https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.144

УДК 691.32

Кровяков С. О., *д-р техн. наук, проф., http://orcid.org/0000-0002-0800-0123*
Шестакова Л. Є., *https://orcid.org/0000-0002-3449-8498*
Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса, Україна

МІЦНІСТЬ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ І МОРОЗОСТІЙКІСТЬ ФІБРОБЕТОНІВ ЖОРСТКИХ ДОРОЖНІХ ПОКРИТТІВ ІЗ БАЗАЛЬТОВОЮ ФІБРОЮ ТА ПОВІТРОВТЯГУЮЧОЮ ДОБАВКОЮ

Анотація

Вступ. Підвищення довговічності жорстких дорожніх покриттів дозволяє знизити витрати на утримання доріг за рахунок подовження міжремонтних інтервалів. Дисперсне армування є відомим методом підвищення морозостійкості та зносостійкості бетону, що позитивно впливає на довговічність дорожніх покриттів в типових для України кліматичних умовах. Базальтова фібра є стійкою до корозії та відносно недорогою, що робить її перспективною для використання у дорожній галузі. Також при приготуванні бетонів жорстких покриттів необхідно використовувати пластифікуючі та повітровтягуючі добавки.

Проблематика. В сучасних економічних умовах та з врахуванням технологічних особливостей приготування сумішей актуальним є порівняння ефективності застосування відомих методів покращення властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів: дисперсного армування і використання повітровтягуючої добавки. Також важливою з науковою та практичної точок зору є задача вивчення доцільності одночасного використання даних методів модифікування бетонної суміші.

Мета. Визначення впливу базальтової фібри і повітровтягуючої добавки на міцність, морозостійкість і стиранність бетонів жорстких дорожніх покриттів.

Результати. Досліджено вплив базальтової фібри довжиною 12 мм і діаметром 18 мкм та повітровтягуючої добавки MICROPORAN на властивості бетонів жорстких дорожніх покриттів. Досліджувалися бетони без фібри, а також з фіброю у кількості 0,50 кг/м^3, 0,75 кг/м^3 і 1,0 кг/м^3. Всі суміші мали рухомість S1 і модифікувалися суперпластифікатором STACHEMENT 2570/5/G у кількості 0,6 % від маси цементу. При використанні 0,05 % MICROPORAN кількість залученого до суміші повітря зростає до (4,8–5,4) % а середня густина бетонів знижується на до (2 401–2 430) кг/м^3. При використанні MICROPORAN у кількості 0,15 % до суміші залучається (10,2–11) % повітря, а середня густина бетону знижується приблизно до (2 320–2 351) кг/м^3. Міцність бетонів на стиск знаходилася в діапазоні від 46,3 МПа до 63,2 МПа, міцність на розтяг при згині – в діапазоні від 5,83 МПа до 7,63 МПа. За рахунок дисперсного армування міцність бетонів на стиск зростає на 13–24 %, міцність на розтяг при згині – на (21–29) %. Повітровтягуюча добавка практично не впливає на міцність на розтяг при згині бетону, але викликає зниження міцності на стиск на (2–16) % при використанні 0,05 % MICROPORAN і на (9–21) % при використанні 0,15 % MICROPORAN. Стиранність бетону при використанні повітровтягуючої добавки практично не змінюється, а за рахунок введення базальтової фібри знижується на (14–15) %, що сприяє підвищенню довговічності матеріалу. Бетон без дисперсного армування і MICROPORAN мав морозостійкість F200. За рахунок дисперсного армування морозостійкість бетону досягає F300. При застосуванні 0,05 % повітровтягуючої добавки морозостійкість не змінюється або навіть дещо знижується, а при застосуванні 0,15 % для бетону без фібри зростає з F200 до F300 при фактичному зниженні витрати цементу.

Висновки. Завдяки використанню базальтової фібри а також комплексній модифікації суперпластифікатором полікарбоксилатного типу та повітровтягувальною добавкою

MICROPORAN отримано бетон для жорстких дорожніх покриттів з високою довговічністю та необхідною міцністю.

Ключові слова: базальтова фібра, повітровтягуюча добавка, жорстке дорожнє покриття, міцність, морозостійкість, стиранність.

Вступ

Дороги з жорсткими цементобетонними покриттями мають низку переваг перед дорогами з асфальтобетонними покриттями. Основними серед таких переваг є стійкість до утворення колії та висока довговічність при близький собівартості будівництва. Це обумовлює поступове збільшення частки цементобетонних доріг у розвинутих країнах, включаючи Україну [1]. При цьому задача підвищення якості та довговічності жорстких дорожніх покриттів залишається актуальною, тому що її вирішення дозволяє подовжити міжремонтні інтервали і відповідно знизити витрати на утримання доріг.

Внаслідок повномасштабної агресії проти нашої країни постраждала велика кількість об'єктів інфраструктури, зокрема доріг. При відновленні даних об'єктів важливо максимально використовувати матеріали на основі вітчизняних компонентів. Широке використання місцевих і нових сучасних дорожньо-будівельних матеріалів при конструюванні жорсткого дорожнього одягу передбачено також згідно ГБН В.2.3-37641918-557:2016 [2].

В кліматичних умовах України найбільш розповсюдженою причиною руйнування бетону дорожніх покриттів є дія заморожування і відтавання, насамперед у період коли бетон знаходиться у вологому стані [3]. Іншими причинами руйнувань є циклічні механічні впливи динамічного характеру, втомні пластичні деформації та деформації повзучості, дія рідких корозійних середовищ, насамперед сольових розчинів.

Для підвищення морозостійкості бетонів широко застосовується метод введення у його склад повітровтягуючої добавки одночасно з суперпластифікатором [4-6]. Аналогічна рекомендація щодо використання пластифікуючої та повітровтягуючої добавки при приготуванні бетонів жорстких покриттів міститься у ДБН В.2.3-4:2015 [7]. Згідно цього стандарту для забезпечення морозостійкості вміст втягнутого повітря бетонної суміші має складати від 5 % до 6 %. У дослідженнях С.М. Толмачева раціональнім називається діапазон вмісту повітря від 5 % до 7 % [8]. Важливим є не лише вміст повітря, а і розподілення пор за розмірами [9]. Наприклад у [10] за рахунок введення повітровтягуючої добавки у бетон аеродромного покриття отримано капілярно-порову структуру з більш рівномірним розподілом пор при зменшенні їх середнього діаметру. Це дозволило покращити морозостійкість одночасно зі стійкістю до дії речовин, що використовуються для запобігання обледенінню літаків.

Слід зауважити, що об'єм втягнутого до суміші повітря фактично може змінюватися в процесі транспортування та ущільнення бетону і відповідно суттєво відрізнятися від визначеного у лабораторних умовах [10, 11]. На цю різницю також впливає тип повітровтягуючої добавки [11]. Така технологічна особливість має враховуватися при проєктуванні складів сумішей з повітровтягуючою добавкою.

Дисперсне армування є ще одним відомим методом покращення тих властивостей бетону, які важливі для жорстких дорожніх покриттів та впливають на довговічність даних покриттів. У якості дисперсної арматури використовується фібра різних типів, але найбільш розповсюдженими є поліпропіленові, сталеві та базальтові волокна [6, 12-14]. При цьому базальтове волокно має ряд переваг, що робить його ефективним саме у дорожньому будівництві. До таких переваг можна віднести порівняно низьку вартість, високу технологічність за рахунок відносно легкого розподілу волокон у суміші та високу корозійну стійкість, що важливо з врахування умов експлуатації жорстких покриттів [15, 16].

Як показано у [6, 15, 17] та багатьох інших роботах, дисперсне армування базальтовою фіброю підвищує морозостійкості бетонів дорожніх покриттів. Також фібра знижує аутогенну усадку бетонів, підвищує їх тріщиностійкість та міцність [12, 16, 18-20]. Наприклад у роботі [12] за рахунок застосування базальтової фібри у кількості 0,25 % від об'єму бетону досягнуто 4,5 % приросту міцності на стиск і 13,8 % зростання динамічного модуля пружності. У [19] дисперсне армування підвищило міцність на згин бетонів дорожніх покриттів майже на 20 % і міцність на стиск на 9,4 %. При цьому суттєве значення мала довжина волокон. У [20] найбільше зростання міцності було відмічено при застосуванні базальтової фібри довжиною 36 мм у кількості 8 кг/м^3.

Таким чином серед інших існують два практично опрацьовані технологічні методи підвищення довговічності бетонів жорстких дорожніх покриттів: застосування базальтової фібри і застосування повітровтягуючої добавки. Дисперсне армування фіброю при цьому також позитивно впливає на міцність та тріщиностійкість бетонів. Тобто з наукової і економічної точок зору актуальною є задача порівняння ефективності застосування цих двох технологічних методів в бетонах дорожніх покриттів. Також актуальною є задача дослідження ефективності використання дисперсного армування одночасно з введенням повітровтягуючої добавки. При вирішенні даної задачі необхідно враховувати наявну в Україні сировинну базу, зокрема доступні на ринку типи цементів, добавок і фібри. Також слід враховувати особливості вимог до бетонних суміші для цементобетонних покриттів і вплив технології їх влаштування.

Матеріали та методика дослідження

Для приготування бетонних сумішей використовували наступні матеріали:

– портландцемент ПЦ І-500Р-Н виробництва філії «Волинь-Цемент» ПРАТ «Дікергофф Цемент Україна» [21];

– кварцовий пісок з модулем крупності 2,2, митий. Походження піску – Вознесенський район Миколаївської області;

– гранітний щебінь фракції 5-20 мм. Походження щебеню – Новобузькій район Миколаївської області;

– добавка суперпластифікатор STACHEMENT 2570/5/G виробництва ТОВ «Стахема Львів-сервіс». Виробляється на основі полікарбоксилатів [22];

– повітровтягуюча добавка MICROPORAN виробництва ТОВ «Стахема Львів-сервіс» [22];

– базальтової фібри BAUCON®-bazalt з довжиною волокон 12 мм і діаметр 18 мкм; Виробник фібри – ТОВ «Баутех-Україна» [23].

Було досліджено властивості 12 складів бетонів, які були поділені на 3 серії (**табл. 1**). У кожній серії виготовлялися 4 склади з різною кількістю дисперсної арматури: без фібри, а також з базальтовою фіброю у кількості 0,50 кг/м^3, 0,75 кг/м^3 і 1,0 кг/м^3. В першій серії (№ 1 – № 4) виготовлялися склади без повітровтягуючої добавки. В другій серії (№ 5 – № 8) виготовлялися бетони і фібробетони з повітровтягуючою добавкою MICROPORAN у кількості 0,05 % від маси цементу. У третій серії (№ 9 – № 12) кількість добавки MICROPORAN складала 0,15 % від маси цементу. Такі дозування повітровтягуючої добавки були обрані за результатами попередніх експериментів та з врахуванням рекомендації виробника. Проміжне дозування добавки у 0,10 % не було доцільним, тому що не дало суттєвої різниці у кількості залученого до суміші повітря порівняно з дозуванням добавки 0,05 %. Крім того при такому дозуванні MICROPORAN кількість залученого повітря та рухомість суміші були більш залежні від часу перемішування, що ускладнювало порівняння.

Під час усіх досліджень у бетонну суміш вводився суперпластифікатор STACHEMENT 2570/5/G у кількості 0,6 % від маси цементу. Рухомість всіх бетонних сумішей була рівною S1 (ОК від 2,0 см до 4,0 см). Таку рухомість було прийнято відповідно до вимог ДБН В.2.3-4 [7], згідно з

якими при використанні бетоноукладача із ковзною опалубкою ОК суміші має бути від 1,0 см до 5,0 см залежно від швидкості руху бетоноукладача. Склади досліджених бетонів і фібробетонів наведені у **табл. 1**.

Кількість цементу та щебеню на кубічний метр бетону коригувалися при використанні добавки MICROPORAN, що пов'язано із залученням повітря до суміші. Тобто склади бетонів були пропорційно перераховані з врахуванням зростання їх пористості та зниження середньої густини. Кількість піску визначалася також з врахуванням об'єму залученого повітря, а також в врахуванням наявності дисперсної арматури у складі.

Для досліджених бетонних сумішей згідно з методикою ДСТУ Б В.2.7-114 [24] з використанням пороміру UTC-0650 визначалася кількість залученого повітря (**рис. 1**).

Для досліджених бетонів і фібробетонів визначалася їх середня густина (згідно з ДСТУ Б В.2.7-170:2008 [25]), міцність на стиск і на розтяг при згині (згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [26]), стиранність (згідно з ДСТУ Б В.2.7-212:2009) і морозостійкість (за прискореною методикою згідно з ДСТУ Б В.2.7-49-96 [27]).

Рисунок 1 – Визначення кількість залученого повітря з використанням пороміру UTC-0650

Таблиця 1

Склади досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів

Серія складів	№ складу	Цемент, кг/м³	Щебінь, кг/м³	Пісок, кг/м³	STACHEMENT 2570/5/G, кг/м³	BAUCON®-bazalt, кг/м³	MICRO-PORAN, кг/м³	Вода, л/м³
без повітро-втягуючої добавки	1	350	1 205	775	2,10	0	0	135
	2			774		0,50		136
	3			774		0,75		136
	4			774		1,00		136

Кінець таблиці 1

Серія складів	№ складу	Цемент, кг/м³	Щебінь, кг/м³	Пісок, кг/м³	STACHEMENT 2570/5/G, кг/м³	BAUCON®-bazalt, кг/м³	MICRO-PORAN, кг/м³	Вода, л/м³
0,05% повітровтягуючої добавки	5	343	1 185	764	2,05	0	0,171	127
	6			763		0,50		128
	7			763		0,75		128
	8			763		1,00		128
0,15% повітровтягуючої добавки	9	336	1 160	740	2,02	0	0,505	125
	10			739		0,50		126
	11			739		0,75		126
	12			739		1,00		126

Результати досліджень

Виходячи з мети роботи, повітровтягуюча добавка застосовувалася для залучення до суміші додаткового повітря, що має утворити систему замкнутих пор та відповідно підвищити довговічність матеріалу в умовах заморожування і відтавання [3, 5, 6]. На **рис. 2** наведено діаграму, яка відображає експериментально визначений об'єм залученого до бетонних сумішей повітря для досліджених бетонів і фібробетонів.

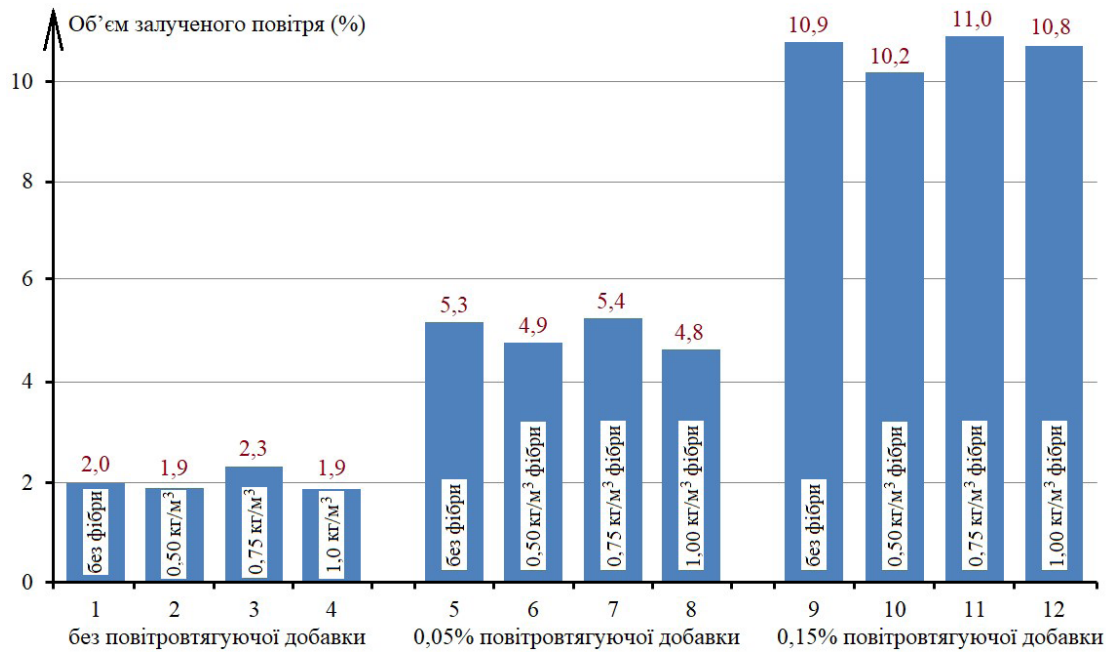


Рисунок 2 – Об'єм залученого до бетонних сумішей повітря

Аналіз діаграми показує, що дисперсне армування базальтовою фіброю майже не впливає на кількість залученого до суміші повітря, але цей показник очікувано змінюється при

використанні повітровтягуючої добавки. В партії бетонів без повітровтягуючої добавки (склади № 1 – № 4) залучення повітря було в межах (1,9 – 2,3) %. При використанні 0,05 % добавки MICROPORAN (склади №5 – №8) – від 4,8 % до 5,4 %. При використанні 0,15 % добавки (склади № 9 – № 12) – від 10,2 % до 11,0 %.

Вміст повітря у бетонній суміші впливав на всі властивості бетону, при цьому найбільш виражено на середню густину матеріалу [6]. Відповідно середня густина досліджених бетонів і фібробетонів залежала переважно від кількості повітровтягуючої добавки, що відображено на наведеній на **рис. 2** діаграмі. Аналіз діаграми показує, що при використанні добавки MICROPORAN у кількості 0,05% від маси цементу середня густина бетонів знижується приблизно на 1,5 % порівняно з бетонами без повітровтягуючої добавки. При використанні MICROPORAN у кількості 0,15 % середня густина бетонів знижується до (2 320 – 2 351) кг/м^3, що приблизно на 4,8 % менше ніж середня густина бетонів без повітровтягуючої добавки.

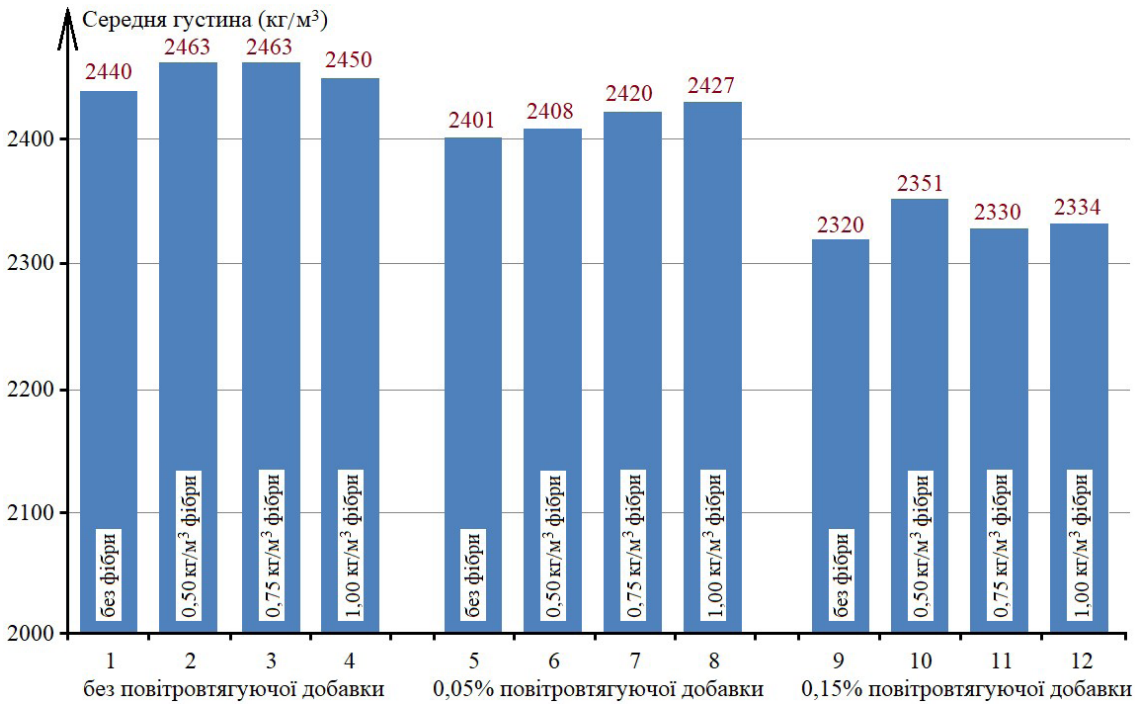
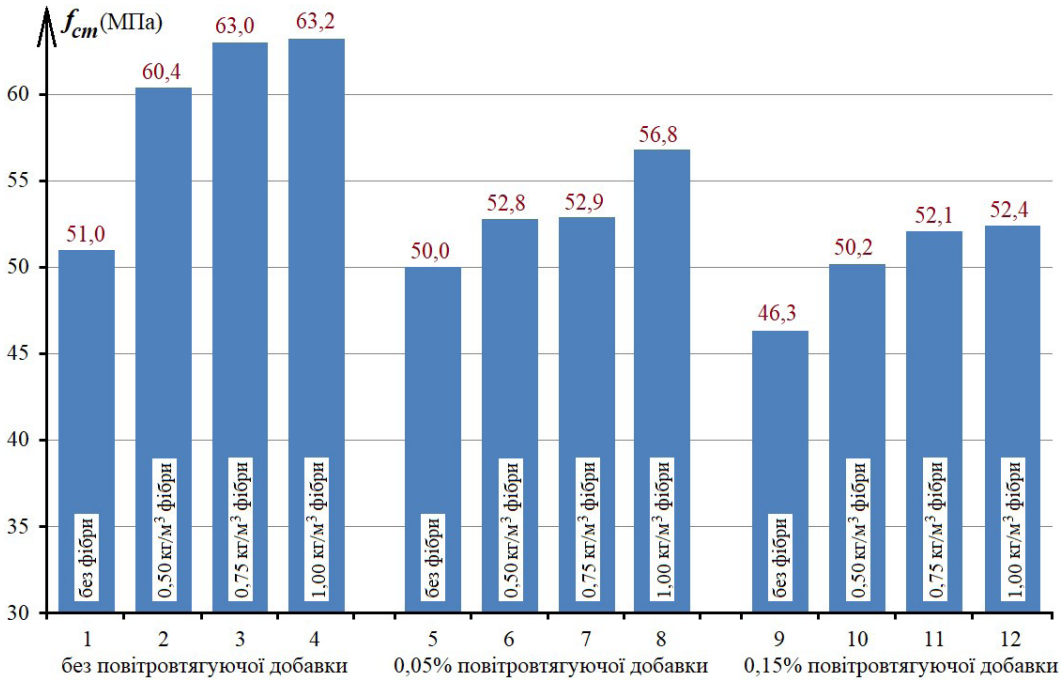


Рисунок 3 – Середня густина досліджених бетонів і фібробетонів

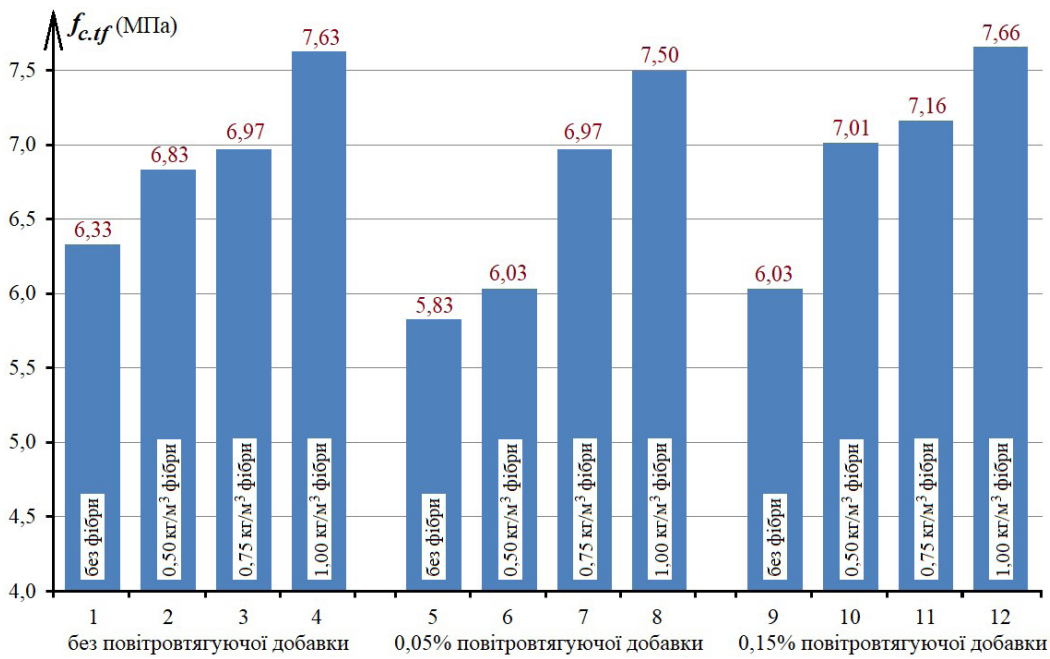
Відомо, що значення об'єму залученого повітря в суміші після приготування і після ущільнення може суттєво відрізнятися [10, 11, 28]. З врахуванням цього можна зробити припущення, що зміна середньої густини бетону відображає зміну фактичної кількості залученого до бетонної суміші повітря. Тобто того повітря, що залишилося в матеріалі після ущільнення суміші. В такому разі при використанні добавки MICROPORAN у кількості 0,15 % фактично до складу бетону залучено додатково об'єм повітря, який є близьким до значення зниження середньої густини матеріалу у відсотках, тобто приблизно 5 %.

Бетони жорстких покриттів автомобільних доріг мають забезпечувати необхідний для заданої категорії рівень міцності [7]. В експерименті контролювалися міцність бетону при стику (**рис. 4**, *а*) та міцність на розтяг при згині (**рис. 4,** *б*).

а



б



а) на стиск;
б) на розтяг при згині.

Рисунок 4 – Міцність досліджених бетонів і фібробетонів

Аналіз наведених діаграм показує, що на міцність бетону суттєво впливає як введення базальтової фібри так застосування повітровтягуючої добавки. За рахунок дисперсного армування

Збірник наукових праць «ДОРОГИ І МОСТИ» www.dorogimosti.org.ua
ISSN 2524-0994 (Print), ISSN 2786-488X (Online). Dorogi i mosti, 2023. Issue 28

у кількості (0,75 – 1,00) кг/м^3 міцність на стиск бетонів без добавки MICROPORAN зростає на величину до 12,2 МПа, що дорівнює 24 % (**рис. 4**, *а*). Введення аналогічної кількості фібри у бетони з вмістом добавки MICROPORAN 0,05 % підвищує міцність на стиск на величину до 6,8 МПа (на 14 %). Для бетонів з 0,15 % добавки MICROPORAN дисперсне армування підвищує міцність на стиск на величину до 6,1 МПа (на 13 %).

Проте як відомо, для дорожніх покриттів міцність на розтяг при згині є більш важливим показником, ніж міцність на стиск. На цей показник одночасно з модулем пружності бетону спирається розрахунок конструкції доріг з жорстким покриттям [2, 29].

Як видно з діаграми на **рис. 4**, *б*, дисперсне армування оказує на міцність на розтяг при згині більш відчутний позитивний вплив, ніж на міцність на стиск. При введенні базальтового волокна у кількості 1 кг/м^3 для бетонів без добавки MICROPORAN величина $f_{c.tf}$ зростає на 1,3 МПа, тобто на 21 %. Для бетонів з 0,05 % MICROPORAN введення аналогічної кількості фібри підвищує міцність на розтяг при згині на 1,7 МПа (29 %), для бетонів з 0,15 % MICROPORAN – на 1,6 МПа, що дорівнює 27 %.

Введення повітровтягуючої добавки викликає зниження міцності бетону на стиск (**рис. 4**, *а*). При використанні MICROPORAN у кількості 0,05 % від маси цементу міцність знижується на (2 – 16) %. При використанні 0,15 % MICROPORAN зниження міцності на стиск складає від 9 % до 21 %. Даний ефект є очікуваним і широко відомим та пояснюється насамперед зниженням середньої густини бетону [4, 6, 11, 30]. Залучене повітря утворює додаткові пори, які впливають на побудову матриці композиційного матеріалу. Також залежно від методу розрахунку складу це може викликати фактичне зменшення витрати цементу на 1 м^3 бетону, яке відбувається виходячи з витрати компонентів на однаковий об'єм бетону.

Проте введення добавки MICROPORAN майже не впливає на міцність на розтяг бетону незважаючи на зміну його середньої густину та деяке фактичне зменшення кількості в'яжучого в складі. Як видно з діаграми на **рис. 4**, *б*, при однаковій кількості фібри міцність на розтяг при згині бетонів без повітровтягуючої добавки та з 0,05 % або 0,15 % добавки MICROPORAN є приблизно рівною. Тобто використання повітровтягуючої добавки дозволяє отримати бетон з необхідним рівнем міцність на розтяг при забезпеченій довговічності та фактично меншій витраті в'яжучого. При цьому як показано вище дисперсне армування дозволяє додатково підвищити міцність бетону дорожнього покриття на розтяг при згині та на стиск.

Відомо, що для дорожніх покриттів важливим показником якості є зносостійкість. Вона визначається за рівнем стиранності матеріалу і в значній мірі обумовлює довговічність бетону в умовах динамічних впливів [8, 13]. На **рис. 5** наведено діаграму, що відображає вплив кількості фібри і повітровтягуючої добавки на стиранність досліджених бетонів і фібробетонів.

Аналіз діаграми дозволяє відзначити, що при застосуванні добавки MICROPORAN стиранність бетону підвищується на (2 – 7) %, тобто зносостійкість матеріалу несуттєво зніжується. Цей ефект пояснюється зменшенням середньої густини та відповідно міцності бетону, що впливає на стійкість до руйнування окремих блоків структури при стиранні поверхні зразків.

При цьому дисперсне армування позитивно впливає на зносостійкість бетону. За рахунок введення базальтової фібри стиранність бетону знижується на (14 – 15) %, що відповідно сприяє підвищенню довговічності жорсткого дорожнього покриття. Даний ефект пояснюється здатністю дисперсної арматуру утримувати окремі блоки композиційного матеріалу при динамічних впливах, що широко описано в багатьох дослідженнях [3, 12, 31].

Як показано вище, морозостійкість бетону є одним з основних фізико-механічних показників, обумовлюючих довговічність жорстких дорожніх покриттів в типових для України кліматичних умовах. Визначені показники морозостійкості досліджених бетонів і фібробетонів наведені у **табл. 2**.

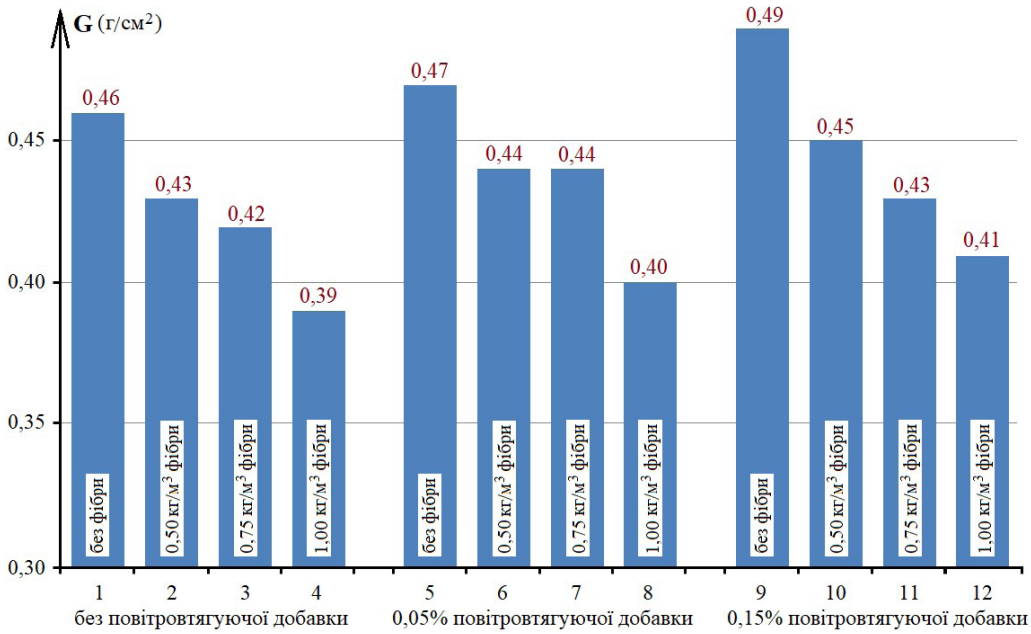


Рисунок 5 – Стиранність досліджених бетонів і фібробетонів

Таблиця 2

Морозостійкість досліджених бетонів і фібробетонів жорстких дорожніх покриттів

Серія складів	без повітровтягуючої добавки				0,05 % повітровтягуючої добавки				0,15 % повітровтягуючої добавки			
№ складу	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
морозостійкість	F200	F300	F300	F300	F200	F200	F200	F300	F300	F300	F300	F300

Аналіз наведених у **табл. 2** даних показує, що морозостійкість всіх складів була забезпечена на високому рівні – від F200 до F300. Досягти цього рівня морозостійкості дозволило використання портландцементу ПЦ І-500Р-Н, ефективного суперпластифікатора STACHEMENT 2570/5/G та якісних митих заповнювачів. За рахунок використання таких компонентів В/Ц сумішей було в діапазоні від 0,37 до 0,39.

Необхідно зауважити, що точність визначення фактичного рівня морозостійкості бетонів і фібробетонів дорожніх покриттів була суттєво обмеженою. Це пов'язано з тим, що найбільш точні методи визначення морозостійкості бетонів вимагають надто багато часу для проведення експериментального дослідження та є трудомісткими. Відповідно в даній роботі як і в більшості практичних випадків використовувався прискорений (третій) метод визначення рівня F згідно з ДСТУ Б В.2.7-49, а саме метод при заморожуванні та відтаванні у соленій воді при температури заморожування мінус 50 °С [27]. Проте даний прискорений метод визначення морозостійкості розрізняє для бетонів дорожніх і аеродромних покриттів тільки марки F100, F150, F200, F300 і так далі. Ця дискретність не заважає оцінити загальний вплив від застосування дисперсної арматури і повітровтягуючої добавки на морозостійкість бетону, але не дозволяє визначити марку за морозостійкістю в діапазоні між F200 і F300.

Відповідно за даними **табл. 2** можна зробити висновок, що застосування базальтової фібри позитивно впливає на морозостійкість бетону. Склад №1 без дисперсного армування мав морозостійкість F200, а при застосуванні фібри незалежно від її кількості (склади № 2-4) рівень морозостійкості фібробетонів складав F300.

При використанні фібри одночасно з повітровтягуючої добавкою ефективність дисперсного армування в підвищенні рівня F є меншою. Позитивний вплив фібри при її одночасному використанні з MICROPORAN виявлено тільки для складу № 8. У даному складі фібробетону за рахунок використання 1 кг/м^3 дисперсної арматури морозостійкість зростає в порівнянні з бетонами складу № 5 і фібробетонами складів № 6 і № 7. Це можна пояснити тим, що капілярно-порова структура має більший вплив на стійкість бетону до заморожування та відтавання, ніж дисперсне армування [9].

Відповідно до цього вплив повітровтягуючої добавки на морозостійкість бетону суттєво змінюється залежно від її кількості у складі. При використанні добавки MICROPORAN у кількості 0,05 % від маси цементу морозостійкість бетонів і фібробетонів знижується до F200 при кількості фібри до 0,75 кг/м^3 (склади № 5-7). Але при підвищенні кількості добавки MICROPORAN до 0,15 % морозостійкість бетону зростає до рівня F300, при цьому важлива відзначити, бетон без фібри, тобто склад № 9, також має морозостійкість F300. Це свідчить про те, що бетони з раціональною кількістю добавки MICROPORAN забезпечують високу морозостійкість за фактично меншій кількості цементу на 1 м^3 бетону. Ефект позитивного впливу саме такої кількості повітровтягуючої добавки (0,15 % від маси цементу) можна пояснити тим, що фактичний об’єм залученого до бетону повітря безпосередньо після приготування суміші та після її ущільнення суттєво відрізняється, при цьому цю різницю важко прорахувати [8, 10, 11, 28]. Відповідно як обґрунтовано вище, для складів № 9-12 фактичний об’єм залученого повітря у даному випадку становив (5 – 7) %, що є близьким до раціонального [3, 4, 7, 11] та позитивно вливає на морозостійкість досліджених бетонів і фібробетонів.

Висновки

У результаті виконаних досліджень встановлено, що дисперсне армування базальтовою фіброю оказує комплексний позитивний вплив на міцність і довговічність бетону дорожнього покриття. При використанні волокна BAUCON®-bazalt у кількості до 1 кг/м^3 міцність бетону на стиск підвищується на (13 – 24) %, міцність на розтяг при згині зростає на (21 – 29) %, морозостійкість підвищується на рівень до 100 циклів. Одночасно з цім стиранність бетону знижується на (14 – 15) %, тобто зростає його зносостійкість.

За рахунок введення повітровтягуючої добавки MICROPORAN середня густина досліджених бетонів і фібробетонів зменшується на (1,9 – 5,4) %. За рахунок цього міцність на стиск бетонів знижується на (2 – 21) %, також несуттєво знижується їх зносостійкість (підвищується стиранність). При використанні повітровтягуючої добавки у кількості 0,05 % від маси цементу морозостійкість бетону не змінюється або навіть дещо знижується. При використанні добавки MICROPORAN у кількості 0,15 % для бетону без дисперсного армування марка за морозостійкістю підвищується від F200 до F300.

В цілому можна констатувати, що за рахунок використання дисперсного армування базальтовим волокном з довжиною волокон 12 мм і діаметром 18 мкм, а також комплексного модифікування бетону ефективним суперпластифікатором полікарбоксилатного типу STACHEMENT 2570/5/G та повітровтягуючою добавкою MICROPORAN отримано фібробетон жорсткого дорожнього покриття з підвищеною довговічністю при збереженні необхідного рівня міцності. Застосування такого модифікованого фібробетону можна визнати економічно вигідним, тому що при незначному збільшенні собівартості матеріалу підвищується його довговічність і відповідно знижуються витрати на утримання та проведення ремонтів жорстких дорожніх покриттів. Окрема слід наголосити, що в даному дослідженні при розробці складів бетонів і фібробетонів використовувалися лише вітчизняні компоненти (в’яжуче, заповнювачі, модифікатори і фібра). Це важливо з економічної точки зору, особливо з врахуванням значних обсягів дорожніх робіт у процесі післявоєнного відновлення нашої країни.

Список літератури

1. Hoxha E., Vignisdottir H.R., Barbieri D.M., Wang F., Bohne R.A., Kristensen T., Passer A. Life cycle assessment of roads: Exploring research trends and harmonization challenges. *Science of the total environment.* 2021, 759, 143506. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143506.
2. ГБН В.2.3-37641918-557:2016. Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування. Київ, 2017. 75 с. (Інформація та документація).
3. Толмачев С.Н., Солодкий С.Й. Факторы обеспечения долговечности дорожного цементного бетона. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2013. 52. С. 275–280.
4. Толмачев С.Н., Беличенко Е.А., Бражник А.В. Способы защиты дорожных бетонов при действии агрессивных факторов. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. 62. С. 176–181.
5. Ziari H., Hayati P., Sobhani J. Air-entrained air field self-consolidating concrete pavements: strength and durability. *International Journal of Civil Engineering*. 2017. 15. P. 21–33 DOI: https://doi.org/10.1007/s40999-016-0104-4.
6. Толмачов С.М. Особливості повітроутягнення у дорожні бетони та фібробетони. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2017. Вип. 99. С. 67–76. URL: http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/99/067-076.pdf (дата звернення: 13.09.2023).
7. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Київ, 2016. 104 с. (Інформація та документація).
8. Толмачев С.Н., Беличенко Е.А. Влияние вовлеченного воздуха на свойства дорожных бетонов и фибробетонов. *Строительные материалы*. 2017. № 1-2. С. 68–72.
9. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Проектування складів бетонів. Рівне: НУВГП, 2015. 353 с. URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/3150/1/Документ5.pdf (дата звернення: 13.09.2023).
10. Lai Y., Liu Y., Wang P., Ma D.X., Guo B., Sun K., Hou S. Effect of aircraft deicer on deicer-scaling resistance and frost resistance of airport pavement concrete. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1605, 012178. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1605/1/012178.
11. Pham L.T., Cramer S.M. Effects of air-entraining admixtures on stability of air bubbles in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2021. Vol. 33, Issue 4. 04021018. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003628.
12. Wu H., Qin X., Huang X., Kaewunruen S. Engineering, mechanical and dynamic properties of basalt fiber reinforced concrete. *Materials*. 2023. 16, 623. DOI: https://doi.org/10.3390/ma16020623.
13. Kos Z., Kroviakov S., Kryzhanovskyi V., Hedulian D. Strength, frost resistance, and resistance to acid attacks on fiber-reinforced concrete for industrial floors and road pavements with steel and polypropylene fibers. *Materials*. 2022. 15 (23), 8339. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15238339.
14. Vaitkus A., Gražulytė J., Šernas O., Karbočius M., Mickevič R. Concrete modular pavement structures with optimized thickness based on characteristics of high performance concrete mixtures with fibers and silica fume. *Materials*. 2021. 14 (12), 3423. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14123423.
15. Jin Sj., Yang Yh., Sun Ym, Li X., Xu Jy. Experimental research on anti-freezing and thawing performance of basalt fiber reinforced fly ash concrete in the corrosive conditions. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2023. 27. P. 3455–3470. DOI: https://doi.org/10.1007/s12205-023-1969-9.
16. Марущак У.Д., Саницький М.А., Королько С.В. Наномодифіковані швидкотверднучі бетони, армовані дисперсними волокнами. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Серія: Теорія і практика будівництва.* 2017. 877. С. 137–143.
17. Kaya Y., Biricik Ö., Bayqra S.H., Mardani A. Effect of fibre type and utilisation rate on dimensional stability and frost resistance of pavement mortar mixture. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023. 24 (1), 2154351. DOI: https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2154351.

18. Lyu Z., Shen A., Meng W. Properties, mechanism, and optimization of superabsorbent polymers and basalt fibers modified cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 2021. 276, 122212. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122212.

19. Sarkar A., Hajihosseini M. The effect of basalt fibre on the mechanical performance of concrete pavement. *Road Materials and Pavement Design*. 2018. 21 (6). P. 1726–1737. DOI: https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1561379.

20. Iyer P., Kenno S.Y., Das S. Mechanical properties of fiber-reinforced concrete made with basalt filament fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015. 27 (11), 04015015. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001272.

21. ПРАТ «Дікергофф Цемент Україна». Портландцемент ПЦ І-500Р-Н. URL: https://www.dyckerhoff.com.ua/pc-i-500 (дата звернення 11.08.2023).

22. ТОВ «Стахема ЛЬВІВ-СЕРВІС». URL: https://stachema.ua (дата звернення 11.08.2023).

23. ТОВ «Баутех-Україна». BAUCON® Basalt. URL: https://bautech.com.ua/product/baucon-basalt (дата звернення 11.08.2023).

24. ДСТУ Б В.2.7-114-2002 Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань. Київ, 2002. 32 с. (Інформація та документація).

25. ДСТУ Б В.2.7-170:2008 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. Київ, 2008. 38 с. (Інформація та документація).

26. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Київ, 2010. 43 с. (Інформація та документація).

27. ДСТУ Б В.2.7-49-96 Будівельні матеріали. Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні. Київ, 1996. 9 с. (Інформація та документація).

28. Du L., Folliard K.J. Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and Concrete Research*, 2005. 35 (8). P. 1463–1471. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.026.

29. Hussain I., Ali B., Akhtar T., Jameel M.S., Raza S.S. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). *Case Studies in Construction Materials,* 2020. 13, e00429. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429.

30. Tolegenova A., Skripkiunas G., Rishko L., Akmalaiuly K. Both plasticizing and air-entraining effect on cement-based material porosity and durability. *Materials*, 2022. 15, 4382. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15134382.

31. Kos Ž., Kroviakov S., Kryzhanovskyi V., Grynyova I. Research of strength, frost resistance, abrasion resistance and shrinkage of steel fiber concrete for rigid highways and airfields pavement repair. *Applied Sciences*. 12(3), 1174. DOI: https://doi.org/10.3390/app12031174.

References

1. Hoxha E., Vignisdottir H.R., Barbieri D.M., Wang F., Bohne R.A., Kristensen T., Passer A. Life cycle assessment of roads: Exploring research trends and harmonization challenges. *Science of the total environment.* 2021, 759, 143506. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143506 [in English].

2. HBN V.2.3-37641918-557:2016. Avtomobilni dorohy. Dorozhniy odyah zhorstkyy. Proektuvannya [Automobile roads. Hard pavement. Designing]. Kyiv, 2016. 75 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

3. Tolmachev S.N., Solodkyy S.Y. Faktory obespechenyya dolhovechnosty dorozhnoho tsementnoho betona [Factors to ensure the durability of road cement concrete]. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2013. 52. P. 275–280 [in Russian].

4. Tolmachev S.N., Belichenko E.A., Brazhnik A.V. Sposoby zashchyty dorozhnykh betonov pry deystvyy ahressyvnykh faktorov [Ways to protect road concrete under the action of aggressive factors]. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2016. 62. P. 176–181 [in Russian].

5. Ziari H., Hayati P., Sobhani J. Air-entrained air field self-consolidating concrete pavements: strength and durability. *International Journal of Civil Engineering*. 2017. 15. P. 21–33 DOI: https://doi.org/10.1007/s40999-016-0104-4 [in English].

6. Tolmachov S.M. Osoblyvosti povitroutyahnennya u dorozhni betony ta fibrobetony. [Features of air entrainment in road concrete and fiber concrete]. *Avtomobil'ni dorohy i dorozhnye budivnytstvo*. 2017. 99. P. 67–76 http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/99/067-076.pdf [in Ukrainian].

7. DBN V.2.3-4:2015 Avtomobilni dorohy. Chastyna I. Proektuvannia. Chastyna II. Budivnytstvo [State Building Norms (DBN V.2.3-4:2015) Highways. Part I. Design. Part II. Building]. Kyiv, 2016. 104 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

8. Tolmachev S.N., Belichenko Ye.A. Vliyaniye vovlechennogo vozdukha na svoystva dorozhnykh betonov i fibrobetonov (The effect of entrained air on the properties of road concrete and fiber-reinforced concrete). *Stroitel'nyye materialy*. 2017. № 1-2. P. 68–72 [in Russian].

9. Dvorkin L.Y., Dvorkin O.L. Proektuvannya skladiv betoniv [Design of concrete compositions]. Rivne: NUVHP, 2015. 353 p. URL: https://ep3.nuwm.edu.ua/3150/1/Документ5.pdf (Last accessed: 13.09.2023) [in Ukrainian].

10. Lai Y., Liu Y., Wang P., Ma D.X., Guo B., Sun K., Hou S. Effect of aircraft deicer on deicer-scaling resistance and frost resistance of airport pavement concrete. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1605, 012178. DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1605/1/012178 [in English].

11. Pham L.T., Cramer S.M. Effects of air-entraining admixtures on stability of air bubbles in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2021. Vol. 33, Issue 4. 04021018. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003628 [in English].

12. Wu H., Qin X., Huang X., Kaewunruen S. Engineering, mechanical and dynamic properties of basalt fiber reinforced concrete. *Materials*. 2023. 16, 623. DOI: https://doi.org/10.3390/ma16020623 [in English].

13. Kos Z., Kroviakov S., Kryzhanovskyi V., Hedulian D. Strength, frost resistance, and resistance to acid attacks on fiber-reinforced concrete for industrial floors and road pavements with steel and polypropylene fibers. *Materials*. 2022. 15 (23), 8339. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15238339 [in English].

14. Vaitkus A., Gražulytė J., Šernas O., Karbočius M., Mickevič R. Concrete modular pavement structures with optimized thickness based on characteristics of high performance concrete mixtures with fibers and silica fume. *Materials*. 2021. 14 (12), 3423. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14123423 [in English].

15. Jin Sj., Yang Yh., Sun Ym, Li X., Xu Jy. Experimental research on anti-freezing and thawing performance of basalt fiber reinforced fly ash concrete in the corrosive conditions. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2023. 27. P. 3455–3470. DOI: https://doi.org/10.1007/s12205-023-1969-9 [in English].

16. Marushchak U.D., Sanytskyy M.A., Korolko S.V. Nanomodyfikovani shvydkotverdnuchi betony, armovani dyspersnymy voloknamy [Nanomodified quick-hardening concrete reinforced with dispersed fibers]. *Visnyk NU "Lvivs'ka politekhnika". Seriya: Teoriya i praktyka budivnytstva*. 2017. 877. P. 137–143 [in Ukrainian].

17. Kaya Y., Biricik Ö., Bayqra S.H., Mardani A. Effect of fibre type and utilisation rate on dimensional stability and frost resistance of pavement mortar mixture. *International Journal of Pavement Engineering*. 2023. 24 (1), 2154351. DOI: https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2154351 [in English].

18. Lyu Z., Shen A., Meng W. Properties, mechanism, and optimization of superabsorbent polymers and basalt fibers modified cementitious composite. *Construction and Building Materials*, 2021. 276, 122212. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122212 [in English].

19. Sarkar A., Hajihosseini M. The effect of basalt fibre on the mechanical performance of concrete pavement. *Road Materials and Pavement Design*. 2018. 21 (6). P. 1726–1737. DOI: https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1561379 [in English].

20. Iyer P., Kenno S.Y., Das S. Mechanical properties of fiber-reinforced concrete made with basalt filament fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015. 27 (11), 04015015. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001272 [in English].

21. PJSC Dickerhoff Cement Ukraine. Portland cement PC I-500R-N. URL: https://www.dyckerhoff.com.ua/pc-i-500 (Last accessed: 11.08.2023) [in Ukrainian].

22. Stachema LVIV-SERVICE LLC. URL: https://stachema.ua (Last accessed: 11.08.2023) [in English].

23. Bautech-Ukraine LLC. BAUCON® Basalt. URL: https://bautech.com.ua/product/baucon-basalt (Last accessed: 11.08.2023) [in English].

24. DSTU B V.2.7-114-2002 Budivelni materialy. Sumishi betonni. Metody vyprobuvan [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-114-2002) Building materials. Concrete mixes. Test methods]. Kyiv, 2002. 32 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

25. DSTU B V.2.7-170:2008 Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennya serednoyi hustyny, volohosti, vodopohlynannya, porystosti i vodonepronyknosti [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-170:2008) Building materials. Concretes. Methods of determination of middle density, moisture content, water absorptions porosity and watertightness]. Kyiv, 2008. 38 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

26. DSTU B V.2.7-214:2009 Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennya mitsnosti za kontrolnymy zrazkamy [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-214:2009) Building materials. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens]. Kyiv, 2010. 43 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

27. DSTU B V.2.7-49-96. Budivelni materialy. Betony. Pryskoreni metody vyznachennya morozostiykosti pry bahatorazovomu zamorozhuvanni ta vidtavanni [State Standard of Ukraine (DSTU B V.2.7-49-96) Building materials. Concretes. Rapid methods for determination of frost resistance by repeated alterneted freezing and thawing]. Kyiv, 1996. 9 p. (Information and documentation) [in Ukrainian].

28. Du L., Folliard K.J. Mechanisms of air entrainment in concrete. *Cement and Concrete Research*, 2005. 35 (8). P. 1463–1471. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.026 [in English].

29. Hussain I., Ali B., Akhtar T., Jameel M.S., Raza S.S. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). *Case Studies in Construction Materials,* 2020. 13, e00429. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00429 [in English].

30. Tolegenova A., Skripkiunas G., Rishko L., Akmalaiuly K. Both plasticizing and air-entraining effect on cement-based material porosity and durability. *Materials*, 2022. 15, 4382. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15134382 [in English].

31. Kos Ž., Kroviakov S., Kryzhanovskyi V., Grynyova I. Research of strength, frost resistance, abrasion resistance and shrinkage of steel fiber concrete for rigid highways and airfields pavement repair. *Applied Sciences*. 12(3), 1174. DOI: https://doi.org/10.3390/app12031174 [in English].

Sergii Kroviakov, *D.Sc., Prof., http://orcid.org/0000-0002-0800-0123*
Lyubov Shestakova, *https://orcid.org/0000-0002-3449-8498*
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine

STRENGTH, ABRASION RESISTANCE AND FROST RESISTANCE OF FIBER CONCRETE OF HARD PAVEMENT WITH BASALT FIBER AND AIR-ENTRAINING ADMIXTURE

Abstract

Introduction. Increasing the durability of hard pavements allows you to reduce road maintenance costs by extending the intervals between repairs. Dispersed reinforcement is a well-known method of increasing the frost resistance and abrasion resistance of concrete, which has a positive effect on the durability of pavements in typical for Ukraine climatic conditions. Basalt fiber is resistant to corrosion and relatively inexpensive, which makes it promising for use in the road industry. Also, plasticizing and air-entraining admixtures must be used for concrete of hard pavement.

Problem Statement. In modern economic conditions and taking into account the technological features of the preparation of mixtures, it is relevant to compare the effectiveness of the use of known methods of improving the properties of concrete for hard pavements: dispersed reinforcement and the use of air-entraining admixtures. Studying the expediency of the simultaneous use of these two methods of modifying the concrete mixture is also an important task from a scientific and practical point of view.

Purpose. Determination of the influence of basalt fiber and air-entraining admixture on the strength, frost resistance and abrasion resistance of concrete of hard pavements.

Results. The effect of basalt fiber with a length of 12 mm and a diameter of 18 μm and air-entraining admixture MICROPORAN on the properties of concretes of hard pavements was investigated. Concretes without fiber and with fiber in the amount of 0.50 kg/m^3, 0.75 kg/m^3 and 1.0 kg/m^3 were investigated. All mixtures had S1 mobility and were modified with superplasticizer STACHEMENT 2570/5/G in the amount of 0.6 % of the cement mass. Using 0.05% MICROPORAN the amount of air entrained in the mixture increases to (4.8–5.4) %, and the average density of concrete decreases by up to (2 401–2 430) kg/m^3. Using 0.15 % MICROPORAN 10.2-11% of air is entrained in the mixture and the average density of concrete is reduced to approximately (2 320–2 351) kg/m^3. The compressive strength of concrete was in the range from 46.3 MPa to 63.2 MPa, the flexural strength was in the range from 5.83 MPa to 7.63 MPa. Due to the dispersed reinforcement, the compressive strength of concrete increases by 13-24 %, the flexural strength increases by (21–29) %. The air-entraining admixture has practically no effect on the flexural strength of concrete, but reduces the compressive strength by (2–16) % using 0.05 % MICROPORAN and by (9–21) % using 0.15 % MICROPORAN. The abrasion of concrete practically does not change using an air-entraining admixture. Due to the introduction of basalt fiber, abrasion is reduced by (14–15) %, which helps to increase the durability of the material. Concrete without dispersed reinforcement and MICROPORAN had frost resistance F200. Dispersed reinforcement increases the frost resistance of concrete up to F300. Using 0.05 % air-entraining admixture, the frost resistance of concrete does not change or even slightly decreases. Using 0.15 % additive in concrete without fibers, frost resistance increases from F200 to F300 with an actual decrease in cement consumption.

Conclusions. Concrete for hard pavements with high durability and required strength was obtained due to the use of basalt fiber and complex modification with polycarboxylate superplasticizer and air-entraining admixture MICROPORAN.

Keywords: basalt fiber, air-entraining admixture, hard pavement, strength, frost resistance, abrasion resistance.