не визначено вплив їх концентрації на фізико-механічні властивості укріплених крупнозернистих щебеневно-піщаних сумішей. Проте є досить багато інформації щодо їх використання в інших матеріалах, що застосовуються в шарах дорожніх одягів. Визначенням впливу різних фіброволокон різної довжини та у різній концентрації в матеріалах, що використовуються для влаштування шарів основ дорожніх одягів займалися Жданюк В.К., Оніщенко А.В., Гамеляк І.П., Толмачов С.М., Панасюк Я.І., Сідун Ю.В., Бражнік Г.В. Сунь Дзянь, та інші. Аналіз літературних джерел [1] показав, що додавання поліпропіленових фіброволокон у склад ґрунтів в оптимальній кількості 0,05 % від маси ґрунту дозволяє підвищити марку цього матеріалу за міцністю. За даними автора Встановлено, що при

введенні 0,05 % поліпропіленових фіброволокон до складу цементогрунту різних марок за міцністю, підвищується значення границі міцності на розтяг при згині – в межах від 1,55 до 1,80 разів, а також зростання модуля пружності від 1,30 до 1,50 рази. Ефективність від додавання поліпропіленових фіброволокон до складу окремих марок цементогрунту полягає у переході його арки за міцністю та за величиною модуля пружності, а також границі міцності на розтяг при згині в більш високу марку. Введення 0,05% поліпропіленових фіброволокон до складу цементогрунту марки М40, підвищує його в марку М60 за фактичними значеннями розрахункових характеристик. У роботі Сунь Дзяня [2] встановлено, що оптимальною концентрацією базальтових фіброволокон у складі щебенево-піщаних сумішей із залістистих кварцитів є 0,05% від їх піщаної частини. При цій концентрації досягаються максимальні значення фізико-механічних властивостей цих сумішей та розрахункових характеристик. Спостерігається максимальне зростання значень границі міцності за стиску, границі міцності на непрямий розтяг та значень розрахункових характеристик матеріалу з ЩПС-40 із залістистих кварцитів зміцнених 4% цементу.

У дисертаційній роботі Бражнік А.В. [3] було досліджено вплив поліпропіленових та інших видів фіброволокон на властивості монолітних дорожніх цементних бетонів. Авторкою було визначено позитивний вплив поліпропіленових фіброволокон разом із повітроутягуючою добавкою на показник морозостійкості даного матеріалу, хоча і спостерігалось зниження міцності бетонів на стиск. Також було визначено, що застосування фібри замість повітроутягуючої добавки сприяло меншому зниженню міцності бетону за однакового повітроутягненні. Також вчені [4,5] займались вивченням впливу поліпропіленових фіброволокон на матеріали, що застосовуються в якості шарів основ дорожніх одягів та їх позитивний вплив на їх фізико-механічні властивості. Попередні дослідження [6] показали, що при вмісті поліпропіленових фіброволокон 0,05% від маси мінерального матеріалу в укріплених цементом щебенево-піщаних сумішах спостерігається зростання досліджених показників границі міцності за стиску та границі міцності на розтяг при вигині в 1,18 рази та 1,79 рази відповідно для марки М10. На сумішах марки за міцністю М75 ефект від введення фіброволокон зменшується 1,09 та 1,35 рази. За вмісту фіброволокон у кількості 0,05% для укріплених дрібнозернистих, середньозернистих, та крупнозернистих щебенево-піщаних сумішей не спостерігалось. Тому, на даному етапі, актуально дослідити вплив концентрації поліпропіленових фіброволокон на укріплені крупнозернисті щебенево-піщані суміші, особливо низьких марок, які набули найбільш широкого застосування, залишається майже не досліджений.

Мета і завдання дослідження. Для щебенево-піщаних сумішей укріплених цементом, особливо низьких марок, які останнім часом набули

найбільш широкого застосування при виконанні ремонтно-будівельних робіт на дорожній мережі, є низька тріщиностійкість та морозостійкість, особливо для матеріалів які за міцністю, відповідають марці М20. Одним із способів покращення цих показників є додавання фіброволокон до їх складу. Таким чином метою даного дослідження є встановлення оптимального вмісту поліпропіленових фіброволокон в крупнозернистій щебенево-піщаній суміші укріпленій цементом марки М20, для проведення подальших досліджень їх впливу на морозостійкість.

Матеріали та методи

Для приготування щебенево-піщаних сумішей згідно вимог ДСТУ 9177-3:2022 [7] використовувався щебінь та відсів подрібнення гранітної гірської породи виробництва Мало-Конівського спецкар'єру. Вихідний кам'яний матеріал був перевірений на відповідність чинних стандартів та розподілений за фракціями (крім відсіву), отримані гранулометричні склади кам'яних матеріалів представлені в таблиці 1.

Таблиця 1. Гранулометричні склади прийнятих для досліджень вихідних матеріалів

Розмір сит, мм	40	20	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,071	<0,071
Відсів 0-5 мм	0	0	0	0	29	47	63	79	89	97	100
Щебень 5-10 мм	0	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100
Щебень 10-20 мм	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Щебень 20-40 мм	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

З отриманих мінеральних складових була розрахована і прийнята для подальших досліджень крупнозерниста щебенево-піщана суміш гранулометричний склад якої максимально наближений до середнього та відповідав вимогам [7]. Прийнятий для досліджень зерновий склад представлено на рис. 1.

В якості мінерального в'язучого використовувався портландцемент виробництва ПрАТ «Івано-Франківськ цемент» марки М400 властивості якого відповідали вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010 [8] та вода згідно ДСТУ Б В.2.7-273:2011 [9]. Для досліджень використовувались фіброволокна довжиною 18 мм виготовлені за ТУ У 24.7-32781078-001:2006 [10].

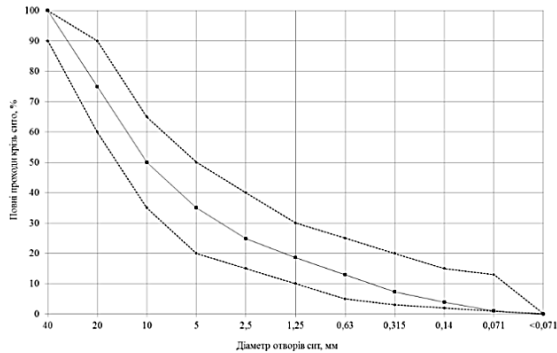


Рис. 1. Прийнятий для подальших досліджень зерновий склад крупнозернистої щебенево-піщаної суміші

Приготування укріпленої щебенево-піщаної суміші виконувалось за допомогою лабораторної мішалки (рис. 2).



Рис. 2. Лабораторна мішалка для приготування сумішей

Безпосередньо в мішалку на першому етапі вводилась піщана частина суміші, наступним компонентом вводили цемент, для сумішей з фіброволокнами, їх вводили разом з 2-ма відсотками цементу. Після чого виконували перемішування протягом 60 сек з 50 % вмістом води від розрахованого складу. Поліпропіленові фіброволокна вводили до загального складу суміші у кількості 0,01 %, 0,03 %, 0,05 % та 0,07 %. Під час перемішування сумішей з вмістом фібри 0,05 % та 0,07 % візуально спостерігалось скупчення фібри в окремі пучки, що свідчить про перенасичення сумішей фіброю (рис. 3 та рис. 4).

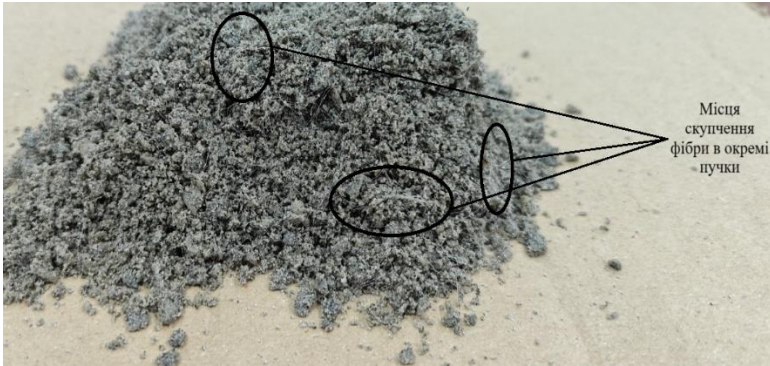


Рис. 3. Піщана частина суміші з вмістом фіброволокон 0,05 %

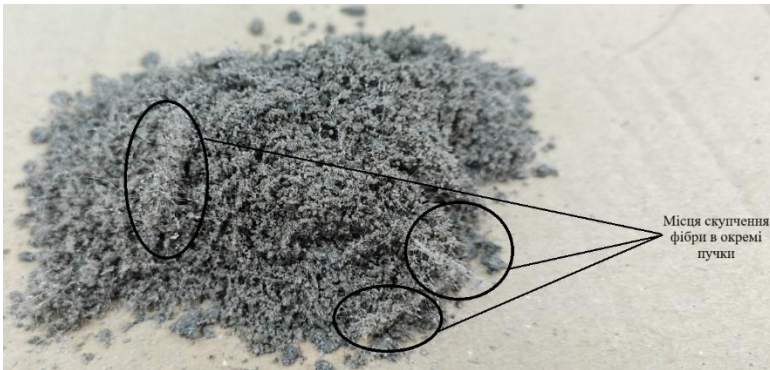


Рис. 4. Піщана частина суміші з вмістом фіброволокон 0,07 %

Наступним етапом приготування суміші було вивантаження перемішаних матеріалів з мішалки та подальше їх ручне перемішування зі щелевеною частиною та часткою води, що залишилась.

Після приготування сумішей, методом пресування виготовлялись лабораторні зразки-циліндри, які відповідним чином маркувались та переміщувались в ванну з гідравлічним затвором на 26 діб до набору проектної міцності.

Під час проведення випробувань використовувались стандартні методи для визначення показників міцності за стиску та на непрямий розтяг, для цього використовувалась випробувальна машина Р-20.

Результати та обговорення

Для проведення досліджень було виготовлено 5 серій зразків. Після витримування зразків у ванні з гідравлічним затвором, перед настанням 28 діб, зразки водонасичувались протягом 48 годин перед початком

проведення випробувань. Результати отриманих досліджень представлені на рис. 5 та рис. 6.

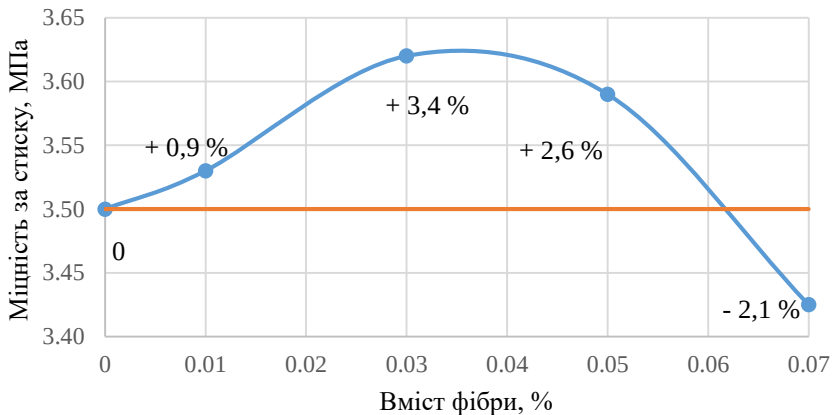


Рис. 5. Результати досліджень показника міцність за стиску від вмісту фібри

Аналіз отриманих результатів дослідження показав, що на показник границя міцності при стиску для крупнозернистих щебенево-піщаних сумішей суттєвого впливу вміст фібри не оказує. Максимальний приріст склав 3,4% при концентрації фіброволокон у складі суміші 0,03%. При вмісті фіброволокон у складі суміші 0,07% показник границі міцності за стиску зменшився на 2,1%, що свідчить про перенасичення суміші фіброволокнами та отримання негативного за даного вмісту впливу на структуру укріпленої щебенево-піщаної суміші.

Вплив фіброволокон більш суттєво оказує на міцність на непрямий розтяг ніж за стиску та є більш інформативним показником. Встановлено, що при концентрації фібри у кількості 0,03%, в складі крупнозернистої щебенево-піщаної суміші, можливо досягти підвищення міцності матеріалу на непрямий розтяг на 35% в порівнянні з укріпленими крупнозернистими щебенево-піщаними сумішами без фіброволокон. Після руйнування зразків, в зразках з вмістом поліпропіленових фіброволокон 0,05% та 0,07% в структурі матеріалу спостерігалися окремі пучки, що свідчить про нерівномірний розподіл фібри в матеріалі. Фотофіксація поверхні розколу окремих зразків після випробування на міцність з різним вмістом фіброволокон на непрямий розтяг наведені на рис. 7.

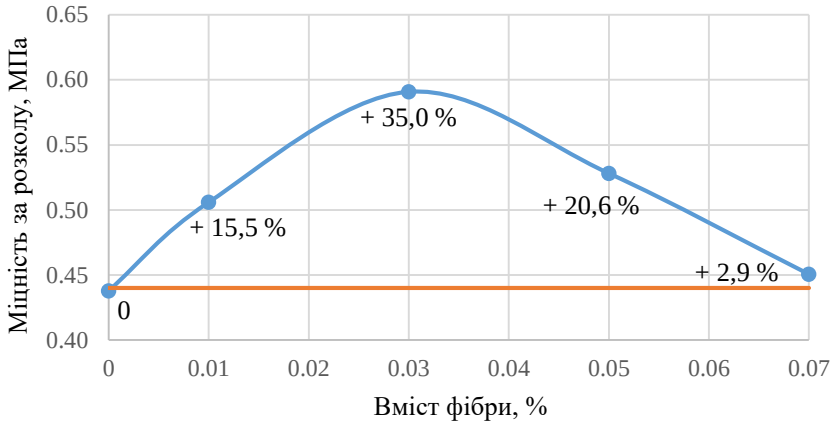


Рис. 6. Результати досліджень показника міцність на непрямий розтяг від вмісту фібри

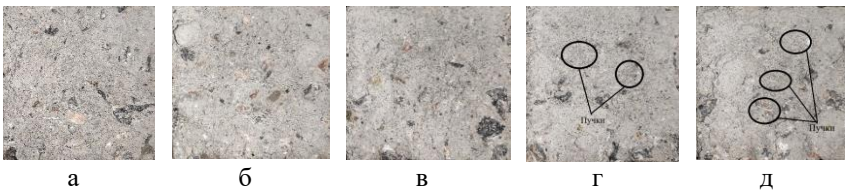


Рис.7 . Фотофіксація окремих зразків після випробування на міцність на непрямий розтяг: а – зразок без фібри; б – зразок з 0,01 % фібри; в – зразок з 0,03 % фібри; г – зразок з 0,05 % фібри; д – зразок з 0,07 % фібри

Узагальнюючі отримані результати досліджень, можна констатувати, що наявність поліпропіленових фіброволокон у складі крупнозернистої щебенево-піщаної суміші марки за міцністю М20 оказує позитивний вплив на міцнісні характеристики. Це дозволяє зробити припущення, що запропонована технологія удосконалення укріплення щебенево-піщаних сумішей покращить не лише міцнісні показники, а також морозостійкість.

Подальшими дослідженнями пропонується встановити оптимальний вміст фіброволокон окремо для піщаної частини та спробувати створити кореляційні залежності, для розрахунку оптимального вмісту фіброволокон від вмісту піщаної частини у складі суміші.

Висновки

За отриманими результатами досліджень встановлено, що додавання фіброволокон у склад укріплених цементом крупнозернистих щебенево-піщаних сумішей позитивно впливає на їх механічні властивості.

Для дослідженої суміші, за наведеними показниками, оптимальний вміст поліпропіленових фіброволокон становить 0,03 %. Найбільш інформативним показником роботи фіброволокон у складі крупнозернистої щебенево-піщаної суміші марки М20 є показник міцність на непрямої розтяг.

Подальше збільшення концентрації фіброволокон від оптимального, призводить до негативного впливу на досліджені показники та нівелює їх роботу в матеріалі, так як відбувається перенасичення суміші фіброволокнами, велика їх кількість хаотично збивається в пучки, які в кінцевому результаті, не можуть рівномірно розподілитись в структурі матеріалу і в результаті знижують показники міцності.

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.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

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

References

1. Panasyuk Ya. Improved technology of soil strengthening by cement for highway construction: dis. for the degree of Candidate of Technical Sciences: specialty. 05.22.11 " Highways and airfields " / Ya. Panasyuk. Kharkiv. 2013. 190 p.
2. Sun Jian. Increasing of the durability of road pavement layers constructed using crushed stone-sand mixtures from ferruginous quartzites: dissertation for the degree of Doctor of Philosophy: specialty. 192 " Highways and airfields " / Jian Sun. Kharkiv. 2025. 212 c.

3. Brazhnyk G. Monolithic road cement concretes of high frost resistance with organomineral complex and fiber: author's abstract of the dissertation of candidate of technical sciences. UkrDAZT. G. Brazhnyk. Kharkiv. 2015. 24 p.
4. Zhang P. Shrinkage properties of cement-stabilized macadam reinforced with polypropylene fiber. P. Zhang, Q.F. Li, C.K. Huang, J Traf. Transp Eng. 2008. 8. P. 30-34.
5. Ma Y.H. Experimental research on flexural toughness of semi-rigid base mixed into polypropylene fiber. Y.H. Ma, G. Zhang, Z.J. Yi, Y.S. Zhong, B.X. Han Journal of Chongqing Jiaotong University. 2007. 4. P. 57-60.
6. Arinushkina O. Cement-reinforced gravel-sand mixtures for the construction of road surfaces. // Scientific Bulletin of Construction. Arinushkina O., Zhdanyuk V – 2016. - №1(83). – P. 120-125.
7. DSTU 9177-3:2022. Crushed stone and gravel materials for road construction. Specifications. Part 3. Materials reinforced with mineral binders [Valid from 2023-01-01]. – K.: UkrNDNC, 2023. 20 p. (State standard of Ukraine).
8. DSTU B V.2.7-46:2010. Building materials. Cements for general construction purposes. Technical conditions. [Valid from 2011-09-01]. – K.: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 2011. 15 p. (State standard of Ukraine).
9. DSTU Б V.2.7-273:2011. Building materials. Water for concrete and mortars. Technical conditions. [Valid from 2012-12-01]. – K.: Research Institute of Building Materials and Products 2012. – 14 p.
10. TC U 24.7-32781078-001:2006. Polypropylene reinforcing fiber (PRF). [Electronic resource]. Available: <http://plastificator.com.ua/cert/Fibers.pdf>. Date of application: April 28, 2017.

Література

1. Панасюк Я.І. Удосконалення технології укріплення ґрунтів цементом для будівництва автомобільних доріг: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.11 "Автомобільні шляхи та аеродроми" / Я.І. Панасюк. Харків. 2013. 190 с.
2. Сунь Цзянь. Підвищення довговічності шарів дорожнього одягу влаштованих з використанням щебенево-піщаних сумішей із залізистих кварцитів: дис. на здобуття наук. ступеня доктора філософії: спец. 192 "Будівництво та цивільна інженерія" / Цзянь Сунь. Харків. 2025. 212 с.
3. Бражник Г.В. Монолітні дорожні цементні бетони високої морозостійкості з органомінеральним комплексом та фіброю : автореф. дис. канд. техн. наук. УкрДАЗТ. Г.В. Бражник. Харків. 2015. 24 с.
4. Zhang P. Shrinkage properties of cement-stabilized macadam reinforced with polypropylene fiber. P. Zhang, Q.F. Li, C.K. Huang, J Traf. Transp Eng. 2008. 8. P. 30-34.

5. Ma Y.H. Experimental research on flexural toughness of semi-rigid base mixed into polypropylene fiber. Y.H. Ma, G. Zhang, Z.J. Yi, Y.S. Zhong, B.X. Han Journal of Chongqing Jiaotong University. 2007. 4. P. 57-60.
6. Аринушкіна О.О. Укріплені цементом щебеневі-піщані суміші для будівництва дорожніх одягів автомобільних доріг. // Науковий вісник будівництва. Аринушкіна О.О., Жданюк В.К. – 2016. - №1(83). – С. 120-125.
7. ДСТУ 9177-3:2022. Матеріали щебеневі та гравійні для дорожнього будівництва. Технічні умови. Частина 3. Матеріали, укріплені мінеральними в'язучими [Чинний від 2023-01-01]. – К.: УкрНДНЦ, 2023. 20 с. (Державний стандарт України).
8. ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови. [Чинний від 2011-09-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. 15 с. (Державний стандарт України).
9. ДСТУ Б В.2.7-273:2011. Будівельні матеріали. Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови. [Чинний від 2012-12-01]. – К.: Науково-дослідний інститут будівельних матеріалів і продукції, 2012. – 14 с.
10. ТУ У 24.7-32781078-001:2006. Волокно армуюче поліпропіленове (ВАП). [Електронний ресурс]. Доступно: <http://plastificator.com.ua/cert/Fibers.pdf>. Дата звернення: Квітень 28, 2017.

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 23.05.2025	Received 23.05.2025
Отримано у доопрацьованому вигляді 24.05.2025	Received in revised form 24.05.2025
Прийнято 01.06.2025	Accepted 01.06.2025
Опубліковано 25.06.2025	Published 25.06.2025

O. O. Arinushkina*

assistant, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6870-3764>

Department of Highway Building and Maintenance named after O.K. Birulya
Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudrogo str., 25, Kharkiv,
Ukraine, 61002

D. Yu. Kostin

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4278-2990>

Department of Highway Building and Maintenance named after O.K. Birulya
Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslav Mudrogo str., 25, Kharkiv,
Ukraine, 61002

*corresponding author, e-mail:

lenaarinushkina@gmail.com

Research of the optimal concentration of polypropylene fibers in coarse-grained crushed stone-sand mixtures reinforced with cement

How to Cite:

Arinushkina, O. O., Kostin, D. Yu. (2025). Research of the optimal concentration of polypropylene fibers in coarse-grained crushed stone-sand mixtures reinforced with cement. *Modern technologies*

and methods of calculations in construction, 23, 19-30. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13\(23\)-02](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2025-13(23)-02)

Abstract. Recently crushed stone-sand mixtures are one of the most widely used road construction materials for the arrangement of base layers of road pavements in Ukraine. More and more often both mineral and combined binders are used to strengthen roads during construction, repairs and reconstruction. One of the ways to improve the properties of building materials is to reinforce them with various fibers. Analysis of literature sources has shown that the addition of fibers into the composition of cement-reinforced soils and cement concretes significantly improves the physical and mechanical properties and durability of these road-building materials.

The article presents the results of an experimental study on the establishment of the optimal content of polypropylene fibers on the physical and mechanical properties of coarse-grained crushed stone-sand mixtures reinforced with mineral binder (cement). The studies were carried out on a coarse-grained crushed stone-sand mixture reinforced with cement in an amount of 2%.

The results of the study showed that for these mixtures, according to the studied indicators, namely compressive strength and indirect tensile strength, the optimal content of polypropylene fiber with a length of 18 mm is 0.03% of the mass of the mineral part of the mixture. At these concentrations, the compressive strength limit increases by 3.4%, and the indirect tensile strength increases by 35%. It was found that a further increase in the concentration of polypropylene fibers from the optimal one leads to a negative impact on the indicators studied and levels their work in the material, as the mixture is oversaturated with fibers and a large number of them are knocked into bundles, which are unevenly distributed in the mixture and ultimately worsen the physical and mechanical indicators.

Keywords: highway, road surface, base layers, repair and construction works, fiber fibers, compressive strength, indirect tensile strength.